

目次

“大气十条”实施期间南京市PM_{2.5}化学组成与来源的演变特征 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM_{2.5}组分差异 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM_{2.5}-O₃复合污染数值响应解析 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李旻, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄蔚铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析

于滨杭, 姬建梅, 王丽学*, 刘静, 高欢, 刘丹

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 为定量评估生物炭对主粮作物产量的影响, 收集了公开发表的 116 篇相关文献, 共 866 对数据, 采用 Meta 分析法定量分析了生物炭对我国主粮作物产量的影响及其影响因子, 同时构建结构方程模型 (SEM) 进一步解释了因子间的交互关系。结果表明, 与不施用生物炭相比, 生物炭施用后可改善主粮田土壤理化性质, 提高主粮作物产量, 平均增产率为 8.77%。其中, 当生物炭 pH 为 7~8 时, 平均增产率最大, 可达 26.49%; 其 C/N < 60 时, 平均增产率为 13.73%, 显著高于 C/N ≥ 60 的平均增产率。将生物炭施入酸性或中性土壤中, 更能发挥其增产效应。当施炭量为 10~20 t·hm⁻² 时, 小麦和玉米的平均增产率最大; 施炭量为 15~25 t·hm⁻² 时, 水稻平均增产率最大。但是, 不同施炭水平的水稻增产率相近, 可考虑损失部分产量, 适当减施以兼顾经济效益。此外, 生物炭增产效应会随施用年限增加而不断减弱, 一般 3 a 后增产不显著。SEM 表明生物炭施用量不仅直接影响主粮作物产量, 还通过改善土壤肥力间接影响主粮作物产量, 而生物炭 C/N 和 pH 仅通过改善土壤肥力影响主粮作物产量。因此, 今后在生物炭的应用中, 优先考虑将其施于低肥力的酸性或中性土, 其 C/N 和 pH 分别控制在 60 以下和 7~8, 并综合考虑土壤条件、生物炭特性和田间管理措施以使主粮作物产量最大化。研究可为生物炭的推广与合理应用提供科学依据与理论基础。

关键词: 生物炭; 产量; Meta 分析; 主粮作物; 中国

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)01-0520-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202203102

Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China

YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue*, LIU Jing, GAO Huan, LIU Dan

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the impact of biochar on the yield of staple crops in China, a total of 866 pairs of data from 116 published studies were collected. Meta analysis was used to quantitatively analyze the impact of biochar on the yield of staple crops in China and its influencing factors. Meanwhile, a structural equation model (SEM) was constructed to further explain the interaction among the factors. The results showed that compared with no biochar application, biochar application could improve the physical and chemical properties of the soil in the main grain fields and increase the yield of the main grain crops, with an average yield increase rate of 8.77%. Among them, when the pH of biochar was 7-8, the average yield increase rate was the highest, reaching 26.49%. When C/N < 60, the average yield increase rate was 13.73%, which was significantly higher than that of C/N ≥ 60. Applying biochar to acidic or neutral soil could give full play to its yield-increasing effect. When the amount of carbon applied was 10-20 t·hm⁻², the average yield increase rate of wheat and corn was the highest. The average yield of rice was the highest when the amount of carbon was 15-25 t·hm⁻². However, the yield-increasing rates of rice with different carbon application levels were similar, so it is possible to consider losing part of the yield and give consideration to the economic benefits by appropriate reduction. In addition, the yield-increasing effect of biochar decreased with the increase in application years, and generally the yield-increasing effect was not significant after three years. The SEM showed that the application amount of biochar not only directly affected the yield of staple crops but also indirectly affected the yield of staple crops by improving soil fertility, whereas biochar C/N and pH only affected the yield of staple crops by improving soil fertility. Therefore, in the future application of biochar, priority should be given to applying it to acidic or neutral soil with low fertility, and its C/N and pH should be controlled below 60 and 7-8, respectively. Soil conditions, biochar characteristics, and field management measures should be comprehensively considered to maximize the yield of staple crops. This research can provide scientific basis and theoretical basis for the popularization and rational application of biochar.

Key words: biochar; yield; Meta analysis; staple crops; China

玉米、小麦和水稻是我国三大主粮作物, 占我国农田总面积的近 70%^[1], 其稳步增产对我国农业生产和粮食安全具有重要意义。然而, 在粮食供需“紧平衡”仍将持续的态势下, 我国粮食安全基础并不稳固^[2]。近年来, 主粮作物年均产量保持在 6.1 亿 t 左右, 近 5 年增长趋势基本陷入停滞状态^[3]。随着城市化进程加快, 预计到 2050 年, 世界人口将比当前提高 34%, 约 70% 为城市人口, 人口增长主要集中在发展中国家^[4]。为了养活这些人口, 未来粮食需求将持续增加。作为发展中国家, 我国迫切需要新的农业技术手段解决粮食安全问题, 突破产量增长瓶颈。

生物炭是一种富含碳的固态难溶有机物^[5], 在缺氧或无氧条件下 200~1 200℃ 热解形成^[6]。作为土壤改良剂, 它可改善土壤理化性质^[7], 减缓气候变化^[8], 提高肥料利用效率^[9], 增加作物产量^[10]。随着粮食安全和生态环境问题日益严峻, 生物炭在农业生产中已引起广泛关注。生物炭产量效应很大程度受到土壤条件、生物炭自身特性和管理措施等因素的影响, 从而导致生物炭对产量影响的个案试验

收稿日期: 2022-03-11; 修订日期: 2022-04-21

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (2019-ZD-0705)

作者简介: 于滨杭 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为北方寒区绿色高效用水, E-mail: 627462097@qq.com

* 通信作者, E-mail: 1987500010@syau.edu.cn

结果不一致. 例如, Kätterer 等^[11]在肯尼亚粉质黏土中将生物炭一次施用后发现连续 10 a 增加了玉米大豆轮作的土壤肥力和产量, 而 Borchard 等^[12]则发现生物炭施用在中温带砂质和粉质土壤中均未能提高玉米产量. Wei 等^[13]则认为生物炭对作物产量的影响主要取决于施肥量. 目前, 我国生物炭的应用研究不断深入, 但研究结果仅对特定条件下的生产实践具有指导意义. 不同土壤条件、生物炭特性和管理措施等因素对主粮作物生物炭产量效应影响的差异尚不明确, 缺少定量研究来评估其农业应用价值.

Meta 分析是一种定量统计方法, 可以对多个同类研究结果进行合并汇总分析, 将涉及同一主题的独立研究项目进行系统评价^[14], 弥补单个研究的不足, 提高效应大小的总体估计能力^[15]. 目前, 文献 [16~19] 运用 Meta 分析进行了全球尺度的生物炭施用后产量变化的定量评估, 刘成等^[20]和肖婧等^[21]对我国农田作物和大棚果蔬的产量及土壤性状进行了定量评估, 但生物炭影响我国田间主粮作物产量的整合分析仍鲜见报道, 需要科学统计方法对资料数据进行量化评估. 此外, 前人的研究没有将土壤理化性质和作物产量结合起来, 也未深入解释各指标直接或间接的因果结构关系. 结构方程模型 (SEM) 是一种多变量分析模型, 用于量化和确定变量和变量之间的因果关系, 并已应用于环境和农业领域的许多研究^[22]. 因此, 本研究收集已发表的生物炭对中国主粮作物产量及土壤理化性质影响的文献数据, 采用 Meta 分析法定量评估生物炭对我国主粮作物产量的直接和间接影响, 运用 SEM, 分析不同变量之间的内在关系, 解释生物炭施用对主粮作物产量影响的内在机制, 以期生物炭推广应用, 突破主粮作物增产瓶颈提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据收集与筛选

本研究收集的已发表文献截至 2021 年 10 月, 在中国知网、万方数据、Web of Science 和 Science Direct 等国内外数据库中, 设置主要关键词: “生物炭” “生物质炭” “黑炭” “biochar” “产量” “yield” “土壤理化性质” 和 “soil physical and chemical properties” 等进行搜索. 文献筛选标准为^[23]: ① 试验为中国范围内田间试验, 试验时间及地点明确; ② 试验中必须有严格的处理组与对照组, 处理组为施用生物炭 (不包括生物炭基肥), 对照组为不施用生物炭, 其他因素 (如肥料用量、作物品种、土壤性质、生物炭用量等) 必须一致; ③ 1 篇文献出现多个独立试验时, 每个试验视为 1 个

独立研究; ④ 试验处理重复次数 ≥ 3 次, 提供作物产量的平均值 (Mean)、标准差 (SD)、样本数 (n); ⑤ 研究对象为小麦、玉米或水稻; ⑥ 不包括评价类、综述类学术论文及相关主题的学位论文. 基于以上标准, 最终获得 116 篇文献, 其中报道作物产量 87 篇, 报道土壤理化性质 29 篇, 共匹配出 866 对数据.

1.2 数据分类

考虑到生物炭产量效应受其他直接或间接因素的影响, 通过亚组分析在文献中提取相关试验信息, 根据所界定的土壤条件、生物炭特性和田间管理措施进行分组处理. ① 土壤 pH 分为: < 6.5 、 $6.5 \sim 7.5$ 、 $7.5 \sim 8.5$ 和 > 8.5 ; ② 土壤质地分为: 黏土 (砂质黏土、粉质黏土、黏土)、壤土 (砂质黏壤土、壤土、黏壤土、粉质黏壤土) 和砂土 (砂、壤质砂、砂壤土); ③ 土壤全氮含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分为: < 1 、 $1 \sim 2$ 和 > 2 ; ④ 土壤碱解氮含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分为: < 50 、 $50 \sim 100$ 、和 100 ; ⑤ 土壤速效磷含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分为 < 10 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 > 40 ; ⑥ 生物炭原材料分为: 秸秆和木材; ⑦ 热解温度 ($^{\circ}\text{C}$) 分为: < 400 、 $400 \sim 600$ 和 > 600 ; ⑧ 生物炭 pH 分为: $7 \sim 8$ 、 $8 \sim 9$ 、 $9 \sim 10$ 和 > 10 ; ⑨ 生物炭 C/N 分为: ≥ 60 、 < 60 ; ⑩ 生物炭施用量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分为: ≤ 10 、 $10 \sim 25$ 、 $25 \sim 40$ 和 > 40 ; ⑪ 生物炭施用年限 (a) 分为: 1、2、3 和 > 3 ; ⑫ 施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分为: 0、 $0 \sim 200$ 和 > 200 . 土壤理化性质作为影响产量的间接因素, 包含土壤全氮、土壤 pH、土壤有机碳、铵态氮、硝态氮、土壤有效磷、土壤速效钾、土壤容重和阳离子交换量. 研究生物炭对产量效应的影响时采用试验前的土壤理化性质数据, 研究生物炭对土壤理化性质的影响时采用试验前后土壤理化性质的数据.

1.3 Meta 分析

本研究选用 Meta 分析法分析了生物炭对产量的影响及其影响因素, 具体步骤如下.

(1) 采用生态学中常用的对数响应比 $\ln R$ 作为效应值^[24]:

$$\ln R = \ln(\bar{X}_E / \bar{X}_C) \quad (1)$$

式中, \bar{X}_E 为处理组试验观测的平均值, \bar{X}_C 为对照观测的平均值.

本研究采用随机效应模型的参数化方法研究生物炭对产量的影响. 假设同一个分组中的各个独立研究之间有不同取样误差和随机变量, 如果 95% 置信区间 > 0 , 则认为生物炭有促进作用; 如果 95% 置信区间 < 0 , 则认为有抑制作用; 如果 95% 置信区间包含 0, 则认为无明显作用. 为直观表达生物炭的促进或抑制作用, 利用式 (2) 将效应值转化为百分比

的形式.

$$I = (R - 1) \times 100\% \quad (2)$$

式中, I 为变化率, R 为响应比.

(2) 通过组间异质性, 检验同一指标的效应量在不同亚组之间的差异, 分析各分组的组间异质性. 如果 $P < 0.05$, 则认为组间异质性显著, 反之则不显著^[25]. 如果异质性检验显著, 则引入解释变量分析异质性来源^[26]. 本研究的组间异质性显著的同时, 组内异质性不显著.

(3) 进行亚组分析进一步明确生物炭对主粮作物产量效应的影响因素. 亚组分析要求每一个亚组不少于 10 条研究, 如果少于 10 条研究则该亚组至少来自 3 篇不同的文献^[27].

(4) 对 Meta 分析进行偏倚性检验. 本研究运用图形分析法绘制频率分布直方图检验收集数据是否符合正态性. 采用罗森博格 (Roseberg's method) 失安全数 (N) 法检验文献是否偏倚^[28]: 若 $N > 5n + 10$ (N 为失安全数, n 为样本量), 则认为研究不存在文献偏倚.

1.4 结构方程模型

根据前人的理论和研究结果, SEM 基于最大似然法的模型参数估计方法构建了一组变量之间的因果关系假设^[29]. 模型的初始假设是观测数据的方差协方差矩阵与模型预测的方差协方差矩阵相匹配, 所以只有当卡方检验的 P 值大于 0.05 时 (无法拒绝初始假设), 模型适配是可接受的. 采用优度拟合指数 (GFI)、相对配适指数 (CFI)、近似误差平方根 (RMSEA) 来评价模型的拟合是否成功. GFI 和 CFI

越接近 1, 模型拟合度越好; RMSEA 小于 0.06 时, 模型拟合较好^[30].

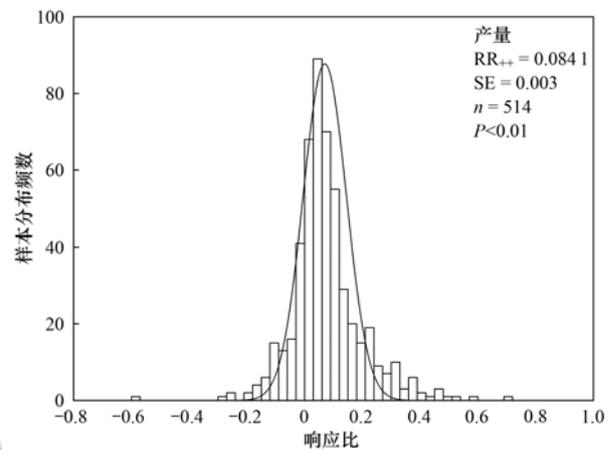
1.5 数据处理

本研究采用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件提取以图片形式展现的部分数据, Microsoft Excel 2010 软件建立数据库, MetaWin 2.1 软件分析数据, OriginPro 2018 软件绘图, R 语言 lavaan 程序包构建结构方程模型.

2 结果与分析

2.1 Meta 文献偏倚检验

本研究数据通过正态性分布检验 (图 1), 失安全数 (N) 大于最低阈值 (表 1 和表 2), 不存在文献偏倚, 即研究数据可靠.



RR₊ 和 SE 分别表示权重响应比和标准误; 曲线表示数据的高斯分布; $P < 0.01$ 达显著水平

图 1 主粮作物产量的样本分布频率

Fig. 1 Data distribution of staple crops yield

表 1 生物炭对主粮作物产量影响的组间异质性分析及文献偏倚检验¹⁾

Table 1 Impacts of biochar input on between-group heterogeneity for yield from staple crops and literature bias test

分类依据	项目	样本数	组间异质性		失安全数
			Q	P	
土壤	pH	512	18.79	0.00**	40 665.7
	质地	514	8.23	0.00**	41 118.9
	土壤全氮	417	27.97	0.00**	20 743.7
	碱解氮	129	8.99	0.01*	5 637.2
	有效磷	274	25.26	0.00**	23 634.1
生物炭特性	生物炭 C/N	160	18.45	0.00**	3 920.2
	生物炭 pH	427	42.74	0.00**	24 760.0
	原材料	464	22.31	0.00**	30 495.4
	热解温度	423	10.07	0.00**	21 840.1
管理措施	施氮量	492	15.79	0.00**	35 735.0
	生物炭施用量	508	10.38	0.03*	39 077.9
	生物炭施用年限	512	10.27	0.01*	40 057.2

1) * 和 ** 分别表示通过 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平的显著性检验

2.2 生物炭特性对主粮作物生物炭产量效应的影响

生物炭特性对主粮作物产量有显著影响 (图 2). 其中, 当 pH 为 7~8 时, 作物产量平均增产率最大, 可达 26.49%; 当 pH 逐渐增加时, 平均增产率随

之不断降低, 最低降至略高于 6%. 当高 C/N (≥ 60) 生物炭施用后, 主粮作物产量的平均增产率为 4.68%, 而低 C/N (< 60) 的平均增产率为 13.73%. 另外, 木质材料制备的生物炭施用后, 主粮作物产量

平均增产率为 22.04%, 显著高于秸秆生物炭. 此外, 热解温度 >600°C 的生物炭施加可使主粮作物平

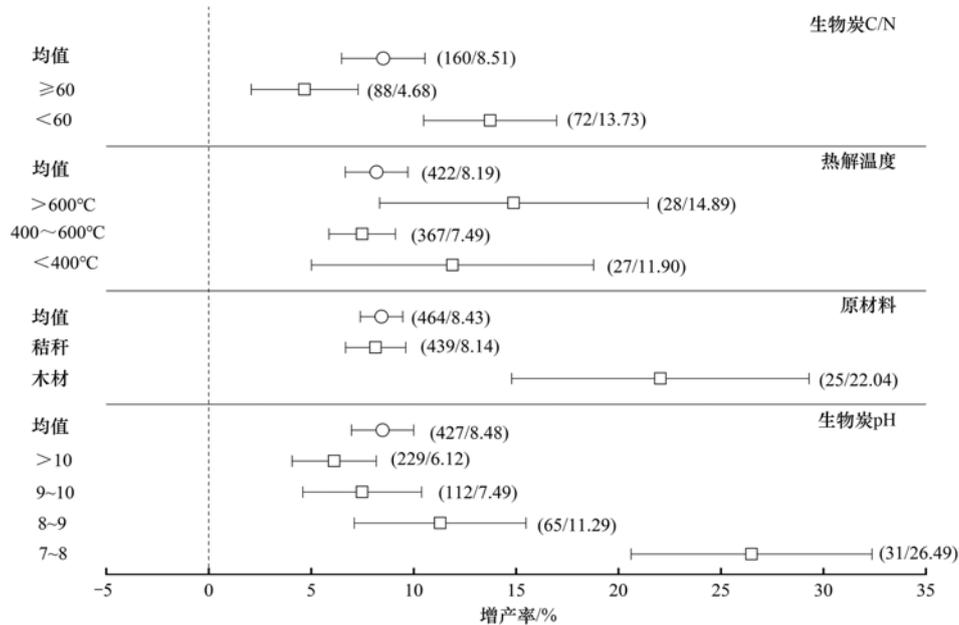
均增产率达到 14.89%, 其次是 <400°C 的生物炭, 400~600°C 生物炭的增产率最低, 为 7.49%.

表 2 生物炭施用后对主粮农田土壤理化性质的异质性分析及文献偏倚检验¹⁾

Table 2 Impacts of biochar input on heterogeneity for soil physical and chemical properties of main grain farmland and literature bias test

分类依据	全氮	pH	土壤有机碳	铵态氮	硝态氮	有效磷	速效钾	容重	阳离子交换量
样本数	62	54	74	31	31	36	33	19	14
<i>Q</i>	101.14	60.42	133.54	50.88	51.32	180.78	265.54	19.71	34.94
<i>P</i>	0.00**	0.20	0.00**	0.01**	0.00**	0.00**	0.00**	0.30	0.19
失安全数	1 981.0	491.4	1 273.3	358.6	760.6	1 179.3	3 547.0	221.4	342.2

1) * 和 ** 分别表示通过 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平的显著性检验



正方形和误差线分别表示平均值和95%置信区间, 括号内的数值表示样本数/变化率(%), 下同

图 2 生物炭特性对主粮作物生物炭增产效应的影响

Fig. 2 Yield-increase effect of staple crops to biochar application affected by biochar properties

2.3 田间管理措施对主粮作物生物炭产量效应的影响

田间管理措施的差异导致主粮作物生物炭产量效应的不同(图3). 例如, 施氮肥和不施氮肥对产量效应存在显著差异: 施氮肥(施氮量 > 200 kg·hm⁻² 和 0~200 kg·hm⁻²) 的增产效应均高于不施氮肥, 且在高施氮量农田生物炭的增产效应低于低施氮量. 此外, 施炭量的不同也影响生物炭的增产效应: 随着施炭量的增加, 增产效应呈现先升高后降低的趋势. 当施用生物炭量为 10~25 t·hm⁻² 时, 可使主粮作物平均增产率达 11.08%, 当施用量 < 10 t·hm⁻² 或 25~40 t·hm⁻² 时, 平均增产率分别为 6.22% 和 10.17%, > 40 t·hm⁻² 时增产效果不显著. 本研究中, 生物炭增产效应的可持续时间随施用年限的增加而逐年减弱, 1 a 增产可达 10.55%, 2 a 和 3 a 则降至 8.07% 和 7.35%, 施用 3 a 后的增产效果不显著.

2.4 土壤条件对主粮作物生物炭产量效应的影响

不同土壤条件对主粮作物生物炭产量效应影响

显著(图4). 土壤 pH 为 6.5~7.5 更能发挥生物炭的增产效应, 平均增产率可达 12.20%; pH < 6.5 次之, 且比 pH 为 7.5~8.5 高 3.22%; pH > 8.5 的生物炭增产效应不明显. 从土壤质地来看, 生物炭施入壤土中, 主粮作物平均增产率为 10.46%, 比砂土高 6.14 个百分点, 而施入黏土后, 主粮作物增产效应不显著. 生物炭施入全氮含量高的土壤增产效果最显著: 当全氮含量 > 2 g·kg⁻¹ 时, 平均增产率可达 26.00%; 全氮含量 1~2 g·kg⁻¹ 平均增产率为 9.98%; 全氮含量 < 1 g·kg⁻¹ 的土壤增产最低. 土壤碱解氮含量与生物炭的增产效应呈负相关: 当碱解氮含量 < 50 mg·kg⁻¹ 时, 平均增产率最大, 为 12.12%; 随着土壤碱解氮含量增大, 增产率降低, 最低为 6.08%. 土壤有效磷含量影响生物炭的产量效应, 影响趋势与土壤碱解氮相似: 当有效磷含量 < 10 mg·kg⁻¹ 时, 平均增产率高达 12.22%; 随着土壤有效磷含量的升高, 增产效应降低, 最低为 5.22%.

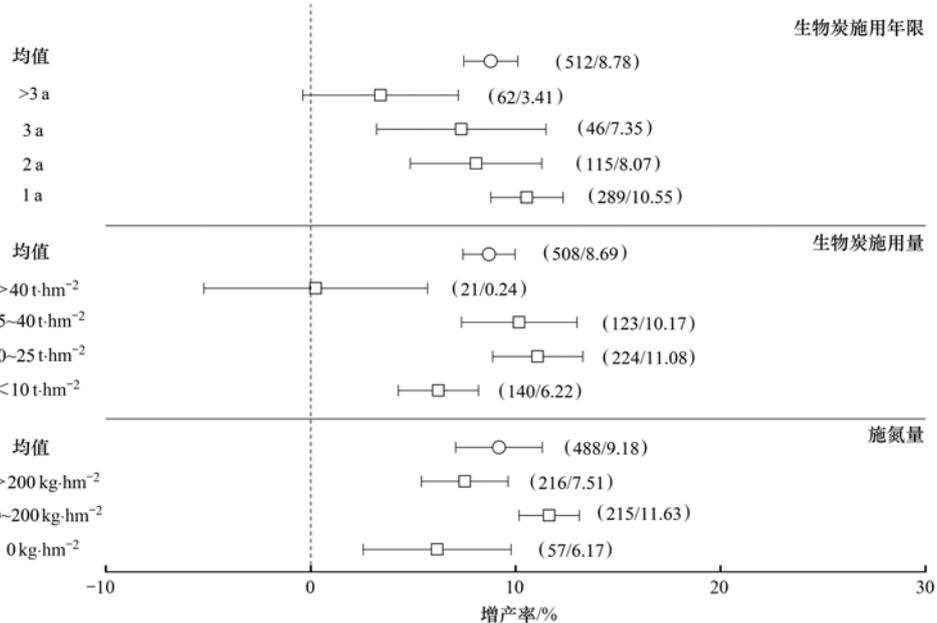


图 3 田间管理措施对主粮作物生物炭增产效应的影响

Fig. 3 Yield-increase effect of staple crops to biochar application affected by field managements

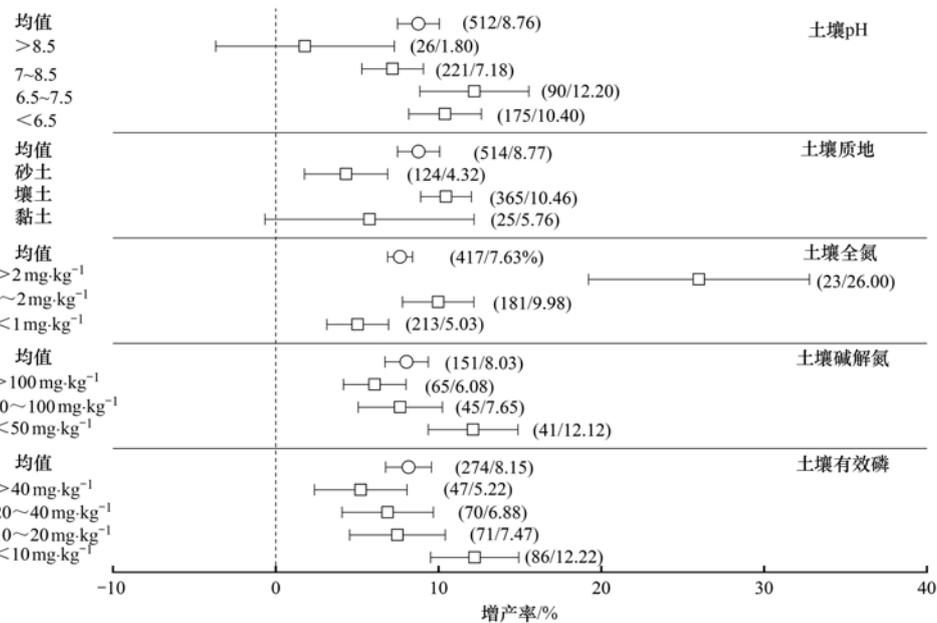


图 4 土壤条件对主粮作物生物炭增产效应的影响

Fig. 4 Yield-increase effect of staple crops to biochar application affected by soil properties

2.5 生物炭对主粮农田土壤理化性质的影响

与不施生物炭相比,施用生物炭后,我国主粮田土壤理化性质发生了改变(图 5)。土壤全氮含量、pH、有机碳含量、硝态氮(NO_3^-)、有效磷含量、速效钾含量和阳离子交换量均有提高。其中,有机碳含量提高最大,为 36.08%,速效钾含量次之,pH 最小(2.5%)。而铵态氮(NH_4^+)含量和土壤容重则分别降低了 19.44%和 4.21%。

2.6 施炭后的土壤理化性质与主粮作物产量的关联分析

线性回归分析显示,图 6(a)、6(b)、6(c)、6

(e)、6(f)、6(g)和 6(i)呈正相关,图 6(d)和 6(h)呈负相关。这表明生物炭施入土壤后,土壤中全氮、有机碳、pH、硝态氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量增加,容重和铵态氮降低,促进了主粮作物产量的提高。

构建 SEM 表征主粮生物炭、土壤肥力和主粮作物产量之间的关系(图 7)。生物炭施用量可以直接影响主粮作物产量,直接效应为 0.578;也可以通过土壤肥力进而间接影响主粮作物产量,间接效应为 0.124。因此,生物炭施用量对产量的总效应为 0.702,即它解释了 70.2%的产量变化。生

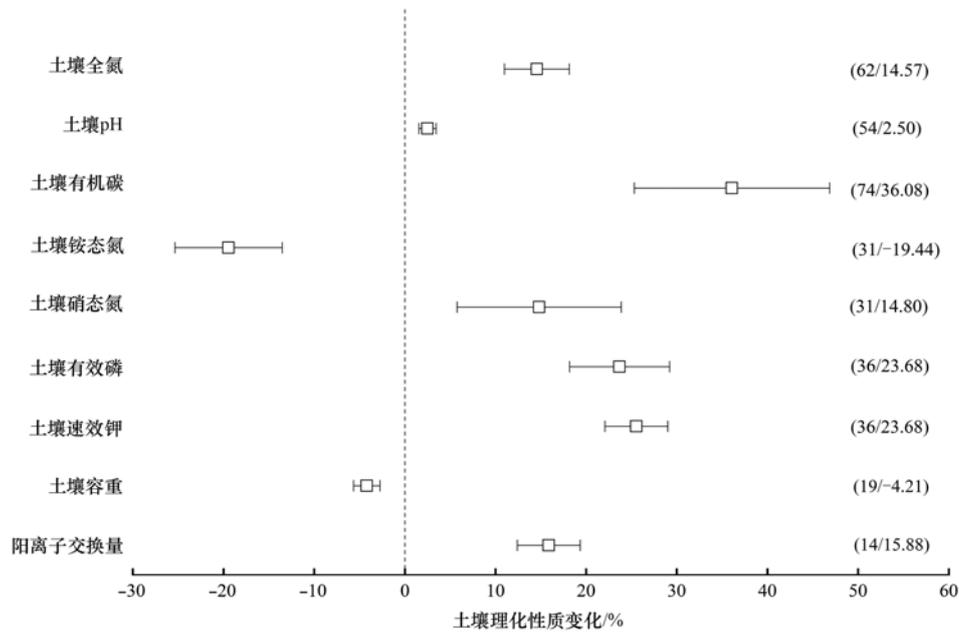
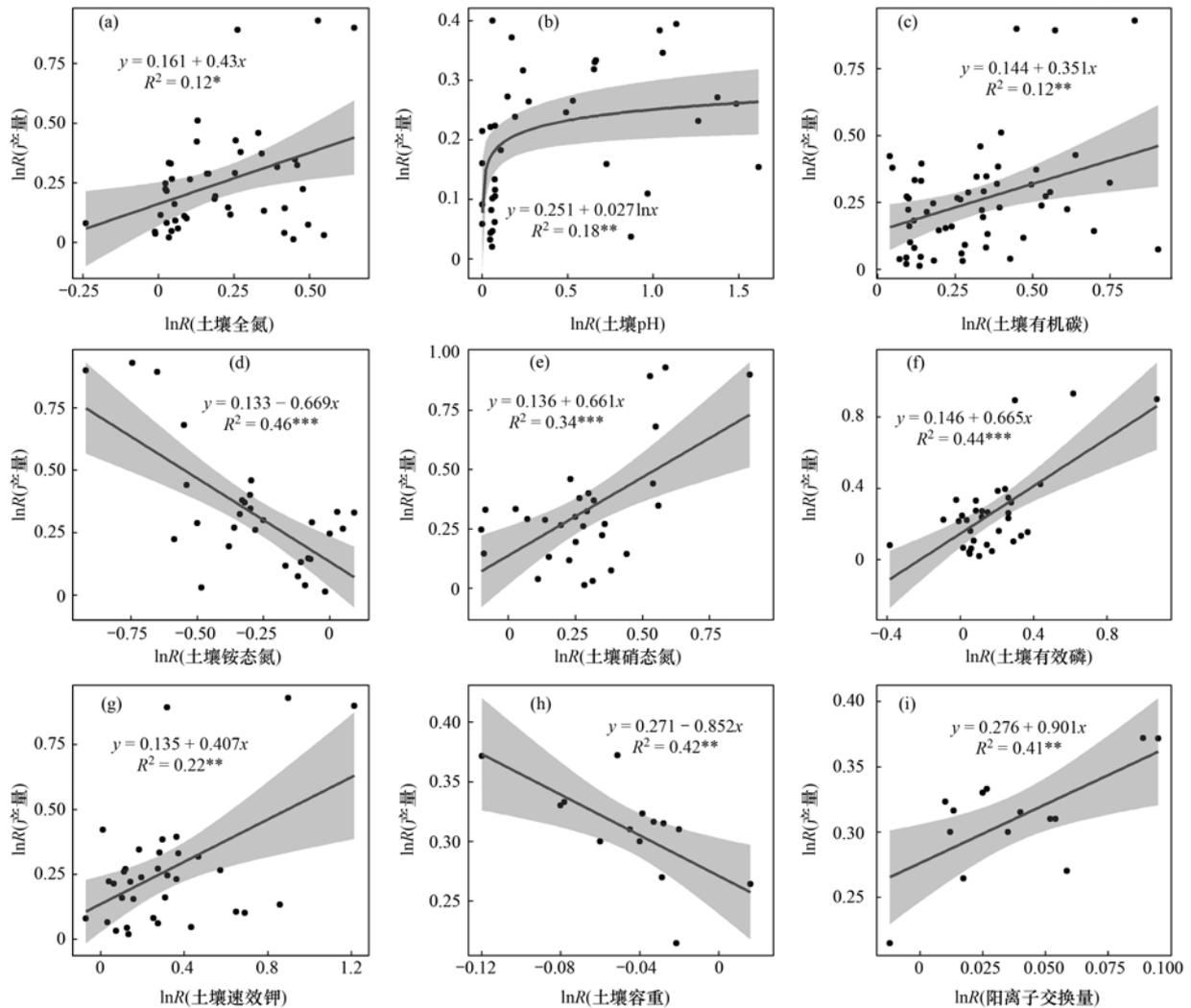


图 5 施用生物炭对主粮农田土壤理化性质的影响

Fig. 5 Effects of biochar application on soil physical and chemical properties



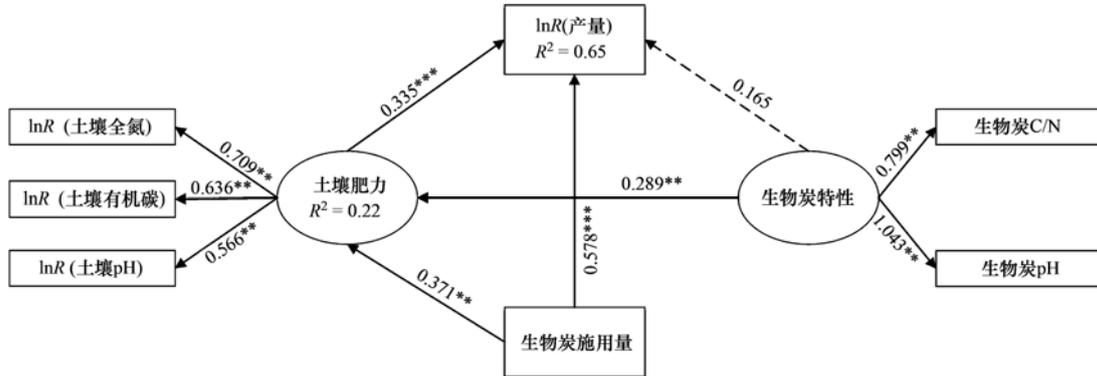
*、** 和 *** 分别表示通过 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平的显著性检验

图 6 产量的效应值 ($\ln R$) 与土壤理化性质之间的关系

Fig. 6 Relationship between yield effect value ($\ln R$) and soil physical and chemical properties

物炭 C/N 和 pH 对主粮作物产量的直接路径关系并不显著,仅通过影响土壤肥力间接影响主粮作物产量,间接效应为 0.097. 土壤肥力对产量的直接效应为 0.335,小于生物炭施用量的总效应. 综

上,尽管土壤肥力、生物炭施用量和生物炭自身特性是影响主粮作物产量的 3 个重要因素,但生物炭施用量是主粮作物生物炭产量效应诸影响因素中最重要因子.



$P = 0.27 > 0.05$, GFI = 0.98, CFI = 0.98, RMSEA = 0.05; 箭头上方的数字是标准化路径系数,实线表示影响显著,虚线表示影响不显著,*、**和***分别表示通过 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平的显著性检验, R^2 表示可由结构方程模型中的相应变量解释的方差比例

图 7 生物炭对主粮产量影响的结构方程模型

Fig. 7 Structural equation model of the effect of carbon on the yield of staple crops

3 讨论

3.1 土壤条件对生物炭增产效应的影响

作物产量很大程度受土壤自身条件影响^[31]. 生物炭施入土壤后,其富含的营养成分和不稳定的有机碳会释放到土壤中,可改善土壤养分,增加土壤有机碳含量,进而提高作物产量^[32-34]. 生物炭具有多孔结构,密度一般低于农田土壤,表面易氧化形成丰富的官能团,可增强土壤阳离子的吸附能力,降低土壤容重,使土壤总孔隙度增加,进而增大土壤通气状况,改善水分入渗速率^[35]. 另外,土壤阳离子交换能力强,更容易吸附 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,从而提高土壤中养分的利用率,减少养分流失^[36]. 土壤存在硝化作用,生物炭施用后矿化产生的 NH_4^+ 很快被转化为 NO_3^- ,可增加土壤氮素截留,提高肥料利用率^[37]. 生物炭大多为碱性,施入酸性土壤后,土壤 pH 增加,提高土壤养分利用^[38],有效改良酸性土壤中的铝毒性,从而提高作物产量^[39]. 但是,在 pH 过高的碱性土壤中施用时,土壤酶活性和微生物有效性受抑制,使作物增产不明显^[40,41]. 同样地,生物炭施入黏土后,由于黏土持水性高、通气性差等因素导致生物炭短期改良不明显^[42],作物增产也不显著. 土壤 C/N 是评价土壤氮素矿化能力的指标,低 C/N 可以加快土壤微生物分解和氮的矿化速率,高 C/N 则有抑制作用^[43]. 因此,土壤全氮含量高,生物炭施入后作物增产更明显. 本研究中,生物炭的增产效应随着土壤碱解氮和有效磷含量的升高而减弱,

可能因为土壤碱解氮和有效磷含量较高的数据大多在我国东北地区及华北平原,这些地区土壤较肥沃,而生物炭在肥力较高的土壤中增产作用不明显^[44].

3.2 生物炭特性对生物炭增产效应的影响

生物炭的有效性和应用依赖于生物质原料及其生产条件,不同原料制备的生物炭对作物增产差异显著^[45]. 由于畜禽粪便类生物炭样本量不足,本研究仅涉及果木枝条、竹子等木质生物炭和秸秆生物炭,前者对作物的增产效应显著高于后者. 这是因为木质生物炭虽然自身营养素较少,但其孔隙结构更发达,可以将肥料中额外营养素浸渍并随后造粒,最终以较慢速度控制营养素释放,从而减少营养素损失^[46]. 热解温度是生物炭炭化工艺的重要参数之一,也是评价生物炭稳定性的一项重要指标. 400 ~ 600°C 裂解的生物炭增产效应低于 400°C 以下,但高于 600°C 的增产效应,这与 Liu 等^[17] 结论不一致. 一方面,可能因为研究数据中的高温裂解生物炭中竹炭等木质生物炭占了绝大多数,提高了高温裂解生物炭亚组的增产效应;另一方面,可能是秸秆亚组中玉米秸秆的 C 含量随热解温度的升高而降低造成的^[47]. 本研究中,生物炭自身 pH 大小与产量呈负相关关系. 当 pH 过高的生物炭施入土壤后,会导致土壤碱度过大^[48],进而抑制作物生长.

3.3 田间管理措施对生物炭增产效应的影响

本研究中,生物炭不配施氮肥也能提高作物产量,这与刘成等^[20] 的研究结果一致,配施氮肥后增产更显著. 这是因为当外源养分吸附在生物炭上,生物炭可以作为一种缓释肥料来提供养分^[49]. 生物炭

与肥料配施存在协同或互补的关系;肥料消除了生物炭养分含量低的缺陷,生物炭的吸附性发挥作用又赋予肥料养分缓释性能^[50].随着生物炭施用量的增加,主粮作物的增产效应先增加后减少,在 $10 \sim 25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最大; $>40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后,增产不显著.一方面过量生物炭会提高土壤 C/N,进而抑制作物生长;另一方面过量的生物炭输入提高土壤 pH 而降低养分有效性.生物炭施用后,增产效应随时间推移而减弱,一般 3 a 后增产不明显.例如,荣飞龙等^[51]在 5 a 大田试验中,得出酸性稻田添加生物炭改善水稻群体质量,进而促进水稻增产,但仅增产 3 a.这是由于生物炭增产效应更多来自于新鲜生物炭的石灰效应提升碱度和土壤中所含养分的直接添加,生物炭表面颗粒的老化与氧化可产生酸性物质,却会降低生物炭提高土壤 pH 的能力^[52],长期的养分淋溶也会降低土壤养分对生物炭增产效应的影响.也有相关研究认为,生物炭一次施入数年后对作物产量无明显影响^[53],但仍可长期改变环境效应如增加氮素利用效率和减少 N_2O 排放等^[54].因此,生物炭一次施入后的长期效应仍需深入研究.

由于本研究各亚组的组内异质性都不显著,在已有亚组分析上再进行分组结果变化不大.但考虑

到目前生物炭价格还相对较高,较小的生物炭施用量变化都会造成较大的经济差异.因此将生物炭施用量分作物再进行探讨以减少成本(图 8).结果表明,生物炭增产效应仍随生物炭施用量的增加呈现先增加后减少趋势,但小麦和玉米的生物炭最佳施用量为 $10 \sim 20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻的生物炭最佳施用量为 $15 \sim 25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,且最大增产率低于小麦和玉米.在水稻生长过程中,大多数时间保持淹灌管理,限制了生物炭对土壤结构和土壤水分条件的影响^[55],而其对土壤理化性质的改善被土壤保水能力的降低所抵消^[56],进而导致生物炭常见的土壤改良在淹灌情况下并不显著^[18],平均增产率也略低于小麦和玉米.本研究发现,不同施炭量均显著提高水稻产量,但增产率相差不大.例如,Cui 等^[57]的研究发现,在稻田土壤中施用 $2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭后,水稻增产无显著差异.Huang 等^[58]的研究认为,生物炭仅改变稻田土壤环境,对水稻产量无影响,这与本研究的结果不一致.可能原因是他们仅参考了 6 篇文献,且试验地点均在我国南方,数据量有限.本研究认为,稻田实际生产中可以考虑损失部分产量,适宜减施,在保证增产的同时兼顾经济效益.

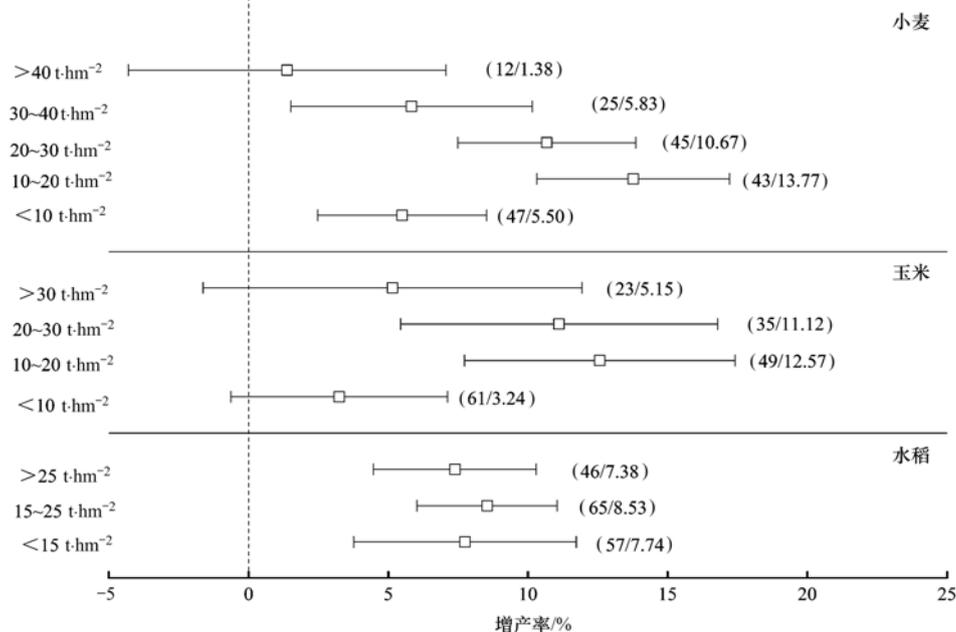


图 8 不同作物类型对生物炭施用量的增产效应

Fig. 8 Yield-increasing effects of different crop species on biochar application rates

4 结论

(1) 与不施生物炭相比,施生物炭可改善主粮田土壤理化性质,提高主粮作物产量.建议优先将生物炭施用在低肥力的酸性或中性土中,并将生物炭 C/N 控制在 60 以下,生物炭 pH 控制在 7~8.

(2) 随着生物炭施用量的提高,主粮作物增产率先增加后降低.其中,不同施炭水平的水稻增产率相近,实际生产中可考虑损失部分产量,适当减施,在保证增产的同时兼顾经济效益.

(3) 生物炭一次施入主粮农田中,一般 3 a 后增产不显著,生物炭的长期效应有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 赵红, 孙滨峰, 逯非, 等. Meta 分析生物质炭对中国主粮作物痕量温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33** (19): 10-16.
Zhao H, Sun B F, Lu F, *et al.* Meta analysis on impacts of biochar on trace greenhouse gases emissions from staple crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(19): 10-16.
- [2] 崔宁波, 董晋. 主产区粮食生产安全: 地位、挑战与保障路径[J]. 农业经济问题, 2021, **499**(7): 130-144.
Cui N B, Dong J. Grain production security in major grain-producing areas: status, challenges and guarantee path [J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, **499**(7): 130-144.
- [3] 蔡之兵, 张青. 中国粮食产量“天花板”的迹象判断、形成机理与应对之策[J]. 行政管理改革, 2021, **138**(2): 72-80.
Cai Z B, Zhang Q. The emergence, formation and countermeasures of the “ceiling” of food production in China [J]. Administration Reform, 2021, **138**(2): 72-80.
- [4] Alexandratos N. FAO's director-general on how to feed the world in 2050 [J]. Population and Development Review, 2009, **35** (4): 837-839.
- [5] Weber K, Quicker P. Properties of biochar [J]. Fuel, 2018, **217**: 240-261.
- [6] Farhangi-Abri S, Torabian S, Qin R J, *et al.* Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, **775**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145869.
- [7] Singh H, Northup B K, Rice C W, *et al.* Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis[J]. Biochar, 2022, **4**, doi: 10.1007/s42773-022-00138-1.
- [8] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 等. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田 CO₂、N₂O 排放的影响[J]. 生态学报, 2017, **37** (20): 6700-6711.
Liu X R, Zhang X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw return on CO₂ and N₂O emissions from farmland in the North China plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37** (20): 6700-6711.
- [9] Abbruzzini T F, Davies C A, Toledo F H, *et al.* Dynamic biochar effects on nitrogen use efficiency, crop yield and soil nitrous oxide emissions during a tropical wheat-growing season [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **252**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109638.
- [10] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. 农业工程学报, 2018, **34** (3): 159-165.
Yuan J J, Tong Y A, Lu S H, *et al.* Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(3): 159-165.
- [11] Kätterer T, Roobroeck D, Andrén O, *et al.* Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya[J]. Field Crops Research, 2019, **235**: 18-26.
- [12] Borchard N, Siemens J, Ladd B, *et al.* Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice [J]. Soil and Tillage Research, 2014, **144**: 184-194.
- [13] Wei W L, Yang H Q, Fan M S, *et al.* Biochar effects on crop yields and nitrogen loss depending on fertilization[J]. Science of the Total Environment, 2020, **702**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134423.
- [14] 刘鸣. 系统评价、Meta-分析设计与实施方法[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011.
- [15] 占亚楠, 王智, 孟亚利. 生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1185-1193.
Zhan Y N, Wang Z, Meng Y L. Biochar addition improves soil phosphorus availability: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(4): 1185-1193.
- [16] 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 & Environment, 2011, **144**(1): 175-187.
- [17] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, *et al.* Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data[J]. Plant and Soil, 2013, **373** (1-2): 583-594.
- [18] Ye L L, Camps-Arbestain M, Shen Q H, *et al.* Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: a meta-analysis of field studies using separate controls[J]. Soil Use and Management, 2020, **36**(1): 2-18.
- [19] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis [J]. GCB-Bioenergy, 2013, **5**(2): 202-214.
- [20] 刘成, 刘晓雨, 张旭辉, 等. 基于整合分析方法评价我国生物质炭施用的增产与固碳减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(3): 696-706.
Liu C, Liu X Y, Zhang X H, *et al.* Evaluating the effects of biochar amendment on crop yield and soil carbon sequestration and greenhouse gas emission using meta-analysis[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(3): 696-706.
- [21] 肖婧, 徐虎, 蔡岸冬, 等. 生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, **50** (10): 1827-1837.
Xiao J, Xu H, Cai A D, *et al.* A meta-analysis of effects of biochar properties and management practices on crop yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, **50**(10): 1827-1837.
- [22] Wu W N, Han J Y, Gu Y N, *et al.* Impact of biochar amendment on soil hydrological properties and crop water use efficiency: a global meta-analysis and structural equation model [J]. GCB-Bioenergy, 2022, **14**(6): 657-668.
- [23] DeMalach N, Zaady E, Kadmon R. Contrasting effects of water and nutrient additions on grassland communities: a global meta-analysis[J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, **26** (8): 983-992.
- [24] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, **80** (4): 1150-1156.
- [25] 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 等. 基于 Meta 分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氮挥发的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1678-1687.
Zhao Z X, Wang X Y, Tian Y J, *et al.* Effects of straw returning on soil ammonia volatilization under different production conditions based on meta-analysis[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1678-1687.
- [26] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合 (Meta) 分析 [J]. 中国农业科学, 2020, **53** (21): 4415-4429.
Yang J H, Luo Y L, Chen J, *et al.* Effects of main food yield under straw return in China: a meta-analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(21): 4415-4429.
- [27] Wittig V E, Ainsworth E A, Naidu S L, *et al.* Quantifying the

- impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(2): 396-424.
- [28] Kinlock N L, Prowant L, Herstoff E M, *et al.* Explaining global variation in the latitudinal diversity gradient: meta-analysis confirms known patterns and uncovers new ones [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, **27**(1): 125-141.
- [29] Yang X C, Liu D P, Fu Q, *et al.* Characteristics of greenhouse gas emissions from farmland soils based on a structural equation model: regulation mechanism of biochar [J]. *Environmental Research*, 2022, **206**, doi: 10.1016/j.envres.2021.112303.
- [30] Zhou S X, Kong F L, Lu L, *et al.* Biochar-an effective additive for improving quality and reducing ecological risk of compost: a global meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151439.
- [31] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant and Soil*, 2010, **327**(1-2): 235-246.
- [32] Zhang Y F, Wang J M, Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: a review [J]. *CATENA*, 2021, **202**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105284.
- [33] Oladele S O, Adeyemo A J, Awodun M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils [J]. *Geoderma*, 2019, **336**: 1-11.
- [34] 张健乐, 曾小英, 史东梅, 等. 生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2209-2218.
Zhang J L, Zeng X Y, Shi D M, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon of eroded cultivated layer of slope farmland in purple hilly area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2209-2218.
- [35] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(8): 1292-1297.
Fang B, Li X Q, Zhao B, *et al.* Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, **23**(8): 1292-1297.
- [36] 段春燕, 沈育伊, 徐广平, 等. 桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4234-4245.
Duan C Y, Shen Y Y, Xu G P, *et al.* Effects of eucalyptus branches biochar application on soil physicochemical properties of acidified soil in a eucalyptus plantation in Northern Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4234-4245.
- [37] 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 等. 负载 NH_4^+ -N生物炭对土壤 N_2O -N排放和 NH_3 -N挥发的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4548-4557.
Ma X G, He J Q, Chen Y L, *et al.* Gaseous nitrogen emission from soil after application of NH_4^+ -N loaded biochar [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4548-4557.
- [38] Buss W, Shepherd J G, Heal K V, *et al.* Spatial and temporal microscale pH change at the soil-biochar interface [J]. *Geoderma*, 2018, **331**: 50-52.
- [39] 付威, 樊军, 胡雨彤, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(5): 1158-1167.
Fu W, Fan J, Hu Y T, *et al.* Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(5): 1158-1167.
- [40] Zheng R L, Cai C, Liang J H, *et al.* The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(7): 856-862.
- [41] Sheng Y Q, Zhu L Z. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **622-623**: 1391-1399.
- [42] 史雷, 张然, 马龙, 等. 小麦产量及土壤性状对施用生物炭的量化响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(7): 1273-1283.
Shi L, Zhang R, Ma L, *et al.* Quantitative response of wheat yield and soil properties to biochar amendment in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(7): 1273-1283.
- [43] 葛顺峰, 周乐, 李红娜, 等. 土壤 C/N 对苹果植株生长及氮素利用的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2013, **21**(7): 795-800.
Ge S F, Zhou L, Li H N, *et al.* Effect of soil C/N ratio on nitrogen utilization and growth of apple [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(7): 795-800.
- [44] Nelson N O, Agudelo S C, Yuan W Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils [J]. *Soil Science*, 2011, **176**(5): 218-226.
- [45] Tag A T, Duman G, Ucar S, *et al.* Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, **120**: 200-206.
- [46] Kim P, Hensley D, Labbé N. Nutrient release from switchgrass-derived biochar pellets embedded with fertilizers [J]. *Geoderma*, 2014, **232-234**: 341-351.
- [47] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [48] Chen X J, Lewis S, Heal K V, *et al.* Biochar engineering and ageing influence the spatiotemporal dynamics of soil pH in the charosphere [J]. *Geoderma*, 2021, **386**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114919.
- [49] Purakayastha T J, 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.
- [50] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态 [J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(2): 1-7.
He X S, Geng Z C, She D, *et al.* Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(2): 1-7.
- [51] 荣飞龙, 蔡正午, 覃莎莎, 等. 酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响——基于 5 年大田试验 [J]. *生态学报*, 2020, **40**(13): 4413-4424.
Rong F L, Cai Z W, Qin S S, *et al.* Effects of biochar on growth and yield of rice in an acidic paddy field: findings from a five-year field trial [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(13): 4413-4424.
- [52] 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用 3 年后对稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(1): 141-148.

- Wu Z, Dong Y B, Xiong Z Q. Effects of biochar application three-years ago on global warming potentials of CH₄ and N₂O in a rice-wheat rotation system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(1): 141-148.
- [53] 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 & Environment, 2017, **237**: 80-94.
- [54] Liao X, Niu Y H, Liu D Y, *et al.* Four-year continuous residual effects of biochar application to a sandy loam soil on crop yield and N₂O and NO emissions under maize-wheat rotation [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **302**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107109.
- [55] Liu X Y, Zhou J S, Chi Z Z, *et al.* Biochar provided limited benefits for rice yield and greenhouse gas mitigation six years following an amendment in a fertile rice paddy [J]. CATENA, 2019, **179**: 20-28.
- [56] Carvalho M T M, Madari B E, Bastiaans L, *et al.* Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield [J]. Geoderma, 2016, **276**: 7-18.
- [57] Cui Y F, Meng J, Wang Q X, *et al.* Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, **16**(5): 1064-1074.
- [58] Huang M, Yang L, Qin H D, *et al.* Quantifying the effect of biochar amendment on soil quality and crop productivity in Chinese rice paddies [J]. Field Crops Research, 2013, **154**: 172-177.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)