

我国耕地质量主控因素及提升策略

丁文成, 宋大利*, 周卫*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 /
农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要: 我国耕地质量总体偏低, 严重威胁国家粮食安全和生态环境安全。目前我国耕地质量的主控因素尚缺乏系统研究, 不同类型障碍耕地的质量提升技术策略也不明晰。因此, 本文在全面阐述我国耕地质量现状的同时, 重点调研揭示了东北黑土地、北方旱地、南方水田、南方旱地、设施农地和盐碱耕地 6 类典型耕地的突出问题, 深入分析了耕地质量问题的主控因素和耕地质量下降的驱动机制。以耕地保护与合理利用为核心, 从耕地监测、改良、培肥、利用 4 个方面, 提出维持和提升耕地质量的核心策略, 明确耕地科技创新的主要方向。阐明农田工程、保护性耕作、科学施肥、水资源高效利用、耐逆适生作物品种选育等关键耕地质量提升技术途径的适用性。旨在梳理全面综合提升耕地质量的科技需求, 为耕地保护相关政策的制定提供重要参考, 支撑耕地的农业生产和生态服务功能提升, 实现藏粮于地、藏粮于技和农业绿色可持续发展的战略目标。

关键词: 耕地质量; 障碍土壤; 耕地监测; 耕地改良; 耕地培肥; 耕地利用

Dominant factors driving the farmland quality in China and strategies for improvement

DING Wen-cheng, SONG Da-li*, ZHOU Wei*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081)

Abstract: The overall quality of arable land in China is relatively low, posing a serious threat to national food security and ecological environmental safety. There is currently insufficient systematic research on the dominant factors driving the decline in farmland quality and the technical strategies for improving the quality of different types of degraded farmland across various regions. Therefore, while comprehensively elucidating the current status of farmland quality in China, this paper focuses on investigating and revealing the prominent issues and driving factors underlying the decline in cultivated land quality across six typical types: northeast black soil farmlands, northern drylands, southern paddy fields, southern drylands, greenhouse farmlands, and saline-alkali farmlands. Furthermore, it delves into the critical mechanisms leading to the decline in farmland quality. Centered on farmland protection and rational utilization, this paper proposes core strategies for maintaining and improving farmland quality from four aspects: farmland monitoring, soil amelioration, soil fertility enhancement, and farmland utilization. It also clarifies the main directions for scientific and technological innovation in arable land by identifying primary areas of focus. The applicability of key techniques for improving farmland quality, such as farmland engineering, conservation tillage, scientific fertilization, efficient water resource utilization, and the breeding of stress-tolerant and adaptable crop varieties, is elucidated. This study aims to identify the scientific

收稿日期: 2024-07-15 接受日期: 2024-08-01

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-PP-02); 国家自然科学基金青年科学基金项目(32102492); 农田智慧施肥项目(20221805); 国家重点研发计划项目(2023YFD2300402); 国家水稻产业技术体系(CARS-01-23)。

联系方式: 丁文成 E-mail: dingwcheng@caas.cn

* 通信作者 宋大利 E-mail: songdali@caas.cn; 周卫 E-mail: zhouwei02@caas.cn

and technological needs for comprehensively improving farmland quality and to provide vital references for formulating policies related to farmland protection. These efforts will support the agricultural production and ecological service functions of farmland, helping to achieve the strategic goals of ensuring food security through land and technology, as well as promoting green and sustainable agricultural development.

Key words: farmland quality; barrier soils; farmland monitoring; soil amelioration; soil fertility enhancement; farmland utilization

耕地作为农业生产的基础资源, 保障其数量和质量直接关系到国家粮食安全、生态安全和农业可持续发展。从数量上看, 我国耕地总面积约为 1.28 亿 hm^2 ^[1], 相比于第二次国土调查时减少了 0.08 亿 hm^2 , 而人均耕地面积仅 0.09 hm^2 , 远低于 0.32 hm^2 的世界平均水平。从耕地生产力来看, 2022 年我国粮食总产量 6.87 亿 t, 人均粮食产量达到 486.3 kg, 比国际粮食安全标准高出 21.6%^[2], 可见集约化的农业生产有效地保障了我国的粮食供应能力。然而, 随着国民经济水平的发展, 谷物消费减少而动物性食物消费增加, 我国粮食需求将保持刚性增长趋势。预测 2035 年我国人均粮食需求量为 534.6 kg, 这就需要粮食产量保持稳步增长^[3]。然而, 我国耕地数量呈基本稳定趋势^[4], 尽管尚有约 0.57 亿 hm^2 的后备耕地资源, 但存在开发难度大、开发成本高等问题, 短期内难以形成有效的土地粮食生产力^[5], 因此依赖耕地数量增长来推动粮食产量增长, 短期内潜力不大。作物单产提升成为当前保障国家粮食安全的主要途径。通过高产抗逆品种选育和集约化的种植管理措施, 近几十年来我国作物单位面积产量得到了显著的提升^[6]。耕地质量是作物单产提升的基石, 便利的农田设施条件, 适宜的土壤有机质含量、土壤结构和水分条件等促进了作物生长并提高了抵御气候变化的能力^[7-8], 是作物高产和稳产的保证, 因此耕地质量的优劣是决定耕地产能上限的关键。然而, 由于我国耕地质量总体偏低, 长期以来化肥和农药的大量投入是作物高产的主要驱动, 进一步加剧了耕地的污染和退化, 影响了作物单产提升的可持续性。2021 年, 习近平总书记在中央农村工作会议上强调“良田是能够以最低的生产投入获得最高粮食产量的优质耕地资源”, 因此提升耕地质量, 为作物创造更好的生长环境, 从而提高其抗逆性, 是实现作物单产进一步提升的战略需求。

通过《基本农田保护条例》、《中华人民共和国耕地占用税法》等耕地保护政策的严格实施, 我国

耕地数量减少趋势得到了有效的遏制。尽管我国也高度重视耕地质量建设工作, 陆续出台和实施了沃土工程、高标准农田建设、土地综合整治、耕地休养生息等政策和行动, 但大部分耕地受限于立地条件差、水土资源匹配不协调、高强度不合理利用导致退化严重等因素, 耕地质量问题十分严峻。全国耕地质量平均等级仅为 4.76 等, 中低等耕地面积超过 68%^[9], 因此, 当前耕地总体状况依然堪忧。通过大量学者多年来的研究, 我国耕地质量的突出问题已比较明确, 如东北黑土地退化、北方旱地干旱和耕层变浅、南方旱地酸化贫瘠化、南方水田低产障碍、盐碱地面积扩大、设施农地污染加剧等^[10-15], 但当前针对不同区域类型的障碍性耕地, 对其质量的主控因素及提升途径仍缺乏系统性研究。随着国际粮食贸易动荡形势加剧和国内需求进一步增长, 耕地质量问题日益受到社会各界的广泛关注。本文旨在对我国耕地质量现状进行综合性评述, 通过深入探讨耕地质量在提升我国粮食安全能力方面存在的短板, 解析制约不同类型耕地质量的主控因素, 进而有针对性地提出耕地质量提升策略, 明确耕地科技创新方向, 以期为相关政策制定和耕地改良实践提供有益参考, 共同推动我国耕地质量持续改善, 确保国家粮食安全和农业可持续发展。

1 我国耕地资源质量现状

耕地质量是环境条件、土壤健康状况和农田基础设施水平等综合构成的耕地生产能力^[16], 高质量耕地通过提供适宜的土壤肥力、土壤结构、微生态环境、水分条件等提高作物抗逆性和产量, 因此耕地质量是保障粮食安全的核心, 决定了粮食生产的稳定性与可持续性^[17]。耕地质量下降已成为全球共同面临的问题。随着自然气候条件变化、农业生产方式变革以及社会经济和工业化城镇化建设快速发展, 我国耕地质量经历了一个复杂而多变的演化过程, 耕地质量无论在等级还是空间分布上, 均发生了显著变化。首先, 耕地的水热资源质量下降, 水热条

件好的长江中下游区和华南区耕地面积大幅减少,而水热条件差、只能一年一熟的东北、内蒙及长城沿线地区耕地大幅增加;其次,化肥、农药、农业机械等生产资料和装备的使用大幅度提高了作物产量,但同时也带来了土壤酸化、污染、压实的问题^[18-20],导致耕地质量的持续下降;再次,随着建设用地规模的不断扩张,大量高质量耕地被占用,尽管实施了耕地占补平衡政策,但补偿的多是刚开发或复垦的低质量耕地。城市化占用高产田面积在全国耕地面积中的比例从2000—2005年的9.7%上升到2010—2015年的15.6%,导致高产田比例不断下降^[21-22];最后,近年来国家开始重视耕地保护和土壤改良工作,通过加强有机物料投入、实施土地整治项目、完善耕地质量建设管理制度等措施,耕地质量得到一定程度的提升。因此,梳理我国耕地质量现状,是提出耕地质量提升相关的对策建议和重大工程的重要前提。

为准确摸清全国耕地质量现状,农业农村部依据国家标准《耕地质量等级》(GB/T33469—2016),组织完成全国耕地质量等级调查评价工作,通过建立分区评价指标体系,对全国9个大区和37个亚区的耕地划分了10个等级^[9]。评价结果显示,全国耕地质量平均等级为4.76等,尽管较2014年提升了0.35个等级^[23],但总体质量仍处于中等偏低水平。从图1来看,一至三等为高等质量耕地,面积0.42亿hm²,占比31.2%,基础地力较高,障碍因素不明显,粮食产能高且平稳,可按照用养结合方式开展农业生产,确保耕地质量稳中有升;四至六等为中等质量耕地,面积0.63亿hm²,占比46.8%,气候基本适

宜,农田基础设施相对较好,障碍因素较不明显,是今后粮食增产的重点区域和突破口;七至十等为低等质量耕地,面积为0.29亿hm²,占比22.0%,基础地力相对较差,生产障碍因素突出,粮食产能水平很低,是耕地质量提升的瓶颈和难点,短时间内较难得到根本改善,应持续开展农田基础设施建设和耕地内在质量建设。通过耕地质量调查评价,全面摸清了我国耕地质量家底,为坚守耕地质量红线,实现藏粮于地、藏粮于技战略目标提供重要支撑。按耕地质量提升1个等级,1hm²耕地面积增加粮食产能1500kg估算,只要全国耕地质量等级能够再提高0.26个等级,即可实现新一轮千亿斤粮食产能提升的战略目标。

2 不同区域类型耕地质量的突出问题及主控因素

当前我国耕地质量问题突出表现为基础地力低、有机质含量降低、水土流失、耕层变浅、酸化、盐碱化、污染加剧等。在前人研究的基础上,表1总结了不同区域低质量耕地或耕地质量下降的具体表现,并分区分析了耕地生产的关键障碍因素和影响耕地质量提升的主要驱动因子。我国耕地质量面临的主要问题包括以下6个方面。

2.1 东北黑土地退化

东北黑土地退化主要表现为黑土层变薄、有机质含量变低和土层压实变硬等问题。黑土的主要特征是具有较深厚的暗沃表层、良好的团粒结构、丰富的有机质含量、较高的盐基饱和度、适宜的pH值

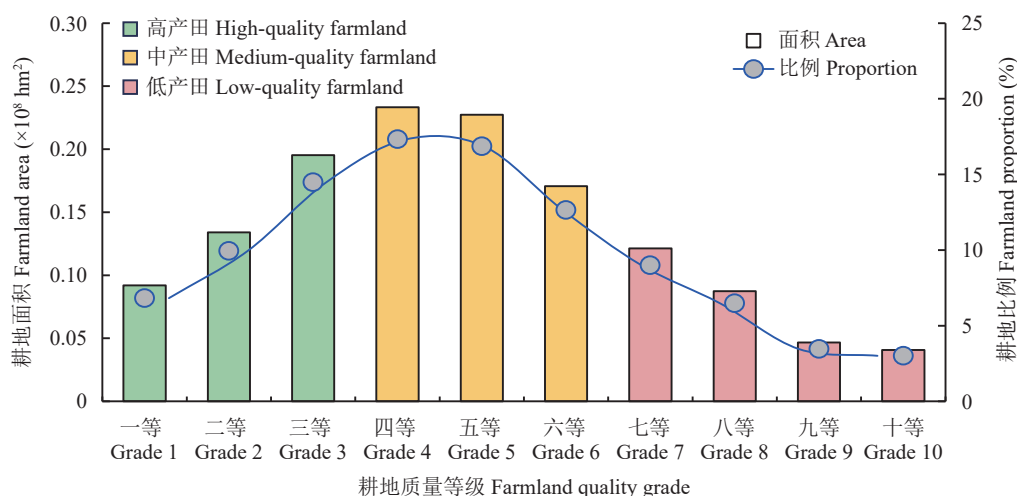


图1 我国不同质量等级的耕地面积及比例

Fig. 1 The area and proportion of farmland with different quality grades in China

表 1 我国不同区域典型耕地质量的突出问题、主控因素及改良途径

耕地类型	质量问题	主控因素	改良途径
Farmland types	Quality issues	Dominant factors	Improvement approaches
东北黑土地	黑土层变薄、有机质下降、土层变硬	风蚀水蚀、高强度利用、机械作业压实	免耕覆盖、秸秆还田、合理轮作、施有机肥
Northeast black-soil farmland	Thinned black soil layer, decreased organic matter, hardened soil strata	Wind and water erosion, intensive utilization, mechanical compaction	No-till and cover cropping, straw return, rational crop rotation, application of organic fertilizers
北方旱地	肥力下降、耕层浅化、沿淮地区粘板涝渍	有机物料投入少、干旱缺水、不合理耕作和灌溉	覆膜节水、水肥协同、适水种植、深耕深松、施调理剂
Northern dryland	Declined soil fertility, shallow plow layer, sticky and waterlogged soils in the Huai River basin	Insufficient input of organic materials, drought and water scarcity, improper cultivation and irrigation practices	Mulching for water conservation, synergistic application of water and fertilizer, water-adapted planting, deep plowing and loosening, and application of soil conditioners
南方水田	瘦、板、烂、酸、冷等多因子障碍	有机质低、耕层浅薄、深水久灌、不合理施肥、水多渍害	有机熟化、厚沃耕层、排水氧化、酸性消减、厢垄除障
Southern paddy field	Multi-factor constraints such as thinness, compaction, waterlogging, acidity, and coldness	Low organic matter content, shallow plow layer, prolonged irrigation, improper fertilization, waterlogging	Organic maturation, deep and fertile plow layer, drainage and oxidation, reduction of soil acidity, bed and ridge obstacle removal
南方旱地	土壤板结、养分贫瘠化、重金属污染	不合理的耕作和灌溉、有机肥投入少、土壤本底重金属超标	酸性改良、有机培肥、污染修复
Southern dryland	Soil compaction, nutrient depletion, heavy metal contamination	Unreasonable cultivation and irrigation, insufficient application of organic fertilizers, excessive background levels of heavy metals in the soil	Acid soil amelioration, organic matter enrichment, pollution remediation
盐碱耕地	盐碱障碍、地力水平低、盐碱地面积扩大	水资源限制、蒸发量大、灌排不配套、气候变化	灌排配套、改土培肥、种养结合、耐盐品种选育
Alkali-saline farmland	Sodic-saline constraints, low soil fertility, and expansion of saline-alkali land area	Water resource constraints, high evaporation rates, inadequate irrigation and drainage systems, climate change	Integrated irrigation and drainage, soil fertility improvement, agriculture and animal husbandry integration, development of salt-tolerant varieties
设施农地	土壤次生盐渍化、农药残留、微塑料污染、连作障碍	化肥、农药、地膜过量投入, 种植结构单一	减肥增效、合理轮作、可降解膜材应用、健康菌落构建
Protected farmland	Secondary soil salinization, pesticide residues, microplastic pollution, and continuous cropping obstacles	Excessive usage of chemical fertilizers, pesticides, and plastic mulch, monotonous planting structure	Reduced fertilizer application for increased efficiency, rational crop rotation, application of biodegradable mulching materials, construction of a healthy microbial community

和土壤容重^[12]。然而, 由于农田防护林体系破坏, 风蚀水蚀频繁发生, 导致黑土层越来越薄^[24]。据调查, 黑土区平均每年流失 0.3~1.0 cm 的黑土表层, 黑土层由开垦前的 80—100 cm 下降到 20—40 cm^[12], 变薄耕地比例约 50%。黑土具有丰厚的有机质, 碳储量巨大, 然而由于高强度利用的同时忽视秸秆、有机肥等有机资源的还田, 导致有机质含量从开垦初期的 8%~10% 下降到目前的 2.5%~3.5%^[25], 而从黑土中损失到大气碳越来越多, 使土壤从碳汇转为碳源^[26], 导致黑土愈来愈瘦, 变瘦耕地比例约 52%。另外, 东北地区农业机械化程度普遍较高, 机械播种、施肥、收获反复碾压导致土壤容重增加, 土壤

板结, 孔隙减少, 团粒结构不断退化, 通透性变差, 入渗能力下降, 保水保肥性能减弱, 抵御旱涝能力降低, 导致黑土愈来愈硬, 变硬耕地比例约 46%。

2.2 北方旱地干旱贫瘠

北方旱地质量问题主要表现为水资源短缺制约耕地产能提升, 土壤肥力低依赖外源养分大量投入, 耕层浅化导致蓄水保肥能力差; 另外, 沿淮地区存在粘、板、涝、渍等作物生长障碍因子。我国旱地农业主要分布在秦岭淮河以北地区, 包括干旱、半干旱偏旱、半干旱、半湿润偏旱和半湿润区等主要类型区, 水资源严重短缺, 降水量少而分布不均, 自南而北、自东向西递减, 降水量 70% 集中

在 6~9 月份,在其余时间里旱灾频繁,导致地下水严重超采。万炜等^[27]研究发现,燕山—太行山山麓平原、冀鲁豫低洼平原和黄淮平原旱地农业区的光温-水-土生产力在近 20 年间逐渐降低。北方旱作区耕地由于土壤基础肥力差,加之长期高强度利用,导致大部分土壤有机质含量在 10 g/kg 以下,氮磷养分含量也处于较低水平。该区域典型耕作制度是小型农机具浅耕作业,长期浅耕及大量施用化肥引发了耕层结构性障碍,例如,耕层浅化(<12 cm)、犁底层上移、紧实度增加等^[28],以及功能性障碍,例如有机质含量降低、土壤板结、耕性变差等^[29]。

2.3 南方旱地酸化贫瘠

南方旱地耕地质量问题主要表现为立地条件较差,地形起伏较大,山地土壤养分贫瘠,部分耕地严重酸化。南方地区的旱地主要分布在山区坡地,河流水上不去、又没有托水层导致地下水缺乏,只能依靠降雨种植玉米等旱作物,如西南石灰岩山区。这些地区立地条件较差,土层较薄,土壤养分贫瘠,基础地力较低,水利设施条件落后,灌溉条件不足,部分耕地存在障碍因素。刘冬碧等^[30]研究结果表明,该区域类型土壤有机质和铵态氮含量处于极低水平,约 80% 的土壤缺钾、缺锌,50% 的土壤缺锰、缺硫,40% 的土壤缺硼,25% 的土壤缺磷,少数土壤轻度缺镁。此外,南方旱地因过量施用氮肥和氮沉降导致土壤酸化问题严重^[18,31],约有 14.5% 的耕地严重酸化,且酸化程度高于水田。例如,华南地区旱地土壤 pH 值(5.45)低于水田(5.74)和水旱轮作(5.47)^[32]。土壤 pH 值下降,不仅影响作物的根系发育和养分吸收,而且会活化土壤中的重金属,导致土壤及农作物中重金属含量超标^[33]。

2.4 南方水田低产障碍

我国南方低产水田耕地的面积约为 767 万 hm^2 ,占南方全部水田面积的 1/3 以上。不同类型低产水稻土的质量特征与低产成因各不相同,其低产障碍主要可概括为瘦、板、烂、酸、冷等土壤生产障碍特性^[14],5 类低产水稻田的关键限制因子包括:1) 华中双季稻区黄泥田(瘦),土壤熟化程度不高,土质粘重或粉沙粒含量高,缺乏有机质(<25 g/kg),水稳性团聚体低(<30%),酸性大,易板结,透水性差;2) 华中单季稻区白土(板),耕层浅薄(<12 cm),土壤漂洗严重,养分贫瘠,粘粒含量少(<7%),粗粉沙含量高,易淀浆板结,保肥供肥性差;3) 沿湖稻区潜育化水稻土(烂),土壤深水久灌,氧化还原电位

低(<200 mv),通气性差,供肥缓慢,秧苗易发僵或坐兜,产量比正常水稻产量低一半以上;4) 华南稻区反酸田(酸),土壤酸度高($\text{pH}<5.5$),还原性毒物多(全硫含量 0.2%~3%),土壤质地粘重,耕性差,同时土壤磷养分缺乏;5) 西南梯田稻作区冷泥田(冷),土壤水多渍害(Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 毒害>1200、35 mg/kg),土壤质地粘重,通气性差,干旱季节漏水漏肥,春季土温低^[34-37]。

2.5 盐碱耕地水资源限制

盐碱土是盐土和碱土的统称,指含盐量在 0.2% 以上,或者土壤胶体吸附一定数量的交换性钠,碱化度在 20% 以上,对作物正常生长有害的土壤。盐碱耕地是我国当前中低产田的最主要类型之一,主要存在水资源缺乏、灌排工程不配套限制土壤盐基离子淋洗,沙化、荒漠化严重,耐盐种质不足,土壤养分贫瘠,生产力水平较低等问题。我国可利用盐碱地总面积约 1993 万 hm^2 ,其中盐碱耕地面积约 760 万 hm^2 ,按照地理区位、土壤因素、气候条件以及盐碱成因等,大致可分为 5 大类型区:一是西北内陆盐碱区,属于极端干旱荒漠盐土区,包括甘、青、新等省(区)的广大干旱、半干旱内陆区。该区干旱少雨,植物生长依赖灌溉,盐碱地面积大且连片分布,土壤含盐量高,盐分以硫酸盐为主。该区盐碱地形成的主要原因是气候干燥和灌溉技术落后、防渗渠建设不完善,排水设施田间配套率低,工程老化、淤积严重等因素^[38]。二是黄河上中游盐碱区,包括蒙、宁、甘等 3 省(区)的引黄灌区。由于使用含盐的黄河水灌溉,且大水漫灌、灌排比例失调,造成地下水位急速抬高,而气候干旱、蒸发强,造成次生盐碱化强烈^[39]。三是东北松嫩平原盐碱区,主要为苏打碱化土,土壤总含盐量不算太高,但碳酸钠、重碳酸钠含量大导致 pH 值很高,物理结构不良,质地粘重,具有胶结性强,透水性差等特点^[40],“湿时兜水不漏,干时刀枪不入”,治理困难大。四是滨海盐碱区,主要分布在冀、辽、苏、浙、鲁等 5 省的沿海地区,这些区域地势低洼平坦,受海水盐渍影响。滨海盐碱化土壤均直接发育于盐渍淤泥,离海岸越近含盐量越高^[41]。同时地下水水位和矿化度均高,结构差、脱盐困难。五是黄淮海平原盐碱区,包括京、津、冀、苏、皖、鲁、豫等 7 省(市)的广大平原地区。由于季风性气候导致地下水位上升、蒸发增加,而降雨和灌溉又产生淋盐作用,其最显著的特点就是季节性积盐和脱盐的频繁

交替,但总体上向上累积的盐分超过淋洗的盐分^[41]。

2.6 设施农地污染加剧

设施耕地主要种植蔬菜等园艺作物,具有高投入、高产出和高强度利用的特点。由于长期受相对封闭环境条件影响,土壤性质发生剧烈变化。耕地质量下降的主要表现包括设施土壤次生盐渍化、污染物累积、连作障碍严重等,而且多种形式的土壤退化经常同时发生。我国设施耕地施肥量大,以设施蔬菜氮肥投入为例,单季氮肥施用量为 500 kg/hm² 左右(包括化肥和有机肥)^[42-43],是粮食作物的 2~3 倍,而周年氮肥投入量在 1000 kg/hm² 以上,远高于欧洲设施蔬菜每年 650 kg/hm² 的投入水平^[44],而氮肥利用率却仅有 19%^[45]。过量施肥导致耕层土壤养分大量累积,加之封闭环境温度高蒸发量大,缺少自然降水对土壤的淋溶作用,导致设施土壤次生盐渍化现象普遍^[46]。据调查,设施蔬菜栽培土壤的平均盐度为 4680 mg/kg,是质量评价标准的 2 倍以上^[47]。此外,过量施肥也加重了生态环境负载,养分流失导致地表和地下水污染、温室气体排放增加^[48-50]。同时,设施土壤存在显著的农药、重金属、抗生素、微塑料等污染物累积问题,严重威胁农产品质量安全。设施畜禽粪便等农家肥投入巨大,平均达 89.7 t/hm²

(鲜重)^[15],规模化养殖场来源畜禽粪便的重金属和抗生素含量较高,是设施土壤污染的重要来源。农膜和化学农药也在设施栽培生产中大量使用,农膜残留导致设施土壤微塑料累积^[51],滥用有机磷、拟除虫菊酯类、氨基甲酸酯类等杀虫剂和杀菌剂农药导致土壤有机污染^[52-53]。设施土壤由于高度集约化和长期单一化连作,土壤微生态环境破坏、根系分泌自毒物质导致连作障碍问题严重^[54]。特别是随着设施栽培年限延长,土传病害发生频次增加,据统计 5 年以上的大棚出现连作障碍的高达 80% 以上,连作 20 年以上的几乎达 100%^[55]。

3 耕地质量提升策略与技术途径

3.1 耕地质量提升的核心策略

针对我国耕地质量整体不高、问题复杂多变的现状,考虑新时代背景下对耕地质量的新需求,本文以耕地保护与利用为核心,以“发现问题—消减障碍—提升地力—生态服务”为总体思路,提出从“耕地监测、耕地改良、耕地培肥、耕地利用”4 个视角开展耕地质量提升策略创新研究(图 2),推进耕地质量的全面综合提升,实现生产和生态目标的协调统一。

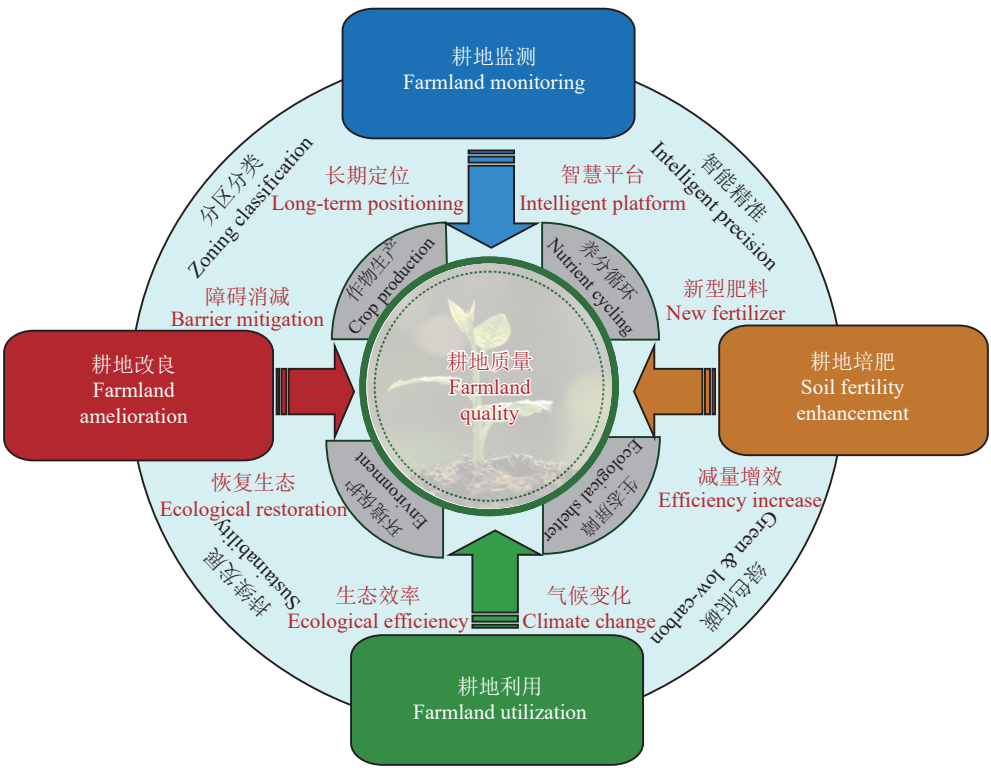


图 2 耕地质量提升的核心策略路径
Fig. 2 Core strategic pathways for improving the quality of farmland

3.1.1 耕地监测向长期定位联网及智慧化监测发展

耕地监测是耕地质量评价的基础。通过实施定期的、系统的耕地监测,及时了解和全面掌握耕地的数量、质量及其变化趋势,发现耕地质量下降的区域和障碍因素,为耕地质量提升策略的制定提供方向。国内外围绕耕地质量监测方法开展了大量研究。传统耕地质量监测主要采用区划布点—样品获取—分析检测—数据分析的方法,对土壤理化特征、耕地产出能力和环境质量开展监测。例如,美国采用格网法布设覆盖全美 50 个州的国家资源监测点位,每年采集土壤样品检测,并调查农作物类型、耕作制度、水土保持措施、灌排条件等数据,并将监测结果编制到国家资源清单^[56]。欧盟同样采用网格法,构建了覆盖整个欧盟成员国的土壤和土地利用类型的监测样点网络,定期对耕地利用情况和质量状态进行评估和分析^[57]。加拿大为应对全国性耕地质量退化问题,在全国建立了 23 个基准点构成基准监测网络,其中 2 个监测点邻近卫星遥感对照地点,用于对农场历史、地形部位、土壤特征等指标开展监测^[58-59]。尽管国内外学者在耕地质量监测指标体系方面做了大量工作,但在监测指标分区选取方面开展的研究还不够广泛,存在评价指标体系与区域差异性匹配不高的问题,而且目前评估指标主要集中于物理和化学指标,生物学指标涉及较少,对土壤健康反映度不够。因此,围绕作物生产力、土壤健康和生态可持续发展耕地质量综合评价指标体系是耕地监测的当务之急。

高精度遥感、5G、物联网等高新技术的发展,推动了耕地监测朝智慧化方向发展。遥感以其覆盖面积大、实时性强等优势广泛应用于耕地资源信息提取,特别在地理环境恶劣、交通条件不便、常规手段难以获取数据的区域,可以对耕地资源进行全天候、全覆盖、多分辨率、多尺度的监测。耕地质量监测越来越注重传统方法与遥感技术的结合。例如,世界银行、联合国粮农组织等采用土壤样本分析和遥感影像监测相结合的方法,对东非部分国家的耕地质量进行了监测^[60]。我国对地观测技术也处于快速发展阶段,遥感数据已广泛应用于耕地资源调查监测工作中,主要用于耕地数量调查、耕地利用情况及变化监测、农作物精准识别及产量估算、干旱灾害预警等方面^[61]。目前,遥感数据对于精细尺度的耕地质量反演技术仍具有巨大发展空间,完善耕地质量提升策略对于高精度土壤科学大数据的需求迫切。同时,促进遥感与物联网、人工智能、云计

算等技术进一步融合,并加强在耕地监测领域的应用,是实现耕地质量智慧化实时监测的关键途径。

此外,长期定位监测是掌握耕地质量演变规律的主要手段。因此,农业农村部于 1984 年开始在全国开展基础地力长期定位监测,由中国农业科学院原土壤肥料研究所牵头构建国家土壤肥力与肥料效益监测长期试验网,覆盖我国部分关键带 8 个土类。中国科学院也于 1988 年设立土壤肥力与肥料效益长期定位监测试验站。但这些监测点布置标准不一,监测指标体系各异,监测网点的数量和精度存在较大差异,不能做到部门间的数据整合汇总与共享^[62]。目前国际上长期定位监测已从独立定位试验监测走向整合和网络研究。例如,长期土壤生态系统研究已经纳入美国科学基金会地球关键带探测网络^[63-64],欧盟在第七框架下,开展了欧洲各国流域为主体的土壤过程及功能联合监测研究。我国应当整合耕地监测资源,建立全国统一的耕地质量监测布设网络体系,实现耕地质量联网监测。聚焦地球关键带过程与耕地质量演变,关键带物质迁移与循环过程对耕地质量的影响,阐明耕地质量变化机理,为因地制宜开展退化耕地培肥改良与治理修复提供科学依据。

3.1.2 耕地改良迫切需要解决瘠薄化、酸化、盐碱化等全国性的土壤退化问题 前文介绍了我国不同区域及类型耕地质量的主要问题,而全国性的耕地质量问题主要是土壤瘠薄化、酸化、盐碱化等,尤其是受气候变化、不合理利用等因素影响,存在这 3 类问题的耕地面积比 20 世纪 80 年代明显增加。障碍土壤改良是提升耕地质量、恢复耕地生态功能的必要手段。因此,重点针对这 3 个典型问题开展退化机理与阻控关键技术攻关,是全面提升耕地质量的迫切需求。

土壤瘠薄化主要表现为有机质含量低、结构破坏导致蓄水保肥能力差以及耕层变浅导致养分供应能力降低,我国东北黑土地、北方旱地、南方旱地均存在此类问题。其中,东北黑土地的“变薄、变瘦、变硬”问题为典型,东北黑土地自开垦以来,长期高强度利用加之风蚀水蚀,导致土壤有机质含量和黑土层厚度大幅下降的趋势仍未得到根本遏制。我国耕地长期浅耕作业以及长期大量施用化肥导致耕层变浅、犁底层上移、紧实度增加、板结、耕性变差^[28-29]。2017 年全国耕地质量监测数据表明,耕层厚度小于 20 cm 的耕地比例超过 65%,土壤容重大于 1.3 g/cm³ 的占 50% 左右,耕层土壤有机碳储量

仅为 $C\ 32.90\ Mg/hm^2$ ^[65]。据 Ma 等^[8]估测, 实现小麦、玉米和水稻产量潜力的土壤有机碳含量分别为 $12.7\sim 13.4$ 、 $43.2\sim 43.9$ 、 $31.2\sim 32.4\ g/kg$, 远高于目前我国耕地土壤的有机碳含量水平。土壤有机质不足直接影响土壤基础养分的矿化和供应能力、肥料养分的保持和周转以及土壤结构的稳定性和抗压性, 从而降低了耕地的增粮潜力, 同时也削弱了抵御气候变化的能力^[7]。当前, 亟需加强对我国耕地瘠薄化机理与阻控关键技术研究, 针对不同区域耕地资源特点, 集成创新以增加耕层厚度和提升土壤有机质为核心的耕地退化阻控技术模式。

由于不合理开发利用和粗放式水肥管理, 导致我国耕地的酸化问题较为突出。我国旱地、水旱轮作、水田土壤 pH 值分别为 6.7、6.5、5.8^[32]。对比 20 世纪 80 年代第二次全国土壤普查数据, 我国酸性土壤总面积增加 $64.5\ 万\ km^2$, 表明我国土壤酸化现象较为普遍, 其中东北区、黄淮海、长江中下游区、华南区强酸性土壤 ($pH\leq 5.5$) 的耕地面积占比分别增加了 2.6%、2.2%、14.9%、1.2%^[66]。以往经常将我国南方红黄壤地区总面积等同于我国酸化耕地面积, 忽视了我国其他地区的酸化耕地。相对于酸性土壤的酸化, 东北区的中性土壤和弱碱性土壤及黄淮海的弱碱性土壤酸化速率大, 对耕地质量的潜在威胁更深。同时, 经济作物农田土壤的酸化现象比粮食作物更为严重^[18], 也需引起足够重视。这是由于经济作物化肥的大量投入, 化肥施用在土壤酸化过程中贡献最高, 贡献率达 55.1%, 其次为作物收获 (34.2%) 和酸沉降 (6.8%)^[67]。耕地酸化引发重金属污染风险、生物多样性退化、生态功能不平衡等土壤健康问题凸显, 严重影响耕地产能提升、作物优质安全与营养健康, 制约了现代农业高质量发展。当前, 耕地酸化研究的关键科学问题包括土壤酸化形成机制与消减机理不明、作物酸害阈值不清, 区域尺度土壤酸化风险预测研究不足。酸化防治亟待突破的关键技术问题是: 针对酸化治理技术落地难, 建立分区分类的酸化治理轻简化技术模式; 针对酸化治理产品成本高, 开发出施用简便、经济长效、生态环保的新型酸性土壤改良剂; 针对酸化治理技术应用和监管规范缺乏, 构建统一的酸化耕地治理技术规范和标准体系。

我国盐碱地广泛分布于东北、华北、西北、长江中上游及滨海的广大区域。近年来, 习近平总书记在山东、河北考察及中央财经委员会第二次会议上, 反复强调开展盐碱地综合利用对于拓展农业生

产空间, 提高农业综合生产能力, 保障国家粮食安全的战略意义。轻中度盐碱耕地如果得到有效改良, 存在着较大增产空间, 在水资源保障条件下, $1\ 万\ hm^2$ 耕地可增产 $1500\ kg$ 以上, $760\ 万\ 万\ 亩$ 盐碱化耕地年均可增产 $114\ 亿\ kg$, 相当于新增 $190\ 万\ 万\ 亩$ 耕地 (按 $6000\ kg/hm^2$ 产量测算), 对提升粮食安全保障能力意义重大。然而, 目前全国盐碱地类型、分布、数量和盐碱化程度及相关水资源、水利工程等情况底数不清, 迫切需要系统谋划盐碱地开发利用的布局 and 规模。契合新时期生态保护和高质量发展新需求的盐碱地生态治理技术不足, 要聚焦绿色、高效、低成本目标, 重点突破耐盐碱农作物品种选育、抗盐绿色栽培、生物生态强化、水盐智能精准调控、盐碱地增碳储汇等新技术及产品, 加大节水条件下高效脱盐、暗管智能控排盐等现代工程技术与关键装备的研发力度, 围绕耐盐碱作物品种构建以土壤绿色调理、地力培育、高效节水等为核心的盐碱地适应性改良技术体系, 突出技术研发的针对性和实践性。

3.1.3 耕地培肥向绿色高效、精准智能与可持续发展

我国耕地土壤肥力基础薄弱, 且区域差异大, 整体居世界中下游水平^[68], 耕地基础地力对粮食产量贡献率仅为 50%, 远低于欧美国家的 70%~80%^[69]。加之我国耕地长期高强度、超负荷利用背景下, 土壤肥力水平持续下降, 耕地综合生产能力下降风险加剧。我国耕地粮食产能实现率较低, 粮食产量提高仍有巨大潜力^[70], 而土壤肥力持续提升是实现耕地产能进一步提升和肥料减量增效的前提。通过高效培肥实现耕地高强度利用下的作物高产、养分高效、环境友好等多重目标, 成为当前耕地质量发展的重要任务。然而, 目前耕地培肥与作物高产高效难以协同, 其突出问题主要表现为: 在养分循环方面, 耕地高强度利用下养分循环机制尚不明确, 土壤肥力维持机理不清, 培肥增效调控途径缺乏; 在肥料创制方面, 安全、环保、可降解的绿色生物基膜材料缓控释肥不足, 养分释放与作物吸收难以同步, 生物肥料、水溶性肥等功能肥料施用占比依然较低, 肥料产品与施肥机械匹配度不高; 在施肥技术方面, 在小农户和规模化农场长期并存条件下, 缺乏适应小农户田间尺度的轻简、精准、智能推荐施肥方法, 以及适应大农场作业的感知决策能力及配套的智能化机械装备。

在农业高质量发展的新形势下, 我国耕地培肥要向绿色高效、精准智能与可持续方向发展。需要

重点在以下几个方面取得突破：一是揭示土壤-作物系统养分循环过程与土壤健康维持机制，重点阐释耕地高强度利用下外源无机养分转化与损失阻控机理，明确土壤肥力维持机制与有机质提升途径，深入挖掘土壤微生物组在养分资源高效利用中的功能潜力，开展土壤碳氮循环模型模拟与未来场景预测；二是新型绿色高效肥料创制与应用，重点加强与生物学、材料学、化学等交叉融合，阐明肥料养分释放与作物吸收同步机制，突破新型绿色生物基膜材与养分释放精准调控，揭示肥水协同增效机制与产品创新，开展基于微生物组的功能性肥料创制与应用；三是构建智能化推荐施肥技术与装备。重点推进智能化大数据推荐施肥方法研发，强化基于传感器和信息技术的养分实时诊断技术，优化大数据施肥决策模型与配套机械，明确农田养分资源高效利用的生态功能与环境效应，实现养分协同优化与精准管理。

3.1.4 耕地利用需要提升生态功能和抵御气候变化能力 可持续的耕地资源利用方式是落实耕地保护、维护粮食安全的重要抓手。传统的耕地利用模式只关注单一的农业生产功能，这种模式往往过度依赖化肥、农药、农膜等化学投入品，导致土壤健康水平下降、水体污染、生物多样性降低等^[71-74]，耕地利用的生态问题严峻。这些问题不仅影响了耕地的可持续利用和粮食安全，也对生态环境和社会经济发展带来了负面影响。我国的农业绿色转型发展方案要求耕地利用过程中融合面源污染防治、低碳等绿色理念，以应对耕地绿色转型发展新挑战^[75]。从国际上看，西欧国家、美国、加拿大以及日本、韩国等东亚国家普遍实施了农地多功能管理模式，通过推行有机综合农场、种养结合、产业多样化经营等措施，实现了耕地的多功能化利用，为我国的耕地利用模式转型提供了有益的借鉴。随着我国社会经济水平的不断发展和生态文明建设的推进，人们对农产品的需求不仅仅满足于数量，更加关注食品安全，注重农业生产的长期效益和可持续发展。耕地利用需要适应这种需求变化，实现耕地利用可持续集约化转型。通过优化农业产业结构、提高农业生产资料利用效率、发展循环农业等措施，突破土壤健康、污染防治、固碳减排等关键技术，推进耕地利用由单一生产功能向生产、环境、生态服务多功能拓展，发挥耕地的生态屏障、水源涵养、气候调节等生态服务功能，提升我国耕地利用的生态效率^[76]，减少对自然资源的过度消耗和破坏，缓解生

态环境压力，推动耕地资源的可持续利用。

随着全球气候变化的加剧，干旱、洪涝、热害和冻害等极端气候事件频发，对作物高产稳产构成了严重威胁。21 世纪以来，我国极端天气气候事件种类多、频次高，影响范围广，灾害共生性和伴生性显著。近 20 年是百年来我国最暖时期，且不同地区间升温幅度差异明显，北方地区升温速率明显大于南方地区，西部地区大于东部地区，华北、华南和西北地区平均年降水量波动上升，而东北和华东地区降水量年际波动幅度增大，易涝易旱^[77]，近年来形成多次“异常性、极端性、高影响”农业气象灾害，年均受灾面积高达 2067 万 hm^2 ，年均粮食损失 290 亿 kg 。面对气候变化带来的挑战，耕地利用需要采取多种策略来适应，通过改进耕作制度、推广节水灌溉技术、选育抗逆性强的作物品种、加强农田基础设施系统化建设、推广农业保险制度等措施，提高耕地抵抗力及应对极端气象灾害的韧性。气候变化背景下，区域水热因子的匹配不协调状况更为突出，需要进一步优化全球气候变化背景下的耕地综合利用模式。制定耕地利用规划，明确不同区域、不同类型耕地的功能定位和发展方向，加快发展适水种植模式，推动水肥一体化技术应用，发展多样化种植模式及配套水肥高效利用绿色生产技术体系，促进区域种植结构优化调整，提高耕地资源的综合利用效率。

3.2 耕地质量提升的关键技术途径

在耕地质量提升的技术层面上，应以耕地障碍消除和地力提升为核心，聚焦耕层瘠薄化、土壤酸化、盐碱化、土壤污染、连作障碍等关键问题，针对不同类型耕地质量的主控因素，科学选择和集成运用工程技术、农艺措施、抗逆育种、生物工程等手段，实施耕地和土壤改良、修复和定向培育，全面提升耕地质量等级，支撑农业可持续集约化发展。

3.2.1 农田工程技术 针对耕地质量退化问题，我国陆续出台和实施了沃土工程、高标准农田建设、土地综合整治等政策和行动，针对田块规模、田块破碎度、田块规整度、灌溉保证率、排水条件、田间道路通达度、耕作距离、林网化程度等指标，主要实施土地平整、田间道路修筑、农田水利兴建和农田防护林网等工程技术措施，以提升耕地质量。截至 2023 年底，我国已经累计建成超过 6667 万 hm^2 高标准农田，农田基础设施条件不断改善，实现耕地规模化、粮食专业化生产，提高了区域土地资源

利用率。通过工程技术手段对破碎地块进行整理, 实现耕地地块形状规则、地面平整和集中连片等目标, 为农业机械的进出和作业提供必要条件, 是提高农业机械化普及率, 减轻劳动强度, 提高农业生产效率的主要途径。针对旱地水资源匮乏和灌溉条件不足等问题, 建立和完善农田灌溉系统和现代化排水系统等基础水利工程, 发展高效节水灌溉, 提升旱地耕地产能, 实现旱涝保收。针对存在盐碱障碍的耕地, 发展基于水热盐运移规律的水利工程措施成为耕地质量提升的核心, 通过充分灌溉和排水系统可以淋洗盐分, 显著降低土壤盐碱含量, 例如在雨量充沛、入渗量大的地区, 利用明沟明渠排盐降碱, 加强对表层盐分积累和次生盐渍化的控制, 而在淡水资源限制地区, 利用暗管排水排盐, 通过在地下铺设平行的排盐管网, 利用雨水和灌溉水从地下管道上方的土壤中滤出盐分^[78], 实现高效节水控盐。对于生态脆弱地区, 实施侵蚀沟治理、整修梯田、修复地埂、建设防护林网等田间工程措施, 强化耕地的水土保持能力, 增强耕地的生态服务功能。

3.2.2 保护性耕作技术 保护性耕作是一种以农作物秸秆覆盖还田、少免耕播种和合理轮作为关键要素的可持续农业技术体系, 能够有效减轻土壤侵蚀, 提升土壤有机质含量并增强保墒抗旱能力和土壤肥力^[79], 获得生态、经济和社会效益协调发展。美国农业在发展过程中充分注意了保护性耕作的重要性, 美国有一半以上的耕地实行保护性耕作措施。针对东北黑土地土壤有机质快速下降, 北方旱地和南方旱地土壤有机质本底值低的问题, 实行少免耕和秸秆还田等保护性耕作措施可显著提升土壤有机质含量, 一方面有机物料投入是有机质提升的第一要素, 秸秆还田短期内提升了土壤中易分解有机碳的数量, 长期还田条件下易分解有机碳会逐渐转化为稳定的土壤有机碳^[80]; 另一方面少免耕减少了土壤扰动和裸露, 降低了有机碳的氧化损失^[81]。针对存在风蚀沙化或水土流失问题的耕地, 通过留高茬少免耕覆盖保护性耕作, 减少对耕层的扰动, 降低风蚀水蚀风险。此外, 地表的无效蒸发和潜水上升是土壤盐碱化的重要原因, 秸秆覆盖可以有效阻断地表水分蒸发, 起到保墒抑盐的作用^[82]。针对土壤肥力低、结构差或连作障碍问题突出的耕地, 通过优化种植结构和区域布局, 因地制宜确定多样化的种植结构, 例如利用豆科/禾本科间套轮作, 实现固碳培肥。澳大利亚的旱地农业实行以豆科牧草为基础的草粮轮作制度, 被确认作为一种最佳的耕作制度, 豆

科牧草的根瘤菌通过固氮提高了土壤肥力水平, 改善了土壤结构, 促进了后茬小麦增长, 同时牧草收入提高了经济效益^[83]。在生态脆弱、资源匮乏地区, 实行与水热资源环境承载力相匹配的作物轮作与休耕制度, 降低耕地利用强度, 筑牢生态安全屏障。

3.2.3 科学施肥技术 养分贫瘠化、酸化、次生盐渍化等耕地质量退化问题都与不合理施肥密切相关。由于我国人多地少、土壤基础肥力差、经营分散、复种指数大、倒茬时间紧等客观因素, 作物高产建立在化肥大量施用的基础上, 科学施肥技术覆盖率不高^[84]。合理施肥既要避免过量施肥导致土壤酸化、次生盐渍化, 也要避免养分供应不足导致土壤有机质过度消耗。伴随信息技术与大数据科技的发展, 近年来以养分专家推荐施肥系统为代表的轻简智能化推荐施肥新方法得以快速发展^[85], 破解了我国肥料利用率提升的技术瓶颈及推广应用的“最后一公里”难题, 应推进其在更大层面和范围内应用, 进一步推动智慧农业发展。同时, 加快研究和推广应用具备精准定位、智能检测、变量施肥功能的种肥同播机、机械深施注肥器、侧深施肥机等配套施肥装备, 这是提升小农户和规模化农场长期并存条件下的科学施肥技术覆盖率的关键途径。针对传统肥料产品养分利用率不高、易造成土壤污染和退化的问题, 加强稳定高效、绿色增产、环境友好的新型肥料产品研发攻关和投入推广。重点利用生物油脂改性材料、天然多糖改性材料(如纤维素、甲壳素、淀粉、木质素)、聚乳酸和金属酚网络等包膜材料创新绿色高效型缓控释肥料产品^[86-87]; 重点攻克基于根际微生物组鉴定和筛选优良微生物菌株技术及不同功能菌株的优配组装技术, 充分发挥固氮解磷释钾型、污染土壤修复型和连作障碍消减型微生物肥料在减轻土传病害、改善土壤健康、促进植物生长等方面的潜力; 根据特定土壤、气候和种植体系及原料特性定制有机肥堆肥和使用方法^[88], 充分发挥其在减缓土壤酸化、盐碱化, 促进土壤培肥和固碳减排等方面的潜力。

3.2.4 水资源高效利用技术 水资源作为农业生产的命脉, 对耕地质量的提升具有不可替代的作用, 灌溉对我国粮食增产的直接贡献率约为 36.3%^[89]。然而我国水资源短缺严重, 单位耕地面积的水资源量仅为世界平均水平的一半。而且我国水土资源不匹配, 64% 的耕地分布在秦岭—淮河线以北, 而这些地区水资源仅占全国约 19%。从全国不同耕地类型来看, 水田占 24.6%, 水浇地占 25.1%, 旱地占 50.3%^[9]。

针对不同耕地类型,实施差异化的水资源管理策略,是当前农业可持续发展的关键。对于水田和水浇地的水资源管理,应结合土壤特性和作物生长规律,通过采用节水灌溉技术,合理调控灌溉时间和灌溉量,提升水资源利用效率的同时,加强水资源保护和水环境治理,提高水资源的质量和可持续利用能力。而对于旱作型耕地,水资源短缺是制约耕地质量和作物产能提升的关键限制因子,旱地农业由对抗型向应变型转变,创新抗旱适水型种植技术和模式,发展适水型雨养农业,集成推广耐旱节水型作物、水肥一体化技术、节水型耕作制度、覆盖减蒸保墒技术等,形成多元化的水资源高效利用模式,保障旱地农田生产的稳定性,兑现耕地产能潜力。另外,由于耕地盐碱障碍治理很大程度上依赖淡水资源的充足供应,而盐碱地分布区一般水资源较为短缺或分布严重不均,因此水资源的高效和安全利用是盐碱地水盐调控的核心。在水资源制约条件下,发展和应用新型的节水控盐灌溉方法和水分高效的优化灌排制度,加强咸水和微咸水资源等边际水资源的安全利用,是盐碱地改良和利用的重要方向。

3.2.5 耐逆适生作物品种选育技术 针对盐碱、干旱、酸性、贫瘠等障碍耕地特征,选育可应对逆境胁迫的耐逆适生作物品种,从而提高障碍耕地的农业生产水平,同样可视为耕地质量提升的间接途径。针对不同障碍类型,利用 GWAS、RNA-Seq 和代谢组分析等研究方法,全面开展作物逆境生理学研究,解析耐逆作物等对障碍耕地的响应和适应机制。重点揭示耐瘠作物品种养分获取与利用协同的生理机制,耐旱作物品种的干旱信号传递过程与生长发育之间的耦联机制及水分高效利用机理,耐盐碱作物品种耐盐聚盐机理及根际渗透调节机制,耐酸作物品种根际毒害离子钝化与养分平衡机制。通过基因工程挖掘盐碱、干旱、酸性、贫瘠等障碍土壤上耐逆作物基因,并进行分子辅助设计育种,或利用传统育种技术筛选和选育耐逆适生的作物品种,在提高盐碱地、瘠薄旱地、酸化红黄壤区等中低产田耕地产能的同时,挖掘和强化提升土壤质量和健康的功能。

参 考 文 献:

- [1] 自然资源部. 第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL]. (2021-08-26). https://m.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678340.html.
Ministry of Natural Resources. Main data bulletin of the third

national land survey[EB/OL]. (2021-08-26). https://m.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678340.html.

- [2] 孔祥斌, 陈文广, 党昱譔. 中国耕地保护现状、挑战与转型[J]. 湖南师范大学社会科学学报, 2023, 52(5): 31-41.
Kong X B, Chen W G, Dang Y X. Current situation, challenges and transformation of cultivated land protection in China[J]. Journal of Social Science of Hunan Normal University, 2023, 52(5): 31-41.
- [3] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 697-713.
Liang X Y, Jin X B, Sun R, *et al.* China's resilience-space for cultivated land protection under the restraint of multi-scenario food security bottom line[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 697-713.
- [4] 袁承程, 张定祥, 刘黎明, 等. 近10年中国耕地变化的区域特征及演变态势[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 267-278.
Yuan C C, Zhang D X, Liu L M, *et al.* Regional characteristics and spatial-temporal distribution of cultivated land change in China during 2009-2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 267-278.
- [5] 曹晓风, 孙波, 陈化榜, 等. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336-348.
Cao X F, Sun B, Chen H B, *et al.* Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 336-348.
- [6] 国家统计局. 年度统计数据[DB/OL]. [2024-07-07]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
National Bureau of Statistics. Annual statistics[DB/OL]. [2024-07-07]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [7] Qiao L, Wang X, Smith, *et al.* Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6): 574-580.
- [8] Ma Y, Woolf D, Fan M, *et al.* Global crop production increase by soil organic carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(12): 1159-1165.
- [9] 农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[EB/OL]. (2020-05-06). http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Bulletin on the quality grade of cultivated land nationwide in 2019[EB/OL]. (2020-05-06). http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm.
- [10] 白重九. 1980—2010年北方旱地农田土壤有机碳变化特征及其主控因素研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2021.
Bai C J. A study on variation characteristics and main controlling factors of soil organic carbon of dryland farmland in Northern China in 1980-2010[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [11] 胡炎, 杨帆, 杨宁, 等. 盐碱地资源分析及利用研究展望[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 489-494.
Hu Y, Yang F, Yang N, *et al.* Analysis and prospects of saline-alkali land in China from the perspective of utilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 489-494.
- [12] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地区耕地质量现状与面临的

- 机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695–701.
- Wang J K, Xu X R, Pei J B, *et al.* Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695–701.
- [13] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160–167.
- Xu R K, Li J Y, Zhou S W, *et al.* Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 160–167.
- [14] 周卫. 低产水稻土改良与管理—理论、方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Zhou W. Theories and approaches of amelioration and management of low yield paddy soils[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [15] 董金龙, 徐烨红, 全智, 等. 中国设施种植土壤可持续利用的难点与应对策略[J]. 土壤学报, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20240229.0907.002>.
- Dong J L, Xu Y H, Quan Z, *et al.* The obstacles and countermeasures of soil sustainability in protected horticulture in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20240229.0907.002>.
- [16] 温良友, 孔祥斌, 辛芸娜, 等. 对耕地质量内涵的再认识[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(3): 156–164.
- Wen L Y, Kong X B, Xin Y N, *et al.* Evolution of cultivated land quality connotation and its recognition[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(3): 156–164.
- [17] 杜国明, 闫佳秋, 张娜, 等. 面向多元主体需求的耕地质量体系新认知[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 212–222.
- Du G M, Yan J Q, Zhang N, *et al.* New cognition of the cultivated land quality system for the needs of multiple subjects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 212–222.
- [18] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008–1010.
- [19] 赵玲, 滕应, 骆永明. 中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J]. 土壤, 2017, 49(3): 417–427.
- Zhao L, Teng Y, Luo Y M. Present pollution status and control strategy of pesticides in agricultural soils in China: A review[J]. Soils, 2017, 49(3): 417–427.
- [20] 赵月, 鲍雪莲, 梁超, 等. 压实对农田土壤特性的影响及应对措施[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1457–1469.
- Zhao Y, Bao X L, Liang C, *et al.* Effects of compaction on farmland soil properties of farms and prevention measure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1457–1469.
- [21] Wang C, Sun X F, Wang M, *et al.* Chinese cropland quality and its temporal and spatial changes due to urbanization in 2000–2015[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(2): 174.
- [22] Wang L, Anna H, Zhang L Y, *et al.* Spatial and temporal changes of arable land driven by urbanization and ecological restoration in China[J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(5): 809–819.
- [23] 农业农村部. 关于全国耕地质量等级情况的公报(农业农村部公报[2014] 1号)[EB/OL]. (2022–6–18). http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217_4297895.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Bulletin on the quality grade of farmland in China (Bulletin of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs [2014] No. 1)[EB/OL]. (2022–06–18). http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217_4297895.htm.
- [24] 李俊岭. 东北农业功能分区与发展战略研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.
- Li J L. Study on northeastern agricultural multifunctionality and regional development strategy[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [25] 辛景树, 汪景宽, 薛彦东. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- Xin J S, Wang J K, Xue Y D. Evaluation of cultivated land quality in the Northeast Black Soil Region[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2017.
- [26] Yu G, Fang H, Gao L, *et al.* Soil organic carbon budget and fertility variation of black soils in Northeast China[J]. Ecological Research, 2006, 21: 855–867.
- [27] 万炜, 邓静, 王佳莹, 等. 基于潜力衰减模型的东北—华北平原旱作区耕地生产力评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 270–280, 336.
- Wan W, Deng J, Wang J Y, *et al.* Evaluation of cultivated land productivity based on potential attenuation model in the dryland farming regions of Northeast and North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 270–280, 336.
- [28] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 63–70.
- Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, *et al.* Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 63–70.
- [29] 齐华, 李从锋, 赵明, 等. 我国北方旱作农田保护性耕作发展与展望[J]. 作物杂志, 2020, (2): 16–19.
- Qi H, Li C F, Zhao M, *et al.* Developments and prospects of conservation tillage in the dryland of Northern China[J]. Crops, 2020, (2): 16–19.
- [30] 刘冬碧, 熊桂云, 胡时友, 等. 不同利用方式下土壤的养分特性及其变异性初探[J]. 湖北农业科学, 2003, (6): 51–55.
- Liu D B, Xiong G Y, Hu S Y, *et al.* Preliminary exploration of nutrient characteristics and their variability under different land uses[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2003, (6): 51–55.
- [31] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition to China: A model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance[J]. Atmospheric Environment, 2017, 153: 32–40.
- [32] 韩天富, 柳开楼, 黄晶, 等. 近30年中国主要农田土壤pH时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2137–2149.
- Han T F, Liu K L, Huang J, *et al.* Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(12): 2137–2149.
- [33] Zhu H, Chen C, Xu C, *et al.* Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 99–106.
- [34] Liu Z, Zhou W, Li S T, *et al.* Assessing soil quality of gleied paddy

- soils with different productivities in subtropical China[J]. *Catena*, 2015, 133: 293–302.
- [35] Liu Z, Zhou W, Shen J B, *et al.* Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivities in Guangdong Province, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 177–186.
- [36] Liu Z, Zhou W, Shen J B, *et al.* Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 140: 74–81.
- [37] Liu Z, Zhou W, Shen J B, *et al.* Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 537–548.
- [38] 郑祥乐. 浅析新疆灌区盐碱地成因分析及治理措施[J]. *水土保持应用技术*, 2014, (2): 29–31.
- Zheng X L. A brief analysis of the causes of saline-alkali land and management measures in Xinjiang irrigation areas[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2014, (2): 29–31.
- [39] 李建设, 柴良义. 河套灌区土壤次生盐渍化的成因特点及改良措施[J]. *内蒙古农业科技*, 2000, (S1): 157–158.
- Li J S, Chai L Y. Causes and improvement measures of secondary salinization in Hetao irrigation area[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2000, (S1): 157–158.
- [40] 李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(1): 64–72.
- Li X G, Cao J, Li F M. Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(1): 64–72.
- [41] 江杰, 王胜. 我国盐碱地成因及改良利用现状[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(13): 85–87.
- Jiang J, Wang S. The cause of formation and improved utilization of saline-alkali land in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(13): 85–87.
- [42] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480–1493.
- Huang S W, Tang J W, Li C H, *et al.* Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1480–1493.
- [43] Ti C, Luo Y, Yan X. Characteristics of nitrogen balance in open-air and greenhouse vegetable cropping systems of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(23): 18508–18518.
- [44] Qasim W, Xia L, Lin S, *et al.* Global greenhouse vegetable production systems are hotspots of soil N₂O emissions and nitrogen leaching: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116372.
- [45] 丁武汉, 雷豪杰, 徐驰, 等. 我国设施菜地表观氮平衡分析及其空间分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(3): 353–360.
- Ding W H, Lei H J, Xu C, *et al.* Characteristics and spatial distribution of apparent nitrogen balance in the greenhouse vegetable cropping system in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 353–360.
- [46] Zhang Z L, Sun D, Tang Y, *et al.* Plastic shed soil salinity in China: Current status and next steps[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126453.
- [47] 郭春霞. 设施农业土壤次生盐渍化污染特征[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2011, 29(4): 50–54, 60.
- Guo C X. Characteristics of secondary soil salinization in protected agriculture[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2011, 29(4): 50–54, 60.
- [48] Wang X, Dou Z, Shi X, *et al.* Innovative management programme reduces environmental impacts in Chinese vegetable production[J]. *Nature Food*, 2021, 2: 47–53.
- [49] Min J, Shi W. Nitrogen discharge pathways in vegetable production as non-point sources of pollution and measures to control it[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 123–130.
- [50] 尹岩, 郝凤明, 邴龙飞, 等. 我国设施农业碳排放核算及碳减排路径[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3856–3864.
- Yin Y, Chi F M, Bing L F, *et al.* Accounting and reduction path of carbon emission from facility agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3856–3864.
- [51] Wang K, Chen W, Tian J Y, *et al.* Accumulation of microplastics in greenhouse soil after long-term plastic film mulching in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 828: 154544.
- [52] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 651–658.
- Lu W H, Zhang N M, Bao L, *et al.* Study advances on characteristics, causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 651–658.
- [53] 吴蕊, 牛明芬, 郭颖, 等. 设施大棚农药污染残留调查分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 130–134.
- Wu R, Niu M F, Guo Y, *et al.* Survey and analysis of pesticide contamination in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 130–134.
- [54] Wang K, Lu Q, Dou Z C, *et al.* A review of research progress on continuous cropping obstacles[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(2): 253–270.
- [55] 王广印, 郭卫丽, 陈碧华, 等. 河南省设施蔬菜连作障碍现状调查与分析[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(25): 27–33.
- Wang G Y, Guo W L, Chen B H, *et al.* Continuous cropping obstacles of facilities vegetables in Henan: Investigation and analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(25): 27–33.
- [56] Nuser S M, Breidt F J, Fuller W A. Design and estimation for investigating the dynamics of natural resources[J]. *Journal of Ecological Applications*, 1998, 8(2): 234–245.
- [57] Jones R J A, Spoor G, Thomason A J. Assessing the vulnerability of subsoils in Europe to compaction: A preliminary analysis[J]. *Soil Tillage Research*, 2003, 73(1): 131–143.
- [58] Huffman E, Eilers R G, Padbury G, *et al.* Canadian agri-environmental indicators related to land quality: Integrating census and biophysical data to estimate soil cover, wind erosion and soil salinity[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 81(2): 113–123.
- [59] Acton D F. A program to assess and monitor soil quality in Canada: Soil quality evaluation program summary report[M]. Ottawa: Centre for Land and Biological Resources Research Agriculture and Agri-Food Canada, 1994.

- [60] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: Research plan[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 81(2): 93–102.
- [61] 张超, 高璐璐, 鄢文聚, 等. 遥感技术获取耕地质量评价指标的研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 1–13.
Zhang C, Gao L L, Yun W J, *et al.* Research progress on obtaining cultivated land quality evaluation indexes by remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 1–13.
- [62] 张蚌蚌, 孔祥斌, 鄢文聚, 等. 我国耕地质量与监控研究综述[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(2): 216–222.
Zhang B B, Kong X B, Yun W J, *et al.* A review on quality and monitoring of arable land in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(2): 216–222.
- [63] Bristol R S, Euliss J N H, Booth N L, *et al.* Science strategy for core science systems in the US geological survey, 2013–2023: Public review release[R]. US Geological Survey, 2012.
- [64] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859–1869.
Zhu Y G, Li G, Zhang G L, *et al.* Soil security: From earth's critical zones to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859–1869.
- [65] Zhao Y, Wang M, Hu S, *et al.* Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4045–4050.
- [66] 杨帆, 贾伟, 杨宁, 等. 近30年我国不同地区农田耕层土壤的pH变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(7): 1213–1227.
Yang F, Jia W, Yang N, *et al.* Spatio-temporal variation of surface soil pH of farmland in different regions of China in the past 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7): 1213–1227.
- [67] 朱齐超. 区域尺度中国土壤酸化定量研究及模型分析[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2017.
Zhu Q C. Quantification and modelling of soil acidification at regional scale of China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2017.
- [68] 胡莹洁, 孔祥斌, 张玉臻. 中国耕地土壤肥力提升战略研究[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(5): 84–89.
Hu Y J, Kong X B, Zhang Y Z. Strategies for soil fertility improvement of arable land in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(5): 84–89.
- [69] 曲昌荣. 基础地力贡献率不断下降造成土地隐性流失[N/OL]. (2013–04–14) [2024–07–06]. <http://finance.people.com.cn/n/2013/0414/c1004-21126776.html>.
QU C R. Decline in soil fertility contribution leads to hidden land loss[N/OL]. (2013–04–14) [2024–07–06]. <http://finance.people.com.cn/n/2013/0414/c1004-21126776.html>.
- [70] 郑亚楠, 张凤荣, 谢臻, 等. 中国粮食产能变化与耕地保护策略研究—基于作物区试产量视角[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(4): 47–53.
Zheng Y N, Zhang F R, Xie Z, *et al.* Research on crop production capacity change and cultivated land protection strategy—based on regional crop yield[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(4): 47–53.
- [71] Liu L, Zheng X, Wei X, *et al.* Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 23015.
- [72] Pahalvi H N, Rafiya L, Rashid S, *et al.* Chemical fertilizers and their impact on soil health[J]. *Microbiota and Biofertilizers*, 2, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1.
- [73] Steffen W, Richardson K, Rockström J, *et al.* Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. *Science*, 2015, 347: 1259855.
- [74] Sun J, Mooney H, Wu W. Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(21): 5415–5419.
- [75] 农业农村部. 建设国家农业绿色发展先行区促进农业现代化示范区全面绿色转型实施方案[EB/OL]. [2024–07–07]. <http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202209/P020220928631650720689.pdf>.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Circular on printing and distributing the implementation plan to establish national pioneering zones of green agriculture and accelerate green transformation of modern agriculture demonstration zones[EB/OL]. [2024–07–07]. <http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202209/P020220928631650720689.pdf>.
- [76] 杜怡锐, 王辉. 我国粮食主产区耕地利用生态效率时空演变特征研究[J]. *湖北经济学院学报*, 2024, 21(5): 38–42.
- [77] Du Y R, Wang H. Research on the spatiotemporal evolution characteristics of ecological efficiency in the utilization of cultivated land in China's major grain-producing areas[J]. *Journal of Hubei University of Economics*, 2024, 21(5): 38–42.
- [77] 中国气象局. 中国气候变化蓝皮书(2023)[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
China Meteorological Administration. China's climate change blue Book (2023)[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [78] 耿其明, 闫慧慧, 杨金泽, 等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. *土壤通报*, 2019, 50(3): 617–624.
Geng Q M, Yan H H, Yang J Z, *et al.* Evaluation for soil improvement effect of open ditch and concealed drainage engineering on saline alkali land development[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3): 617–624.
- [79] Pittelkow C M, Liang X, Linquist B A, *et al.* Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. *Nature*, 2015, 517: 365–368.
- [80] Heitkamp F, Wendland M, Offenberger K, *et al.* Implications of input estimation, residue quality and carbon saturation on the predictive power of the Rothamsted Carbon Model[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 168–175.
- [81] Zhao S, Schmidt S, Gao H, *et al.* A precision compost strategy aligning composts and application methods with target crops and growth environments can increase global food production[J]. *Nature Food*, 2022, 3: 741–752.
- [82] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1395–1403.
Wang M H, Chen W F, Song X L, *et al.* Preliminary study on effect

- of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1395–1403.
- [83] Hochman Z, Horan H, Navarro G J, *et al.* Cropping system yield gaps can be narrowed with more optimal rotations in dryland subtropical Australia[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 184: 102896.
- [84] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
- Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259–273.
- [85] He P, Xu X P, Zhou W, *et al.* Ensuring future agricultural sustainability in China utilizing an observationally validated nutrient recommendation approach[J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 132: 126409.
- [86] Schmücker C, Stevens G W, Mumford K A. Liquid marble formation and solvent vapor treatment of the biodegradable polymers polylactic acid and polycaprolactone[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 514: 349–356.
- [87] Shen Y, Du C, Zhou J, Ma F. Application of nano Fe III–tannic acid complexes in modifying aqueous acrylic latex for controlled-release coated urea[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65: 1030–1036.
- [88] Zhao X, He C, Liu W S, *et al.* Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(1): 154–166.
- [89] 康绍忠. 加快推进灌区现代化改造 补齐国家粮食安全短板[J]. 中国水利, 2020, (9): 1–5.
- Kang S Z. Accelerating modernization of irrigation districts to make up shortfall of national food security[J]. *China Water Resources*, 2020, (9): 1–5.