

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
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·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	《环境科学》征稿简则(4132)
信息(4233, 4293, 4304)	

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响

杨彩迪, 卢升高*

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 为比较秸秆直接还田和炭化还田对亚热带典型红壤酸度、养分及交换性能的动态影响, 试验以水稻和油菜秸秆为材料, 设置7个盆栽处理: 空白(CK)、水稻秸秆直接还田(R1B0)、水稻秸秆 350℃ 炭化还田(R1B1)、水稻秸秆 550℃ 炭化还田(R1B2)、油菜秸秆直接还田(R2B0)、油菜秸秆 350℃ 炭化还田(R2B1)和油菜秸秆 550℃ 炭化还田(R2B2), 秸秆按1%和相应的生物质炭施入土壤, 进行水稻秧苗期、分蘖期、灌浆期和成熟期这4个时期采集土壤, 分析土壤酸度、养分和交换性能的动态变化。结果表明, 红壤 pH、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量随生长期呈现减小的趋势, 而有机质、CEC 和各交换性盐基离子呈现增加的趋势。秸秆直接还田和炭化还田均提高土壤 pH, 降低交换性酸总量, 同时提高有机质含量及交换性能, 且作用效果随生长期增大。成熟期时秸秆炭化还田对各项指标的作用效果均好于秸秆直接还田, 秸秆原料和炭化温度对各项土壤性质的影响不同, 油菜秸秆生物质炭在提高土壤 pH、有机质和 CEC 含量方面略好于水稻秸秆生物质炭。土壤酸度、养分含量和交换性能等因子的相关分析表明, 土壤交换性酸与有机质呈极显著负相关关系 ($R = -0.912, P < 0.01$), 与 CEC 呈显著负相关关系 ($R = -0.866, P < 0.05$), CEC 和有机质呈显著正相关关系 ($R = 0.833, P < 0.05$), 说明三者之间密切相关。研究表明, 秸秆直接还田和炭化还田均可以达到改良土壤酸性和提高养分含量的效果, 在等量秸秆情况下, 秸秆炭化还田对阻控土壤酸化、提高有机质含量和 CEC 的效果比秸秆直接还田较为明显。

关键词: 秸秆还田; 生物炭; 土壤酸度; 养分; 交换性能; 动态变化

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4246-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202002213

Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil

YANG Cai-di, LU Sheng-gao*

(College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To compare the dynamic effects of straw and corresponding biochar on soil acidity, nutrients, and exchangeable capacity in red soil, a pot experiment was performed. The treatments included control (CK), rice straw (R1B0), rice straw biochar prepared at 350℃ (R1B1) and 550℃ (R1B2), rape stalk (R2B0), and rape stalk biochar prepared at 350℃ (R2B1) and 550℃ (R2B2). Straw at 1% and corresponding biochar were added to a strongly acidic red soil. The rice was planted as the experimental crop. Soils were collected at the seedling, tillering, filling and mature stages of rice growth, respectively. The changes in soil pH, exchangeable acidity, organic matter, nutrients (NH_4^+ -N and NO_3^- -N), and exchangeable cations in soils were measured. The results showed that soil pH, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N concentrations decreased with the growth period of rice, while the organic matter content and cation exchange capacity (CEC) increased. Direct returning of straw and biochar could increase soil pH, organic matter content, and exchangeable cations content, and reduce the total amount of exchangeable acids. In the mature stage of rice, rice straw and rape stalk biochar at 350℃ increased the soil pH by 0.29 and 0.42, respectively, compared to the control treatment. Similarly, biochar decreased the exchangeable acidity and exchangeable Al^{3+} content significantly compared to the direct returning treatments of straw. The exchangeable acidity and exchangeable Al^{3+} contents of soils in R1B2 and R2B1 treatments decreased by 54.8% and 58.9%, respectively, compared to the control treatment. The soil organic matter (SOM) content and CEC in biochar treatments were significantly higher than those in direct returning treatments of straw. Overall, the effects of rape stalk biochar on soil properties were slightly stronger than those of rice straw. The correlation analysis showed that soil exchangeable acids had a significantly negative correlation with organic matter ($R = -0.912, P < 0.01$), and CEC ($R = -0.866, P < 0.05$). The CEC in soils was positively related to organic matter ($R = 0.833, P < 0.05$). Direct returning of straw and biochar applications can effectively improve soil acidity and increase nutrient contents. The effects of straw biochar on soils were stronger than the direct returning of straw in decreasing soil acidity, and increasing soil organic matter content and exchangeable capacity in acidic soils.

Key words: straw returning; biochar; soil acidity; nutrients; exchange capacity; dynamics

随着人类活动的加剧,近20年来土壤酸化问题愈加严重,成为限制农业发展的重要因子^[1]。土壤酸化不仅造成土壤理化性质恶化和养分流失,还制约着土壤中营养元素的转化和释放,严重影响农作

收稿日期: 2020-02-29; 修订日期: 2020-03-16

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C02008)

作者简介: 杨彩迪(1995~),女,博士研究生,主要研究方向为土壤物理、土壤酸化与养分互作机制, E-mail: 11714043@zju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lusg@zju.edu.cn

物的生长发育及农业的可持续发展^[2]. 酸性土壤分布区域大多水热资源丰富, 植物生产潜力巨大, 对酸性土壤的改良不仅可以提高农业生产力, 同时对保护生态环境和改善农产品品质具有重要意义^[1]. 农作物秸秆的不合理配置既浪费资源又污染环境^[3]. 作为一种可再生生物质资源, 秸秆还田不仅可以提高土壤养分含量, 还能改善土壤酸化、板结等问题, 为发展有机农业提供条件^[4]. 已有研究表明, 秸秆还田可以显著降低土壤容重, 提高土壤孔隙度, 同时增加土壤中水稳性大团聚体的数量, 改善土壤结构^[5,6]. 张雅洁等^[7]的研究表明单独秸秆还田和秸秆与肥料配施均可以提高土壤有机质含量. 曹湛波等^[8]的研究表明不同来源的秸秆还田后效果不同, 玉米和水稻等秸秆较黄豆秸秆对土壤微生物活性的促进作用显著. 生物质炭是秸秆、木屑和动物粪便等在完全或部分缺氧的条件下, 热解炭化产生的一种含碳量丰富、稳定性高的物质^[9]. 在改良土壤理化性质方面, 生物质炭的多孔结构和巨大表面积可以增加土壤孔隙度, 降低土壤容重, 提高田间持水量^[10]. 生物质炭呈弱碱性, 具有较高的阳离子交换量, 因此可以提高酸性土壤 pH, 增加阳离子交换量和养分含量^[11]. 在固碳减排和土壤污染修复方面, 生物质炭通过施入稳定性碳来改变土壤碳库的自然平衡, 提高土壤碳库容量, 降低土壤呼吸强度和减少温室气体排放, 同时生物质炭对重金属有很高的吸附容量, 可以降低重金属元素的生物有效性, 对农药残留的吸收和固持可以减少污染物下渗或地表径流^[12~14]. 赵海成等^[3]通过研究连年秸秆与生物炭还田对盐碱土壤理化性状的影响发现, 各处理均显著提高了土壤有效磷和速效钾, 且以秸秆还田提高的幅度更大. 而郭春雷等^[4]的研究表明在等秸秆量和等氮磷钾养分条件下, 秸秆炭化还田对降低土壤酸度, 提高土壤交换性能的效果好于直接还田. Eduah 等^[15]通过研究不同热解温度下生物炭对土壤磷的有效性影响发现, 300~450℃下制备的生物炭可有效降低磷的吸附性能, 提高磷的生物利用度, 特别是在酸性土壤中.

目前国内外的研究多为秸秆还田和生物质炭对土壤改良的影响状态, 但秸秆原料和炭化温度对土壤性质影响的对比研究较少, 特别是作物种植过程中土壤性质的动态变化. 本文以亚热带典型红壤为盆栽试验的研究对象, 选取水稻和油菜收割后的秸秆为原料, 将两种秸秆原料分别在 350℃ 和 550℃ 下制备成生物质炭, 进行秸秆直接还田和炭化还田的对比试验, 分析等量秸秆以两种方式还田对土壤酸度、养分和交换性能的影响, 以期对土壤酸化改良及

秸秆生物质资源合理利用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验用红壤取自浙江省余姚市低丘区 (N29°45.6', E121°07.2'), 该地属于亚热带季风气候, 四季分明, 雨量充沛, 年平均气温 16.2℃, 年平均降水量 1 547 mm. 水稻秸秆和油菜秸秆取自浙江省乐清市 (N28°07.2', E120°58.5'), 分别于 2017 年 11 月和 2018 年 5 月作物收割后采集. 将两种作物秸秆带回室内用蒸馏水清洗干净, 放入 105℃ 烘箱中烘 24 h, 将烘干的原材料磨碎过 2 mm 筛备用.

1.2 生物质炭制备和盆栽试验

将过筛后的两种作物秸秆用铝箔包好置于马弗炉中, 分别升温至 350℃ 和 550℃ 加热 2 h, 冷却至室温后取出生物质炭产品, 计算生物质炭的产率, 研磨过 2 mm 和 0.15 mm 筛, 放在封口袋里备用. 水稻秸秆及 350℃ 和 550℃ 制备的生物质炭分别记为 R1B0、R1B1 和 R1B2, 油菜秸秆及其制备的生物质炭分别记为 R2B0、R2B1 和 R2B2. 盆栽试验每盆土壤为 5 kg, 按照 0.15 g·kg⁻¹ (尿素, 以 N 计)、0.10 g·kg⁻¹ (氯化钾, 以 K 计) 施入氮钾底肥, 按 1% 秸秆和等量秸秆制备的生物质炭与土壤均匀混合, 设计 CK、R1B0、R1B1、R1B2、R2B0、R2B1 和 R2B2 共 7 个处理, 每个处理 3 个重复. 土壤保持田间含水量老化一个月后, 插入水稻秧苗, 在水稻 4 个生长期 (秧苗期、分蘖期、灌浆期和成熟期) 分别使用盆栽取样器沿对角线在距离根部 5 cm 处取两个点, 混匀后测定土壤各项指标.

1.3 土壤、秸秆和生物质炭分析

土壤基本理化性质测定采用常规方法^[16]. pH 值 1:2.5 土水比 pH 计 (Metler Toledo, 下同) 测定; 交换性酸用 KCl 提取、NaOH 滴定法测定. 有机质用重铬酸钾氧化法测定; NH₄⁺-N 用 KCl 提取, 靛酚蓝比色法测定; NO₃⁻-N 用 CaCl₂ 提取, 紫外分光光度法测定. 土壤阳离子交换量 (CEC) 用乙酸铵交换法测定, 交换性 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 用原子吸收分光光度计, 交换性 K⁺ 和 Na⁺ 用火焰光度计测定. 总磷 NaOH 熔融法提取, 有效磷 NaHCO₃ 提取 (Olsen 法), 钼锑抗比色法测定. 生物质炭元素组成用元素分析仪 (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) 测定. 秸秆和生物质炭 pH 1:20 固液比 pH 计测定. 每个指标重复 3 次, 取平均值. 供试土壤、秸秆和生物质炭的基本理化性质如表 1.

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 Origin 2017 进行数据整理

表 1 供试土壤、秸秆和生物质炭的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil, straw, and biomass charcoal

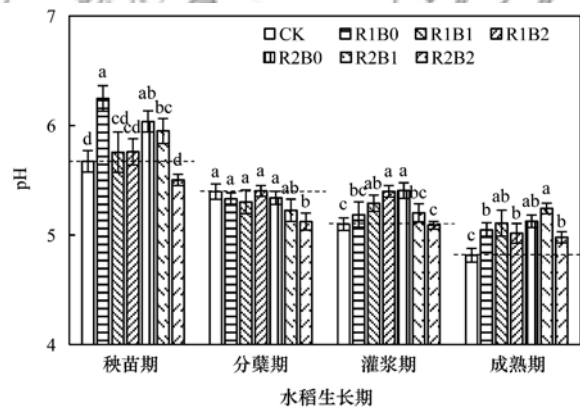
项目	产率/%	pH	TOC /g·kg ⁻¹	Olsen-P /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	所占质量分数/%			
						N	C	H	S
红壤	—	4.61	8.25	0.03	0.17	0.03	0.43	1.03	0.01
R1B0	—	8.93	289.05	0.35	1.28	1.09	37.79	5.13	0.11
R1B1	41.90	9.94	420.08	0.53	1.62	0.91	48.71	3.55	0.26
R1B2	31.21	11.11	422.83	0.97	2.57	0.77	48.53	2.08	0.24
R2B0	—	7.71	370.43	0.52	1.63	1.51	40.46	5.76	0.64
R2B1	34.07	10.58	603.20	0.64	2.60	1.01	56.21	3.42	0.93
R2B2	28.67	10.76	563.33	0.88	3.11	0.89	60.26	2.23	1.20

和绘图,采用 SPSS 16.0 进行统计分析,利用 Duncan 多重比较进行多组处理间差异显著性检验分析($P=0.05$).

2 结果与分析

2.1 秸秆直接还田和炭化还田对红壤 pH 的动态影响

秸秆直接还田和炭化还田对水稻不同生长期红壤 pH 的影响见图 1. 红壤 pH 随水稻生长期呈现降低的趋势. 与对照相比,秧苗期时秸秆直接还田显著提高土壤 pH,而炭化还田不明显;成熟期时秸秆直接还田和炭化还田均显著提高土壤 pH, 350℃ 制备的生物质炭效果较好,水稻和油菜秸秆生物质炭分别较对照提高 pH 0.29 和 0.42 个单位.



相同小写字母表示不同处理间无显著差异($P>0.05$),不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$),下同

图 1 秸秆直接还田和炭化还田对水稻不同生长期红壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of direct returning of straw and biochar on pH of red soil at different stages of rice growth

2.2 秸秆直接还田和炭化还田对红壤交换性酸度的动态影响

图 2 是秸秆直接还田和炭化还田对红壤交换性酸度的动态影响,可以看出,土壤交换性酸总量和交换性 Al^{3+} 随水稻生长期呈现降低的趋势. 秸秆直接还田和炭化还田在 4 个生长期均可以降低交换性酸总量和交换性 Al^{3+} 含量,灌浆期和成熟期

效果显著,成熟期时秸秆炭化处理效果显著高于秸秆直接还田, R1B2 和 R2B1 处理的土壤交换性酸总量分别较对照降低 54.8% 和 58.9%. 而土壤交换性 H^+ 随生长期变化规律为先减小后增加,成熟期水稻秸秆直接还田和炭化还田显著($P<$

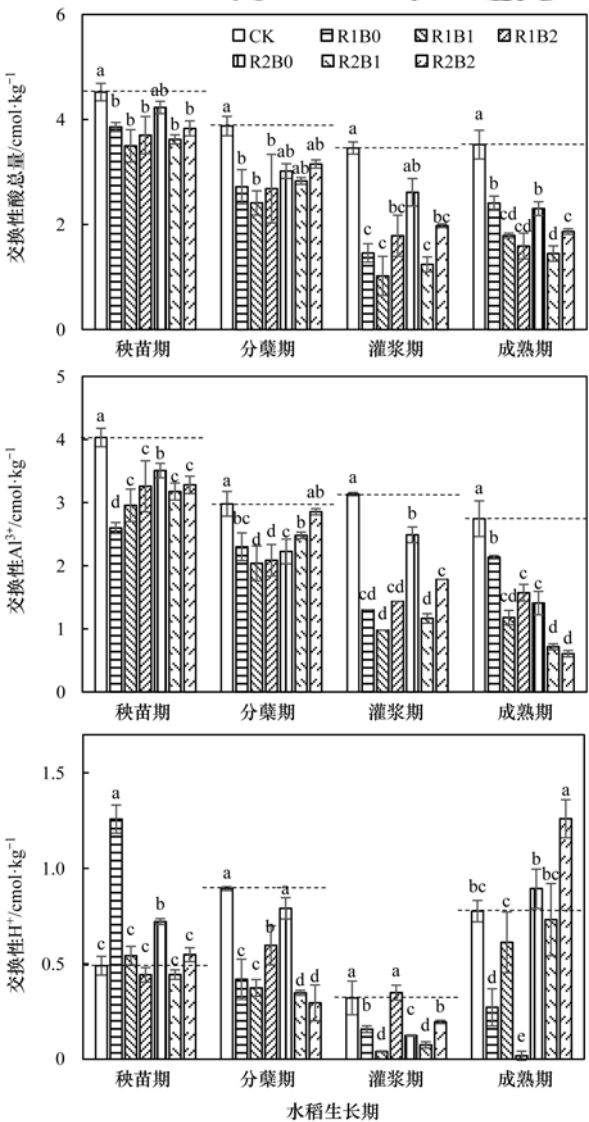


图 2 秸秆直接还田和炭化还田对水稻不同生长期红壤交换性酸度的影响

Fig. 2 Effects of direct returning of straw and biochar on exchangeable acidity of red soil at different stages of rice growth

0.05)降低土壤交换性 H^+ 含量,而油菜秸秆处理则出现相反的效果.

2.3 秸秆直接还田和炭化还田对红壤养分的动态影响

从图 3 可见,红壤 SOM 含量随水稻生长期呈现增加的趋势,而 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量呈现降低的趋势. 与对照相比,水稻秧苗期、分蘖期和成熟期时不同处理均显著提高 SOM 含量,成熟期时炭化还田处理效果显著($P < 0.05$)好于秸秆直接还田,在最优处理 R1B2 和 R2B2 下分别较对照显著($P < 0.05$)提高 58.5% 和 57.2%. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤 NH_4^+-N 含量的影响规律是前期升高,后期降低,成熟期时不同处理的 NH_4^+-N 含量较对照显著($P < 0.05$)降低. 不同处理对 NO_3^--N 的影响规律因秸秆原料不同而不同,其中水稻秸秆及炭化处理表现为前期升高,后期降低,而油菜秸秆炭化还田在不同生长期均显著($P < 0.05$)提高 NO_3^--N 含量,且 R2B1

处理效果较好.

2.4 秸秆直接还田和炭化还田对红壤交换性能的动态影响

表 2 是秸秆直接还田和炭化还田对水稻不同生长期红壤交换性能的影响. 可以看出,除交换性 K^+ 外,土壤 CEC 与交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 含量随水稻生长期均呈现增加的趋势. 成熟期时秸秆炭化还田的土壤 CEC 显著($P < 0.05$)高于秸秆直接还田,在最优处理 R1B2 和 R2B1 下分别较对照提高 50.9% 和 67.4%. 不同生长期的交换性 Ca^{2+} 含量均在 R1B2 和 R2B1 处理下较高,显著($P < 0.05$)高于秸秆直接还田. 成熟期时交换性 Mg^{2+} 和 Na^+ 也表现为秸秆炭化还田处理显著($P < 0.05$)高于秸秆直接还田. 土壤交换性 K^+ 含量以两种秸秆 550℃ 炭化温度处理下较高. 整体来看,秸秆直接还田和炭化还田均提高土壤交换性能,且以油菜秸秆 350℃ 炭化还田的效果较好.

表 2 秸秆直接还田和炭化还田对水稻不同生长期红壤交换性能的影响/ $cmol \cdot kg^{-1}$

Table 2 Effects of direct returning of straw and biochar on exchange performance of red soil at different stages of rice growth/ $cmol \cdot kg^{-1}$

水稻生长期	处理	CEC	交换性 K^+	交换性 Na^+	交换性 Ca^{2+}	交换性 Mg^{2+}
秧苗期	CK	7.00 ± 1.12bc	1.71 ± 0.03bc	0.39 ± 0.15b	3.16 ± 0.13ab	0.79 ± 0.01ab
	R1B0	5.74 ± 0.41c	1.86 ± 0.11bc	0.71 ± 0.16a	2.58 ± 0.12b	0.59 ± 0.01b
	R1B1	6.11 ± 0.78c	1.57 ± 0.14c	0.80 ± 0.16a	2.92 ± 0.36ab	0.82 ± 0.12ab
	R1B2	7.37 ± 1.12b	2.14 ± 0.26b	0.86 ± 0.17a	3.45 ± 0.56ab	0.92 ± 0.14a
	R2B0	5.38 ± 0.51c	1.75 ± 0.07bc	0.71 ± 0.17a	2.32 ± 0.22b	0.60 ± 0.04b
	R2B1	7.74 ± 0.95ab	2.14 ± 0.03b	0.71 ± 0.30a	4.03 ± 0.55a	0.87 ± 0.07ab
	R2B2	8.46 ± 0.24a	2.70 ± 0.05a	0.89 ± 0.04a	3.97 ± 0.15a	0.90 ± 0.00a
分蘖期	CK	6.99 ± 0.33c	0.87 ± 0.15b	0.57 ± 0.03d	4.53 ± 0.14b	1.01 ± 0.01b
	R1B0	7.47 ± 1.07c	1.07 ± 0.11ab	1.07 ± 0.31ab	4.47 ± 0.30b	0.86 ± 0.04b
	R1B1	7.42 ± 0.30c	1.38 ± 0.01ab	0.72 ± 0.02c	4.29 ± 0.26b	1.02 ± 0.01b
	R1B2	9.85 ± 1.48a	1.77 ± 0.28a	0.96 ± 0.29b	5.85 ± 0.56a	1.27 ± 0.16a
	R2B0	6.91 ± 0.56c	1.29 ± 0.02ab	0.70 ± 0.02c	4.02 ± 0.35b	0.91 ± 0.17b
	R2B1	8.73 ± 1.16b	1.30 ± 0.12ab	1.12 ± 0.14a	5.41 ± 0.77ab	0.89 ± 0.14b
	R2B2	8.73 ± 0.73b	1.68 ± 0.21a	0.72 ± 0.00c	5.26 ± 0.44ab	1.06 ± 0.08b
灌浆期	CK	8.55 ± 1.24cd	1.07 ± 0.06c	0.46 ± 0.02c	5.83 ± 1.02c	1.20 ± 0.14c
	R1B0	8.75 ± 0.66cd	1.22 ± 0.07bc	0.51 ± 0.03c	5.96 ± 0.52c	1.06 ± 0.04cd
	R1B1	10.01 ± 2.23bc	1.46 ± 0.07ab	1.06 ± 0.17a	6.04 ± 1.66bc	1.45 ± 0.03ab
	R1B2	12.19 ± 1.57a	1.42 ± 0.09ab	0.56 ± 0.06c	8.65 ± 1.21a	1.56 ± 0.21a
	R2B0	7.73 ± 0.46d	1.13 ± 0.04bc	0.61 ± 0.10c	5.04 ± 0.30c	0.95 ± 0.03d
	R2B1	11.27 ± 1.27ab	1.07 ± 0.19c	1.20 ± 0.08a	7.69 ± 0.83ab	1.32 ± 0.16b
	R2B2	9.35 ± 0.67cd	1.71 ± 0.02a	0.77 ± 0.01b	5.80 ± 0.56c	1.08 ± 0.09cd
成熟期	CK	7.27 ± 0.39d	1.45 ± 0.03de	0.71 ± 0.02d	4.22 ± 0.3c	0.88 ± 0.04bc
	R1B0	7.34 ± 0.55d	1.20 ± 0.03e	0.80 ± 0.06cd	4.50 ± 0.43c	0.84 ± 0.03c
	R1B1	9.72 ± 0.43c	1.53 ± 0.10cd	1.14 ± 0.18bc	5.97 ± 0.15abc	1.08 ± 0.01ab
	R1B2	10.97 ± 0.89b	1.84 ± 0.04b	1.43 ± 0.15b	6.46 ± 0.58ab	1.23 ± 0.12a
	R2B0	8.78 ± 0.16c	1.78 ± 0.00bc	0.95 ± 0.09cd	5.17 ± 0.04bc	0.89 ± 0.02bc
	R2B1	12.17 ± 0.38a	1.51 ± 0.12cd	2.33 ± 0.08a	7.14 ± 0.17a	1.20 ± 0.02a
	R2B2	9.96 ± 1.72bc	2.56 ± 0.13a	2.05 ± 0.39a	4.31 ± 1.13c	1.04 ± 0.08bc

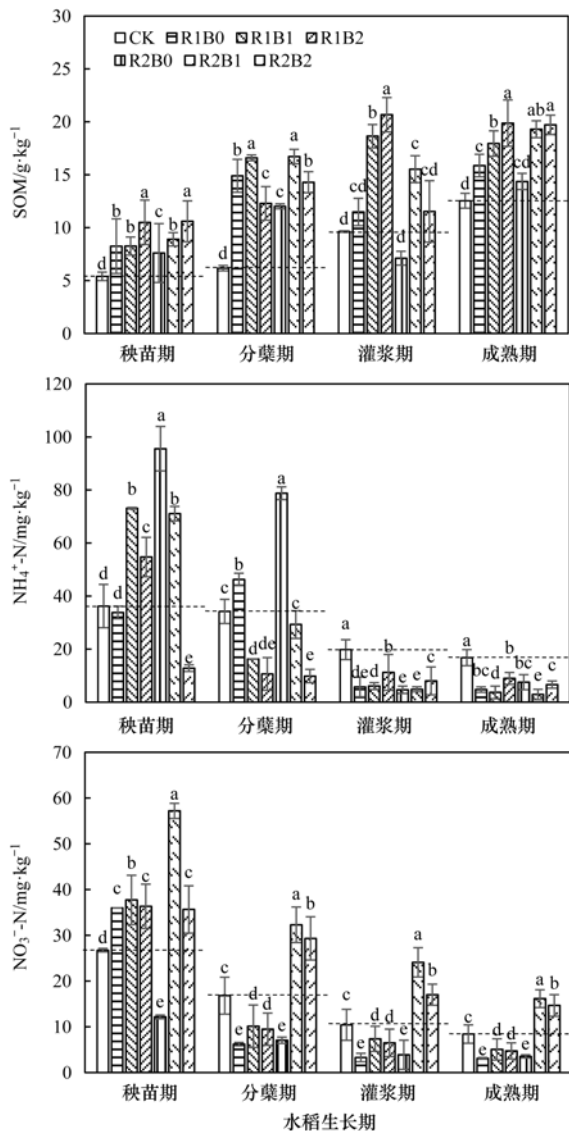


图3 秸秆直接还田和炭化还田对水稻不同生长期红壤 SOM、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量的影响

Fig. 3 Effects of direct returning of straw and biochar on SOM, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N of red soil at different stages of rice growth

3 讨论

土壤酸化是红壤地区土壤退化的主要原因,施用有机肥和生物质炭是改良土壤酸化的重要措施^[17,18]. 秸秆和生物质炭中含有的碱性物质及有机氮的矿化作用可提高土壤 pH; 而氮的硝化作用和盐基离子的消耗降低土壤 pH^[19]. 本研究中,红壤 pH 随水稻生长期呈现降低的趋势,说明氮的硝化作用和盐基离子消耗引起土壤酸化. 秸秆直接还田和炭化还田处理可提高土壤 pH,降低交换性酸含量,且炭化还田效果更为明显,这是由于秸秆中的碱性物质在热解条件下富集到生物炭中,同时产生新的碱性物质(碳酸盐和有机官能团等)^[20],而秸秆在土壤中的分解会积累一定的酸性产物^[21],这与郭春雷等^[4]的研究结果一致. 成熟期时两种秸秆生物质炭

均以 350℃ 炭化处理效果较好,且油菜秸秆生物质炭好于水稻秸秆生物质炭,这与不同生物质炭 pH 的变化规律不同,说明生物质炭改良红壤酸性受到除生物炭本身性质外的气候、作物和根系分泌物等多因素的影响.

秸秆和生物质炭含有的氮、磷、钾、钙、镁和硫等营养元素,可直接提高土壤养分含量,促进团粒结构形成^[9~11]. 有研究表明,生物质炭富含的性质稳定的非活性有机碳是土壤有机质含量提高的直接因素,且制备温度越高,炭化程度越高^[22]. 秸秆和生物质炭含碳量为 37.8%~60.3% (表 1),因此可以显著($P<0.05$)提高土壤 SOM 含量,秸秆炭化还田的效果明显好于直接还田,且随制备温度的提高而增加,这与生物质炭中的有机碳稳定性较高有关. 土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量随水稻生长期呈现减小的趋势,这是由于水稻生长会吸收利用部分有效氮^[23]. 成熟期时不同处理的 NH_4^+ -N 含量较对照显著降低,这是因为有机物料促进土壤微生物的活动,土壤矿化产生的 NH_4^+ -N 被微生物固定^[24]. 不同秸秆原料对 NO_3^- -N 的影响规律不同,其中水稻秸秆炭化还田表现为前期升高,后期降低,而油菜秸秆炭化还田在不同生长期均显著提高. 分析其原因可能是:土壤中 NO_3^- -N 很不稳定,在样品测定过程中极易转化丢失^[24];亚热带酸性土壤硝化速率分为不受基质控制和受基质控制两类:前者表现为零级反应,即 NH_4^+ -N 进入土壤不促进硝化速率,也不促进土壤酸化;后者表现为一级反应,即 NH_4^+ -N 进入土壤加速土壤硝化和酸化,而绝大多数酸性土壤(68.9%)的硝化不受基质(NH_4^+ -N 或 NH_3)供应的控制,加上秸秆原料与炭化温度的影响, NO_3^- -N 的变化规律因此更加复杂^[25]. 同时,秸秆和生物质炭对 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的吸附作用可以减少土壤有效氮的挥发和淋失;而二者的加入使土壤碱性提高,促进 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化, NO_3^- -N 极易挥发^[26]. 油菜秸秆生物质炭提高 NO_3^- -N 含量可能是因为 NH_4^+ -N 转化成 NO_3^- -N 的含量大于 NO_3^- -N 的吸附和挥发之和.

土壤交换性能与土壤物理、化学及生物性质的交互作用,是养分有效性的基础;交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 在维持土壤养分与缓冲土壤酸化中起到重要作用^[27]. 本研究中,秸秆炭化还田处理对提高土壤 CEC 的效果好于直接还田,这是由于生物质炭本身的碱性及其表面的含氧官能团能够吸收并中和土壤溶液中的 H^+ ,将 Al^{3+} 由活性态水解为惰性的氢氧化铝或羟基铝;同时生物质炭灰分中的

盐基离子与土壤中被吸附的 H^+ 和 Al^{3+} 发生阳离子交换作用,因此在改良土壤酸度的同时,增加土壤盐基离子总量^[28,29].各交换性盐基离子的关系为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \approx \text{K}^+ > \text{Na}^+$, Ca^{2+} 占绝大多数,其与土壤胶体中的 H^+ 交换会形成钙胶体,促进土壤胶体凝聚,有利于形成团粒结构,促进作物的养分吸收和积累.秸秆炭化还田较秸秆直接还田对提高土壤交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的效果更为明显,这是因为秸秆施入土壤中会腐解产生一定的盐基离子,但其在土壤中分解时间较长,养分释放较慢;而生物质炭中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等矿质元素以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,更易被土壤分解利用^[30,31].两种作物秸秆分别在 R1B2 和 R2B1 处理下对提高土壤交换性效果较好,且油菜秸秆效果更佳,这与不同秸秆原

料及其本身的组分差异有关,其中水稻秸秆生物质炭在制备温度较高时效果较好,而油菜秸秆正好相反^[8],生物质炭对土壤 CEC 的调节作用可能需要建立在一个长期施用的条件下^[21].结合土壤酸度、养分含量和交换性能等进行相关分析表明(表 3),土壤交换性酸与有机质呈极显著负相关关系($R = -0.912, P < 0.01$),与土壤 CEC 呈显著负相关关系($R = -0.866, P < 0.05$),CEC 和有机质呈显著正相关关系($R = 0.833, P < 0.05$),交换性 Mg^{2+} 、 Na^+ 和有机质呈显著正相关关系(相关系数分别为 $R = 0.841$ 和 $R = 0.802, P < 0.05$),由此证明,三者之间密切相关,秸秆直接还田和炭化还田通过降低交换性酸总量和提高土壤盐基饱和度等作用,从而达到改良土壤酸性,提高土壤养分含量的目的^[4,9].

表 3 水稻成熟期红壤酸度、养分和交换性能的相关性¹⁾

Table 3 Correlation of acidity, nutrients, and exchangeable properties of red soil in the mature stage of rice										
	pH	交换性酸	SOM	NH_4^+-N	NO_3^--N	交换性 Ca^{2+}	交换性 Mg^{2+}	交换性 K^+	交换性 Na^+	CEC
pH	1									
交换性酸	-0.754	1								
SOM	0.451	-0.912**	1							
NH_4^+-N	-0.865*	0.806*	-0.623	1						
NO_3^--N	0.129	-0.267	0.432	-0.130	1					
交换性 Ca^{2+}	0.727	-0.741	0.579	-0.499	0.181	1				
交换性 Mg^{2+}	0.415	-0.793*	0.841*	-0.353	0.420	0.833*	1			
交换性 K^+	-0.135	-0.318	0.478	0.003	0.440	-0.163	0.283	1		
交换性 Na^+	0.476	-0.727	0.802*	-0.488	0.847*	0.519	0.731	0.526	1	
CEC	0.626	-0.866*	0.833*	-0.513	0.551	0.846*	0.937**	0.345	0.865*	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关

4 结论

水稻与油菜秸秆直接还田和炭化还田处理下,土壤不同指标随水稻生长期呈现不同的变化规律,其中 pH、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量呈现降低的趋势,而 SOM、CEC 和各交换性盐基离子含量则相反.两种秸秆直接还田和炭化还田均可以提高红壤 pH,降低交换性酸总量,同时提高有机质含量及交换性能.成熟期时秸秆炭化还田对土壤各项性质的影响明显大于直接还田,其中 350℃ 炭化处理提高 pH 的效果较好,土壤 SOM 含量随炭化温度升高而增加,土壤 CEC 在 R1B2 和 R2B1 处理下效果较好.总体上,秸秆原料和炭化温度对土壤酸度、养分和交换性能可产生不同的影响,炭化还田对阻控土壤酸化的效果较好,油菜秸秆生物质炭的影响较水稻秸秆生物质炭明显.

参考文献:

[1] 沈仁芳,赵学强.酸性土壤可持续利用[J].农学学报,2019,9(3):16-20.
Shen R F, Zhao X Q. The sustainable use of acid soils[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(3): 16-20.

[2] 张福锁.我国农田土壤酸化现状及影响[J].民主与科学,2016,(6):26-27.
[3] 赵海成,郑桂萍,靳明峰,等.连年秸秆与生物炭还田对盐碱土壤理化性状及水稻产量的影响[J].西南农业学报,2018,31(9):1836-1844.
Zhao H C, Zheng G P, Jin M F, et al. Effects of successive straw and biochar residue incorporation on physical and chemical characters of saline alkali soil and rice yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(9): 1836-1844.
[4] 郭春雷,李娜,彭靖,等.秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1205-1213.
Guo C L, Li N, Peng J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(5): 1205-1213.
[5] Guo Z, Wang D Z. Long-term effects of returning wheat straw to croplands on soil compaction and nutrient availability under conventional tillage[J]. Plant, Soil and Environment, 2013, 59(6): 280-286.
[6] Madari B, Machado P L O A, Torres E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80(1/2): 185-200.
[7] 张雅洁,陈晨,陈曦,等.小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质

- 组成及不同形态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(11): 2155-2161.
- Zhang Y J, Chen C, Chen X, *et al.* Effects of wheat and rice straw returning on soil organic matter composition and content of different nitrogen forms in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(11): 2155-2161.
- [8] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- [9] Wrobel-Tobiszewska A, Boersma M, Sargison J, *et al.* Nutrient changes in potting mix and *Eucalyptus nitens* leaf tissue under macadamia biochar amendments [J]. Journal of Forestry Research, 2018, **29**(2): 383-393.
- [10] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3388-3396.
- Li Q Q, Xu C Y, Geng Z C, *et al.* Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of loess soil [J]. Environmental science, 2019, **40**(7): 3388-3396.
- [11] Cole E J, Zandvakili O R, Xing B S, *et al.* Effects of hardwood biochar on soil acidity, nutrient dynamics, and sweet corn productivity [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, **50**(14): 1732-1742.
- [12] Zhang L Y, Xiang Y Z, Jing Y M, *et al.* Biochar amendment effects on the activities of soil carbon, nitrogen, and phosphorus hydrolytic enzymes: a meta-analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(22): 22990-23001.
- [13] 李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 等. 多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 915-923.
- Li Y S, Ding S S, Yin Q Y, *et al.* Effect of long-term biochar application on soil respiration in flue-cured tobacco planting fields in Henan province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 915-923.
- [14] Wu H P, Lai C, Zeng G M, *et al.* The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, **37**(6): 754-764.
- [15] Eduah J O, Nartey E K, Abekoe M K, *et al.* Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures [J]. Geoderma, 2019, **341**: 10-17.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [17] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, *et al.* Nitrification and acidification from urea application in red soil (Ferralic Cambisol) after different long-term fertilization treatments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(9): 1526-1536.
- [18] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53**(1): 202-212.
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(1): 202-212.
- [19] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Dai Z M. The effects of biochar on acid soil improvement and the related biochemical mechanisms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [20] Yuan J H, Xu R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China [J]. Soil Research, 2012, **50**(7): 570-578.
- [21] 战秀梅, 彭靖, 王月, 等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(6): 1633-1641.
- Zhan X M, Peng J, Wang Y, *et al.* Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physicochemical properties and peanut yields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(6): 1633-1641.
- [22] Tan Z X, Yuan S N. The effect of preparing temperature and atmosphere on biochar's quality for soil improving[J]. Waste and Biomass Valorization, 2017, **10**(5): 1395-1405.
- [23] 方明, 任天志, 赖欣, 等. 施用生物炭对红壤和潮土种植小白菜氮素利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 123-133.
- Fang M, Ren T Z, Lai X, *et al.* Effect of biochar application on crop nitrogen utilization in red and fluoro-aquic soil [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019, (6): 123-133.
- [24] 李艳. 施用豆科绿肥对砖红壤酸度及交换性能的动态影响[D]. 海口: 海南大学, 2011.
- Li Y. Research on the temporal dynamics of Latosol acidity and exchangeable ability after leguminous green manures application [D]. Haikou: Hainan University, 2011.
- [25] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? [J]. Plant and Soil, 2007, **297**(1-2): 213-221.
- [26] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota-a review [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(9): 1812-1836.
- [27] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, *et al.* A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams[J]. Forest Ecology and Management, 2011, **262**(2): 95-104.
- [28] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(5): 1402-1417.
- Yuan S, Zhao L X, Meng H B, *et al.* The main types of biochar and their properties and expectative researches [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, **22**(5): 1402-1417.
- [29] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, *et al.* Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, **59**(6): 2501-2510.
- [30] 韩晓日, 蒋海英, 郭春雷, 等. 施用新型多元素螯合肥对玉米产量、养分吸收与利用的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, **47**(2): 159-165.
- Han X R, Jiang H Y, Guo C L, *et al.* Effects of new chelate fertilizer on yield, nutrient uptake and nutrient use efficiency of maize [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, **47**(2): 159-165.
- [31] 管恩娜. 生物质炭对土壤理化性质、烤烟生长及烟草黑胥病的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- Guan E N. Effect of biochar on soil physicochemical properties, tobacco growth and tobacco black shank [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)