

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国锋, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

生物炭输入对土壤本体有机碳矿化的影响

陈威^{1,2}, 胡学玉^{1,2*}, 陆海楠^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 近年来,生物炭应用于土壤后其碳汇能力已成为国内外的研究热点,但是目前研究结果显示其碳汇功能仍然存在争议,生物炭与土壤本体有机碳之间的作用关系还有待探明. 研究以水稻土(C₃土壤)为供试土壤,向其中添加以水洗(CS)和未水洗(CN)方式处理的玉米(C₄作物)秸秆生物炭,生物炭分别按1%和3%(CS1%、CS3%和CN1%、CN3%)的质量比与C₃土壤均匀混合,以不添加生物炭(CK)为对照处理,每个处理重复3次,开展室内培养实验,探讨生物炭添加对土壤有机碳矿化的影响. 结果表明:①在180 d的培养期内,CS1%、CS3%、CN1%这3种处理的土壤CO₂累计释放量分别为1 865.7、1 864.4和1 856.2 mL·kg⁻¹,均高于对照土壤CK的1 779.0 mL·kg⁻¹,但未形成显著差异. 处理CN3%的CO₂累计释放量最大,为2 289.1 mL·kg⁻¹,明显高于其他处理及对照土壤. 说明较高添加量下,水洗生物炭CS处理减排效果明显;②同位素分析结果显示,CK处理土壤的本体有机碳的CO₂累计释放量最高,达到1 534.2 mL·kg⁻¹,CS3%与CN3%处理土壤本体有机碳的CO₂累计释放量分别为1 000.4 mL·kg⁻¹和1 153.7 mL·kg⁻¹,均明显低于对照处理,说明2种生物炭的添加均能抑制土壤本体有机碳的矿化. 激发效应的结果也验证了这一点,CS3%处理土壤的激发效应PE值为-34.8%,处理CN3%的PE值为-24.8%,CS生物炭的负激发效应更显著.

关键词: 生物炭; 水洗处理; 土壤有机碳; CO₂释放; δ¹³C

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)06-2300-06 **DOI:** 10.13227/j.hjks.2015.06.051

Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon

CHEN Wei^{1,2}, HU Xue-yu^{1,2*}, LU Hai-nan^{1,2}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Province Key Laboratory of Wetland Evolution and Ecological Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Since the biochar was applied in soil, its function in carbon sink had become a research hotspot recently. However, the present studies showed that its function in carbon sink remained controversial and the interaction between biochar and soil organic carbon remained to be investigated. So our study used paddy soil (C₃ soil) as the experimental soil, and added washed (CS) or unwashed (CN) corn stalk (C₄ crop). Biochar was mixed with soil uniformly by two kinds of weight, each treatment was 1% and 3% of the soil (CS1%, CS3% and CN1%, CN3%). Soil without biochar was used as the control treatment (CK), every treatments repeated three times. Then indoor culturing experiments was carried out to study the effect of biochar on the mineralization of organic carbon. The results showed as follows: ① During the 180 days' experiment, the accumulated amount of released CO₂ in CS1%, CS3% and CN1% groups were 1 865.7, 1 864.4 and 1 856.2 mL·kg⁻¹ respectively, all were higher than the CK (1 779.0 mL·kg⁻¹). But the differences were not significant. However, the accumulated amount of released CO₂ in the CN3% group was the highest (2 289.1 mL·kg⁻¹), which was significantly higher than those of all other groups. This showed that high addition of CS biochar significantly reduced the soil CO₂ release. ② The accumulated amount of released CO₂ of native soil from the CK treatment, CS treatment and CN treatment were 1 534.2, 1 000.4 and 1 153.7 mL·kg⁻¹ respectively, among which the CK group is significantly higher than the others. It showed that additions of two kinds of biochar both could inhibit the mineralization of organic carbon in the soil. The result of priming effect also proved that: the PE value of CS 3% group was -34.8%, and the PE value of CN 3% group was -24.8%. This showed that the negative priming effect significantly induced by washed (CS) biochar.

Key words: biochar; washing treatments; soil organic carbon; CO₂ cumulative release; δ¹³C

据估计,全球土壤总碳库储量约2 500 Pg,其中1 550 Pg为有机碳库,约为大气中碳储量(约760 Pg)的2倍,为生物碳库(约560 Pg)的2.7倍^[1]. 土壤有机碳库的变化将显著影响大气CO₂的浓度,因此如何增加土壤有机碳库储量,或是减少土壤有机碳的矿化分解,对缓解全球温室效应具有重要意义.

生物炭(biochar)是黑碳(black carbon)的一种,专指由各种生物质材料(作物秸秆、木屑、动物粪

便等)在无氧或缺氧条件下,经低温(<700℃)裂解炭化产生的一类高度芳香化的、抗分解能力极强的固态物质,是一种富含碳元素的有机连续体^[2,3].

收稿日期: 2014-10-16; 修订日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071159,41371485); 湖北省公益性科技研究项目(GYS0022); 湖北省自然科学基金重点项目(2014CFA116)

作者简介: 陈威(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: 872516150@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

由于生物炭自身碳含量较高并表现出一定的化学或生物学惰性,应用于土壤后其所具有的碳汇功能成为近年来的研究热点^[4~7]。多数研究者认为生物炭输入土壤后能有效提高土壤总有机碳含量^[8~10],同时对土壤有机碳矿化产生一定影响^[11~13]。国内外关于生物炭对土壤有机碳矿化影响的研究已经有一些报道,但是结论各不相同,甚至完全相反^[14~18]。土壤类型不同、气候条件的差异以及不同的生物炭制备原料和制备条件等因素都会影响生物炭在土壤中的反应性^[12, 19],乃至影响其碳汇功能的表现。到目前为止,当生物炭与土壤混合后,其共存体系中有有机碳的分解转化及其环境效应仍然缺乏足够的背景作支撑,生物炭输入对土壤本体有机碳矿化的影响与贡献尚不十分明确^[20, 21]。

本研究以我国长江中下游广泛分布的人为水成土——水稻土为供试土壤(C₃ 土壤),以大宗粮食作物玉米秸秆(C₄ 作物)为制取生物炭的生物质原材料,分别采用水洗(CS)与未水洗(CN)方式处理生物炭,同时模拟自然条件开展室内培养实验,并通过稳定碳同位素技术表征土壤有机碳稳定同位素的变化,以期精确地描述生物炭——土壤系统中生物炭对土壤本体有机碳矿化的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 生物炭制备及处理

将玉米秸秆洗净,去除表面黏附物,60℃烘至恒重,将秸秆剪碎至1.0 cm的小段,称取20 g已处理好的秸秆于300 mL瓷坩埚中,盖上盖子,置于程序控温马弗炉(KSW-4b-11A,湖北英山县建力电炉制造有限公司)内,以5℃·min⁻¹升至目标温度500℃,保持目标温度2 h,关闭马弗炉。待炉膛温度自然降至室温后,取出烧制好的生物炭,用研钵磨细过100目筛备用。

取部分生物炭与去离子水按1:10比例混合,振荡1h,去除上浮部分生物炭并用砂芯漏斗0.45 μm滤膜过滤,此过程重复5次。将水洗处理的生物炭置于电热鼓风干燥箱中恒温(25℃)烘干。水洗处理的生物炭样品记为CS生物炭,未水洗处理的生物炭样品记为CN生物炭。

1.1.2 供试土壤

供试土壤采自武汉市江夏区水稻种植区,取样地区连续种植水稻30年以上,为C3土壤。采用蛇形布点法进行采样,采集0~20 cm的表层土壤,多

点混合。将采集的土壤样品运回实验室、风干,尽量取出植物残体及其它固体物,磨细过2 mm筛备用。土壤基本理化性状如下:土壤pH 5.75、土壤有机质含量19.8 g·kg⁻¹、土壤碱解氮含量875 mg·kg⁻¹、土壤速效磷含量19.48 mg·kg⁻¹、土壤速效钾含量93.60 mg·kg⁻¹。

1.2 实验方法

1.2.1 室内培养实验

实验设置5个处理,每个培养处理土壤质量均为2 kg,生物炭按照不同质量比与土壤均匀混合。处理1:不添加生物炭的空白对照(CK);处理2:添加1%水洗生物炭(CS1%);处理3:添加3%水洗生物炭(CS3%);处理4:添加1%未水洗生物炭(CN1%);处理5:添加3%未水洗生物炭(CN3%)。每个处理设置3次重复。

分别将不同用量不同类型的生物炭与土样混合均匀,并调节培养瓶中含水量至田间持水量的(60±5)%,然后,将盛有20 mL 2 mol·L⁻¹的NaOH溶液的25 mL小烧杯小心地置于培养瓶内,将培养瓶加盖密封好,于(25±1)℃的恒温箱中培养,并设置光照强度(每天0~12 h:0 lx;13~24 h:30 000 lx)。模拟自然条件中没有种植植物的土壤。培养过程中利用重量法定期补充水分。

1.2.2 生物炭与土壤δ¹³C值的测定

检测方法:同位素质谱分析。

检测仪器:气体稳定同位素比值质谱仪(MAT-251EM, Finnigan MAT, Germany),分辨率:>250(10%谷处);分辨精度:δ¹³C<0.01‰;半度灵敏:<2×10⁻⁶。

有机碳¹³C同位素取样测定时间:1、7、28、90、150 d。

取样方法:将各处理培养土样品风干、磨细、过2 mm筛,称取20 g样品加入过量1 mol·L⁻¹ HCl溶液,充分搅拌,反应24 h以除去碳酸盐类,用去离子水洗至中性,室温烘干,过100目筛备用。测量时取微量已制备好的样品放入气体稳定同位素质谱仪中测定,得到δ¹³C值。

土壤混合样品碳稳定同位素δ¹³C值通过(1)式表达:

$$\delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$, R_{standard} 是PDB标准, $R_{\text{PDB}} = 0.011\,237\,2$ ^[22],通过仪器测定结果计算土壤样品稳定同位素¹³C值变化情况。

生物炭与土壤有机碳对土壤CO₂排放量的贡

献度可以通过下列公式求得:

$$(1 - P) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{生物炭}} + P \times \delta^{13}\text{C}_{\text{土}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{混合}} \quad (2)$$

$$P(\%) = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{混合}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{生物炭}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{土}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{生物炭}}} \quad (3)$$

式中, P : 土壤本体对混合样品 CO_2 排放量贡献度; $\delta^{13}\text{C}_{\text{土}}$: 对照土壤的同位素组成值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{生物炭}}$: 生物炭样品的同位素组成值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{混合}}$: 添加生物炭后土壤样品的混合同位素组成值。

1.2.3 土壤 CO_2 释放量测定

在培养中的第 1、3、7、14、28、56、90、120、150、180 d, 取出装有碱液的小烧杯, 加入过量的 BaCl_2 溶液, 加 2 滴酚酞指示剂, 用已标定的盐酸滴定至红色消失, 计算 CO_2 的释放量。

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{(c_1 \times V_1 - c_2 \times V_2)}{2} \times 22.4 \times 1000 \quad (4)$$

式中, V_{CO_2} : 土壤样品 CO_2 释放量, mL; c_1 : 原先放入的 NaOH 溶液浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; V_1 : 原先放入的 NaOH 溶液体积, L; c_2 : 取出的 NaOH 溶液浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; V_2 : 取出的 NaOH 溶液体积, L; 22.4: 标准大气压下气体摩尔体积 $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

1.2.4 土壤激发效应的定量^[23]

$$\text{PE}(\%) = \frac{(C_1 - C_2)}{C_2} \times 100\% \quad (5)$$

式中, PE : 激发效应的量化值; C_1 : 来自于添加外源有机质后土壤原有有机碳矿化的 CO_2 量; C_2 : 未添加外源有机质的土壤有机碳的 CO_2 量。

式(5)中当 PE 为正时, 说明外源有机质的添加引起了土壤有机碳的正激发效应, 当 PE 为负时, 说明外源有机质的添加引起了土壤有机碳的负激发效应, 即抑制了本体有机碳的矿化。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 与 Croeldraw X4 制作数据图、SPSS 13.0 进行单因素方差分析, 显著性水平设为 0.05。

2 分析与讨论

2.1 生物炭输入对土壤有机碳稳定同位素组成的影响

自然界中 C_3 植物与 C_4 植物具有不同的光合作用路径, 在吸收 CO_2 同化形成有机质的过程中, 稳定碳同位素分馏模式也不同, 导致 C_3 植物与 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异明显。 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -35%

$\sim -20\%$ 之间, 平均为 -27% ; C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -15% $\sim -7\%$ 之间, 平均为 -13% ^[24]。

C_3 和 C_4 植物在一个生态系统中长期存在后, 就会在土壤有机质中留下同位素信号, 土壤有机质源物质主要来自其中所生长的植物, 所以土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常接近于该生态系统中优势植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[22]。在 C_3 植物长期生长的土壤中, 其有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值因此接近于 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 可以称之为 C_3 土壤。

表 1 为水洗生物炭 (CS)、未水洗生物炭 (CN) 及供试土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 2 种生物炭的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 -13.33% $\sim -13.44\%$ 之间, 处于 C_4 植物原有的同位素组成范围内, 与 C_3 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值 -27.76% 差异明显。

表 1 水洗与未水洗玉米秸秆生物炭及 C_3 土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Table 1 The $\delta^{13}\text{C}$ values of washed and unwashed corn straw biochar and C_3 soil

样品类型	$\delta^{13}\text{C}\%$ ($- \text{VPDB}$)
水洗生物炭 (CS)	-13.33
未水洗生物炭 (CN)	-13.44
供试土壤	-27.76

表 2 表示通过气体稳定同位素比值质谱仪测定的生物炭——土壤混合样品随培养时间延长, 其稳定碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化情况。

从表 2 中发现, 随培养时间延长, 土壤有机碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}$ 值稳定增加, 到 150 d 时, CN3% 处理与 CS3% 处理土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -20.415% 和 -19.745% , 表示随着 C_4 植物生物炭的加入, 土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值是一个稳定增加的过程, 说明 C_4 植物秸秆生物炭输入土壤后对土壤有机碳的贡献明显。

表 2 土壤稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 随时间的变化值/ $\%$

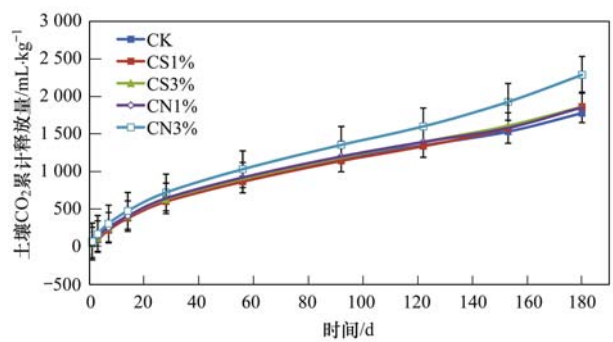
Table 2 Changes of the stable isotope of the organic matter in soil, $\delta^{13}\text{C}$ value/ $\%$

处理代号	水洗生物炭 (CS3%)	未水洗生物炭 (CN3%)
1	-23.575	-24.985
7	-23.685	-23.355
28	-22.885	-22.050
90	-23.045	-23.735
150	-19.745	-20.415

2.2 生物炭输入对土壤 CO_2 释放量与释放速率的影响

图 1 表示生物炭添加后, 不同处理土壤的 CO_2 累计释放量。从中可知, 在 180 d 的培养期内, CS1%、CS3%、CN1% 这 3 种处理的土壤 CO_2 累计

释放量分别为1 865. 7、1 864. 4和1 856. 2 mL·kg⁻¹，均高于对照土壤 CK 的1 779. 0mL·kg⁻¹，但未形成显著差异. 处理 CN3% 的 CO₂ 累计释放量最大,为 2 289. 1mL·kg⁻¹，明显高于其他处理及对照土壤. 说明较高添加量下,生物炭经过水洗 (CS) 后减排效果明显. 这可能是因为水洗处理减少了生物炭中易分解有机碳组分引起的结果,而 2 种生物炭在较低添加量下,对土壤的 CO₂ 累计释放量没有明显影响.



图中误差棒表示标准差 (SD),下同
图1 不同处理土壤 CO₂ 释放量累计值

Fig. 1 Accumulative CO₂ emissions of different soil treatments

土壤 CO₂ 释放速率是指单位质量土壤单位时间内矿化产生的 CO₂ 量,本研究以每千克湿土每天释放的 CO₂ 毫升数表示,单位为 mL·(kg·d)⁻¹.

图2 为不同处理土壤 CO₂ 释放速率随培养时间的变化情况,从中可知,培养第 1 d, CS1%、CS3%、CN1% 及 CN3% 这 4 种处理 CO₂ 释放速率分别为 47. 0、57. 3、61. 1 及 74. 7 mL·(kg·d)⁻¹,均显著高于对照土壤 42. 7 mL·(kg·d)⁻¹. 有生物炭添加的土壤矿化 CO₂ 释放速率显著增加,其原因可能是供试土壤碳氮 (C/N) 比值偏低,仅为 13. 1,在此条件下土壤 C 成为制约土壤某一类微生物活性的主要因素之一,当生物炭加入后,其较高的含 C 量与 C/N 比值使土壤有机 C 含量增加、C/N 值提高,因此微生物的能量来源增加、生长环境改善,微生物活性增强,从而导致土壤有机碳矿化速率迅速提高.

对比不同处理生物炭在相同添加量下 CO₂ 释放速率发现,CN 生物炭处理释放速率明显高于 CS 处理的 CO₂ 释放速率,这一方面可能是由于 CN 生物炭中易分解组分所引起,另一方面也可能是因为 CN 生物炭偏碱性、而 CS 生物炭更加接近中性,CN 生物炭对供试土壤酸性环境的改善更加明显,增强了土壤微生物的酶活性,土壤矿化速率加快.

在整个培养期内,各处理释放速率均随着时间的延长而显著降低,90 d 后逐渐稳定,但添加生物炭处理的 CO₂ 释放速率依然高于对照土壤.

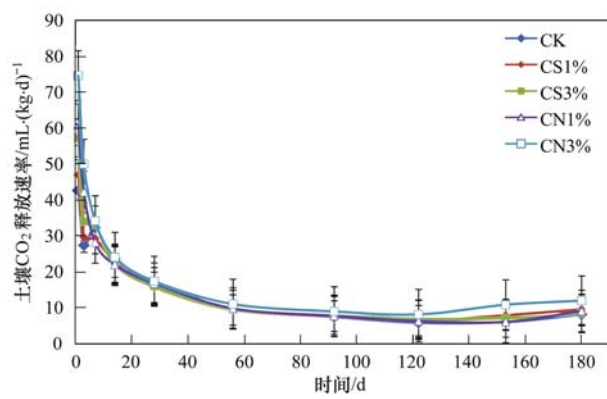


图2 土壤 CO₂ 释放速率的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil CO₂ release rate

2.3 生物炭输入对土壤本体有机碳的影响

土壤本体 CO₂ 释放量等于土壤 CO₂ 总排放量乘以土壤本体 CO₂ 释放量贡献率,结果如图 3 所示. 从中可见,培养 150 d 后,水洗生物炭处理 CS 3% 与未水洗生物炭处理 CN 3% 土壤本体 CO₂ 累计释放量分别为 1 000. 4 mL·kg⁻¹ 和 1 153. 7 mL·kg⁻¹,均明显低于对照处理 CK 的 1 534. 2 mL·kg⁻¹,说明 2 种生物炭的添加均能抑制土壤本体有机碳的矿化. 有研究表明添加不同原料、制备条件的生物炭对土壤本体有机碳矿化均有抑制作用^[14, 18],并且随着生物炭添加量增加,土壤本体矿化量下降^[17],该结果与本研究结

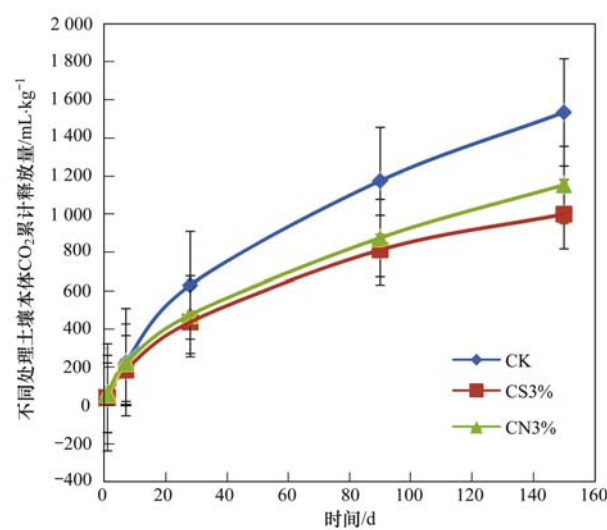


图3 不同处理土壤本体 CO₂ 累计释放量

Fig. 3 Accumulative CO₂ emissions of the native soil from different samples

果一致. 但是这种抑制本体有机碳分解的机制并不明确, 可能是将微生物利用的碳源转移, 使得微生物利用生物炭自身含有的易分解态碳来达到减少对土壤本体有机碳的分解, 也有可能是生物炭的添加致微生物的群落发生了变化.

由图 3 不难发现, 处理 CS3% 的土壤本体 CO_2 释放量低于处理 CN3% 的释放量. 通过公式 (5) 定量计算两种生物炭的激发效应 PE 值, 结果如图 4 所示. 从中可知, 培养第 1 d, CN3% 处理有明显的 PE 正值, CS3% 处理土壤本体表现为微弱的 PE 负值.

一般认为外源有机质添加进入土壤后, 引起土壤本体有机质矿化速率正的或负的变化是由于微生物活性、数量和组成的改变引起的^[25], 可能是因为 CN 处理生物炭本身含有较多易分解态有机质, 提供微生物更多可利用原料, 提高了土壤微生物活性, 加速了土壤本体有机碳的矿化分解, 故短期内引起了正的激发效应.

随着培养时间的延长, CN3% 及 CS3% 处理的 PE 值均小于 0, 生物炭添加对土壤的负激发效应迅速增强. 至培养第 150 d, 处理 CS3% 的 PE 值为 -34.8%, 处理 CN3% 的 PE 值为 -24.8%. 与未水洗生物炭 CN 相比, 水洗生物炭 CS 引起的负激发效应更显著. 研究认为, 不同生物炭进入土壤后, 培养前期将刺激土壤本体有机 C 的矿化, 表现为正激发效应, 后期则抑制土壤有机 C 矿化, 产生负激发效应, 大部分培养实验持续时间均为半年左右, 其总激发效应呈现出不一致的结论^[14, 26, 27], 其中不同生物炭添加至水稻土中的结果均为负激发效应^[17, 18], 与本研究结果一致.

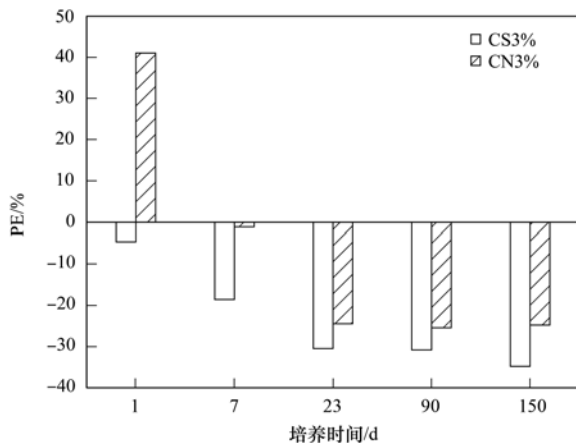


图 4 生物炭激发效应 PE 值

Fig. 4 PE value of biochar

3 结论

(1) 土壤中添加不同比例的水洗生物炭 (CS1%、CS3%)、未水洗生物炭 (CN1%、CN3%) 后, 土壤 CO_2 累计释放量分别为 1 865.7、1 864.4、1 856.2 和 2 289.1 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均高于对照土壤 CK 的释放量 1 779.0 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对比添加不同处理生物炭土壤的 CO_2 释放量发现, 在较低添加量下, 不同生物炭对土壤 CO_2 释放量没有明显影响, 在较高添加量下, 水洗处理生物炭减排效果更显著.

(2) 根据对 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分析, 添加生物炭处理与对照土壤相比, 土壤-生物炭混合样品的有机碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 随培养时间的延长而稳定增加, 计算得到水洗 (CS3%) 与未水洗 (CN3%) 这 2 种生物炭处理土壤本体 CO_2 释放量分别为 1 000.4 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 1 153.7 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$, 都显著低于对照土壤的 1 534.2 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这可能是由于生物炭中易分解态碳组分通过代替土壤本体有机碳被微生物利用从而保护土壤本体有机碳免于被分解, 产生负激发效应, 其中 CS 生物炭对土壤矿化抑制作用更加明显. 基于 180 d 的室内培养实验结果, 生物炭施用于土壤可作为碳储存载体.

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [2] Hammes K, Schmidt M W I, Smernik R J, *et al.* Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(3): GB3016.
- [3] Goldberg E D. Black carbon in the environment: properties and distribution[M]. New York, NY: John Wiley & Sons, 1985. 198.
- [4] Powlson D S, Whitmore A P, Goulding K W T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, **62**(1): 42-55.
- [5] Sutherland W J, Clout M, Cote I M, *et al.* A horizon scan of global conservation issues for 2010[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, **25**(1): 1-7.
- [6] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**(3): 118-124.
- [7] Bruun E W, Ambus P, Egsgaard H, *et al.* Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 73-79.
- [8] 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.
- [9] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, *et al.* Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. Transactions of the Asabe, 2008, **51**(6): 2061-2069.
- [10] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 127-131.
- [11] Hamer U, Marschner B. Priming effects of sugars, amino acids, organic acids and catechol on the mineralization of lignin and peat [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, **165**(3): 261-268.
- [12] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, *et al.* Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil [J]. Chemosphere, 2009, **77**(4): 574-581.
- [13] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 93-99.
- [14] 刘燕萍, 高人, 杨玉盛, 等. 黑碳添加对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2011, **43**(5): 763-768.
- [15] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, *et al.* Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(11): 2304-2314.
- [16] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, *et al.* Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation [J]. Organic Geochemistry, 2004, **35**(7): 823-830.
- [17] 赵次娴, 陈香碧, 黎蕾, 等. 添加蔗渣生物质炭对农田土壤有机碳矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(5): 987-994.
- [18] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 570-575.
- [19] Hilscher A, Heister K, Siewert C, *et al.* Mineralisation and structural changes during the initial phase of microbial degradation of pyrogenic plant residues in soil [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(3): 332-342.
- [20] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, *et al.* A review of biochar and its use and function in soil [J]. Advances in Agronomy, 2010, **105**: 47-82.
- [21] Lehmann J, Sohi S. Comment on "fire-derived charcoal causes loss of forest humus" [J]. Science, 2008, **321**(5894): 1295.
- [22] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥. $\delta^{13}\text{C}$ 方法在土壤有机质研究中的应用[J]. 土壤学报, 2005, **42**(3): 495-503.
- [23] Hamer U, Marschner B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(3): 445-454.
- [24] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(3): 425-448.
- [25] 黄文昭, 赵秀兰, 朱建国, 等. 土壤碳库激发效应研究[J]. 土壤通报, 2007, **38**(1): 149-154.
- [26] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. Science, 2008, **320**(5876): 629.
- [27] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 酸性和碱性土壤中芒草生物质炭激发效应的特征与差异[J]. 土壤学报, 2014, **51**(1): 90-95.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of YuanYang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行