

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017年) 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM_{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 罗珊, 胡锦涛, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响

曹杨^{1,2}, 沈育伊^{3*}, 陈运霜^{1,2}, 王紫卉⁴, 牟芝熠^{1,2}, 徐广平^{2*}, 张德楠², 孙英杰², 毛馨月^{1,2}

(1. 广西师范大学生命科学学院, 广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室, 桂林 541006; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 桂林 541006; 3. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室, 桂林 541006; 4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006)

摘要: 研究施用不同量生物炭 5 a 后桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮特征, 探讨土壤有机氮组分和活性氮之间的关系, 明确生物炭不同施用量下土壤的供氮潜力, 为桉树林业废弃物生物炭的实践应用提供科学依据. 利用开始于 2017 年的桉树人工林生物炭中长期定位试验, 选取 CK(0%)、T1(0.5%)、T2(1.0%)、T3(2%)、T4(4%)和 T5(6%)这 6 个处理, 一次性施用生物炭 5 a 后测定不同处理下有机氮组分、微生物量氮和溶解性有机氮含量. 结果表明: ①与对照相比, 随着生物炭施用量的增加, 不同土层全氮、酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮、微生物量氮、溶解性有机氮和氮储量含量均呈递增趋势, 增幅分别为 45.48%~156.32%、44.31%~171.31%、38.06%~223.37%、39.42%~163.32%、36.72%~109%、23.27%~113.51%和 29.45%~62.37%, 在 T5 处理最大; 未知态氮和非酸解态氮含量总体亦呈增加的趋势, 增幅分别为 88.41%~158.71%和 50.24%~139.01%; 酸解氨基糖态氮含量趋于降低, 降幅为 7.72%~32.73%. 不同处理下有机氮各形态的分布趋势大小为: 酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 非酸解态氮 > 酸解未知态氮 > 酸解氨基糖态氮, 生物炭施用处理增加了酸解总氮含量及其占全氮的比例. ②除了酸解未知态氮之外, 土壤有机氮其它组分和活性氮含量均随着土层的加深而递减. ③土壤全氮、微生物量氮和溶解性有机氮均与酸解总氮、非酸解态氮和氮储量之间存在显著的正相关关系. 主成分分析表明: 容重与酸解氨基糖态氮; 全氮与酸解未知态氮; 酸解氨基酸态氮与酸解总氮间的关系均较为密切. 综上, 林业废弃物生物炭施用 5 a 后, 显著增加了桉树林土壤有机氮组分和活性氮含量, 有利于提高土壤氮素的供应能力; 酸解总氮、酸解铵态氮和酸解氨基酸态氮对土壤活性氮有重要贡献.

关键词: 生物炭; 有机氮组分; 酸解性氮(AHN); 活性氮; 桉树人工林

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6235-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202211155

Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in *Eucalyptus* Plantations After Five Years in Northern Guangxi

CAO Yang^{1,2}, SHEN Yu-yi^{3*}, CHEN Yun-shuang^{1,2}, WANG Zi-hui⁴, MOU Zhi-yi^{1,2}, XU Guang-ping^{2*}, ZHANG De-nan², SUN Ying-jie², MAO Xin-yue^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals and Sustainable Utilization, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: The objective of this study was to research the characteristics of fractions of organic nitrogen and active nitrogen and their relationship under different biochar applications and to provide a basis for the preparation and practical application of biochar from *Eucalyptus* forest wastes. In a long-term positioning test of biochar application from 2017, six different treatments were selected: 0(CK), 0.5%(T1), 1%(T2), 2%(T3), 4%(T4), and 6%(T5). The contents of soil organic nitrogen components, total nitrogen(TN), dissolved organic nitrogen(DON), and microbial biomass nitrogen(MBN) following the different treatments were measured. The results showed that: ① compared with that of the control, with the increase in biochar application, the contents of soil TN, acidolysis of total organic nitrogen(AHON), ammonia nitrogen(AN), amino acid nitrogen(AAN), MBN, DON, and nitrogen storage(NS) increased significantly by 45.48%-156.32%, 44.31%-171.31%, 38.06%-223.37%, 39.42%-163.32%, 36.72%-109%, 23.27%-113.51%, and 29.45%-62.37%, respectively. The contents of soil hydrolyzable unknown nitrogen(HUN) and non-hydrolyzable nitrogen(NHN) also increased significantly by 88.41%-158.71% and 50.24%-139.01%, respectively. The contents of soil amino sugar nitrogen(ASN) decreased by 7.72%-32.73%. The contents of different forms of organic nitrogen fractions in all treatments displayed an order of AN > AAN > NHN > HUN > ASN. Compared with

收稿日期: 2022-11-14; 修订日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42267007, 31760162); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297048, 2018GXNSFAA050069); 广西重点研发计划项目(AB21220057); 广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室研究基金项目(LRCSU21K0203); 广西科学院基本科研业务费(CQZ-E-1912); 广西植物研究所基本业务费(桂植业 202203); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金项目(22-035-26)

作者简介: 曹杨(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为森林生态学与环境修复, E-mail: 2339575029@qq.com

* 通信作者, E-mail: 417850389@qq.com; xugpx@163.com

the no biochar treatment, each biochar treatment increased the contents and proportion of AHON in the TN. ② With the exception of HUN, the contents of other soil organic nitrogen components and active nitrogen content decreased with the increase in soil depth. ③ There were significantly positive correlations between TN, MBN, and DON and AHON, NHN, and NS contents. The principal component analysis showed that bulk density and ASN and TN and HUN, AAN, DON, and AHON were closely related, respectively. In conclusion, the application of forestry waste biochar for five years could significantly increase the content of soil organic nitrogen component and active nitrogen, thereby improving the capacity of the soil to supply nitrogen. AHON, AN, and AAN were the main factors contributing to soil active nitrogen content.

Key words: biochar; organic nitrogen component; acid hydrolyzable nitrogen (AHN); active nitrogen; *Eucalyptus* plantations

土壤氮素是影响植物生长和生态系统生产力的主要影响因子^[1]. 土壤氮包括无机态氮和有机态氮,土壤有机态氮占土壤全氮(TN)含量的90%以上,是土壤氮的主要存在形式^[2]. 土壤有机氮的化学形态及其存在特征与土壤氮素肥力紧密相关,会影响土壤氮素的供应能力^[3]. 目前有关有机氮组分的研究方法,较多的是采用 Bremner 提出的酸水解分级方法,可作为表征土壤氮素指标之一,该方法将土壤有机氮分为酸解性氮(acid hydrolyzable nitrogen, AHN)和非酸解性氮(non-acid hydrolyzable nitrogen, NHN),其中酸解性氮由酸解铵态氮(ammonia nitrogen, AN)、酸解氨基酸态氮(amino acid nitrogen, ANN)、酸解氨基糖态氮(amino sugar nitrogen, ASN)和酸解未知态氮(identified hydrolyzable nitrogen, HUN)组成^[4]. 不同形态土壤有机氮组分在土壤氮素循环过程中的作用并不相同^[5],深入研究土壤有机氮组分的变化特征,对认识土壤肥力演变和合理施肥十分重要.

活性氮主要包括土壤微生物生物量氮(microbial biomass N, MBN)和溶解性有机氮(dissolved organic N, DON),是土壤氮素中最活跃的组分^[6],尽管占土壤氮储量的一小部分,但在陆地生态系统氮循环中发挥着关键作用^[7],其大小反映土壤对有机氮的同化和矿化能力. MBN 是土壤活性氮的主要“源”和“库”^[3],DON 代表了不稳定的有机氮组分,是深层土壤中氮固定的潜在来源,周转周期快,能更快地响应土壤的管理情况^[8]. 农业耕作和肥料的大量施用改变了土壤的养分条件、通气性、微生物群落结构与活性等,对土壤有机氮组分和 MBN 有一定影响,结果还存在不确定性^[9]. 因此,研究土壤有机氮组分和活性氮的变化特征,对深入了解土壤质量变化具有重要的意义^[3,10].

近年来,生物炭作为一种新型环境功能材料,在土壤改良等方面得到了广泛应用^[11-13]. 生物炭主要是以木材、动物遗体或粪便、农作物秸秆或植物落叶等生物质在限氧或无氧、高温条件下形成的富含碳元素且结构高度稳定的固态物质^[14,15],其孔隙结构发达、比表面积大,具有大量的表面负电荷以及较高的阳离子交换量,能较强吸附土壤离子,含有植物生长所需的大量营养元素和微量营养元素^[16-18].

褚继登等^[19]在植烟土壤中施加生物炭,发现可以减少可溶性总氮的淋失量. 有研究表明,生物炭施用4 a 后,增加了土壤 TN 含量,有机氮各组分含量的顺序为:酸解铵态氮 > 氨基酸态氮 > 非酸解态氮 > 酸解未知态氮 > 氨基糖态氮,显著提高了土壤酸解有机氮中酸解铵态氮和氨基酸态氮的含量,促进了氮素的活化,有利于花生中低产田氮素的吸收和运转^[20]. 在稻田轮作土壤,施用生物炭6 a 后提高了土壤总氮,改善了土壤碳储量和氮磷含量^[21]. 也有研究表明,施用生物炭6 a 后稻田土壤有机碳、有效磷和速效钾含量显著增加,土壤 pH 值和容重显著降低,但对 TN 含量无显著影响^[22]. 可见,生物炭对土壤有机氮含量及组分有着重要的影响,但由于生物炭材料、土壤类型、施用年限、耕作制度和区域环境等不同,其研究结果还不尽一致,还有待进一步的研究.

有关生物炭的相关研究在农田土壤的研究居多,应用于林地的较少^[23],大部分为室内培养,在大田原位施用生物炭的报道不多^[11],而大田环境下土壤受多种复杂环境因子的影响,可能会与培养条件下的结果有一定的差异^[24]. 桉树是我国亚热带地区重要的造林树种之一,长期以来桉树林采伐后采取焚烧等整地措施,常引起土壤肥力下降等问题,加重了土壤酸化的趋势^[25]. 随着桉树人工林的快速发展,林业废弃物产生量日益增加,给生态环境造成巨大压力. 笔者团队前期研究表明,桉树林业废弃物是较理想的生物炭材料,将林业废弃物制备成生物炭并就地返还桉树林土壤,是林业废弃物资源化利用的有效途径之一^[25],在桉树人工林原位施用生物炭1 a 后对改善土壤理化性质和提高养分含量有积极的改良效果,可显著增加土壤速效氮等含量^[11]. 生物炭施入土壤后,对于土壤改良及土壤环境变化的影响是长期的,会随着时间的推移而变化^[26],验证生物炭对农业生产的有效性需要进行长期的野外定位试验来证实^[27]. 一次性施用生物炭5 a 后,对桉树林土壤有机氮组分的持续效应如何,土壤不同形态有机氮组分与活性氮之间有何关系,以及生物炭不同施用量的调控作用目前还不清楚. 因此,本研究利用团队前期2017年建立的桉树人工林生物炭施用定位试验平台,探

明生物炭一次性施用 5 a 后, 桉树林土壤有机氮组分和活性氮的变化特征, 通过进一步了解生物炭施用对桉树林土壤氮库的中长期影响, 明确生物炭不同施用量措施下土壤的供氮潜力, 旨在为土壤培肥和地力提升, 以及林业废弃物生物炭在林业生产中的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在广西国有黄冕林场, 地处柳州市鹿寨县与桂林市永福县交界区域, $24^{\circ}37'25'' \sim 24^{\circ}52'11''N$, $109^{\circ}43'46'' \sim 109^{\circ}58'18''E$, 该区域属于中亚热带气候, 无霜期长, 雨热同期; 年均气温为 $19^{\circ}C$, 年平均降雨量为 $1750 \sim 2000$ mm, 主要集中在 4 ~ 8 月, 热量充足, 年均蒸发量 $1426 \sim 1650$ mm. 黄冕林场主要为低山和丘陵地貌, 地形起伏大, 坡面险峻, 林地土壤类型主要是以砂岩、砂页岩等发育而成的红壤、山地黄红壤为主^[25].

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置和样品采集

本试验是段春燕等^[11,28]于 2017 年 3 月桉树林生物炭施用定位试验的延续, 以黄冕林场试验地及周边区域内桉树林采伐剩余物枝条为原料, 经过高温 ($500^{\circ}C$) 无氧条件下裂解制备为生物炭. 生物炭基本性质: 比表面积 $43.21 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 电导率 $692.82 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 阳离子交换量 $51.48 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (灰分) 41.05% , pH 值 9.52, ω (C) 55.86% , ω (H) 3.13% , ω (O) 23.70% , ω (N) 1.36% , ω (P) $5.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, ω (K) $32.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[28]. 以桉树人工林土壤作为研究对象, 生物炭施用比例参考生物炭与土壤的质量分数进行控制^[29], 设置 CK (0%)、T1 (0.5%)、T2 (1.0%)、T3 (2%)、T4 (4%) 和 T5 (6%) 这 6 个处理, 每个处理设 3 个重复, 采用完全随机区组设计, 共设 18 个试验小区, 每个小区规格为 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$, 小区间设 1 m 缓冲带. 采用农耕工具分别将各小区内表层 30 cm 深的土壤均匀翻耕, 将生物炭一次性按照设定的比例与翻耕的土壤充分混合, 对照组采用同样的翻耕等处理^[29]. 于 2022 年 3 月, 生物炭施用 5 a 后进行土壤取样. 按照 S 型方法在各样地中选取 5 个代表性样点, 按 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 不同层次用土壤取样器分层取土, 同层 5 个点土壤混匀为 1 个土样. 将每个样地采集的土壤样品, 装在无菌自封袋中, 迅速置于密封冰袋容器中冷藏后带回实验室于 $4^{\circ}C$ 冰箱中保存备用. 鲜样用于土壤 MBN 的分析; 风干样用于土壤氮组分、全氮等理化性质的测定。

1.2.2 土壤氮组分和活性氮的分析

土壤 TN 通过德国 Vario EL III 型元素分析仪进行测定; 有机氮组分采用 Bremner^[4] 提出酸解土壤的方法; 总有机氮 (TON) 和酸解总氮 (AHON) 采用浓 H_2SO_4 消化-凯氏定氮法; 酸解铵态氮 (AN) 采用氧化镁蒸馏法; 酸解氨基酸态氮 (AAN) 采用茚三酮氧化, 磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸汽蒸馏法; 酸解氨基糖态氮 (ASN) 采用 pH 11.2 的磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸汽蒸馏法. 酸解未知态氮 (HUN) = 酸解总氮 - (酸解铵态氮 + 酸解氨基酸态氮 + 酸解氨基糖态氮); 非酸解态氮 (NHN) = 总有机氮 - 酸解总氮. 土壤氮储量 (NS) = $10N \cdot \rho \cdot h$, 式中, N 为全氮含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), h 为实际土层深度 (cm). 容重采用环刀法, 带回实验室烘干称重后计算土壤容重 (ρ). 土壤 MBN 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[30], DON 采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提, 德国耶拿 Multi N/C 3100TOC-智能型 TOC/TN 分析仪测定。

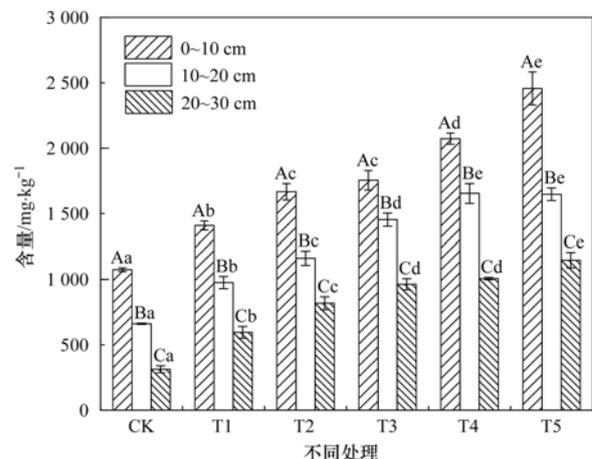
1.3 数据分析

通过 Excel 2010、SPSS 17.0 和 OriginPro 2022b 进行数据处理和图表制作, 对不同处理不同土层的土壤全氮、有机氮组分、活性氮等数据采用单因素方差分析 (One-way ANOVA)、Duncan 多重比较 ($\alpha = 0.05$) 等统计分析, 对土壤各指标进行 Pearson 相关性、主成分等统计分析。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭对土壤全氮含量的影响

由图 1 可知, 与对照相比, 生物炭施用 5 a 后,



不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同生物炭处理土壤全氮含量的变化

Fig. 1 Changes in soil total nitrogen content under different biochar treatments

土壤 TN 含量呈显著增加的趋势 ($P < 0.05$), T1、T2、T3、T4 和 T5 处理 0~30 cm 土层 TN 含量平均增幅分别为 45.48%、78.02%、103.64%、131.06% 和 156.32%。0~10 cm 土层 T2 与 T3 处理间无显著性差异,其它处理间均呈显著性差异 ($P < 0.05$); 10~20 cm 土层 T4 与 T5 处理间无显著性差异,其它处理间均呈显著性差异 ($P < 0.05$); 20~30 cm 土层 T3 与 T4 间无显著性差异,其它处理间均呈显著性差异 ($P < 0.05$)。随着土层的加深,土壤 TN 含量均呈降低趋势,同一处理不同土层间均呈显著性差异。

2.2 施用生物炭对土壤有机氮组分的影响

从图 2 可以看出,与对照相比,随着生物炭施用量的增加土壤酸解总氮含量呈现逐渐增加的趋势 ($P < 0.05$), T1、T2、T3、T4 和 T5 处理 0~30 cm 土层 AHON 含量平均增幅分别为 44.31%、71.01%、94.94%、135.55% 和 171.31%。同一处理随着土层的加深,AHON 含量均呈降低的趋势,且不同土层间均呈显著性差异 ($P < 0.05$)。0~10 cm 和 10~20 cm 土层,CK、T1、T2、T3、T4 和 T5 处理两两之间均表现出显著性差异 ($P < 0.05$); 20~30 cm 土层,除 T2 和 T3 间未有显著性差异之外,其余不同处理间均表现出显著性差异 ($P < 0.05$)。

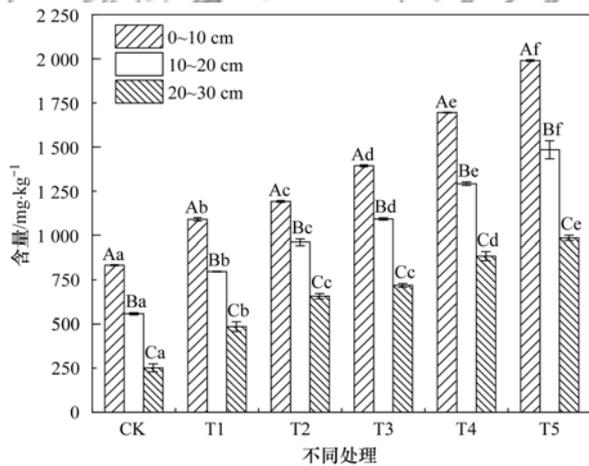


图 2 不同生物炭处理土壤酸解总氮含量的变化

Fig. 2 Changes in soil total acid hydrolyzable N contents under different biochar treatments

图 3 中,与 CK 相比,施用生物炭后,AN 和 AAN 的变化规律一致,均随着生物炭施用量的增加而增加,各处理 0~30 cm 土层平均值的增幅分别为 38.06%~223.37%、39.42%~163.32%,均在 T5 处理时达到最大值,同一土层不同处理之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。同一处理随着土层的加深,AN 和 AAN 含量均呈降低的趋势,不同土层之间亦存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

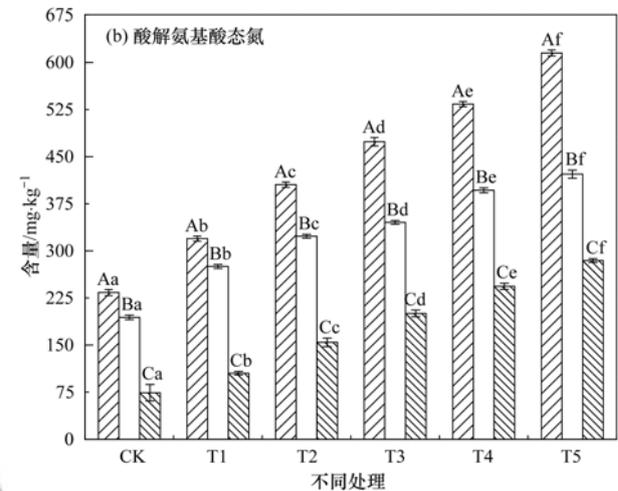
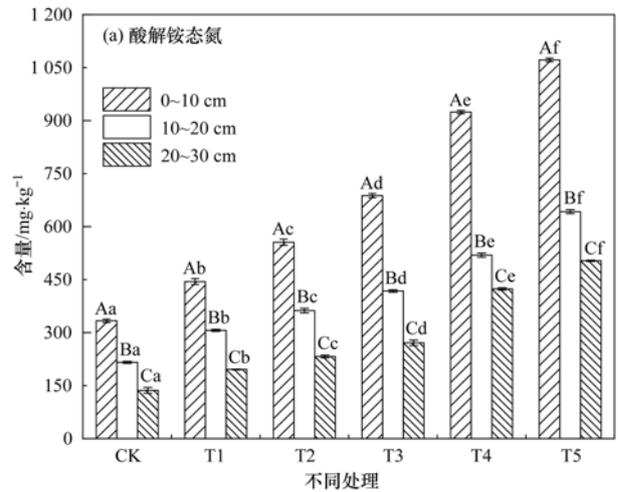


图 3 不同生物炭处理土壤酸解铵态氮和酸解氨基酸态氮含量的变化

Fig. 3 Changes in soil ammonia N and amino acid N contents under different biochar treatments

由图 4 可知,与 CK 相比,随着生物炭施用量的增加,ASN 含量呈现出降低的趋势,在 T5 处理略有增加,各处理 0~30 cm 土层平均值的降幅为 7.72%~32.73%,在 T4 处理时 ASN 含量值最低,各

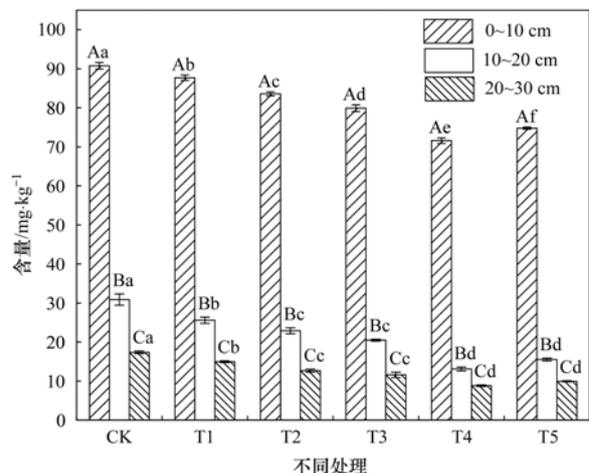


图 4 不同生物炭处理土壤酸解氨基糖态氮含量的变化

Fig. 4 Changes in soil amino sugar N contents under different biochar treatments

土层 ASN 含量的大小顺序一致表现为: CK > T1 > T2 > T3 > T5 > T4. 同一处理随着土层的加深, ASN 含量均呈降低的趋势, 不同土层之间存在显著性差异 ($P < 0.05$). ASN 主要富集在 0 ~ 10 cm 土层, 且不同处理间显著性差异 ($P < 0.05$); 在 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层, 除了分别在 T2 和 T3 间, T4 和 T5 间差异不显著之外 ($P > 0.05$), 其它处理间均有显著差异 ($P < 0.05$).

图 5 反映了 HUN 和 NHN 含量的变化趋势, 与 CK 相比, 随着生物炭施用量的增加, 0 ~ 30 cm 土层 HUN 含量整体呈现增加的趋势, 平均增幅为 88.41% ~ 158.71%; 但在不同土层间表现出不同的变化规律. 在 0 ~ 10 cm 土层, HUN 含量呈现先增加

后减小再略增加的趋势, 大小顺序为: T1 > T5 > CK > T4 > T3 > T2; 10 ~ 20 cm 土层 HUN 含量呈不断增加的趋势, 大小顺序为: T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > CK, 且含量逐渐高于其它土层; 20 ~ 30 cm 土层 HUN 含量呈先增加后略减小的趋势, 大小顺序为: T2 > T3 > T4 > T5 > T1 > CK. 随着土层深度的增加, 在 CK 和 T1 处理, HUN 含量表现为逐渐减小的趋势; 在 T2 处理, 表现为逐渐增大的趋势; 在 T3、T4 和 T5 处理, 均表现为在 10 ~ 20 cm 土层最大. 在 0 ~ 10 cm 土层, CK 与 T1、T2 和 T5 间差异显著 ($P < 0.05$); 在 10 ~ 20 cm 土层, CK 与 T2、T3、T4 和 T5 间显著差异 ($P < 0.05$); 在 20 ~ 30 cm 土层, CK 与生物炭处理间均存在显著差异 ($P < 0.05$).

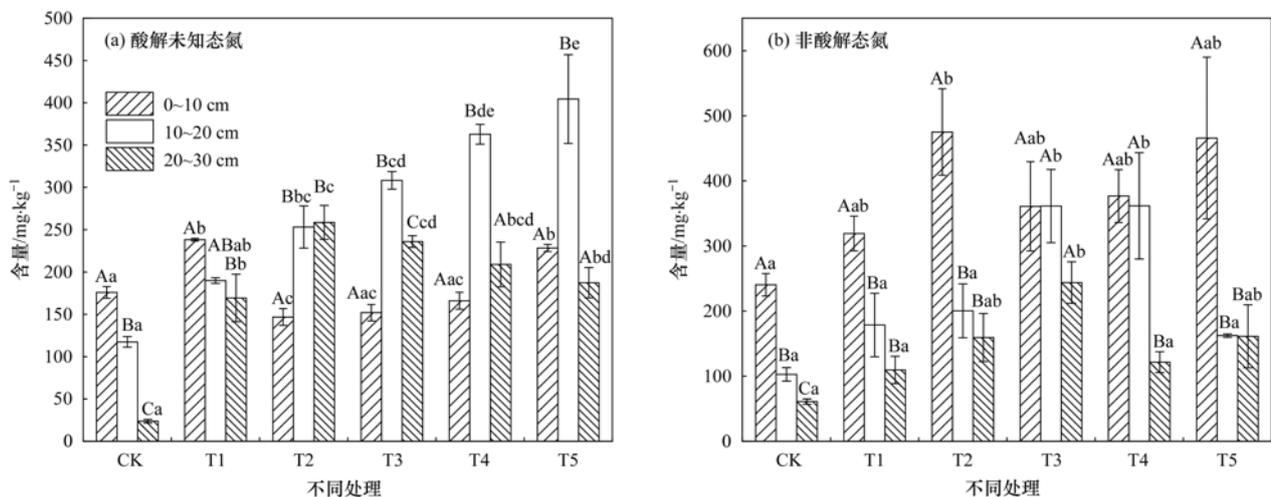


图 5 不同生物炭处理酸解未知态氮和非酸解态氮含量的变化

Fig. 5 Changes in soil hydrolyzable unknown N and non-hydrolyzable N contents under different biochar treatments

施用生物炭后, NHN 含量呈现先上升后略下降的趋势, 但总体上高于 CK, 各处理 0 ~ 30 cm 土层平均值的增幅为 50.24% ~ 139.01%, 大小顺序为: CK < T1 < T5 < T2 < T4 < T3. 各处理 NHN 含量在不同土层的变化规律不一致, 在 0 ~ 10 cm 土层, 表现为先增大后减小再增大的变化趋势, 大小顺序依次为: T2 > T5 > T4 > T3 > T1 > CK; 在 10 ~ 20 cm 土层表现为先增大后略减小的趋势, 大小顺序为: T4 > T3 > T2 > T1 > T5 > CK; 在 20 ~ 30 cm 土层亦表现为先增大后略减小的趋势, 大小顺序为: T3 > T5 > T2 > T4 > T1 > CK.

从图 6 可以看出, 与 CK 相比, 不同生物炭处理土壤 AHON 占 TN 的比例为 76.64% ~ 85.94%, CK 中 AHON 占 TN 的比例为 80.85%, AHON 大小顺序为: T5 > T4 > CK > T1 > T2 > T3. CK 中 NHN 占 TN 的比例为 19.15%, 不同生物炭处理 NHN 占 TN 的比例为 14.06% ~ 23.36%, 大小顺序为: T3 > T2 > T1 > CK > T4 > T5. 在不同处理, AN、AAN、ASN 和

HUN 分别占 TN 的比例为 31.15% ~ 42.35% (均值 35.44%)、22.97% ~ 25.28% (均值 24.14%)、1.62% ~ 6.26% (均值 2.48%) 和 13.93% ~ 21.54% (均值 18.81%).

在不同土层中 AN 占 TN 的比例最大; 0 ~ 10 cm 土层, AN 占 TN 的比例为 31.06% ~ 44.64%, 随生物炭施用量的增加, AN 占 TN 的比例总体趋于增加, 大小顺序为: T4 > T5 > T3 > T2 > T1 > CK; 10 ~ 20 cm 土层, AN 占 TN 的比例为 28.82% ~ 39.06%, AN 占 TN 的比例先降低后增加, 大小顺序为: T5 > CK > T1 > T4 > T2 > T3; 20 ~ 30 cm 土层, AN 占 TN 的比例为 28.22% ~ 44.13%, AN 占 TN 的比例先降低后增加, 大小顺序为: T5 > CK > T4 > T1 > T2 > T3. ASN 占 TN 的比例最小, 0 ~ 10 cm 土层中 ASN 占 TN 的比例为 3.06% ~ 8.45%, 10 ~ 20 cm 土层中 ASN 占 TN 的比例为 0.79% ~ 4.67%, 20 ~ 30 cm 土层中 ASN 占 TN 的比例为 0.87% ~ 5.65%. 在不同土层中, ASN 占 TN 的比例均随着生物炭施用量的

增加呈现减小的趋势. 同一处理 0~10 cm 土层 ASN 占 TN 的比例较大, 10~30 cm 土层 ASN 占 TN 的比例降幅较大.

随着生物炭施用量的增加, HUN 在不同土层间表现出较大差异. 0~10 cm 土层中 HUN 占 TN 的比例为 8.01%~16.92%, 与 CK 比较 HUN 占 TN 的比例整体呈减小的趋势, 大小顺序为: T1 > CK > T5 > T3 > T2 > T4; 10~20 cm 土层中 HUN 占 TN 的比例为 17.78%~24.41%, HUN 占 TN 的比例呈增加的趋势, 大小顺序为: T5 > T4 > T2 > T3 > T1 > CK; 20~30 cm 土层中 HUN 占 TN 的比例为: 7.63%~31.58%, HUN 占 TN 的比例呈先增加后降低的趋势, 大小顺序为: T2 > T1 > T3 > T4 > T5 > CK. 随着土层的加深, T1、T2 和 T3 处理, HUN 占 TN 的比例逐渐增加, CK、T4 和 T5 处理, HUN 占 TN 的比例呈先增加后降低的趋势. NHN 占 TN 的比例在不同土层间变化不一致, 0~10 cm 土层中 NHN 占 TN 的比例为 18.12%~28.29%, 大小顺序为: T2 > T1 > CK > T3 > T5 > T4; 10~20 cm 土层中 NHN 占 TN 的比例为 9.89%~24.65%, 大小顺序为: T3 > T4 > T1 > T2 > CK > T5; 20~30 cm 土层中 NHN 占 TN 的比例为 12.11%~25.12%, 大小顺序为: T3 > CK > T2 > T1 > T5 > T4.

0~10 cm 土层 AAN 占 TN 的比例为 21.75%~27.12%, 不同处理间的大小顺序为: T3 > T4 > T5 > T2 > T1 > CK; 10~20 cm 土层中 AAN 占 TN 的比例为 23.83%~29.37%, 大小顺序为: CK > T1 > T2 > T5 > T4 > T3; 20~30 cm 土层中 AAN 占 TN 的比例为 17.89%~24.96%, 大小顺序为: T5 > T4 > CK > T3 > T2 > T1. 0~10 cm 土层土壤有机氮各形态平均值的分布趋势为: 酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 非酸解态氮 > 酸解未知态氮 > 酸解氨基糖态氮; 10

~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤有机氮各形态平均值的分布趋势一致为: 酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 酸解未知态氮 > 非酸解态氮 > 酸解氨基糖态氮. 总体上, 各处理 0~30 cm 土层土壤有机氮各形态平均值的分布趋势为: 酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 非酸解态氮 > 酸解未知态氮 > 酸解氨基糖态氮, 其中 AN、AAN 和 NHN 为有机氮的主要组分. 与对照相比, ASN 占 TN 的比例表现为下降趋势, HUN 占 TN 的比例表现为上升趋势, AN 占 TN 和 AAN 占 TN 的比例表现为先下降后上升趋势, NHN 占 TN 的比例表现为先上升后下降的趋势. 与 CK 相比, 生物炭施用处理总体上增加了酸解态氮占全氮的比例.

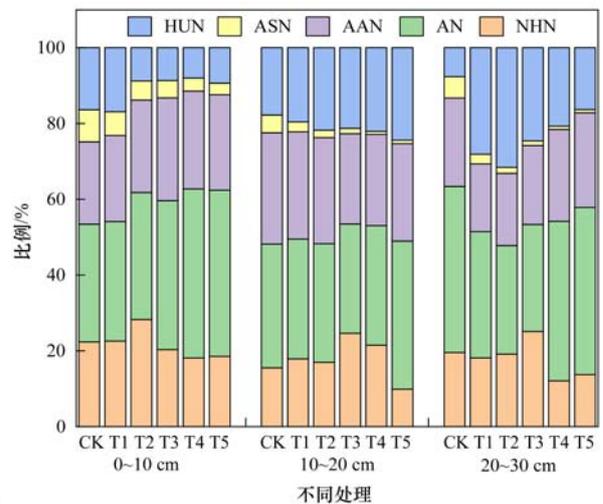


图 6 不同生物炭处理土壤有机氮组分占全氮的比例

Fig. 6 Percentage of soil organic N fractions to total N under different biochar treatments

2.3 施用生物炭对土壤活性氮含量及氮储量的影响

图 7 中, 随着生物炭施用量的增加, 土壤 MBN 和 DON 含量表现出一致的变化规律, 呈现不断上升的趋势, 生物炭处理的土壤活性氮含量均高于 CK, 且含量均随着土层的加深而降低. 与 CK 相比, 各处

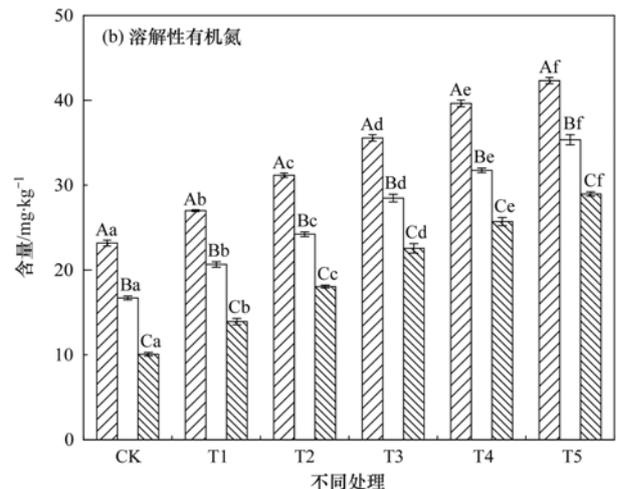
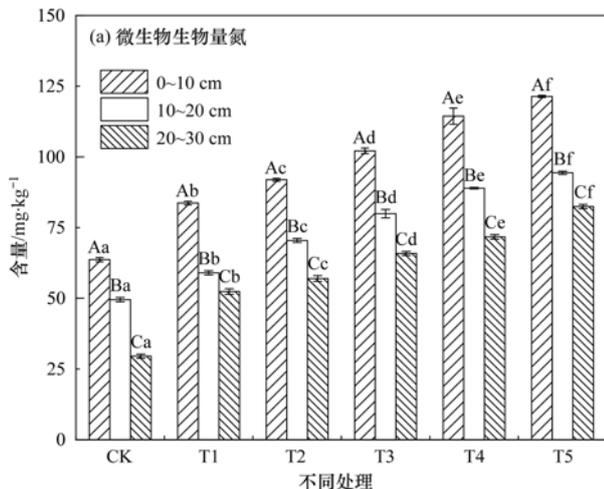


图 7 不同生物炭处理土壤微生物生物量氮和溶解性有机氮含量的变化

Fig. 7 Changes in microbial biomass nitrogen and dissolved organic nitrogen contents under different biochar treatments

理 0~30 cm 土层 MBN 平均值的增幅为 36.72%~109%, DON 平均值的增幅为 23.27%~113.51%。MBN 和 DON 分别在同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 同一处理不同土层间亦存在显著差异 ($P < 0.05$), 说明施用生物炭对土壤活性氮含量影响较大。

由图 8 可知, 施用生物炭后, 土壤 MBN 和 DON 占 TN 的比例均呈下降的趋势, T5 处理值最小, 这主要是由于生物炭施用后, 生物炭各处理土壤全氮的增幅远大于 MBN 和 DON 的增幅。土壤 MBN 占 TN 的比例大于 DON 占 TN 的比例。

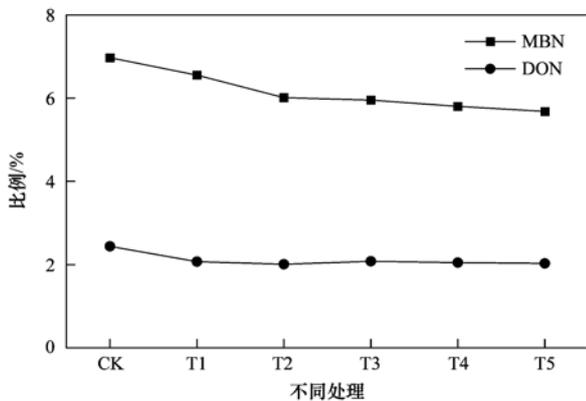


图 8 不同生物炭处理土壤活性氮含量占全氮的比例
Fig. 8 Percentage of soil labile N fractions to total N under different biochar treatments

图 9 中, 随着生物炭施加量的增大, 土壤氮储量整体呈上升的趋势, 在不同土层间的变化趋势略有差异。在 0~10 cm 土层, 土壤 NS 呈现先升高后降低再升高的趋势, 在 T5 处理时 NS 最高; 在 10~

20 cm 和 20~30 cm 土层, 土壤 NS 均呈现先升高后略有降低的趋势, 均在 T3 处理时 NS 最高。NS 均随着土层的加深而降低, 不同土层间差异性显著 ($P < 0.05$)。同一土层, 生物炭处理与 CK 间均存在显著差异 ($P < 0.05$), 表明施用生物炭提高了桉树林土壤氮储量。

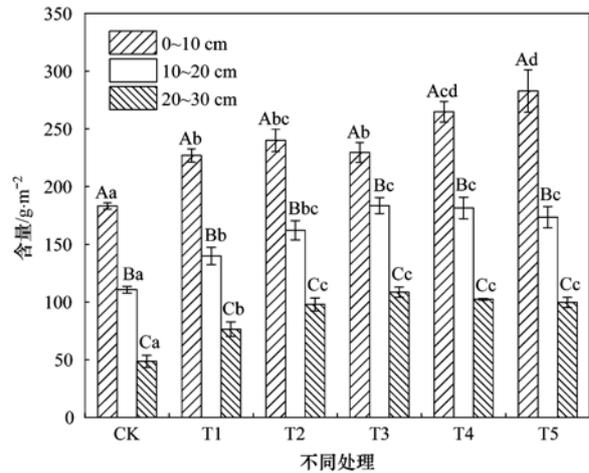
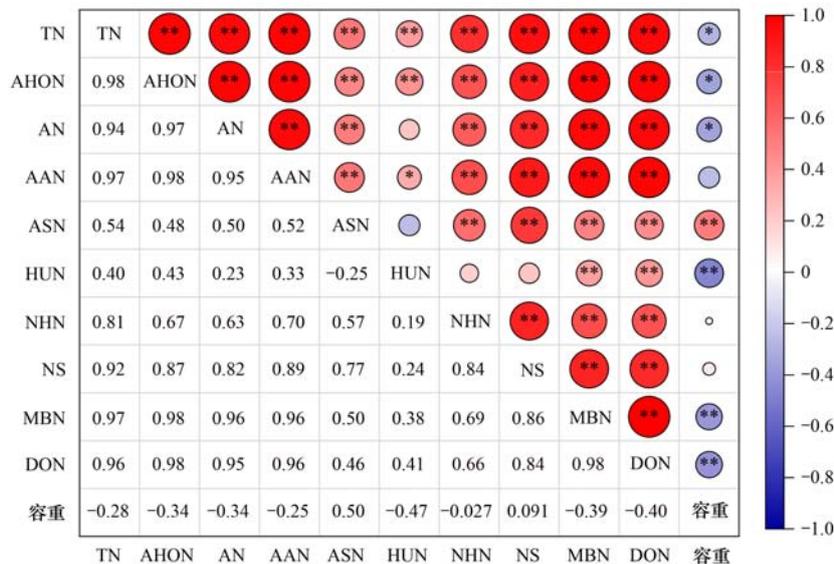


图 9 不同生物炭处理土壤氮储量的变化
Fig. 9 Changes in soil nitrogen storage under different biochar treatments

2.4 施用生物炭措施下土壤全氮、活性氮与有机氮组分的相关性

从图 10 可知, 土壤 TN 和 AHON 分别与 AN、AAN、ASN、HUN、NHN、NS、MBN 和 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。AN 分别与 AAN、ASN、NHN、NS、MBN 和 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 HUN 无显著相关性。AAN 与容重无显著相关性, 与



TN:全氮, AHON:酸解总氮, AN:酸解铵态氮, AAN:酸解氨基酸态氮, ASN:酸解氨基糖态氮, HUN:酸解未知态氮, NHN:非酸解态氮, NS:氮储量, MBN:微生物量氮, DON:溶解性有机氮, 下同; 红色表示两个变量呈正相关, 蓝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 10 不同生物炭处理土壤全氮、有机氮组分与活性氮间的相关关系

Fig. 10 Relationships among total nitrogen, organic nitrogen fractions, and active N under different treatments

HUN 显著正相关 ($P < 0.05$), 分别与 ASN、NHN、NS、MBN 和 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$). ASN 除了与 HUN 无显著相关性之外, 分别与 NHN、NS、MBN、DON 和容重呈极显著正相关 ($P < 0.01$). HUN 分别与 MBN 和 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 NHN 和 NS 间均无显著相关性. NHN 与 NS、MBN 和 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与容重无显著相关性. NS 与 MBN 和 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与容重无显著相关性. MBN 与 DON 呈极显著正相关 ($P < 0.01$). 容重分别与 TN、AHON 和 AN 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 ASN 极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 HUN、MBN 和 DON 呈极显著负相关 ($P < 0.01$).

由图 11 可知, 对土壤全氮、有机氮组分、活性氮进行主成分分析, PC1 轴解释率达 89.8%, 主要与 AN、DON、AHON、AAN、MBN、TN、HUN 和 NS 有着较大的正向关系; 与容重和 ASN 有着较大的负向关系. PC2 轴解释率占 7.0%, NHN 在 PC2 上的载荷系数最大, PC2 轴与 NHN 有着较大的正向关系. 单个因子中, 容重与 ASN; TN 和 HUN; MBN、AAN、DON 和 AHON 间的关系较为密切. 在土壤有机氮组分中, AHON、AN 和 AAN 对土壤活性氮的影响较大. 随着生物炭施用量的增加, 各处理在 PC1 上由负相关转变为正相关, 说明生物炭施用量的增加对土壤有机氮组分和活性氮具有正向的积极作用效果.

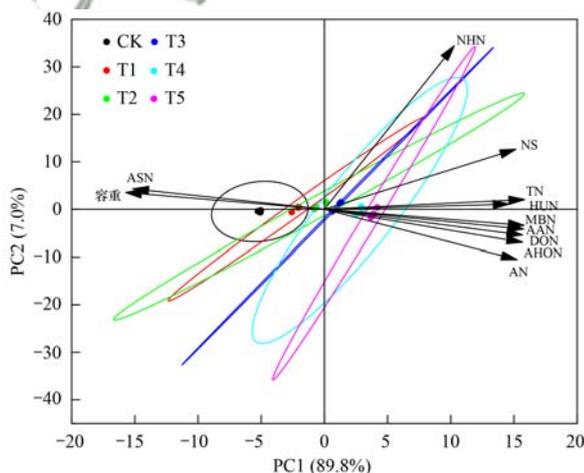


图 11 不同生物炭处理土壤全氮、有机氮组分和活性氮间的主成分分析

Fig. 11 Principal component analysis of total nitrogen, organic nitrogen fractions, and active N under different treatments

3 讨论

3.1 生物炭施用对土壤全氮和有机氮组分含量的影响

本研究中, 随着生物炭施用量的增加, 土壤 TN

含量呈上升趋势, 各处理与 CK 间差异性显著 ($P < 0.05$), 表明生物炭施用对于土壤 TN 的积累有显著影响, 有利于土壤持续供氮, 高施用量可以促进 TN 的积累. 这与其他学者的研究结果相一致^[31~33], 例如, 龙泽华等^[31]研究发现秸秆炭化还田显著提高了棉田土壤 TN 含量, 秸秆炭化还田较秸秆不还田处理土壤 TN 含量增加了 37.2%~38.4%. 在黄土高原不同类型的土壤中施加生物炭改良剂, 显著改善提高了土壤 TN 含量^[32]. 生物炭一次性施入 8 a 后对灌耕风沙土的研究结果表明, 分别增加了 TN、有机质及速效钾含量^[33]. 而胡琛等^[34]研究发现土壤 TN 质量分数与对照相比没有明显差异, 表明在落叶松人工林施加生物炭对土壤养分的影响较小. 以上结果在不同地区的研究结论不一, 可能与植物或作物类型、土壤环境和生物炭施用量等不同有关.

土壤中最主要的有机氮形态是 AN 和 AAN, 其含量与有机氮的矿化速率呈线性相关, 被认为是土壤易矿化有机氮的主要来源, 难矿化氮主要为 HUN 和 NHN^[5,35]. 前人研究表明, 在棕壤中连续施用 4 a 不同量的生物炭, 增加了土壤 TN 含量, 随着生物炭施加量的增加, AN、HUN、NHN 和 AAN 含量均有所提高^[20]. 在采煤塌陷区复垦土壤中添加生物炭后, 增加了土壤 TN、AAN、ASN、HUN 和 MBN 的含量^[36]. 以上研究结果与本研究结果类似, 本研究中, 与 CK 相比, 随着生物炭施用量的增加, 除了 ASN 含量趋于减小之外, AHON、AN 和 AAN 含量显著提高, HUN 和 NHN 含量呈现波动增加的趋势, AHN 占 TN 的比例逐渐增加, NHN 占 TN 的比例呈现先增加后降低的趋势. 说明生物炭施用可提高桉树林土壤氮素含量并促进其向土壤 AN、AAN 和 HUN 等有效形态转化, 显著增加了土壤有机氮的有效态组分, 有利于提高有机氮的有效性, 促进了土壤的熟化作用, 这与其他研究的结果相一致^[20], 这也类似于长期定位施肥对棕壤有机氮组分的影响^[37]. 在不同土层间, 随着土壤深度的加大, 土壤的 TN 含量及有机氮组分表现为逐渐降低的趋势, 这与李玥等^[20]的结论相似.

笔者团队前期的研究表明, 施用生物炭 1 a 后土壤中的 TN、AHON、AN、AAN 呈现逐渐上升的趋势, 土壤氮储量趋于增加; ASN 先降低后略增加, HUN 和 NHN 变化规律不明显^[28]. 本研究中, 生物炭施用 5 a 后土壤氮组分的变化幅度大于施用 1 a 后的试验结果, 且 HUN 和 NHN 在不同土层间具有一定的变化规律 (图 5), 各处理土壤有机氮组分占全氮比例的大小顺序为: 酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 非酸解态氮 > 未知态氮 > 酸解氨基糖态氮.

施用生物炭降低了土壤 ASN 所占比例,这与连续 4 a 施用生物炭对棕壤有机氮组分影响的研究结果一致^[20]. 施用生物炭 1 a 后土壤有机氮组分占总有机氮的比例关系大小顺序为:酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 酸解未知态氮 > 非酸解态氮 > 酸解氨基糖态氮^[26],这与本研究中酸解未知态氮和非酸解态氮的大小顺序略有所不同,但土壤 TN 和 TON 的变化特征是一致的,整体上氮组分变化规律是相近的. 这进一步表明,桉树枝条废弃物生物炭施用 5 a 后,对增加桉树林土壤氮组分含量有一定的持续效应.

本研究中,AN 的增加效果较为显著,一方面,其中一个来源是土壤无机氮(如吸附性铵和固定态铵),生物炭施用可以改变土壤氮循环中微生物介导的反应,包括氮的矿化^[38],并且能增强土壤铵离子浓度^[39]. 另一方面,其它来源是酸解过程中某些氨基酸和氨基糖脱氨产生,生物炭的微孔结构,为微生物的繁殖提供了充分的营养物质^[40]. 在土壤微生物的作用下,促进了氨基酸等低分子有机氮的形成,从而增加了铵态氮的含量^[20]. 此外,在桉树林施用生物炭 5 a 后,显著增加了土壤 AAN 的含量及其所占比例. 这是因为,土壤水解产物中主要的氮化物是氨基酸态氮,以土壤有机质中的蛋白质和多肽形式存在为主^[41]. 生物炭自身携带的营养和活性物质进入土壤后,能在短期内促进微生物的增长和代谢^[42],在土壤微生物的作用下,复杂的大分子有机氮降解产生为小分子的可溶性有机氮,进而为植物提供可直接利用的无机氮源和低分子有机氮,如氨基酸和多肽^[43]. 因此,生物炭施用可能促进了桉树林土壤微生物活性,增强了土壤微生物的固氮能力,进而引起土壤微生物生物量发生变化,最终影响土壤 AN 和 AAN 含量.

土壤 AN 和 AAN 是土壤中有效氮的“暂存库”和“缓效库”^[5]. 本研究中,生物炭施用 5 a 后不仅增加了土壤中易矿化的 AN、AAN 的含量,也增加了较难分解的 HUN 含量,与团队前期生物炭施用 1 a 后的结果类似^[28],T5 处理下 AN 和 AAN 含量最高,表明生物炭高施用量下土壤中活性有机氮含量较高,即土壤供氮潜力较高. 其他研究同样表明,生物炭施用既可以提高土壤氮素的供应强度,又可以提高土壤氮素的供应容量^[44]. 本研究中 NHN 占 TN 的比例相比 CK 有所下降,表明生物炭可以起到活化氮素、促进氮素转化的作用. 这也说明生物炭对提高土壤供氮能力有积极作用,易矿化部分在当季即可分解释放出矿质氮,而难矿化部分的矿化持续时间则较长,但在生物炭施用 5 a 后仍可以产生累积效应.

3.2 生物炭施用措施下土壤有机氮组分与活性氮间的关系

有研究表明,土壤微生物参与了土壤氮素的矿化,土壤的供氮能力与土壤微生物活性密切相关^[45]. DON 可为土壤微生物生长提供氮源,也是土壤氮矿化过程的基础物质^[46]. 与单施有机肥处理相比,有机肥配施生物炭后,复垦土壤 MBN 含量增加了 8.8%^[36]. 施用玉米芯生物炭使土壤中活性氮和 MBN 含量显著增加,土壤中 MBN 的增强与生物炭改良土壤中总氮的增加和微生物活性的提高有关^[47]. 郭书亚等^[48]施加生物炭 5 a 后显著增加了土壤 MBN 的含量,且随着生物炭施用量的增加而呈增加趋势. 在稻田土壤中施加生物炭,增加了土壤 MBN 的含量^[49]. 与以上研究的结果相一致,本研究中,随着生物炭施用量的增加,土壤 MBN 和 DON 含量呈现增加的趋势. 而 MBN 和 DON 活性组分的分配比例呈下降趋势,这与李子玉等^[50]研究的结果类似,长期的秸秆还田,降低了 MBN 和 DON 活性组分的分配比例. 其它研究也表明,随着生物炭施用量的增加,MBN 占 TN 的比例逐渐降低^[51]. 说明桉树林生物炭施用 5 a 后,土壤 TN 的增量要显著高于活性氮的增量,MBN 和 DON 可能易被植物体吸收,也间接表明可能增加了惰性有机氮组分的积累,使土壤氮库趋于稳定,说明 MBN 占 TN 和 DON 占 TN 的比例关系,并没有较 MBN 和 DON 含量大小更能显著地反映生物炭施用对土壤的影响.

前人研究表明,对干润砂质新成土、黄土正常新成土和土垫早耕人为土,MBN 除了与 ASN 没有显著相关性外,与其余氮组分均达到极显著正相关关系^[52]. 在湖南水稻土的研究结果表明,土壤 AHN 及其组分均与 MBN 存在极显著的正相关关系,其中 AAN 和 HUN 对 MBN 的影响最大^[9]. 在本研究中,MBN 与 AHON、AN、AAN、ASN、HUN 和 NHN 均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),说明 MBN 与土壤有机氮组分密切相关,主成分分析也进一步验证了 AAN 对 MBN 有重要影响. 本研究中生物炭处理提高了 MBN 的含量,这是由于生物炭直接增加了土壤中有效能源物质,提高了土壤微生物的活性,从而使 MBN 明显增加. MBN 含量的提高,说明有较多的氮素可能通过同化作用转入土壤微生物体内进行固定,进而比较稳定地储存于土壤中,减少了土壤氮素的损失. 本研究中,土壤 DON 与 AN、AAN、ASN 和 HUN 均呈显著正相关关系,究其原因,一方面是由于生物炭施用引起了土壤 AHN 组分和 DON 含量的同步增加;另一方面,也可能与土壤有机氮组分中容易迁移的 AAN 和 AN 进入土壤溶液后发生径流

或淋溶有关^[53]。Qualls 等^[54]研究表明,生物因素(土壤微生物的水解作用和吸收利用小分子化合物),非生物因素(配位基交换和形成氢键),都可能促进土壤溶液中可溶性有机和无机养分的移出。据此推测,生物炭施用 5 a 后土壤 DON 含量的变化可能与土壤微生物分解释放 DON 以及 DON 被土壤吸附等过程综合作用有关。今后还需加强对土壤有机氮组分与 DON 相互作用机制的研究。

有研究表明,随着生物炭施用量的增加,土壤中 TN 含量增加,土壤总氮储量与生物炭施用量呈显著线性关系^[55]。在黄土高原施加生物炭后,具有提高土壤氮储量的潜力^[56]。尚杰等^[57]通过 2 a 的田间定位试验表明,施用生物炭可以显著提高土壤 TN 及其相关氮组分含量,促进土壤氮积累,从而提高土壤氮储量。以上研究与本研究的结论一致,桉树林生物炭施用 5 a 后,随生物炭量的施加,氮储量含量表现为增加的趋势,表明生物炭施用 5 a 可以持续增加土壤有机氮库容量,提升桉树人工林的土壤供氮潜力,这有利于增强土壤肥力。有研究表明,由于生物炭施用改善了土壤通气状况,通过抑制氮素微生物的反硝化作用减少了 NO_x 的形成和排放^[58],进而会增加土壤氮储量;另外,生物炭具有大的孔隙结构、巨大的比表面积、较强的离子吸附交换能力以及高电荷密度的特性^[23],能降低土壤氮素的淋失,吸附养分并将养分滞留在土壤中供植物利用^[59];同时,生物炭本身含有一部分氮素,随着施用量越大,对土壤氮素的增加也会越大。因此,说明桉树人工林施用生物炭是一种减少土壤氮素损失、增加氮素截留的有效措施。在酸性双季稻田上,一次性施用生物炭对水稻产量在 5 a 内有显著影响,对土壤酸化的改良效果可以持续 4 a^[60]。本研究中,林业废弃物生物炭施用 5 a 后,提高了桉树人工林土壤氮储量,对提高土壤肥力有一定的积极作用。桉树人工林多在 3~5 a 后进行采伐,因此,将林业废弃物制备为生物炭,就地返还林地,通过提高土壤 TN 及氮组分含量,提升了可矿化氮的比例,增加了氮的有效性,促进了土壤的熟化作用,对土壤有明显的培肥作用,长远有利于减缓短期轮伐后可能出现的土壤肥力下降等问题,这对桉树人工林的可持续经营具有一定的实践指导意义。

4 结论

(1) 随生物炭施用量的增加,能显著提高桉树林土壤全氮含量,增加了酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮和酸解未知态氮的含量,非酸解态氮含量整体亦呈增加的趋势,降低了酸解氨基糖态

氮含量。酸解态有机氮是桉树林土壤氮的主体。有机氮各形态的分布趋势大小为:酸解铵态氮 > 酸解氨基酸态氮 > 非酸解态氮 > 酸解未知态氮 > 酸解氨基糖态氮,其中酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮和非酸解态氮为有机氮的主要组分。生物炭对土壤有机氮组分含量沿土层分布的影响相似,除了酸解未知态氮之外,其它组分含量均随土层加深而降低。

(2) 生物炭施用 5 a 增加了酸解态氮(酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮及酸解未知态氮)占全氮的比例,非酸解态氮和酸解氨基糖态氮占全氮的比例趋于降低,促进了土壤有机氮有效态组分的增加,提高了有机氮的有效性。土壤全氮、微生物生物量氮、溶解性有机氮均与土壤有机氮组分之间存在显著的正相关关系。在土壤有机氮组分中,酸解总氮、酸解铵态氮和酸解氨基酸态氮对微生物生物量氮和溶解性有机氮的影响较大。

(3) 总之,生物炭施用 5 a 对桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮含量的增加有显著的持续效应,且增加了土壤氮储量,促进了非酸解态氮向有效态氮的转化,有利于提高土壤氮素供应能力。桉树林业废弃物制备成生物炭,就地还田,是提高桉树人工林土壤供氮能力的重要途径,施用 6% 的桉树枝条生物炭是增加土壤氮素含量的较优处理。

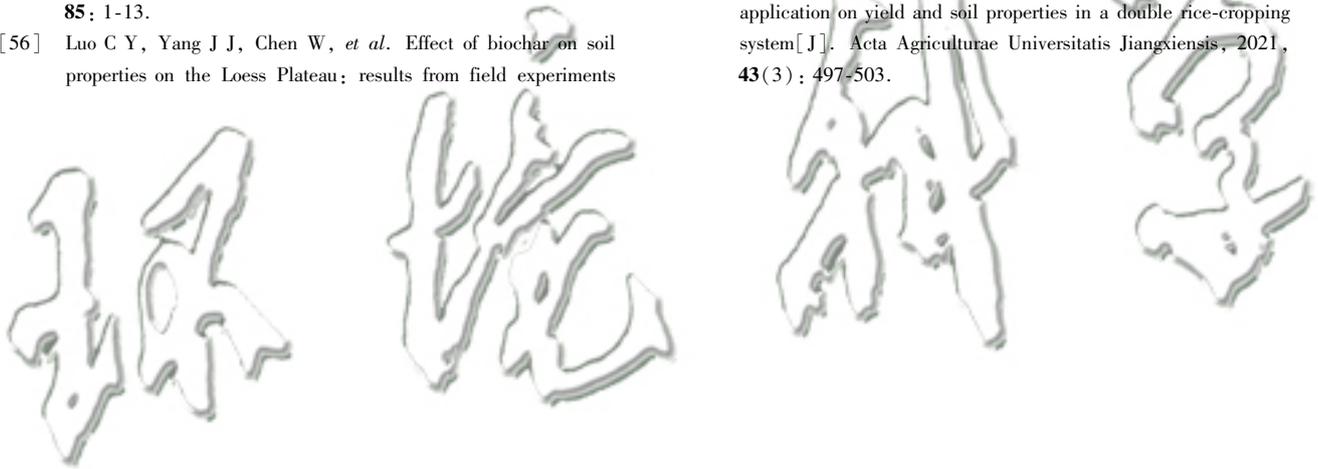
参考文献:

- [1] 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 等. 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4717-4726.
Tian F F, Ji H F, Wang L Y, *et al.* Effects of various combinations of fertilizer, soil moisture, and temperature on nitrogen mineralization and soluble organic nitrogen in agricultural soil[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4717-4726.
- [2] 李瑞, 张巡, 杨阳, 等. 沼液替代化学氮肥对滨海稻田土壤有机氮和细菌群落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, **28**(8): 1364-1375.
Li R, Zhang X, Yang Y, *et al.* Effects of substituting biogas slurry for chemical nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen and bacterial communities in coastal paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, **28**(8): 1364-1375.
- [3] 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(23): 4707-4716.
Hao X Y, Ma X Z, Gao Z C, *et al.* Variation characteristics of fractions of active nitrogen and organic nitrogen under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(23): 4707-4716.
- [4] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[A]. In: Norman A G (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties* [M]. Madison: American Society of Agronomy, Inc., 1965: 1238-1255.
- [5] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展[J]. 土壤通报, 2018, **49**(5): 1240-1246.
Wu H Q, Zhang Y L, Zhang Y L, *et al.* Soil organic nitrogen fractions: a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018,

- 49(5): 1240-1246.
- [6] 郑利远, 陈一民, 焦晓光, 等. 长期施肥对不同有机质含量农田黑土活性有机氮组分的影响 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(5): 96-100.
Zheng L Y, Chen Y M, Jiao X G, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil labile organic nitrogen in arable molisols under different organic matter levels [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(5): 96-100.
- [7] Gong S S, Yang X Y, Xu X K, *et al.* Effect of stand age on the temporal dynamics of soil active carbon and nitrogen in Chinese cypress artificial forests [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 68(1): 64-71.
- [8] Wang L F, Sun J T, Kang J, *et al.* Influence of nitrogen addition on the changes in nitrogen and carbon fractions in soil profiles of wheat fields [J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(8): 2540-2553.
- [9] 彭佩钦, 仇少君, 童成立, 等. 长期施肥对水稻土耕层微生物生物量氮和有机氮组分的影响 [J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1816-1821.
Peng P Q, Qiu S J, Tong C L, *et al.* Effects of long-term application of fertilizers on soil microbial biomass nitrogen and organic nitrogen components in subtropical paddy soils [J]. Environmental Science, 2007, 28(8): 1816-1821.
- [10] 张玉玲, 陈温福, 虞娜, 等. 长期不同土地利用方式对潮棕壤有机氮组分及剖面分布的影响 [J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 740-747.
Zhang Y L, Chen W F, Yu N, *et al.* Effect of long-term land use on fractionation and profile distribution of organic nitrogen in aquatic brown soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 740-747.
- [11] 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.
- [12] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 [J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1914-1920.
Yang C D, Zong Y T, Lu S G. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1914-1920.
- [13] 向书江, 余添, 熊子怡, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 [J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6067-6077.
Xiang S J, Yu L, Xiong Z Y, *et al.* Effects of combined application of biochar with chemical fertilizers and organic fertilizers on nutrients and phosphorus forms in purple soils [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 6067-6077.
- [14] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 [J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4327-4337.
Luo M, Tian D, Gao M, *et al.* Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4327-4337.
- [15] 王舒, 王子芳, 龙翼, 等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2406-2415.
Wang S, Wang Z F, Long Y, *et al.* Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2406-2415.
- [16] Laird D, Fleming P, Wang B Q, *et al.* Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3-4): 436-442.
- [17] 李坤权, 李焱, 郑正, 等. 高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能 [J]. 环境科学, 2013, 34(1): 328-335.
Li K Q, Li Y, Zheng Z, *et al.* Preparation, characterization and adsorption performance of high surface area biomass-based activated carbons [J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 328-335.
- [18] 王红, 夏雯, 卢平, 等. 生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 [J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3944-3952.
Wang H, Xia W, Lu P, *et al.* Adsorption characteristics of biochar on heavy metals (Pb and Zn) in soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3944-3952.
- [19] 褚继登, 闫慧峰, 王树声, 等. 化肥减量配施生物炭对植烟土壤氮素淋失的影响 [J]. 中国烟草科学, 2022, 43(4): 40-47.
Chu J D, Yan H F, Wang S S, *et al.* Effects of reduced fertilization and biochar application on nitrogen leaching from tobacco-growing soils [J]. Chinese Tobacco Science, 2022, 43(4): 40-47.
- [20] 李玥, 余亚琳, 张欣, 等. 连续施用炭基肥及生物炭对棕壤有机氮组分的影响 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2903-2909.
Li Y, Yu Y L, Zhang X, *et al.* Effects of continuous application of biochar-based fertilizer and biochar on organic nitrogen fractions in brown soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(10): 2903-2909.
- [21] 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: 118435.
- [22] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1110-1118.
Xu Y X, He L L, Liu Y X, *et al.* Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1110-1118.
- [23] 徐广平, 沈育伊. 农林废弃物制备生物炭实践与应用 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2022.
Xu G P, Shen Y Y. Practice and application of preparing biochar from agricultural and forestry wastes [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2022.
- [24] 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 等. 生物质炭对双季水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3799-3807.
Liu J Y, Qiu H S, Tang H, *et al.* Effects of biochar amendment on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in paddy soils [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3799-3807.
- [25] 徐广平, 沈育伊, 滕秋梅, 等. 桉树人工林生态环境效应研究 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2021.
Xu G P, Shen Y Y, Teng Q M, *et al.* Research on ecological environmental effect of eucalyptus plantation [M]. Nanning: Guangxi Science & Technology Publishing House, 2021.
- [26] Bruun S, Jensen E S, Jensen L S. Microbial mineralization and assimilation of black carbon: Dependency on degree of thermal alteration [J]. Organic Geochemistry, 2008, 39(7): 839-845.
- [27] 张美芝, 耿焯函, 张薇, 等. 秸秆生物炭在农田中的应用研究综述 [J]. 中国农学通报, 2021, 37(21): 59-65.

- Zhang M Z, Geng Y H, Zhang W, *et al.* The role of straw biochar in farmland; a review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(21): 59-65.
- [28] 段春燕. 施用桉树枝条生物炭对桂北桉树人工林土壤氮组分及微生物学特征的影响 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2020.
Duan C Y. Effects of eucalyptus branches biochar application on soil nitrogen components and microbiological characteristics of eucalyptus plantation in Northern Guangxi[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2020.
- [29] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 [J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3393-3400.
Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- [30] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [31] 龙泽华, 王晶, 侯振安. 秸秆炭化还田和施氮量对棉田土壤有机氮组分的影响 [J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2019, **37**(2): 154-161.
Long Z H, Wang J, Hou Z A. Effects of cotton straw biochar returning and N application rate on soil organic nitrogen fractions in cotton field [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, **37**(2): 154-161.
- [32] Han F P, Ren L L, Zhang X C. Effect of biochar on the soil nutrients about different grasslands in the Loess Plateau [J]. CATENA, 2016, **137**: 554-562.
- [33] 张云舒, 唐光木, 龙晓双, 等. 生物炭一次性施入对灌耕风沙土壤性质及玉米产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2021, **39**(4): 137-141.
Zhang Y S, Tang G M, Long X S, *et al.* Effects of one-time biochar input on soil properties and corn yield in irrigation sandy soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, **39**(4): 137-141.
- [34] 胡琛, 贺云龙, 黄金莲, 等. 生物炭和氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸及其理化性质的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, **49**(9): 77-82.
Hu C, He Y L, Huang J L, *et al.* Effects of biochar and nitrogen deposition on soil respiration and physical and chemical properties of larch gmelinii plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, **49**(9): 77-82.
- [35] 李菊梅, 李生秀. 可矿化氮与各有机氮组分的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, **9**(2): 158-164.
Li J M, Li S X. Relation of mineralizable N to organic N components[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, **9**(2): 158-164.
- [36] 樊晓东, 孟会生. 有机肥和化肥配施生物炭对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响 [J]. 山西农业科学, 2019, **47**(11): 1960-1964.
Fan X D, Meng H S. Effect of organic fertilizer and chemical fertilizer combined with biochar on nitrogen forms of reclaimed soil in coal mining subsidence area [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, **47**(11): 1960-1964.
- [37] 高晓宁, 韩晓日, 刘宁, 等. 长期定位施肥对棕壤有机氮组分及剖面分布的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, **42**(8): 2820-2827.
Gao X N, Han X R, Liu N, *et al.* Effects of long-term fertilization on organic nitrogen forms and their distribution in profile of a brown soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, **42**(8): 2820-2827.
- [38] Zhu L X, Xiao Q, Shen Y F, *et al.* Effects of biochar and maize straw on the short-term carbon and nitrogen dynamics in a cultivated silty loam in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(1): 1019-1029.
- [39] Gundale M J, Nilsson M C, Pluchon N, *et al.* The effect of biochar management on soil and plant community properties in a boreal forest [J]. GCB Bioenergy, 2016, **8**(4): 777-789.
- [40] 魏春辉, 任奕林, 刘峰, 等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展 [J]. 河南农业科学, 2016, **45**(3): 14-19.
Wei C H, Ren Y L, Liu F, *et al.* Research progress of application of biochar and biochar-based fertilizer in agriculture [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, **45**(3): 14-19.
- [41] 卓苏能, 文启孝. 土壤未知态氮 [J]. 土壤学进展, 1992, **20**(2): 11-19, 33.
- [42] 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.
- [43] Farrell M, Hill P W, Farrar J, *et al.* Seasonal variation in soluble soil carbon and nitrogen across a grassland productivity gradient [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(4): 835-844.
- [44] Nguyen T H, Shindo H. Effects of different levels of compost application on amounts and distribution of organic nitrogen forms in soil particle size fractions subjected mainly to double cropping [J]. Agricultural Sciences, 2011, **2**(3): 213-219.
- [45] 郝晓晖, 刘守龙, 童成立, 等. 长期施肥对两种稻田土壤微生物量氮及有机氮组分的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, **40**(4): 757-764.
Hao X H, Liu S L, Tong C L, *et al.* The influence of long-term fertilization on microbial biomass nitrogen and organic nitrogen fractions in paddy soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, **40**(4): 757-764.
- [46] Schmidt B H M, Kalbitz K, Braun S, *et al.* Microbial immobilization and mineralization of dissolved organic nitrogen from forest floors [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(8): 1742-1745.
- [47] Amoakwah E, Arthur E, Frimpong K A, *et al.* Biochar amendment influences tropical soil carbon and nitrogen lability [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, **21**(4): 3567-3579.
- [48] 郭书亚, 尚赏, 张艳, 等. 生物炭施用五年后对土壤生物化学特性及夏玉米产量的影响 [J]. 土壤与作物, 2022, **11**(3): 290-297.
Guo S Y, Shang S, Zhang Y, *et al.* Effects of biochar application after five years on soil biochemical properties and summer maize yield [J]. Soils and Crops, 2022, **11**(3): 290-297.
- [49] Tang Z Q, Zhang L Y, He N, *et al.* Influence of planting methods and organic amendments on rice yield and bacterial communities in the rhizosphere soil [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, **13**, doi: 10.3389/fmicb.2022.918986.
- [50] 李子玉, 张小均, 刘慧, 等. 新疆绿洲连作棉田土壤活性有机氮组分的变化 [J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2022, **40**(3): 291-297.
Li Z Y, Zhang X J, Liu H, *et al.* The change about soil active organic nitrogen of continuous cropping cotton fields in Xinjiang [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2022, **40**(3): 291-297.
- [51] Zhang M, Liu Y L, Wei Q Q, *et al.* Biochar enhances the retention capacity of nitrogen fertilizer and affects the diversity of

- nitrifying functional microbial communities in karst soil of southwest China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **226**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112819.
- [52] 党亚爱, 王立青, 张敏. 黄土高原南北主要类型土壤氮组分相关关系研究 [J]. *土壤*, 2015, **47**(3): 490-495.
- Dang Y A, Wang L Q, Zhang M. Relationship of components of soil nitrogen for typical soils from north to south on the Loess Plateau [J]. *Soils*, 2015, **47**(3): 490-495.
- [53] 杜晓玉, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 华北地区施用有机肥对土壤氮组分及农田氮流失的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2011, (6): 13-19.
- Du X Y, Xu A G, Ji H J, *et al.* Effects of manure on soil nitrogen components and nitrogen loss from farmland in North China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (6): 13-19.
- [54] Qualls R G. Comparison of the behavior of soluble organic and inorganic nutrients in forest soils [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, **138**(1-3): 29-50.
- [55] Yuan S N, Tan Z X, Huang Q Y. Migration and transformation mechanism of nitrogen in the biomass- biochar- plant transport process [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **85**: 1-13.
- [56] Luo C Y, Yang J J, Chen W, *et al.* Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: results from field experiments [J]. *Geoderma*, 2020, **369**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114323.
- [57] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 509-517.
- Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 509-517.
- [58] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems- a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, **11**(2): 403-427.
- [59] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物炭环境行为与环境效应 [J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(4): 977-982.
- Liu X Y, Liu W, Wu W X, *et al.* Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(4): 977-982.
- [60] 杨星莲, 刘磊, 廖萍, 等. 生物炭对双季水稻产量和土壤性状的持续效应 [J]. *江西农业大学学报*, 2021, **43**(3): 497-503.
- Yang X L, Liu L, Liao P, *et al.* Persistent effects of biochar application on yield and soil properties in a double rice-cropping system [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, **43**(3): 497-503.



CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jun-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)