

生物炭在土壤改良中的应用进展与风险分析

高亮^{1,2}, 李志合^{3*}, 王芳³, 邓敏⁴, 陈雪⁴, 赵峰^{1,2}

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 养分资源高效利用全国重点实验室, 济南 250100; 3. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 4. 重庆市农业科学院茶叶研究所, 重庆 402160)

摘要: 生物炭在提升耕地质量和作物增产方面展现出显著潜力, 为深入分析生物炭还田对土壤改良和作物生长的研究和应用进展, 该研究系统综述了生物炭的制备方法及其装备、影响生物炭理化性质的关键因素、以及生物炭对土壤(理化性质、养分、酶活和微生物群落、无机重金属和有机污染物、碳汇减排)和作物的影响, 归纳总结了关键影响因素及相关机理, 探讨了生物炭应用的风险及应对措施, 并提出未来研究建议。一方面, 生物炭还田具有改善土壤条件、直接提供或促进养分供给、改善土壤微生物群落结构及酶活性、降低重金属生物有效性、吸附或降解有机污染物、减少温室气体排放、提高土壤固碳能力、促进作物生长等优势; 另一方面, 生物炭大量施用土壤, 可能存在环境风险和健康风险, 需要对生物炭长期还田效果进行系统评估, 全面评价其经济、社会和生态效益, 并采取适当优化措施, 降低甚至避免生物炭应用风险。研究旨在推动生物炭产业健康发展, 助力生物炭在农业高质量发展进程中发挥更大作用。

关键词: 生物炭; 土壤改良; 作物增产; 固碳; 风险分析

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504093

中图分类号: S156; X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-19-0019-13

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504093 <http://www.tcsae.org>

GAO Liang, LI Zhihe, WANG Fang, et al. Application progress and risk analysis of biochar in soil amelioration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(19): 19-31. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504093 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤对于农业生产的效益和质量有至关重要的影响, 良好的土壤质量可提高作物产量和质量, 保障粮食安全^[1-3]。联合国环境规划署针对全球土壤质量评估结果显示, 超过 50% 的土壤资源处于亚健康状态, 包括结构性破坏、养分流失、元素循环紊乱、土壤微生物群落失衡等现象, 约有 30% 的土壤呈现中度到重度功能衰退迹象^[4-5]。联合国教科文组织也于 2024 年发出警告, 未来 30 a 内全球 90% 的耕作层土壤将面临系统性功能衰退风险, 这将严重影响现代农业的发展以及人类赖以生存的根基^[6]。

生物炭科学还田具有改善土壤生态、农业碳汇减排和提高作物产量及质量等功效^[7], 近年来, 生物炭作为一种功能材料在土壤改良领域中的研究与应用得到国内外广大学者的持续关注^[8-9]。生物炭是以生物质(通常指农林废弃物)为原料, 在一定温度、气氛(限氧、无氧、饱和水蒸气)与压力(常压或高压)条件下热解, 生成的一种具有高度化学稳定性、热稳定性和生物惰性的固体材料^[10-11]。生物炭具有官能团丰富、孔隙发达、比表

面积大、理化性质易控可调、原料成本低、碳中性、可再生等优点^[12-13], 还田后通过物理、化学和生物等作用机制对土壤和作物可产生直接或间接影响, 进而实现土壤改良及作物增产提质^[14]。

近年来学者们对生物炭的研究兴趣愈发浓厚, 尽管已有研究综述了生物炭在农业^[15]、环境^[16]、能源^[17]等领域的应用, 但缺乏对生物炭还田应用在碳汇减排和潜在风险方面的充分重视。基于此, 本研究系统综述了生物炭对改良土壤生态、促进作物生长和固碳减排的影响及其机理, 并提出生物炭应用的潜在风险及应对措施, 依据研究现状对未来的研究和发展方向进行了展望, 以为生物炭的研究与应用提供参考, 助力生物炭产业在农业领域的健康发展。

1 生物炭还田对土壤的影响

1.1 生物炭制备

生物炭还田效果与其本身理化性质密切相关, 而原料类型、热解温度、制备方法及反应器类型对生物炭理化特性具有重要影响。现有生物炭制备方法见表 1, 生物炭制备优选慢速热解法, 炭产率相对较高且特性较好, 以实现工厂化生产, 快速热解和气化主要用于生产生物油和裂解气, 微波热解、水热炭化、闪蒸炭化的炭产率虽然高, 但设备投入成本高, 尚未市场化, 烘焙主要作为一种原料预处理方法使用, 生物炭特性不显著。

生物质种类直接影响产物分布和品质, 通常情况下, 木材类原料木质素含量高, 粪便类原料蛋白质和脂肪含量高, 秸秆类原料纤维素和半纤维素占比高, 同样热解条件下生物炭的产率及碳含量的大小依次为: 木材类、秸

收稿日期: 2025-04-09 修订日期: 2025-08-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4203802); 国家重点研发计划项目(2024YFD1700500); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0994); 鲁渝科技协作计划项目(CSTB2024TIAD-LDX0011)

作者简介: 高亮, 博士, 助理研究员, 研究方向为农机装备与生物质资源化利用技术。Email: qdgaoliang@163.com

*通信作者: 李志合, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物质综合利用技术。Email: lizhihe@sdut.edu.cn

秆类、粪便类。孔隙结构和表面积方面,木材类生物炭微孔和介孔并存,孔隙最发达,比表面积最高;秸秆类生物炭以介孔为主,孔隙分布分散,比表面积中等;粪便类生物炭以微孔为主,孔隙结构致密、易被灰分和无机矿物堵塞,比表面积较低。生物炭灰分和矿物质含量大小依次为:粪便类、秸秆类、木材类;生物炭热值大小依次为:木材类、秸秆类、粪便类。生物炭表面化学性质方面,秸秆类稳定性中等,含有较多含氧官能团,亲水性好,可用于改善土壤透气性和保水性等,适合旱地农业;粪便类易矿化,稳定性最低;还要预防病原体 and 重金属风险,可作为肥料补充剂提供养分,木材类稳定性最高,是长期固碳的理想材料,可用于污染土壤修复等^[18]。

生物质制备生物炭技术的关键是热解反应器,反应器类型及加热方式对产物分布和品质有重要影响。热解是吸热反应,需从外界吸收能量才能持续。美国、澳大利亚、加拿大等国家的生产工艺和设备较为先进,中国通过对热解过程和机理的理论研究,生物质热解技术和装备也取得较好发展成果,国内外典型生物质热解反应

器如表2所示。外加热式反应器的裂解气热值高、生物油含尘量少,特别是回转炉式反应器,具有原料适应性强、操作方便、成熟度高等优点,在工业上已经成功应用于生物炭规模化生产,但传热效率较低。内加热式反应器加热速度快,但焦油含尘量高、重质组分含量高。内外复合式加热反应器加热迅速,但热解过程中使用热载气会降低气体热值^[20]。

表1 生物炭制备方法

制备方法 Preparation method	温度区间 Temperature interval/°C	保温时间 Holding time	产物分布 Product distribution/%			参考文献 References
			生物炭 Biochar	生物油 Bio-oil	裂解气 Pyrolysis gas	
慢速热解	300~650	>30 min	20~50	20~30	25~35	[3]
快速热解	500~800	0.5~5.0 s	10~20	70~80	10~20	[5]
微波热解	400~700	5~20 min	30~45	30~45	20~30	[7]
气化	600~900	10~20 s	<10	<5	>85	[8]
水热炭化	150~250	1~12 h	30~70	5~25	2~5	[9]
闪蒸炭化	300~600	<30 min	30~50	/	/	[18]
烘焙	200~300	10~60 min	65~85	/	/	[18]

表2 国内外典型生物质热解反应器

加热方式 Heating method	热载体 Heat carrier	典型热解反应器 Typical pyrolysis reactor	参考文献 References
外加热 External heating	/	Edinburgh 大学热解设备、中国科技大学螺旋热解装置、农业农村部规划设计院的回转炉热解反应器、真空热解反应器、斯列普炉	[18]
内加热 Internal heating	瓷球、沙子、气体	Karlsruhe 理工学院和 Mississippi State 大学的螺旋反应器 鼓泡流化床、循环流化床、内循环串行流化床	[19]
内外复合式加热 Combined internal and external heating	瓷球、沙子或热载气	美国加利福尼亚州热解反应器、山东理工大学的陶瓷球热载体 加热下降管式热解装备、沈阳农业大学的旋转锥热解反应器	[20]

1.2 生物炭对土壤理化性质的影响及相关机理

如图1所示,生物炭具有多孔、比表面积大、富含亲水性的含氧官能团等特点,对土壤主要理化性质有明显影响,可改善土壤容重和孔隙度、保水能力、pH值和阳离子交换量^[21]。容重升高,土壤易板结,不利于作物生长。刘慧等^[22]在减氮配施生物炭改善土壤肥力和水稻产量的研究中发现,生物炭还田后土壤孔隙度增加、容重降低、持水性提升,显著提高了土壤综合肥力。生物炭改善土壤容重的机制归纳为3种:1)生物炭颗粒密度相比土壤更低,生物炭还田后与土壤间形成孔隙,从而降低土壤容重;2)生物炭表面含氧官能团吸附作用将土壤微团聚体聚合成大团聚体,结构疏松多孔,降低了土壤容重;3)生物炭为土壤微生物提供营养物质,微生物代谢增强产生的有机酸等产物有利于土壤大团聚体的形成,进一步降低了土壤容重。生物炭本身多孔能直接提高土壤孔隙度,同时通过产生堆积孔隙或容纳孔隙来提升土壤整体孔隙度^[22-23]。

生物炭改善土壤保水能力的机制归纳为3种:1)生物炭多孔结构引起土壤孔径分布的重组,改善土壤透气性和透水性,进而提升土壤保水能力;2)极性含氧官能团使得生物炭具有不错的亲水性,增强了土壤对水分的保留能力;3)极性氢键(O_2- 与 $C-O-H$)促使水分子与生物炭相互作用,提高土壤持水能力。土壤保水能力与生物炭原料类型、特性、粒径及土壤质地等因素密切相关,不同质地黑土的持水量随生物炭添加比例增加而显著增大,随生物炭粒径减小而增大,且当生物炭粒径为0.25 mm,添加比例为10%时,杨木炭效果优于竹炭,

添加杨木炭的壤土、沙壤土和沙土的田间持水量相比空白对照分别提高了64.97%、66.42%和69.39%^[23]。制备温度越高,生物炭的极性越低,其疏水性增强可能会阻止水分进入生物炭孔隙,特别是在生物炭大量应用时,疏水效果比较显著^[24]。此外,生物炭还田后,老化会提高生物炭亲水性,但降解导致生物炭破碎,甚至有的土壤组分迁移到生物炭表面占据亲水性吸附位点、阻塞孔隙,阻碍水分传导,也会减低生物炭对土壤的保水能力^[25]。

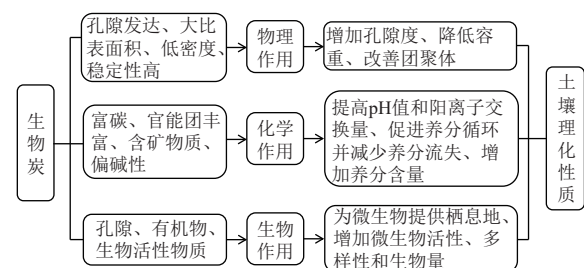


图1 生物炭对土壤理化性质的影响

Fig.1 Influence of biochar on soil physical and chemical properties

pH值是土壤最重要的属性,也是影响作物产量的重要因素。生物炭因含有碳酸盐等矿物质元素,一般呈碱性,通过改性可调控其酸碱度,进而用于改善不同类型土壤的pH值^[23]。土壤中 Al^{3+} 与生物炭表面的可交换阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)发生离子交换,生物炭表面官能团通过络合、配位作用吸附 Al^{3+} ,既可缓解土壤铝胁迫,又增加了土壤中碱离子含量,可一定程度提高土壤pH值^[26]。生物炭对土壤pH值的改良效果与土壤类型、生

物炭原料、热解温度等因素有关。相同热解条件下制备生物炭用于提升土壤 pH 值，相比玉米秸秆和花生壳，小麦秸秆制备的生物炭效果显著，500 °C 以下温度制备的生物炭呈中性或弱碱性，随热解温度升高，生物炭碱性增强，因此，生物炭常用于改良酸性土壤^[27-28]。

阳离子交换量 (cation exchange capacity, CEC) 是衡量土壤营养质量并调节土壤肥力的重要指标，在土壤改良时提高 CEC 尤为重要。生物炭增加土壤 CEC 的机制有 3 种 (见图 2)：1) 生物炭含氧官能团和矿质元素丰富，能够直接增加土壤的交换位点；2) 生物炭表面电荷多呈负电性，增加土壤对阳离子的吸附位点；3) 生物炭引起土壤 pH 值升高，使得土壤胶体去质子化，促进有机-无机矿物复合物的形成，进而增加了土壤 CEC。

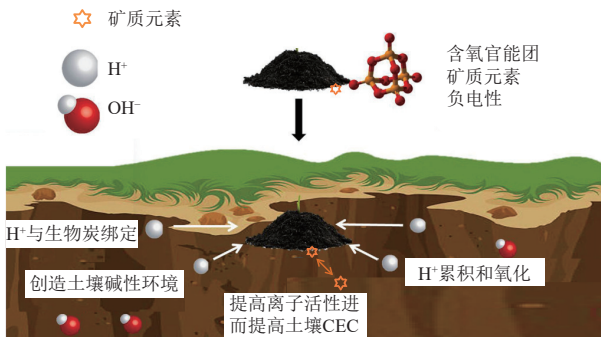


图 2 生物炭增加土壤阳离子交换量机制

Fig.2 Mechanism of biochar increasing soil cation exchange capacity (CEC)

原料类型、制备温度、土壤类型、环境等均会影响生物炭改良土壤 CEC 效果。畜禽粪便生物炭相比秸秆生

物炭，含有更多的矿物质和官能团，所以 CEC 更高，秸秆生物炭的 CEC 随制备温度的升高 (450~700 °C) 而降低 (26.36~10.28 cmol/kg)，这是因为低温下纤维素分解不完全，会产生更多含氧官能团，生物炭还田对 CEC 较低的盐碱地改善作用明显^[21]。生物炭还田后，随着时间的推移，环境因素 (冻融、旱涝等) 使得生物炭老化或降解，生物炭官能团和交换位点数量的变化会影响其 CEC^[29]。

1.3 生物炭对土壤养分的影响及相关机理

生物炭对土壤养分的影响取决于土壤类型及生物炭的原料、制备工艺和施用量等，如表 3 所示。生物炭通过官能团和孔隙，可直接吸附铵态氮和硝态氮，减少 N 淋失和反硝化损失^[30]。生物炭普遍呈碱性，可中和酸性土壤，减少 NH₃ 挥发，提高土壤有效氮含量^[31]。生物炭通过改善微生物活性促进有机氮矿化，间接增加有效氮供应^[32]。生物炭通过提高酸性土壤 pH 值，可减少铁/铝氧化物对 P 的固定、促进含 Ca 矿物质溶解，还能通过阳离子交换作用吸附磷酸根阴离子、置换被矿物质固定的 Ca，从而提高土壤中 P 和 Ca 的有效性^[32]。生物炭表面负电荷可吸附 K⁺，减少钾的淋失^[34]。与原材料相比，由于元素的浓缩效应，生物炭可直接为土壤提供养分^[35]。此外，生物炭还通过改善土壤结构、影响土壤微生物群落等作用间接对土壤养分产生正向影响^[36]。

生物炭还可以通过提高土壤中大分子养分 (N、P、K) 和微量营养元素 (Ca、Mg) 的留存，进而提高植物对养分的可利用性，机理如图 3 所示。生物炭通过物理和化学作用参与土壤营养物质的循环，其多孔特性和丰富的表面官能团能够对营养元素进行吸附、络合和配位交换，进而调控土壤中可利用营养物质的供给^[21]。

表 3 生物炭对土壤养分含量的影响

Table 3 Effects of biochar on soil nutrient content

土壤类型 Soil type	应用场景 Application scenarios	原料 Raw material	热解温度 Pyrolysis temperature/°C	施用量 Application amount/%	生物炭对土壤养分的影响 Impact of biochar on soil nutrient	参考文献 References
沙壤土和黏土 Sandy loam and clay loam	农田	生玉米	200~600	0.5~1.0	土壤总氮增加 63%~120%，钾含量增加 12%~41%，但植物速效磷下降 23%~86%	[30]
钙质壤土 Calcicolous soil	农田	玉米渣	200~500	2	全氮增加 1.21~1.41 倍，速效磷增加 1.71~2.65 倍，钾增加 1.53~2.6 倍	[31]
黏壤土 Clay loam	农田	玉米秸秆	500~600	0~8	土壤碳、全氮、速效磷、钾分别提高 349.26%、120.39%、15.78% 和 9.11%	[32]
沙壤土 Sany loam	农田	小麦秸秆	350~550	40~50	全氮、碳、速效磷显著提高了 16.46%、7.66% 和 119.1%	[32]
河岸土 Riverbank soil	土柱试验	稻壳	450	1~10	全氮含量增加了 58.64%，有效磷含量增加了 85.05%	[32]
酸性土壤 Acid soil	温室土	污泥	550	5~10	土壤 pH 值提高 20.9%~34.1%，总碳含量提高 554.5%~818.2%，总氮含量提高 350%~550%	[33]

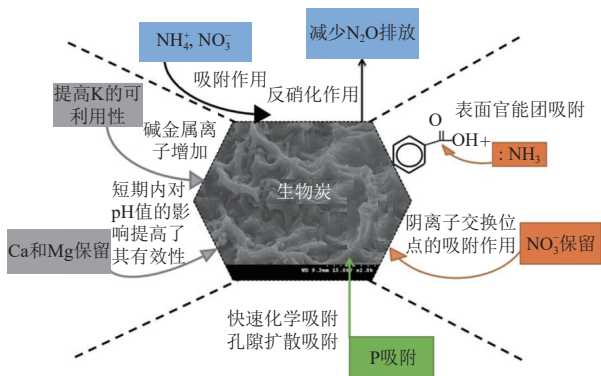


图 3 生物炭增加土壤养分留存并提高其可利用性机理
Fig.3 Mechanism by which biochar increases soil nutrient retention and enhances their availability

1.4 生物炭对土壤酶活和微生物群落的影响及相关机理

土壤酶反映了土壤的肥力和质量状况，其活性取决于土壤的类型、条件和理化性质。生物炭还田对土壤酶活有显著影响，当麦秸生物炭施用量为 30 t/hm² 时，可显著提高土壤脱氢酶、脲酶、蛋白酶和碱性磷酸酶的活性^[37-38]。生物炭对土壤酶活性的影响如表 4 所示，生物炭增强土壤酶活性的机制可归结为：1) 生物炭孔隙为微生物提供栖息地，增强了微生物活性，进而增加酶分泌^[45]；2) 生物炭改善了土壤通气性，促进好氧微生物活动，微生物通过分泌更多过氧化氢酶分解好氧代谢副产物 (H₂O₂) 以避免毒性；3) 生物炭吸附重金属或有机污染物，减轻其抑制作用，提高酶活性^[46]；4) 生物炭含可溶性有机碳，能够直接刺激微生物分泌转化酶来分解蔗糖等底物^[47]；5) 生物炭提高土壤持水性，改善微生物活

性, 间接促进转化酶分泌^[43-44]。

微生物是土壤重要组成部分, 其代谢活性在土壤化学循环过程中发挥着核心驱动作用^[48]。不同生物炭还田对土壤微生物群落的影响如表 5 所示, 生物炭影响土壤微生物群落的机制可归结为: 1) 土壤微生物群落结构与酶活性密切相关, 生物炭可增加土壤酶(脲酶、过氧化氢酶等)含量, 引起土壤放线菌、芽单胞菌等菌群数量增加^[54-55]; 2) 生物炭可固定和灭活土壤病原菌释放的酶, 从而保护有益菌群^[56]; 3) 生物炭通过阳离子交换、络合吸附等作用提升土壤养分含量, 为微生物生长直接提供养分^[57]; 4) 低密度、多孔结构的生物炭可为土壤微生物提供栖息地(见图 4), 可改善土壤透气性和持水性,

进而影响微生物群落结构^[47]; 5) 生物炭通过电子传递功能促进微生物间电子转移, 可增强土壤微生物活性^[44]; 6) 生物炭长期还田能够影响土壤 pH 值, 随土壤 pH 值上升, 细菌丰度(pH 值 ≤ 7 时)增加, 但真菌丰度下降^[58]。

原料不同, 生物炭理化特性不同, 其对土壤微生物群落和土壤酶活性的影响作用也不同, 因此, 要针对不同土壤类型及其特点选择适宜的生物质原料、制备工艺。同时, 随着土壤微生物群落和酶活性的改变, 其对土壤生态的改善效果也不同, 例如水解酶类数量和活性增加, 能够通过水解蛋白质、多糖等物质促进土壤 C、N 循环, 而氧化还原酶类数量和活性增加, 能够通过分解腐殖质的分解合成促进土壤中物质和能量的转化^[48]。

表 4 生物炭对土壤酶活性的影响

Table 4 Effects of biochar on soil enzyme activity

土壤类型 Soil type	pH 值 pH value	原料 Raw material	热解温度 Pyrolysis temperature / $^{\circ}\text{C}$	施用量 Application amount	对酶活性影响 Effects on enzyme activity	参考文献 References
粘壤土	7.86	棉秆	450	3.7 t·hm ⁻²	与对照相比, 土壤 β -葡萄糖苷酶和 N-乙酰-葡萄糖苷酶活性分别提高 29.4% 和 50.9%	[39]
红土	5.40	猪粪	350~500	5~20 g·kg ⁻¹	与对照相比, 添加 2.0% 生物炭可显著提高磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性, 分别提高 23.2%、27.9%、50.3% 和 63.3%	[40]
粉质壤土	6.90	稻秆	500	肥料分别与 0.2%、1% 和 5% 生物炭配施	与对照组相比, 5% 生物炭与肥料配施, 脲酶活性最高, 脲酶活性提高了 121.05%	[41]
盐土	10.10	花生壳	350~550	0~101.25 t·hm ⁻²	随生物炭施用量增加, 过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性增加了 20%~54.76%	[42]
沙质土壤	5.90	稻壳	450	0~80 g·kg ⁻¹	施用量 80 g·kg ⁻¹ 的土壤, 转化酶、中性磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性最高	[43]
沙质土壤	8.25	甘蔗渣	350	0~10 t·hm ⁻²	10 t·hm ⁻² 配施 NPK 时土壤脱氢酶活性最高, 比对照组提高 52%	[44]

表 5 生物炭对土壤微生物群落影响

Table 5 Effects of biochar on soil microbial communities

土壤类型 Soil type	原料 Raw material	热解温度 Pyrolysis temperature/ $^{\circ}\text{C}$	施用量 Application amount	对菌群数量的影响 Impact on the quantity of the microbial community	参考文献 References
红壤土	水稻秸秆	450	192 kg·hm ⁻² (2 a)	与对照相比, 绿弯菌门和酸杆菌门分别增加了 48.77% 和 57.17%, 厚壁菌门和放线菌门分别减少了 30.97% 和 43.18%	[42]
东北草甸 (白土)	水稻秸秆、玉米秸秆	/	20 t·hm ⁻²	与对照相比, 变形菌门增加了 9.94%~13.95%, 疣微菌门增加了 8.46%~16.57%, 拟杆菌门增加了 0.39%~23.62%, 酸杆菌门减少了 7.08%~7.58%, 绿弯菌门减少了 21.68%~22.60%	[49]
粉质黏壤土	酸性木	250~300	15 和 30 g·kg ⁻¹ (30 d)	与对照相比, 变形菌门增加了 39%, 且变形菌门和放线菌门的相对丰度升高	[50]
风沙土	小麦秸秆	450	15.75、31.5、63、126 t·hm ⁻² (7 a)	对照组的厚壁菌门相对丰度 20.53%, 随生物炭施用量增加, 厚壁菌门相对丰度分别为 31.16%、42.09%、37.17% 和 33.51%	[51]
淋溶土	玉米秸秆	500	250 和 750 kg·hm ⁻² (6 a)	与对照相比, 相对丰度方面, 酸杆菌门提高了 176.02% 和 128.4%, 芽单胞菌门提高了 327.6% 和 216.4%, 绿弯菌门提高了 57.6% 和 60.2%, 浮霉菌门提高了 74.2% 和 86.1%, 装甲菌门提高了 230.5% 和 125.6%	[52-53]
钙质沙壤土	森林伐木剩余物	500	与猪粪堆肥和化学肥料配施 2 a	与对照相比, 放线菌门和变形菌门相对丰度提高了 39.59% 和 29.01%	[5]

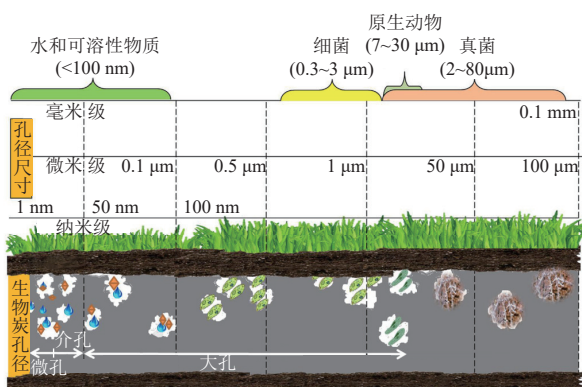


图 4 生物炭孔径分布

Fig.4 Pore size distribution of biochar

1.5 生物炭对土壤重金属的影响及相关机理

重金属是指原子密度大于 4.5 g/cm³ 的元素, 包括铜、

铅、锌、锡、镍、钴、铈、汞、镉和铋, 重金属均有毒性, 铜、锌等虽然是动植物生长必须的微量元素, 但当浓度超过限值时, 也会对动植物造成危害, 铅、镉、汞等, 极低的浓度也会使生物中毒^[18]。《中国统计年鉴》数据显示, 2019 年全国年排放污水 699.7 亿 t, 占全国供水总量的 11.6%, 污水中含有重金属污染物 20.8 亿 t, 是有机污染物排放量的 30.5 倍, 重金属迁移造成土壤污染, 通过生物累积效应, 最终影响动植物甚至人类健康。

生物炭不仅通过吸附、络合等作用提高重金属的稳定性, 还促进土壤重金属由可交换态向残渣态转变, 降低其生物有效性, 减少重金属向植物的迁移, 进而降低重金属的生物累积效应^[59]。生物炭还田对土壤重金属形态及其生物可利用性的影响见图 5, 有研究表明生物炭还田可减少土壤中 Cd 向地表水淋滤, 生物炭与堆肥混合施用使得土壤中生物可利用形态的 Cd、Pb 和 Zn 浓度分别降低了 75%、86% 和 92%^[44]。

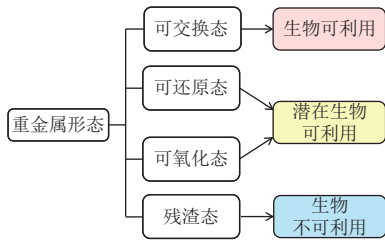
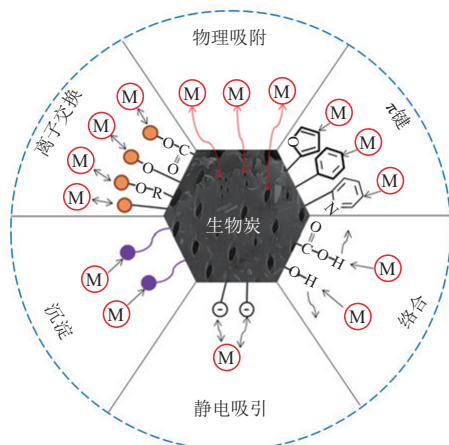


图 5 重金属形态及其生物可利用性

Fig.5 Heavy metal forms and their bioavailability

生物炭对重金属的稳定作用，不仅与生物炭理化性质密切相关，还受重金属类型和土壤条件的影响。在土壤中施用生物炭，植物中 B 和 Mo 的浓度增加，但 Cd、Cu 和 Mn 的浓度降低，在酸性、低 CEC 和总有机碳 (total organic carbon, TOC) 的土壤中，生物炭对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的稳定效果最好^[60]。生物炭的 pH 值一般高于土壤，在重金属更易溶解的酸性土壤中施用生物炭，更利于重金属固定^[45]。浙江绍兴市某铅锌矿区水稻田 0~20 cm 土层，其总 Pb、总 As 含量分别为 447.84、99.73 mg/kg，施用铁改性生物炭后，虽然土壤孔隙水中 As 的浓度显著增加（可能生物炭引起土壤 pH 值升高导致 As 流动性增加），但植物对 As 的吸收量并没有增加，水稻茎、稻谷中 As 的质量分数相对对照组分别下降了 71%~84% 和 70%，原因是生物炭改善了土壤通气条件，促进植物根系表面铁膜的生成，抑制了植物对可溶性砷的吸收，土壤中有有效 Pb 质量分数，相对对照组降幅最高达 24%^[61]。

如图 6 所示，生物炭降低重金属迁移性和生物可利用性的机理可归纳为：1) 大比表面积和高孔隙度可增强生物炭物理吸附重金属的能力；2) 生物炭表面官能团和矿质成分等，如羧基、羟基等含氧官能团能通过离子交换与络合反应吸附重金属，氢键能通过 π 键作用吸附重金属，碳酸盐等矿质成分能通过沉淀反应吸附重金属；3) 生物炭表面一般呈负电性，能通过静电吸附重金属阳离子，生物炭通过改性（负载金属氧化物或阳离子）可增加其正电荷位点，对重金属阴离子（铬酸根、重铬酸根等）也具有静电吸附作用^[18]。



注：● 为可交换阳离子，(M) 为重金属，● 为矿质成分(CO_3^{2-} , PO_4^{3-}), ● 为生物炭。
 Note: ● is exchangeable cations, (M) is heavy metal, ● is mineral(CO_3^{2-} , PO_4^{3-}), ● is biochar.

图 6 生物炭降低重金属迁移性和生物可利用性的机理
 Fig.6 Mechanism of biochar in reducing the mobility and bioavailability of heavy metals

生物炭通过物理、化学作用吸附固定土壤中的重金属，进而降低其迁移性，降低动植物对重金属的利用率。

1.6 生物炭对土壤有机污染物的影响及相关机理

工业生产、农用化学品使用、牲畜饲养等，致使土壤中有有机污染物数量不断增加，特别是杀虫剂、除草剂、多环芳烃和多氯联苯等。生物炭是修复含有机污染物土壤的理想改良剂，多孔结构、大比表面积和丰富的含氧官能团等性质使其对有机污染物具有较高的吸附能力，从而降低有毒化合物的生物可利用性及其环境毒性^[45]，在添加了 5%（质量分数）黄瓜生物炭的土壤中，油麦菜对磺胺甲噁啉（土壤中混入量 5 mg/kg）的吸收量减少了 86%^[62]。此外，生物炭还可通过提高污染土壤中相关降解细菌的丰度来减少有机污染物含量，施用 5%（质量分数）生物炭的土壤中，83% 的苯醚甲环唑被降解，而与苯醚甲环唑生物降解密切相关的剑菌和假单胞菌丰度分别增加了 46% 和 110%^[63]。木材生物炭对土壤中的甲氧咪草烟、氯草酸和氯磺酸没有吸附作用，是因为阴离子化合物与带负电的生物炭相互排斥，影响了生物炭对这些阴离子污染物的吸附降解作用，但可以通过生物炭改性解决该问题^[64]。

全氟和多氟烷基物质 (perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 是广泛分布在环境中的持久性有机污染物，由于全氟辛烷的毒性和难降解性，其修复日益受到重视，与其他吸附剂相比，生物炭原料来源广泛且成本较低，具有修复持久性有机污染物的潜力^[65]，相关机理如图 7 所示：1) 生物炭上 7.5~11.0 nm 的孔径可“捕获”吸附全氟辛烷酸分子且不易解吸^[66]；2) 生物炭的含氧官能团（羟基、羰基、羧基等）可以通过氢键绑定全氟辛烷磺酸，降低其环境风险^[67]；3) 疏水和静电相互作用也是生物炭去除 PFAS 的关键，高温生物炭疏水表面通过范德华力捕获 PFAS，含氧官能团结合溶液中 H^+ 使生物炭整体带正电，通过静电引力吸附 PFAS 阴离子^[68]；4) 生物炭还可通过氧化、产生自由基等作用直接降解土壤中的全氟辛酸，通过提供反应位点和介导体种间电子转移等作用间接促进全氟辛酸的生物降解^[69]。

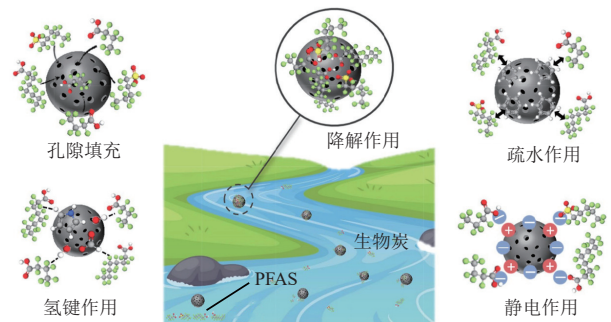


图 7 生物炭修复全氟和多氟烷基物质的机理

Fig.7 Mechanism of biochar in the remediation of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS)

1.7 生物炭对土壤碳汇减排的影响及相关机理

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库，大约 2/3 的有效碳以土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 的形式存在。生物炭芳香烃结构高度稳定，其中的有机碳在土壤中可留存 200 a，是一种资源型的可再生碳储存原料^[70-71]，因此，生物炭还田可有效提高土壤有机碳含量，减少温室气体排放。LIANG 等^[72]连续 2 a 使用玉米秸秆

生物炭还田, 土壤微生物碳含量提高了2.4倍, 在风沙土中应用生物炭的固碳减排潜力相当于每年抵消1亿t二氧化碳排放。WANG等^[73]设置了5个生物炭还田水平(0~6 kg/m²), 通过大田试验研究了生物炭对长江中游典型水田减排温室气体(CH₄、N₂O、CO₂)和固碳的影响, 结果表明, 水稻田CH₄、N₂O和CO₂的累积排放量分别减少了17.12%~58.63%、7.72%~42.2%和18.53%~58.44%, 生物炭还田减排温室气体能力大小依次为: CH₄、CO₂、N₂O。此外, 生物炭显著降低了全球变短潜能值和温室气体强度指数。杨佳等^[74]研究了生物炭对羊粪好氧堆肥温室气体减排的影响, 结果表明, 添加生物炭使得堆肥过程中NH₃、CH₄和N₂O的排放量分别减少38.68%、14.26%和31.54%, 总温室效应降低了31.11%。王雨婷等^[75]对旱伞草生物炭的固碳潜能进行了测算, 发现中国旱伞草生物炭年产量可达1.96~3.21 Mt, 短期年固碳量1.32~1.62 Mt, 短期年减排CO₂当量为4.85~5.95 Mt, 长期年固碳量0.75~0.79 Mt, 长期年减排CO₂当量为2.76~2.88 Mt。

制备生物炭时, 较低的热解温度(<400℃)在固

碳减排方面优于中温(400~600℃)和高温(>600℃), 可能低温热解条件下生物炭碳含量更高所致, 难降解特性使其在土壤中能够长期留存^[76]。生物炭还田已经成为缓解气候变化和改善土壤碳循环(soil carbon cycling, SCC)的一种战略, 且影响SCC的关键因素包含生物炭(原料、制备条件、使用频率等)、土壤类型及条件和还田方案设计等。

2 生物炭对作物的影响及相关机理

生物炭对作物产量的影响如表6所示, 一般情况下, 生物炭还田对作物产量呈正向效应, 如大田作物(玉米^[79-80]、水稻^[81-82]、小麦^[83]、大豆^[84])、特色经济作物(辣椒^[85]、大蒜^[86]、烤烟^[87]、甘薯^[29])和果蔬(小白菜^[88]、黄桃^[89])等。但是, 原料类型、制备条件、使用量、土壤和作物类型等均会影响生物炭对作物的增产效果, 例如, 450℃制备的麦秸生物炭, 当还田量相同时, 水稻和小麦分别增产28%和51%, 当还田量达到50 t/hm²时, 小麦产量减产22%, 家禽粪便生物炭的增产效果优于麦秸炭和生活绿色废弃物类生物炭^[21]。

表6 生物炭对作物产量的影响
Table 6 Effects of biochar on crop yield

土壤类型 Soil type	原料 Raw material	热解温度 Pyrolysis temperature/℃	施用量 Application amount/(t·hm ⁻²)	作物 Crop	产量增减情况 Changes in production volume/%	国家 Country	参考文献 References
酸性粉质沙土	家禽粪便	300~550	30、60	小麦	+28.2、+28.6	意大利	[21]
南方水稻土	麦秸	350~500	10、20	水稻	+28、+9	中国	[21]
酸性土	麦秸	450	1、5、10、50	小麦	+19、+79、+51、-22	德国	[21]
酸性砂质黏壤土	作物秸秆	450	25	玉米	无明显影响	英国	[21]
酸性沙壤土	白桦木	400~550	20	燕麦、春大麦	无明显影响、+6	丹麦	[21]
微碱性壤土	生活绿色废弃物	550	25	小麦	+7.54	澳大利亚	[21]
酸性砂壤土	稻草	400	5	水稻	+24.3	印度	[21]
黏土(盐和钙含量高)	向日葵茎秆	400	15	谷子	提高谷子产量	伊朗	[77]
黄三角盐碱土	稻秆	400~500	8	水稻	促进根系发育和水稻增产	中国	[78]

此外, 生物炭对盐碱土作物生长也有促进作用(表6)。土壤盐分高和有机质含量低是导致土壤条件恶化、影响作物生长的主要原因^[61], 在种植番茄的盐渍化土壤中使用生物炭后, 土壤盐度显著降低, 全量养分(TN、TK、TP)、速效养分(AN、AK、AP)和有机质含量明显提高, 土壤肥力和微生物活性增强, 提高了番茄产量和品质^[90]。施用生物炭可促进滨海盐碱地藜麦根系发育, 同时提高根系活力和酶活性, 显著促进藜麦植株的生长和产量^[91]。在黄河三角洲盐碱地连续施用生物炭2 a后, 0~20 cm土层的水溶性盐含量和pH值均降低, 土壤有机质和速效N、P、K含量增加, 促进了菊芋壮苗培育和产量提高^[92-93]。

生物炭促进作物增产机理如图8所示, 归纳为3种: 1) 生物炭促进作物根系生长, 根系是作物与土壤的纽带, 生物炭通过直接提供营养元素、改善土壤水气条件, 为根系提供良好生长环境, 增强了作物对养分和水分的吸收及利用, 从而促进作物增产; 2) 生物炭促进作物光合作用, 光合作用是作物物质合成与代谢的核心过程, 生物炭可增强光合色素合成、光系统活性, 提高叶片光合性能, 进而促进作物增产; 3) 生物炭能够抑制病害、缓解干旱和盐碱胁迫, 可显著降低烟草根结线虫病发病率, 与微生物菌剂结合后还田可抑制作物病害、缓解盐

胁迫, 可提高干旱或半干旱地区的花生产量^[94-97]。

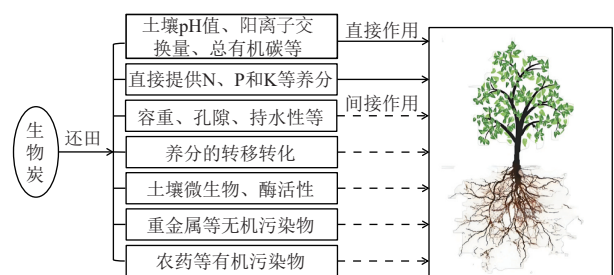


图8 生物炭促进作物增产机理

Fig.8 Mechanism of biochar promoting crop yield increase

3 生物炭应用的风险及应对措施

在过去10~15 a间, 生物炭在农业和环境科学领域引起全球的广泛关注, 研究重点大多是生物炭在土壤改良、作物增产、改善水质和固碳减排方面的益处, 却忽略了生物炭的潜在风险, 然而, 这些风险因素至关重要, 它们不仅决定生物炭的命运, 还影响土壤与动植物健康。生物炭应用风险包括环境风险和健康风险两个方面, 环境风险又分为内源污染物风险、外源污染物风险和纳米生物炭风险^[98]。

3.1 环境风险

3.1.1 内源污染物风险

内源污染物来自生物炭本身，包含有机和无机污染物，如多环芳烃、重金属和新兴污染物^[99]。热解温度对生物炭中多环芳烃含量及毒性有显著影响，低热解温度（ $\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）制备的生物炭多环芳烃（2~3 环）含量低且毒性小，当温度达到或超过 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，高分子量的多环芳烃会分裂成低分子量的多环芳烃，并进一步分裂成 CO 、 CO_2 和 CH_4 等化合物，虽然高温生物炭的多环芳烃含量降低，但更易在土壤中迁移转化，毒性和环境风险较大^[100]。此外，高纤维素含量原料制备的生物炭更易产生多环芳烃^[101]，因此，选择木质素含量较高的原料较好。

生物炭本身含有的重金属来源于原料，受热解温度、原料和重金属化学形态的影响。随热解温度升高，富集效应导致生物炭重金属含量逐渐增加，也有重金属（如 Cd）含量在高温时下降的，这是因为生物质中的 Cd 在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温时会形成高挥发性化合物并以气体形式挥发^[102]。原料类型对生物炭重金属含量的影响很大，牲畜粪便（如牛粪、鸡粪、猪粪）和工业废物（如污水、污泥）生物炭的重金属含量远高于作物秸秆生物炭^[103]。此外，重金属环境风险取决于其浓度和形态（图 5），可交换态重金属的生物利用率最高、毒性最强，可还原与可氧化态重金属在一定条件下可被转化利用，而残渣态重金属很难被生物吸收，毒性最弱，因此，残渣态被认为是稳定无毒的重金属形态。

新兴污染物能够产生活性氧自由基，对农业环境和动植物健康构成重大风险^[104]。热解条件和原料对生物炭中新兴污染物的含量具有重要影响，随热解温度升高、热解时间增加，新兴污染物浓度逐渐增加，木质素、纤维素和半纤维素都是新兴污染物的主要前体，且纤维素和半纤维素的贡献较多，因此，利用高木质素含量原料制备生物炭可降低其新兴污染物含量^[105]。此外，金属改性可能会影响生物炭中新兴污染物的含量，生物质中的酚类化合物会将电子转移到金属氧化物中，形成自由基，但过量金属离子也会消耗新兴污染物并降低其浓度，因生物炭中的新兴污染物能够促进金属还原^[106]。

由此可见，内源污染物的环境风险主要取决于生物炭原料类型、制备工艺和改性方法，可以通过建立一个筛选系统来指导低风险生物炭的生产，确保生物炭应用的环境安全性。

3.1.2 外源污染物风险

外源污染物来自环境，是生物炭从土壤环境中吸附的有机和无机污染物，如重金属、多环芳烃等。生物炭具有良好的吸附特性，环境中的污染物在迁移过程中可被生物炭吸附，特别要注意的是，被生物炭吸附的污染物可能仍具有毒性，如重金属、四环素部分组分，它们只是被生物炭吸附固定，仍具生物可利用性，当生物炭性质发生改变不足以吸附固定这些污染物时，它们会从生物炭迁移转化到土壤中，对土壤生态和动植物产生危害^[107]。

生物炭老化是指因环境因素作用导致生物炭发生的结构、成分及功能改变，这一过程直接影响其应用效果和 环境风险^[98]。生物炭老化机理如图 9 所示，归纳为

3 种：1) 物理老化，是由光照、雨雪、冻融等环境和气候条件导致，会显著改变生物炭形态结构、比表面积、孔径分布等性质，影响其吸附污染物的能力，增加其内源和外源污染物向环境迁移的风险；2) 化学老化，导致生物炭含氧官能团数量增加、pH 值下降、芳香化 π - π 电子被氧化等，生物炭吸附固定污染物的能力进一步减弱，加剧其内源和外源污染物迁移环境的风险；3) 生物老化，微生物（细菌、真菌、放线菌等）可利用并降解生物炭成分，导致生物炭失重、比表面积和官能团密度下降，根际分泌物（糖类、氨基酸等）会促进微生物增值，进而加速生物炭的降解，在此过程中，溶解性有机碳的淋溶、有机碳的矿化流失等会降低生物炭的土壤固碳能力^[106]。

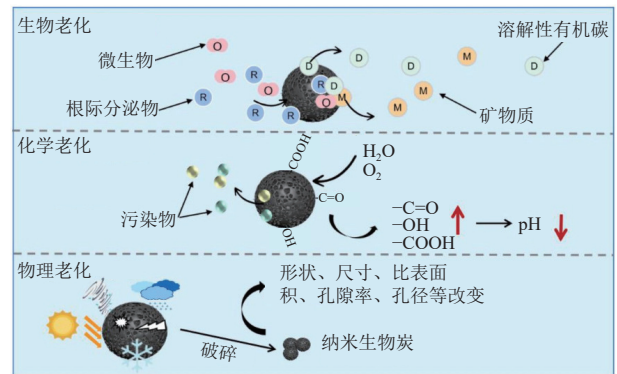


图 9 生物炭老化机理

Fig.9 Aging mechanism of biochar

3.1.3 纳米生物炭风险

在老化过程中，生物炭外形崩解、破碎、粉化，最终成为纳米生物炭（图 9）。纳米生物炭可通过球磨、超声等方法人工制备用于吸附污染物、增强材料性能等，但随着生物炭应用规模扩大，环境中纳米生物炭的累积可能引发显著的纳米效应，纳米生物炭常呈胶体或可溶状态，具有粒径小（通常 $< 100\text{ nm}$ ）、易迁移、较高的光转化/降解率和较高的活性氧生成量等特性^[106]，这引发了人们对生物炭大规模应用安全性的担忧。当前，对纳米生物炭的安全剂量阈值、长期稳定性、毒性认知不足，因此，需要开展更多其在动植物体内迁移转化过程及影响风险的研究。

3.2 健康风险

如上所述，生物炭经老化、降解、淋滤和径流等途径扩散到环境中，其含有的污染物可直接或间接对动植物甚至人类健康产生负面影响，例如，高浓度多环芳烃对细菌基因具有诱变性，重金属、苯、呋喃、酮类和新兴污染物等会抑制微生物活性，此外，生物炭可吸附微生物用于交流的信号分子，导致微生物之间的通讯中断、代谢过程受阻^[108]。

生物炭通过离子交换作用结合土壤中的氮和微量元素，可影响植物对养分的吸收，生物炭中的污染物（多氯联苯、重金属等）会阻碍土壤有益菌与作物间的互生关系、减缓根系发育，导致作物减产^[109]。生物炭含有的新兴污染物对土壤动物具有神经毒性，小尺寸（ $< 0.5\text{ mm}$ ）的生物炭颗粒更易被摄取，对土壤动物健康影响显著^[110]。生物炭大量还田会引起土壤 pH 值、铵盐浓度升高，可

导致蚯蚓体重减轻甚至死亡^[111]。

关于生物炭对人类健康风险的研究很少,局限于对多环芳烃致癌风险的评估^[108]。通常利用研磨来减小粒径、增加比表面积、增强生物炭的应用效果,在其使用过程中出现粉尘扩散,如被人类吸入,可能造成呼吸损伤^[112]。生物炭中的重金属难以降解,具有食物链累积效应,生物炭制备过程中产生的新兴污染物可诱导活性氧自由基的形成,这些对人体健康可能构成重大风险^[113]。因此,要关注生物炭长期应用效果的系统评估,全面评价生物炭应用的经济、社会和生态效益。

4 结论和展望

生物炭还田可改良土壤、促进作物生长,其产业发展是破解资源环境瓶颈、增强农业产能、控制面源污染、助力农业固碳减排的重要路径,一方面,可以多元生物炭基产品的研发和应用为抓手,从政策、技术创新、产业链和商业模式、示范项目及推广、国际合作等方面构建全链条推进体系,推动生物炭产业健康发展;另一方面,生物炭的应用风险可能制约其实际效益,因此,在应用生物炭改良土壤时,有必要深入研究这些限制因素,采取适当措施优化其性能,以提升生物炭还田效果和安全性,针对未来研究,提出以下展望和建议:

1) 阐明不同原料、制备工艺和条件、施用量对生物炭还田效果的影响,验证生物炭与其他土壤改良材料联合使用的效果。研究重点是开发无污染、高效的功能性生物炭基产品(如酸性土壤改良剂、缓释炭基肥、抗盐碱剂等)。

2) 研究生物炭应用的环境和生态风险,建立并完善生物炭应用的评价体系,从全链条的高度全面评估生物炭的经济、社会和生态效益。研究重点是量化生物炭应用产生的负面影响,以优化生物炭原料、制备工艺、使用方法等,从而降低甚至避免生物炭应用风险。

3) 生物炭降解周期很长并会持续影响土壤、作物和环境,因此,未来应开展更大规模、更长期的田间试验,研究生物炭还田后的长期变化及其环境效应。

[参 考 文 献]

- [1] SADAF J, SHAH G A, SHAHZAD K, et al. Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-application of biochars and chemical fertilizers[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 715-724.
- [2] MENG X C, ZHENG E N, HOU D M, et al. The effect of biochar types on carbon cycles in farmland soils: A meta analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 930: 172623.
- [3] LU Y, GU K, SHI B, et al. Does biochar mitigate rainfall-induced soil erosion? A review and metaanalysis[J]. *Biogeochemistry*, 2024, 2: 100096.
- [4] WANG P Y, WANG S P, CHEN F J, et al. Preparation of two types plant biochars and application in soil quality improvement[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167334.
- [5] GUO X X, LIU H T, ZHANG J. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: A review[J]. *Waste Management*, 2020, 102: 884-899.
- [6] 钟兴豪, 谢更新, 张虹, 等. 水热炭在土壤改良中的应用潜力与技术挑战[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(2): 12-25.
- [7] ZHONG Xinghao, XIE Gengxin, ZHANG Hong, et al. Application potential and technical challenges of hydrochar in soil amelioration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(2): 12-25. (in Chinese with English abstract)
- [8] ANTONANGELO J A, SUN X, EUFRADE H D J. Biochar impact on soil health and tree-based crops: A review[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 51.
- [9] 肖鹏飞, 安璐, 吴德东. 基于文献计量学分析的全球生物质炭研究进展[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 292-300.
- [10] XIAO Pengfei, AN Lu, WU Dedong. Research progress of biochar in the world based on bibliometrics analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(18): 292-300. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李子富, 于露, 郑蕾, 等. 水热碳化技术处理畜禽粪便的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(3): 220-229.
- [12] LI Zifu, YU Lu, ZHENG Lei, et al. Research progress of treatment of livestock manure by hydrothermal carbonization technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(3): 220-229. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 1-18.
- [14] ZHANG Weiming, XIU Liqun, WU Di, et al. Review of biochar structure and physicochemical properties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [15] 韩鲁佳, 李彦霏, 刘贤, 等. 生物炭吸附水体中重金属机理与工艺研究进展[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 1-11.
- [16] HAN Lujia, LI Yanfei, LIU Xian, et al. Review of biochar as adsorbent for aqueous heavy metal removal[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [17] XIANG W, ZHANG X Y, CHEN J J, et al. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review[J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126539.
- [18] PATEL M R, PANWAR N L. Evaluating the agronomic and economic viability of biochar in sustainable crop production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 188: 107328.
- [19] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [20] CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Research progress and prospects of agricultural biochar[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物质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.
- [22] CHEN Feijie, XIA Huijuan, LIU Defu, et al. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 161-172. (in Chinese with English abstract)
- [23] 邱凌, 周勤勤, 朱铭强, 等. 农林生物质制备铁炭复合材料及其环境污染治理应用的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 172-182.
- [24] QIU Ling, ZHOU Qinqin, ZHU Mingqiang, et al. Research progress on the preparation of iron-carbon composites from agricultural and forestry biomass and their application in improving environmental pollution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(22): 172-182. (in Chinese with English abstract)
- [25] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 典型农业生物炭理化特性及

- 产品质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 249-257.
- HUO Lili, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Physical and chemical properties and product quality evaluation of biochar from typical agricultural residues[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(16): 249-257. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高亮. 棉秆生物炭吸附铅离子机制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- GAO Liang. Adsorption Mechanism of Pb²⁺ by Cotton Stalk Biochar[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [19] 胡二峰, 赵立欣, 吴娟, 等. 生物质热解影响因素及技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 212-220.
- HU Erfeng, ZHAO Lixin, WU Juan, et al. Research advance on influence factors and technologies of biomass pyrolysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 212-220. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘壮, 田宜水, 马大朝, 等. 生物质热解的典型影响因素及技术研究进展[J]. 可再生能源, 2021, 39(10): 1279-1286.
- LIU Zhuang, TIAN Yishui, MA Dachao, et al. Research progress on typical influencing factors and technology of biomass pyrolysis[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(10): 1279-1286. (in Chinese with English abstract)
- [21] PURAKAYASTHA T, BERA T, BHADURI D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security[J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 345-365.
- [22] 刘慧, 焦岩, 窦婉毓, 等. 减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 391-401.
- LIU Hui, JIAO Yan, DOU Wanyu, et al. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 391-401. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王忠江, 刘卓, 曹振, 等. 生物炭对东北黑土持水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 147-153.
- WANG Zhongjiang, LIU Zhuo, CAO Zhen, et al. Effect of biochars on water retention properties of northeast region black soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 147-153. (in Chinese with English abstract)
- [24] 林彦萍, 任源, 王晓娥, 等. 农业生物质废弃物转化功能材料的研究进展[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4332-4351.
- LIN Yanping, REN Yuan, WANG Xiao'e, et al. Research progress of functional materials for conversion of agricultural biomass wastes[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4332-4351. (in Chinese with English abstract)
- [25] 谢彦海, 陈翰博, 高玉蓉, 等. 农田土壤中生物炭定量方法研究进展[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2024, 42(1): 58-67.
- XIE Yanhai, CHEN Hanbo, GAO Yurong, et al. Advances in quantitative analysis techniques of biochar in agricultural soils[J]. Journal of Foshan University (Natural Sciences Edition), 2024, 42(1): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- [26] BOUDJABi S, ABABSA N, CHENCHOUNI H. Enhancing soil resilience and crop physiology with biochar application for mitigating drought stress in durum wheat (*Triticum durum*)[J]. *Heliyon*, 2023, 9(12): e22909.
- [27] 鲁丽佳, 许丕霞, 陈全, 等. 生物炭提升土壤中解磷菌定殖及其解磷能力[J]. 材料导报, 2024, 38(21): 154-162.
- LU Lijia, XI Pixia, CHEN Quan, et al. Effects of biochar on improving the colonization and phosphate-solubilizing ability of phosphate-solubilizing microbes[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(21): 154-162. (in Chinese with English abstract)
- [28] KUMAR A, KUMARI M, AZIM U, et al. Garbage to Gains: The role of biochar in sustainable soil quality improvement, arsenic remediation, and crop yield enhancement[J]. *Chemosphere*, 2023, 344: 140417.
- [29] AGBEDE T, OYEWUMI A. Benefits of biochar, poultry manure and biochar-poultry manure for improvement of soil properties and sweet potato productivity in degraded tropical agricultural soils[J]. *Resources, Environment and Sustainability*, 2022, 7: 100051.
- [30] KHADEM A, RAIESI F, BESHARATI H, et al. The effects of biochar on soil nutrients status, microbial activity and carbon sequestration potential in two calcareous soils[J]. *Biochar*, 2021, 3(1): 105-116.
- [31] KARIMI A, MOEZZI A, CHOROM M, et al. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(2): 450-459.
- [32] HOSSAIN M, BAHAR M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J]. *Biochar*, 2020, 2(4): 379-420.
- [33] EL-NAGGAR A, EL-NAGGAR A H, SHAHEEN S M, et al. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 241: 458-467.
- [34] BOLAN N, HOANG S, BEIYUAN J, et al. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage[J]. *International Materials Reviews*, 2021, 67(2): 150-200.
- [35] DAI Z M, XIONG X Q, ZHU H, et al. Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes[J]. *Biochar*, 2021, 3(3): 239-254.
- [36] ZHOU C F, HEAL K, TIGABU M, et al. Biochar addition to forest plantation soil enhances phosphorus availability and soil bacterial community diversity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 455: 117635.
- [37] SU Z J, LIU X Z, WANG Z J, et al. Biochar effects on salt-affected soil properties and plant productivity: A global meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 366: 121653.
- [38] KHAN Z, ZHANG K K, KHAN M N, et al. Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 154: 127096.
- [39] MA L J, MIN W, GUO H J, et al. Response of soil organic C fractions and enzyme activity to integrating N fertilisation with cotton stalk or its biochar in a drip-irrigated cotton field[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2021, 71(2): 98-111.
- [40] JIANG Y L, WANG X J, ZHAO Y M, et al. Effects of biochar application on enzyme activities in tea garden soil[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 728530.
- [41] ZHENG J Y, ZHANG J X, GAO L, et al. Effect of straw biochar amendment on tobacco growth, soil properties and rhizosphere bacterial communities[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20727.
- [42] WANG J P, HUANG R Z, ZHU L Q, et al. The effects of biochar on microbial community composition in and beneath biological soil crusts in a *Pinus massoniana* Lamb.

- Plantation[J]. *Forests*, 2022, 13(7): 1141.
- [43] WANG Y F, MA Z T, WANG X W, et al. Effects of biochar on the growth of apple seedlings, soil enzyme activities and fungal communities in replant disease soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256: 108641.
- [44] AZEEM M, HAYAT R, HUSSAIN Q, et al. Effects of biochar and NPK on soil microbial biomass and enzyme activity during 2 years of application in the arid region[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(10): 311.
- [45] ZHU X M, CHEN B L, ZHU L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 98-115.
- [46] YAO T X, ZHANG W T, GULAQA A, et al. Effects of peanut shell biochar on soil nutrients, soil enzyme activity, and rice yield in heavily saline-sodic paddy field[J]. *Journal of Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(1): 655-664.
- [47] 杨海滨, 李中林, 徐泽, 等. 不同施肥措施对重庆茶园土壤微生物学特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023, 8: 59-66.
YANG Haibin, LI Zhonglin, XU Ze, et al. Effects of different fertilization regimes on soil microbial characteristics in tea-garden soil from Chongqing[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023, 8: 59-66. (in Chinese with English abstract)
- [48] 黄治宏, 赵浩宾, 王龙飞, 等. 生物炭对土壤酶活性、生态功能研究进展及作用机制分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2025, 1: 250-259.
HUANG Zhihong, ZHAO Haobin, WANG Longfei, et al. Research progress and mechanism analysis of biochar on soil enzyme activity and ecological function[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025, 1: 250-259. (in Chinese with English abstract)
- [49] YIN D, LI H, WANG H, et al. Impact of different biochars on microbial community structure in the rhizospheric soil of rice grown in albic soil[J]. *Molecules*, 2021, 26(16): 4783.
- [50] SOOTHAR M K, HAMANI A K M, SARDAR M F, et al. Maize (*Zea mays L.*) seedlings rhizosphere microbial community as responded to acidic biochar amendment under saline conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 789235.
- [51] YAN H, CONG M F, HU Y, et al. Biochar-mediated changes in the microbial communities of rhizosphere soil alter the architecture of maize roots[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1023444.
- [52] GAO M Y, YANG J F, LIU C M, et al. Effects of long-term biochar and biochar-based fertilizer application on brown earth soil bacterial communities[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, 309: 107285.
- [53] YAN T T, XUE J H, ZHOU Z D, et al. Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous area[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148757.
- [54] HUANG W H, QIN H L, LU Y, et al. Effects of banana stem and its biochar application on soil aggregate characteristics in the Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 413-420.
- [55] FENG H L, XU C S, HE H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 42(1): 422-432.
- [56] JAISWAL A K, ALKAN N, ELAD Y, et al. Molecular insights into biochar-mediated plant growth promotion and systemic resistance in tomato against fusarium crown and root rot disease[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13934.
- [57] ATOLOYE I A, ADESINA I S, SHARMA H, et al. Hemp biochar impacts on selected biological soil health indicators across different soil types and moisture cycles[J]. *PloS One*, 2022, 17(2): e0264620.
- [58] 杨莉, 勾颖, 文子伟, 等. 生物质炭对连作参地土壤肥力及微生物特性的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(6): 1244-1253.
YANG Li, GOU Ying, WEN Ziwei, et al. Effect of biochar on soil fertility and microbial properties in continuous cropping ginseng field[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(6): 1244-1253. (in Chinese with English abstract)
- [59] SULTAN H, LI Y S, AHMED W, et al. Biochar and nano biochar: Enhancing salt resilience in plants and soil while mitigating greenhouse gas emissions: A comprehensive review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 355: 120448.
- [60] GAO G, YAN L, TONG K Q, et al. The potential and prospects of modified biochar for comprehensive management of salt-affected soils and plants: A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169618.
- [61] 毛浩楠, 杨兴, 陆扣萍, 等. 铁改性生物质炭对农田土壤养分及砷、铅有效性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(6): 1222-1232.
MAO Haonan, YANG Xing, LU Kouping, et al. Effect of iron-modified biochars on soil nutrients and bioavailability of As and Pb[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(6): 1222-1232. (in Chinese with English abstract)
- [62] HU Y, CAO Y N, MA C X, et al. Nano-biochar as a potential amendment for metal(loid) remediation: Implications for soil quality improvement and stress alleviation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119658.
- [63] HE X L, YANG Y R, HUANG B S, et al. An overview of characteristic factors of biochar as a soil improvement tool in rice growth- A review[J]. *Environmental Research*, 2024, 242: 117794.
- [64] WANG X, DING J L, HAN L J, et al. Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2024, 443: 116845.
- [65] WANG H Y, ZHANG H Y, HE L Z, et al. Environmental behavior of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and the potential role of biochar for its remediation: A review[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 14.
- [66] LIU Z Y, ZHANG P, WEI Z X, et al. Porous Fe-doped graphitized biochar: An innovative approach for co-removing per-/polyfluoroalkyl substances with different chain lengths from natural waters and wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476: 146888.
- [67] LYU X Y, XIAO F, SHEN C Y, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in subsurface environments: Occurrence, fate, transport, and research prospect[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60: e2021RG000765.
- [68] WU Y D, QI L, CHEN G. A mechanical investigation of perfluorooctane acid adsorption by engineered biochar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130742.
- [69] IM J, MACK E E, SEGER E S, et al. Biotic and abiotic dehalogenation of 1, 1, 2-trichloro-1, 2, 2-trifluoroethane (CFC-113): Implications for bacterial detoxification of chlorinated ethenes[J]. *Environmental Science & Technology*, 53(20): 11941-11948.
- [70] AYAZ M, MUNTAHA S T, BALTRENAITE-GEDIENE E, et al. Biochar and carbon-negative technologies: Exploring opportunities for climate change mitigation[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 17.

- [71] 徐子博, 俞璐, 杨帆, 等. 土壤矿物质-可溶态生物炭的交互作用及其对碳稳定性的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4329-4335.
XU Zibo, YU Lu, YANG Fan, et al. Interactions between soil minerals and dissolvable biochar and its influence on carbon stability[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11): 4329-4335. (in Chinese with English abstract)
- [72] LIANG W J, TANG J X, LI Y, et al. Biochar and bentonite application improves aeolian sandy soil health and enhances soil carbon sequestration and emission reduction potential[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 2205.
- [73] WANG H, DONG W, SHAO D G, et al. Biochar enhances paddy productivity, carbon sequestration, and reduces greenhouse gas emissions in the middle Yangtze River region[J]. *Agronomy-Basel*, 2024, 14(12): 3067.
- [74] 杨佳, 王国英, 唐若兰, 等. 生物炭和菌剂对羊粪堆肥好氧堆肥腐熟度和温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 224-231.
YANG Jia, WANG Guoying, TANG Ruolan, et al. Effects of biochar and microbial inoculum on maturity and greenhouse gas emissions during microaerobic composting of sheep manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(10): 224-231. (in Chinese with English abstract)
- [75] 王雨婷, 陈冠益, 李磊, 等. 旱草水热炭的稳定性特征及固碳潜能[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 639-647.
WANG Yuting, CHEN Guanyi, LI Lei, et al. Stability and carbon sequestration potential of hydrochar derived from *Cyperus alternifolius*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 639-647. (in Chinese with English abstract)
- [76] BEKCHANOVA M, KUPPENS T, CUYPERS A, et al. Biochar's effect on the soil carbon cycle: A rapid review and meta-analysis[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 88.
- [77] TAHERI M A, ASTARAEI A R, LAKZIAN A, et al. The role of biochar and sulfur-modified biochar on soil water content, biochemical properties and millet crop under saline-sodic and calcareous soil[J]. *Plant and Soil*, 2023, 499(1-2): 221-236.
- [78] WU L P, ZHANG S R, CHEN M M, et al. A sustainable option: Biochar addition can improve soil phosphorus retention and rice yield in a saline-alkaline soil[J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2021, 24: 102070.
- [79] 郑云珠, 孙树臣, 翟胜. 生物炭与秸秆还田对潮土区夏玉米产量及土壤水分的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(10): 56-63.
ZHENG Yunzhu, SUN Shuchen, ZHAI Sheng. Effects of biochar and straw returning on summer maize yield and soil moisture in fluvo-aquic soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(10): 56-63. (in Chinese with English abstract)
- [80] HAIDER G, STEFFENS D, MOSER G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 237: 80-94.
- [81] 王红越, 宋玉凤, 肖辉, 等. 生物炭配合深翻对稻田土壤性质及水稻产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 120-127.
WANG Hongyue, SONG Yufeng, XIAO Hui, et al. Effects of rice husk biochar combined with deep tillage on properties of soil in paddy fields and yield of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(1): 120-127. (in Chinese with English abstract)
- [82] 宋凯悦, 刘志伟, 刘伟, 等. 生物质炭施用对水稻土有机质分子结构和组成的影响[J]. 环境科学研究, 2023, 36(10): 1979-1987.
SONG Kaiyue, LIU Zhiwei, LIU Wei, et al. Effects of biochar application on molecular structure and composition of organic matter in paddy soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(10): 1979-1987. (in Chinese with English abstract)
- [83] BLANCO-CANQUI H, GREECH C F, EASTERLY A C. How does biochar impact soils and crops in a semi-arid environment? A 5-yr assessment[J]. *Field Crops Research*, 2024, 310: 109340.
- [84] 吴迪, 袁鹤肿, 顾闻琦, 等. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 37-45.
WU Di, YUAN Hechong, GU Wenqi, et al. Photosynthetic physiological metabolism and yield response of continuous soybean cropping mediated by long-term application of biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 37-45. (in Chinese with English abstract)
- [85] 苏彩霞, 董旭. 根际促生菌与生物炭制剂对辣椒生长发育及土壤改良效果的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(12): 109-117.
SU Caixia, DONG Xu. Effects of growth-promoting rhizobacteria and biochar preparation on growth and development of pepper and soil improvement[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(12): 109-117. (in Chinese with English abstract)
- [86] 王瑞萍, 杨兴, 高玉蓉, 等. 锰改性生物质炭对砷铅在大蒜中积累及土壤酶活性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 1024-1036.
WANG Ruiping, YANG Xing, GAO Yurong, et al. Effects of manganese-modified biochar on accumulation of arsenic and lead in garlic and soil enzyme activity[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(5): 1024-1036. (in Chinese with English abstract)
- [87] 聂天宏, 韩学博, 王海龙, 等. 不同种类生物质炭对植烟土壤保育及烤烟生长和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 346-358.
NIE Tianhong, HAN Xuebo, WANG Hailong, et al. Effect of different biochars on soil conservation, growth and quality of the flue-cured tobacco[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 346-358. (in Chinese with English abstract)
- [88] 钟佳霖, 许翥妍, 张怡云, 等. 原料、炭化温度和生物质炭组分对小白菜生长的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(14): 2775-2785.
ZHONG Jialin, XU Ziyang, ZHANG Yiyun, et al. Effects of feedstock, pyrolyzing temperature and biochar components on the growth of chinese cabbage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(14): 2775-2785. (in Chinese with English abstract)
- [89] 钱九盛, 谢文逸, 何中华, 等. 施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 680-688.
QIAN Jiusheng, XIE Wenyi, HE Zhonghua, et al. Effect of biochar amendment on orchard soil fertility and yellow peach yield and quality[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 680-688. (in Chinese with English abstract)
- [90] 远兵强, 田春丽, 胡莹莹. 生物炭与根际促生菌对盐渍化土壤理化性质及微生物群落组成的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(6): 101-109.
YUAN Bingqiang, TIAN Chunli, HU Yingying. Effects of biochar and plant growth promoting rhizobacteria on

- physicochemical properties and microbial community composition of salinized soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(6): 101-109. (in Chinese with English abstract)
- [91] 梁晓艳, 衣葵花, 李萌, 等. 生物炭对盐碱地藜麦根系生长及生理特性的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(12): 24-29.
LIANG Xiaoyan, YI Kuihua, LI Meng, et al. Effects of biochar on root growth and physiological characteristics of quinoa in saline-alkali soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(12): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [92] 管西林, 郭洪海, 贾曦, 等. 不同有机改良剂对盐碱地菊芋产量及土壤理化性质的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(3): 70-77.
GUAN Xilin, GUO Honghai, JIA Xi, et al. Effects of different organic amendments on yield of *Helianthus tuberosus* L. and soil physical and chemical properties in saline-alkali land[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(3): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [93] 魏盈, 焦乐, 张鹏, 等. 生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J]. *环境科学*, 2024, 45(2): 940-951.
WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, et al. Research and application progress of biochar in amelioration of saline-alkali soil[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(2): 940-951. (in Chinese with English abstract)
- [94] 兰宇, 孟军, 韩晓日, 等. 生物炭基产品及其对土壤培肥改良效应的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1396-1412.
LAN Yu, MENG Jun, HAN Xiaori, et al. Advances in research on biochar-based products and their effects on soil fertility improvement[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(7): 1396-1412. (in Chinese with English abstract)
- [95] 王庆阳, 曹殿云, 王迪, 等. 长期施用生物炭对棕壤养分及腐殖质组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(13): 2612-2622.
WANG Qingyang, CAO Dianyuan, WANG Di, et al. Effects of long-term application of biochar on nutrients, fractions of humic in brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(13): 2612-2622. (in Chinese with English abstract)
- [96] 赵璐, 王佳妮, 殷婕, 等. 不同源生物炭对多元物料协同堆肥腐熟度和腐殖化的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 250-260.
ZHAO Lu, WANG Jiani, YIN Jie, et al. Effects of biochar from different sources on the maturity and humification during diverse materials synergistic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(4): 250-260. (in Chinese with English abstract)
- [97] 钟磊, 栗高源, 陈冠益, 等. 我国农作物秸秆分布特征与秸秆炭基肥制备应用研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(3): 575-585.
ZHONG Lei, LI Gaoyuan, CHEN Guanyi, et al. Research progress on the distribution characteristics of crop straws and the preparation and application of straw carbon-based fertilizers in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 575-585. (in Chinese with English abstract)
- [98] MURTAZA G, AHMED Z, EL-DIN S M, et al. Biochar as a green sorbent for remediation of polluted soils and associated toxicity risks: A critical review[J]. *Separations*, 2023, 10(3): 197.
- [99] JI M Y, WANG X X, USMAN M, et al. Effects of different feedstocks-based biochar on soil remediation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 294: 118655.
- [100] SORMO E, KRAHN K M, FLATABO G O, et al. Distribution of PAHs, PCBs, and PCDD/Fs in products from full-scale relevant pyrolysis of diverse contaminated organic waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132546.
- [101] HONG J, WANG C, WAGNER D C, et al. Foliar application of nanoparticles: Mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts[J]. *Environmental Science: Nano*, 2021, 8(5): 1196-1210.
- [102] WANG A D, ZOU D S, ZENG X Y, et al. Speciation and environmental risk of heavy metals in biochars produced by pyrolysis of chicken manure and water-washed swine manure[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 11994.
- [103] WANG Q, WANG B, MA Y N, et al. Stabilization of heavy metals in biochar derived from plants in antimony mining area and its environmental implications[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 300: 118902.
- [104] VINAYAK A, MUDGAL G, SINGH G B. Environment persistent free radicals: Long-lived particles[J]. *Free Radical Biology and Environmental Toxicity*, 2021, 3: 1-19.
- [105] RUAN X X, SUN Y Q, DU W M, et al. Formation, characteristics, and applications of environmentally persistent free radicals in biochars: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281: 457-468.
- [106] DONG M Y, JIANG M Y, HE L Z, et al. Challenges in safe environmental applications of biochar: Identifying risks and unintended consequence[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 12.
- [107] WANG B Y, ZHANG Y J, ZHU D Q, et al. Assessment of bioavailability of biochar-sorbed tetracycline to *Escherichia coli* for activation of antibiotic resistance genes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(20): 12920-12928.
- [108] RREN X W, TANG J C, WANG L, et al. Combined effects of microplastics and biochar on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters and its potential microbial ecological mechanism[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 647766.
- [109] YANG X C, HOU R J, FU Q, et al. A critical review of biochar as an environmental functional material in soil ecosystems for migration and transformation mechanisms and ecological risk assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 360: 121196.
- [110] HUANG C D, WANG W Y, YUE S Z, et al. Role of biochar and *Eisenia fetida* on metal bioavailability and biochar effects on earthworm fitness[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114586.
- [111] LLOVET A, MATTANA S, CHIN-PAMPILLO J, et al. Long-term effects of gasification biochar application on soil functions in a Mediterranean agroecosystem: Higher addition rates sequester more carbon but pose a risk to soil faunal communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149580.
- [112] LI Y L, GE C H, CHENG C, et al. Nano-biochar uptake and translocation by plants: Assessing environmental fate and food chain risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167012.
- [113] ODINGA E S, WAIGI M G, GUDDA F O, et al. Occurrence, formation, environmental fate and risks of environmentally persistent free radicals in biochars[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105172.

Application progress and risk analysis of biochar in soil amelioration

GAO Liang^{1,2}, LI Zhihe^{3*}, WANG Fang³, DENG Min⁴, CHEN Xue⁴, ZHAO Feng^{1,2}

(1. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China*; 2. *State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Jinan 250100, China*; 3. *College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China*; 4. *Tea Research Institute of Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China*)

Abstract: Biochar has shown significant potential to improve the quality of cultivated land and crop yields. This study aims to explore the research and application of biochar returning to the field for soil improvement and crop growth. A systematic review was conducted on the preparation and equipment of the biochar, the key influencing factors on the physicochemical properties of the biochar, as well as the effects of biochar on soil (physicochemical properties, nutrients, enzyme activities and microbial communities, inorganic heavy metals and organic pollutants, carbon sink reduction) and crops. The key influencing factors and mechanisms were summarized to evaluate the risks and countermeasures of biochar application. Some suggestions were proposed for future research. The results showed that the rotary-furnace reactor was successfully applied to the industrial-scale production of biochar, due to its good adaptability and convenient operation. Furthermore, the soil bulk density decreased after the application of biochar into the soil, whereas there was an increase in the water retention capacity, cation exchange capacity, the content of macronutrients and micronutrients in the soil, as well as the utilization rate of nutrients by plants. The microbial community structure was dominated by the biochar. And then the activities of soil enzymes were enhanced, such as urease and peroxidase. Heavy metals were also adsorbed and fixed by biochar after ion exchange and complexation. The transformation of heavy metals was promoted from the exchangeable to the residual state. Organic pollutants were adsorbed and degraded by biochar after hydrophobic interaction, electrostatic interaction, and free radical interaction. The toxicity and bioaccumulation of pollutants were reduced in the soil. The returning biochar to the field can be expected to mitigate climate change through soil carbon cycling. Taking Chinese umbrella grass biochar as an example, the annual output reached 1.96-3.21 Mt, and the long-term annual carbon sequestration was 0.75-0.79 Mt, and the long-term annual reduction of CO₂ equivalent was 2.76-2.88 Mt. Generally, the behavior of returning biochar to the field had a positive effect on the crop yield. However, the extensive application of biochar in the soil can pose environmental and health risks. The pollutants that are contained in biochar itself, and the pollutants were used to adsorb from the environment (such as heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons), indicating the potential to be released into the soil under the influence of the environment and time. Eventually, the nano-biochar was obtained during biochar aging after disintegration, fragmentation, and pulverization. Currently, there is a significant lack of research on the safety, stability, and toxicity of nano-biochar, particularly on the health risks of biochar to humans. Therefore, it is very necessary to conduct a systematic assessment of the long-term and large-scale biochar application in fields. Some optimal measures were also proposed to evaluate the economic, social, and ecological benefits, in order to reduce or even avoid the application risks of biochar. The research can also provide a strong reference to promote the healthy development of the biochar industry in high-quality agriculture.

Keywords: biochar; soil improvement; crop yields increase; carbon sequestration; risk analysis