

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.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响

杨彩迪, 宗玉统, 卢升高*

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 为研究不同原料生物炭对农田土壤酸度、交换性能、磷素养分以及作物产量的综合动态影响, 试验设置空白(CK)、水稻秸秆生物炭(RSB)、玉米秸秆生物炭(MSB)、小麦秸秆生物炭(WSB)、稻壳生物炭(RHB)和竹炭(BCB)这6种处理, 生物炭按质量分数0.1%施入农田进行长期定点试验, 测定水稻、油菜和玉米这3季作物产量和作物收割后的土壤理化性质。结果表明, 添加不同原料生物炭可有效提高土壤pH和交换性能, 降低交换性酸含量, 作用效果随时间下降。生物炭对盐基离子组成的影响为提高交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量, 降低 Na^+ 含量。生物炭能不同程度地增加土壤有机质(SOM)、速效磷、总磷和无机磷(Al-P和Fe-P)含量, 作物产量较当季对照显著提高($P < 0.05$)。稻壳生物炭在改良酸性土壤理化性质和提高作物产量方面效果较好。

关键词: 生物炭; 酸化; 交换性能; 磷素养分; 作物产量

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1914-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910102

Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland

YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao

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

Abstract: To investigate the dynamic effects of biochars produced from different biomass materials on farmland soil acidity, exchangeable cations, phosphorus nutrient, and crop yield, a field experiment was performed on acid paddy soil. Five types of biochars—rice straw biochar (RSB), maize straw biochar (MSB), wheat straw biochar (WSB), rice husk biochar (RHB), and bamboo charcoal (BCB)—were applied to farmland soil at mass fraction of 0.1%. No biochar addition was used as control treatment (CK). The soil physicochemical properties and crop yields were analyzed after harvesting rice, rapeseed, and corn crops. Results indicated that the addition of biochars could effectively increase soil pH and exchangeable cations and reduce exchangeable acid content, but the effects decreased with time. The biochars increased the content of exchangeable K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} and decreased the exchangeable Na^+ content in soils. The biochars increased the contents of organic matter (SOM), available phosphorus, total phosphorus, and inorganic phosphorus (Al-P and Fe-P). Compared with the control treatment, biochars significantly ($P < 0.05$) increased the yields of rice, oil seed, and maize crops. Rice husk biochar (RHB) had the best effect in improving acid soil physicochemical properties and increasing crop yield.

Key words: biochar; acidification; exchangeable cations; phosphorus nutrient; crop yield

土壤酸化是近年来土壤退化的一种重要形式, 与土壤本身性质和人类活动等外部条件密切相关。土壤酸化直接影响土壤的物理、化学和生物特征, 不仅破坏土壤正常团粒结构, 造成土壤板结和养分流失, 而且活化有毒重金属, 抑制微生物活性, 从而影响作物生产, 严重制约农业的可持续发展^[1-3]。生物炭是生物质在无氧或限氧条件下热解形成的富碳固体物质, 具有弱碱性、多孔、高稳定性和阳离子交换量较高等特点, 施入土壤后可以提高酸性土壤pH, 增加阳离子交换量, 同时提高有效养分含量^[4,5]。王义祥等^[6]的研究发现生物炭和石灰处理均可显著提高茶园土壤pH值和盐基饱和度, 且生物炭的改良效果优于石灰。董颖^[7]的研究发现不同地区的油菜秸秆生物炭均可提高红壤pH和交换性盐基含量, 降低交换性酸含量, 且改良效果随生物炭制备温度和添加量的增加而提高。生物炭本身含有大量高效的磷素养分可以直接提高土壤磷素有效性, pH的

提高也可以促进土壤中固定磷的释放, 同时生物炭还通过影响磷的吸附解吸来改变磷的形态和有效性^[8,9]。靖彦等^[10]的研究表明, 添加小麦秸秆生物炭后土壤pH和有效磷含量在油菜各生育期均有所提高, 且二者显著相关。Zhai等^[11]通过研究玉米秸秆生物炭对酸性红壤和碱性潮土中磷有效性的影响, 发现土壤有效磷和微生物量磷含量随生物炭添加量的增加而增加。洪灿^[12]的研究发现, 老成土中施用生物炭使Al-P和Ca-P含量分别增加8.34%和3.94%, 而在淋溶土中二者分别增加11.02%和3.81%。除此之外, 生物炭在改良土壤结构、固碳减排、污染修复等方面也具有非常重要的作用^[13-15]。

目前国内外对于生物炭改良土壤的研究集中于

收稿日期: 2019-10-15; 修订日期: 2019-11-12

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

对土壤养分的分别研究,且多为室内模拟试验,对不同原料生物炭影响酸性土壤理化性质和作物产量的长期动态综合研究相对较少,特别是在大田试验的多因素条件下.本文选取水稻土为研究对象、5种不同原料的生物炭为改良剂,于2017年4月将生物炭施入农田进行长期定点试验,对水稻-油菜-玉米三季作物收割后土壤的理化性质和作物产量进行综合动态分析.通过获得生物炭对酸性土壤影响的动态变化规律,以期为阻控农田土壤酸化、提高养分利用率和增加作物产量等农业生产提供一定的理论指导.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验田位于浙江省温州市雁荡镇(N28°20', E121°7'),属于河谷冲积物发育的水稻土.生物炭购买于商业生物炭公司,将水稻秸秆、玉米秸秆、小麦秸秆、稻壳和竹子5种有机物料分别置于550℃反应器中热解3 h,分别制得水稻秸秆生物炭(RSB)、

玉米秸秆生物炭(MSB)、小麦秸秆生物炭(WSB)、稻壳生物炭(RHB)和竹炭(BCB).试验基地土壤和生物炭的基本性质如表1所示.试验基地黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.25~2 mm)占土壤的质量分数分别为21.24%、59.24%和19.52%.

1.2 样地设置与样品处理

2017年4月采用翻施的方式将5种生物炭按0.1%的质量分数添加(土壤容重为1.13 g·cm⁻²,按耕层20 cm计算施用量为2.25×10⁴ kg·hm⁻²)均匀施入土壤耕层(0~20 cm),每个小区面积16 m²(4 m×4 m),小区间以0.3 m宽的田埂隔开.以不施生物炭为对照,共6种处理,每种处理重复3次.2017年5月起进行水稻-油菜-玉米三季作物轮作,各小区田间管理与农民习惯施肥处理一致(表2).本试验开始前和每季作物收获后在各小区内采用“S形采样法”采集耕层土壤样品,收割水稻、油菜和玉米籽粒后计算产量.

表1 不同原料生物炭及供试土壤的基本性质
Table 1 Basic properties of different biochars and soils tested

项目	土壤	RSB	MSB	WSB	RHB	BCB
pH	4.78	10.52	10.65	10.54	7.75	9.48
TOC/g·kg ⁻¹	32.06	399.34	453.8	347.81	358.35	402.97
Olsen-P/mg·kg ⁻¹	15.14	245.81	225.63	229.61	373.39	47.56
全磷/g·kg ⁻¹	0.55	1.63	1.58	1.59	2.44	0.67
N/%		0.76	0.81	0.8	1.44	0.62
C/%		56.59	56.05	56.25	40.35	70.44
H/%		2.08	2.09	2.1	2.8	2.3
S/%		0.37	0.43	0.42	0.68	0.28

表2 水稻-油菜-玉米三季作物轮作的施肥与生长状况¹⁾
Table 2 Fertilization management and growth status of rice-rapeseed-corn crop rotation

作物	底肥类型	底肥施用量 /kg·hm ⁻²	追肥类型及施用量 /kg·hm ⁻²	种植时期 (年-月)	收获时期 (年-月)	生长期 /d
水稻	水稻专用肥	750	水稻专用肥;75,尿素;150	2017-05	2017-10	180
油菜	复合肥	450	复合肥;苗期75,花期300	2017-12	2018-05	180
玉米	复合肥	750	复合肥;75,尿素;150	2018-06	2018-10	150

1)各肥料的N:P₂O₅:K₂O比例为:水稻专用肥18:13:17;复合肥18:22:14;尿素46:0:0

1.3 样品测定指标与方法

土壤室温下风干,研磨过2 mm和0.15 mm筛备用,测定土壤酸度、交换性能和磷素养分指标.土壤酸度指标:pH值以1:2.5土水比使用pH计(Metler Toledo,下同)测定;交换性酸使用KCl提取、NaOH滴定法测定.土壤阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定,盐基阳离子采用原子吸收法(交换性Ca²⁺和Mg²⁺)和火焰光度法(交换性K⁺和Na⁺)分别测定.有机质采用K₂Cr₂O₇氧化-外加热法测定;分别采用Olsen法(NaHCO₃提取)和Bray 1法(HCl+NH₄F提取)提取土壤有效磷、NaOH熔融

法提取总磷,钼锑抗比色法测定^[16].采用Hedley等^[17]改进的方法测定无机磷,NH₄Cl-NH₄F(pH=8.2)提取铝磷,NaOH提取铁磷,H₂SO₄提取钙磷,钼锑抗比色法测定.生物炭pH以1:20的比例使用pH计测定.总有机碳采用K₂Cr₂O₇氧化法测定.Olsen-P用NaHCO₃提取、全磷采用HClO₄-HF溶液消化样品,钼锑抗比色法测定^[16].用元素分析仪测定元素组成.每个指标重复3次,求平均值.

1.4 数据处理

采用Excel 2010进行数据整理和绘图,采用SPSS16.0进行统计分析,利用Duncan多重比较进

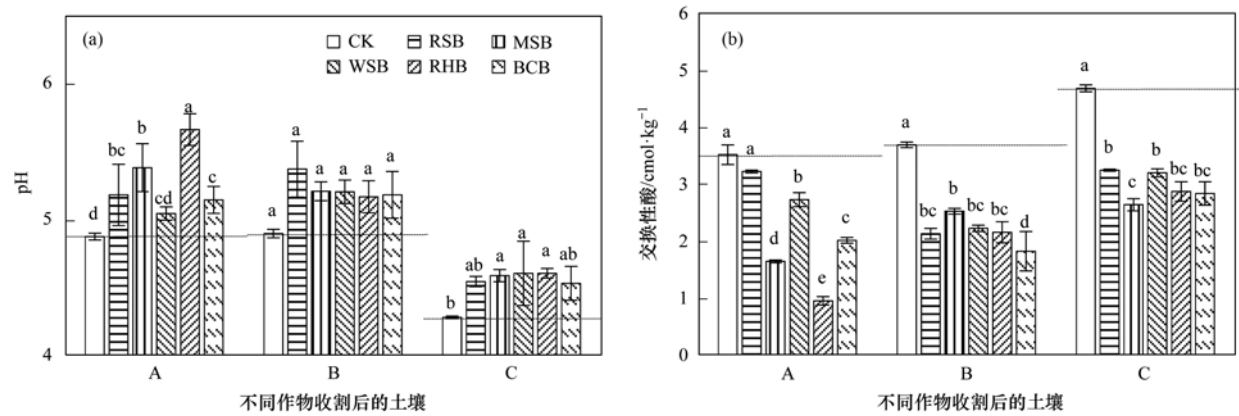
行多组处理间差异显著性检验分析($P=0.05$).

2 结果与分析

2.1 不同原料生物炭对土壤酸度的影响

从图 1 可以看出,不同原料生物炭对土壤 pH 均有不同程度提高,而交换性酸则相反. 三季作物收割后土壤 pH 以 RHB、RSB 和 RHB 处理较好,较

对照分别提高 0.79、0.59 和 0.58 个单位;RHB、BCB 和 RHB 处理下交换性酸分别较对照降低 72.8%、50.6% 和 58.2%. 土壤 pH 随时间降低,表明生物炭的作用效果随时间下降. 交换性酸含量的变化反映了相同的规律. 不同原料生物炭均能有效改良土壤酸化,以稻壳生物炭降低土壤酸性的效果最好.



A: 水稻收割后的土壤,B: 油菜收割后的土壤,C: 玉米收割后的土壤,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 不同原料生物炭对土壤酸度的影响

Fig. 1 Effects of different biochars on soil acidity

2.2 不同原料生物炭对土壤交换性能的影响

表 3 是不同原料生物炭对土壤交换性能的影响,结果表明不同原料生物炭能有效提高土壤 CEC,三季土壤在最优处理 RHB 下较对照分别显著提高 16.6%、15.1% 和 21.9%;各处理 ECEC 含量均显著高于对照,介于 3 ~ 6 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,三季土壤的 RHB 处理分别较对照提高 64.4%、82.1% 和

162.9%. 各交换性盐基离子关系为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$, Ca^{2+} 占 60% ~ 80%. 不同处理均提高交换性 Ca^{2+} 含量,随时间显著增强,油菜和玉米收割后的土壤提高显著;交换性 Mg^{2+} 的变化与 Ca^{2+} 基本相同,三季土壤在 RHB 处理下分别较对照提高 120.8%、99.6% 和 189.8%,总体趋势减小;交换性 K^{+} 在 BCB 处理下分别较对照提高 141.6%、57.6%

表 3 不同原料生物炭对土壤交换性能的影响/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 3 Effects of different biochars on soil exchange performance/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$

取样时期	处理	CEC	ECEC	交换性 K^{+}	交换性 Na^{+}	交换性 Ca^{2+}	交换性 Mg^{2+}
A	CK	7.84 ± 0.44a	3.72 ± 0.01b	0.17 ± 0.01d	0.20 ± 0.00a	2.68 ± 0.01b	0.67 ± 0.00b
	RSB	9.04 ± 1.16a	4.33 ± 0.18b	0.34 ± 0.02c	0.14 ± 0.02b	3.05 ± 0.11ab	0.79 ± 0.04b
	MSB	8.85 ± 0.05a	5.08 ± 0.33ab	0.37 ± 0.02bc	0.14 ± 0.01b	3.66 ± 0.24ab	0.91 ± 0.06b
	WSB	8.89 ± 0.55a	4.85 ± 0.41ab	0.36 ± 0.01bc	0.15 ± 0.02ab	3.55 ± 0.28ab	0.80 ± 0.10b
	RHB	9.14 ± 0.14a	6.11 ± 0.83a	0.40 ± 0.01ab	0.15 ± 0.01ab	4.08 ± 0.60a	1.48 ± 0.22a
	BCB	8.34 ± 0.40a	4.82 ± 0.19ab	0.42 ± 0.01a	0.17 ± 0.00b	3.53 ± 0.13ab	0.73 ± 0.04b
B	CK	8.09 ± 0.46b	2.40 ± 0.05c	0.17 ± 0.02a	0.18 ± 0.01a	1.64 ± 0.01d	0.42 ± 0.02c
	RSB	8.66 ± 0.29ab	3.59 ± 0.15b	0.26 ± 0.02a	0.17 ± 0.02a	2.54 ± 0.08c	0.63 ± 0.04b
	MSB	8.87 ± 0.34ab	4.53 ± 0.10a	0.23 ± 0.00a	0.16 ± 0.02a	3.49 ± 0.02a	0.65 ± 0.06b
	WSB	9.08 ± 0.26a	4.50 ± 0.11a	0.25 ± 0.01a	0.15 ± 0.01a	3.39 ± 0.07a	0.72 ± 0.03b
	RHB	9.31 ± 0.24a	4.37 ± 0.21a	0.24 ± 0.01a	0.15 ± 0.01a	2.89 ± 0.14b	1.10 ± 0.05a
	BCB	8.57 ± 0.22ab	3.57 ± 0.20b	0.26 ± 0.02a	0.15 ± 0.01a	2.61 ± 0.10bc	0.55 ± 0.08bc
C	CK	8.98 ± 0.48b	1.95 ± 0.17d	0.22 ± 0.03c	0.16 ± 0.05a	1.17 ± 0.05d	0.40 ± 0.04c
	RSB	9.35 ± 0.10b	3.40 ± 0.17c	0.22 ± 0.03c	0.09 ± 0.02a	2.45 ± 0.02c	0.64 ± 0.09b
	MSB	9.19 ± 0.16b	3.67 ± 0.10bc	0.30 ± 0.00bc	0.10 ± 0.03a	2.52 ± 0.02c	0.75 ± 0.05b
	WSB	9.32 ± 0.26b	3.93 ± 0.03b	0.27 ± 0.01bc	0.08 ± 0.00a	2.85 ± 0.02b	0.74 ± 0.00b
	RHB	10.95 ± 0.36a	5.13 ± 0.18a	0.38 ± 0.02b	0.10 ± 0.04a	3.49 ± 0.10a	1.17 ± 0.03a
	BCB	9.72 ± 0.18a	3.64 ± 0.11c	0.59 ± 0.06a	0.07 ± 0.00a	2.38 ± 0.04c	0.61 ± 0.01b

和 168.8%, 显著性降低; 交换性 Na^+ 含量整体降低, 各处理间差异不显著. 总体来看, 生物炭能有效提高土壤 CEC 和 ECEC, 其中交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量增加, Na^+ 含量降低, 稻壳生物炭提高土壤交换性能的效果最好.

2.3 不同原料生物炭对土壤养分的影响

2.3.1 不同原料生物炭对土壤有机质、速效磷和总磷的影响

从图 2 可以看出, 不同原料生物炭均可提高土壤有机质含量, 其中 MSB、RHB 和 BCB 处理在 3 季

作物土壤中效果均为显著. Olsen-P 含量随时间增加, 三季土壤在 RHB 处理下分别较对照显著提高 119.0%、96.1% 和 52.2%. Bray 1-P 含量变化与 Olsen-P 变化基本一致, 不同处理关系为 $\text{RHB} > \text{RSB} > \text{WSB} > \text{BCB} > \text{MSB}$, 三季土壤在最优处理 RHB 下分别较对照显著提高 171.6%、110.0% 和 172.2%. 土壤总磷含量为 $0.54 \sim 1.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 三季土壤在最优处理 BCB、RHB 和 RHB 下分别较对照显著提高 50.7%、45.7% 和 25.5%. 整体来看, 稻壳生物炭在长期的土壤改良中对提高有机质和磷素养分效果最好.

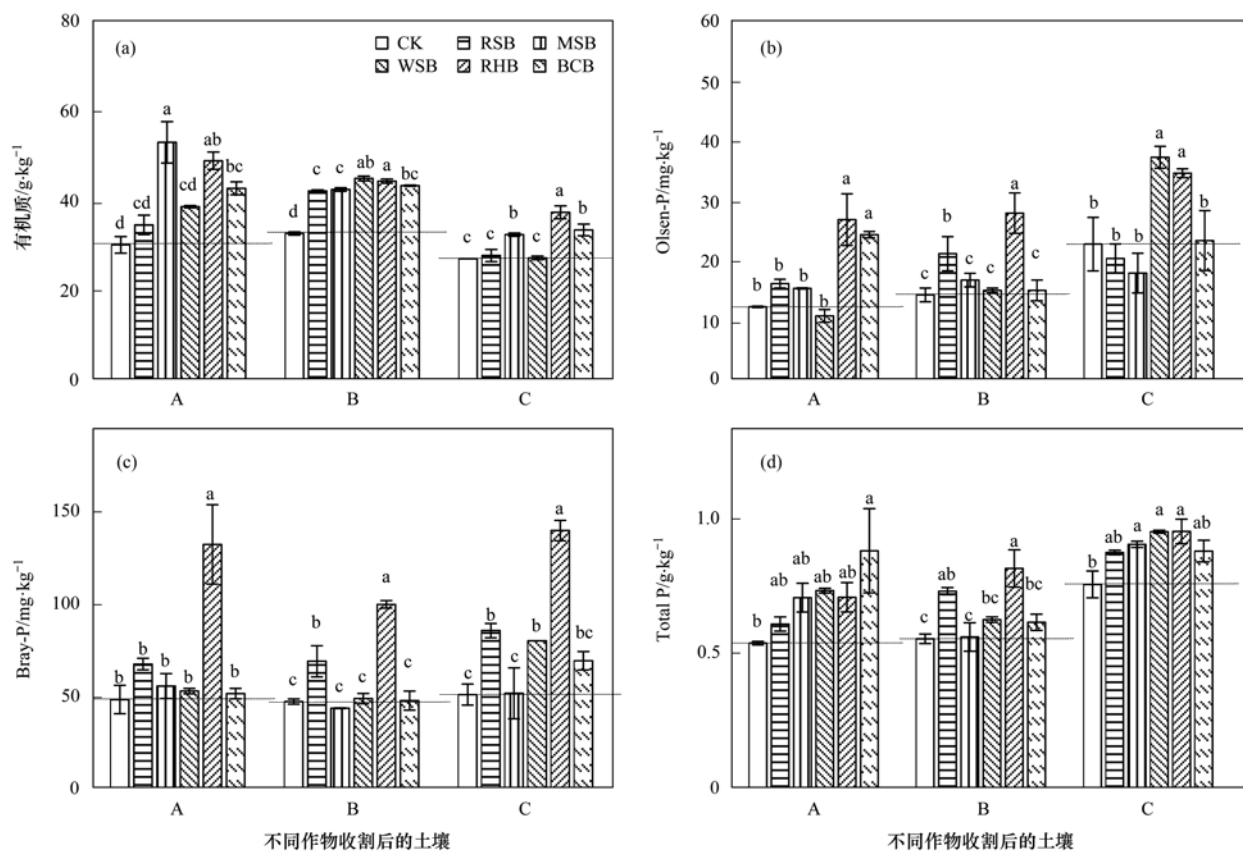


图 2 不同原料生物炭对土壤有机质、速效磷和总磷的影响

Fig. 2 Effects of different biochars on soil organic matter, available P, and total P

2.3.2 不同原料生物炭对土壤无机磷的影响

从图 3 可以看出, 三季土壤的 Al-P 和 Fe-P 含量随时间增加, Ca-P 则相反, 其中 Al-P 是无机磷的主要成分, 含量为 $79.5 \sim 311.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Fe-P 含量次之, 为 $38.9 \sim 188.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Ca-P 含量最低, 为 $48.5 \sim 90.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不同处理间差异不大. 三季土壤的 Al-P 在最优处理 RSB、RHB 和 RHB 下分别较对照提高 52.1%、139.8% 和 120.4%; Fe-P 在最优处理 RHB 下分别提高 91.8%、27.3% 和 50.8%; Ca-P 含量随时间略有降低, 但显著性增强. 生物炭对无机磷的影响主要表现为 Al-P 和 Fe-P 含量的增加, 稻壳生物炭对提高二者含量的综合效果最好.

2.4 不同原料生物炭对大田作物产量的影响

轮作水稻、油菜和玉米三季作物产量如图 4 所示. 添加不同生物炭后, 三季作物产量较对照均有增加. 不同处理对水稻增产效果为 $\text{RHB} > \text{WSB} > \text{MSB} > \text{RSB} > \text{BCB}$, 分别较对照显著提高 13.3%、10.8%、10.1%、7.7% 和 6.3%; RHB 和 RSB 处理对油菜籽粒产量分别显著提高 83.0% 和 59.9%, 其余处理增产不显著; 对玉米的增产效果与水稻基本一致, 为 $\text{RHB} > \text{WSB} > \text{RSB} > \text{MSB} > \text{BCB}$, 分别较对照显著提高 57.8%、36.6%、32.6%、27.0% 和 5.3%. 整体来看, 稻壳生物炭对三季作物增产效果最优, 这与上述其对土壤酸度、交换性能和磷素养分的改良效果一致.

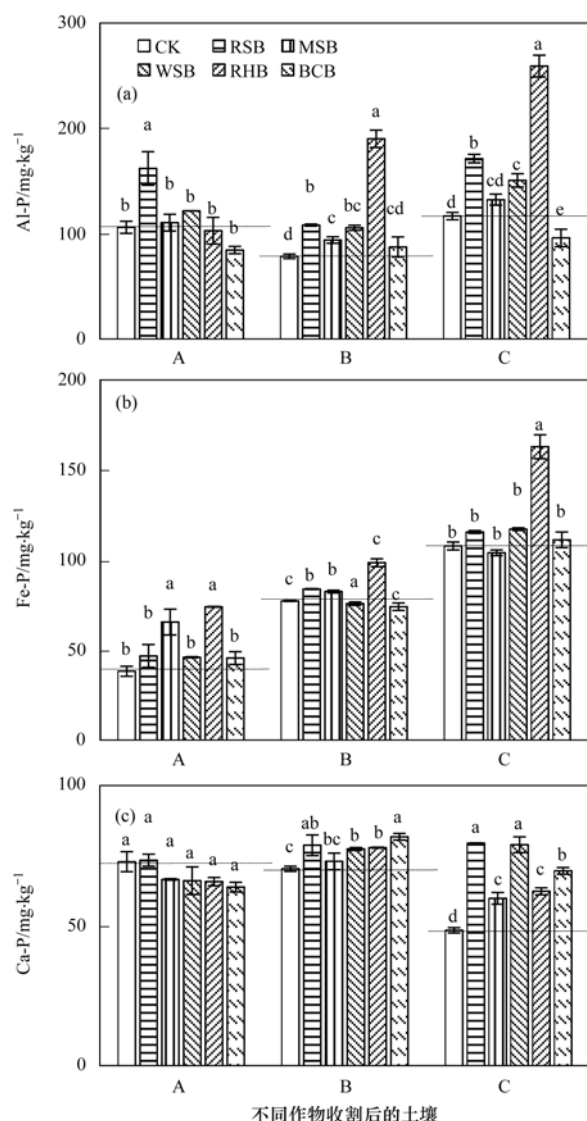


图3 不同原料生物炭对土壤无机磷的影响

Fig. 3 Effects of different biochars on soil inorganic phosphorus

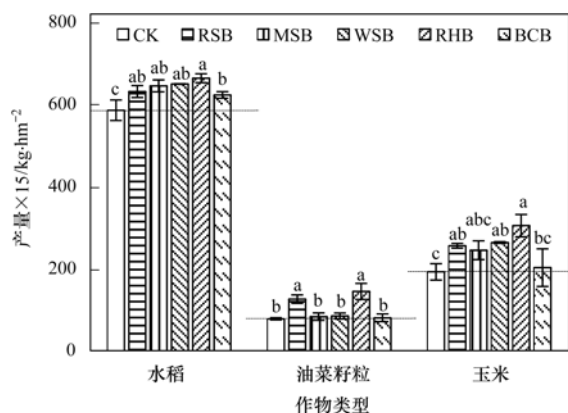


图4 添加不同原料生物炭对大田作物产量的影响

Fig. 4 Effects of different biochars on crop yields in field

3 讨论

土壤酸化实质是 H^+ 增加、 Al^{3+} 水解和盐基阳离子减少的过程,因此增加盐基离子是改良酸性土壤的有效途径之一^[2]. 研究区土壤初始 pH 为 4.78,有

机质、交换性盐基和黏土矿物是影响 pH 的主要缓冲物质^[18]. 生物炭弱碱性、高养分的特点可以直接提高土壤 pH, 补充淋失的盐基离子, 提高土壤 CEC^[4]. 虽然三季土壤 pH 随时间降低, 但加入生物炭后 pH 均显著高于当季对照, 同时交换性酸显著降低, 且随时间显著性增强. 土壤 pH 随时间降低是因为在种植水稻的淹水条件下, 硝化作用较弱, 硝酸盐淋溶较少, 释放质子较少; 而在种植油菜和玉米的旱地条件下, 硝化作用产生硝酸盐随土壤淋溶, 质子含量增加^[19]. 整体来看, 稻壳生物炭改良酸性土壤效果最好, 这与其 pH 最低不一致, 但与有效磷、总磷和总氮含量较高相一致, 原因是生物炭改良土壤不仅由生物炭本身性质决定, 还与大田试验的多因素(气候、作物、根系分泌物等)有关; 生物炭可以显著提高土壤有机质和交换性盐基含量, 进而提高养分的有效性, 促进土壤生物多样性及生产^[4]; 该地土壤黏粒含量较高, 对改良土壤酸性起到重要作用. 三季土壤的 CEC 均在 RHB 处理下效果最优, 各盐基阳离子的关系为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$, 生物炭可以提高交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量, 降低 Na^+ 含量, 这与已有研究结果一致, 原因是二价离子与土壤胶体结合更为紧密, 因此交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 更易在团聚体中积累^[20]; 同时, 生物炭含有的羟基、羧基和苯环等官能团可以增加对阳离子的吸附^[21]. 交换性盐基离子组成的差异是成土母质、生物物质循环及淋溶等综合作用的结果. 土壤交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量与 pH 呈正相关关系; 交换性 K^+ 受成土母质中速效钾影响较大; Na^+ 极易受到淋溶^[22]. 总之, 生物炭对酸性土壤具有重要的修复效应, 但因生物炭材料及组成不同, 改良效果也有所差异.

生物炭本身含有的 N、P、K、Ca、Mg 和 S 等营养元素可以直接提高土壤养分^[4]. 5 种生物炭含碳量为 40.35%~70.44%, 能显著提高土壤有机质含量. 不同生物炭对磷素养分有效性作用效果不同, 3 种土壤的有效磷均在 RHB 处理下效果最优. 生物炭提高土壤有效磷有 3 个原因: ①生物炭含有的有效磷直接为土壤提供磷素养分^[4]; ②生物炭改良土壤酸性条件, 促进含磷矿物的转化, 释放磷素养分^[23]; ③生物炭与土壤作用促进生物炭自身含磷矿物的有效化. 土壤总磷含量随时间逐渐增加, 稻壳生物炭效果最好, 这与稻壳生物炭的总磷含量最高一致. 土壤无机磷含量为 $Al-P > Fe-P > Ca-P$, 生物炭对不同无机磷的影响差异较大, 稻壳生物炭对提高 Al-P 和 Fe-P 的综合效果最好, 这是因为 pH、Eh 等环境条件改变会影响铁、铝等金属与磷的结合

状态,促进沉淀物磷的释放, OH^- 对吸附态铁磷具有解吸作用,从而使 Fe-P 含量明显升高^[24];另外,生物炭还可以通过促进微生物繁殖、提高土壤磷酸酶活性等途径活化土壤中的磷素^[23]. 生物炭不仅对土壤改良有较大的作用,同时对作物的生长发育有较大的影响. 5 种生物炭中稻壳生物炭对 3 种作物的增产效果最好,这与稻壳生物炭对土壤理化性质的改良效果一致. 这是因为生物炭不但可以补充土壤养分,还可以优化土壤团粒结构,有效截留水分和养分,提高土壤肥力^[25]. 土壤性质的改良对农业生产具有积极影响,有效促进作物产量和作物品质的提升.

4 结论

(1) 不同生物炭可以不同程度地提高酸性土壤 pH 和 CEC,降低交换性酸,增强土壤交换性能,但作用效果随时间降低. 生物炭可使土壤交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量增加, Na^+ 含量减小,其中稻壳生物炭改良酸化效果最好.

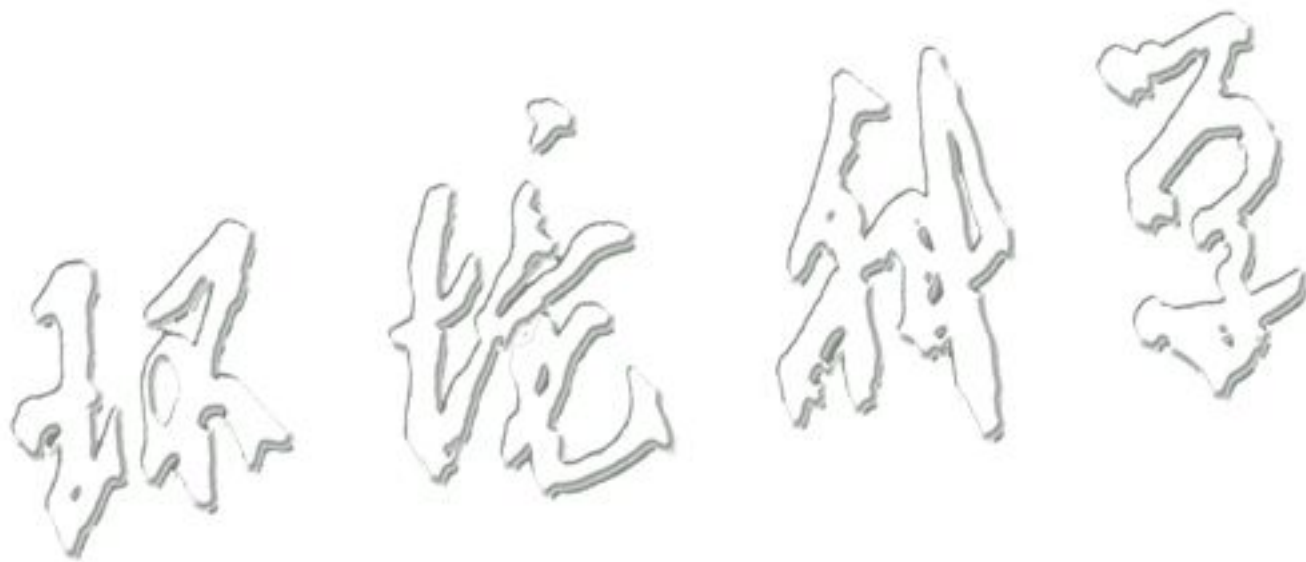
(2) 添加生物炭可以增加土壤有机质、速效磷和总磷含量. 土壤中无机磷含量为 $\text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca-P}$,生物炭可以增加 Al-P 和 Fe-P 含量,降低 Ca-P 含量;其中以稻壳生物炭提高土壤养分含量效果最好.

(3) 添加不同原料生物炭后,三季作物产量较对照组均有增加. 不同处理对水稻产量增加显著,稻壳生物炭对提高三季作物产量综合效果较好,这与稻壳生物炭对土壤酸度、交换性能和磷素养分改良的效果一致.

参考文献:

- [1] 张玲玉,赵学强,沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(6): 1900-1908.
Zhang L Y, Zhao X Q, Shen R F. Soil acidification and its ecological effects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(6): 1900-1908.
- [2] 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.
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, **327** (5968): 1008-1010.
- [4] 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.
- [5] 王月玲,耿增超,王强,等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3634-3641.
Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al.* Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- [6] 王义祥,辛思洁,叶菁,等. 生物炭对强酸性茶园土壤酸度的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(12): 108-111.
Wang Y X, Xin S J, Ye J, *et al.* Improvement effect of biochar on soil acidity in strong acidity tea garden [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(12): 108-111.
- [7] 董颖. 不同地区油菜秸秆生物质炭改良红壤酸度的差异性研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018.
Dong Y. Amelioration of an ultisol acidity by biochars derived from canola straw varied with their cultivating soils [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018.
- [8] Song D L, Tang J W, Xi X Y, Zhang S, *et al.* Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil [J]. European Journal of Soil Biology, 2018, **84**: 1-10.
- [9] Xu G, Sun J N, Shao H B, *et al.* Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity [J]. Ecological Engineering, 2014, **62**: 54-60.
- [10] 靖彦,陈效民,刘祖香,等. 生物黑炭与无机肥料配施对旱作红壤有效磷含量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 989-994.
Jing Y, Chen X M, Liu Z X, *et al.* Effects of combined application of biochar and inorganic fertilizers on the available phosphorus content of upland red soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(4): 989-994.
- [11] Zhai L M, Cai Z N, Liu J, *et al.* Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, **51**(1): 113-122.
- [12] 洪灿. 土壤改良剂对酸性土壤磷的生物有效性和土壤物理性质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Hong C. The effects of the soil modifiers on the bioavailability of phosphorus and the physical properties in acid soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [13] 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 Lou soil [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3388-3396.
- [14] 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.
- [15] O'Connor D, Peng T, Zhang J, *et al.* Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials [J]. The Science of the Total Environment, 2017, **619-620**: 815-826.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [17] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, **46**(5): 970-976.
- [18] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil acidification [J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und

- Bodenkunde, 1986, **149**(6): 702-717.
- [19] Zhang H M, Wang B R, Xu M G. Effects of inorganic fertilizer inputs on grain yields and soil properties in a long-term wheat-corn cropping system in South China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, **39** (11-12): 1583-1599.
- [20] Adesodun J K, Adeyemi E F, Oyegoke C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses [J]. Soil and Tillage Research, 2007, **92**(1-2): 190-197.
- [21] Uphoff N, Ball A S, Fernandes E, *et al.* Biological approaches to sustainable soil systems[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [22] Lü L Y, Wang R Z, Liu H Y, *et al.* Effect of soil coarseness on soil base cations and available micronutrients in a semi-arid sandy grassland[J]. Solid Earth, 2016, **7**(2): 549-556.
- [23] 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.
- [24] Hass A, Gonzalez J M, Lima I M, *et al.* Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, **41** (4): 1096-1106.
- [25] 张又弛, 李会丹. 生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响[J]. 生态环境学报, 2015, **24** (5): 898-905.
- Zhang Y C, Li H D. Influence of biochar on the community structure and biogeochemical functions of microorganisms in soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(5): 898-905.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)