

中低产田耕地产能提升：生物炭的潜力与挑战

李琦¹, 裴怀弟^{1*}, 王立光¹, 李淑洁¹, 张敏敏¹, 张朝巍¹, 李彤²,
杨钊³, 欧巧明¹, 叶春雷¹

(1 甘肃省农业科学院生物技术研究所, 甘肃兰州 730070; 2 兰州财经大学农林经济管理学院, 甘肃兰州 730100;
3 甘肃省农业科学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 针对我国中低产田占比高 (68.76%)、土壤退化制约粮食安全的问题, 以及改良过程中对关键技术的需求, 本研究通过整合生物炭制备工艺、理化特性及其与土壤-微生物互作关系的文献数据和试验验证, 系统探讨生物炭在耕地质量提升中的潜力与作用机制。从以下 4 个方面进行系统分析: 1) 不同原料 (稻壳、秸秆、柚子皮等农林废弃物) 和热解温度 (300℃~500℃) 下制备的生物炭的理化特性 (微孔结构、表面官能团); 2) 我国中低产田主要类型, 及其障碍因子与改良措施; 3) 生物炭对中低产田多维度调控效应, 包括土壤养分、土壤结构、土壤微生物、土壤气体等; 4) 生物炭在应用实施中的潜在风险。分析结果显示: 1) 生物炭发达的孔隙结构 (比表面积达 1059.85 m²/g) 与表面官能团 (羟基、羧基等) 通过物理吸附与化学络合作用, 可显著改善土壤结构 (容重降低 11.6%~18.2%), 并提升持水能力 (田间持水量增加 15%~30%), 且原材料含碳量越高, 改善效果越明显; 2) 生物炭通过调节土壤碳氮比 (提升至 56.4~94.3) 与 pH 值 (如酸性土壤改良至中性), 可激活有益微生物 (如鞘氨醇菌属丰度提高 20%~40%), 抑制病原菌 (如镰刀菌属丰度下降 14%~32%), 从而重构土壤微生态环境, 在连作农田的改良效果尤为显著; 3) 生物炭的碳封存效应可减少农田碳排放 (CH₄ 排放降低 16.8%~32.9%, N₂O 排放减少 22%~47%), 并协同提升土壤有机碳储量 (增幅达 64.3%), 且长期施用 (3 年以上) 效果更稳定。生物炭通过“土壤结构改良-微生物群落优化-碳氮循环调控”三重机制, 实现中低产田产能提升与生态效益协同, 为我国耕地保护与碳中和目标提供了创新解决方案。未来, 需要重点关注生物炭长期施用的生态风险 (如重金属富集、毒性物质挥发等) 及标准化应用体系构建。

关键词: 中低产田; 生物炭; 土壤改良; 碳封存; 温室气体; 微生物群落

Enhancing the productivity of medium-and low-yield croplands: Potential and challenges of biochar

LI Qi¹, PEI Huai-di^{1*}, WANG Li-guang¹, LI Shu-jie¹, ZHANG Min-min¹, ZHANG Chao-wei¹, LI Tong²,
YANG Zhao³, OU Qiao-ming¹, YE Chun-lei¹

(1 Institute of Biotechnology, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2 School of Agriculture and Forestry Economics and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou, Gansu 730100, China;
3 Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Addressing the critical challenge of widespread low- and medium-yielding croplands in China (accounting for 68.76 percent of total arable land) and soil degradation threatening food security, this study systematically investigates the potential and mechanisms of biochar in improving cultivated land quality. This is achieved by integrating literature data on biochar production techniques, physicochemical properties, and its interactions within the soil-microbe system, supplemented by experimental validation. The systematic analysis encompasses: 1) Physicochemical characteristics (microporous structure, surface functional groups) of biochar

收稿日期: 2025-06-04 接受日期: 2025-11-28

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-21, GARS-14); 甘肃省农业科学院 2022 年中青年基金项目 (2022GAAS58); 甘肃省科技厅省级生态文明建设重点研发专项 (25YFFA009); 甘肃省现代寒旱特色农业产业技术体系项目 (CSARS09)。

联系方式: 李琦 E-mail: 799960586@qq.com; * 通信作者 裴怀弟 E-mail: phdfeixiang@163.com

derived from diverse feedstocks (e.g., rice husk, straw, pomelo peel) at pyrolysis temperatures ranging from 300°C to 500°C; 2) Major types of low- and medium-yielding soils in China and ameliorative measures targeting specific constraints; 3) Multidimensional regulatory effects of biochar on these soils, including soil nutrients, structure, microbial communities, and soil gases; 4) Potential risks associated with biochar application. Key findings reveal that: 1) Biochar's pore structure (specific surface area up to 1059.85 m²/g) and surface functional groups (e.g., hydroxyl, carbonyl) significantly enhance soil structure (reducing bulk density by 11.6% to 18.2%) and water retention capacity (increasing field capacity by 15% to 30%) through physical adsorption and chemical complexation, with effects being more pronounced for biochar derived from higher carbon-content feedstocks. 2) By adjusting soil C/N ratios (increasing to 56.4–94.3) and pH (ameliorating acidic soils towards neutrality), biochar activates beneficial microorganisms (e.g., increasing the relative abundance of *Sphingomonas* by 20% to 40%) while suppressing pathogens (e.g., decreasing *Fusarium* abundance by 14% to 32%), thereby restructuring the soil microbiome. This effect is particularly significant in continuously cropped fields. 3) Biochar contributes to carbon sequestration, reducing agricultural greenhouse gas emissions (CH₄ by 16.8% to 32.9%; N₂O by 22% to 47%) while synergistically increasing soil organic carbon stocks (by up to 64.3%). Long-term application (over 3 years) yields more stable benefits. This research demonstrates that biochar operates through a tripartite mechanism—"soil structure improvement–microbial community optimization–carbon and nitrogen cycle regulation"—effectively enhancing the productivity of low- and medium-yielding croplands while delivering ecological benefits. It thus offers an innovative solution supporting China's goals for cultivated land protection and carbon neutrality. Future research should prioritize investigating long-term ecological risks (e.g., heavy metal accumulation, volatilization of toxic substances) and establishing standardized application protocols.

Keywords: medium-and low-yield farm land; biochar; soil reclamation; carbon sequestration; greenhouse gases; microbial communities

当前,我国耕地质量面临严峻挑战,主要表现为基础地力下降、有机质含量降低、水土流失、耕层变浅,以及酸化、盐碱化和污染加剧等。具体而言,主要存在6大区域性问題:东北黑土地退化、北方旱地干旱贫瘠化、南方旱地酸化与贫瘠化、南方水田低产障碍、盐碱耕地受水资源限制,以及设施农业污染加剧。根据2020年完成的第三次全国国土调查结果,截至2019年底,全国耕地总面积为1.279亿hm²(19.18亿亩)^[1]。2014年农业农村部发布的《全国耕地质量等级情况公报》^[2]显示,全国耕地平均质量等级为9.97等,中低质量耕地(4~10等地)面积占比高达72.7%,中低产田规模巨大。后续发布的2019年和2022年《全国耕地质量等级情况公报》^[3-4]显示,我国耕地质量呈现稳步提升态势。到2021年末,全国耕地平均等级已提升至4.58等,中低质量耕地占比下降至约67.1%。其中,酸性(pH值小于6.5)耕地面积约0.6127亿hm²(9.19亿亩),强酸性(pH值小于5.5)耕地面积占0.174亿hm²(2.61亿亩)^[5]。因此,中低产田(尤其是7~10等低产田)改造提升工程,在现阶段乃至未来较长时期内,仍是保障我国粮油等重要农产品供给的全局性重大

战略事项。这部分耕地面积大、等级偏低,蕴藏着巨大的产能提升潜力,是挖掘粮食增产潜力最切实可行、最有效的途径,亟需通过科技和政策手段进一步挖掘其潜力。

过去40年间,我国在中低产田改良、耕地质量评价和作物产能提升等方面取得了许多重要成果,如盐碱地改良、污染土壤修复、沙化土地生态恢复等。这得益于众多学者对农田土壤碳汇、土壤养分循环及功能性土壤微生物筛选和应用等领域的持续深入研究。当前,我国推动农田土壤改良及产能提升的主要技术路径包括高标准农田建设、种植制度与模式优化,及土壤改良与质量提升等。其中,高标准农田建设主要针对不同地区的干旱缺水、土壤盐渍化、肥力低下、沙化等多种障碍因素,因地制宜通过工程措施,实现田块平整、集中连片、满足机械化作业要求,以加快农业现代化水平,增加农民收入,实现粮食稳定高产,确保粮食安全。有学者认为,高标准农田建设是提升耕地质量的基础,是实现农业可持续发展与耕地保护的基础,在落实“藏粮于地”战略、保障粮食安全方面,具有重要意义^[6]。种植制度与模式优化通过作物配置(如轮作、

连作)、水肥管理(如滴灌灌溉)和地表覆盖(如秸秆还田、地膜覆盖)等管理措施,调节土壤理化和生物学性质(土壤酶活性、土壤微生物组成),实现土壤健康与产能协同提升。特别是在盐碱地改良中,结合耕作、灌溉等生物-物理-化学协同技术,可显著增强作物耐盐性,促进盐碱地快速改良和利用。土壤改良与质量提升技术主要通过施用有机物质(如有机肥替代化肥)、增施土壤改良剂(如生物炭)、合理配施大、中、微量元素,并辅以深松和绿色种植(覆盖作物、间作绿肥、生物定向调理等)等技术,以恢复土壤肥力、改善土壤物理性质、提升土壤生物活性。在此背景下,生物炭作为一种新型土壤改良剂,因其多功能的改良潜力,近年来受到广泛关注,并被应用。

生物炭,是生物质或有机材料在缺氧条件下热解形成的稳定、富碳固体材料^[7]。其优势在于可实现废弃物资源化利用。具体有3个优势:1)原料丰富;2)制成品含碳量高,性能更稳定;3)提高土壤有机碳(SOC)封存潜力、可减少农田碳排放达10亿t/年或更多^[8-9]。这意味着,生物炭不仅改善土壤有机养分,而且还减缓农田温室气体排放。研究显示,生物炭改良土壤机制主要体现在提升土壤碳储量、增强土壤肥力、激发生物活性以及加强土壤持水能力等方面^[10]。而施用石灰虽可短期调节土壤pH,但长期施用会导致作物产量显著下降,土壤质量恶化^[11]。与之相比,有机肥虽然能提升土壤有机质含量,但会显著增加CH₄、N₂O和CO₂等温室气体排放^[12]。生物炭在增加土壤养分、改善土壤物理化学性质以及增加土壤微生物种类与数量的同时,兼具长效碳汇、温室气体减排的功能,从而优化根际土壤微生态环境。试验结果显示,棉花秸秆生物炭及炭基肥处理显著提高棉花产量和总生物量^[13]。然而,目前关于生物炭调节中低产田土壤理化性质-微生物群落-养分循环间耦合机制尚不明确。本研究通过梳理总结国内外相关文献,重点解析:1)生物炭改良中低产田耕地质量的物质基础和理论依据;2)生物炭对中低产田土壤养分利用效率、微生物学性质、物理化学性质及生态功能的调节效应;3)生物炭长期施用的环境风险。

1 生物炭的理化性质

生物炭作为有机物在高温低氧条件下热解而成的一种碳基多孔物质,与木炭、草木灰等同类碳制品的不同之处在于:1)生物炭在性质上更为稳定,

其多孔性、比表面积以及离子交换能力等关键指标均显著优于其他碳制品^[14];2)生物炭制备的原料包括农业残留物、木材废料、牲畜粪便和污水污泥,而其他碳制品的原料多为木材,生产工序和设备相对简单^[15-16];3)生物炭的产量、化学成分和属性,主要由原料类型和在特定热解条件中形成的芳香碳结构和微孔特征所决定,且后者占据主导地位。生物炭的微孔结构与表面官能团形成机理如图1所示。

1.1 生物炭的孔隙结构

首先,生物炭孔隙结构和特征与裂解温度密切相关。如图1所示,常规控温范围一般为300℃~500℃。裂解温度对生物炭孔隙的影响主要体现在两个方面:1)孔隙结构的形成。在裂解过程中,原料中的半纤维素、纤维素、木质素大量分解,羟基、烷基及芳香烃环等化学键依次断裂,所生成的大量挥发性气体扩张了生物炭表面孔隙^[17]。2)孔隙特征的演变。多数生物炭的最佳热解温度和CO₂浓度分别为600℃和100%,此时炭样表面微孔数量、面积占比、总孔容均达到最佳状态,并且随着热解停留时间(亦称炭化时间/保留时间)延长,成型生物炭的吸附性能有继续增大的可能^[18]。以棉花秸秆生物炭为例,在300℃炭化温度下,随着炭化时间由1.5h延长至3.5h,生物炭中小粒径颗粒和侧壁微孔径接连出现,生物炭比表面积逐渐增大。而以炭化时间为2h的生物炭在施入土壤后对土壤容重和总孔隙度影响最大^[19]。但若裂解温度超出一定阈值,生物炭的性质和产出率反而难以维持最佳效果。以稻秆生物炭为例,随着裂解温度升高,其表面分层结构更具层次化,300℃时总孔容为0.0066~0.0087 cm³/g,500℃时增至0.0089~0.0206 cm³/g,而700℃时进一步增至0.0288~0.0318 cm³/g,并伴随着材料石墨化程度加剧等现象^[20]。

其次,生物炭孔隙结构特征主要受原料类型和裂解温度两方面的影响。木质化程度越高的原料(松木屑、荔枝、杨树和苹果枝条等木本植物)所制成生物炭的孔隙比表面积和孔容越发达。但也有例外,如木本植物和禾本科植物在500℃限氧热解制成的生物炭,相比之下虽然后者的平均孔径较前者显著小,但比表面积和总孔容差异不显著^[21]。原材料影响生物炭性能的直接表现是其对同一吸附对象的吸附力不同。如污染土壤重金属Cu(II)吸附试验结果显示,花生秸秆和棉花秸秆生物炭的添加均可降低土壤对Cu(II)的亲合力,但由于花生生物炭的H/C和O/C比值高于棉花生物炭,所以花生生物炭的吸

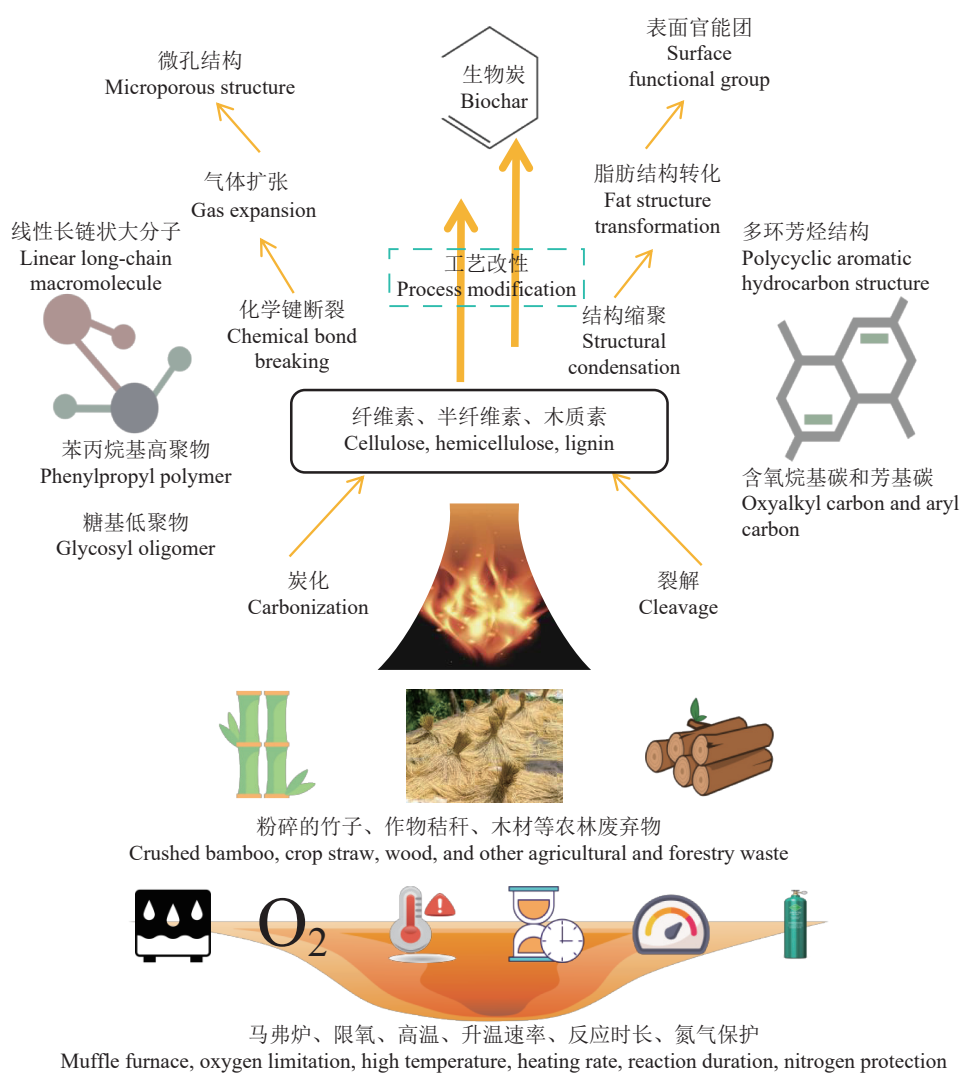


图 1 生物炭微孔结构和表面官能团的形成机理

Fig. 1 Formation mechanisms of the microporous structure and surface functional groups of biochar

附量大于棉花生物炭^[22-23]。在实际生产过程中，渐变温度曲线、升温速率及热解时长是决定生物炭品质和产出率的关键技术参数。表 1 列举了几种主要农林废弃物原料在不同裂解温度下制得生物炭的孔隙

特征。

1.2 生物炭的表面官能团

生物炭的吸附性不仅源于其丰富孔隙所形成的高比表面积 (物理吸附)，而且还与其表面官能团类

表 1 不同原料生物炭的孔隙特征

Table 1 Pore characteristics of biochars derived from different feedstocks												
原料 Raw material	小麦秸秆 Wheat straw		花生壳 Peanut shell		水稻秸秆 Rice straw		玉米秸秆 Corn straw		松木屑 Pine sawdust	荔枝树枝 Twigs of lychee	杨树枝条 Willow twigs	苹果枝条 Apple branch
裂解温度 Pyrolysis temperature	500℃	600℃	500℃	600℃	400℃	600℃	600℃	600℃	600℃	600℃	600℃	500℃
比表面积 (m ² /g) Specific surface area	4.585	186.71	3.522	90.79	3.72	108.42	41.084	92.17	210.6	283.18	348.35	143.079
孔隙 (mL/g) Pore volume	0.0008		0.0005	1.614	0.0068		0.098	0.0537	0.1573		80.034	0.017
文献来源 Literature source	[24]	[25]	[24]	[26]	[27]	[25]	[28]	[26]	[29]	[25]	[26]	[30]

型和丰度密切相关(化学吸附)。图 1 展示出了生物炭表面官能团的形成机理。

首先, 原料的不同是生物炭表面官能团差异的物质基础。特别是以木本和草本植物(如木材、玉米秸秆和竹子)为原料的生物炭, 通常具有更丰富的表面官能团^[31]。其原因在于, 这些原料通常富含纤维素、半纤维素和木质素等成分, 是形成复杂官能团结构的前体物质。具体来说, 植物纤维素是由葡萄糖基通过 β -1, 4 糖苷键连接而成的线性长链状大分子, 在 200℃~400℃ 的主要热解阶段生成以含氧烷基碳和芳基碳为主的碳结构; 半纤维素是仅由几百个糖基组成的低聚物, 在 350℃~360℃ 发生完全熔断分解; 木质素是由苯丙烷基单元构成, 具有三维空间结构, 其热稳定性显著高于纤维素和半纤维素, 在 280℃~500℃ 高温状态下可缩聚形成多环芳烃结构^[32-33]。可见, 生物炭的碳含量与其官能团结构息息相关。例如, 用元素分析仪测定稻壳生物炭和高粱秸秆生物炭中的 C 元素含量(w/%) 结果接近(分别为 39.71% 和 43.32%), 对两种材料制成生物炭的傅里叶红外光谱(FTIR) 分析显示, 其主要吸收峰位置基本一致, 即所含官能团种类也相似, 均包含烷烃、烯烃、羟基、羰基、酯基等基团^[34-35]。然而, 不同类型原料制成的生物炭在表面含氧官能团数目和特异官能团组成上存在差异。例如, 由于污泥的灰分中 Si 元素含量较高, 可形成具有独特的 Si—O—C 或 Si—O—Si 结构, 所以污泥生物炭的含氧官能团数量一般低于植物生物炭^[36]。此外, 原料的粉碎粒度、纤维化程度、干湿度等也会影响到生物炭表面官能团的类型和数量。

其次, 裂解温度对官能团的种类和数量具有直接的调节作用。在特定的裂解温度区间内, 随着炭化温度的升高, 生物质中的脂肪结构会逐步向芳香性结构转变, 化学极性随之减弱, 这意味着生物炭的稳定性和吸附能力会相应增强^[37-38]。通常, 热裂解温度<300℃ 时, 生物炭中含有大量酚类、醛类和酮类等含氧基团; 温度升为 600℃ 时, 酸性官能团含量较高, 芳香化程度显著提升; 而当温度为 800℃~1000℃ 时, 碱性官能团含量增加, 芳香化程度降低^[39-40]。傅里叶红外光谱(FTIR) 分析显示, 在 250℃~850℃ 区间内, 随热解温度升高, 生物炭表面的一OH、—CH₃、—CH₂、C=O、C=C、苯环骨架、C—O、C—H 等官能团含量显著下降, 但芳基碳含量从 16%~36% 增加至 79%~91%, 说明升温促进生物炭中石墨化多环芳烃增加和含氧碳结构脱氧^[41]。

在相同热解温度下, 不同原料制得的生物炭官能团特征差异明显。同等裂解温度下, 玉米秸秆生物炭较桃木生物炭具有更高的一OH 官能团丰度以及更丰富的 Ca²⁺、Mg²⁺ 矿物组分, 从而表现出更强的亲水性和离子交换能力^[42]; 棉花秸秆生物炭比稻壳生物炭在比表面积(300℃ 除外)、无机离子含量、羧基和酚羟基等官能团数量方面更有优势, 所以其对环境中 Pb²⁺ 的吸附能力和去除率更高^[43]。

此外, 还有研究发现, 在相同炭化条件下, 棉花秸秆在 0~30 min 炭化时间内炭产率最高, 而在炭化时间>60 min 时水稻秸秆炭产率最高; 棉花秸秆生物炭的固定碳含量最高; 油菜秸秆生物炭的挥发分和钙元素含量最高; 水稻秸秆生物炭的灰分和钾元素含量最高; 油菜秸秆生物炭的碳元素含量最高; 玉米和棉花秸秆生物炭的氮元素含量最高; 棉花秸秆生物炭的氧元素含量最高^[44]。并且, 由于棉花秸秆生物炭的挥发分、固定碳、pH 值、C、H、N、S、碳转化率、高位热值及热解气和能量转化率均高于水稻秸秆生物炭, 所以棉花秸秆更适合热解炭化^[45]。这表明, 虽然制备原料不同, 但裂解时的炭化处理对秸秆生物炭热值及灰分、挥发分和固定碳含量等的影响规律基本一致。且有研究结果表明, 炭化温度对生物炭的影响最为明显, 保温时间与升温速率的影响小^[46]。

1.3 生物炭改性

除裂解温度和原料对生物炭孔隙结构和官能团特性有显著影响外, 制备过程中添加活化剂也对生物炭起到改性作用。分析结果显示, 经过 KOH 氧化处理制成的柚子粉末生物炭, 其表面大量坍塌形成沟壑结构, 比表面积显著高于未经氧化处理的生物炭^[47]。生物炭改性效果因所用活化剂种类而异, 主要表现为孔隙结构、含氧官能团和芳香特性等的变化。研究表明, 与未经鼠李糖脂改性的棉花秸秆生物炭相比, 改性后生物炭的孔隙度显著提升, C—O—C 键及羧酸和醇羟基中的 C—O 官能团峰值增强, C 和 Si 元素含量降低, O 和 N 元素含量增加^[48]。与原始生物炭(稻草、小麦秸秆、椰壳和柚子皮) 相比, KOH 改性后生物炭对污染土壤碘吸附容量由 15.13% 提高至 54.79%, 碘蒸气去除能力达 2121.2~2583.4 mg/g, 其优异性能与含氧官能团有关^[49]。壳聚糖改性后的小麦秸秆木质素基生物炭, 虽然比表面积、平均孔径和总孔隙体积减小, 但 —OH、—C(O)NH— 等活性官能团显著增加, 促进 Pb²⁺ 与官能团结合并形成表面络合物, 使最大吸附容量达 37.78 mg/g, 是未改

性生物炭的 4.02 倍^[50]。可见,生物炭改性可显著提升性能表现和应用价值。目前,改性生物炭主要应用于土壤和水体中重金属和有毒污染物的修复处理,尤其是对农耕环境具有优异的效益。经硅酸钾改性的生物炭用于种植小麦的酸性土中,不仅可以进一步降低土壤中铝的生物有效性,还可以通过补充硅肥显著提升小麦根系的养分吸收能力^[51]。针铁氧化物具有表面积大、电荷量高等特性,将其负载到棉秆生物炭后,显著提升比表面积和孔容积,对 As(Ⅲ) 的吸附能力高于原始生物炭,在土壤 As 修复中可作为一种新型材料^[52]。除了上述改性方法外,还有酸洗改性、镁改性、锰改性等方法,都可根据生物炭使用目的而实现生物体性能的定向调节。

2 我国中低产田现状

2.1 中低产田的评价方法及分布情况

我国中低产田面积占耕地总面积的比例目前有多种统计口径。根据国家有关部门发布的《全国耕地质量等级情况公报》,2014—2021 年该比例为 67.1%~72.7%。省级地方耕地质量与肥料管理总站的统计值为 68.76%^[53]。而研究者基于农田生产力遥感模型的统计结果为 79.36%^[54]。这或许与我国多次对全国耕地总面积的统计数据差异有关,又或许是由于各方所引用的评价方法和标准不一致,以致计算或评估出的耕地面积不相同。例如,由国务院主导的第三次全国国土调查以 2019 年 12 月 31 日为标准时点汇总数据,全面采用优于 1m 分辨率的卫星遥感影像制作调查底图,广泛应用移动互联网、云计算、无人机等新技术,创新运用“互联网+调查”机制,全流程严格实行质量管控,公报显示我国耕地总面积为 127.8619 万 km²^[1],而由自然资源部主导的全国国土变更调查通过行政记录、逐级上报等方法收集资料,《2023 年中国自然资源公报》和《2024 年中国自然资源公报》分别显示 2022 年和 2023 年度全国耕地总面积分别为 127.5800 万 km² 和 128.6088 万 km² ^[55-56]。所以,估算我国中低产田总面积约为 85.790 万~102.064 万 km²。其数值的波动反映出中低产田评价和计算的复杂性。以下是几种当前常规使用的耕地地力评价方法:

1) 能够真实反映区域地块尺度耕地地力的评价方法。主要包括两种:①根据作物产量确定耕地地力,②根据土壤性状确定耕地地力。方法①主要是在小区域面积使用,具有指导意义。而我国第三次

国土调查、全国《耕地质量调查检测与评价办法》和《耕地质量等级》国家标准等,均需要以大面积区域布点实地调查和土壤样品检测为基础依据,所以采用的是方法②。在此评价方法下,根据 2020 年农业农村部发布的《2019 年全国耕地质量等级情况公报发布》^[3]显示,我国高等级耕地(1~3 等)占 31.24%,中等级(4~6 等)和低等级(7~10 等)耕地分别占 46.81% 和 21.95%,且中、低等田受生产障碍因素的限制,耕地产能提升潜力仍有很大提升空间。

2) 联合国世界粮农组织(FAO)依据土地适宜性程度和限制性强度进行土地适宜性评价,提出《土地评价纲要》系统,又称土地适宜性评价系统^[57]。有报道指出,按联合国的划分方法,我国有障碍耕地(低产田和中产田)占 89%,无障碍耕地(高产田)仅占 11%^[58]。

3) 基于遥感计算。这是一种新兴的统计方法,但有明显缺点,如受建模模型和地面复种制度不同等的制约。综合文献分析,我国中低产田划分方法已从耕地质量法、障碍因子法和作物产量法 3 种,发展为目前的作物产量分析法、土壤性状等级评价法、土壤适宜度法和遥感模型计算 4 种方法。

2.2 中低产田的主要类型和障碍因子

2.2.1 主要类型 根据耕地质量评价方法,我国中低产田可划分为盐碱、瘠薄、酸化、渍潜、障碍层次等 5 个等级^[59]。而依据障碍因子方法,我国中低产田又可划分为干旱灌溉型、渍涝潜育型、盐碱耕地型、坡地梯改型、渍涝排水型、沙化耕地型、障碍层次型、瘠薄培肥型等 8 个等级^[60]。其中,面积占比前三的分别为瘠薄培肥型(25.8%)、干旱灌溉型(25.0%)、坡地梯改型(18.8%)^[61]。而根据作物产量方法,我国将产量高于平均单产 20.0% 以上的耕地定义为高产田,低于平均单产 20.0% 以下的为低产田,中产田介于两者之间^[62]。虽然各指标体系和分类方法对中低产田的等级或类型划分较为接近,但对各类型土地面积的统计数据差异较大。例如,我国旱地农业区耕地面积一般认为是 510 万 km²^[63],而第三次全国国土调查统计出旱区耕地面积为 64.3551 万 km²^[1];盐碱地面积在第三次国土调查中为 7.59 万 km²^[64],而其他统计认为有 9.913 万 km²^[65];沙化土地面积较为统一,各文献和报道都广泛认可全国第六次荒漠化和沙化调查结果,即 168.18 万 km²^[66]。

2.2.2 障碍因子 不同中低产田的障碍因子因其成因不同而异。一般地,导致耕地质量下降和数量减少的因素即为中低产田地力提升的主要障碍。中低

产田的形成原因主要有两方面, 一是自然条件恶劣, 地形和气候造成降水不足, 土壤肥力不足和盐碱化等问题所致; 二是粗放的土地利用和超载利用, 导致耕层变薄、土壤污染和荒漠化等状况持续出现^[67]。例如, 淮河流域煤矿区耕地数量减少和质量下降, 主要因为煤矿开采导致耕地地表塌陷、土壤结构破坏、肥力降低和重金属污染加重等^[68]。

使用 PSR (压力-状态-响应) 模型分析区域耕地障碍因子是当前评价体系的前沿方法。贵州省耕地生态安全评价及障碍因子分析显示, 第一产业占国内生产总值 (GDP) 比重、人口自然增长率、农药使用量、化肥使用量等指标的阻碍度呈现增长趋势, 表明这些指标的影响作用逐步增强, 已经成为全省耕地生态安全的重要影响因子^[69]。相比之下, 安徽省耕地的主要障碍因子依次为森林覆盖率、农民可支配收入、第一产业占 GDP 比重、人均耕地面积、人口密度、有效灌溉比、复种指数、农业财政支出比例、单位耕地面积农药负荷、单位耕地面积粮食产量^[70]。而东北黑土地耕地安全保障因子的排名前 6 依次是柴油使用量、土壤重金属污染、农业电力供应、第一产业从业人员比例、土壤有机质、土壤 pH^[71]。

2.3 解决措施

在全国层面, 我国主要实施高标准农田建设, 通过田块整治、土壤改良、灌溉排水等建设内容, 计划至 2030 年建成 8000 万 hm^2 (12 亿亩) 高标准农田, 并改造提升 1867 万 hm^2 (2.8 亿亩) 高标准农田, 以此稳定保障 6 亿 t (1.2 万亿斤) 以上粮食产能^[72]。在地方/地区层面, 各地根据现有条件针对性地破解中低产田障碍, 以构建具有区域特色的耕地质量提升技术体系。甘肃实施的措施主要有旱地全膜双垄沟播技术、绿洲灌区沙化耕地修复与培肥技术及耐盐碱生物菌肥引进与筛选等技术措施, 多学科联合攻关有效推进中低产田改良和农业可持续发展^[73]。河南省焦作市坚持在保护耕地数量的同时, 通过高标准农田建设、绿色种养循环等项目实施, 不断提升耕地质量, 保障粮食安全^[74]。

落实到农田实施层面, 各地遵循因地制宜、因时制宜、可持续发展的原则, 采取多种措施以高效提升中低产田耕地质量。首先, 根据应用目标可采用的技术和措施如下: 1) 灌水施肥制度优化。通过现代农业节水和水肥精准调节技术, 黄河灌区盐碱型中低产田实现改良后的土壤种植作物节肥至少 20%, 节水 30%~40%, 减药 15%~30%, 节省劳力 15~20 个, 增产增收 10%~30%^[75]。内蒙古鄂尔多

斯市对于干旱灌溉型中低产田耕地质量改善、生产能力提升取得重大成效, 实现项目区农业节水 35%、耕地质量提升 0.5 个等级、亩均增产 100 kg、亩均节约成本 300 元等目标^[76]。2) 集约化种植管理。通过优化田间管理措施 (种植品种、种植密度、肥料用量、秸秆还田、有机物料投入等), 结合新型土壤改良剂 (脱硫石膏等) 施用, 降低盐渍表层土壤盐分, 改善土壤环境, 促进植物养分吸收和干物质积累, 提高资源利用效率^[77]。3) 集成土壤微生物调节技术。Meta 分析显示, 中低产田中施用含有芽孢杆菌或木霉菌复合菌剂可使玉米增产 9%~10%^[78]。4) 生物措施。种植牧草, 建立草-田轮作体系, 特别是发展豆科牧草 (如紫花苜蓿), 可提高单位耕地面积的生产力, 实现生产和生态效益双提升^[79]。而且, 试验证明粒径在 1~2 mm、施肥添加量占 4% 的棉花秸秆生物炭是修复退化高寒草地 (苔草和高羊茅) 的最佳选择^[80]。5) 应用土壤改良剂。这是一种较为传统但很有使用效果的措施。即以农林废弃物、生石灰/熟石灰/白云石、腐殖酸、凹凸棒石及石膏为主要原料, 通过化学改性或活化等方法制备土壤改良剂。

在提升地力的同时, 生物炭兼备土壤污染修复功能, 正逐步作为新材料被重点关注。研究表明, 生物炭与铁基物质结合成的复合材料 BC-Fe, 可高效去除抗生素、内分泌干扰物等难降解有机物, 在土壤修复中表现出高效、低成本和环境友好特性^[81]。

3 生物炭对中低产田土壤养分利用效率的调控

3.1 生物炭提高土壤养分供给量

我国中低产田的主要特征是土壤生产力低且不稳、生产效益较差, 粮食单产仅为高产田的 40%~60%^[82]。从理论角度而言, 土壤养分的矿化和硝化主要受土壤管理实践 (如土壤温度、干燥和再湿润事件) 和土壤生物群落 (如微生物群落等) 的影响。而生物炭对作物生长及产量的影响主要源于生物炭对土壤理化特性和土壤养分含量的改变。例如, 对比试验发现, 棉花秸秆生物炭较秸秆纯还田可增强土壤氮素的缓释效应, 提高氮素利用效率与稳定性 (氮素的矿化和固持作用), 显著增加土壤-水稻系统的表观残留氮, 优化稻田氮素平衡, 从而对水稻生长发育及产量提升产生积极作用^[83]。

基于图 2 所示, 生物炭提高土壤养分利用率的主要原因可归纳如下: 1) 改善根际微环境。生物炭

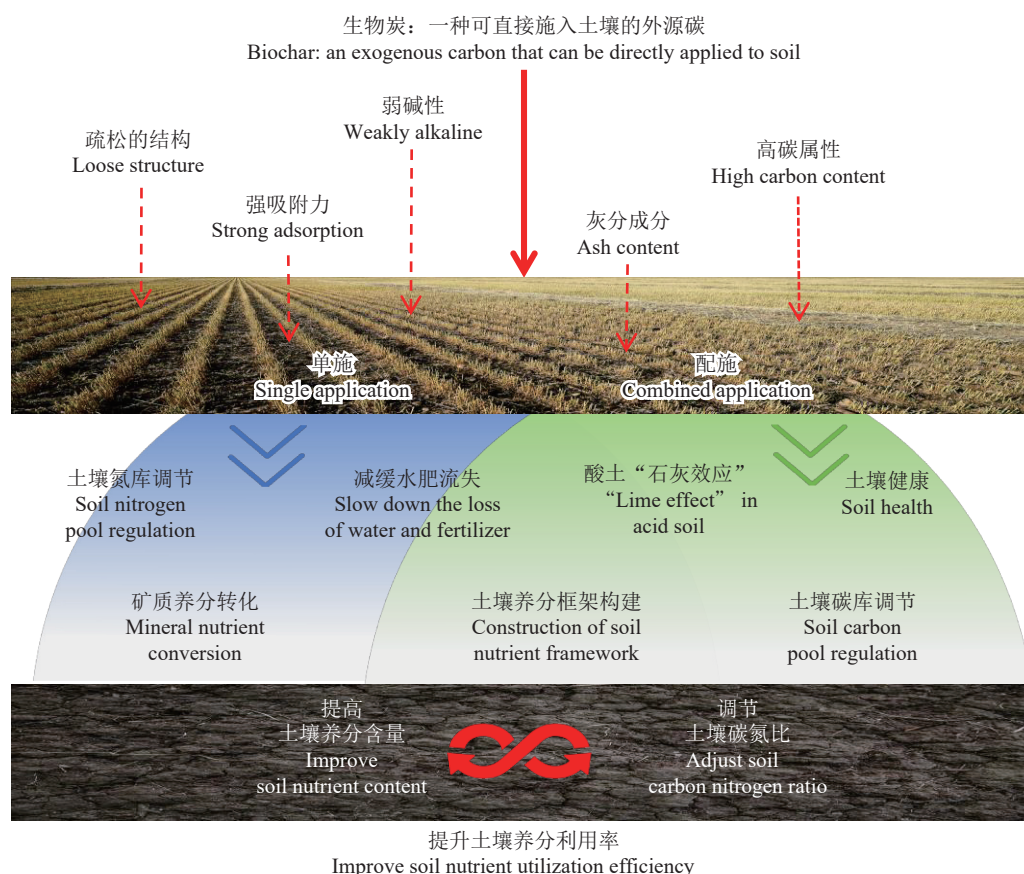


图2 生物炭提高土壤养分利用率的作用机制

Fig. 2 Mechanisms of biochar enhances soil nutrient use efficiency

通过发挥自身的物理特点，将对土壤理化特性的改变效应延伸到对根际微环境的优化中。如马铃薯根际、鳞茎、块茎的生长环境因生物炭的添施处理而得以优化，继而增强地上部叶片光合、株高、主茎数等产量相关农艺性状^[84]。2) 提供矿质养分。可提高土壤有效养分浓度。随着生物炭施用量增加，生物炭自身灰分溶解释放到土壤中的中微量元素养分浓度也会升高，并协同促进植株对土壤氮的吸收和累积量，表明生物炭可作为植物矿质养分“库”^[85-86]。3) 促进养分矿质转化。生物炭能显著提高瘠薄农田土壤有机碳 (SOC)，并显著影响土壤氮转化速率以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量^[87]。与秸秆不还田和秸秆直接还田相比，棉花秸秆生物炭具有增加并维持土壤全氮、有机态氮库 (氨基糖态氮)、酸解氮和非酸解氮含量的能力^[88]。4) 减缓水肥流失。我国当前中低产田耕地土壤养分呈现出以下特点：其一，农田投入的化肥矿化速度过快，难以满足作物生长后期需求^[89]；其二，不合理的耕作方式和施肥制度，容易造成土壤养分流失 (径流、蒸发、固化、淋溶、侵蚀等)，难以持续满足作物对养分的吸收和积累^[90]；此

外，化肥严重流失还会引发土壤板结、酸化等问题^[91]。在砂壤土中施用生物炭的改良效果显示，生物炭使土壤容重降低 8.5%~26.5%，作物对土壤水的利用效率至少提升 27.7%，肥料利用率至少提高 87.5%^[92]。

3.2 生物炭调节土壤碳氮比

生物炭作为可直接施入土壤的外源碳，因其独特的理化性质，被认为是具备长期固碳潜力的物质^[93]。而土壤 C/N 是表征土壤营养状况的重要指标之一，能够代表土壤碳氮库容量，并能直接影响土壤微生物群落结构及土壤养分含量。根据图 2 展示的内容，生物炭主要通过以下路径调节中低产田土壤 C/N：

1) 生物炭自身的高 C/N 直接提高土壤 C/N。高 C/N 生物炭可直接扩容土壤碳库。一般地，生物炭自身的“碳封存”可使土壤碳库增加 64.3%^[94]。生物炭的高 C/N 与原材料类型和热解温度有关。以大豆秸秆生物炭为例，随热解温度升高，含碳量从 45.69% 升至 75.29%、含氮量从 0.81% 升至 1.19%，C/N 从 56.41 增至 63.27^[95]。但是，土壤 C/N 过高也影响作物生长。一般认为，土壤微生物每分解 25~30 份碳

约需 1 份氮, 当土壤 C/N>25:1, 土壤有效氮含量下降, 且有机物质分解会受到抑制; 如果 C/N<25:1, 土壤氮素供应充足, 土壤有机物分解较快^[96]。

2) 生物炭调节土壤碳氮库。生物炭对提高土壤碳氮库具有积极意义。生物炭除直接输入的碳外, 还对 SOC 有激发效应。试验显示, 高 C/N 生物炭降低土壤微生物活性, 减少温室气体排放利于 SOC 的形成^[97-98]。然而, 其对氮库调节尚存争议。部分研究认为, 高 C/N 生物炭降低土壤净氮矿化速率, 从而降低土壤氮含量^[99]。另有研究认为, 生物炭可显著增加土壤全氮含量 (增幅为 14.44%~97.50%), ≥4% 施用量可显著减少土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 和总氮淋失 (降幅分别达 12.50%~42.86%、3.23%~11.87% 和 4.62%~10.62%)^[100]。这其中的差异可能与土壤类型、生物炭原料及施用方式有关。

3) 生物炭的高 C/N 比有助于构建持续稳定的土壤养分^[101]。生物炭本身碳含量较高, 化学性质稳定, 分解速度较慢, 且能有效减缓土壤有机质的淋失和降解, 促进腐殖质形成^[102]。多项研究结果表明, 适量施用生物炭可促进 SOC 矿化, 增加土壤有机质及速效养分 (碱解氮、速效磷和速效钾) 含量^[103]。但在低肥力土壤中施用 C/N=12.5 的肥料组合对提高小麦生物量、增加土壤速效养分含量、增强土壤酶活性、提升微生物生物量碳氮的效果, 优于 C/N 分别为 25 和 40 的组合^[104]。这也表明 C/N 过高的物料添施不利于土壤肥力的提升。

4) 应用高 pH 值和高 C/N 生物炭可在酸性土壤中起到显著“石灰效应”。生物炭可降低土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 活性, 减弱活性酸补充能力, 显著改善酸化土壤^[105-106]。酸性土壤的形成与土壤 C/N 呈显著负相关 ($P \leq 0.01$)^[107]。在以酸化为主要障碍的中低产田中应用生物炭可逐步恢复土壤基础地力^[58, 108]。并且, 生物炭可显著增加土壤盐基饱和度和土壤养分含量, 优化土壤结构并促进土壤有效养分形态转换、提升土壤微生物活性和丰度, 从而提升土壤肥沃程度 (提升幅度可达 85.0%~99.3%)^[109]。

4 生物炭对中低产田土壤微生物学性质的调控

4.1 生物炭提高土壤微生物丰度

对比高产田和中低产田的根际和非根际土壤的微生物群落结构发现, 高产田非根际土壤细菌群落丰富度、多样性均显著高于中低产田, 但高产田根

际土壤细菌和真菌群落的丰富度、多样性显著低于中低产田^[110]。该试验结论为通过优化土壤微生物群落特征提升耕地质量提供了基础。施加生物炭可以影响土壤微生物的环境质量, 从而影响其代谢活性。尽管生物炭的施用量、施入方式、原料类型及与其他物质的配施方式存在差异, 但在连作土壤中均能显著提高土壤微生物数量, 调节微生物群落结构, 并降低病原菌丰度^[111]。这是因为生物炭的疏松多孔结构和高比表面积, 可强力吸附可溶性有机物、气体和无机营养物质, 为众多微生物定殖、生长和繁殖提供适宜的栖息地和物质来源。图 3 展示了“生物炭-土壤-微生物”三者间的相互关系。

4.1.1 为微生物提供栖息空间 不同类型生物炭的比表面积为几十至几千 m^2/g , 孔容为 0.02~1 mL/g (表 1), 可满足微生物对定殖空间矿物质和水分的需求。由于生物炭具有特定孔隙大小, 部分微生物个体过大无法进入, 即可为某些特定大小微生物提供最佳的“避难所”或栖息地, 保护其免受天敌捕食^[112]。

4.1.2 为微生物提供生存物质条件 生物炭的孔隙能够存储很多水分 (一般为 2.9 mL/g 干物质左右), 可为微生物生存提供水分保障^[113]。并且, 生物炭还可为微生物定殖提供孔隙空间和养分资源, 对促进土壤微生态系统的良性运转具有重要作用。施加生物炭后, 土壤真菌群落的物种丰富度和多样性发生显著分化, 根际促生菌葡萄孢盘菌属 (*Botryotinia*) 丰度升高, 而抑制镰刀菌属 (*Fusarium*)、链格孢属 (*Alternaria*) 等病原真菌的丰度^[114]。例如, 在兰州百合连作中低产田土壤中添加生物炭 10 $\text{g}/200 \text{ g}$ (生物炭/土壤) 后, 土壤中鞘氨醇菌属 (*Sphingomonas*)、曲霉属 (*Aspergillus*)、产油菌属 (*Solicoccozyma*) 等有益菌的相对丰度及土壤酶活性 (脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶) 均呈升高趋势, 而被孢霉属 (*Mortierella*) 和镰刀菌属 (*Fusarium*) 等致病菌则受到抑制, 表明生物炭利于有益微生物生物量的提高^[115]。

4.1.3 生物炭与微生物的互作关系 培养试验结果表明, 定殖在生物炭孔隙中的微生物与生物炭间存在互利关系。一方面, 微生物可促进生物炭成分矿化和结构演变, 与非生物因素一同决定生物炭在土壤中的赋存时间和状态; 另一方面, 生物炭理化特性决定了各类微生物在生物炭表面的定殖。研究表明, 生物炭富含可利用态脂肪族的有机碳, 而放线菌对其分解能力强, 因此是生物炭上主要定殖的土壤微生物^[116-117]。低温热解的生物炭富含脂肪族碳, 所以其微生物丰度高于高温热解生物炭^[118]。而且,

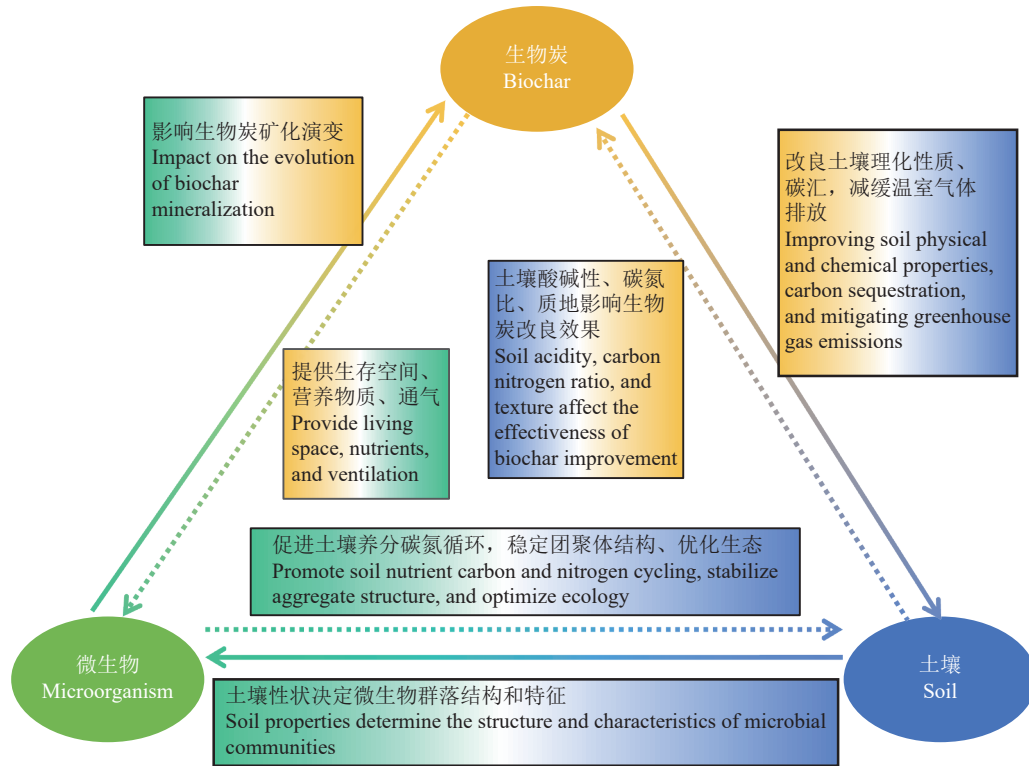


图3 “生物炭-土壤-微生物”间的相互关系

Fig. 3 Interrelationships among "biochar-soil-microorganisms"

高温热解生物炭具有更多孔隙、灰分、芳香族物质和吸附点位及亲水性更强等特点, 所以能吸引更多种类土壤微生物定殖^[119]。然而, 生物炭并没有提高土壤微生物量碳氮和细菌数量, 除非在高量添施生物炭条件下才会少量增加土壤真菌和革兰氏阴性菌数量^[120]。这反映出生物炭与微生物间互利机制的复杂性, 目前尚无明确的解释, 可能需要在中低产田实际改良行动中进一步探索。

4.2 生物炭调节土壤微生物群落结构

4.2.1 中低产田与高产田土壤微生物特性对比 研究表明, 中低产田根际土壤固氮能力强于高产田, 而硝酸还原能力弱于高产田^[121]。中低产田土壤病原真菌(立枯丝核菌、柱孢属、壳针孢属等)比例较高, 而高产田土壤中促生菌(黄杆菌属、杜氏菌属及慢生根瘤菌等)占比较高^[122]。并且, 高产田土壤细菌和真菌网络更复杂。特别是对比发现, 高产田的放线菌群、太古菌群和子囊菌群是改善土壤健康的潜在驱动因素^[123]。然而, 目前仍缺乏直接证据来阐释中低产田的形成原因与土壤菌群之间的因果关联。

根据图3所示, 在“微生物-土壤-作物”体系中, 土壤微生物影响土壤、作物健康以及许多关键生态系统功能, 土壤理化性质反过来也会影响微生物对

环境资源的竞争, 继而引发微生物群落结构和特征的变化。当生物炭作为外源物质输入土壤后, 尽管微生物难以直接获取其碳元素, 但生物炭能调节土壤理化特性, 进而调节土壤微生物群落结构与功能, 提升土壤微生物生物量、生长速度和活性。

在微观尺度上, 生物炭通过提供良好的通气、水分和营养物质, 引导土壤中微生物群落组成、丰度和活性的变化。同时, 土壤微生物会随土壤环境的改变主动地调整群落结构, 适应性强的微生物得以保留^[124]。现有的观察结果显示, 生物炭可降低群落均匀度和多样性, 但却提高土壤微生物量并减弱种间竞争, 从而降低网络复杂性并促进特定微生物增殖。例如, 旱地红壤连续施用生物炭虽未影响土壤细菌数量, 但可提高土壤 pH、有机质和土壤 C/N, 并与土壤细菌群落分布显著相关, 对提高放线菌相对丰度、降低绿弯菌和拟杆菌门相对丰度有显著作用^[125]。

4.2.2 生物炭与土壤微生物群落的关联机制 土壤微生物群落稳定性和生态作用与生物炭添加之间的关联机制主要有以下 3 个方面: 1) 生物炭提高土壤养分有效性, 进而提升微生物网络复杂性和稳定性; 2) 生物炭增加真菌和细菌互作网络模块化结构复杂性; 3) 生物炭孔隙结构对细菌和真菌提供保护, 降

低竞争者侵害^[126-127]。根据关联机制的反馈,在实际应用过程中,生物炭不仅能改善土壤的理化性质,还能防控病原菌。其原因如下:一是,降低病原微生物的数量;二是,调节病原微生物的结构;三是,吸附病原酶和有毒代谢物等等^[128]。例如,生物炭与枯草芽孢杆菌(SL-44)复合施用,可促进根际微生物富集,提高 Bio-LMS 水平,增强对枯萎病菌(*R. solani*)的竞争力,使枯萎病发病率降低 59.88%^[129]。还可显著降低马铃薯青枯菌丰度(16.8%~32.9%)和枯萎病指数(14.0%~49.2%),提高芽孢杆菌属(*Bacillus*)和鞘脂单胞菌属(*Sphingomonas* sp.)等有益细菌相对丰度^[130]。

5 生物炭对中低产田土壤物理化学性质的调控

5.1 中低产田土壤物理改良

高产田与中低产田在土壤物理性质方面存在显

著差异。低产田耕作层薄(<20 cm)、土壤结构不良、容重过高(>1.3 g/cm³)、通气透水性差,影响农作物正常生长^[131]。如图 4 所示,在农业生产中土壤物理性质提升是土地生产力提升的关键。土壤物理改良措施主要包括耕作方式优化和有机物料还田。

5.1.1 耕作方式 研究表明,在瘠薄、沙化、盐碱中低产田应用保护性耕作(秸秆覆盖、免耕、少耕等)能增强土壤蓄水保肥能力,防止水土流失,减轻环境污染,降低生产成本,提高粮食产量和质量^[132]。较传统翻耕和旋耕,深松不但可以打破姜砂黑土犁底层,还可改善根际层土壤状况,降低根际土壤容重,增加孔隙度,提高深层蓄水能力,促进作物根系对养分的吸收^[133]。

5.1.2 有机物料还田 研究表明,有机物料还田显著提高耕层土壤有机碳含量,特别是可溶性和活性有机碳含量^[134]。施用菌渣可改善土壤物理特性(土壤容重降低 11.6%~18.2%、土壤紧实度降低 20.8%~35.7%),可促进作物根系生长^[135]。秸秆配合生物炭

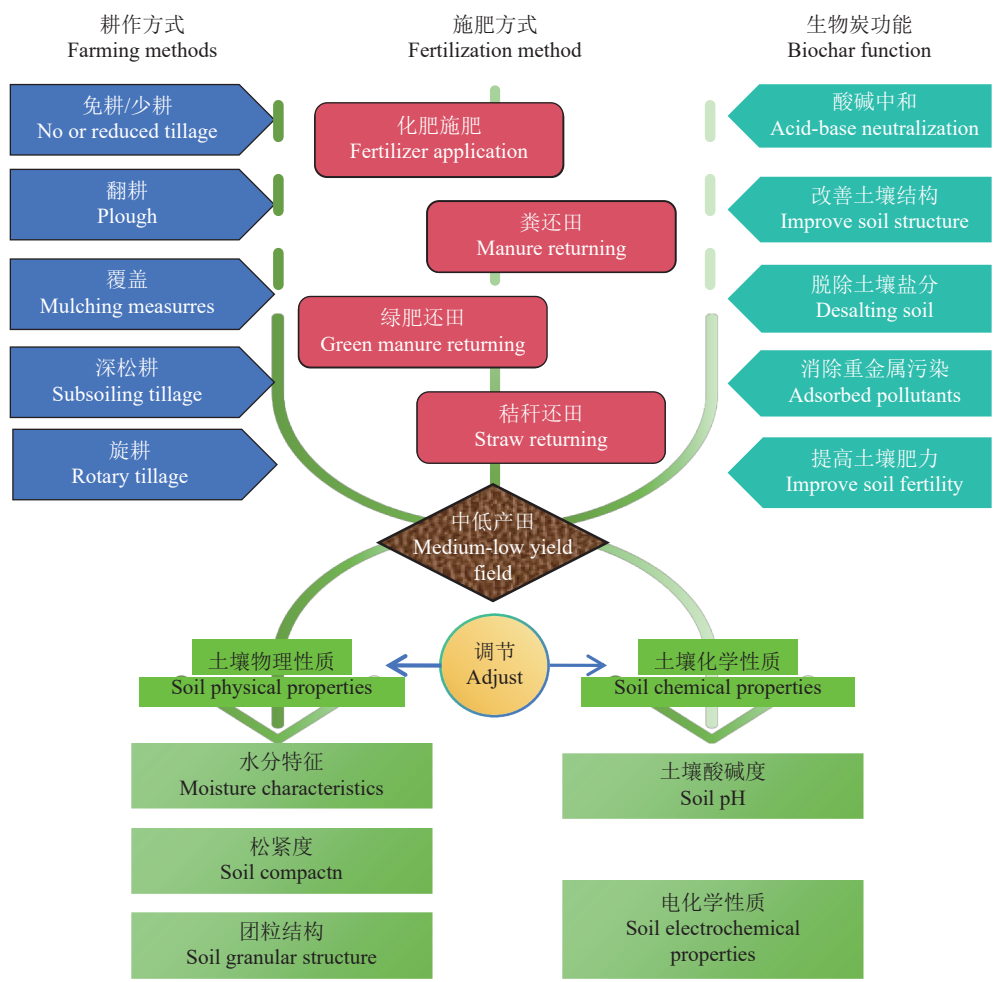


图 4 生物炭对土壤理化性质的调控机理
Fig. 4 Regulation mechanism of biochar on soil physicochemical properties

覆盖还田可改善土壤物理化学性质,可提高土壤大团聚体数量和稳定性^[136]。以秸秆还田为代表的土壤有机培肥措施,是近年来研究最为深入、应用最为广泛的土壤改良技术。

5.2 中低产田土壤化学改良

如图 4 所示,中低产田化学改良机理大致可分为 5 类,包括土壤脱盐、酸碱中和、改善土壤结构、消除重金属污染以及提高土壤肥力等^[137]。具体做法: 1) 土壤脱盐 施用微生物改良菌剂(多为菌根真菌和根际促生菌)^[138]、在休作期灌溉淋洗^[139]、利用高分子聚合物通过螯合作用固定盐离子^[140],以及化学调理剂(主要有钙基、酸性盐、弱酸性盐、有机酸和有机物料等)单独或配施有机物料联合应用^[141]。2) 酸碱中和 在酸性土壤施用石灰,提高土壤 pH 值;在碱性土壤施用硫磺粉或石膏,降低土壤 pH 值^[142]。3) 改良土壤结构 通过化学改良剂改善土壤团聚体,以调节水肥气热,提高土壤肥力。如使用化学改良剂 β -环糊精可显著增加粉砂质黏土的土壤微团聚体总量,促进土壤水稳性团聚体形成,尤其显著增加大团聚体质量分数,且降低 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数^[143]。4) 消除重金属污染 包括化学淋洗、化学改良和电化学修复等^[144]。如使用温和化学淋洗剂(磷酸氢钾)使砷(As)去除效率超过 80%,淋洗后土壤 As 含量基本与背景值接近^[145]。5) 提高土壤肥力 其措施除因地制宜地施用肥料、改良剂、微生物菌剂外,还包括耕作制度管理、水资源高效利用、农田种植规划等。特别是受环境所限而无法大规模实施作业的中低产田区域,更需采用适地适用的改良措施。

5.3 生物炭改良中低产田土壤物理性质

如图 4 所示,生物炭改良中低产田土壤物理性质主要体现在以下几个方面:

5.3.1 调节土壤水分 生物炭的多孔结构有助于土壤保水,持续提高土壤持水量^[146]。适量添加生物炭降低土壤容重的同时提高土壤田间持水量^[147]。添加 6% 的生物炭可显著提高土壤饱和含水量、田间持水量、最大有效水含量和有效水含量,以及土壤水分湿润锋深度^[148]。而较生物炭单施,生物炭与其他物质配施效果更好。

5.3.2 改善土壤孔隙 土壤中添加生物炭后,土壤容重和孔隙度等性状均得到改善。优化土壤孔径多样性和连通性,减少土壤大孔隙(>100 μm)和极微孔隙(<0.3 μm)数量,增加中等孔隙($0.3\sim100$ μm)数

量,而且生物炭的疏水性也影响土壤水分运移,巨量有效孔隙提高土壤持水量^[149]。

5.3.3 改善土壤团粒结构 生物炭施用显著增加大团聚体比例和平均重量直径,但对土壤微团聚体和粉黏粒组分无显著作用^[150]。砂姜黑土中施入适量生物炭(3% 和 6%)能稳定 0.25~2.00 mm 粒径团聚体含量,增加 1~2 和 >2 mm 粒径团聚体含量,促进土壤团聚体的稳定性^[137]。而且,生物炭和秸秆联合施用提高胶结物质的比例,显著提高 >0.25 mm 团聚体含量^[151]。但过量生物炭(>20 t/hm²)会破坏土壤大团聚体,因此合理生物炭用量(10~20 t/hm²)至关重要^[152]。生物炭提升土壤团聚体形成与稳定的机制包括:生物炭颗粒小、比表面积大和吸附作用强,施入土壤后可与土壤有机质、微生物及粘土矿物相互作用,增加土壤团聚性、微生物活性和菌根的数量,促进团聚体形成和稳定^[153-154]。

5.4 生物炭改良土壤化学性质

生物炭改良中低产田土壤化学性质的作用(图 4)包括以下几个方面:

5.4.1 生物炭对土壤酸碱度的调节 中低产田多属生态脆弱区,存在明显限制因子。在中低产田改造过程中,消除与作物产量相关的障碍因素,即可实现增产,也有助于提升农田生态稳定性^[155]。在众多影响因素中,土壤酸碱度是公认的首要障碍因素。研究表明,生物炭影响作物产量的机制之一就是生物炭对土壤酸碱平衡的调节作用^[156]。尤其是在酸性土壤上,生物炭可使土壤 pH 值提高到 6~8 (中性~弱碱性),是改良酸性土壤实现增产的主要原因^[157]。

生物炭调节土壤酸碱度的作用机制主要有以下两点: 1) 生物炭自身高碱性是改良酸化土壤的基础。在热解温度 >770 °C 时,有效磷和钾因挥发而含量降低,导致生物炭 pH 升高^[158-159]。2) 生物炭通过释放阳离子或自身物理属性调节土壤酸碱性^[160-161]。生物炭在土壤中释放的 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子与土壤中 H^{+} 和 Al^{3+} 发生交换,增加土壤可交换性盐基离子含量,进而调节土壤 pH 值^[147, 162]。此外,生物炭调节土壤酸碱性常伴随土壤养分状态的改变,一是土壤有效磷、速效钾和有效氮含量均随生物炭用量增加而提高,二是适量生物炭施用可降低胡敏酸和富里酸等活性有机质的比例^[147, 163-164]。

5.4.2 生物炭对土壤电化学性质的调节 生物炭可将土壤电导率(EC)、电动电位(zeta 电位)和阳离子

交换量 (CEC) 等调节至适合植物生长的水平^[165]。由傅里叶红外分析结果可知, 生物炭表面存有大量含氧官能团和碱性官能团 (如羰基、酚基、醌基等), 这些官能团可增加单位表面电荷密度和阳离子吸附表面积, 从而提高土壤 CEC^[166-167]。由 Zeta 电位分析可知, 生物炭带有大量的负电荷, 施入土壤后与金属阳离子间的静电吸引力加强, 促进 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等阳离子运动^[168]。进一步研究显示, 生物炭对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 等阳离子的吸附机制是官能团吸附、 $\text{Pb}^{2+}-\pi$ 和 $\text{Cd}^{2+}-\pi$ 相互作用、静电吸附和矿物沉淀的协同效应^[169]。而对有机物的吸附机制是孔隙结构上的吸附位点, 通过 $\pi-\pi$ 、疏水相互作用和吸附氢键、自由基和电子转移进行^[170]。

6 生物炭对中低产田土壤生态效应 (气体排放) 的调控

6.1 生物炭对土壤温室气体排放的影响

6.1.1 生物炭对土壤碳排放的影响 如图 5 所示, 土壤碳排放主要包括 CH_4 和 CO_2 。有研究认为, 生物炭改变了土壤 C/N, 促进了微生物代谢及土壤呼吸强度, 土壤累计碳排放量可能升高^[171-172]。然而, 在分别监测 CH_4 和 CO_2 排放时, 却出现不一致的结果。试验结果明确表明, 添施生物炭后土壤 CH_4 排放通常下降^[173]。这是因为生物炭可提高甲烷氧化菌活性和丰富度, 且对产甲烷菌活性有抑制作用^[174]。但是, 生物炭对土壤 CO_2 排放的影响尚无统一结论, 这是因为土壤 CO_2 通量受土壤温度和土壤含水量主导^[175], 而生物炭对土壤温度的影响机理尚不明

确。对此, 当前主要有以下 3 种观点:

1) 生物炭促进土壤碳排放 (5%~25%)。支持该观点的研究认为: 土壤无机碳的非生物释放、生物炭不稳定成分分解, 以及生物炭诱导的土壤有机质分解促进了土壤碳排放^[176]。直接证据显示, 施用生物炭、秸秆还田配施生物炭均可增加 SOC 储量^[177]。而大气中一部分的 CH_4 和 CO_2 是 SOC 的主要分解产物。

2) 生物炭抑制或不影响土壤碳排放。支持该观点的研究认为: ①生物炭通过吸附或物理保护土壤中 SOC 不分解, 从而抑制土壤 CO_2 释放, 其抑制效果受生物炭种类和土壤理化性质等因素影响^[178]; ②生物炭微孔提供许多吸附位点, 维持土壤微生物多样性, 从而降低了土壤异养微生物的呼吸, 保持土壤碳库稳定性^[179]。

3) 生物炭种类导致差异性碳排放。支持该观点的研究认为: 不同类型生物炭均提高土壤呼吸速率和累积排放量。试验结果证明, 棉花秸秆生物炭土壤呼吸速率高于葡萄藤生物炭^[180]。但其中机理还需进一步探究。

6.1.2 生物炭对土壤氮排放的影响 生物炭诱导土壤氮转化微生物的固定, 增强反硝化作用, 最终降低土壤氮氧化物排放量。如图 5 所示, 生物炭通过促进反硝化将大量氮素固定到土壤中, 每年可减少 NO 和 N_2O 排放约 32%, 并在 3 年内将 NH_3 和 N_2O 的累积排放量分别减少 47% 和 22%^[181-182]。在偏酸性土壤中, 生物炭施用效果更显著, 可减少约 54% 的 N_2O 年排放量^[183]。对于中低产田土壤固氮、减少氮素淋失和挥发具有积极意义。有试验结果显示,

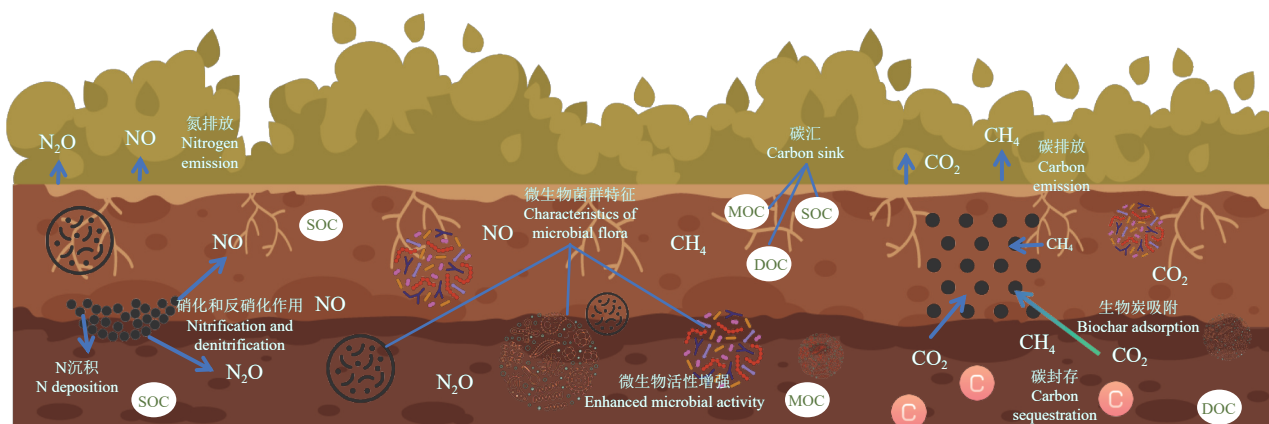


图 5 生物炭吸附、微生物活性及土壤气体排放示意图

Fig. 5 Schematic diagram of biochar adsorption, microbial activity, and soil gas emissions

注: SOC—土壤有机碳; MOC—矿质结合态有机碳; DOC—可溶性有机碳。

Note: SOC—Soil organic carbon; MOC—Mineral-associated organic carbon; DOC—Dissolved organic carbon.

施用生物炭的滴灌棉田氨挥发显著低于施用棉花秸秆^[184-185]。

然而,也有研究发现生物炭会促进土壤硝化作用,导致氮排放反升。例如,在干湿交替灌溉下生物炭提高水稻农田 N_2O 排放量^[186]。这其中可能存在的机制:一是,生物炭诱发正激发效应,促进 SOC 分解,氨氧化菌可利用活性氮增多,硝化作用加强,进而增加土壤 N_2O 排放^[187];二是,生物炭自身含有 NH_4^+ 和 NO_3^- , 增加反应底物而导致土壤 N_2O 排放增加^[188]。研究结论的差异性可能与农田耕作制度、农事管理措施及农田土壤初始氮含量等因素有关。

6.1.3 生物炭对温室气体排放强度 (GHGI) 的影响

当前,尽管研究者们认同生物炭能够减缓全球增温潜势综合指数 (GHGI) 这一结论,但尚未完全明晰生物炭影响 GHGI 的作用机制。一方面,研究发现,生物炭施用量越高、时间越长,其对 GHGI 的抑制作用越强,且当施用量超过 80 t/hm^2 , 且施用时间超过 1 年时,该抑制作用最强^[189]。另一方面,试验结果显示,生物炭配施处理 (如 4 t/hm^2 生物炭 + 16 t/hm^2 脱硫石膏处理) 表现出农田碳中和效应^[190]。因此,在中低产田改良的实践中,生物炭单施或与其他肥料、改良剂等配施是目前的常规做法。

6.2 生物炭与农田碳汇

生物炭在中低产田可持续发展中发挥的碳封存效益得到广泛认可。研究发现,生物炭可提高土壤总碳库,还提高可溶性有机碳 (DOC) 和微生物量碳 (MBC) 含量。在氮沉降背景下,酸化土壤施用生物炭可提高土壤 DOC 含量,且氮沉降与 DOC 含量间存在显著交互作用^[191]。生物炭添施显著提升微生物量碳 (MBC) 含量并降低微生物量碳氮比^[192]。因为施用生物炭提高土壤 pH, 促进了生物炭活性及有机碳组分释放与溶解,且施入量越大土壤 DOC 含量越高^[193]。土壤中 MBC 提高的原因在于生物炭为微生物提供了生存空间和生存条件^[194]。

普遍认为,农业管理措施是影响 SOC 转化的重要因素。通过改变土壤物质循环过程,进而影响农业生态系统的可持续性。从生态发展而言,增强农业土壤碳汇关键在于平衡土壤有机质积累和消耗。通过农业措施增加土壤碳输入,是缓解气候变化的关键手段之一,也是挖掘土壤固碳潜力的关键路径。平衡耕地质量提升与温室气体减排关系,是实施可持续农业的关键环节。从作物生产而言,生物炭扩增土壤碳库更快速、更直接。

7 生物炭在中低产田应用中的风险

认识生物炭对中低产农田土壤生态调节的局限性,应用中需充分考虑时空尺度、施用量和障碍类型等因素。若单一评价生物炭效应,既不能客观体现其价值,也不能有效规避潜在负面效应。图 6 概括了生物炭在中低产田应用中的几种主要风险及其成因。从中可见,在中低产田改造和地力提升中,更需建立生物炭-土壤-作物系统的适配性评价体系,以量化不同障碍类型中低产田的最佳施用阈值和使用类型。

7.1 土壤性质影响生物炭效应

生物炭在不同土壤类型水稻田中的长期固碳效果差异显著,其中黑土最佳,其次是砂姜土和红壤土^[195]。同一土壤类型的不同质地也显著影响生物炭效应。例如,砂姜黑土的抗张强度与生物炭的施用量和粒径密切相关,高量施用粗颗粒生物炭 (粒径 $1\sim 2 \text{ mm}$, 施用量 $>3\%$) 会降低砂姜黑土的抗张强度,且对粉黏土的降低程度显著高于粉质黏壤土;少量施用细生物炭颗粒 (粒径 $<0.15 \text{ mm}$, 施用量 $<1\%$) 反而会提高砂姜黑土的抗张强度,且粉黏土的提高程度更明显^[196]。

此外,土壤酸碱性也是制约生物炭改土效果的重要因素。生物炭通常呈强碱性 ($\text{pH}>8$), 因此生物炭在酸性土壤中的应用较成功。但在碱性土壤可能会加剧盐碱化和养分失衡,不利于酸性微生物的生长和繁殖^[197]。通常, 500°C 以下制备的生物炭多呈中性或弱碱性,且其 pH 值随热解温度升高而上升,因此生物炭常用于改良酸性土壤^[198]。若施用不当或造成负效应。例如,施用 50 t/hm^2 以上生物炭显著降低黑钙土和石灰性紫色土的总氮淋失量 (可达 29% 以上), 而 10 t/hm^2 施用量却显著提高总氮淋失量,分别流失 22% 和 2% 总氮^[199]。但是, 50 t/hm^2 以上施用量经济效益为负值,且还会造成土壤过量负载。表明利用生物炭改良土壤时,需综合考虑生物炭颗粒粒径、施用量、土壤类型和质地。

7.2 残留污染物的潜在风险

低温 ($<500^\circ\text{C}$) 裂解过程中,原料中的纤维素和半纤维素分解产生挥发性物质,未能形成稳定结构 (石墨化程度低),致使成品生物炭热稳定性和化学稳定性不足^[200]。原料中难挥发重金属 (如 Cr、Cu、Cd、Pb 等) 超过 98.5% 富集在生物炭中,在土壤化学反应时可能析出而污染土壤。裂解过程中还不可避免生成二噁英、呋喃、多氯、二苯并呋喃、多环芳

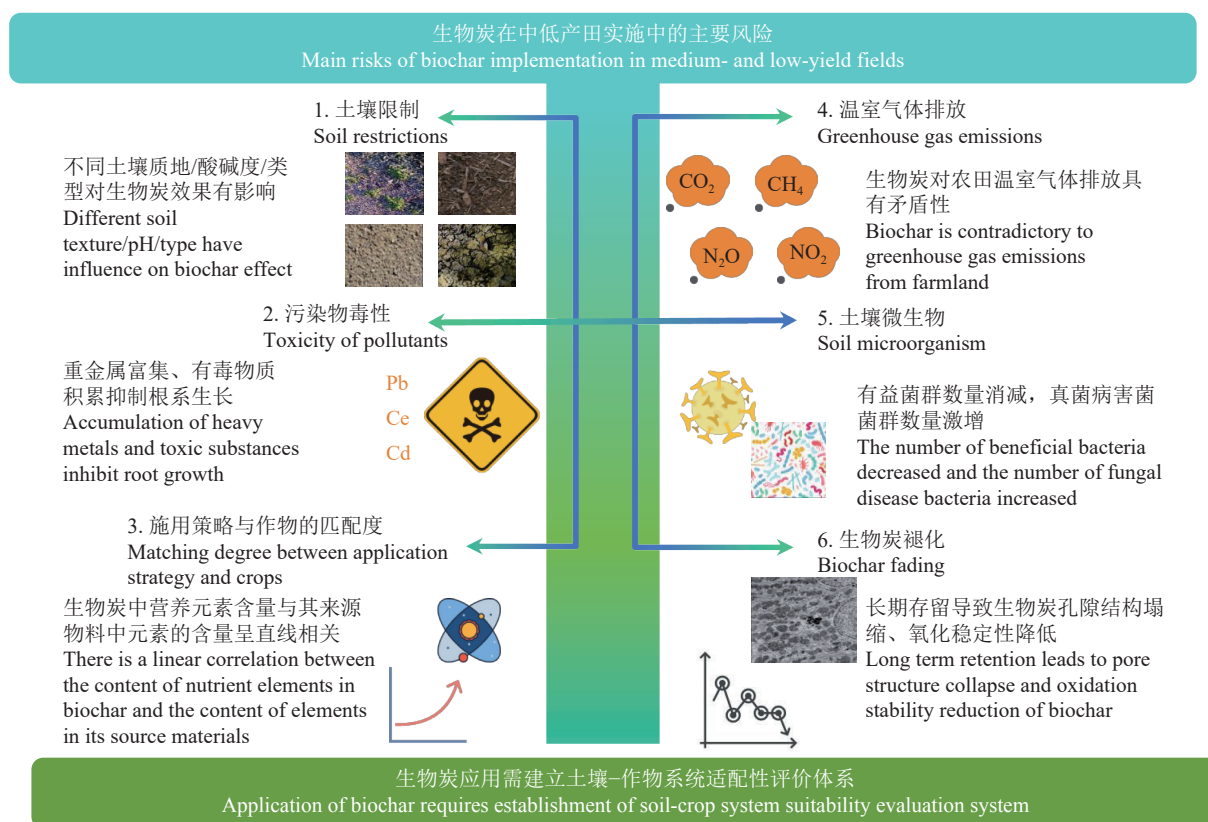


图 6 生物炭在中低产田应用中的主要风险

Fig. 6 Main risks associated with biochar application in medium- and low-yield croplands

香烃等和抑制植物生长的环境持久性自由基, 其含量随裂解温度升高而降低, 但毒性不一定减弱^[201-202]。微囊菌微生物的生态毒性试验表明, 微小颗粒生物炭易诱导细胞内损伤并提高细胞内抗氧化酶活性, 大颗粒生物炭易通过机械损伤和环境持久性自由基 (EPFR) 攻击损害细胞膜^[203]。另有试验发现, 500℃ 和 800℃ 制备的生物炭的植物毒性也与自由基诱导的氧化损伤有关, 生物炭中过氧-O 和 -HO 自由基是活性氧激化反应发生的主要物质^[204]。此外, 生物炭可吸附土壤中的农药, 机制与孔隙填充一致, 影响农药最终功效, 即使调整剂量也无法弥补损失^[205]。可能导致农药残留量增大并威胁生态安全^[206]。因此, 生物炭施用应考虑用量和安全性评估, 降低潜在环境风险。

7.3 生物炭施用量和类型不适配导致作物减产或无效

试验结果表明, 碱性土壤中将生物炭和化肥混合协同施用可能导致小麦、萝卜和葡萄产量降低。可能原因包括: 生物炭矿质养分含量低, 提高土壤碳氮比而降低土壤有效性养分浓度/比例, 进而引发减产效应^[207]。而且, 生物炭性质高度依赖原料、热

解温度及时长, 其养分含量与原料中含量呈直线相关^[208]。所以, 在中低产田改良中, 应选好适宜原料并控制好用量, 避免对土壤造成不利影响。此外, 不同生物炭的 C/N、孔隙特征等也会影响到作物的生长状况, 但目前对于这一现象, 尚无被广泛认可的解释。

7.4 生物炭对土壤微生物的抑制作用

产生抑制作用的原因包括: 生物炭滞留微生物生长可用营养物质、阻断微生物间通讯信号、释放有毒害成分以及生物炭吸附污染物影响微生物等^[209]。多数试验中, 生物炭提高土壤细菌数量, 但降低真菌数量。在真菌土传病害较重土壤中, 可采用中、高剂量生物炭抑制病害发生^[111]。

7.5 生物炭性质随存留时长发生显著褪色

扫描电子显微镜分析 (SEM) 结果显示, 生物炭在土壤中存留 1 年和 5 年后, 其结构从不规则表面向平滑结构转变, 可归因于孔隙被土壤矿物填充、孔隙结构塌陷以及生物炭表面由疏水性转为亲水性, 导致生物炭过度氧化而不稳定, 最终生物炭长期有效性显著下降 (吸附力显著降低, 碳含量降低 10.4%, 氧含量增高 40.52%)^[210]。

8 生物炭在中低产田改造中的应用总结

总结生物炭对土壤理化性质、微生物群落结构及土壤气体排放的影响可知,生物炭在中低产田中能显著驱动土壤生化反应,推动耕地质量及土壤健康水平提升。特别是在改善土壤理化性质过程中,能调节土壤微生物作用,在土壤中各类有机/无机物质的分解、转化及酶促反应,以及土壤氮循环和碳封存等过程中发挥重要作用。改良中低产田成为高产田。通过总结生物炭的农田应用效果及其对土壤生物和非生物因子的作用机制,归纳生物炭在中低产田地力提升中的使用要点如下:

1) 原料与工艺决定生物炭的功能特性。多样化的原料赋予生物炭显著的使用价值和经济价值,先进制备工艺提高生物炭的资源利用效率,并决定生物炭的理化特性。生物炭特有的孔隙结构、比表面积、含氧官能团及高含碳量等特性,是其中在低产农田发挥土壤改良、耕地质量提升和水肥利用效率提高作用的基础。例如:生物炭孔隙结构可改善土壤结构、酸碱度和质地;官能团结构在修复土壤污染、丰富土壤有机物质、减少土壤养分流失中发挥作用。但是,生物炭的负面效应及形成因素在应用中亦需重视。不同类型的中低产田应因地制宜地选择功能性生物炭,以便更有针对性地提升耕地质量。

2) 生物炭对中低产田土壤环境的物理、化学、生物调节机制。①土壤物理性质,生物炭凭借其高吸附力提高土壤含水量,并对土壤酸碱度、土壤质地、土壤容重及土壤团粒结构等起到优化作用。②土壤化学性质,生物炭在优化土壤物理性质的基础上,直接提高耕层土壤的有效养分含量,减少矿物质养分淋失,促进有机质转化和固持。同时,生物炭自身分解和释放过程为土壤提供了外源氮、碳及其他元素。尽管短期内提升土壤养分效果不显著,但随着施用时间延长,生物炭在土壤养分转化和存储方面的作用将日益凸显。③微生物群落重构,生物炭对中低产田土壤微生物的调节体现在“约束”和“增益”。一方面,孔隙结构限制体型较大微生物的定殖,降低多样性;另一方面,为微孔中微生物提供水分、矿质营养等,从而提升微生物丰度。促进中低产田土壤微生物功能发挥。

3) 应用效果受生物炭类型、土壤类型和质地的共同影响。生物炭的高碱性影响其在盐碱土中的效果。生物炭在结构松散黏壤土壤中对团粒结构的调

优效果更佳。对于砂姜黑土、红壤土等土壤容重较高、质地较黏的土壤,生物炭通过自身疏水特性,及表面官能团的理化反应,起到显著改良效果。连作障碍土壤中,生物炭通过补充土壤碳氮库、提升土壤含水量、优化土壤结构、促进土壤微生物增殖等综合效应,实现综合改良。

4) 生物炭的固碳减排潜力与时空差异。大部分研究者倾向于认为,生物炭在中低产田的固碳减排潜力显著。虽然生物炭在参与土壤中所发生的碳氮循环过程中会受土壤质地、土壤水肥条件、生物炭类别,甚至环境区域气候等因素的影响,但不可置否的一点是,施用生物炭确实是实现农林碳汇的重要举措。这主要体现在以下两方面:一是长期作用下,生物炭对温室气体排放的抑制效果更为明显。它通过改善土壤结构与微环境,降低温室气体的产生与排放,从而将更多的碳与氮固定在土壤中。二是农业废弃物资源丰富,以其为原料生产的生物炭还田比例较高,且环境风险相对较低。因此,生物炭可为增强中低产田的持续生产能力提供重要支持。

参 考 文 献:

- [1] 新华社. 第三次全国国土调查主要数据成果发布[EB/OL]. (2021-08-26) [2025-10-01]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678337.html.
Xinhua News Agency. The main data results of the third national land survey were released[EB/OL]. (2021-08-26) [2025-10-01]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678337.html.
- [2] 中华人民共和国农业部. 农业部发布全国耕地质量等级情况公报[EB/OL]. (2014-12-17) [2025-10-01]. https://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/201412/t20141217_4298677.htm.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Ministry of Agriculture releases the bulletin of "National Cultivated Land Quality Grades" [EB/OL]. (2014-12-17) [2025-10-01]. https://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/201412/t20141217_4298677.htm.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部发布《2019年全国耕地质量等级情况公报》[EB/OL]. (2020-01-14) [2025-10-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/14/content_5469074.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the people's Republic of China. The Ministry of Agriculture and Rural Affairs issued the bulletin on the quality level of cultivated land nationwide in 2019 [EB/OL]. (2020-01-14) [2025-10-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/14/content_5469074.htm.
- [4] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部发布《2022年全国耕地质量等级情况公报》[EB/OL]. (2023-03-14) [2025-10-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-03/14/content_5746596.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the people's Republic of China. The Ministry of Agriculture and Rural Affairs issued the bulletin on the quality level of cultivated land nationwide in 2022 [EB/OL]. (2023-03-14) [2025-10-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-03/14/content_5746596.htm.

- wen/2023-03/14/content_5746596.htm.
- [5] 山东省发展和改革委员会. 持续推进退化耕地治理[EB/OL]. (2025-08-01) [2025-10-02]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2025/8/1/art_91540_10472115.html. Shandong Provincial Development and Reform Commission. Continuously promoting the management of degraded farmland [EB/OL]. (2025-08-01) [2025-10-02]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2025/8/1/art_91540_10472115.html.
- [6] 汪元凤, 胡静, 胡云喜, 等. 典型丘陵地区高标准农田改造提升对耕地质量的影响—以重庆市沙坪坝区为例[J]. 西南农业学报, 2025, 38(7): 1518–1527.
- Wang Y F, Hu J, Hu Y X, *et al.* Effect of high-standard farmland upgrading in typical hilly areas on quality of cultivated land : A case study of Shapingba district, Chongqing[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2025, 38(7): 1518–1527.
- [7] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Soil Research, 2008, 45: 629.
- [8] Xiu L Q, Zhang W M, Wu D, *et al.* Biochar can improve biological nitrogen fixation by altering the root growth strategy of soybean in Albic soil[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773(1): 144564.
- [9] Purakayastha T J, Kumari S, Sasmal S, *et al.* Biochar carbon sequestration in soil—a myth or reality?[J]. International Journal of Bio-resource and Stress Management, 2015, 6: 623.
- [10] Elifgünala, Halilerdema, İsmailçelikb. Effects of three different biochars amendment on water retention of silty loam and loamy soils[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208(3): 4.
- [11] 张宇鹏, 严慧若, 朱嘉磊, 等. 土壤调理剂和石灰对粤北酸化稻田土壤的改良效果比较[J]. 南方农业, 2023, 17(23): 52–55.
- Zhang Y P, Yan H R, Zhu J L, *et al.* Comparison of the improvement effects of soil conditioners and lime on acidified paddy soil in northern Guangdong[J]. South China Agriculture, 2023, 17(23): 52–55.
- [12] 薛里, 张忠学, 齐智娟, 等. 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对黑土区稻田净碳排放的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 382–390, 441.
- Xue L, Zhang Z X, Qi Z J, *et al.* Effects of biochar and organic fertilizer addition on net carbon emission of paddy field in black soil area under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 382–390, 441.
- [13] 孙宁川, 唐光木, 徐万里, 等. 棉秆炭和炭基专用肥对棉花生长及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(1): 163–169.
- Sun N C, Tang G M, Xu W L, *et al.* The impact of cotton stalk carbon and carbon-based specialty fertilizer on the cotton growth and yield[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(1): 163–169.
- [14] 夏阳. 生物炭对滨海盐碱植物生长及根际土壤环境的影响[D]. 山东青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 2015.
- Xia Y. Impact of biochar-rhizosphere system on plant growth by affecting soil nutrient availability and microbial community in coastal saline soil[D]. Qingdao, Shandong: MS Thesis of Ocean University of China, 2015.
- [15] Bhat S A, Kuriqi A, Dar M U D, *et al.* Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: A systematic review[J]. Sustainability, 2022, 14(17): 11104.
- [16] Mohan D, Pittman C U. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review[J]. 2006, 20(3): 848–889.
- [17] 丁文川, 曾晓岚, 王永芳, 等. 生物炭载体的表面特征和挂膜性能研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1451–1455.
- Ding W C, Zeng X L, Wang Y F, *et al.* Characteristics and performances of biofilm carrier prepared from agro-based biochar[J]. China Environmental Science, 2011, 31(9): 1451–1455.
- [18] 刘泽伟, 闫思佳, 夏子皓, 等. 温度和CO₂对热解成型生物质炭孔隙结构和表面分形维数的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(17): 2925–2931.
- Liu Z W, Yan S J, Xia Z H, *et al.* Effects of temperature and CO₂ on pore structure and surface fractal dimension of pyrolytic carbonized biochar briquettes[J]. Materials Reports, 2018, 32(17): 2925–2931.
- [19] 张红美, 李珂, 朱琴, 等. 炭化时间对南疆沙化土壤物理性质和水分特征的影响[J]. 节水灌溉, 2019, (8): 59–63.
- Zhang H M, Li K, Zhu Q, *et al.* Effect of carbonization time on physical property and water characteristics of sandy soil in southern Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (8): 59–63.
- [20] 张向前, 侯国军, 张玉虎, 等. 不同产地水稻秸秆制备生物炭结构特征及其理化性质[J]. 环境工程, 2017, 35(9): 122–126.
- Zhang X Q, Hou G J, Zhang Y H, *et al.* Structural and physico-chemical properties of biochars prepared from different rice straw[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(9): 122–126.
- [21] 刘壮壮, 郭怡欣, 吕建, 等. 3种生物炭的理化性质及其对水中铵态氮和磷的吸附作用[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 1–10.
- Liu Z Z, Guo Y X, Lü J, *et al.* Analysis on physical and chemical properties of three biochars and their adsorption effects on ammonium nitrogen and phosphorus in water[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2025, 34(5): 1–10.
- [22] 荆延德, 刘兴, 孙小银, 等. 秸秆生物炭对棕壤中Cu(Ⅱ)的吸附效应及影响因素[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 998–1006.
- Jing Y D, Liu X, Sun X Y, *et al.* The adsorption effect and influencing factors of straw biochar on Cu(Ⅱ) pollution in brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(4): 998–1006.
- [23] 荆延德, 巩晨, 孙小银, 等. 棉花、花生秸秆生物炭对棕壤中Cu(Ⅱ)运移的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 50–55.
- Jing Y D, Gong C, Sun X Y, *et al.* Effects of cotton and peanut straw biochar on Cu(Ⅱ) migration in brown soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 50–55.
- [24] 马帅, 马帅辉, 尹微琴, 等. 小麦秸秆与花生壳生物炭对Cu²⁺和Zn²⁺的吸附研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(8): 1–9.
- Ma S, Ma S H, Yin W Q, *et al.* Adsorption study of Cu²⁺ and Zn²⁺ by wheat straw and peanut shell biochar[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(8): 1–9.
- [25] 张晗, 林宁, 黄仁龙, 等. 不同生物质制备的生物炭对菲的吸附特性研究[J]. 环境工程, 2016, 34(10): 166–171.
- Zhang H, Lin N, Huang R L, *et al.* Sorption of phenanthrene on biochars produced from different biomass materials[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(10): 166–171.

- [26] 韩婉祺, 刘蕾, 成洁, 等. 4种典型林业剩余物基生物炭理化性质对不同热解温度的响应[J]. 林业科学, 2025, 61(11): 138–149.
Han W Z, Liu L, Cheng J, *et al.* Response of physicochemical properties of four typical forest residue-based biochars to different pyrolysis temperatures[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025, 61(11): 138–149.
- [27] 杨海征, 袁宗琪, 徐晓林, 等. 低温裂解水稻秸秆生物炭对水体中Pb/Cd吸附的应用研究[J]. 曲靖师范学院学报, 2024, 43(3): 13–23.
Yang H Z, Yuan Z Q, Xu X L, *et al.* Application of low temperature pyrolysis rice straw biochar in Pb/Cd absorption from water[J]. *Journal of Qujing Normal University*, 2024, 43(3): 13–23.
- [28] 孙兆楠, 张永波, 赵鹏, 等. 玉米秸秆生物炭制备、表征及吸附性能研究[J]. 可再生能源, 2024, 42(12): 1587–1593.
Sun Z N, Zhang Y B, Zhao P, *et al.* Preparation, characterization and adsorption performance of corn stover biochar[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(12): 1587–1593.
- [29] 常帅帅, 张学杨, 王洪波, 等. 木屑生物炭的制备及其对Pb²⁺的吸附特性研究[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(3): 37–44.
Chang S S, Zhang X Y, Wang H B, *et al.* Preparation of biochar from sawdust and its adsorption property on Pb²⁺[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2020, 54(3): 37–44.
- [30] 张培, 李思锦, 李金磊, 等. 炭化温度对果树枝条生物质炭理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(9): 90–100.
Zhang P, Li S J, Li J L, *et al.* Effects of carbonization temperature on the physicochemical properties of fruit tree branch biomass charcoal[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(9): 90–100.
- [31] 胡颖斌, 吴孟李, 范利青, 等. 探析生物炭对Anammox工艺脱氮的影响及其机理[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 22–33, 44.
Hu Y B, Wu M L, Fan L Q, *et al.* Influence and mechanism of biochar on nitrogen removal in anammox process[J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(7): 22–33, 44.
- [32] 吴迪超, 陈超, 侯兴隆, 等. 热解温度对纤维素和木质素成炭结构的影响[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(3): 1–9.
Wu D C, Chen C, Hou X L, *et al.* Effect of pyrolysis temperature on structures of chars forming from cellulose and lignin[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2021, 55(3): 1–9.
- [33] 廖承茵, 吴郅俊, 彭柳军, 等. 生物炭概念及生物炭形成的影响因素综述[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 57–62.
Liao C J, Wu Z J, Peng L J, *et al.* A review of the concept of biochar and its influencing factors[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 41(6): 57–62.
- [34] 吕友军, 冀承猛, 郭烈锦. 农业生物质在超临界水中气化制氢的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 238–242.
Lü Y J, Ji C M, Guo L J. Experimental investigation on hydrogen production by agricultural biomass gasification in supercritical water[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(3): 238–242.
- [35] 张哲源, 陈韬, 李业伟. 两种生物质炭对水中多环芳烃萘的吸附研究[J]. 应用化工, 2022, 51(3): 653–657.
Zhang Z Y, Chen T, Li Y W. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbon naphthalene in water by two kinds of biochar[J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(3): 653–657.
- [36] 孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 等. 不同原料生物炭理化性质的对比分析[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 543–549.
Sun T, Zhu X P, Li D P, *et al.* Comparison of biochars characteristics from different raw materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(6): 543–549.
- [37] 林肖庆, 吕豪豪, 刘玉学, 等. 生物质原料及炭化温度对生物炭产率与性质的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(7): 1216–1223.
Lin X Q, Lü H H, Liu Y X, *et al.* Effects of biomass and carbonization temperature on biochar yield and characteristics[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(7): 1216–1223.
- [38] 张倩, 柳超颖, 范子哲, 等. 黍糠、菜籽饼生物炭的制备及其对重金属镉(Cd²⁺)的吸附[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 664–670.
Zhang Q, Liu C Y, Fan Z X, *et al.* On the preparation of pyrolysis of the millet bran biochar and the rapeseed cake biochar and their adsorption behavior of Cd²⁺[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(2): 664–670.
- [39] 付静薇, 贾紫雯, 杨晓欢, 等. 热解温度对生物炭提升厌氧氨氧化性能的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5695–5702.
Fu J W, Jia Z W, Yang X H, *et al.* Effect of pyrolysis temperature for biochar on improving nitrogen removal efficiency of anammox[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(12): 5695–5702.
- [40] 伏肖, 徐强, 黄晓玮, 等. 热裂解温度和原料类型对生物炭品质影响的评价—基于修复重金属污染的应用潜力[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 147–157.
Fu X, Xu Q, Huang X W, *et al.* Effects of different pyrolysis temperatures and feedstock types on biochar quality based on the application scenario for heavy metal contamination control[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 147–157.
- [41] Zhang Y M, Ma Z Q, Zhang Q S, *et al.* Comparison of the physicochemical characteristics of bio-char pyrolyzed from moso bamboo and rice husk with different pyrolysis temperatures[J]. *BioResources*, 2017, 12(3): 4652–4669.
- [42] 杨思卿, 倪钧钧, 顾中华. 生物炭热解温度、原料类型和添加量对土体裂隙的影响[J/OL]. 福建农林大学学报(自然科学版), 1–14. (2025–08–29) [2025–10–02]. [https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu\(nat.sci.\).202505029](https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202505029).
- Yang S Q, Ni J J, Gu Z H. Influence of pyrolysis temperatures, raw material type and dosage of biochar on soil crack[J/OL]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 1–14. (2025–08–29) [2025–10–02]. [https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu\(nat.sci.\).202505029](https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202505029).
- [43] 刘杰, 施胜利, 贾月慧, 等. 不同热解温度生物炭对Pb(II)的吸附研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2586–2593.
Liu J, Shi S L, Jia Y H, *et al.* Effect of the pyrolysis temperature on biochar adsorption of Pb²⁺[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2586–2593.
- [44] 刘朝霞, 刘鸣, 牛文娟, 等. 保温时间对不同秸秆生物炭肥料化利用理化特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 182–192.

- Liu Z X, Liu M, Niu W J, *et al.* Effects of holding time on physical and chemical properties of utilizing different straw biochar fertilizer[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(4): 182–192.
- [45] 牛文娟, 阮桢, 钟菲, 等. 保温时间与粒度对稻秆和棉秆热解产物组成及能量转化影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 212–219.
- Niu W J, Ruan Z, Zhong F, *et al.* Effects of holding time and particle size on physicochemical properties and energy conversion of pyrolysis product component of rice straw and cotton stalk[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(22): 212–219.
- [46] 刘静, 杨芳, 牛文娟, 等. 基于工业分析指标的秸秆生物炭热值预测[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(8): 142–148.
- Liu J, Yang F, Niu W J, *et al.* Prediction of calorific value of straw biochar based on industrial analysis index[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(8): 142–148.
- [47] 李佳璇, 王平, 万斯, 等. 高孔隙率生物炭研制及其处理废水中磷酸盐[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(11): 6395–6406.
- Li J X, Wang P, Wan S, *et al.* High porosity biochar and its treatment of phosphate in wastewater[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11): 6395–6406.
- [48] 敬凌琨, 王洪博, 曹振玺, 等. 鼠李糖脂改性对棉花秸秆生物炭结构特性及其盐胁迫下植物生长的影响[J/OL]. *材料导报*, 1–14. [2025–10–17]. <https://doi.org/10.11896/cldb.24110033>.
- Jing L K, Wang H B, Cao Z X, *et al.* Effects of rhamnolipid modification on the structural characteristics of cotton stalk biochar and plant growth under salt stress[J/OL]. *Materials Reports*, 1–14. [2025–10–17]. <https://doi.org/10.11896/cldb.24110033>.
- [49] 李祺, 王敏, 张雨辰, 等. 改性生物炭的制备及其高效气态碘固定性能研究[J]. *中国科学: 化学*, 2025, 55(11): 3212–3223.
- Li Q, Wang M, Zhang Y C, *et al.* Study on the preparation of modified biochar and its performance in highly efficient gaseous iodine sequestration[J]. *Science China Chemistry*, 2025, 55(11): 3212–3223.
- [50] 倪冰滢, 裴晓宇, 谢君, 等. 杨木和秸秆木质素基生物炭的制备及其对铅的吸附性能研究[J]. *环境工程*, 2025, 43 (11): 123–132.
- Ni B Y, Pei X Y, Xie J, *et al.* Preparation of lignin-based biochar from poplar and straw and its adsorption properties on Pb^{2+} [J]. *Environmental Engineering*, 2025, 43 (11): 123–132.
- [51] 龙巧玲, 朱俊, 谭文峰, 等. 硅酸钾改性生物炭对土壤铝硅形态和小麦生长发育及产量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2025, 44(4): 37–46.
- Long Q L, Zhu J, Tan W F, *et al.* Effects of potassium silicate-modified biochar on speciation of aluminum and silicon in soil, growth and yield of wheat[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(4): 37–46.
- [52] 迪力夏提·阿不力孜. 棉花秸秆生物炭的改性及其对As(Ⅲ)的吸附[J]. *应用化工*, 2022, 51(S2): 130–134, 144.
- Dilixiati Abulizi. Modification of cotton straw biochar and its adsorption of As(Ⅲ)[J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(S2): 130–134, 144.
- [53] 虞轶俊, 徐青山, 张均华, 等. 土壤培肥技术对土壤健康的影响途径与作用机制[J]. *中国土壤与肥料*, 2024, (2): 220–227.
- Yu Y J, Xu Q S, Zhang J H, *et al.* The influence and mechanism of soil fertilization technology on soil health[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024, (2): 220–227.
- [54] 冀咏赞, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 基于MODIS数据的中国耕地高中低产田空间分布格局[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 766–778.
- Ji Y Z, Yan H M, Liu J Y, *et al.* A MODIS data derived spatial distribution of high-, medium-and low-yield cropland in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 766–778.
- [55] 中华人民共和国自然资源部. 2023年中国自然资源公报[R/OL]. (2024–02–28). [2025–10–01]. <http://ecs.mnr.gov.cn/dhj/gk/gbytyj/202403/P020240304369959267727.pdf>.
- Xinhua News Agency. Release of major data results from the third national land survey[EB/OL]. (2024–02–28). [2025–10–01]. <http://ecs.mnr.gov.cn/dhj/gk/gbytyj/202403/P020240304369959267727.pdf>.
- [56] 中华人民共和国自然资源部. 2024年中国自然资源公报[R/OL]. (2025–03–14) [2026–03–01]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202503/content_7013521.htm.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China natural resources bulletin 2024[R/OL]. (2025–03–14) [2026–03–01]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202503/content_7013521.htm.
- [57] 杜红悦, 李京. 土地农业适宜性评价方法研究与系统实现—以攀枝花为例[J]. *资源科学*, 2001, 23(5): 41–45.
- Du H Y, Li J. Agricultural land suitability evaluation: Model and system implementation—a case study of panzhihua[J]. *Resources Science*, 2001, 23(5): 41–45.
- [58] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(7): 8–14.
- Xu M G, Lu C A, Zhang W J, *et al.* Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(7): 8–14.
- [59] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室. 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室关于印发《第三次全国国土调查耕地质量等级调查评价工作方案》的通知: 国土调查办发〔2018〕19号[S/OL]. (2018–11–29)[2026–03–01]. https://ntjss.moa.gov.cn/zcfb/201905/t20190520_6311052.htm.
- Office of the Leading Group for the Third National Land Survey of the State Council. Notice of the Office of the Leading Group for the Third National Land Survey of the State Council on Issuing the Work Plan for the Survey and Evaluation of Cultivated Land Quality Grade in the Third National Land Survey: No. 19 [2018] of the Office of the Leading Group for Land Survey [S/OL]. (2018–11–29) [2026–04–02]. https://ntjss.moa.gov.cn/zcfb/201905/t20190520_6311052.htm.
- [60] NY/T 310—1996, 中华人民共和国农业部. 全国中低产田类型划分与改良技术规范: [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- NY/T 310—1996, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Classification and improvement technical specifications for medium- and low-yield fields in China[S]. Beijing: China Standards Press, 1996.

- [61] 石全红, 王宏, 陈阜, 等. 中国中低产田时空分布特征及增产潜力分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 369–373.
Shi Q H, Wang H, Chen F, *et al.* The spatial-temporal distribution characteristics and yield potential of medium-low yielded farmland in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(19): 369–373.
- [62] 张剑峰, 马世浩, 曹玉东, 等. 我国中低产稻田主要类型及其改良研究进展[J]. 中国稻米, 2025, 31(4): 44–50, 56.
Zhang J F, Ma S H, Cao Y D, *et al.* Types and improvements of medium-and low-yield paddy fields[J]. China Rice, 2025, 31(4): 44–50, 56.
- [63] 黄占斌, 冯俊义, 马浩冉, 等. 腐植酸在旱地农业土壤改良和水肥增效中的作用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 49–54.
Huang Z B, Feng J Y, Ma H R, *et al.* Effects of humic acid on soil improvement and water and fertilizer use efficiency in dryland agriculture[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 49–54.
- [64] 中华人民共和国中央人民政府. 做好这篇“大文章”, 田间地头有答卷[EB/OL]. (2023–06–08) [2025–10–25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202306/content_6885154.htm.
The Central People's Government of the People's Republic of China. Making progress in this “important task”: Answers from the fields[EB/OL]. (2023–06–08) [2025–10–25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202306/content_6885154.htm.
- [65] 武海雯, 杨秀艳, 王计平, 等. 沙枣改善盐碱土壤养分的研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3527–3534.
Wu H W, Yang X Y, Wang J P, *et al.* A review on the improvement of salt-affected soil nutrients by *Elaeagnus angustifolia* L.[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3527–3534.
- [66] 贾毅立, 李洋, 范琳. 我国北方沙化土地综合治理对策[J]. 林业科技通讯, 2024, (9): 46–49.
Jia Y L, Li Y, Fan L. Comprehensive governance countermeasure of the desertification areas in northern China[J]. Forestry Science and Technology, 2024, (9): 46–49.
- [67] 许青山. 试述土壤改良与中低产田综合整治对农作物增产的效果[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2022, (1): 66–69.
Xu Q S. Discussion on the effect of soil improvement and comprehensive renovation of medium- and low-yield fields on crop yield increase[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full-text Edition) Natural Science, 2022, (1): 66–69.
- [68] 许怡, 陈孝杨, 牛经纬, 等. 淮河流域煤矿区受损耕地数量、质量及生态调控技术研究进展[J]. 河南农业科学, 2025, 54(8): 1–14.
Xu Y, Chen X Y, Niu J W, *et al.* Research progress on the quantity, quality and ecological regulation technology of damaged arable land in coal mining areas of the Huaihe River Basin[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(8): 1–14.
- [69] 韩丽红, 潘玉君, 高敏, 等. 贵州耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2023, 7(6): 68–73.
Han L H, Pan Y J, Gao M, *et al.* Ecological security evaluation and obstacle factor analysis of cultivated land in Guizhou Province[J]. Journal of Southwest Forestry University (Social Sciences), 2023, 7(6): 68–73.
- [70] 於冉, 余祺琪, 李雪, 等. 安徽省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2026, 34(3): 706–716.
Yu R, Yu Q Q, Li X, *et al.* Evaluation of cultivated land ecological security and analysis of obstacle factors in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2026, 34(3): 706–716.
- [71] 张慧, 刘倩倩, 李咏雪. 东北黑土区耕地系统健康评价及障碍因子分析—以肇源县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(4): 866–876.
Zhang H, Liu Q Q, Li Y X. Evaluation of cultivated land system health and diagnosis of its obstacle factors in the black soil region of northeast China: A case study of Zhaoyuan County, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(4): 866–876.
- [72] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》的通知[EB/OL]. (2021–09–16)[2026–03–01]. <http://www.ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202109/P020210915673910083593.pdf>.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on issuing the “National Plan for the Construction of High-Standard Farmland (2021–2030)” [EB/OL]. (2021–09–16)[2026–03–01]. <http://www.ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202109/P020210915673910083593.pdf>.
- [73] 孙建好, 郭全恩, 赵建华, 等. 基于甘肃省中低产田现状的改良措施及其应用效果[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(2): 139–144.
Sun J H, Guo Q E, Zhao J H, *et al.* Improvement measures and the application effects based on the current situation of middle-low yield farmlands in Gansu[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2023, 2(2): 139–144.
- [74] 张学军, 常青晓, 王小明, 等. 焦作市耕地质量保护与提升的现状与对策[J]. 农业科技通讯, 2025, (6): 42–43, 180.
Zhang X J, Chang Q X, Wang X M, *et al.* Current situation and countermeasures of cultivated land quality protection and improvement in Jiaozuo City[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2025, (6): 42–43, 180.
- [75] 贾学宇, 郝永河, 周霞, 等. 鄂尔多斯市黄河灌区盐碱型中低产田水肥高效精准利用技术集成模式—以向日葵种植为例[J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(6): 14–17.
Jia X Y, Hao Y H, Zhou X, *et al.* Technical integration model of targeted use of water and fertilizer in saline-alkali fields in yellow river irrigation area of ordos city—a case study of sunflower planting[J]. Journal of Smart Agriculture, 2023, 3(6): 14–17.
- [76] 刘俊梅, 王伟妮, 陈玉琳, 等. 内蒙古鄂尔多斯市耕地质量提升经验与发展建议[J]. 农业工程技术, 2025, 45(13): 48–50.
Liu J M, Wang W N, Chen Y L, *et al.* Experience and development suggestions for cultivated land quality improvement in Ordos City, Inner Mongolia[J]. Agricultural Engineering Technology, 2025, 45(13): 48–50.
- [77] 王韵弘, 苗琪, 李俊超, 等. 田间管理措施对滨海盐渍地区中低产田生产力的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(1): 163–172.
Wang Y H, Miao Q, Li J C, *et al.* Effect of comprehensive management measures on productivity of medium and low yield

- farmland in coastal saline areas[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(1): 163–172.
- [78] 甘元炜, 冯小杰, 李永华, 等. 施用微生物肥料对我国玉米产量影响的Meta分析[J]. *植物营养与肥科学报*, 2023, 29(12): 2247–2257.
- Gan Y W, Feng X J, Li Y H, *et al.* Effects of microbial fertilizer application on maize yield in China: A meta-analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(12): 2247–2257.
- [79] 高树琴, 王屹晟, 段瑞, 等. 关于加大在中低产田发展草牧业的思考[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(2): 166–174.
- Gao S Q, Wang H S, Duan R, *et al.* How to develop grass-based livestock husbandry in areas of low-and middle-yield fields[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(2): 166–174.
- [80] 胡云鹏, 买迪努尔·阿不来孜, 田宇欣, 等. 短期棉花秸秆生物炭添加对高寒草地苔草和高羊茅生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(8): 1815–1823.
- Hu Y P, Maidinur A, Tian Y X, *et al.* Effects of short-term biochar addition of cotton straw on the growth of *Carex liparocarpos* and *Festuca arundinacea* Schreb in alpine meadow[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1815–1823.
- [81] 周含雨, 游学极, 刘强, 等. 生物炭增效铁基物质对有机污染修复效能研究进展[J/OL]. 材料导报, 1–17. (2025–07–25). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20250716.0928.006.html>.
- Zhou H Y, You X J, Liu Q, *et al.* Advances in biochar enhancing iron-based materials for organic pollution remediation[J/OL]. *Materials Reports*, 1–17. (2025–07–25). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20250716.0928.006.html>.
- [82] 高树琴, 王屹晟. 我国中低产田土地资源和草牧业发展潜力[EB/OL]. 中国网·中国发展门户网, (2020–03–06) [2025–12–22]. http://cn.chinagate.cn/news/2020-03/06/content_75781215.htm.
- Gao S Q, Wang H S, *et al.* China's medium and low-yield farmland resources and the development potential of grassland animal husbandry[EB/OL]. China Development Gateway(CnDG), (2020-03-06) [2025–12–22]. http://cn.chinagate.cn/news/2020-03/06/content_75781215.htm.
- [83] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 棉花秸秆生物炭对新疆水稻产量、氮素利用率及稻田氮素平衡的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报, 1–12. (2025–09–10) [2025–10–17]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0087>.
- Chen Z D, Xu C C, Ji L, *et al.* Effects of cotton straw biochar on rice yield, nitrogen utilization efficiency and the nitrogen balance in paddy field of Xinjiang[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 1–12. (2025–09–10) [2025–10–17]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0087>.
- [84] Nair A. Application of biochar in potato production and its effects on soil properties, crop yield, and quality[R]. New Orleans, LA: ASHS, 2015.
- [85] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. *Soil Research*, 2008, 46(5): 437–444.
- [86] Agbede T M, Odoja A S, Bayode L N, *et al.* Effects of biochar and poultry manure on soil properties, growth, yield and quality of cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) grown in sandy soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(7): 932–947.
- [87] Ullah S, He L, Ali I, *et al.* Biochar coupled with contrasting nitrogen sources mediated changes in carbon and nitrogen pools, microbial and enzymatic activity in paddy soil[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2020, 24(11): 835–849.
- [88] 龙泽华, 王晶, 侯振安. 秸秆炭化还田和施氮量对棉田土壤有机氮组分的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(2): 154–161.
- Long Z H, Wang J, Hou Z A. Effects of cotton straw biochar returning and N application rate on soil organic nitrogen fractions in cotton field[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2019, 37(2): 154–161.
- [89] Abbasi M K, Anwar A A. Ameliorating effects of biochar derived from poultry manure and white clover residues on soil nutrient status and plant growth promotion-greenhouse experiments[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10: e0131592.
- [90] 汪志鹏. 黄河故道地区低产土壤养分均衡调控技术研究[D]. 江苏南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2020.
- Wang Z P. Study on the regulation and control technology of low-yield soil nutrient balance in the ancient bed of yellow river in Jiangsu Province[D]. Nanjing, Jiangsu: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2020.
- [91] Fiorellino N M, McGrath J M, Vadas P A, *et al.* Use of annual phosphorus loss estimator (APLE) model to evaluate a phosphorus index[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46: 1380–1387.
- [92] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤肥力利用效率与番茄生长影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2187–2193.
- Li C J, Qu Z Y, Gou M M, *et al.* Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2187–2193.
- [93] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-a review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403–427.
- [94] Chagas J K M, Figueiredo C C D, Ramos MLG. Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114403.
- [95] 张千丰, 孟军, 刘居东, 等. 热解温度和时间对三种作物残体生物炭pH值及碳氮含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2347–2353.
- Zhang Q F, Meng J, Liu J D, *et al.* Effects of pyrolysis temperature and duration time on pH, carbon and nitrogen contents of biochars produced from three crop residues[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2347–2353.
- [96] 肖飞. 紫色土区土壤氮元素特征研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(2): 307–310.
- Xiao F. Characteristics of nitrogen element in the soil at purple lands[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2010, 29(2): 307–310.
- [97] Cayuela M L, Oenema O, Kuikman P J, *et al.* Bioenergy by-products as soil amendments? Implications for carbon sequestration

- and greenhouse gas emissions[J]. *Gcb Bioenergy*, 2010, 2: 201–213.
- [98] Xu H, Wang M, You C, *et al.* Warming effects on C: N: P stoichiometry and nutrient limitation in terrestrial ecosystems[J]. *Soil Tillage Research*, 2024: 235.
- [99] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, *et al.* Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2014, 68: 402–409.
- [100] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54–61.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54–61.
- [101] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 425–428.
- Guo W, Chen H X, Zhang Q Z, *et al.* Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in North China Plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(3): 425–428.
- [102] 吉贵锋, 王鹏泽, 张书伟, 等. 生物炭对植烟褐土C/N值及烤烟根系发育的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(6): 863–867, 902.
- Ji G F, Wang P Z, Zhang S W, *et al.* Effects of biochar on C/N value of cinnamon soil in tobacco growing areas and the root growth of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(6): 863–867, 902.
- [103] Van Z L, Kimber S, Morris S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235–246.
- [104] 胡玮, 李桂花, 任意, 等. 不同碳氮比有机肥组合对低肥力土壤小麦生物量和部分土壤肥力因素的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011, (2): 22–27.
- Hu W, Li G H, Ren Y, *et al.* The effects of combined organic manure in different carbon-to-nitrogen ratio on wheat biomass and soil fertility in low fertility soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (2): 22–27.
- [105] Xu H, Cai A, Wu D, *et al.* Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C/N ratio and soil pH: A global meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105125.
- [106] Chintala R, Mollinedo J, Schumacher T E, *et al.* Effect of biochar on chemical properties of acidic soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60: 393–404.
- [107] 李世珍, 袁自强, 林琳, 等. 江河源冻土区土壤碳氮空间分布特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(12): 5246–5258.
- Li S Z, Yuan Z Q, Lin L, *et al.* Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen contents in association with permafrost variability in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 5246–5258.
- [108] 夏良文, 李丹丹, 李建华, 等. 生物炭、石灰和有机肥对土壤酸化的防控效果及其适宜条件的Meta分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(12): 2383–2389.
- Xia L W, Li D D, Li J H, *et al.* Efficacy and suitable conditions of biochar, lime, and organic fertilizer for controlling soil acidification: A meta-analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(12): 2383–2389.
- [109] 邓金环. 生物炭改良酸性土壤及提高大豆硅磷吸收转化的机理研究[D]. 广东广州: 华南农业大学硕士学位论文, 2019.
- Deng J H. Effect of biochar on acid soil improvement and enhancement of silicon/phosphorus transformation in soybean[D]. Guangzhou, Guangdong: MS Thesis of South China Agricultural University, 2019.
- [110] 宋瑶. 中低产田土壤微生物障碍因子分析及防病促生菌群的构建[D]. 石家庄: 河北科技大学硕士学位论文, 2024.
- Song Y. Analysis of soil microbial obstacle factors in low- and medium-yield fields and construction of disease-resistant and growth-promoting bacterial communities[D]. Shijiazhuang: MS Thesis of Hebei University of Science and Technology, 2024.
- [111] 鹿子晨, 李明, 薛国萍, 等. 生物炭对连作土壤微生物群落影响研究进展[J]. *蔬菜*, 2024, (11): 21–28.
- Lu Z C, Li M, Xue G P, *et al.* Research progress on the effect of biochar on microbial communities in continuous cropping soil[J]. *Vegetables*, 2024, (11): 21–28.
- [112] Warnock D D, Lehmann J, Kuypers T W, *et al.* Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300: 9–20.
- [113] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. *Oikos*, 2000, 89: 231–242.
- [114] 孙海航, 官会林, 王旭, 等. 生物炭对三七连作土壤性质及真菌群落的影响[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(2): 221–231.
- Sun H H, Guan H L, Wang X, *et al.* Effects of biochar on the soil properties and fungal community structure under continuous cropping of *Panax notoginseng*[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(2): 221–231.
- [115] 周丽靖, 王亚军, 谢忠奎, 等. 生物炭对兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)连作土壤的改良作用[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(2): 134–143.
- Zhou L J, Wang Y J, Xie Z K, *et al.* Improvement effect of biochar on the degraded soil of Lanzhou Lily field[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(2): 134–143.
- [116] Paul Eldor-A. Soil microbiology, ecology, and biochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [117] Sun D Q, Meng J, Xu E G, *et al.* Microbial community structure and predicted bacterial metabolic functions in biochar pellets aged in soil after 34 months[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 135–143.
- [118] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, *et al.* Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350°C or 700°C, in a silty-clay loam soil of high and low pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 513–523.
- [119] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2017.
- Dai Z M. The effects of biochar on acid soil improvement and the related biochemical mechanisms[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of

- Zhejiang University, 2017.
- [120] 李培培, 韩燕来, 金修宽, 等. 生物炭对砂质潮土养分及玉米产量的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1164–1169.
- Li P P, Han Y L, Jin X K, *et al.* Effects of biochar application on soil nutrients and maize yield of sandy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1164–1169.
- [121] Pan H W, Qin Y, Wang Y T, *et al.* Dissimilatory nitrate/nitrite reduction to ammonium (DNRA) pathway dominates nitrate reduction processes in rhizosphere and non-rhizosphere of four fertilized farmland soil[J]. *Environmental Research*, 2020, 186(prepublish): 109612.
- [122] Bandara Y A, Weerasooriya K D, Trexler V R, *et al.* Soybean roots and soil from high-and low-yielding field sites have different microbiome composition[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 675352.
- [123] Sun X Z, Li T T, Zhang J Z. Soil health and microbial network analysis in a wheat-maize cropping system under different wheat yields[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(4): 615–625.
- [124] 姚丽茹, 李伟, 朱员正, 等. 施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3396–3407.
- Yao L R, Li W, Zhu Y Z, *et al.* Effects of biochar application on soil bacterial community diversity and winter wheat growth in wheat fields[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6): 3396–3407.
- [125] 林小兵, 成艳红, 王斌强, 等. 生物炭连续施用对旱地红壤细菌群落结构的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023, (10): 28–35.
- Lin X B, Cheng Y H, Wang B Q, *et al.* Effects of continuous biochar application on bacterial community structure in upland red soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023, (10): 28–35.
- [126] 马泊泊, 黄瑞林, 张娜, 等. 秸秆生物质炭对根际土壤细菌-真菌群落分子生态网络的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 964–974.
- Ma B B, Huang R L, Zhang N, *et al.* Effect of straw-derived biochar on molecular ecological network between bacterial and fungal communities in rhizosphere soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 964–974.
- [127] Warnock D D, Mummey D L, McBride B, *et al.* Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: Results from growth-chamber and field experiments[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46: 450–456.
- [128] 王思宇, 刘赛男, 黄玉威, 等. 生物炭对植物土传病害的影响与作用机制研究进展[J]. *沈阳农业大学学报*, 2022, 53(5): 611–619.
- Wang S Y, Liu S N, Huang Y W, *et al.* Research progress on the influence and mechanism of biochar on soil-borne diseases of plants[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2022, 53(5): 611–619.
- [129] Chen W, Wu Z, Liu C, *et al.* Biochar combined with *Bacillus subtilis* SL-44 as an eco-friendly strategy to improve soil fertility, reduce fusarium wilt, and promote radish growth[J]. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2023, 251: 114509–114520.
- [130] Wang S, Wang L, Li S, *et al.* The win-win effects of an invasive plant biochar on a soil-crop system: Controlling a bacterial soil borne disease and stabilizing the soil microbial community network[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(3): 447.
- [131] 张贝贝, 田毅. 高、低产田土壤物理性质研究[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(15): 2832–2834, 2839.
- Zhang B B, Tian Y. Study on soil physical properties of high and low yield fields[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(15): 2832–2834, 2839.
- [132] 葛天航. 保护性耕作技术在改造中低产田中的应用[J]. *农业科技与装备*, 2015, (5): 7–8, 12.
- Ge T H. Application of conservation tillage technique in the improvement of low yield field[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2015, (5): 7–8, 12.
- [133] 熊淑萍, 王静, 王小纯, 等. 耕作方式及施氮量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(7): 767–775.
- Xiong S P, Wang J, Wang X C, *et al.* Effects of tillage and nitrogen addition rate on nitrogen metabolism, grain yield and protein content in wheat in lime concretion black soil region[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(7): 767–775.
- [134] 代红翠, 陈源泉, 赵影星, 等. 不同有机物料还田对华北农田土壤固碳的影响及原因分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 103–110.
- Dai H C, Chen Y Q, Zhao Y X, *et al.* Effects and causes of different organic materials amendment on soil organic carbon in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 103–110.
- [135] 徐聪, 吴迪, 王磊, 等. 菌渣施用对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 491–498.
- Xu C, Wu D, Wang L, *et al.* Using mushroom residues improving soil physiochemical properties, wheat root growth and yield in low-yield cropland of ancient Yellow River area[J]. *Soils*, 2021, 53(3): 491–498.
- [136] 李培培, 汪强, 文倩, 等. 不同还田方式对砂质潮土理化性质及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3665–3672.
- Li P P, Wang Q, Wen Q, *et al.* Effects of the return of organic materials on soil physical and chemical properties and bacterial number in sandy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3665–3672.
- [137] 何小妹, 江昱琳, 张洛涵, 等. 生物炭施用量对砂姜黑土团聚体特征及有机碳分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2025, 43(4): 70–78.
- He X M, Jiang Y L, Zhang L H, *et al.* Effects of biochar application rates on agglomerate characteristic and organic carbon distribution in Shajiang black soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(4): 70–78.
- [138] 邹荣松, 陈军华, 邓丞, 等. 盐渍化土壤隔盐脱盐材料及技术研究进展[J]. *世界林业研究*, 2023, 36(2): 20–25.
- Zou R S, Chen J H, Deng C, *et al.* Research progress of materials and technologies for salt isolation and desalination of salinized soil[J]. *World Forestry Research*, 2023, 36(2): 20–25.
- [139] 肖军, 刘洪波, 卢震林, 等. 冬灌条件下改良措施对重盐碱土壤脱盐效果的影响[J]. *中国农学通报*, 2025, 41(13): 110–121.
- Xiao J, Liu H B, Lu Z L, *et al.* Effect of improvement measures on

- desalting effect of heavy saline-alkali soil under winter irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(13): 110–121.
- [140] 万宝兴, 杨震发, 田园, 等. 耐盐碱水稻品种选育及盐碱地改良问题研究[J]. 农业科技创新, 2025, (14): 27–29.
- Wan B X, Yang Z F, Tian Y, *et al.* Research on breeding of salt-tolerant rice varieties and improvement of saline-alkali lands[J]. The Farmers Consultant, 2025, (14): 27–29.
- [141] 杨全刚, 孙雅杰, 王会, 等. 盐碱地改良与综合利用技术研究进展与展望[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2025, 56(3): 384–395.
- Yang Q G, Sun Y J, Wang H, *et al.* Research progress and prospect of saline-alkali land improvement and comprehensive utilization technology[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 56(3): 384–395.
- [142] 油梅霞. 棉花田土壤改良措施及其效果评估[J]. 种子科技, 2025, 43(12): 201–203.
- You M X. Soil improvement measures and effect evaluation in cotton fields[J]. Seed Science & Technology, 2025, 43(12): 201–203.
- [143] 伍海兵, 马想, 梁晶. 厨余垃圾沼渣堆肥与化学改良剂对城市搬迁地土壤团聚体形成的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 911–917.
- Wu H B, Ma X, Liang J. Effects of food waste biogas residue composting and chemical amendments on the formation of soil aggregates in urban relocation sites[J]. Soils, 2023, 55(4): 911–917.
- [144] 佟雨泽, 孙曙光. 土壤重金属污染现状及修复方法概述[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(7): 122–124.
- Tong Y Z, Sun S G. Overview of the current status and remediation methods for soil heavy metal pollution[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2025, 38(7): 122–124.
- [145] 王昕, 卿三成, 薛广海, 等. 自然修复下长停产矿山土壤重金属污染特征及风险消除研究[J]. 环境保护科学, 2024, 50(4): 163–168.
- Wang X, Qing S C, Xue G H, *et al.* Characteristics and risk elimination of heavy metal pollution in long-term suspension mine soil under natural restoration[J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(4): 163–168.
- [146] Razzaghi B A E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis[J]. Geoderma: An International Journal of Soil Science, 2020, 361: 114055.
- [147] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439–445.
- Huang C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2011, 37(4): 439–445.
- [148] 涂超. 生物炭对土壤理化性质及水分养分吸附运移特性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2020.
- Tu C. Effects of biochar on physicochemical properties and characteristics of water and nutrient adsorption and transport in soil[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2020.
- [149] 刘超, 付强, 侯仁杰, 等. 施加生物炭对东北黑土区土壤结构及融雪水入渗的影响[J]. 东北农业大学学报, 2025, 56(2): 131–143.
- Liu C, Fu Q, Hou R J, *et al.* Effects of applying biochar on soil structure and snowmelt infiltration in black soil area of Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025, 56(2): 131–143.
- [150] 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 等. 生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6847–6856.
- Meng Y, Shen Y W, Meng W W, *et al.* Effect of biochar on agricultural soil aggregates and organic carbon: A meta-analysis[J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6847–6856.
- [151] 陈超, 李娟, 李劲彬. 生物炭和秸秆施用对复配土壤物理性状及团粒结构的影响[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2017, 2(2): 36–40, 49.
- Chen C, Li J, Li J B. Effects of biological carbon and straw on physical properties and aggregate structure of compound soil[J]. Land Development and Engineering Research, 2017, 2(2): 36–40, 49.
- [152] Ghorbani M, Amirahmadi E. Insights into soil and biochar variations and their contribution to soil aggregate status—a meta-analysis[J]. Soil Tillage Research, 2024, 244: 106282.
- [153] 赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(3): 95–101.
- Zhao J K, Li J Z, Du Z L, *et al.* Effects of biochar application on soil physical properties: A review[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(3): 95–101.
- [154] Wu J, Li Z, Li Y, *et al.* Effects of rice straw biochar application rates on soil aggregate biogeochemistry and linkages to microbial community structure and enzyme activities[J]. Soil Tillage Research, 2025, 252: 106589.
- [155] 张琳, 张凤荣, 姜广辉, 等. 我国中低产田改造的粮食增产潜力与食物安全保障[J]. 农业现代化研究, 2005, (1): 22–25.
- Zhang L, Zhang F R, Jiang G H, *et al.* Potential improvement of medium low yielded farmland and guarantee of food safety in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2005, (1): 22–25.
- [156] Jeffery S, Abalos D, Prodana M, *et al.* Biochar boosts tropical but not temperate crop yields[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(5): 53001.
- [157] Crane-droesch A, Abiven S, Jeffery S, *et al.* Heterogeneous global crop yield response to biochar: A meta-regression analysis[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(4): 44049.
- [158] Cely C, Gascó G, Paz-Ferreiro J, Méndez A. Agronomic properties of biochars from different manure wastes[J]. Journal of Analytical Applied Pyrolysis, 2015, 111: 173–182.
- [159] Günel H, Bayram Ö, Günel E, *et al.* Characterization of soil amendment potential of 18 different biochar types produced by slow pyrolysis[J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2019, 8: 329–339.
- [160] 陈虹廷, 陈旭, 杜宏儒, 等. 生物炭对土壤理化性质的影响[J]. 园艺与种苗, 2025, 45(10): 108–110.
- Chen H T, Chen X, Du H R, *et al.* The effect of biochar on soil physical and chemical properties[J]. Horticulture & Seed, 2025, 45(10): 108–110.
- [161] Sikder S, Joardar J C. Biochar production from poultry litter as management approach and effects on plant growth[J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2018, 8:

- 47–58.
- [162] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 161–172.
- Chen F J, Xia H J, Liu F D, *et al.* Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 161–172.
- [163] 薛生桂, 王艳莹. 生物炭对土壤性质及温室气体排放的影响[J]. 农业技术与装备, 2020, (8): 155–156.
- Xue S G, Wang Y Y. Effects of biochar on soil properties and greenhouse gas emissions[J]. Agricultural Technology Equipment, 2020, (8): 155–156.
- [164] 温志豪, 曾路生, 柴超, 等. 生物炭-过氧化氢联合修复对火电厂土壤性质与小白菜生长的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(10): 2356–2365.
- Wen Z H, Zeng L S, Chai C, *et al.* Effects of combined biochar and hydrogen peroxide remediation on soil properties of thermal power plants and cabbage growth[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(10): 2356–2365.
- [165] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1–2): 1–18.
- [166] Antón-Herrero R, García-Delgado C, Alonso-Izquierdo M, *et al.* Comparative adsorption of tetracyclines on biochars and stevensite: Looking for the most effective adsorbent[J]. Applied Clay Science, 2018, 160: 162–172.
- [167] Stimson J F. A dictionary of some tuamotuan dialects[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1964.
- [168] 韩琳希, 吴宇茜, 钱敏, 等. 化学老化对Mg改性生物炭矿物结构及Pb²⁺吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(7): 1512–1523.
- Han L X, Wu Y Q, Qian M, *et al.* Effects of chemical aging on mineral structure and Pb²⁺ adsorption of Mg-modified biochar[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(7): 1512–1523.
- [169] 张腾鹤, 王爱勤, 赵峰, 等. 油页岩半焦基矿物/生物炭复合材料制备及其吸附性能研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(5): 65–74, 105.
- Zhang T H, Wang A Q, Zhao F, *et al.* Preparation and adsorption properties of oil shale semi-coke-based mineral/biochar composites[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2023, 59(5): 65–74, 105.
- [170] Chen Q, Feng H, Dong J, *et al.* Enhancing insight into sorption-degradation interplay: A comparative study on the removal of organics by biochar through experiments and theoretical calculations[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354(Part1): 128519.
- [171] 胡云飞, 李荣林, 杨亦扬. 生物炭对茶园土壤CO₂和N₂O排放量及微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1954–1960.
- Hu Y F, Li R L, Yang Y Y. Effects of biochar on CO₂ and N₂O emissions and microbial characteristics of tea garden soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1954–1960.
- [172] 张海龙, 武润琴, 李佳佳, 等. 根系分泌物C/N对刺槐林地土壤理化特征和土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 949–956.
- Zhang H L, Wu R Q, Li J J, *et al.* Effects of root exudates C:N on soil physical and chemical characteristics and soil respiration in Robinia pseudoacacia plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 949–956.
- [173] 蒋晨, 麻培侠, 胡保国, 等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 184–191.
- Jiang C, Ma P X, Hu B G, *et al.* Effect of biochar returning to paddy field on CH₄ emission reduction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 184–191.
- [174] 刘志伟, 刘娟, 吴家森, 等. 生物炭和腐殖酸施用对稻麦轮作系统CH₄和N₂O综合温室效应的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 220–229.
- Liu Z W, Liu J, Wu J S, *et al.* Effects of biochar and humic acid application on global warming potentials of CH₄ and N₂O in a rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(11): 220–229.
- [175] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 等. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田CO₂、N₂O排放的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6700–6711.
- Liu X R, Zhang X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw return on CO₂ and N₂O emissions from farmland in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6700–6711.
- [176] 贾小玉, 闫伟明, 上官周平. 生物炭对农田土壤温室气体排放强度的调控机理研究进展[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022, 2(2): 62–73.
- Jia X Y, Yan W M, Shangguan Z P. Research progress on the regulation mechanism of biochar on soil greenhouse gases emission intensity in farmland[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2022, 2(2): 62–73.
- [177] 高尚洁, 刘杏认, 李迎春, 等. 施用生物炭和秸秆还田对农田温室气体排放及增温潜力的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(5): 935–949.
- Gao S J, Liu X R, Li Y C, *et al.* Effects of biochar and straw return on greenhouse gas emissions and global warming potential in the farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(5): 935–949.
- [178] 吴乐诗, 李冬琴, 黎华寿, 等. 生物炭影响农田温室气体排放的研究进展[J]. 生态科学, 2024, 43(1): 257–264.
- Wu L S, Li D Q, Li H S, *et al.* Research progress on the effects of biochar on greenhouse gas emissions in farmland[J]. Ecological Science, 2024, 43(1): 257–264.
- [179] 赵小飞, 陈玉, 李军明, 等. 餐厨沼渣生物炭类型和掺杂比对湿地土壤二氧化碳排放的影响[J]. 环境工程学报, 2024, 18(9): 2588–2595.
- Zhao X F, Chen Y, Li J M, *et al.* Effects of biochar type and doping ratio on wetland soil carbon dioxide emissions from food waste digestate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(9): 2588–2595.
- [180] 闫翠侠, 杨国亮, 李典鹏, 等. 生物炭对干旱区绿洲农田土壤呼吸的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(9): 575–584.
- Yan C X, Yang G L, Li D P, *et al.* Effect of biochar addition on soil respiration of oasis farmland in arid areas[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(9): 575–584.
- [181] Fungo B, Lehmann J, Kalbitz K, *et al.* Ammonia and nitrous oxide

- emissions from a field Ultisol amended with tithonia green manure, urea, and biochar[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(2): 135–148.
- [182] Lu H H, Wang Y F, Liu Y X, *et al.* Effects of water-washed biochar on soil properties, greenhouse gas emissions, and rice yield[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2018, 46(4): 1700143.
- [183] Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, *et al.* Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191: 5–16.
- [184] 李琦, 廖娜, 张妮, 等. 棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10): 1987–1994.
- Li Q, Liao N, Zhang N, *et al.* Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1987–1994.
- [185] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395–419.
- [186] 郭峻泓, 娄运生, 邢钰媛, 等. 生物炭配施硅肥对夜间增温稻田碳排放强度的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(6): 1421–1434.
- Guo J H, Lou Y S, Xing Y Y, *et al.* Effects of biochar combined with silicate fertilization on carbon emission intensity in a rice field under night time warming[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1421–1434.
- [187] Sánchez-garcía M, Roig A, Sánchez-Monedero M A, *et al.* Biochar increases soil N₂O emissions produced by nitrification-mediated pathways[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, 2: 25.
- [188] 赵光昕, 刘宏元. 生物炭对农田氧化亚氮排放及其影响机制的研究进展[J]. *天津农林科技*, 2022, (2): 40–43.
- Zhao G X, Liu H Y. A review: Effect and its influencing mechanism of biochar on agricultural nitrous oxide[J]. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, 2022, (2): 40–43.
- [189] 张晶晶. 生物炭施用对作物产量和GHGI的影响研究[J]. *现代农业研究*, 2024, 30(8): 52–55.
- Zhang J J. Effects of biochar application on crop yield and GHGI[J]. *Modern Agriculture Research*, 2024, 30(8): 52–55.
- [190] 徐莹, 罗曼琳, 木志坚, 等. 生物炭和脱硫石膏混施对稻田碳排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(11): 2614–2624.
- Xu Y, Luo M L, Mu Z J, *et al.* Effects of mixed application of biochar and desulfurized gypsum on carbon emissions from a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2614–2624.
- [191] 黄思彤, 马亚培, 李宇轩, 等. 氮沉降背景下生物炭输入对土壤可溶性有机质和无机氮的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2023, 18(2): 56–61.
- Huang S T, Ma Y P, Li Y X, *et al.* Effects of biochar application on dissolved organic matter and inorganic nitrogen contents of soils under nitrogen deposition[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2023, 18(2): 56–61.
- [192] 林少颖, 曾瑜, 陈金梅, 等. 施用秸秆和生物炭的茉莉园土壤微生物量及细菌多样性的差异[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(8): 383–395.
- Lin S Y, Zeng Y, Chen J M, *et al.* Differences in soil microbial biomass and bacterial diversity under straw and biochar amendments in *Jasminum sambac* garden[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(8): 383–395.
- [193] 孙涛, 孙约兵, 贾宏涛, 等. 虾壳生物炭对Cd-As复合污染土壤修复效应及土壤可溶性有机碳含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(8): 1675–1685, 1606.
- Sun T, Sun Y B, Jia H T, *et al.* Effects of crayfish shell biochar on remediation of Cd-As contaminated soil and soil dissolved organic carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1675–1685, 1606.
- [194] 周静雯, 向钦佩, 项金金, 等. Meta分析生物炭对我国农田土壤的增汇减排效应[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(5): 422–429.
- Zhou J W, Xiang Q P, Xiang J J, *et al.* Impact of biochar application on soil carbon sink and greenhouse gas emissions of farmlands in China: A meta-analysis[J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2024, 47(5): 422–429.
- [195] 刘本娟, 谢祖彬, 刘琦, 等. 生物炭引起的土壤碳激发效应与土壤理化特性的相关性[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 343–353.
- Liu B J, Xie Z B, Liu Q, *et al.* Correlation between biochar-induced carbon priming effect in soils and soil physiochemical properties[J]. *Soils*, 2021, 53(2): 343–353.
- [196] 石馨晔, 霍静, 陈冲, 等. 生物炭粒径和用量对砂姜黑土强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(1): 128–134.
- Shi X Y, Huo J, Chen C, *et al.* Effects of biochar particle size and dosage on the strength of Vertisols[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(1): 128–134.
- [197] Lin Y, Cai Q, Chen B, *et al.* A review of the negative effects of biochar on soil in green infrastructure with consideration of soil properties[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2025, 55: 2563–2577.
- [198] 高亮, 李志合, 王芳, 等. 生物炭在土壤改良中的应用进展与风险分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(19): 19–31.
- Gao L, Li Z H, Wang F, *et al.* Application progress and risk analysis of biochar in soil amelioration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(19): 19–31.
- [199] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 278–284.
- Zhou Z H, Li X Q, Xing Y, *et al.* Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278–284.
- [200] 任思豪, 付永坤, 郭春春, 等. 玉米秸秆热解衍生生物炭稳定性及其改良土壤效果评估[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(14): 255–264.
- Ren S H, Fu Y K, Guo C C, *et al.* Evaluating soil enhancement and biochar stability derived from maize straw pyrolysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(14): 255–264.
- [201] 秦雅鑫, 李桂英, 安太成, 等. 生物炭环境应用过程中的生态和健康风险研究进展[J]. *科学通报*, 2021, 66(1): 5–20.
- Qin Y X, Li G Y, An T C, *et al.* Advances in ecological and health risks of biochar during environmental applications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1): 5–20.
- [202] Pan Y, Chen H, Bolan N, *et al.* Both sides of coin: Benefits and potential negative consequences of biochar in sediment

- remediation[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2023, 261: 4.
- [203] Huang J, Tan X, Duan Z, *et al.* Unveiling the hidden environmental risk of biochar: Take colony-forming *Microcystis* as biotoxicological indicator[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(3): 117219.
- [204] Bai X, Zhang S, Shao J, *et al.* Exploring the negative effects of biochars on the germination, growth, and antioxidant system of rice and corn[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107398.
- [205] Graber R E, Tsechansky L, Gerstl Z, *et al.* High surface area biochar negatively impacts herbicide efficacy[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353: 95–106.
- [206] 荣璐阁, 孙丹, 张宇. 生物炭对农田土壤微环境的影响及其在土壤污染治理中的应用[J]. *辽宁科技学院学报*, 2025, 27(1): 44–47, 72.
- Rong L G, Sun D, Zhang Y. Effects of biochar on soil microenvironment and its application in soli pollution control[J]. *Journal of Liaoning Institute of Science and Technology*, 2025, 27(1): 44–47, 72.
- [207] 南旭军, 赵保卫, 马锋锋, 等. 施加生物炭对植物营养元素的迁移转化和植物有效性的影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(11): 153–156.
- Nan X J, Zhao B W, Ma F F, *et al.* Advances in influence of biochar on migration, transportation and phytoavailability of plant nutrient elements[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(11): 153–156.
- [208] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 963–967.
- Wang D, Zhang X, Jiang C C, *et al.* Biochar research advances regarding soil improvement and crop response[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 963–967.
- [209] Xiang L, Liu S H, Ye S J, *et al.* Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126611.
- [210] Liu X, He Y, Li J, *et al.* Does biochar field aging reduce the kinetic retention for weakly hydrophobic antibiotics in purple soil?[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 69.