

土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈研究进展

李 毅^{1,2,3}, 冯 浩⁴, 梁嘉平², 陈 克², 陈俊清², 梁志杰¹, 姚 宁^{2,3}

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点实验室,河南 新乡,453002;

2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌,712100;

3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌,712100;4.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌,712100)

摘要:生物炭作为一种土壤改良剂,近年来在提升土壤质量和作物产量方面效应良好。在全面梳理生物炭施用效果方面的最新研究基础上,总结了土壤理化性质、作物生长和产量对生物炭施用的响应和反馈规律。结果表明:(1)生物炭的来源、是否酸化、施用年限及施用量决定了施用后的土壤属性及作物产量变化幅度。一般来说,施用量增加、土壤容重降低,土壤孔隙度增加、土壤水力性质及入渗性能改善,土壤温度也增加。(2)由于土壤物理性质改变,施用生物炭最终降低了土壤表层的盐分表聚。生物炭对土壤 pH 的调节效果取决于两者 pH 的差异。此外,随着生物炭施用量增加,有机质含量呈线性增加趋势,而有效氮、有效钾和有效磷呈先增加后减小的趋势。(3)适宜施用生物炭使作物长势更好、产量更高;而过高的施量既不经济、增加成本,又对作物产量提升无益,适宜生物炭施用量为 10~40 t/hm²。(4)总体上,虽然土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈因试验条件、土壤质地和作物类型、气候条件差异而表现出响应幅度不同,但大部分结果证实,土壤属性和作物生长对生物炭施用具有正面响应。今后在生物炭施用的科学认识和生产实践中需因地制宜制定施用策略。

关键词:生物炭;土壤属性;产量;棉花;甜菜

中图分类号:S161.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)05-0009-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.002

Research Advances of Responses and Feedback of Soil Properties and Crop Growth to Biochar Application

LI Yi^{1,2,3}, FENG Hao⁴, LIANG Jiaping², CHEN Ke², CHEN Junqing², LIANG Zhijie¹, YAO Ning^{2,3}

(1.*Institute of Farmland Irrigation of CAAS, Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 2.Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;4.Institute of soil and water conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100*)

Abstract: In recent years, biochar as a soil modifier has responded well in improving soil quality and crop yield. In this paper, the responses and feedbacks of soil physical and chemical properties, crop growth and yield to biochar application were summarized based on the comprehensive and latest review of biochar application effects. The results showed that: (1) The source, acidification, application years and application amount of biochar determine the change range of soil properties and crop yield after application. Generally speaking, as the application amount increases, soil bulk density decreases, soil porosity increases, soil hydraulic properties and infiltration performance are improved, and soil temperature also increases. (2) Due to the changes of soil physical properties, the biochar application eventually reduces the soil surface salt accumulation. The effect of biochar on soil pH depends on the difference of pH between biochar and soil. In addition, with the increase of biochar application rate, organic matter content increased linearly, while available nitrogen, available potassium and available phosphorus increase firstly and then decrease. (3) Suitable appli-

cation of biochar can make crops grow better and yield higher. However, the excessive application amount is not economic, which increases the cost, and contribute less to the improvement of crop yield. The appropriate application amount of biochar are recommended to be in the range of 10 to 40 t/hm². (4) In general, although the response and feedback of soil properties and crop growth to biochar application vary with experimental conditions, soil texture and crop type, and climatic conditions, most of the results confirm that soil properties and crop growth have positive responses to biochar application. In future, the scientific understanding and production practice of biochar application should be formulated according to local conditions.

Keywords: biochar; soil properties; yield; cotton; sugar plant

农田土壤的结构、水力性质、养分运移影响作物的生长发育和产量形成。农业生产实践技术的提高和科技的快速发展为粮食安全提供了重要的保障。然而,目前农业生产的发展仍然受多种因素的影响,变化环境下干旱一半干旱地区水资源短缺^[1],各种气象和农业系统灾害和极端事件发生频繁^[2],中低产田养分匮乏等^[3]都对农业系统的稳产增产造成了不利影响,不利于粮食增产。提高中低产田所种植作物的水分利用效率和经济效益,始终是干旱一半干旱地区农业高效用水和优质生产迫切需要解决的问题。目前在农业生产中,有多种中低产田改良方法,包括工程、水利、农业、生物和植物修复及化学改良措施等,旨在最大程度保持土壤质量和优化环境,以满足作物生长需求。生物炭是生物有机材料在缺氧或绝氧条件下,经过 300~1 000 ℃ 高温热裂解后产生的含碳量极其丰富的有机物^[4]。生物炭本身含有大量的碳,可以显著增加土壤有机质含量^[5],稳定土壤结构,优化土壤物理结构^[6-7];生物炭是一种良好的养分载体,可以提供基本的土壤矿物质养分(P、K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺)^[8];生物炭不仅能提高土壤阳离子的交换能力,还可提高土壤养分的利用率,促进植物对养分的吸收,进而减少因淋溶引起的养分流失^[9];生物炭还可改善土壤微生物学特性,增加土壤中微生物数量^[10];更重要的是,生物炭结合其他农田管理措施(覆盖、施肥、膜下滴灌等)能使农业增产^[11],从而有利于社会经济发展。

由于生物炭对土壤和作物生产具有改善效应,近年来国内外在利用生物炭改善土壤质量及提高农业产量方面进行了大量的研究和尝试,获得了非常多的成果。本文从土壤物理性质、化学性质及作物生长对生物炭的响应和反馈方面入手,梳理和总结目前生物炭在农业系统中应用的最新进展,从而揭示农田土壤属性和作物生长对生物炭的响应和反馈机制,以期生物炭在农业生产中进一步应用提供参考。

1 土壤物理性质对生物炭施用的响应

1.1 土壤容重

土壤物理性质包括土壤容重、孔隙度、土壤水分、

土壤温度等,这些土壤物理性质是反映土壤健康的重要指标。其中土壤容重反映土壤的紧实程度,与土壤孔隙度有密切关系。由于生物炭自身的容重显著低于土壤的容重,以往研究^[12-13]结果比较一致地表明,施用生物炭可以降低土壤容重约 8%~11.2%,而且降低幅度和被施用土壤的性质、生物炭施用量、生物炭自身属性、试验条件及生物炭施用年限都有关系。刘祥宏^[14]通过研究不同生物炭施用量(0,4,8,16 g/kg)对黄土高原 5 种土壤(塬土、黑垆土、黄绵土、沙黄土和风沙土)容重的影响发现,生物炭施用量越高,降低土壤容重的效果越显著。Githinji^[15]将生物质炭与砂壤土按不同体积配比混合处理发现,施用 25% 生物炭的土壤容重与对照组相比降低了 18%。孟繁昊等^[16]研究表明,施加生物炭(8,16,24 t/hm²)使 0—20 cm 土层容重降低 1.19%~11.18%。李倩倩等^[17]通过连续 5 年的试验研究发现,随着年限的延长以及生物炭施量的增加,20—30 cm 土层的土壤容重显著降低。然而,另有研究^[18-20]表明,生物炭对土壤容重的影响因土壤有机质含量不同而产生不同效果。Herath 等^[18]指出,施用生物炭能够显著降低有机质含量低土壤的容重,但不会减小高有机质含量土壤的容重,该结论也先后被 Tammeorg 等^[19]和 Moragues-Saitua 等^[20]证实。总体上,由于受到外部环境、生物炭来源和土壤本身质地结构等具体条件的影响,生物炭对土壤容重的调控机理较复杂,这种复杂性不仅涉及土壤容重等物理性质,也对土壤化学性质及作物生长—产量等构成潜在影响。

1.2 土壤孔隙度

施用生物炭改变了土壤容重,从而影响土壤孔隙度。生物炭改善土壤孔隙的机制归因于高孔隙度生物炭材料的孔隙贡献、通过产生堆积或孔隙来修饰孔隙系统及改善整体稳定性^[21]。经过生物炭改良后的土壤主要表现为微、中和宏观孔隙度的增加^[22-24]。将 25 t/hm² 的生物炭添加到粉砂壤土中能够使 0—10 cm 土层的土壤总孔隙度显著提升 6.4%,且同时增加大孔隙度和微孔隙度^[23],随着生物炭施加量的增大,土壤孔

隙度呈线性增加的趋势^[15]。特定情况下生物炭的添加不改变土壤的总孔隙度,但对土壤的孔隙组成产生一定的影响,降低大孔隙比例而显著提高中孔隙的比例,继而对作物生长产生积极作用^[24]。

1.3 土壤水力性质

已有研究^[4-5,8]表明,施加生物炭对土壤有效含水量、田间持水量以及凋萎系数具有积极的作用,而且这种增加与生物炭降低了土壤容重同时增加了孔隙度有直接关系。生物炭的粒径、比表面积、施用量等均可影响土壤的保水能力。施用粒径为 $1\sim 8\ \mu\text{m}$ 的生物炭可最大程度地增加 $0.06\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 的水分,从而增加土壤的保水能力^[25]。较高比表面积且粒径为 $1\sim 2\ \text{mm}$ 的生物炭可提高沙质土壤的田间持水量^[26]。生物炭施用量 $22.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 可使土壤有效水提升 28.8% ^[27]。王浩等^[28]研究表明,随生物质炭比例增加,土壤的吸水系数、凋萎湿度、田间持水量和饱和含水量都有所增加。Githinji^[15]在向壤质砂土中施加生物质炭的试验中发现,当生物质炭施用量超过 25% 后,继续增加生物炭施用量,会使累积入渗量呈线性下降。Liang等^[29]基于3年大田试验,系统地研究了连续施用生物炭对土壤水分分布和储水量的影响,结果表明,生物炭施用量为 $22\ \text{t}/\text{hm}^2$ 对土壤储水有最佳效果,生物炭施用量过高($100\ \text{t}/\text{hm}^2$)导致土壤储水量降低。

生物炭较高的孔隙度和比表面积对土壤水分的时空分布、运动规律(包括入渗、蒸发及再分布等)产生影响。在一定程度上添加生物炭和炭基肥能够提高垂直土柱中土壤的持水性能^[30]。此外,生物炭在一定程度上降低了土壤水分的淋滤与运移^[31]。当土壤含水率较低时,添加生物炭会抑制土壤水分扩散^[32]。生物炭对土壤的水力特性也有影响,已有研究^[33-34]表明,施用生物炭可增加表层土壤饱和导水率和不同质地土壤的水分扩散率。然而,也有研究^[35]表明,生物炭对土壤饱和导水率无显著影响。

1.4 土壤温度和热性质

热性质包括土壤热容量、导热率和导温率等。生物炭呈黑色,施用后明显加深土壤颜色,从而增加土壤吸收热量,降低地表反射率^[36],改变土壤温度。与对照相比,生物炭可使地表温度增加 $31.3\%\sim 58.1\%$,且生物炭施用量与土壤温度之间呈显著的正相关关系^[37]。施加生物炭后土壤的容重增加,降低土壤的热扩散率和热导率^[38],降幅达 $3.48\%\sim 7.49\%$ ^[37],这也是生物炭影响土壤温度的原因之一。添加生物炭还可以调节土壤温度的波动和温度极值,削弱热胁迫。然而,以往对生物炭影响土壤热性质的结论并不统一,Ventura等^[38]发

现,施用生物炭增加了表层土壤温度,但未显著影响 $7.5\ \text{cm}$ 深度的土壤温度。生物炭对土壤温度的影响是一个多因素综合作用的结果,其影响机制并未深入揭示,还需要进一步的研究。

2 土壤化学性质对生物炭施用的响应

2.1 土壤盐分

土壤盐分含量高引起的土地质量退化是限制作物生产和农业可持续发展的主要障碍^[39]。已有研究^[40]表明,施用生物炭能缓解微咸水灌溉条件下土壤盐分表聚现象,对土壤具有一定的降盐作用,避免盐胁迫造成离子毒害,减轻作物受盐胁迫的程度。对玉米田,当生物炭施用量为 $30\ \text{t}/\text{hm}^2$ 时可起到有效的节水降盐增产效果。校康等^[41]研究发现,施用生物炭可使土壤溶液中的 Na^+ 离子降低 9.43% ,且在 $4\ \text{g}/\text{kg}$ 的生物炭处理下降盐效果最为明显。Zhao等^[42]研究表明,施用生物炭可增加盐渍化土壤阳离子交换量,进而降低土壤盐分和钠离子含量。此外,施用生物炭能够通过调节土壤的养分状况,克服盐分对土壤和作物的有害影响^[43]。

由于施用生物炭有降低土壤容重、增加土壤饱和导水率的效果,因此土壤物理性质改善将增加盐分的淋洗效果,降低土壤钠吸附比,减轻盐分胁迫^[44]。但同时由于生物炭携带一些化学物质进入土壤,因此随着生物炭施用量的增加,土壤电导率也随之增加。但由于生物炭可降低土壤容重、增加土壤孔隙度和土壤导水能力,因而又能促进土壤盐分的淋洗。Zhang等^[45]研究证实,施用生物炭可大大降低土壤电导率以及可交换 Na^+ 、 Cl^- 含量,进而减轻盐胁迫对水稻幼苗的抑制作用。

2.2 土壤 pH

生物炭的来源、是否酸化、施用年限及施用量决定了施用后的pH变化幅度。生物炭能够有效地调节土壤pH,其调节效果取决于生物炭和土壤pH的差异,若前者大于后者,则土壤pH增加^[46],反之则土壤pH降低^[47]。生物炭施用年限越长,土壤pH的增加越趋于弱化^[48]。Kannan等^[48]通过连续3年的田间试验发现,施加生物炭最终增加了土壤的pH。Jin等^[49]通过连续5年的田间定位试验研究发现,施入生物炭第1年后,土壤pH显著增加,且 $40\ \text{t}/\text{hm}^2$ 的生物炭处理可使土壤pH增加 0.53 ,但随着施用年限的延长,pH明显降低,尤其第5年 $40\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭处理的pH降低最多。张明月^[50]研究表明,当生物炭施用量与土壤的体积比超过 $2/3$ 时,可使棕壤土与褐土的pH分别增加 0.44 和 0.30 。Aamer等^[51]发现,施用生物炭可将酸性土

壤的 pH 从 5.48 提高到 6.11。陈乐等^[52]研究指出,生物炭施用量越高,对酸性土壤的 pH 提高幅度越大,特别是 50 g/kg 的生物炭使 4 种酸性土壤 pH 分别提高 0.68,0.97,1.29,1.71。

2.3 土壤养分

氮、磷和钾是作物生长的重要营养元素。生物炭能够吸附土壤中的 NH_3 和 N_2O ,进而减少土壤氮损失。Esfandbod 等^[53]研究表明,应用低 pH 的生物炭能有效降低盐碱地或苏打土中的 NH_3 挥发,以提高氮的保留和使用效率。生物炭能够显著增加表层土壤养分含量^[54],且随着生物炭施用量的增加,有机质含量呈线性增加趋势,而有效氮、有效钾和有效磷呈先增加后减小的趋势。但由于生物炭施用成本高,因此不宜高量施用,20 t/hm² 的施用量能获得土壤养分含量的最大值,施用量较大时,会造成土壤氮损失^[55]。

磷素的有效性直接受土壤 pH 和有机物含量的影响,且 pH 在 5.0~7.5 是磷的最佳释放范围,土壤 pH>7.0 的土壤中有有效磷减少^[56]。盐渍土限制了土壤磷的有效性,而生物炭可以作为磷肥增加盐渍土的有效磷,提升磷的有效性和作物吸收磷素^[57]。da Silva Carneiro 等^[58]研究表明,生物炭基肥料可以在短期和长期完全或部分替代传统的可溶性磷肥,提升土壤磷的有效性和磷利用率,促进植物对磷的吸收。生物炭为土壤提供了可溶和可交换磷,通过影响磷相关的络合和代谢作用来提高内生土壤磷的利用率,改善土壤对磷的吸附,有助于扩大土壤磷库,增加其利用率,并减少淋失^[59]。

我国土壤有效钾含量低,钾的利用率不高,且过量施肥增加了环境污染和经济损失风险。施用生物炭能够增加钾的有效性^[60],2% 的生物炭能够替代 40% 的常规钾肥,加速缓慢利用的钾向可用钾转化^[11]。

3 作物生长对生物炭的响应和反馈

植物在土壤中的生长是一个复杂的过程。根系在植物对水分和养分的吸收、化合物的生物合成和储存以及与土壤环境中的非生物和生物因子的相互作用中起至关重要的作用。健康的土壤中植物生长良好;而问题土壤则阻碍水分和养分的吸收并抑制植物生长。类似土壤属性,作物生长对生物炭也有其响应和反馈。由于作物种类多,篇幅所限,以下将以棉花为主评述作物生长对生物炭的响应和反馈。

3.1 棉花

棉花是重要的经济作物。适量生物炭使其长势更好、产量更高;而过高施量既不经济,又不利于产量提升。近年来生物炭对作物生长影响的研究集中于

生物量、生长指标和产量上,部分研究涉及作物养分利用效率。王荣梅等^[61]研究表明,10% 的生物炭施量可倍增喀什绿洲灌淤土的田间持水量;在混合施用方式下,生物炭显著提高棉花产量;5% 的施量提高皮棉产量 26%。苏倩等^[62]研究表明,施用生物炭可提高棉花生物量和养分吸收量。李琦等^[63]研究表明,施用生物炭能够使棉花的干物质和氮素吸收分别增加 9.2%~17.3% 和 29.5%~48.8%,且随施用量增加,棉花的干物质也逐渐增加。田晓飞^[64]研究表明,生物炭能够提升棉花花期和铃期叶片的叶绿素相对含量、净光合速率、蒸腾速率和棉花产量。侯艳艳等^[65]在新疆灰漠土开展田间试验发现,添加棉秆生物炭相对对照组能明显提高棉花产量 7.9%~21.3%,棉花茎粗、株高及生物量等虽然有所提高,但效果不显著。Wu 等^[66]研究表明,1% 的生物炭施用量可增加棉花的芽、铃和有效果枝数,且当 75 mg/kg 的 K_2O 与 1% 的生物炭结合时最有利于提高棉花产量、农艺效率和经济效益。凌遵学等^[67]研究表明,施用生物炭基尿素能延长棉花的生育期,提升棉花株高、单株果枝数、单株结铃数、单铃重和棉花产量。Qayyum 等^[68]发现,施用生物炭不仅使棉花株高增加 11.71%~22.47%,单株铃数增加 0.74%~13.75%,平均铃重增加 35.44%~36.22%,籽棉产量提高 14.48%,而且还可使棉花的纤维长度和马克隆值分别增加 4.3% 和 24.5%。此外,生物炭的合理施用也有利于减轻棉花病虫害。

3.2 其他作物

甜菜是重要的糖类作物,其经济价值很高。施用生物炭可减轻甜菜幼苗受除草剂的毒害,促进甜菜的植株生长,改善甜菜的根系形态、增加根冠比和甜菜的含糖量^[69]。施用生物炭还可增加碱胁迫下的甜菜出苗率、块根产量、含糖率和产糖量^[70]。生物炭和氮肥配合施用,不仅增加甜菜的出苗率,还可提升甜菜各生育期内叶片和块根的干物质量,增加甜菜的光合速率和叶绿素含量,进而提高甜菜的产量和含糖量^[71]。

在生物炭对玉米生长的影响研究方面,Xia 等^[72]认为,氮肥与生物炭配合使用对改善玉米的氮素利用效率和促进土壤质量具有积极的作用,生物炭不仅增加了土壤养分和有机质,还使植物的氮利用率提高 11.08%,根的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量从 11.97 mg/kg 增加到 21.3 mg/kg,芽的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量从 50.8 mg/kg 增加到 82.3 mg/kg。屈忠义等^[73]采用 3 种不同的改良措施(包括施加生物炭 22.5 t/hm²、脱硫石膏和秸秆还田)研究了盐渍土上种植葵花产量的差异,结果表明,生物炭更具优势、增产率最高,达 32.28%。在生物炭对作

物根系的影响方面, Xiang 等^[74]对 136 篇文章的 2 108对观察结果进行了分析发现,施用生物炭可以使植物根系的生物量、根系体积、表面积、根长、根尖数及根直径分别增加 32%, 29%, 39%, 52%, 17%, 9.9%。除了对作物的生长有正面影响外,生物炭施用后也可能降低作物产量。然而 Spokas 等^[75]指出,只有 50%的研究中生物炭使作物增产,而其余 50%的研究显示其对作物增产没有影响,甚至减少了作物产量。

生物炭影响作物生长的主要原因有:(1)生物炭含有一定成分的灰分,可为作物生长提供氮、磷、钾等养分^[76];(2)大多生物炭呈碱性,可有效降低土壤的酸度,缓解重金属胁迫,提高作物的生产效率^[77];(3)适量生物炭添加可以有效提高土壤的持水性能,缓解旱田作物的干旱胁迫,提高作物产量;(4)生物炭还与土壤中微生物协同作用,改善根系微生物的群落环境,促进根系发育,对作物生长有积极作用^[78]。

4 生物炭施用的关键技术参数

生物炭施用的方式、年限、施用量等技术参数的变化导致施用效果差异明显。合理的生物炭施用量对作物生长有明显的促进作用,当施用量过高会显著抑制作物生长。Li 等^[79]研究表明,与 40 t/hm²施用量相比,20 t/hm²的生物炭处理可获得最高的作物产量。勾芒芒等^[80]和 Li 等^[81]分别通过盆栽和田间试验研究指出,在 40 t/hm²生物炭施用量下番茄地上生物量、产量、水肥生产力以及经济效益显著高于 60 t/hm²的施用量。Jin 等^[49]开展了不同生物炭(0,5,20,40 t/hm²)与氮肥(0~120 kg/hm²)结合对油菜籽和红薯产量的影响试验,结果表明,当生物炭和氮肥的施用量分别为 11.4 t/hm²和 102 kg/hm²时可获得最高作物产量和净收入。梁嘉平^[4]通过对南疆重度盐碱地连续 3 年施用生物炭(0~100 t/hm²)进行研究,推荐 10 t/hm²作为棉花和甜菜经济效益最高的合理施用量。Reyes-Cabrera 等^[82]在添加生物炭和酒糟情况下分析了棉花—花生轮作与甜高粱的产量和土壤含水量等指标,认为 30 kg N/hm²结合 5 t/hm²生物炭是最佳组合。综合来看,最佳生物炭施量依不同的作物类型、土壤及气候条件而变化,推荐 25 t/hm²以下为经济效益最佳的生物炭施量,此外,结合施肥及其他耕作措施有益于同时提高土壤养分和作物产量。

5 结论与建议

本文通过对比国内外生物炭相关的研究进展,发现生物炭的施用对土壤物理性质(包括容重、孔隙率、水分和温度)、化学性质(pH、盐分)及作物生长和产量有正效应。合理的施用方式、年限、生物炭来源可

促进作物的生理生长和发育过程,从而可获得最佳产量和经济效益。然而,由于生物炭自身的理化性质较为复杂,加上不同研究者的试验条件有很大差异,土壤、气候、作物类型等具有较大的区域差别和时空变异性,土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈规律不同,甚至施用生物炭对同一土壤属性或作物类型的影响,结果并不一致。大部分结果证实,土壤属性和作物生长对生物炭具有正响应。目前相关研究成果虽然非常丰富,但在生物炭对土壤环境的调控和作物促生机理方面的观点不一致,今后应在机理机制研究方面进行重点研究和分析,在生产实践中需注意因地制宜制定施用策略。建议将生物炭与其他施肥、灌溉、田间管理措施有效结合,合理制定施用方式、年限及施用量,为我国粮食安全作出更大的贡献。

参考文献:

[1] Kang S Z, Hao X M, Du T S, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice [J].Agricultural Water Management,2016,179:5-17.

[2] Li L C, Yao N, Li Y, et al. Future projections of extreme temperature events in different sub-regions of China [J].Atmospheric Research,2019,217:150-164.

[3] Dahlawi S, Naeem A, Rengel Z, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities [J].Science of the Total Environment, 2017,625:320-35.

[4] 梁嘉平.施用生物炭对南疆膜下滴灌土壤属性及棉花/甜菜生长的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2021.

[5] Xiao Q, Zhu L X, Shen Y F, et al. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment [J].Field Crops Research,2016,196:284-293.

[6] 魏永霞,肖敬萍,王鹤,等.施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J].农业机械学报,2021,52(3):305-314.

[7] 吴昱,赵雨森,刘慧,等.秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J].农业机械学报,2017,48(7): 247-256.

[8] 陈浩然.施用生物质炭对新疆旱区膜下滴灌土壤盐盐移及棉花生长的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[9] Ghezzehei T A, Sarkhot D V, Berhe A A. Biochar can be used to capture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil physico-chemical properties [J].Solid Earth,2014,5(2):953-962.

- [10] Amini S, Ghadiri H, Chen C R, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: A review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 939-953.
- [11] Zhang Q Q, Song Y F, Wu Z, et al. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: e118435.
- [12] Omondi M O, Xia X, Nahayo A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data [J]. *Geoderma*, 2016, 274: 28-34.
- [13] Razzaghi F, Obour P B, Arthur E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2020, 361: e114055.
- [14] 刘祥宏. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(4): 457-470.
- [16] 孟繁昊, 于晓芳, 王志刚, 等. 生物炭配施氮肥对土壤物理性质及春玉米产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2020, 28(1): 142-150.
- [17] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3388-3396.
- [18] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol [J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 188-197.
- [19] Tammeorg P, Simojoki A, Mäkelä P, et al. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191: 108-116.
- [20] Moragues-Saitua L, Arias-González A, Gartzia-Bengoetxea N. Effects of biochar and wood ash on soil hydraulic properties: A field experiment involving contrasting temperate soils [J]. *Geoderma*, 2017, 305: 144-152.
- [21] Hardie M, Clothier B, Bound S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J]. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 347-361.
- [22] Barrow C J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture [J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 21-28.
- [23] Eastman C M. Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqualf amended with biochar [D]. Columbus: The Ohio State University, 2011.
- [24] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [25] Turunen M, Hyväluoma J, Heikkinen J, et al. Quantifying the pore structure of different biochars and their impacts on the water retention properties of Sphagnum moss growing media [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 191: 96-106.
- [26] Tanure M M C, da Costa L M, Huiz H A, et al. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 192: 164-173.
- [27] Yang C D, Lu S G. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: e104798.
- [28] 王浩, 焦晓燕, 王劲松, 等. 生物质炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 253-257.
- [29] Liang J P, Li Y, Si B C, et al. Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 771: e144802.
- [30] 黄超, 刘丽君, 章明奎, 等. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响 [J]. *浙江大学学报*, 2011, 37(4): 439-445.
- [31] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [32] 魏永霞, 王鹤, 肖敬萍, 等. 生物炭对黑土区土壤水分扩散与溶质弥散持续效应研究 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 315-326.
- [33] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [34] 田丹, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析 [J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1374-1378.
- [35] Larid D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Mid-western agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [36] Genesio L, Miglietta F, Lugato E. Surface albedo following biochar application in durum wheat [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): e14025.
- [37] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1141-1147.
- [38] Ventura F, Salvatorelli F, Piana S, et al. The effects

- of biochar on the physical properties of bare soil [J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2013, 103(1): 5-11.
- [39] Meena M D, Yadav R K, Narjary B, et al. Municipal solid waste (MSW) strategies to improve salt affected soil sustainability: A review [J]. Waste Management, 2019, 84: 38-53.
- [40] 贾咏霖, 屈忠义, 丁艳宏, 等. 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤水盐迁移规律及玉米水分利用效率的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 44-51.
- [41] 校康, 孙亚乔, 马卫国. 添加生物炭对降低冬小麦幼苗盐害并促进其生长的效果研究 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 22-27.
- [42] Zhao W, Zhou Q, Tian Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: e137428.
- [43] Mehdizadeh L, Moghaddam M, Lakzian A. Amelioration of soil properties, growth and leaf mineral elements of summer savory under salt stress and biochar application in alkaline soil [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 267: e109319.
- [44] Xiao L, Yuan G D, Feng L R, et al. Soil properties and the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in response to reed (*phragmites communis*) biochar use in a salt-affected soil in the Yellow River Delta [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 303: e107124.
- [45] Zhang J H, Bai Z G, Huang J, et al. Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: e104372.
- [46] Liu Q, Liu B J, Zhang Y H, et al. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 104: 8-17.
- [47] Abrishamkesh S, Gorji M, Asadi H, et al. Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth [J]. Plant, Soil and Environment, 2015, 61(11): 475-482.
- [48] Kannan P, Paramasivan M, Marimuthu S, et al. Applying both biochar and phosphobacteria enhances *Vigna mungo* L. growth and yield in acid soils by increasing soil pH, moisture content, microbial growth and P availability [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 308: e107258.
- [49] Jin Z W, Chen C, Chen X M, et al. The crucial factors of soil fertility and rapeseed yield-A five year field trial with biochar addition in upland red soil, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 1467-1480.
- [50] 张明月. 生物炭对土壤性质及作物生长的影响研究 [D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [51] Aamer M, Shaaban M, Hassan M U, et al. Biochar mitigates the N₂O emissions from acidic soil by increasing the *nosZ* and *nirK* gene abundance and soil pH [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 255: e109891.
- [52] 陈乐, 詹思维, 刘梦洁, 等. 生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和重金属 Cu, Cd 有效性影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 358-364.
- [53] Esfandbod M, Phillips I R, Miller B, et al. Aged acidic biochar increases nitrogen retention and decreases ammonia volatilization in alkaline bauxite residue sand [J]. Ecological Engineering, 2017, 98: 157-165.
- [54] Xie Y X, Dong C, Chen Z Y, et al. Successive biochar amendment affected crop yield by regulating soil nitrogen functional microbes in wheat-maize rotation farmland [J]. Environmental Research, 2021, 194: e110671.
- [55] Feng Y F, Sun H J, Xue L H, et al. Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH₃ volatilization dramatically in rice paddy soil [J]. Chemosphere, 2017, 168: 1277-1284.
- [56] Naidu R, Syers J K, Tillman R W, et al. Effect of liming and added phosphate on charge characteristics of acid soils [J]. Journal of Soil Science, 1990, 41(1): 157-164.
- [57] Lashari M S, Liu Y, Li L, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain [J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113-118.
- [58] da Silva Carneiro J S, Andrade I C R, Nardis B O, et al. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability [J]. Science of the Total Environment, 2020, 760: e143955.
- [59] Yang L, Wu Y C, Wang Y C, et al. Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus [J]. Science of the Total Environment, 2020, 758: e143657.
- [60] Oram N J, van de Voorde T F J, Ouwehand G J, et al. Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 191: 92-98.
- [61] 王荣梅, 杨放, 许亮, 等. 生物质炭在新疆棉田的应用效果研究 [J]. 地球与环境, 2014, 42(6): 757-763.

- [62] 苏倩,侯振安,赵靓,等.生物炭对土壤磷素和棉花养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2014(3):642-650.
- [63] 李琦,马莉,赵跃,等.不同温度制备的棉花秸秆生物炭对棉花生长及氮肥利用率(^{15}N)的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):600-607.
- [64] 田晓飞.控释氮肥、钾肥及生物炭对棉花生长和土壤养分状况的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2017.
- [65] 侯艳艳,朱新萍,徐万里,等.施用生物炭对灰漠土养分及棉花生长的影响[J].新疆农业科学,2018,55(1):24-32.
- [66] Wu X W, Wang D, Riaz M, et al. Investigating the effect of biochar on the potential of increasing cotton yield, potassium efficiency and soil environment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 182: e109451.
- [67] 凌遵学,张取仁.生物炭基尿素对棉花性状、产量及经济效益的影响[J].安徽农学通报,2019,25(6):58-60.
- [68] Qayyum M F, Haider G, Raza M A, et al. Straw-based biochar mediated potassium availability and increased growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2020, 24(12):963-973.
- [69] 李玉梅,宋柏权,刘峥宇,等.除草剂残留下生物炭对甜菜生长的影响[J].农业资源与环境学报,2015,32(3):269-274.
- [70] 陈婧婷,武沛然,刘新宇,等.减氮条件下生物炭对甜菜盐碱胁迫的缓解效应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(8):122-130.
- [71] 武沛然.生物炭与氮肥配施对盐碱胁迫下甜菜生长及土壤特性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [72] Xia H, Riaz M, Zhang M Y, et al. Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 196: e110531.
- [73] 屈忠义,胡敏,王丽萍,等.不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响[J].农业机械学报,2020,51(3):268-275.
- [74] Xiang Y Z, Deng Q, Duan H L, et al. Effects of biochar application on root traits: A meta-analysis [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2017, 9(10):1563-1572.
- [75] Spokas K A, Cantrell K B, Novak J M, et al. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4):973-989.
- [76] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2011, 144(1):175-187.
- [77] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [78] Warnock D D, Mummey D L, McBride B, et al. Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: Results from growth-chamber and field experiments [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(3):450-456.
- [79] Li B, Huang W H, Elsgaard L, et al. Optimal biochar amendment rate reduced the yield-scaled N_2O emissions from Ultisols in an intensive vegetable field in South China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: e138161.
- [80] 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等.生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J].农业机械学报,2014,45(1):137-142.
- [81] Li C J, Xiong Y X, Qu Z Y, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China [J]. Geoderma, 2018, 331:100-108.
- [82] Reyes-Cabrera J, Erickson J E, Leon R G, et al. Amending marginal sandy soils with biochar and lignocellulosic fermentation residual sustains fertility in elephantgrass bioenergy cropping systems [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2019, 115:69-83.