

农田土壤黑碳应用研究进展

郭大勇^{1,2}, 范明生^{1*}, 张福锁¹

(1 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193; 2 河南科技大学农学院,河南洛阳 471003)

摘要: 在应对全球气候变暖和保障粮食安全的双重背景下,如何增加土壤碳库容量、提升土壤生产力以及减少环境危害已成为农学家、土壤学家和环境学家在二十一世纪的研究重点和热点,黑碳(或生物碳)在农田土壤中的应用作为一种增加土壤碳库和提高土地生产力的新方法引起了极大关注。本文综述了黑碳在农业土壤中的含量,应用黑碳(生物碳)对作物产量、土壤肥力和温室气体排放的影响;探讨了应用黑碳影响作物生产力和土壤环境行为的机理以及农田土壤应用黑碳在不同区域、作物类型、用量和黑碳性质上的差异表现;展望了农田应用黑碳未来研究的方向和热点。

关键词: 黑碳; 生物碳; 固碳; 土壤肥力; 作物生产力

中图分类号: S153.6⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2012)05-1252-10

A review on biochar application in arable soils

GUO Da-yong^{1,2}, FAN Ming-sheng^{1*}, ZHANG Fu-suo¹

(1 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2 Agricultural College, He'nan University of Science and Technology, Luoyang, He'nan 471003, China)

Abstract: Sequestration carbon in soils with CO₂ mitigation and enhancing global food security has been a significant research hot topic under circumstance of global warming and food demand pressure. Biochar application in arable soils becomes a vigor method for increasing C pool and improving soil productivity, which arouse interests for scientists all over the world recently. The contents of black carbon in soils and the effects of biochar application on crop productivity and soil fertility as well as greenhouse gas emission in arable soils are reviewed. The possible mechanism of biochar application on crop yield productivity and soil-environment aspects is discussed, and the discussion is focused on practical performance of biochar application in different regions, crop varieties, fertilization amounts and biochar types. Several key research points in agriculture and perspectives in future are proposed.

Key words: black carbon; biochar; soil carbon sequestration; soil fertility; crop productivity

全球气候变暖背景下各种介质中碳循环的迁移转化规律以及源库的关系被全世界的科学家所关注,研究土壤的固碳容量、潜力和机理成为二十一世纪土壤科学研究的热点和重点领域^[1]。Wim Sombroek 1966 年出版他的著作《Amazon Soils》以后,Terra Preta do Indio(Indian Dark Earth)土壤由于含有大量的有机碳和具有高生产力的特征,成为关注的热点^[2];在亚马逊地区的考古发现 Terra Preta

土壤大多伴随有陶瓷碎片,面积一般为 1~5 公顷,最大能达到 300 公顷甚至更多,Terra Preta 土壤是人为蓄意活动的结果已经得到了大多数科学家的公认,据推测这可能是古印第安人施用黑碳的结果,但形成过程还存在一定的认知不足^[3-4]。黑碳是大气二氧化碳的重要储库,每年燃烧可产生 50~260 Tg 黑碳^[5],主要来源于化石燃料和生物质的燃烧,其在土壤和沉积物中的埋藏以及它的化学惰性,使得

收稿日期: 2012-03-07

接受日期: 2012-07-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)“粮食主产区农田地力提升机理与定向培育对策”(2011CB100505)资助。

作者简介: 郭大勇(1979—),男,安徽宣城人,博士研究生,主要从事养分资源管理方面的研究工作。E-mail: pancywang@163.com

* 通讯作者 Tel: 010-62731661, E-mail: famms@cau.edu.cn

黑碳对减缓大气二氧化碳浓度上升和碳循环具有非常重要的意义^[6]。过去的几十年中黑碳在环境中的负面作用报道很多^[7],如充当大气中各种化学反应的催化剂,促进臭氧的光化学反应和雾霾的形成^[8];作为气溶胶的重要组成成分,吸收阳光热量,增强温室效应^[9-10];过去一个世纪北极雪地烟炱的存在贡献了大约 25% 的温室效应现象^[11];黑碳还能引起人的呼吸和心血管疾病,如多环芳烃(PAH)致人死亡^[12]。在农业生态系统中,黑碳往往扮演着一个积极的角色,在热带雨林土壤高风化地区,将砍烧模式(slash-burn system)变为砍炭模式(slash-char system)很可能成为一种可持续农业生产模式,1) 增加土壤碳容量和土壤碳库;2) 提高作物产量;3) 减少养分的淋洗运移,降低环境风险^[13-15]。黑碳还是土壤中各种有机物吸附的重要载体,能强烈吸附并影响疏水性有机污染物(如 PAHs、PCBs 和 PCDDs)的迁移、转化及生物有效性,对土壤有机污染物有很强的吸附及解吸迟滞作用,影响土壤农药吸附和农药生物可用性^[16],黑碳对重金属离子也产生吸附,对作物生长发育过程产生重要影响,这些都具有重要的生态环境意义^[17]。

因此,认识黑碳在农业中应用的意义,探讨农业生态系统中黑碳的作用机理和作用方式显得尤为紧要,这不仅能加深对黑碳的科学认识,而且可为可持续农业提供最重要的科学依据。

1 农田生态系统土壤中的黑碳

1.1 黑碳的定义

1985 年 Goldberg 发表了较具影响的著作《Black Carbon in the Environment》,对黑碳的基本性质和在环境中的作用进行了论述,是一本介绍黑碳较为系统的著作^[18],在他的书中将黑碳定义为是化石燃料或生物体不完全燃烧产生的一种非纯净碳的混合物,它含有 60% 以上的 C 元素,其它元素主要有 H、O、N、S,这个定义被其他研究者广泛引用。目前在名称上使用黑碳比较广泛,但不同的研究领域,在定义和名称上依然存在较大差异,英文文献中黑碳出现的命名包括:木炭(charcoal)、焦炭(char)、烟炱(soot)、石墨碳(graphitic carbon)、元素碳(elemental carbon)、热解碳(polymeric carbon)、游离碳(free carbon)、炭黑(carbon black)、黑碳(black carbon)等^[19],如环境科学中,

研究大气的科学家一般将黑碳称为烟炱(soot)、气溶胶(黑碳气溶胶)(aerosols)。农业研究领域文献中生物碳(biochar)的使用越来越普遍,虽然通常认为生物碳和黑碳是同一类物质,但其确切的含义有所不同;根据 Lehmann 等人的定义,生物碳指的是从植物生物质形成的黑碳,包括木炭和植物炭残体但不包括石油燃料形成的黑碳和地球成因的黑碳^[20]。

1.2 农业土壤黑碳的来源

黑碳主要来源于化石燃料,生物质燃料的燃烧^[21],广泛存在于土壤、大气、水体和沉积物中,即便在极地和高山,也存在黑碳并对太阳辐射产生重要影响^[11]。

农田生态系统的黑碳可能由以下几个来源组成:作物收获后秸秆燃烧的产物;由降水或灌溉随水分带来的黑碳^[22-23];其他人类活动所产生的黑碳,如改变土地利用方式形成的黑碳,将林地或草地转变为耕地往往会有燃烧的过程,会形成黑碳,自然灾害也会产生黑碳,但在农田生态系统中发生火灾的可能性远小于森林火灾,自然灾害 90% 以上发生在森林和草原生态系统,因此农田施肥与管理方式、地理位置等对土壤黑碳含量的影响占主导^[24]。

1.3 土壤中黑碳的含量

黑碳含量的研究主要集中在热带土壤高风化和部分欧美地区,含量从每千克零点几至几十毫克不等,占有机碳的比例最高能达到 45%,最低 1% 左右,这些样品基本都是表层农业土壤,土壤颜色大多是黑色或灰黑色;黑碳含量的测定方法主要包括光学、热学和化学测定三类,但应用较多的是苯多环羧酸作为分子标志物测量法和¹³C 的核磁共振光谱法,热氧化法测定相对少一些,这些研究很不系统,结果间差异很大,使得可比性和可靠性下降^[19, 25-27](表 1)。一般而言,黑碳随着土壤深度的增加含量下降,Brodowski 研究了德国的土壤,他发现不同采样地点的土壤表层(0—10 cm)黑碳占有有机碳中的比重不同,长期施用无机肥对表层土壤黑碳含量无显著影响,但是黑碳在下层(87—114 cm)含量会有所增加,甚至达到有机碳含量的 35% 左右(35 ± 7%),有些地方土壤中的黑碳占土壤有机碳的比例高达三分之二,主要来源于化石燃料的燃烧^[28],而在 Terra Preta 土壤中,黑碳含量在 30—40 cm 表层

表 1 土壤中黑碳的含量
Table 1 Contents of black carbon in soils

样品地点 Sample Site	含量(g/kg) Contents	备注 Notes	分析方法 Analysis method	黑碳浓度(%) BC/TOC	参考 References
欧洲黑钙土/软土 European chernozem soil	0.6 ~ 7.4	<53 μm	高能紫外辐射氧化 + 核磁共振 ^a	15 ~ 45	[33]
美国农业土壤 U. S. agricultural soil	1.8 ~ 13.6	<53 μm	高能紫外辐射氧化 + 核磁共振 ^a	10 ~ 35	[34]
澳大利亚土壤 Australian soil	<8		高能紫外辐射氧化 + 核磁共振 ^a	<30	[35]
西伯利亚森林土 Siberian forest soil			苯多环羧酸作为 分子标志物 ^b	1.6 ~ 4.5	[36]
瑞士土壤 Swiss soil	0.4 ~ 1.8		60 $^{\circ}\text{C}$ /375 $^{\circ}\text{C}$ /24h ^c	1 ~ 6	[37]
加拿大黑钙土 Canadian chernozem soil	1.16	$n = 1$	NaClO + 核磁共振 ^d	22.3	[38]
巴西 Terra Preta 土壤 Brazilian dark earth	0.1 ~ 2.1 1.3 ~ 6.4 1.1 ~ 14.2	$d < 2.0$ $d = 2.0 \sim 2.4$ $d > 2.4$	苯多环羧酸作为 分子标志物 ^b	<35	[29]
日本火山灰土 Japanese volcanic ash soil	0.34 ~ 6.1 (处理前 Before treat.) 0.74 ~ 42 (处理后 After treat.)	HCl-HF 酸处理	称重法 ^e	9 ~ 33	[30]
中国土壤 Chinese soil	4.15 ~ 6.33		55 $^{\circ}\text{C}$ /60 h	8.3 ~ 25.6	[30,39]
德国土壤 German soil	1.9 ~ 2.6		苯多环羧酸作为 分子标志物 ^b	11.9 ~ 13.1	[28]
	<8		高能紫外辐射氧化 + 核磁共振 ^a	<45	[40]

注(Note): 本表根据韩永明图表修改补充^[19] The table was revised by Han *et al.*^[19]. a—High energy UV photooxidation + nuclear magnetic resonance spectroscopy(NMR); b— Benzenecarboxylic acids as molecular markers (BCAs); c— CTO method described by Gustafsson *et al.* (2001); d— Chemical oxidation + nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR); e—Specific gravity (s. g.) method.

有所增加,推测可能是土壤扰动或者是蚯蚓和白蚁的搬运造成的,黑碳向下层移动的原因和机理目前还不明确^[29]; Wang 的研究也表明徐州城市公路附近表层土壤中的大部分黑碳来源于交通的排放^[30]。Shindo 在研究火山灰土壤时发现火山灰土壤中植物黑碳残渣高达土壤有机物的 9% ~ 33%; 用酸处理土壤样品黑碳含量会有所变化,用酸处理土壤样品后黑碳含量会有所增加,这可能与植物残体中的木质素有关^[31-32]。Bucheli 测定了瑞士 23 个土壤样品的黑碳含量,包括林地、草地和农田土壤,其中 3 个农业土壤中黑碳含量分别为 0.5、3.7 和 0.4 g/kg,

占有机碳的比例分别为 4.81%、2.53% 和 3.74%; 而在张履勤的研究中林地、茶园和旱地黑碳的含量大致都在 5 g/kg 左右,占有机碳的比例最低的也比瑞士土壤高出了数倍^[39]。

2 黑碳对作物产量的影响

土壤中加入黑碳后可以显著地提高种子的萌发率、促进植物生长和提高作物的产量^[41]。Jeffery 等总结了 2010 年 3 月前已发表文献,统计结果表明施用黑碳与作物产量间呈显著性正相关关系,增幅平均达到 10%,同时结果还表明中酸性(pH < 6)和质

地较粗土壤施用黑碳后效果更佳,施用黑碳增产的机理主要存在于黑碳的改土作用和增加持水能力以及提供了部分养分元素^[42]。但他的研究结果存在一定的局限性: 1) 已发表文献的研究区域均集中在热带和亚热带地区,温带地区尚缺乏研究^[43],结果缺乏更大尺度的代表性; 2) 试验结果基本为 1~2 年的短期试验,缺乏长期试验结果的支撑。

目前,黑碳对作物增产的讨论依然存在部分争议,不同作物类型、不同土壤类型、黑碳制作原料以及制作工艺均可能影响作物的生长发育过程。也有少量文献表明施用黑碳后作物会减产,如 Asai 在老挝北部的试验表明,加入 16 t/ha 的黑碳后水稻产量有所下降,原因在于较高的黑碳会固持土壤中的氮素,造成土壤有效性氮素的减少,进而导致产量的下降^[44],因此在氮素匮乏的土壤黑碳的施用应格外慎重,显然 Lehmann 也注意到了这一点,但他认为产量的下降只是暂时的现象^[45]。当养分含量较为充足时,如黑碳与有机物料一起施用,黑碳对作物的产量影响可能不显著,如 Devonald 的试验中豌豆产量就没有显著性变化,他同时指出市场上的黑碳可能对一些作物产生毒害作用,因此建议在使用时预先进行酸/碱处理^[46]。

引用较多的最早关于黑碳的文献是 1948 年 Tyron 在森林土壤上所做的研究^[47]。黑碳加入土壤后,不仅能改善土壤的物理性质,其中的灰分元素尤其是 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,为植物的生长提供了养分,在亚马逊地区的试验发现黑碳与氮磷钾混施比单施氮磷钾产量提高了一倍,尽管输出的氮、磷、钾增加,但是土壤有效养分依然没有下降^[48]。不同作物以及不同地域对黑碳的响应有所不同,作物产量增加变幅在 20%~220% 之间,三大粮食作物中关于玉米和水稻也已有较多报道,但有关小麦的报道较少,这可能与热带和亚热带的主要粮食作物为玉米和水稻有关。黑碳的来源、热解温度以及基础地力的不同会导致同一种作物的响应有较大变异,因此,即使同一种作物,在比较作物生产力的变化时也应予这些因素以充分考虑。如: 在尼日利亚 Alfisols 和 Inceptisols 土壤上发现玉米产量与矿渣胡敏酸物质用量呈正相关,每加入 1 千克可以提高 1 克的玉米产量^[49],而 Oguntunde 等在加纳的炭窑土壤和邻近土壤的试验表明,黑碳增加了 91% 的玉米产量和 44% 的生物量^[50],Kimetu 在肯尼亚西部的试验表明,施用黑碳玉米产量增加了 200% 左右^[51],国内也有黑碳能促进玉米增长的研究报道^[52]。除粮食

作物外,Glaser 发现施用黑碳可以增加燕麦和豇豆的产量,Topoliantz 等在豇豆上的试验也得到了增产的效果^[53],Iswaran 等^[54]和 Hossain 等^[55]在大豆、豌豆、绿豆以及番茄上的也有类似的报道。

虽然目前的数据统计还不能得出最优化的黑碳用量,但 Lehmann 指出作物在黑碳施用量最高至每公顷 50 吨时依然具有增产的作用,只有在极高时才会使产量下降,对大多数植物种类和土壤条件,黑碳施用量甚至达到每公顷 140 吨时作物产量依然没有出现下降的趋势,而造成产量下降的原因可能是因为这些作物对 pH 的变化比较敏感或者 pH 的变化引起微量营养元素的缺乏所致^[56-57]; 在黑碳用量适宜的情况下,黑碳用量可能与作物产量呈相关关系,如 Lehmann 等发现在土壤中加入 20% 的黑碳比 10% 的黑碳作物生物量更高一些^[45]; Mbagwu 等的研究也有类似的结果; 但 Jeffery 的统计结果表明作物产量的增加与黑碳用量无显著性关系,他发现黑碳用量在 10、25、50 和 100 t/hm² 时显著地增加了作物产量,而 45 和 60t/ha 却与产量无显著相关性^[42]。因此,根据地域明确黑碳适宜施用量也是一个需要深入研究的课题。

3 黑碳对土壤肥力的影响

3.1 对土壤 pH 的影响

由于黑碳中的灰分营养元素的加入,大多数的土壤 pH 增加了零点几至一点几个单位,减少了酸性土壤上离子的毒害作用,增加了土壤的养分有效性。Oguntunde 等^[50]发现炭窑地块比邻近地块的 pH 平均高出了 1.8; Topoliantz 等^[53]发现黑碳与木薯皮或锯末混合施用均显著地提高了土壤的 pH (pH H₂O 和 pH KCl),而 Mbagwu 等^[49]的研究表明,由于土壤的质地不同 pH 最高能增加 1.2 个单位。Kishimoto^[57]的研究表明在连续三年加入黑碳以后土壤的 pH 由对照的 5.8 增加到 6.3; Lehmann 和 Sugiura^[45]的试验表明单施黑碳时土壤的 pH 从 5.14 增加到 5.89,但当黑碳与化肥以及厩肥同时使用时 pH 最高达到 6.22,增加了 1.08 个单位,土壤 pH 均显著上升; Steiner^[46]发现无论是加入不同粒径的黑碳还是和化肥、厩肥混合施用,土壤的 pH 基本保持不变或最高上升 0.32 (pH H₂O) 和 0.41 (pH KCl)。上述试验表明土壤中加入黑碳后,尽管有些试验结果的差异性不显著,但 pH 均会有不同程度的上升,上升幅度的大小可能与土壤属性密切相关; 黑碳和有机质同时施用比单施能更显著地增加土壤

pH,改善酸性土壤环境^[45,48,53],而且在砂性土壤和壤土上pH的增加比在粘土上增加的要多得多^[41]。但在中碱性土壤上黑碳对土壤pH的作用目前尚未有报道,因此根据改土的机理能否生产或处理成酸性黑碳以增加作物产量和提高土壤养分有效性也是一个值得关注的命题。

3.2 对土壤有效性养分和阳离子交换量的影响

由于黑碳是生物质不完全燃烧后的产物,因此其较多的灰分元素可以显著地提高土壤有效性钾、钙、镁、磷,通常黑碳所携带的灰分元素以水溶性无机盐的形式存在,能为作物生长提供养分,这也是黑碳提高作物产量的一个重要原因,同时这也增加了土壤的阳离子交换量^[58]。Tyron 和 Mbagwu 等人发现加入大量的硬质木炭后土壤的CEC提高了50%,而Glaser发现即使施入少量的黑碳土壤的CEC也得到了提高^[40,49,58],土壤有效氮也得到了部分的提高,这可能与黑碳加入土壤后能够形成的有机无机复合体有关^[59]。黑碳的芳香环边缘往往是吸附各种离子的活跃区域,能够吸附各种阳离子,增加土壤对氮素的利用效率,黑碳高的比表面积也增加了这种对土壤阳离子的吸附,减少了重金属离子的移动性和环境的污染;另外一种机理也可能与黑碳对水分的影响有关,由于黑碳的存在水分在土壤的移动速度大大下降,降低了水分对可溶性离子携带的移动性,从而大大降低了尤其是硝态氮在土体中向下的淋洗作用,因此,黑碳加入土壤后不仅能够通过自身的灰分营养元素为作物提供养分,也通过自身的物理化学性质改变了土壤养分的移动性,减少了水分对一些可溶性离子的淋洗,增加了土壤有机无机可溶性物质的有效性^[41]。

3.3 黑碳对微生物的影响

土壤微生物是土壤的重要组成部分,所有的土壤过程微生物都直接或间接地参与,土壤微生物是土壤质量与土壤健康的重要生物指示^[60]。大多数文献结果表明黑碳加入土壤后可以增加土壤微生物量^[61-63],但也有黑碳对土壤微生物产生副作用的研究报道^[64]。目前对于黑碳影响微生物生物多样性和群落构成的机理理解不够,Lehmann等^[65]和Warnock等^[66]综述了黑碳对土壤微生物、菌根的影响和可能的机理,土壤中加入黑碳后对促进微生物活动有直接和间接的作用,存在的机理主要包括:1)黑碳(木炭)可以改善土壤理化性状;2)黑碳孔隙性为微生物的生长与繁殖提供庇护场所;3)黑碳吸附的特性使其能够固持养分和水分,促进微生物

繁殖;4)黑碳能减少土壤病原菌,促进植物根系生长。Lehmann提出了“炭土界面”(biochar-sphere)的概念^[65],这是养分吸附、交换以及微生物活动最活跃的区域,这些活动对土壤、植物和生态系统的影响范围、尺度是未来的研究重点之一,也是探明黑碳对微生物影响机理的关键区域所在。

4 对有毒有害物质的吸附影响

黑碳不仅在全球的生物地球化学循环中起着重要的作用,是土壤中稳定的有机碳库,且对土壤有机污染物有很强的吸附及迟滞作用,是影响土壤吸附污染物作用大小以及污染物生物有效性(bioavailability)及迁移转运的重要有机质组分之一。在环境中黑碳或黑碳类物质是多环芳烃(PAH)最重要的结合相,它们结合后对于持久有机污染物(POPs)具有超强的吸收能力(supersorbent)。这些研究主要集中于上世纪90年代,对于环境评价的平衡分割理论(EPT)的发展具有重要的作用;黑碳对这些有机物质的吸附可能极大地降低环境风险^[67]。国内的研究在近几年才开始,如,余向阳的研究表明土壤吸附农药的容量和强度与加入黑碳的量呈正相关,吸附等温线的非线性也逐步增强^[16],张耀斌的研究也得出相同的结果^[68]。对于目前土壤中的重金属离子,吴成的研究表明黑碳虽然能够吸附一定量的金属离子,但是也非常容易解吸,而且其吸附能力要低于有机物和腐殖酸^[17]。

5 对温室效应气体的影响

CO₂、CH₄和N₂O是对全球温室效应起主要作用的几种气体,农业温室气体排放占全球总温室气体排放的10%~12%^[69],因此,农田温室气体减排也是当前研究的热点之一。农田土壤中加入黑碳对温室气体的影响结果不一,就N₂O而言,与对照相比大多数文献几乎都得到了黑碳可以降低其排放的结果^[70-73],也有结果表明施用黑碳对N₂O的排放无影响^[74],减少N₂O排放的机理存在于施用黑碳后,黑碳的吸附性降低了土壤中的氮素尤其是铵态氮含量^[76-77],从而减少了反硝化作用强度,进而减少N₂O的排放,还可能与新鲜黑碳所产生的乙烯相关^[77],减少的程度取决于黑碳性质^[78]、立地条件以及土壤类型等。而对于CO₂和CH₄而言,目前的研究结果存在不同甚至是完全相反的结果^[65,79]。Randon^[80]和Karhu^[81]发现了黑碳可以显著地减少

CH₄ 的结果,而 Zhang 等的结论^[82-83]则发现施用黑碳增加了 CH₄ 排放,甚至高出对照的 34%~41%,其他研究者也有施用黑碳增加 CH₄ 排放的结论^[74]。而 Knoblauch^[84]的试验则表明无论是实验室培养还是大田条件下,黑碳的施用与 CH₄ 的排放无相关关系,相当于对照,施用黑碳后 CH₄ 排放没有显著性变化;CO₂ 的排放与土壤呼吸密切相关,Bell^[85]在英格兰的试验表明加入较大粒径木炭后显著地增加了 CO₂ 的排放,而 Hilscher、Knoblauch 和 Karhu^[74,81,86]则发现加入木炭后对土壤呼吸几乎无影响。一般而言,黑碳与有机物料混施后土壤呼吸会急剧增加,土壤呼吸的程度取决于土壤微生物的活动能力,黑碳添加可以改善土壤中的微生物活动环境,进而增加这些碳库的分解,引起一个正激发效应(priming effect)。Jones 等^[87]则认为黑碳可以压制土壤呼吸,是一个负激发效应,这些争论的观点都与黑碳改善土壤属性的能力大小有关,无论是 CO₂ 还是 CH₄ 的排放,施入黑碳(木炭)对其影响是个多因素、交互作用的结果,因此,试验结果取决于特定地点、特定作物类型和特定管理制度,影响 CO₂ 和 CH₄ 排放的机理尚有待进一步地明确。

另一个值得关注的问题是施用黑碳可以增加土壤的孔隙度,从而增加土壤水分,增加土壤对养分的固持,提高 pH,降低容重,使耕作更加容易,减少农业生产中的能量投入,包括肥料的生产运输和灌溉等,进而直接或间接地减缓农业过程对温室效应的二氧化碳排放^[88],在评价黑碳作用时也应予以考虑和评价。

6 展望

黑碳作为土壤碳库中难于被降解的成分,它不仅可能是全球碳收支中“missing carbon”的重要组成部分,为陆地生态系统土壤固碳提供了一种新的研究方向,也可能对粮食增产和改善土壤的物理化学结构具有重要的意义,这为保障我国粮食安全和农业可持续发展提供了一种新的技术手段和思路,只有完整地评估黑碳在农业生产的应用价值,包括作物土壤生产力以及对环境的影响,与土壤、水分、养分等的交互作用机理,才能真正认识黑碳在可持续农业中的作用。

目前国际国内在农田土壤黑碳的应用研究尚不够系统深入,在作物生产力和环境综合评价方面存在一定的认知不足和争议,未来需要深入研究的可能包括如下几个方面:1)黑碳含量 黑碳含量测定

的结果间差异很大,不同研究者的方法不同使得结果可比性和可靠性差。国内的报道主要运用的是热氧化法,关注城市生态系统和农业生态系统中黑碳的含量及其环境意义,涉及到外源人为施用黑碳对作物生长发育和土壤过程的报道极少^[24,39,89-91],同时在如何区分土壤外源施入的黑碳和原有的黑碳方面缺乏报道,这对评价黑碳的固碳作用至关重要;2)作物生产力 虽然目前的统计结果表明黑碳能增加作物产量,但缺乏长期试验的结果,且研究尺度不够,而且作物类型、土壤条件相对单一,仍需要进一步的评估;3)研究区域 目前对农业土壤黑碳的研究大多数在热带地区进行,土壤类型为高度淋溶酸性土壤,温带地区尤其是中/碱性土壤上的研究不多,是否能够显著提高作物产量还需要更多的试验数据支撑,同时在我国高密度轮作的生产体系中仍然需要精确的田间定位试验以评价黑碳应用在我国的发展前景和推广价值。4)黑碳与土壤的交互作用 黑碳与土壤中的有机质之间存在着交互作用^[92],黑碳的多孔结构会促进微生物和菌根在根际的活动,进而可能增加土壤有机碳的释放速率,减少土壤原有有机碳含量^[93],同时黑碳对微生物作用直接与间接的影响无法区分,需要进一步的明确机理;5)黑碳对温室气体净排放的影响 值得关注的是在碳固定以减少温室效应的同时,其作用往往被其他温室气体排放增加所抵消^[94],系统研究黑碳对温室气体排放的影响有所欠缺,尤其是在农业土壤中的应用研究需要进一步加强^[95];6)黑碳在土壤中的周转与运移 Hammes 的研究表明黑碳在百年时间左右损失了 25%,主要是生物降解过程,他推测黑碳的周转时间大约是 300 年左右^[93],远远低于先前预计的千年以上^[96],这也意味着黑碳的固碳作用可能被高估,农田应用黑碳的前景下降,同时黑碳在土壤剖面中的动力学特征不明晰,需要精确评估其环境影响^[97]。

参考文献:

- [1] 潘根兴,周萍,李恋卿,张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
Pan G X, Zhou P, Li L Q, Zhang X H. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration [J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(2): 327-337.
- [2] Marris E. Black is the new green[J]. Nature, 2006, 442(10): 624-626.
- [3] Mann C C. The real dirt on rainforest fertility[J]. Science, 2007, 297: 920-923.

- [4] Erickson C. Historical ecology and future explorations [A]. Lehmann J, Kern D C, Glaser B, Woods W I (eds.). *Amazonian dark earths: Origin, properties, management* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. 455–500.
- [5] Masiello C A, Druffel E R M. Black carbon in deep-sea sediments [J]. *Science*, 1998, 280: 1911–1913.
- [6] Schmidt M W I. Carbon budget in the black [J]. *Nature*, 2004, 427: 305–307.
- [7] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nat. Geosci.*, 2008, 1: 221–227.
- [8] Ammann M, Kalberer M, Jost D T *et al.* Heterogeneous production of nitrous acid on soot in polluted air masses [J]. *Nature*, 1998, 395: 157–160.
- [9] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, 409: 695–697.
- [10] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T. Aerosols, climate and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, 294: 2119–2124.
- [11] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos [J]. *PNAS*, 2004, 101: 423–428.
- [12] Morawska L, Zhang J. Combustion sources of particles 1. Health relevance and source signatures [J]. *Chemosphere*, 2002, 49: 1045–1058.
- [13] Baskin Y. Slash-and-char improves Amazonian soil [J]. *Bioscience*, 2006, 56: 368.
- [14] Laird A D. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality [J]. *Agron. J.*, 2008, 100(1): 178–181.
- [15] Lehmann J, Silva da Jr, Rondon J P *et al.* Slash-and-char-a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon? [C]. Bangkok, Thailand: 17th World Congress of Soil Science, 2002. 1–12.
- [16] 余向阳, 张志勇, 张新明, 刘贤金. 黑碳对土壤中毒死蜱降解的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5): 1681–1684.
Yu X Y, Zhang Z Y, Zhang X M, Liu X J. Effect of charcoal on the degradation of chlorpyrifos in soil [J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2007, 26(5): 1681–1684.
- [17] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳吸附汞砷铅镉离子的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 770–774.
Wu C, Zhang X L, Li G B. Sorption of Hg^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} and Cd^{2+} by black carbon [J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2007, 26(2): 770–774
- [18] Goldberg E D. *Black carbon in the environment: properties and distribution* [M]. New York: John Wiley, 1985.
- [19] 韩永明, 曹军骥. 环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 125–132.
Han Y M, Cao J J. Black carbon in the environments and its global biogeochemical cycle [J]. *Mar. Geol. Quat. Geol.*, 2005, 25(1): 125–132.
- [20] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—a review [J]. *Mitig. Adapt Strat. Glob. Change*, 2006, 11: 403–427.
- [21] Bond T C, Streets D G, Yarber K F *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *J. Geophys. Res. Atmosph.*, 2004, 109: D14203.
- [22] Jacobson M Z. Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soots feedback to snow and sea ice albedo and emissivity [J]. *J. Geophys. Res. Atmosph.*, 2004, 109: D21201.
- [23] Rodhe H, Persson C, Akesson O. An investigation into regional transport of soot and sulfate aerosols [J]. *Atmos. Environ*, 1972, 6(9): 675–693.
- [24] 戴婷, 李艾芬, 章明奎. 浙江平原农业土壤中黑碳分布特征的研究 [J]. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1321–1324.
Dai T, Li A F, Zhang M K. Distribution characteristics of black carbon in agricultural soils of northern Zhejiang Plain [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2009, 40(6): 1321–1324.
- [25] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochem Cycl.*, 2000, 14: 777–794.
- [26] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Czimeczik C I *et al.* Comparative analysis of black carbon in soils [J]. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 2001, 15: 163–167.
- [27] Hammes K, Schmidt M W I, Smernik R J *et al.* Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere [J]. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 2007, GB3016.
- [28] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Zech W. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils [J]. *Geoderma*, 2007, 139: 220–228.
- [29] Glaser B, Balashov E, Haumaier L *et al.* Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region [J]. *Org. Geochem.*, 2000, 31: 669–678.
- [30] Wang X S. Black carbon in urban topsoils of Xuzhou (China): Environmental implication and magnetic proxy [J]. *Environ. Monit. Assess*, 2009: DOI 10.1007/s10661-009-0814-z.
- [31] Shindo H, Honma T, Yamamoto S, Honma H. Contribution of charred plant fragments to soil organic carbon in Japanese volcanic ash soils containing black humic acids [J]. *Org. Geochem.*, 2004, 35(3): 235–241.
- [32] Simpson M J, Hatcher P G. Overestimates of black carbon in soils and sediments [J]. *Naturwissenschaften*, 2004, 91(9): 436–440.
- [33] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Jager C. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: Black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning [J]. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 2002, 16: 1123–1131.
- [34] Skjemstad J O, Reicosky D C, Wilts A R, McGowan J A. Charcoal carbon in U. S. agricultural soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 1249–1255.

- [35] Skjemstad J O, Clarke P, Taylor J A *et al.* The chemistry and nature of protected carbon in soil[J]. *Aust. J. Soil Res*, 1996, 34: 251–276.
- [36] Czimezik C I, Preston C M, Schmidt M W I, Schulze E D. How surface fire in Siberian Scots pine forests affects soil organic carbon in the forest floor: stocks, molecular structure, and conversion to black carbon (charcoal) [J]. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 2003, 17 (1): 1956–1977.
- [37] Bucheli T D, Blum F, Desaulles A, Gustafsson O. Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland [J]. *Chemosphere*, 2004, 56 (11): 1061–1076.
- [38] Simpson M J, Hatcher P G. Determination of black carbon in natural organic matter by chemical oxidation and solid-state ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *Org. Geochem.*, 2004, 35(8): 923–935.
- [39] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 662–665.
Zhang L Q, Zhang M K. Effects of land use on particulate organic carbon and black carbon accumulation in red and yellow soils [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2006, 37(4): 662–665.
- [40] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Gehrt E, Knabner I K. Charred organic carbon in German chernozemic soils [J]. *Euro. J. Soil Sci.*, 1999, 50: 351–365.
- [41] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. *Biol. Fert. Soils*, 2002, 35: 219–230.
- [42] Jeffery S, Verheijen F G A, Velde M V D, Bastos A C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 2011, 144: 175–187.
- [43] 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 Soil*, 2010, 337: 1–18.
- [44] Asai H, Benjamin K, Samson B *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *field Crop Res.*, 2009, 111: 81–84.
- [45] Lehmann J, Silva Jr J P, Steiner C *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant Soil*, 2003, 249: 343–357.
- [46] Devonald V G. The effect of wood charcoal on the growth and nodulation of garden peas in pot culture [J]. *Plant Soil*, 1982, 66: 125–127.
- [47] Tryon E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils [J]. *Ecol. Monogr*, 1948, 18: 81–115.
- [48] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. *Plant Soil*, 2007, 291: 275–290.
- [49] Mbagwu J S C, Piccolo A. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield [A]. Drozd J, Gonet S S, Senesi N, Weber J (eds). *The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection* [M]. Wroclaw, Poland: IHSS, Polish Society of Humic Substances, 1997. 921–925.
- [50] Oguntunde P, Fosu M, Ajayi A E, Giesen N V D. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil [J]. *Biol. Fert. Soils*, 2004, 39: 295–299.
- [51] Kimetu J M, Lehmann J, Solomon O *et al.* Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient [J]. *Ecosystems*, 2008, 11: 726–739. DOI: 10.1007/s10021-008-9154-z.
- [52] 刘世杰, 窦森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 79–82.
Liu S J, Du S. The effects of black carbon on growth of maize and the absorption and leaching of nutrients [J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2009, 23(1): 79–82.
- [53] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. *Biol. Fert. Soils*, 2005, 41: 15–21.
- [54] Iswaran V, Jauhri K S, Sen A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1980, 12: 191–192.
- [55] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, Nelson P F. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Chemosphere*, 2010, 78: 1167–1171.
- [56] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—a review [J]. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change*, 2006, 11: 403–427.
- [57] Kishimoto S, Sugiura G. Charcoal as a soil conditioner [J]. *Int. Achieve Fut.*, 1985, 5: 12–23.
- [58] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 37–41.
- [59] Ma Y J, Li S G, Wang Z Q. Effect of weathered coal on the colloidal property of soils [J]. *Tu Jang Hsueh Pao*, 1979, 16: 22–28.
- [60] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 162–171.
Zhou L X, Ding M M. Soil microbial characteristics as bioindicators of soil health [J]. *Biodiver. Sci.*, 2007, 15(2): 162–171.
- [61] Liang B, Lehmann J, Sohi S P *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Org. Geochem.*, 2010, 41: 206–213.
- [62] O'Neill B, Grossman J, Tsai M T *et al.* Bacterial community composition in Brazilian Anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification [J]. *Microb. Ecol.*, 2009, 58: 23–35.
- [63] Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S *et al.* Microbial mineralization

- of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study [J]. *Appl. Soil Ecol.*, 2011, 50: 45–51.
- [64] Gaur A, Adholeya A. Effects of the particle size of soilless substrates upon AM fungus inoculums production [J]. *Mycorrhiza*, 2000, 10: 43–48.
- [65] Lehmann J, Rillig M C, Thies J *et al.* Biochar effects on soil biota-A review [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2011, 43: 1812–1836.
- [66] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper K W, Rillig M C. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms [J]. *Plant Soil*, 2007, 300: 9–20.
- [67] Koelmans A A, Jonker M T O, Cornelissen G *et al.* Black carbon: The reverse of its dark side [J]. *Chemosphere*, 2006, 63(3): 365–377.
- [68] 张耀斌, 刘建秋, 赵雅芝, 全燮. 黑碳对沉积物和土壤中乙草胺吸附作用 [J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(1): 26–29.
- Zhang Y B, Liu J Q, Zhao Y Z, Quan X. Effect of black carbon on acetochlor sorption in soils and sediments [J]. *J. Dalian Univ. Technol.*, 2010, 50(1): 26–29.
- [69] Smith P, Martino D, Cai Z *et al.* Agriculture [A]. Metz, Davidson O R, Bosch P R *et al.* (Eds.), *Climate change 2007: Mitigation, contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [M]. Cambridge, UK/New York, US: Cambridge University Press, 2007: 497–540.
- [70] Renner R. Rethinking biochar [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2007, 41: 5932–5933.
- [71] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2007, 53: 181–188.
- [72] Rondon M A, Molina D, Hurtado M *et al.* Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through biochar amendments to unfertile tropical soils [A]. *Proceedings of the 18th world congress of soil science* [C]. PA, USA: Philadelphia, 2006: 138–168.
- [73] Castaldi S, Riondino M, Baronti S *et al.* Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes [J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 1464–1471.
- [74] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, Haefele S M. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2010, 43: 1768–1778.
- [75] Singh B P, Hatton B J, Singh B *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *J. Environ. Qual.*, 2010, 39: 1224–1235.
- [76] Taghizadeh T A, Clough T J, Condon L M *et al.* Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches [J]. *J. Environ. Qual.*, 2011, 40: 468–476.
- [77] Spokas K A, Baker J M, Reicosky D C. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts [J]. *Plant Soil*, 2010, 333: 443–452.
- [78] Zwieter V L, Singh B, Joseph S *et al.* Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil [A]. Lehmann J, Joseph S. *Biochar for environmental management science and technology* [M]. UK: Earthscan Press, 2009. 227–249.
- [79] Zimmerman A, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2011, 43: 1169–1179.
- [80] Rondon M, Ramirez J A, Lehmann J. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils [A]. *Proceedings of the third USDA symposium on greenhouse gases and carbon sequestration* [C]. Baltimore: Soil Carbon Center, Kansas State University, United States Department of Agriculture, 2005. 208.
- [81] Karhu K, Mattila T, Bergstrom I, Kristiina R. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study [J]. *Agric., Ecosys. Environ.*, 2011, 140: 309–313.
- [82] Zhang A F, Bian R J, Pan G X *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles [J]. *Field Crops Res.*, 2012, 127: 153–160.
- [83] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agric., Ecosys. Environ.*, 2010, 139: 469–475.
- [84] Knoblauch C, Marifaat A A, Haefele M S. Biochar in rice-based system: impact on carbon mineralization and trace gas emissions [Z]. 2008. <http://www.biocharinternational.org/2008/conference/posters>.
- [85] Bell M J, Worrall F. Charcoal addition to soils in NE England: a carbon sink with environmental co-benefits? [J]. *Sci. Total Environ.*, 2011, 409: 1704–1714.
- [86] Hilscher A, Heister K, Siewert C, Knicker H. Mineralization and structural changes during the initial phase of microbial degradation of pyrogenic plant residues in soil [J]. *Org. Geochem.*, 2009, 40: 332–342.
- [87] Jones D L, Murphy D V, Khalid M *et al.* Short-term biochar induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2011, 43: 1723–1731.
- [88] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R. A review of biochar and its use and function in soil [J]. *Adv. Agron.*, 2010, 105: 47–82.
- [89] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 177–182.
- He Y, Zhang G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing [J]. *Acta Pedolog. Sin.*, 2006, 43(2): 177–182.

- [90] 何跃, 张甘霖, 杨金玲, 等. 城市化过程中黑碳的土壤记录及其环境指示意义[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2369-2375.
He Y, Zhang G L, Yang J L *et al.* Soil record of black carbon during urbanization and its environmental implications [J]. Environ. Sci., 2007, 28(10): 2369-2375.
- [91] 唐杨, 韩贵琳, 徐志方. 黑碳研究进展[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 98-108.
Tang Y, Han G L, Xu Z F. Black carbon: A review of recent research[J]. Earth Environ., 2010, 38(1): 98-108.
- [92] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. Science, 2008, 320: 629.
- [93] Hammes K, Torn M S, Lapenas A G, Schmidt M W I. Centennial black carbon turnover observed in a Russian steppe soil[J]. Biogeosciences, 2008, 5: 1339-1350.
- [94] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism[J]. Agric. Ecosys. Environ., 2000, 82(13): 121-127.
- [95] Pratt K, Moran D. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential [J]. Biomass Bioen., 2010, 34: 1149-1158.
- [96] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling[J]. Soil Biol. Biochem., 2009, 41: 210-219.
- [97] Lehmann J, Skjemstad J, Sohi S *et al.* Australian climate-carbon cycle feedback reduced by soil black carbon[J]. Nat. Geosci., 2008, 832-835.