

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勳之, 姜榕, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2

目次

综述

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)  
再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)  
基于多种新型受体模型的PM<sub>2.5</sub>来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)  
华中地区夏季PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)

淄博2021年元宵节PM<sub>2.5</sub>水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)

浙江省大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)

2001~2019年气象条件对江苏省PM<sub>2.5</sub>分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)

基于神经网络和数值模型的重点区域PM<sub>2.5</sub>预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)

2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)

济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)

山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)

基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)

日照市夏季VOCs物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)

泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)

2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)

西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)

生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)

不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)

雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)

廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)

北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰蓉, 郭道宇 (803)

河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 ..... 陈召堂, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)

青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)

鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)

基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中DBPs污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)

铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)

氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)

环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)

冷冻PN/A颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮英, 文言, 钱飞跃 (920)

不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)

山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄容, 高雪松 (946)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)

西南地质高背景区蔬菜Pb的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)

矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)

不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)

温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐焯 (1015)

复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦Cd吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)

土壤phoC和phoD微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余烁, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张祯敏, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)

中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)

稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)

模拟及实际根系分泌物对镉污染土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)

德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)

陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)

长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)

《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

# 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响

熊钰婷, 袁旭音\*, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏

( 河海大学环境学院, 南京 210098 )

**摘要:** 滨岸带土壤的氮矿化改变了氮元素的迁移和利用效率, 与水体富营养化控制息息相关, 而土地利用导致的土壤性质差异使得氮的固持和运移能力不同. 因此, 以太湖西部沿岸 3 种土地利用类型的土壤(林地、草地和耕地)为研究对象, 通过培养实验和土柱淋溶实验, 探究不同生物炭添加(0%、1%和5%)条件下滨岸带土壤氮矿化量的动态变化和淋失特征. 结果表明, 总体上生物炭添加抑制了林地和草地土壤的氮矿化, 对耕地氮矿化的影响则为低浓度促进而高浓度抑制. 淋溶实验研究发现, 生物炭添加减少了土壤矿质氮的流失, 对氨氮削减率为 23.28%~39.79%, 3 种土地利用类型之间的差异较小; 硝氮降低了 17.20%~44.49%, 其中耕地的削减率较林地和草地小. 综合来看, 生物炭输入草地和耕地更能达到保持土壤肥力和减少滨岸带土壤氮素淋失的效果.

**关键词:** 生物炭; 滨岸带土壤; 氮矿化; 氮淋失; 土地利用

中图分类号: X144; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0762-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106075

## Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake

XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin\*, ZHOU Hui-hua, GAO Yi-dan, WANG Yi-min

( College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China )

**Abstract:** Nitrogen mineralization in riparian soil changes the migration and utilization efficiency of nitrogen, which is closely related to the control of water eutrophication. The differences in soil properties caused by land use alter nitrogen retention and transport capacity. Therefore, the soil of three land use types ( woodland, grassland, and cultivated land ) in the western riparian zone of Taihu Lake were selected for research on the dynamic changes in nitrogen mineralization amount using an incubation experiment and a leaching characteristics by soil column leaching experiment, and their environmental effects were also studied under different biochar addition conditions ( 0%, 1%, and 5% ). The results showed that, in general, the addition of biochar inhibited nitrogen mineralization in forest land and grassland soil, whereas the effect of biochar on nitrogen mineralization in cultivated land was promoted in low concentrations but inhibited in high concentrations. Leaching experiments showed that the biochar addition reduced the loss of soil mineral nitrogen, and the reduction rate in ammonia nitrogen was 23.28%~39.79%, whereas there was little difference between the three land use types. The nitrate decreased by 17.20%~44.49%, and the reduction rate of cultivated land was smaller than that of forest land and grassland. In conclusion, the input of biochar into grassland and cultivated land can better maintain soil fertility and reduce soil nitrogen loss in riparian soil.

**Key words:** biochar; riparian soil; nitrogen mineralization; nitrogen leaching; land use

氮是土壤中重要的营养元素, 其存在形态的组成差别决定了可利用程度, 而土壤的氮矿化过程是最主要的氮形态转化方式之一. 生物炭具有多孔、比表面积大和表面负电荷多的特点, 能够改变土壤理化性质和干预微生物活动<sup>[1,2]</sup>, 影响有机氮的矿化过程和无机氮的淋失过程. 有研究表明生物炭对土壤氮矿化的影响既有可能是正向激发<sup>[3]</sup>, 也有可能是反向抑制<sup>[4]</sup>, 或者没有显著影响<sup>[5]</sup>. 这些结果的差异性与生物炭添加量有关. Manirakiza 等<sup>[6]</sup>的研究表明生物炭添加后以土壤碳氮比作为其控制氮矿化的关键因素, 生物炭添加比例越高, 降低净氮矿化率的效果越显著. Xu 等<sup>[7]</sup>的研究则发现生物炭施入土壤通过向微生物供给不稳定碳源提高了微生物活性, 促进了土壤氮矿化, 但当施用率较高(8%)时反而会降低微生物活性, 导致土壤呼吸和净氮矿化的降低. 由于土地利用方式改变了土壤性质, 生物炭的作用效果也会有所差异<sup>[8]</sup>. Zhu 等<sup>[9]</sup>的研究结果表明菜地土壤无机氮积累较高, 土壤结构和孔隙发

育良好, 使生物炭对菜地土壤氮矿化抑制强度小于复垦土壤. Borchard 等<sup>[10]</sup>的研究发现由于土壤 pH、有机质和质地不同, 生物炭添加能显著减少耕地和园艺用地的二氧化氮排放和硝氮淋失, 但施用于草地土壤时效果却并不显著. 可见, 生物炭施用于不同利用类型土壤的环境效应对比研究很有必要. 此外, 已有研究中关于生物炭添加土壤有机氮矿化过程和无机氮淋失削减过程的影响有时是相互矛盾的, 施加生物炭在降低土壤硝氮淋失的同时, 也降低了作物吸收的有效氮含量<sup>[11]</sup>, 需要综合考虑生物炭对有机氮矿化和无机氮淋失的影响.

滨岸带处于水陆交替带, 不断的干湿交替会增加微生物的基质供给从而促进氮的固定<sup>[12]</sup>, 因此与其他陆地土壤相比, 滨岸带土壤的养分积累量更高,

收稿日期: 2021-06-09; 修订日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372354, 41601540)

作者简介: 熊钰婷(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为滨岸带土壤氮循环, E-mail: hhu\_xyt@163.com

\* 通信作者, E-mail: yxy\_hjy@ hhu. edu. cn

微生物活性更强<sup>[13]</sup>. 并且滨岸带土壤中的营养元素在水位涨落和强降雨下十分容易进入水体, 对河湖生态系统具有重要影响<sup>[14]</sup>. 鉴于此, 本文以太湖西部滨岸带的林地、草地和耕地这 3 种利用类型土壤为研究对象, 按不同质量比施加生物炭(0%、1% 和 5%), 经过室内培养实验研究生物炭对不同利用类型土壤氮矿化和有效氮的影响, 并利用土柱淋溶实验研究土壤氮素向水体迁移的情况. 在此基础上, 比较不同类型滨岸带土壤氮的矿化动力学过程和相应的淋失特征差异, 以期生物炭合理利用和控制太湖滨岸带营养元素的流失提供参考依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

本实验土样为 2020 年夏季采自太湖不同用地类型滨岸带的表层土(取样深度为 0~25 cm). 为防止采集样品的随机性和偶然性, 对于不同植被类型、不同作物类型采集 3~5 个样品组成混合样, 分别作为林地、草地和耕地土壤样品, 将混合土壤自然风

干后剔除杂质, 并置于 4℃ 环境下保存. 生物炭以小麦秸秆为原料, 风干后粉碎过 1 mm 筛, 填入瓷坩埚用马弗炉进行厌氧加热. 加热温度为 500℃, 升温速率为 20℃·min<sup>-1</sup>. 取出后自然冷却, 置于棕色广口瓶备用. 供试土壤和生物炭基本理化性质见表 1.

### 1.2 实验设计

培养实验共设置了林地、草地和耕地土壤这 3 组实验, 每组设置 0% (不添加生物炭, 记为 CK)、1% (低含量生物炭添加, 记为 BC<sub>1</sub>) 和 5% (高含量生物炭添加 BC<sub>5</sub>) 这 3 种处理方式, 各 3 个重复. 实验前将土样称取入烧杯并放入恒温培养箱, 在 25℃ 下进行为期 7 d 的预培养, 预培养时使用称重法将土壤湿度维持在常规田间持水量(60%). 将 200 g 预培养后的土样与生物炭混合均匀后放入烧杯, 进行 90 d 的氮矿化培养, 在培养过程中保持含水量稳定(田间持水量 80%). 在培养的第 1、3、7、14、28、42、63 和 84 d 从烧杯中取样测定氨氮、硝氮和有效氮含量, 同时计算有机氮的矿化率 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ].

表 1 供试土壤和生物炭的基本理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Major physicochemical properties of studied soil and biochar

参数	土地利用类型			生物炭
	林地土壤	草地土壤	耕地土壤	
$\omega(\text{TOC})/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	32.87 ± 4.12a	27.10 ± 3.52b	18.80 ± 2.80b	392
$\omega(\text{TN})/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.75 ± 0.17b	1.63 ± 0.13b	2.16 ± 0.27a	2.58
$\omega(\text{TP})/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.75 ± 0.18a	0.32 ± 0.10b	1.04 ± 0.16a	1.21
pH	5.87 ± 0.25a	6.15 ± 0.24a	5.18 ± 0.25b	10.4
$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	11.24 ± 0.26b	12.22 ± 0.41a	10.82 ± 0.37b	—
$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	2.78 ± 0.31b	3.34 ± 0.26a	2.61 ± 0.11b	—
$\omega(\text{CaO})/\%$	0.19 ± 0.01ab	0.16 ± 0.03b	0.25 ± 0.08a	—
$\omega(\text{MgO})/\%$	1.66 ± 0.11a	1.92 ± 0.07a	1.88 ± 0.08a	—
$\omega(\text{砂粒})/\%$	29.0 ± 1.48a	26.8 ± 3.82a	16.1 ± 2.57b	—
$\omega(\text{粉粒})/\%$	48.8 ± 3.53a	53.0 ± 1.45a	47.2 ± 2.57a	—
$\omega(\text{黏粒})/\%$	22.2 ± 3.68b	20.2 ± 3.98b	36.7 ± 4.62a	—

1) 同一行不同小写字母表示不同土地利用类型土壤之间差异达到显著性水平( $P < 0.05$ )

土柱淋滤实验采用 PVC 管, 高 40 cm, 外径 5.8 cm, 内径 5 cm, 管的内壁涂抹凡士林以减少土柱边缘效应, 顶部设置加水口, 底部设置石英砂层和无磷滤布过滤出水. 控制土壤密度 1.4 g·cm<sup>-3</sup>, 填充土壤 30 cm 高, 生物炭添加条件同前(3 个处理). 预培养时加水使土柱水分均匀并保持湿润, 之后于第 1、7、14、28、42 和 84 d 加蒸馏水 200 mL 并从土柱底部收集淋滤液, 测定淋滤液中的硝氮和氨氮浓度.

### 1.3 样品测定和数据分 析

土壤有机质的测定采用重铬酸钾氧化法, 全磷采用钼锑抗比色法, 全氮和硝氮采用紫外分光光度法测定, 氨氮采用靛酚蓝比色法测定, 微生物生物量氮采用氯仿熏蒸法测定<sup>[15,16]</sup>. 土壤粒径采用

LS13320 全自动激光粒度分析仪(美国贝克曼库尔特有限公司)测定, 常量元素采用 PW2424 型 X 射线荧光仪(荷兰帕纳科公司)测定. 淋滤液硝氮采用紫外分光光度法测定, 氨氮采用纳氏比色法测定<sup>[16]</sup>.

土壤氮矿化一阶指数模型公式:

$$N_t = N_0 [1 - \exp(-k \cdot t)]$$

式中,  $t$  为矿化培养时间(d),  $N_t$  为累积氮矿化量, 表示  $t$  时间内的有机氮矿化量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $N_0$  为有机氮矿化势, 是一定条件下土壤中能够矿化成无机氮的有机氮的最大值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $k$  为相对矿化速率常数( $\text{d}^{-1}$ ).

生物炭对土壤氮矿化后的环境效应应用相对淋失

系数(RLC)表示:

$$RLC = (LN'_i/SN'_i)/(LN_i/SN_i)$$

式中,RLC为相对淋失系数, $LN'_i$ 为添加组淋滤液无机氮( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $SN'_i$ 为添加组土壤无机氮( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), $LN_i$ 为对照组淋滤液无机氮( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); $SN_i$ 为对照组土壤无机氮( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

采用Excel进行基本数据统计,使用Origin 9.1进行数据分析和绘图,使用SPSS进行单因素方差分析,使用R包“corrplot”绘制相关性热图.

## 2 结果与分析

### 2.1 滨岸带土壤氮矿化动力学

土壤有机氮净矿化量是指有机氮的减少量,不

同时段的累积矿化量如图1所示.在培养前期累积氮矿化量增长较快,随着培养时间增加,3种利用类型土壤的累积氮矿化量的增长逐渐放缓,矿化速率降低.林地土壤 $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组比CK组累积矿化量分别减少了31.77%和36.97%,生物炭的抑制作用在培养中后期更加明显.草地土壤 $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组比CK组累积矿化量分别减少了31.59%和40.94%,但矿化量从前期就开始显著低于CK组,后期矿化速率差别较小.耕地 $BC_1$ 组比CK组增加了9.96%, $BC_5$ 组则减少了29.52%.生物炭加入显著改变了土壤的氮矿化势和供氮潜能,3种类型土壤之间的氮矿化动力学模型参数之间存在显著差异(表2).

表2 滨岸带土壤的氮矿化动力学模型参数<sup>1)</sup>

Table 2 Kinetic model parameters of nitrogen mineralization in riparian soil

类型	处理组	$N_0/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$k/\text{d}^{-1}$	$N_i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
林地	CK	54.18 ± 8.81Aa	0.011 ± 0.004Ab	68.42 ± 1.16Aa
	$BC_1$	35.07 ± 11.07Ba	0.013 ± 0.005Ab	49.87 ± 1.94Ba
	$BC_5$	29.03 ± 6.72Ba	0.014 ± 0.004Ab	44.42 ± 1.04Ca
草地	CK	21.95 ± 2.43Ab	0.034 ± 0.007Aa	40.98 ± 1.63Ac
	$BC_1$	15.20 ± 1.85Bb	0.033 ± 0.007Aa	32.65 ± 0.88Bb
	$BC_5$	13.42 ± 0.88Bb	0.027 ± 0.003Aa	29.11 ± 0.70Cb
耕地	CK	23.83 ± 2.526Ab	0.038 ± 0.007Aa	53.14 ± 1.86Ab
	$BC_1$	25.48 ± 1.73Aab	0.037 ± 0.0003Aa	52.10 ± 2.09Aa
	$BC_5$	17.26 ± 3.52Bb	0.031 ± 0.01Aa	40.41 ± 3.70Ba

1)同一列不同小写字母表示不同土地利用类型土壤之间达到显著性差异( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示不同处理组之间达到显著性差异( $P < 0.05$ )

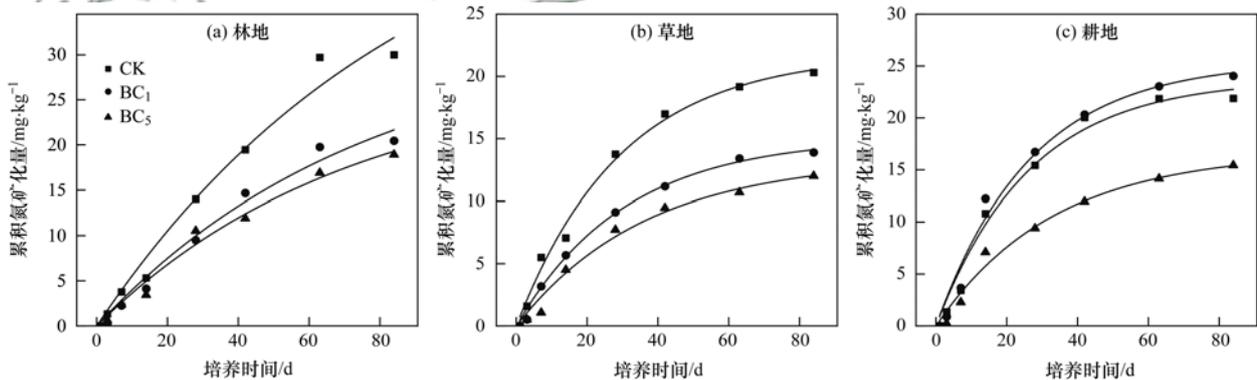


图1 滨岸带不同土地利用类型土壤累积氮矿化量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes in accumulated nitrogen mineralization amount of riparian soils with different land use types

### 2.2 生物炭添加对土壤碳氮比、微生物生物量氮含量的影响

生物炭施加后土壤碳氮比和微生物生物量氮的含量分别如图2和图3所示.林地和草地 $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组的土壤碳氮比相对于CK组均显著增加,且 $BC_5$ 组大于 $BC_1$ 组.耕地的 $BC_1$ 组相对于CK组没有显著变化,在高浓度生物炭添加下才表现出明显增加.与CK组相比,生物炭显著提高了3种土地利用类型的土壤微生物生物量氮含量,在草地最为明显.

土壤碳氮比和微生物生物量氮与累积矿化量( $N_i$ )和氮矿化综合指数( $N_0 \times k$ )之间的相关性分析如图4所示.土壤碳氮比与土壤累积矿化量呈显著负相关( $r = -0.40, P < 0.05$ ),与矿化综合指数呈极显著负相关( $r = -0.32, P < 0.01$ ).土壤微生物生物量氮与土壤累积矿化量( $r = -0.51, P < 0.01$ )和矿化综合指数( $r = -0.78, P < 0.01$ )之间均呈极显著负相关.土壤碳氮比和微生物生物量氮是生物炭决定土壤氮矿化作用的重要物质.

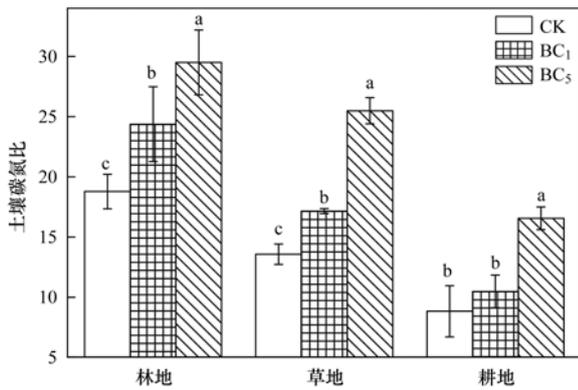


图2 不同土地利用类型土壤的碳氮比

Fig. 2 Soil C/N ratio of different land use types

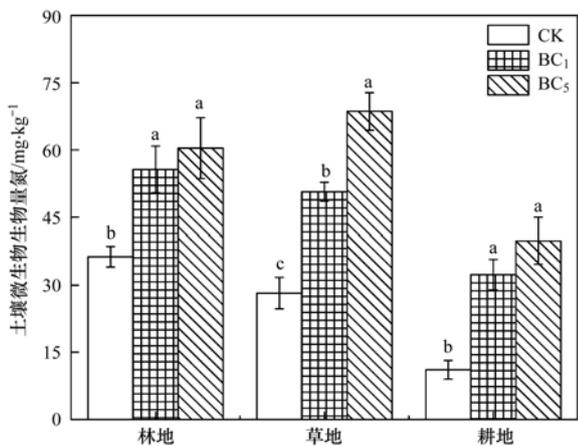
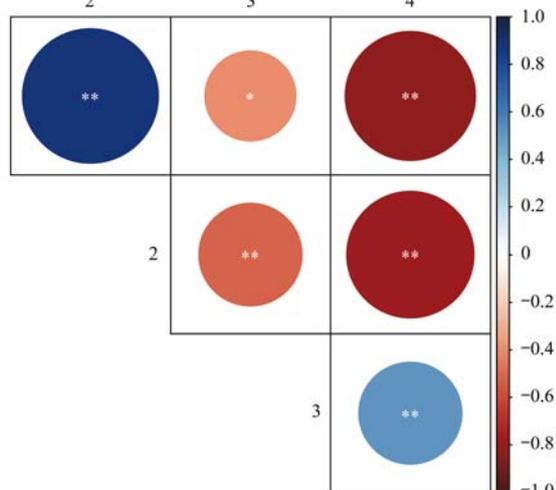


图3 不同土地利用类型土壤的微生物生物量氮

Fig. 3 Soil MBN of different land use types



1. C/N, 2. MBN, 3.  $N_t$ , 4.  $N_0 \times k$ ; 蓝色表示两个变量呈正相关, 红色表示变量呈负相关, 色彩越深表示变量相关性越大, \* 表示不同因子间的相关性显著水平,  $P < 0.05$ , \*\* 表示不同因子间的相关性极显著水平,  $P < 0.01$

图4 土壤碳氮比和微生物生物量氮与矿化模型参数的相关性  
Fig. 4 Correlation between soil C/N ratio and MBN and parameters of mineralization model

### 2.3 土壤矿质氮含量拟合方程

矿质氮作为氮素的重要组成部分, 与植物的生

长和水质非点源污染息息相关, 为了进一步探究生物炭对矿化过程中土壤矿质氮含量(氨氮与硝氮之和)的影响, 以培养时间和全氮含量为自变量对土壤矿质氮含量的变化进行方程拟合, 结果见表3. 拟合方程的  $R^2$  值在 0.77 ~ 0.95, 拟合效果较好. 由此可见, 生物炭添加减小了拟合方程中矿质氮随时间变化的系数, 林地  $BC_1$  组的降幅较  $BC_5$  组更大, 草地和耕地则是  $BC_5$  组的系数更小. 不同土地利用类型土壤矿质氮含量随全氮含量变化的系数在生物炭添加下也均显著减小, 林地和草地在 5% 添加下甚至出现了负值. 说明不同土地利用类型土壤矿质氮含量对生物炭输入响应差异与矿化过程和土壤全氮含量有关.

表3 土壤氮矿化过程中矿质氮含量的拟合方程参数<sup>1)</sup>

Table 3 Fitting equation parameters of mineral nitrogen content in soil nitrogen mineralization process

类型	处理组	土壤矿质氮含量拟合方程	$R^2$
林地	CK	$y = 7.47 \ln t + 6.56 \text{ TN} + 21.41$	0.77
	$BC_1$	$y = 4.57 \ln t + 2.81 \text{ TN} + 19.64$	0.78
	$BC_5$	$y = 4.92 \ln t - 3.36 \text{ TN} + 28.19$	0.83
草地	CK	$y = 5.13 \ln t + 3.26 \text{ TN} + 12.44$	0.93
	$BC_1$	$y = 3.56 \ln t + 1.77 \text{ TN} + 13.58$	0.90
	$BC_5$	$y = 2.97 \ln t - 0.19 \text{ TN} + 15.23$	0.85
耕地	CK	$y = 6.87 \ln t + 2.46 \text{ TN} + 22.43$	0.90
	$BC_1$	$y = 6.42 \ln t + 1.59 \text{ TN} + 20.69$	0.93
	$BC_5$	$y = 4.23 \ln t + 2.23 \text{ TN} + 17.29$	0.95

1)  $y$  表示土壤矿质氮含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $t$  表示时间 (d), TN 的单位为  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

### 2.4 土壤淋滤液中硝氮、氨氮含量的变化

如图5所示, 淋溶液中的氨氮和硝氮浓度在不同利用类型土壤的变化趋势有所不同. 林地氨氮的淋出浓度随时间下降缓慢, 和CK组相比,  $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组分别削减了32.58%和39.79%. 草地土壤的 $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组对氨氮的削减率分别为26.06%和32.21%. 耕地的氨氮淋出浓度在后期 $BC_1$ 组逐渐超过了 $BC_5$ 组, 最终分别削减了23.28%和32.55%.

硝氮浓度的下降曲线比氨氮略陡峭. 生物炭添加后土壤硝氮的淋出浓度均呈现先快速下降后趋于平缓的趋势, 其中林地和草地生物炭添加组在初期显著低于CK组. 与CK组相比, 林地 $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组的削减率分别为24.39%和43.43%. 草地为27.16%和44.49%. 耕地淋滤液的硝氮浓度趋于稳定的时间节点与林地相比稍晚,  $BC_1$ 组和 $BC_5$ 组分别削减了17.20%和28.96%.

### 2.5 土壤无机氮的相对淋失系数

本文用土壤无机氮的相对淋失系数来反映生物炭添加对氮矿化和氮淋失的综合效应, 相对淋失系数(RLC)低于1时为削减效应, 大于1为释放效应.

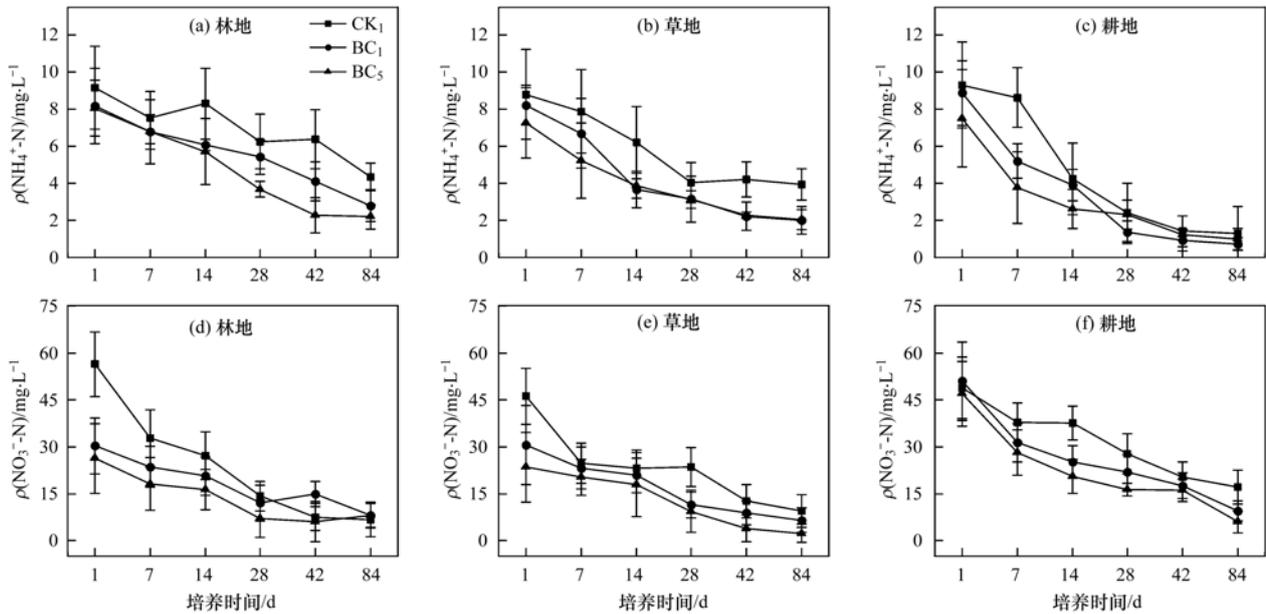


图5 土壤淋滤液中氨氮和硝氮浓度的变化

Fig. 5 Changes in  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in soil leaching solution

从图6可见,林地  $\text{BC}_1$  组和  $\text{BC}_5$  组的数值分别在第14 d 和第28 d 后迅速上升至高于1,  $\text{BC}_1$  组上升到峰值后逐渐下降. 草地只在第14 d 左右表现为释放效应,随后一直稳定于0.5~1. 耕地则在最初表现

为释放效应,之后呈“S”形波动,  $\text{BC}_5$  处理组在中期高于  $\text{BC}_1$ . 生物炭施用于草地和耕地的综合效应更好,对于林地和草地而言1%生物炭添加时的效果优于5%,耕地则相反.

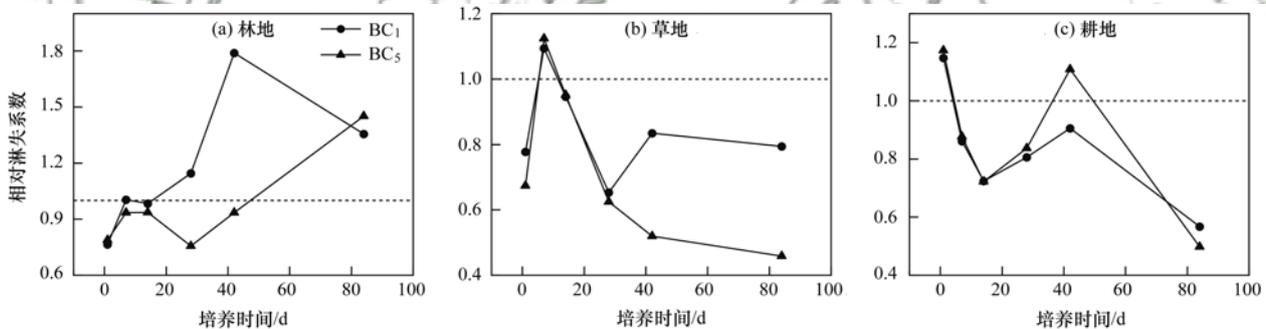


图6 不同土地利用类型土壤无机氮相对淋失系数的变化

Fig. 6 Changes in relative leaching coefficients of soil inorganic nitrogen with different land use types

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭添加对不同利用土壤氮矿化的影响

由于不同类型土壤自身的养分构成和微生物群落结构不尽相同,添加生物炭引起土壤微生物和土壤结构的变化,导致土壤氮矿化的效率存在差异. 总体而言,添加生物炭对林地和草地土壤氮矿化的影响表现为抑制作用,且对草地土壤的影响较林地土壤更明显,生物炭对耕地土壤氮矿化的影响则表现为低浓度促进和高浓度抑制.

有研究表明,氮的矿化动力学依赖于土壤碳氮比<sup>[17]</sup>. 从图2和图4分别可以看到两种浓度生物炭添加均显著增加了林地和草地土壤的碳氮比,并且土壤碳氮比与氮矿化参数之间存在显著负相关,这

说明土壤碳氮比可能是生物炭控制土壤氮矿化的关键因素. 林地和草地由于凋落物归还、根系周转和根系分泌物等因素导致有机质含量较高,加之处于水陆过渡带养分更易积累,滨岸带林地和草地土壤的初始碳氮比较周边地区更高<sup>[18]</sup>,生物炭输入后短期内更容易刺激其对氮的固定,对土壤氮矿化产生明显的抑制作用<sup>[19]</sup>. 低浓度生物炭添加对耕地碳氮比的影响不显著,在低碳土壤中易被生物炭吸附的溶解性营养元素含量较少,因此生物炭输入能有效提高有机质和微生物降解基质有效性较低的土壤的微生物活性<sup>[20]</sup>,同时耕地致密的土壤结构受生物炭改良形成了利于微生物生长繁殖的环境条件,活化了土壤固定的养分,所以在低浓度添加时生物炭对耕地土壤氮矿化呈现促进作用<sup>[21]</sup>.

有研究表明,土壤微生物生物量氮的矿化占总矿化量近半,反映了微生物和土壤之间氮素循环与转化的联系<sup>[22]</sup>.从图3可见,林地和草地土壤微生物生物量氮明显高于耕地,可能是因为耕地在化肥的长期施用下土壤氮素逐渐转化为有机氮,因此土壤微生物生物量氮含量相对较低.生物炭添加显著增大了土壤微生物生物量氮,一方面源于土壤碳氮比的提高,另一方面则是因为生物炭增加了土壤微生物活性和功能多样性,提高了土壤微生物生物量<sup>[23]</sup>.因此生物炭输入增加了微生物对氮的需求,促使微生物固持氮素,减少了土壤无机氮的生成.土壤微生物生物量氮与土壤氮矿化势和土壤氮矿化综合指数呈负相关(图4),这也说明生物炭通过促进微生物循环促进了氮的保持.耕地土壤的微生物生物量氮在低浓度添加下表现出显著增加,矿化表现为促进,说明生物炭主要促进了耕地土壤其他形式有机氮的矿化.

此外,土壤矿物含量也同氮矿化有关,这是因为铁铝氧化物对土壤团聚体的形成和稳定性有重要影响<sup>[24]</sup>.在3种土地利用类型中草地的金属氧化物含量最高(表1),对有机碳生成了更强的保护作用,在生物炭添加下形成复杂的有机无机复合体,阻碍了微生物对养分的吸收利用,因而对氮矿化的抑制作用最为明显<sup>[25,26]</sup>.而且湿润或处于淹水的滨岸带土壤的氧化铁易作为电子受体参与铁氮化学耦合过程,促进了有机氮生成<sup>[27]</sup>.

综合分析土壤矿质氮含量拟合曲线的参数变化结果,可以推测出生物炭对矿质氮含量变化的影响:一部分来源于生物炭对矿质氮的吸附作用,另一部分在于生物炭影响了氮形态的变化.前者降低了矿质氮随时间变化的幅度,通常受土壤粒度和pH影响,后者影响了全氮和矿质氮之间的关联性.可能受土壤酶活性影响,生物炭吸附了土壤中对酶活有重要作用的基质从而抑制了土壤酶活性<sup>[28]</sup>,影响了有机氮向矿质氮的转化.总之,土壤矿质氮在变化过程中受生物炭的显著影响,同时土壤性质也影响了矿质氮含量.

### 3.2 生物炭添加对不同利用土壤氮素淋失的影响

生物炭在矿化过程中固持的氮素随降雨径流的淋失关系到滨岸带对土壤氮素的拦截功能,本文通过淋溶实验探究生物炭对土壤氮素迁移的影响.从淋溶实验的结果可以看出,生物炭添加能显著降低3种土地利用类型土壤氨氮和硝氮的淋出浓度,前人的研究也表明生物炭对氮素有显著的削减效果<sup>[29]</sup>.林地BC<sub>1</sub>组和BC<sub>5</sub>组的氨氮淋出浓度随时间变化较CK组稳定,是因为生物炭对氨氮的吸附作

用与土壤的粒径有关<sup>[30]</sup>,由于林地土壤的黏粒含量低,土壤容重和阳离子交换量相对低,因此在生物炭输入后能明显增强林地土壤对氨氮的保持能力.林地对硝氮的削减主要表现的淋滤初期,到后期时BC<sub>1</sub>组逐渐大于CK组,说明生物炭添加延长了林地土壤硝氮的滞留时间<sup>[31]</sup>.草地硝氮淋出浓度受到生物炭两次削减的影响:一次在加入初期,主要是因为生物炭表面通过静电相互作用和离子交换对硝氮的吸附<sup>[32]</sup>,另一次在第28d左右生物炭输入抑制了峰值的出现,这可能是因为草地相对缺氮,在这种环境条件下生物炭更能加强微生物对氨氮的固定同化,减少参与硝化作用的氨氮含量,从而抑制土壤硝化作用<sup>[33]</sup>.耕地CK组的氨氮淋失浓度从第14d开始迅速下降,此时硝氮的淋失浓度开始显著大于生物炭添加组,说明耕地的有机氮在转化成为氨氮后很快就被转化成了硝氮,耕地的硝化作用较强.这是因为长期氮肥添加使农田土壤氨氧化古菌的物种多样性大于林地,通常农田较林地有更大的硝化势<sup>[34]</sup>.

相对淋失系数的变化在不同土地利用类型土壤中存在差异,这种差异是氮矿化和氮淋失的共同结果.林地数值的大幅提升说明生物炭对林地无机氮的固持具有波动性和暂时性.草地BC<sub>5</sub>处理组在后期没有上升可能是因为草地受人为干扰较小,自身团聚体稳定性较强,高浓度生物炭输入促进微生物分泌土壤胶结物形成了更多团聚体,能较为持久地减少氮素淋失<sup>[35]</sup>.耕地两组实验数值后期的下降则可能是因为耕地土壤原始pH较低,刘杰云等<sup>[36]</sup>的研究发现当土壤pH低于反硝化菌最适pH时,生物炭会通过增大土壤pH显著改变反硝化功能基因的组成,促进氮素转化成了气体而减少了淋失.BC<sub>1</sub>和BC<sub>5</sub>处理组之间的差距则与土壤无机氮的累积有关.各利用类型土壤的生物炭适宜施用率不同,耕地应以低浓度施用,林地和草地则可以略微提高施用量.Bu等<sup>[37]</sup>的研究还表明5%的生物炭施用虽然减少了太湖滨岸带土壤的氮素淋失,但增加了磷素的淋失风险,生物炭在滨岸带的科学施用仍然有待进一步探究.

## 4 结论

生物炭添加明显抑制了林地和草地土壤的氮矿化,但对耕地土壤则表现为低浓度促进而高浓度抑制,这与生物炭加入改变了土壤碳氮比和微生物生物量氮有关,与土壤物质组成也有一定关系.土壤矿质氮变化的模拟结果显示,土壤矿质氮的释放速率随生物炭添加而减小,不同利用类型的土壤之间存

在差异.同时,生物炭输入改变了土壤无机氮向水体释放的潜力,明显削减了草地和耕地土壤中氮的释放,在林地的削减效果稍弱.考虑到滨岸带的淋失风险和养分可利用性,需着重控制耕地的生物炭施用量.

#### 参考文献:

- [1] Xu W H, Whitman W B, Gundale M J, *et al.* Functional response of the soil microbial community to biochar applications [J]. *GCB Bioenergy*, 2021, **13**(1): 269-281.
- [2] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展[J]. *生态科学*, 2018, **37**(1): 192-199.  
Tang X C, Chen J L. Review of effect of biochar on soil physicochemical and microbial properties [J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(1): 192-199.
- [3] 俞映惊, 杨林章, Odindo A O, *et al.* 碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3851-3859.  
Yu Y L, Yang L Z, Odindo A O, *et al.* Influence of calcium carbonate and biochar addition on soil nitrogen retention in acidified vegetable soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3851-3859.
- [4] Li Y, Zhou C F, Qiu Y X, *et al.* Effects of biochar and litter on carbon and nitrogen mineralization and soil microbial community structure in a China fir plantation [J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, **30**(5): 1913-1923.
- [5] 李志刚, 张继光, 申国明, *et al.* 烟秆生物质炭对土壤碳氮矿化的影响[J]. *中国烟草科学*, 2016, **37**(2): 16-22.  
Li Z G, Zhang J G, Shen G M, *et al.* Study on the effects of tobacco stem biochar on soil organic carbon and nitrogen mineralization [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2016, **37**(2): 16-22.
- [6] Manirakiza E, Ziadi N, Luce M S, *et al.* Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to co-application of biochar and paper mill biosolids [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **142**: 90-98.
- [7] Xu N, Tan G C, Wang H Y, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, **74**: 1-8.
- [8] 张林, 林庆毅, 张梦阳, *et al.* 生物炭对不同土壤改良及生态效应影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2019, **35**(15): 54-58.  
Zhang L, Lin Q Y, Zhang M Y, *et al.* A review on biochar: effect on soil improvement and ecology [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(15): 54-58.
- [9] Zhu J R, Yu H M, Xiong M H, *et al.* Mineralization of organic nitrogen in soils with contrasting fertility was regulated differently by addition of biochar and animal manures [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, **51**(9): 1227-1237.
- [10] Borchard N, Schirrmann M, Cayuela M L, *et al.* Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N<sub>2</sub>O emissions: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2354-2364.
- [11] Li S L, Wang S, Shanguan Z P. Combined biochar and nitrogen fertilization at appropriate rates could balance the leaching and availability of soil inorganic nitrogen [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, **276**: 21-30.
- [12] Gao J Q, Feng J, Zhang X W, *et al.* Drying-rewetting cycles alter carbon and nitrogen mineralization in litter-amended alpine wetland soil [J]. *Catena*, 2016, **145**: 285-290.
- [13] 王静, 王冬梅, 任远, *et al.* 漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(8): 2687-2695.  
Wang J, Wang D M, Ren Y, *et al.* Coupling relationships between soil microbes and soil nutrients under different hydrologic conditions in the riparian zone of the Lijiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2687-2695.
- [14] 王超, 尹炜, 贾海燕, *et al.* 滨岸带对河流生态系统的影响机制研究进展[J]. *生态科学*, 2018, **37**(3): 222-232.  
Wang C, Yin W, Jia H Y, *et al.* Review on the influence mechanism of riparian zone to the river ecosystem [J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(3): 222-232.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] García-Ruiz R, Carranza-Gallego G, Aguilera E, *et al.* C and N mineralisation of straw of traditional and modern wheat varieties in soils of contrasting fertility [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, **113**(2): 167-179.
- [18] 王莲阁, 高岩红, 丁长欢, *et al.* 三峡库区典型消落带土壤有机碳分布特征[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, **37**(3): 120-124.  
Wang L G, Gao Y H, Ding C H, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon in a typical water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, **37**(3): 120-124.
- [19] 常晶晶. 生物炭、天然生物质和有机氮肥对黄河三角洲滨海湿地土壤有机氮矿化的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [20] 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.
- [21] Fungo B, Lehmann J, Kalbitz K, *et al.* Aggregate size distribution in a biochar-amended tropical Ultisol under conventional hand-hoe tillage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **165**: 190-197.
- [22] 钱佳彤, 郭涛. 长期定位施肥对紫色土氮矿化特征的影响[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(5): 1152-1159.  
Qian J T, Guo T. Effects of long-term fertilization on nitrogen mineralization of purple soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(5): 1152-1159.
- [23] Gałazka A, Jończyk K, Gawryjolek K, *et al.* The impact of biochar doses on soil quality and microbial functional diversity [J]. *Bioresources*, 2019, **14**(4): 7852-7868.
- [24] 陈红, 马文明, 周青平, *et al.* 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其铁铝氧化物分异的研究[J]. *草业学报*, 2020, **29**(9): 73-84.  
Chen H, Ma W M, Zhou Q P, *et al.* Shrub encroachment effects on the stability of soil aggregates and the differentiation of Fe and Al oxides in Qinghai-Tibet alpine grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, **29**(9): 73-84.
- [25] 张乾, 李金升, 赵天赐, *et al.* 生物炭对土壤的影响及在草地生态系统中应用的研究进展[J]. *草地学报*, 2019, **27**(2): 279-284.  
Zhang Q, Li J S, Zhao T C, *et al.* Research progress on the effect of biochar on soil and its application in grassland ecosystem [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, **27**(2): 279-284.
- [26] 陈颖, 刘玉学, 陈重军, *et al.* 生物炭对土壤有机碳矿化的激

- 发效应及其机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(1): 314-320.
- Chen Y, Liu Y X, Chen C J, *et al.* Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(1): 314-320.
- [27] 王娅静, 刘晶, 郭景恒. 铁作用下土壤氮素化学转化过程的研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2014, **19**(2): 95-99.
- Wang Y J, Liu J, Guo J H. Chemical transformation of soil nitrogen under the influence of iron: a review [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, **19**(2): 95-99.
- [28] 蒋容, 余一, 唐玉蓉, 等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, **36**(1): 72-77, 85.
- Jiang R, Yu Y, Tang Y R, *et al.* Effects of warming and biochar addition on soil enzyme activities in farmland [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, **36**(1): 72-77, 85.
- [29] 刘国子, 杨凤根, 许斌. 生物炭对土壤氮素淋失影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2020, **18**(4): 139-149.
- Liu G Z, Yang F G, Xu B. Advances in research on effects of biochar on soil nitrogen leaching[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, **18**(4): 139-149.
- [30] Sun L Y, Li L, Chen Z Z, *et al.* Combined effects of nitrogen deposition and biochar application on emissions of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> from agricultural and forest soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2014, **60**(2): 254-265.
- [31] 王静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2810-2820.
- Wang J, Fu W Z, Ge X H, *et al.* Effects of corn biochar and modified carbon on leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(12): 2810-2820.
- [32] Jassal R S, Johnson M S, Molodovskaya M, *et al.* Nitrogen enrichment potential of biochar in relation to pyrolysis temperature and feedstock quality [J]. Journal of Environmental Management, 2015, **152**: 140-144.
- [33] 冯政君. 不同环境条件下生物炭对土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响及机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [34] 刘天琳. 不同 pH 及土地利用方式对土壤硝化作用及硝化微生物的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [35] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(11): 1978-1986.
- Gao M H, Li N, Peng J, *et al.* Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, **26**(11): 1978-1986.
- [36] 刘杰云, 邱虎森, 王聪, 等. 生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2394-2403.
- Liu J Y, Qiu H S, Wang C, *et al.* Influence of biochar amendment on soil denitrifying microorganisms in double rice cropping system[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2394-2403.
- [37] Bu X L, Xue J H, Zhao C X, *et al.* Nutrient leaching and retention in riparian soils as influenced by rice husk biochar addition[J]. Soil Science, 2017, **182**(7): 241-247.

## CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	( 577 )
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	( 586 )
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	( 597 )
PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	( 608 )
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	( 619 )
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	( 629 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	( 639 )
Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	( 649 )
Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	( 663 )
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	( 675 )
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	( 686 )
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	( 696 )
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	( 707 )
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	( 714 )
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	( 723 )
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	( 735 )
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	( 743 )
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	( 752 )
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	( 762 )
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	( 770 )
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	( 782 )
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	( 795 )
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	( 803 )
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	( 813 )
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	( 826 )
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	( 837 )
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	( 847 )
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	( 859 )
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	( 867 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	( 878 )
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	( 887 )
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	( 896 )
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	( 907 )
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PN/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	( 920 )
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	( 928 )
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	( 936 )
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	( 946 )
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	( 957 )
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	( 965 )
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	( 975 )
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	( 985 )
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	( 995 )
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	( 1004 )
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	( 1015 )
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	( 1023 )
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	( 1031 )
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	( 1040 )
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	( 1050 )
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	( 1059 )
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	( 1069 )
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	( 1077 )
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	( 1089 )
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	( 1097 )
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	( 1108 )