

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.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李翔婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响

周慧华¹, 袁旭音^{1*}, 熊钰婷¹, 韩年¹, 叶宏萌², 陈耀祖¹

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 武夷学院生态与资源工程学院, 武夷山 354300)

摘要: 生物炭作为一种新型环保材料常被用于改良土壤和污染修复, 生物炭输入对土壤中营养元素的有效态会产生明显影响. 本文基于太湖滨岸带不同土地利用类型(林地、草地、耕地和荒地), 对比研究生物炭施加对不同类型土壤中营养元素有效态含量的影响, 并探讨其动力学变化规律. 结果表明, 生物炭施加能够明显影响滨岸带土壤营养元素有效态含量, 但对碳氮磷的影响效果存在差别. 添加生物炭之后, 土壤中溶解性有机碳呈显著下降趋势, 而有效氮轻微增加, 有效磷则明显增加. 林地、草地、耕地和荒地土壤中溶解性有机碳含量分别下降了33.3%、27.4%、29.5%和51.4%; 有效氮含量分别提高了10.8%、18.2%、16.4%和15.2%; 有效磷含量分别增加了40.0%、50.2%、34.0%和43.6%. 对比控制组(CK)和添加组(BC)的变化, 土壤溶解性有机碳和有效磷含量在两组之间差别不大, 而有效氮的含量变化差距较大, 且在4种利用类型土壤中, 生物炭施加后对不同营养元素有效态的影响程度有所差异.

关键词: 生物炭; 土壤; 营养元素; 土地利用; 滨岸带

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0914-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909006

Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types

ZHOU Hui-hua¹, YUAN Xu-yin^{1*}, XIONG Yu-ting¹, HAN Nian¹, YE Hong-meng², CHEN Yao-zu¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: Biochar, as a new environmentally friendly material, has been used to improve soil quality and for pollution remediation. Biochar input has a significant impact on available nutrients in the soil. Based on the different land use types (forestland, grassland, cultivated land, and barren land) in the riparian zone of Taihu Lake, the effects of biochar application on the available content of nutrients in different land use types of soil were compared, and the dynamics of nutrient change was also discussed. Results show that the addition of biochar can significantly affect the available nutrient content in riparian soil, however the influential degrees for carbon, nitrogen, and phosphorus were different. After the input of biochar, dissolved organic carbon in riparian soils showed a clear downward trend, while the available nitrogen increased slightly, and the available phosphorus increased significantly. For woodland, grassland, arable land and wasteland soils, the contents of dissolved organic carbon decreased by 33.3%, 27.4%, 29.5%, and 51.4%, while the contents of available nitrogen increased by 10.8%, 18.2%, 16.4%, and 15.2%, and the contents of available phosphorus increased by 40.0%, 50.2%, 34.0%, and 43.6%, respectively. Compared with the concentrations between the control group soil (CK) and the biochar additive group soil (BC), the concentrations of dissolved organic carbon and available phosphorus exhibited large differences between the two groups regarding available nitrogen concentrations. Among the four types of riparian soils, the effects of biochar on the availability of different nutrients were different.

Key words: biochar; soil; nutrient element; landuse; riparian zone

生物炭是生物有机质在无氧或缺氧条件下通过热解反应产生的高度芳香化固态物质, 其拥有比表面积大、吸附性能好和稳定性强的特点^[1]. 近年来, 生物炭作为一类新型环境功能材料广泛应用于土壤修复, 随着时间的推移, 生物炭与土壤发生交互作用改变了土壤环境中 pH、CEC 和孔隙度等理化性质, 改变了土壤微生物的生长条件^[2]. 此外, 生物炭对土壤中的有机质有很强的吸附作用, 能与土壤腐殖质形成有机和无机的复合体, 降低了土壤微生物对土壤有机质的分解作用^[3]; 生物炭吸附土壤中的极性化合物, 通过滞留微、中观土壤孔隙中的水分实现养分的持留, 从而使土壤氮元素得以保持^[4]; 生

物炭主要通过调节土壤酸碱度, 改变磷酸根与金属离子相互作用强度, 从而影响土壤磷元素的有效性^[5]. 因此, 土壤有机碳及氮磷元素的有效含量会因生物炭的输入而发生变化^[6].

土壤营养元素的变化是目前土壤环境问题中的研究热点, 营养元素的流失不仅会使土壤肥力下降, 同时也会造成周围水体的污染, 碳氮的流失甚至会

收稿日期: 2019-09-01; 修订日期: 2019-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372354, 41601540); 大学生创新训练项目(2018102941081)

作者简介: 周慧华(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: zhohhh1006@163.com

* 通信作者, E-mail: yxy_hjy@hhu.edu.cn

对气候变化产生影响. 已有的研究表明, 生物炭施用于土壤对不同营养元素变化的作用效果与土壤类型密切相关. El-Naggar 等^[7]的研究发现施用稻草生物炭可以显著提高稻田土壤氮及有效磷的含量; 付琳琳等^[8]的研究发现施用小麦秸秆制得的生物炭后, 土壤溶解性有机碳含量明显高于对照, 随培养时间增加, 溶解性有机碳含量逐渐下降, 但始终高于对照组; 吴嘉楠等^[9]的研究表明, 施加生物炭可以提高烤烟种植地土壤中¹⁵N残留量、土壤无机氮以及碱解氮含量; 夏丽丹等^[10]的研究表明, 生物炭的添加能够有效提高红壤 pH 值和有效磷含量, 同时降低土壤酸性磷酸酶的活性. 可见, 在不同类型土壤中施用生物炭可以对碳氮磷组分产生明显的影响, 而影响的程度则有所差异.

滨岸带土壤毗邻水体, 其营养元素的变化对释放能力有直接影响, 尤其是营养元素的有效态含量. Wang 等^[11]的研究表明, 干湿交替通过增强微生物作用提高微生物活性、促进土壤有机质的分解从而促进土壤有机质转化为可溶性有机质, 因而滨岸带土壤营养元素有效态含量的变化动态过程与其他土壤会有所不同. 因此, 本研究从营养元素有效性角度出发, 以太湖滨岸带土壤为研究对象, 探讨生物炭输

入对土壤中营养元素有效态含量随时间动态变化的影响, 并比较不同土地利用类型对生物炭作用响应的差异. 在此基础上, 探究滨岸带不同土地利用方式下土壤中营养元素有效态含量的动力学变化规律, 以为农业活动中合理施肥以及环境材料的合理应用提供依据, 并为流域滨岸带环境管理带来经验与启示.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验土壤是采自太湖宜兴段 (119°53'44"E, 31°15'23"N) 滨岸带不同土地利用类型的表层土 (0~20 cm), 将自然风干的土壤磨碎过 2 mm 筛, 一部分用于测定其基本理化性质, 另一部分用于进行烧杯模拟实验并定期取样测定碳氮磷有效态含量. 张甲坤等^[12]曾提出土壤在室温和天然 pH 条件下, 能够溶于水相的那部分有机组分就是土壤有效碳, 因此本文以溶解性有机碳 (DOC) 作为土壤有效碳, 而有效氮以碱解氮计, 有效磷则以速效磷计. 生物炭从南京智融联科技有限公司购得, 是以小麦秸秆为原材料在 500℃ 热解制成的生物质炭. 供试土壤及生物炭基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤与生物炭的基本理化性质¹⁾

Table 1 Major physicochemical properties of studied soil and biochar

土地参数	土壤利用类型				生物炭
	林地	草地	耕地	荒地	
SiO ₂ /%	50.1 ± 1.21a	47.4 ± 0.88b	51.6 ± 0.46a	49.1 ± 0.32a	/
Al ₂ O ₃ /%	12.2 ± 0.11a	12.1 ± 0.21a	11.5 ± 0.32a	10.6 ± 0.13b	/
Fe ₂ O ₃ /%	2.82 ± 0.32c	3.50 ± 0.28a	2.62 ± 0.11c	3.11 ± 0.19b	/
CaO/%	0.09 ± 0.01c	0.17 ± 0.03b	0.28 ± 0.08a	0.23 ± 0.05a	/
MgO/%	1.74 ± 0.03b	1.92 ± 0.01a	1.87 ± 0.01a	1.83 ± 0.02a	/
K ₂ O/%	2.23 ± 0.11d	2.54 ± 0.08b	2.56 ± 0.23b	2.63 ± 0.20a	/
TOC/g·kg ⁻¹	31.5 ± 0.18b	36.1 ± 0.22a	36.4 ± 0.38a	25.6 ± 0.12c	392
TN/g·kg ⁻¹	4.78 ± 0.21a	3.70 ± 0.23b	4.76 ± 0.16a	3.21 ± 0.41c	2.58
TP/g·kg ⁻¹	0.75 ± 0.14b	0.32 ± 0.17c	1.03 ± 0.16a	0.38 ± 0.26c	1.21
砂粒/%	96.5 ± 0.32a	92.8 ± 0.26a	85.1 ± 0.13b	82.5 ± 0.18b	/
粉粒/%	3.10 ± 0.25d	6.16 ± 0.13c	9.11 ± 0.34b	15.4 ± 0.28a	/
黏粒/%	0.38 ± 0.31c	1.04 ± 0.22b	5.78 ± 0.23a	2.12 ± 0.35b	/
pH	5.17 ± 0.11a	5.15 ± 0.43a	5.18 ± 0.32a	5.15 ± 0.34a	10.4

1) 同一行中不同字母表示差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

结合国内外研究, 发现土壤中添加生物炭浓度为 4%~7% 时能发挥其最优修复性能^[13,14], 因此本文选取生物炭添加浓度为 5%. 在 25℃ 恒温培养箱中分别进行空白对照组 (记为 CK) 和生物炭添加组 (记为 BC) 的烧杯培养实验. 实验针对 4 个不同的土地利用类型, 每组设置 3 个平行样. 每个烧杯中分别加入 180 g 土, 通过称重法和水分添加使实验土

壤含水量保持在 60%, 共培养 60 d. 在第 1、4、8、14、22、34、46 和 60 d 分别采集土样测定有效碳、有效氮和有效磷含量.

1.2.2 样品测定与数据处理

土壤及生物炭的基本理化性质测定方法均参考文献^[15], 总氮 (TN) 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法^[15], 总磷 (TP) 采用钼锑抗比色法^[15], 总有机碳 (TOC) 采用灼烧法^[16], 土壤粒径采用 LS13320 全自动激光粒度分析仪测定 (美国贝克曼库尔特有限

公司),常量元素采用 PW2424 型 X 射线荧光仪测定(荷兰帕纳科公司),溶解性有机碳的测定首先用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸钾溶液浸提,然后采用 Multi N/C2100TOC 仪测定(德国耶拿公司),有效氮采用碱解扩散法^[15],有效磷采用 Bray I 法^[17]. 采用 Excel 2013 统计实验数据,使用 Origin2017 进行绘图,利用 SPSS 24 进行非参数检验和动力学方程拟合.

2 结果与分析

2.1 不同滨岸带土壤溶解性有机碳含量变化及差异

对于研究土壤有效碳而言,其含量在施加生物炭后逐渐下降,但是 BC 组始终高于 CK 组(图 1).

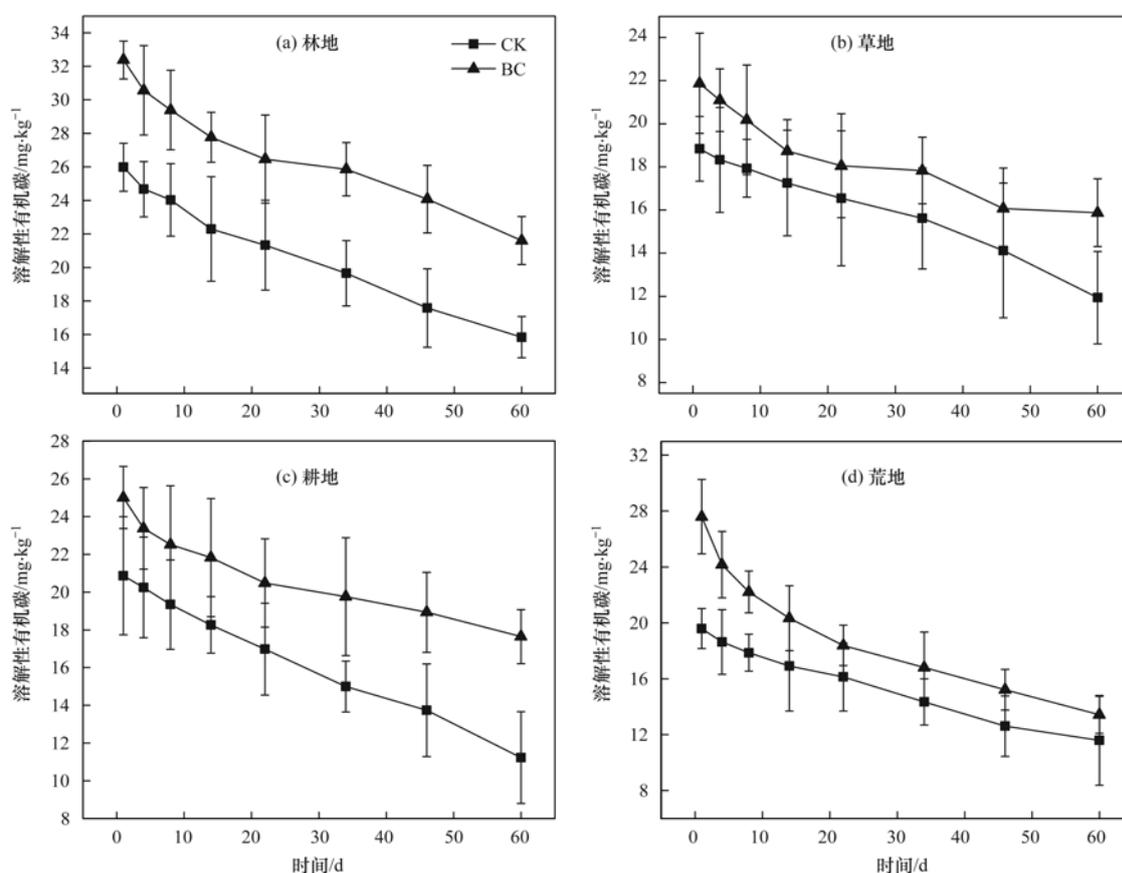


图 1 不同滨岸带土壤 DOC 随时间变化曲线

Fig. 1 DOC concentration vs. time for different land use types

2.2 不同滨岸带土壤有效氮含量变化及差异

对于实验土壤而言,CK 组土壤有效氮含量总体上是逐渐下降的,变化强度为林地 > 草地 > 荒地 > 耕地,而添加生物炭后土壤中的有效氮含量则缓慢增加,变化强度表现为草地 > 荒地 > 耕地 > 林地(见图 2). 培养 60d 后,林地土壤 CK 组有效氮含量降低 42.7%,下降速度先快后减缓最后又加快;而 BC 组有效氮含量增加 10.8%,始终处于缓慢增加状态;草地土壤 CK 组的有效氮含量降低 28.7%,下降速度逐渐减缓并趋于平稳,BC 组有效氮含量增加 18.2%,培养初期 BC 组有效氮含量高于 CK 组,且

总体上 CK 组和 BC 组土壤 DOC 的下降趋势是一致的,但变化速率略有差别. 其中林地土壤的下降速率较为明显,且 CK 组和 BC 组之间差值随时间变化较为平稳;草地土壤的 CK 组与 BC 组之间的 DOC 含量相差较小,但变化趋势有所不同,CK 组含量下降速度先慢后快,BC 组培养前期下降速度较快,中后期速度下降并趋于平稳;耕地土壤 CK 组 DOC 含量下降速度随时间逐渐减缓,BC 组的减缓趋势更为明显;荒地土壤 CK 组 DOC 含量前期快速下降而中后期逐渐平稳,BC 组 DOC 含量下降速度极快,后期有所减缓,培养期间 BC 组 DOC 降低量甚至比 CK 组高 10.5%.

有一个明显增加的过程,后期变化较为平稳;耕地土壤 CK 组有效氮含量降低 21.0%,下降速度先慢后快,BC 组有效氮含量增加 16.4%,增加速度缓慢,但增势优于林地;荒地土壤 CK 组有效氮含量降低 21.1%,下降速度先快后慢,BC 组有效氮含量增加 15.2%,先逐渐增加后略有降低.

2.3 不同滨岸带土壤有效磷含量变化及差异

如图 3 所示,研究区除荒地外,不同滨岸带类型土壤中的有效磷的含量均随培养时间的延长而增加,是因为磷元素在土壤中的迁移能力较弱,活化的磷元素大都会滞留在土壤中. Atkinson 等^[18]的研究

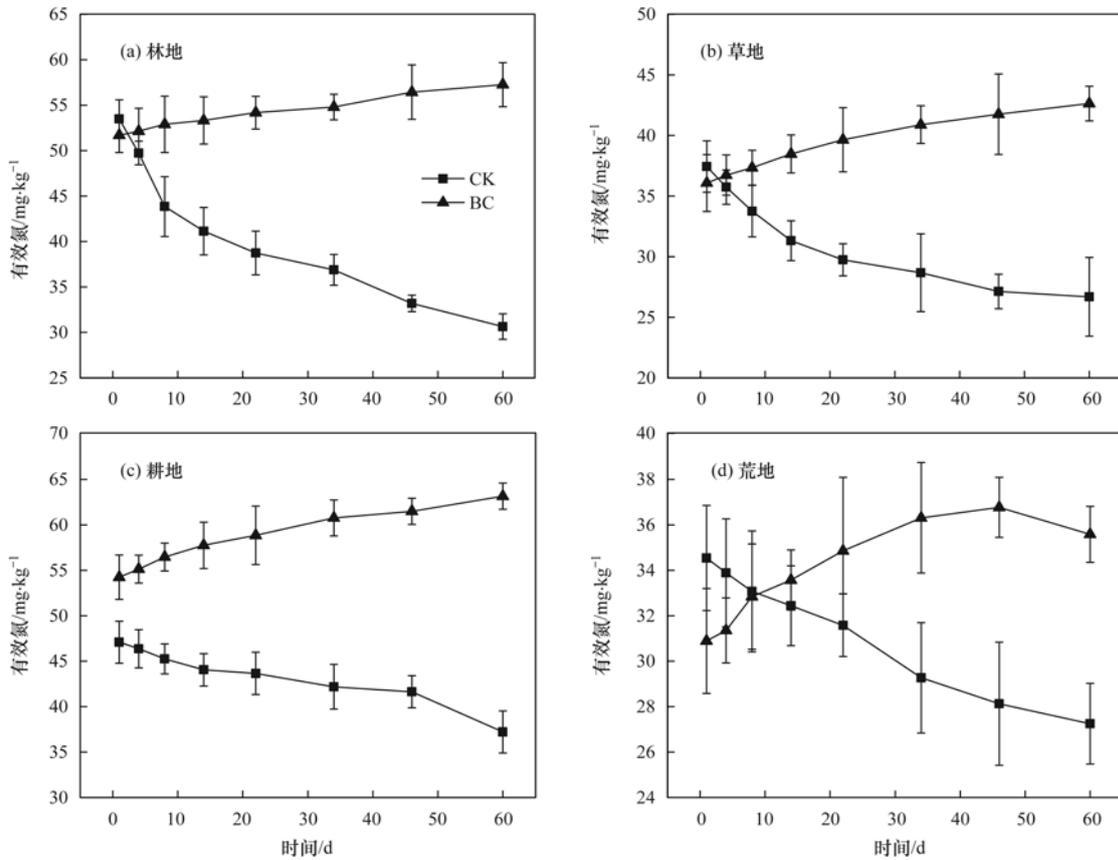


图2 不同滨岸带土壤有效氮随时间变化曲线

Fig. 2 Available nitrogen content in soil vs. time for different land use types

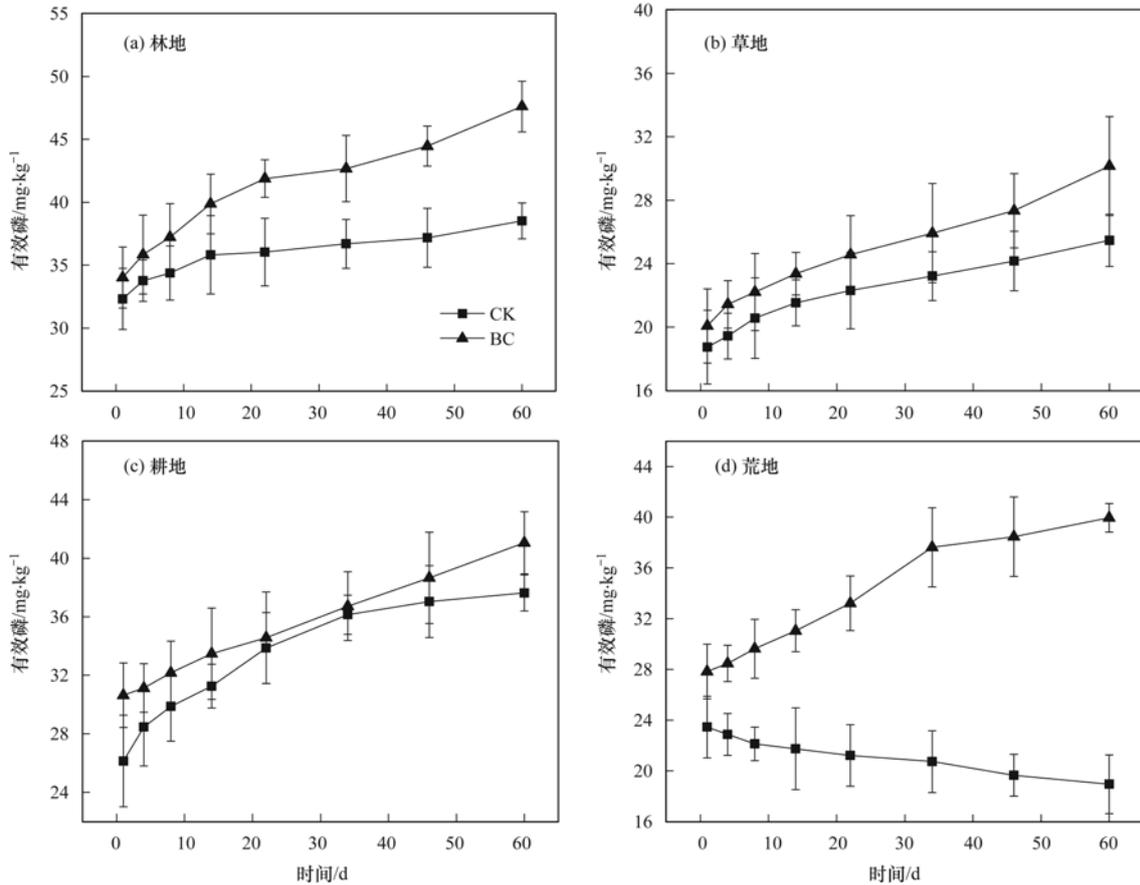


图3 不同滨岸带土壤有效磷随时间变化曲线

Fig. 3 Available phosphorus in soil vs. time for different land use types

中发现随着生物炭的施用,土壤中有效磷的含量都会提高.本实验前后林地土壤 CK 组有效磷含量增加 19.2%,前期增加较多,后期变化较为平稳,BC 组则增加 40.0%;草地土壤有效磷含量 CK 组增加 36.0%,增长速度先快后慢,BC 组增加 57.7%,各阶段增速均高于 CK 组;耕地 CK 组土壤有效磷含量增加 41.7%,增长速度较快,后期有所减缓,是所有土地利用方式中有效磷含量增加量最多的. BC 组土壤有效磷含量增加 34.0%,初期增长缓慢,后期有所提升;荒地土壤 CK 组有效磷含量共减少 19.2%,增长速度较缓,BC 组土壤有效磷含量则增加 43.6%,是 4 种类型土壤中增量最多的.

3 讨论

3.1 不同滨岸带土壤的溶解性有机碳变化分析

不同的土地利用方式下土壤微生物构成及其代谢产物不尽相同,施入生物炭后,其与土壤相互作用所带来的影响也有所差异.林地土壤中钙镁离子含量最低,固定土壤腐殖质能力较弱,有利于腐殖质形成溶解性有机碳^[19],且林地土壤因为铝氧化物含量较高,土壤中的溶解性有机碳更易被吸附.草地土壤铁氧化物含量较高,能够通过影响土壤中电子供体数量促进土壤有机碳的矿化,而生物炭中不稳定组分的快速降解促进了土壤有机碳的矿化^[1],因而 BC 组 DOC 含量前期下降较快.耕地土壤常年翻耕,土质疏松,其砂粒含量明显高于其它土地利用方式,土壤通透性较强,且土壤中铝氧化物含量较低,吸附作用较弱,DOC 可以通过土壤下渗到地下水而流失,而施加生物炭可以通过改变土壤孔径大小而改变土壤水分的渗率模式^[20],增强土壤固定 DOC 的能力.荒地土壤植被较少,土壤中铝氧化物含量相对最低,吸附 DOC 能力最弱,而培养前期部分 DOC 又被生物炭固定,后期吸附量基本达到饱和,因此 BC 组后期的 DOC 减少量低于 CK 组.总体而言,溶解性有机碳含量始终处于下降状态,BC 和 CK 组含量两者之间差别不大,生物炭主要通过两个方面改变土壤溶解性有机碳含量^[21]:①生物炭添加改变了土壤的理化性质,增强了土壤中溶解性有机碳的固定作用;②生物炭通过为土壤微生物提供养分从而促进土壤有机质分解,间接提高土壤溶解性有机碳含量,但随培养时间的延长,土壤对溶解性有机碳的结合作用逐步加强.

3.2 不同滨岸带的土壤有效氮变化分析

Lehmann 等^[22]和 Ding 等^[23]通过室内培养实验也发现生物炭施入土壤后通过对 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的吸附来增加土壤中有效氮的质量分数,这与本研

究的结论较为一致.林地土壤钙氧化物含量较低,土壤颗粒的结合能力相对较弱,因而其 CK 组有效氮含量的减少量相对最多.然而在培养初期,CK 组有效氮含量甚至高于 BC 组,是因为土壤表层长期覆盖枯枝落叶,腐殖质丰富,且相对于其它自然植被土壤而言,林地土壤中有机质的可溶性较高,从而导致 N 矿化作用较强^[24].随着培养时间的延长,生物炭施加不仅增强了土壤对氮元素的固定,而且还抑制了反硝化反应,减少了氮氧化物的消耗,因而 BC 组土壤有效氮含量处于缓慢增加的状态.草地土壤湿度较大,铁氧化物含量相对较高,其可以作为电子受体参与化学硝化过程^[25],同时由于好氧微生物活性较弱导致氮元素矿化作用弱,因而草地土壤有效氮含量相对较低;而施加生物炭后土壤通气状况得以改善,反硝化受到抑制,氮元素消耗减少,因而 BC 组有效氮含量一直缓慢地增加.耕地 CK 组有效氮含量的减少量最低,是因为土壤中较高的钙氧化物含量导致 pH 值相对最高,从而使得耕地土壤与有效氮的结合能力相对较强.此外,耕地土壤黏粒含量较高,其与有机质相结合减轻了有机质的作用,从而削弱了土壤氮元素的矿化强度^[26],因而土壤有效氮含量的下降速度较缓.从培养初期开始,耕地土壤中有效氮含量为 BC 组明显高于 CK 组,是因为耕地土壤通透性较强,土壤微生物反硝化作用受到抑制,氮化合物的释放量减少^[27],而生物炭的添加能促进土壤中有机氮的矿化^[22],因此耕地土壤 BC 组有效氮含量一直增加.荒地土壤培养初期 BC 组有效氮含量低于 CK 组,但后期随着生物炭开始发挥作用,BC 组有效氮含量反超 CK 组,但增加幅度较小,可见生物炭作用不明显,应该是荒地土壤中微生物活性及有机质含量较低,氮元素的矿化作用相对较弱的缘故.总体而言,施加生物炭有助于提高研究区不同类型土壤有效氮含量.

3.3 不同滨岸带土壤的有效磷变化分析

不同土地利用方式下土壤中动植物残体、根系分泌物等不尽相同,因而土壤中有效磷含量变化也有所不同,而且生物炭施加后会通过影响土壤中微生物的数量、活性以及群落组成,从而对土壤中碳氮磷等营养元素的循环及形态转变产生影响,这与刘玉学等^[28]的研究结果相一致.林地土壤有大量的植物根系分泌物,能够促进微生物对有机磷的矿化作用,从而使得土壤有效磷含量增加.生物炭主要通过吸附土壤溶液中的磷酸根以及促进土壤有机态磷的矿化作用来增加土壤有效磷含量^[29].草地土壤中有效磷含量相对较低,主要是因为草地土壤中铁氧化物含量较高,铁氧化物的强亲和力限制了磷元素

在土壤中的有效性^[30];而 BC 组草地土壤有效磷含量增加较多,是因为酸性土壤中铁铝及其氧化物分别通过沉淀和配体交换来固定和吸附土壤溶液中的磷元素^[31];而施加生物炭后,土壤 pH 值增加,铁铝离子对磷的沉淀反应减少^[32],因而施加生物炭后土壤有效磷含量逐渐增加.对于耕地土壤而言,磷肥的施用使得土壤有效磷含量高于草地、荒地等自然植被土壤,因而 CK 组有效磷含量相对最高;BC 组初期土壤有效磷增长缓慢,随着培养实验的进行,生物炭的施加促进了部分有机磷的矿化,因此 BC 组土壤有效磷含量在培养后期有较大地提升;然而耕地土壤两组之间的有效磷含量差距较小,是因为耕地土壤黏粒含量较高,生物炭施入所带来的磷酸盐被土壤中黏粒大量吸附^[33, 34],有效磷含量增加不明显.荒地土壤植被稀少,有机质含量低,因而其对土壤磷元素影响较低^[35],而且土壤中的有效磷大多是由土壤中原生和次生的磷酸盐转化而来,因此 CK 组土壤有效磷含量呈现出逐渐降低的趋势;BC 组土壤有效磷增量明显,是因为荒地土壤铁含量相对较高,生物炭的施入为荒地土壤中的植物提供养分,刺激植物根系促进有机酸的分泌,并与铁发生络合作用,同时也促进了磷化合物的溶解^[36];再者,荒地土壤有效磷含量本底值较低,在生物炭的激发作用下,

荒地土壤有效磷含量的增长速度甚至高于林地、草地和耕地.综合以上分析,土壤中磷元素的有效性与铁铝等金属元素有较大的相关性,且不同土地利用方式下两组有效磷含量相差不多,而施加生物炭可以促进土壤磷元素残效的发挥,且生物炭本身含磷量不高,主要还是通过促进土壤中原有磷元素的矿化来提高土壤有效磷含量.

4 土壤营养元素有效态变化的动力学分析

为了探究生物炭的施加对土壤中营养元素有效态含量动力学变化过程的影响,本文对滨岸带不同土地利用方式下营养元素有效态含量基于培养时间及其总量的变化进行动力学方程拟合,具体结果见表 2.对于溶解性有机碳而言,拟合方程的 R^2 值均介于 0.61 ~ 0.85,其中 BC 组的拟合效果明显优于 CK 组(耕地除外),说明在人为扰动较低的土壤中施加生物炭后,土壤溶解性有机碳的变化规律更为明显.两组的拟合曲线中 DOC 含量均与总有机碳含量和时间成反比,说明土壤有机碳含量始终是逐渐下降的,施加生物炭也没有改变这种趋势.有效氮含量动力学变化的拟合方程的 R^2 值均介于 0.68 ~ 0.85,CK 组不同土地利用方式下有效氮的拟合效果差异较大,而 BC 组拟合效果较为一致,且除林地外

表 2 土壤营养元素有效态含量变化动力学拟合方程¹⁾

Table 2 Dynamics fitting equations of available contents changes for soil nutrients

指标	土地利用	组别	拟合方程	R^2	P
溶解性有机碳	林地	CK	$y = 133 - 3.39\text{TOC} - 7.01 \ln t$	0.63	<0.05
		BC	$y = 99.5 - 1.75\text{TOC} - 5.63 \ln t$	0.85	<0.05
	草地	CK	$y = 137 - 3.29\text{TOC} - 6.81 \ln t$	0.73	<0.01
		BC	$y = 81.1 - 1.46\text{TOC} - 3.37 \ln t$	0.77	<0.05
	耕地	CK	$y = 215 - 5.35\text{TOC} - 8.91 \ln t$	0.79	<0.001
		BC	$y = 109 - 2.03\text{TOC} - 4.18 \ln t$	0.79	<0.01
	荒地	CK	$y = 183 - 6.40\text{TOC} - 11.0 \ln t$	0.61	<0.05
		BC	$y = 107 - 2.81\text{TOC} - 6.60 \ln t$	0.69	<0.05
有效氮	林地	CK	$y = 992 - 198\text{TN} - 8.44 \ln t$	0.82	<0.05
		BC	$y = -1149 + 253\text{TN} + 3.87 \ln t$	0.75	<0.05
	草地	CK	$y = 296 - 70.2\text{TN} - 4.52 \ln t$	0.68	<0.05
		BC	$y = -810 + 228\text{TN} + 4.03 \ln t$	0.85	<0.001
	耕地	CK	$y = 535 - 103\text{TN} - 5.49 \ln t$	0.77	<0.05
		BC	$y = -668 + 150\text{TN} - 6.91 \ln t$	0.79	<0.05
	荒地	CK	$y = 459 - 133\text{TN} - 7.41 \ln t$	0.71	<0.05
		BC	$y = -331 + 112\text{TN} + 4.05 \ln t$	0.74	<0.05
有效磷	林地	CK	$y = -95.4 + 170\text{TP} + 2.23 \ln t$	0.81	<0.05
		BC	$y = -162 + 236\text{TP} + 4.56 \ln t$	0.74	<0.05
	草地	CK	$y = -9.42 + 90.2\text{TP} + 2.29 \ln t$	0.74	<0.05
		BC	$y = -45.0 + 152\text{TP} + 3.80 \ln t$	0.68	<0.05
	耕地	CK	$y = -145 + 168\text{TP} + 4.54 \ln t$	0.91	<0.001
		BC	$y = -136 + 154\text{TP} + 4.79 \ln t$	0.89	<0.001
	荒地	CK	$y = 41.1 - 49.0\text{TP} - 1.68 \ln t$	0.76	<0.01
		BC	$y = -35.1 + 162\text{TP} + 5.44 \ln t$	0.78	<0.01

1) t 表示时间(d), TOC、TN 和 TP 含量的单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 溶解性有机碳、有效氮和有效磷含量的单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

BC 组拟合效果均优于 CK 组,说明林地土壤施加生物炭后土壤有效氮含量变化规律较差。CK 组拟合曲线有效氮含量与总氮含量呈反比,而 BC 组是正比,说明生物炭的施加主要通过影响土壤总氮含量从而改变土壤有效氮含量。而有效磷含量动态变化预测结果的拟合方程 R^2 值均介于 0.68 ~ 0.91,除荒地外,其它土地利用方式的拟合效果皆是 CK 组优于 BC 组,但两组之间的差异并不大,主要因为土壤中磷元素残留较多,有效磷大多由其转化而来,施加生物炭带入了磷元素,改变了土壤有效磷的来源机制,因而拟合效果反而略差于 CK 组。

总体而言,添加生物炭后,不同土地利用方式下有效氮的动力学方程预测效果较好。就不同元素而言,溶解性有机碳的变化与土壤总有机碳(TOC)的关联性在林地土壤较好,有效氮与土壤总氮(TN)的关联性在草地土壤较好,而有效磷与土壤总磷(TP)的关联性则在耕地土壤较好,表明生物炭添加对不同土地利用土壤的作用效果存在明显的差别,这既与营养元素的地球化学性质有关,也与土壤的理化性质、微生物结构有关。

5 结论

太湖滨岸带土壤在施加生物炭后,随着培养时间的延长,溶解性有机碳含量呈现出逐渐下降趋势,有效氮含量轻微增加,有效磷含量显著增加。不同的土地利用方式中以林地土壤的营养元素有效态含量变化差异最大,其次是耕地和荒地土壤,草地土壤中营养元素有效态变化差异较小。土壤营养元素有效态变化的动力学模拟显示,不同利用类型的土壤对生物炭施加的响应效果存在差异,这与营养元素的地球化学性质和土壤理化性质有关。对于太湖滨岸带土壤而言,施加生物炭均能增加土壤氮磷的有效态含量,且在不同利用方式土壤中的环境效应存在差异,这种现象在流域环境管理中应该加以考虑。

参考文献:

- [1] 陈颖,刘玉学,陈重军,等. 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, **29** (1): 314-320.
Chen Y, Liu Y X, Chen C J, *et al.* Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(1): 314-320.
- [2] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, **41**(2): 206-213.
- [3] Singh R, Babu J N, Kumar R, *et al.* Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective[J]. Ecological Engineering, 2015, **77**: 324-347.
- [4] 郭伟,陈红霞,张庆忠,等. 华北高产农田施用生物炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(3): 425-428.
Guo W, Chen H X, Zhang Q Z, *et al.* Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in north China Plain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(3): 425-428.
- [5] Xu G, Wei L L, Sun J N, *et al.* What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism? [J]. Ecological Engineering, 2013, **52**: 119-124.
- [6] Mukherjee A, Zimmerman A R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures[J]. Geoderma, 2013, **193-194**: 122-130.
- [7] El-Naggar A, Lee S S, Awad Y M, *et al.* Influence of soil properties and feedstocks on biochar potential for carbon mineralization and improvement of infertile soils[J]. Geoderma, 2018, **332**: 100-108.
- [8] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. 土壤通报, 2013, **44**(6): 1379-1384.
Fu L L, Lin H H, Li L Q, *et al.* Persistent effects of biochar application on organic carbon fractions of paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(6): 1379-1384.
- [9] 吴嘉楠, 闫海涛, 彭桂新, 等. 生物质炭与氮肥配施对土壤氮素变化和烤烟氮素利用的影响[J]. 土壤, 2018, **50**(2): 256-263.
Wu J N, Yan H T, Peng G X, *et al.* Effects of biochar addition combined with nitrogen fertilizer on soil nitrogen and nitrogen utilization of flue-cured tobacco[J]. Soils, 2018, **50**(2): 256-263.
- [10] 夏丽丹, 曹升, 张虹, 等. 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(5): 1101-1111.
Xia L D, Cao S, Zhang H, *et al.* Effect of biochar on phosphorus forms and phosphatase activity in red soil under different water conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(5): 1101-1111.
- [11] Wang D Y, Griffin D E, Parikh S J, *et al.* Impact of biochar amendment on soil water soluble carbon in the context of extreme hydrological events[J]. Chemosphere, 2016, **160**: 287-292.
- [12] 张甲坤, 陶澍, 曹军. 土壤中水溶性有机碳测定中的样品保存与前处理方法[J]. 土壤通报, 2000, **31**(4): 174-176.
Zhang J S, Tao S, Cao J. Soil sample preservation and pretreatment for water soluble organic carbon determination[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, **31**(4): 174-176.
- [13] Beck D A, Johnson G R, Spolek G A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(8-9): 2111-2118.
- [14] 吴丹, 林静雯, 张岩, 等. 牛粪生物炭对土壤氮肥淋失的抑制作用[J]. 土壤通报, 2015, **46**(2): 458-463.
Wu D, Lin J W, Zhang Y, *et al.* Inhibitory effects of dairy manure biochar on soil nitrogen leaching[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **46**(2): 458-463.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [J]. Journal of Paleolimnology, 2001, **25**(1): 101-110.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出

- 版社, 2001.
- [18] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils; a review[J]. *Plant and Soil*, 2010, **337**(1-2): 1-18.
- [19] 邢英, 李心清, 房彬, 等. 生物炭添加对两种类型土壤 DOC 淋失影响[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(2): 133-137.
Xing Y, Li X Q, Fang B, *et al.* Effect of biochar addition on DOC leaching from two different types of soils[J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(2): 133-137.
- [20] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(6): 893-899.
- [21] 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.
- [22] Lehmann J, Da Silva Jr J P, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(2): 343-357.
- [23] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, *et al.* Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **213**(1-4): 47-55.
- [24] Curtin D, Campbell C A, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(1): 57-64.
- [25] 王娅静, 刘晶, 郭景恒. 铁作用下土壤氮素化学转化过程的研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2014, **19**(2): 95-99.
Wang Y J, Liu J, Guo J H. Chemical transformation of soil nitrogen under the influence of iron: a review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, **19**(2): 95-99.
- [26] Hassink J, Bouwman L A, Zwart K B, *et al.* Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**(1): 47-55.
- [27] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, **11**(2): 403-427.
- [28] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(6): 1690-1695.
Liu Y X, Tang X, Yang S M, *et al.* Review on the effect of biochar on soil phosphorus transformation and mechanisms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, **22**(6): 1690-1695.
- [29] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(5): 1009-1015.
Zeng A, Liao Y C, Zhang J L, *et al.* Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(5): 1009-1015.
- [30] Khan I, Fahad S, Wu L, *et al.* Labile organic matter intensifies phosphorous mobilization in paddy soils by microbial iron (III) reduction[J]. *Geoderma*, 2019, **352**: 185-196.
- [31] Schoumans O F, Chardon W J. Phosphate saturation degree and accumulation of phosphate in various soil types in The Netherlands[J]. *Geoderma*, 2015, **237-238**: 325-335.
- [32] Wang T, Camps-Arbestain M, Hedley M, *et al.* Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars[J]. *Plant and Soil*, 2012, **357**(1-2): 173-187.
- [33] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1606-1612.
Cai G, Hu Y J, Wang T T, *et al.* Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1606-1612.
- [34] Gundale M J, DeLuca T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **231**(1-3): 86-93.
- [35] 白秀玲, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封城市土壤磷素组成特征及流失风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 909-915.
Bai X L, Ma J H, Sun Y L, *et al.* Characterization of phosphorus in urban surface soils in Kaifeng City and its risk of loss[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 909-915.
- [36] Zhao X R, Li D, Kong J, *et al.* Does biochar addition influence the change points of soil phosphorus leaching? [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**(3): 499-506.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)