

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094) 《环境科学》征订启事 (4126) 信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响

王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩*, 谢德体

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘要: 采用野外采样和室内培养试验, 研究了不同土地利用类型(林地和旱地)下的石灰土表层土壤有机碳(SOC)矿化对变温环境的响应. 两种供试土样分别采自贵州省普定县天龙山区域的典型林地和旱地的 0~10 cm 表层. 在培养试验中, 依据积温相同的原理, 设置变温(范围: 15~25℃, 变温间隔 12 h)和恒温(20℃)两个温度处理, 培养时间为 56 d. 在整个培养期内, 旱地石灰土变温处理的 SOC 累积矿化量(63.32 mg·kg⁻¹)虽略低于恒温处理(63.96 mg·kg⁻¹), 但两者之间差异不显著, 而森林石灰土变温处理的 SOC 累积矿化量(169.46 mg·kg⁻¹)则显著低于恒温处理(209.52 mg·kg⁻¹) ($P < 0.05$), 这表明不同土地利用类型的石灰土 SOC 矿化对变温环境的响应不同. 受植被和土地利用类型的影响, 森林石灰土和旱地石灰土表层的 SOC 含量和组成差异显著, 这可能是导致其 SOC 矿化对变温环境响应差异的重要原因. 另外, 各温度处理中, 土壤可溶性有机碳(DOC)含量与 SOC 日均矿化量之间均呈极显著正相关($P < 0.01$), 表明制约土壤 DOC 生成是温度影响土壤有机碳矿化的一个重要途径. 在培养过程中, 土壤微生物量碳含量不能有效反映恒温和变温下的 SOC 矿化差异, 结合矿化动力学分析可知, 同恒温相比, 变温虽然不能通过改变微生物数量来影响 SOC 矿化, 但能通过改变微生物群落的总体活性来影响 SOC 矿化过程.

关键词: 土壤有机碳; 矿化; 温度; 土地利用; 可溶性有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4291-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.035

Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils

WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, CI En, XIE De-ti

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400715, China)

Abstract: Soil sampling in the field and incubation experiment in the laboratory were conducted to investigate the responses of soil organic carbon (SOC) mineralization to variable temperature regimes in the topsoil of limestone soils from forest land and dry land. Two incubated limestone soils were sampled from the 0-10 cm layers of typical forest land and dry land respectively, which were distributed in Tianlong Mountain area of Puding county, Guizhou province. The soils were incubated for 56 d under two different temperature regimes including variable temperature (range: 15-25℃, interval: 12 h) and constant temperature (20℃), and the cumulative temperature was the same in the two temperature treatments. In the entire incubation period (56 d), the SOC cumulative mineralization (63.32 mg·kg⁻¹) in the limestone soil from dry land (SH) under the variable temperature was lower than that (63.96 mg·kg⁻¹) at constant 20℃, and there was no significant difference in the SOC cumulative mineralization between the variable and constant temperature treatments ($P < 0.05$). While the cumulative mineralization (169.46 mg·kg⁻¹) of organic carbon in the limestone soil from forest land (SL) under the variable temperature was significantly lower than that (209.52 mg·kg⁻¹) at constant 20℃. The results indicated that the responses of SOC mineralization to the variable temperature were obviously different between SL and SH soils. The SOC content and composition were significantly different between SL and SH soils affected by vegetation and land use type, which suggested that SOC content and composition were important factors causing the different responses of SOC mineralization to variable temperature between SL and SH soils. In addition, the dissolved organic carbon (DOC) content of two limestone soils were highly ($P < 0.01$) positively correlated with daily mineralization of soil organic carbon in both temperature treatments, which implied that controlling DOC production was an important way for the temperature influence of SOC mineralization. During the incubation period, SOC mineralization was independent of microbial biomass carbon (MBC) content in both temperature treatments. Combined with mineralization kinetic data, the results showed that, compared to constant temperature 20℃, variable temperature mainly influenced SOC mineralization by changing microbial community activity rather than by changing microbial quantity.

Key words: soil organic carbon; mineralization; temperature; land use; dissolved organic carbon

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2014-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301245); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050506); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013B043); 重庆市环境保护局环保科技项目(环科学2010第26号)

作者简介: 王莲阁(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环, E-mail: liangewang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cien777@163.com

土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 库是陆地生态系统中最大的碳库^[1], 是全球碳循环的重要组成部分^[2,3], 与全球气候变化关系密切. 土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程之一, 直接关系到 SOC 的积累及土壤质量的保持等, 对全球大气 CO₂ 浓度变化亦有深远的影响^[2], 该过程受到诸多因素包括土壤理化性质、利用类型、温度条件、水分状况等的影响, 其中温度是关键的影响因子之一^[4]. 通常认为, SOC 矿化速率随温度升高而增长^[4,5], 其中, 低温下升温会大大促进 SOC 的矿化, 高温下升温对 SOC 矿化的促进作用则有所减弱^[6]. 国内外对温度与土壤有机碳矿化之间的关系已开展了大量研究, 且多以恒温为主^[4,5,7]; 但在自然状态下, 随着太阳辐射的昼夜变化, 土壤温度亦随之发生周期性变化, 然而目前有关变温环境对土壤有机碳矿化影响的研究则相对缺乏, 且尚未形成系统的观点和理论^[8~10].

石灰土是发育于碳酸盐岩母质, 广泛分布于我国热带亚热带岩溶区的一种非地带性土壤^[11]. 由于石灰土碳酸盐岩成土背景的特殊性, 其比热容较小, 土壤感知外界气候变化的能力更为灵敏, 因而石灰土具有升降温快, 温度变化幅度大的特点. 我国碳酸盐岩分布区约占国土面积的 1/3^[12], 是地球表层系统的重要组成部分. 作为碳酸盐岩区的主要土壤类型, 石灰土有可能成为我国一个重要的碳汇^[13], 因此阐明石灰土有机碳矿化对温度变化的响应机制, 对促进陆地生态系统的碳汇研究具有重要的参考意义. 为此, 本研究选取贵州省普定县碳酸盐岩区地质地貌发育成熟、集中、典型地带的石灰土, 采取野外采样和室内模拟培养的方法, 分析变温

环境对石灰土有机碳矿化的影响, 以期全面认识石灰土有机碳矿化的温度效应以及有机碳矿化模型的构建提供基础资料和科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

供试土壤采自贵州省普定县马官镇天龙山区域 (105°76'E, 26°24'N). 普定县属亚热带湿润季风气候, 气候温和, 雨量充沛, 云雾多, 日照少, 年均气温 15.1℃, 年均降雨量 1 396.9 mm, 年均日照时数 1 202 h, 无霜期 301 d. 根据土壤类型和利用类型, 在天龙山样区分别选取两块距离相近的典型石灰土样地 (林地和旱地), 样地面积均为 400 m², 其中林地样地为天然林地, 植被类型为以窄叶石栎 (*Lithocarpus confinis*)、云南鼠刺 (*Itea yunnanensis*) 等为优势种的常绿落叶阔叶混交林, 地块坐标为 105°77'E, 26°24'N, 海拔为 1 474 m; 旱地样地由人为开垦而来, 作物类型为单季玉米, 常年翻耕, 以施用化肥为主, 地块坐标为 105°76'E, 26°24'N, 海拔为 1 365 m; 两块样地的石灰土 (森林石灰土和旱地石灰土, 分别简称为 SL 和 SH) 均发育于石灰岩母质. 在各样地内, 沿“S”形路线分别采集 21 个表层 (0~10 cm) 土样并均匀混合, 去除混合土样中的活体根系及可见有机物残体后, 取部分鲜样 (约 500 g), 快速过 2 mm 筛, 4℃ 下保存, 用于土壤可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 和微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 测定; 剩余混合土样于室内自然风干, 待磨细、过筛后, 用于土壤有机碳矿化培养试验和基本理化性质测定. 供试土壤的理化性质见表 1.

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

样号	土壤名称	利用类型	pH	SOC /g·kg ⁻¹	DOC /g·kg ⁻¹	MBC /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	C/N	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	黏粒 /%
SL	森林石灰土	林地	7.39	109.22	136.02	1 227.60	10.20	10.71	3.34	18.93	14.62
SH	旱地石灰土	旱地	7.39	30.95	55.05	102.09	3.12	9.92	2.00	60.00	40.90

1.2 矿化培养试验

针对 2 种供试土壤, 依据积温相同的原则, 设置 2 种温度模式: ① 变温处理, 范围: 15~25℃, 变温间隔 12 h, 每 24 h 为 1 个周期; ② 恒温处理, 选取变温处理的平均温度 20℃ 作为恒温处理. 本研究共设置了 4 个培养处理. ① 森林石灰土: 20℃ 恒温培养, 简称为 SL-H; ② 森林石灰土: 15~25℃ 变温培养, 简称为 SL-B; ③ 旱地石灰土: 20℃ 恒温培养,

简称为 SH-H; ④ 旱地石灰土: 15~25℃ 变温培养, 简称为 SH-B.

取 20 g 已剔除根系并过 2 mm 筛的供试土壤 (森林石灰土、旱地石灰土), 均匀平铺于 250 mL 培养瓶底部, 用中间有一小孔的橡胶塞塞住瓶口, 瓶塞小孔处涂上硅胶防止漏气. 调节含水量至 60% WHC (田间持水量), 置于 25℃ 恒温培养箱中预培养 5 d. 预培养结束后, 利用称重法补充水分, 放入

按 2 种温度模式设置的培养箱中避光密封培养 56 d, 并设置无土空白对照. 每隔 14 d 测定 1 次培养瓶的重量, 添加适量去离子水以保证瓶内水分恒定. 分别在培养后第 1、3、5、7、14、21、28、35、42、49、56 d 用注射器从培养瓶的瓶塞小孔处抽取约 8 mL 气体, 并运用气相色谱仪 (Agilent, 7820A) 分析 CO_2 浓度, 每个处理 4 次重复. 采集气体后打开培养瓶的瓶塞约 20 min, 待培养瓶的内外气体交换充分后, 盖上瓶塞并封闭抽气孔, 并将密封培养瓶放入培养箱继续培养. 根据气体产物的释放量, 计算培养期内土壤有机碳的日均矿化量和累积矿化量等. 另外, 分别在培养后第 1、3、7、14、21、28、35、42、56 d 测定培养土壤的 DOC 含量, 每个处理 3 次重复; 分别在培养后第 1、7、21、56 d 测定培养土壤的 MBC 含量, 每个处理 3 次重复, 每个培养处理共 43 次重复.

1.3 分析方法

各项土壤理化指标的测定均依照参考文献 [14] 进行, 具体如下: 土壤 pH 采用酸度计法测定, 土水比为 1:2.5; 土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测定; 全氮采用半微量开氏法测定; 全磷采用硫酸-高氯酸消解, 比色法测定; 全钾采用氢氟酸-高氯酸消解, 火焰光度计测定; 黏粒含量采用吸管法测定; 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法 (FE) 测定; 土壤可溶性有机碳的测定步骤: 将待测土壤加超纯水至土水比 1:2, 振荡 30 min 后在 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下离心 20 min, 取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜, 滤液中有有机碳使用 TOC 分析仪 (multi N/C 2100, Germany) 测定.

1.4 数据处理

累积矿化量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 为单位质量土壤 (105°C 烘干土重) 某段培养期内矿化释放的总碳量 ($\text{CO}_2\text{-C}$); 矿化速率 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$] 为单位质量土壤 (105°C 烘干土重) 单位时间内矿化释放的碳量 ($\text{CO}_2\text{-C}$); 矿化强度 (‰) 为 56 d 培养期内矿化释放的总碳量 ($\text{CO}_2\text{-C}$) 与培养土壤初始 SOC 含量的比值.

土壤有机碳矿化符合动力学一级方程^[15]: $C = C_0 \times (1 - e^{-kt})$, 式中, C_0 为 SOC 潜在矿化量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C 为培养时间 t (d) 时的累积矿化量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); t 为培养时间 (d); k 为矿化速率常数 (d^{-1}).

采用 Excel 2003 制图, 相关指标的差异显著性检验及相关性分析采用 SPSS 16.0 软件进行.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的矿化特征

有机碳矿化呈现阶段性特点: $0\sim14\text{ d}$ 为快速矿化阶段; $14\sim21\text{ d}$, 矿化速率总体呈现缓慢下降趋势; $21\sim56\text{ d}$, 矿化速率趋于稳定或略有波动 (图 1). 培养结束时森林和旱地石灰土的 SOC 日均矿化量分别降为第 1 d 的 $3.2\%\sim5.0\%$ 和 $3.1\%\sim3.7\%$. 整个培养期间, 森林石灰土的日均矿化量均显著 ($P < 0.05$) 高于旱地石灰土. 不同温度处理间, 培养第 1 d, 森林和旱地石灰土变温处理的日均矿化量 [$35.04\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $12.99\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$] 显著高于恒温处理 [$22.36\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $10.59\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; 而至第 5 d 变温处理的日均矿化量则明显低于恒温, 此时旱地石灰土 2 种温度模式之间的日均矿化量差异值 (131%) 达到最大, 而森林石灰土的最大差异值 (235%) 则出现在第 14 d. 总体来看, 培养期间 SOC 日均矿化量变化符合乘幂函数, 相关方程式为: 森林石灰土 (恒温) $Y = 32.98X^{-0.79}$ ($R^2 = 0.935$), 森林石灰土 (变温) $Y = 35.97X^{-0.91}$ ($R^2 = 0.976$), 旱地石灰土 (恒温) $Y = 12.59X^{-0.88}$ ($R^2 = 0.970$), 旱地石灰土 (变温) $Y = 12.05X^{-0.86}$ ($R^2 = 0.971$), 式中, Y 为日均矿化量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$], X 为培养时间 (d).

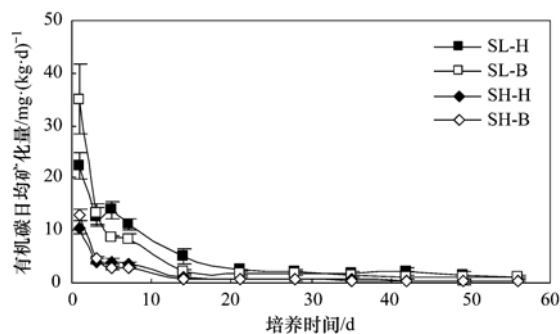


图 1 不同温度模式下森林和旱地石灰土有机碳日均矿化量动态特征

Fig. 1 Dynamics of daily mineralization of organic carbon in two types of limestone soils under two temperature regimes

在培养的起始阶段, 由于可利用性碳源较多, 各处理的 SOC 累积矿化量均增长较快, 之后逐渐减慢 (图 2). 森林石灰土 56 d 的累积矿化量显著 ($P < 0.05$) 高于旱地石灰土. 培养期间, 2 种土地利用类型石灰土 1~3 d 的累积矿化量均表现为变温显著高于恒温, 自 7~14 d 开始恒温处理的累积矿化量逐渐高于变温; 森林石灰土 2 种温度模式之间的累

积矿化量于第 42 d 达到显著差异,培养结束时其变温处理的累积矿化量($169.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著低于恒

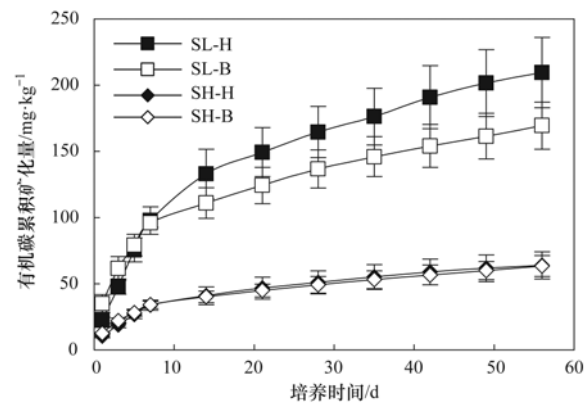


图 2 不同温度模式下森林和旱地石灰土有机碳累积矿化量动态特征

Fig. 2 Dynamics of cumulative mineralization of organic carbon in two types of limestone soils under two temperature regimes

温处理($209.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);而至培养结束时旱地石灰土 2 种温度模式之间的累积矿化量仍未出现显著性差异,该现象表明不同土地利用类型的石灰土 SOC 矿化对变温环境的响应不同,通常利用恒温培养下获得的土壤矿化数据来预测和衡量田间土壤碳矿化水平的方法是有待商榷的.

2.2 土壤有机碳矿化的动力学特征

虽然旱地石灰土的 SOC 累积矿化量显著($P < 0.05$)低于森林石灰土,由于其 SOC 含量较低(表 1),故总矿化强度还是高于森林石灰土(表 2).各处理 SOC 的累积矿化都符合一级动力学方程.其中,2 种不同土地利用类型石灰土的矿化速率常数 k 对温度的响应亦有差异,森林石灰土变温处理的 k 值显著高于恒温,旱地石灰土 2 种温度模式之间的 k 值则无明显差异.相同土壤不同温度处理的 SOC 矿化速率常数 k 随 C_0 的增加而减小(表 2),这可能与土壤碳矿化过程中微生物所能利用的底物有关.

表 2 土壤有机碳的矿化强度、潜在矿化量和速率常数¹⁾

Table 2 Mineralization intensity, potential mineralization and decay rate constants of soil organic carbon

土壤名称	温度模式	矿化强度/ $\%$	$C_0/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	k	R^2
森林石灰土	恒温	$1.92 \pm 0.24\text{a}$	$197.36 \pm 24.44\text{a}$	$0.08 \pm 0.01\text{c}$	0.970
	变温	$1.55 \pm 0.17\text{b}$	$151.18 \pm 15.66\text{b}$	$0.13 \pm 0.02\text{a}$	0.905
旱地石灰土	恒温	$2.07 \pm 0.33\text{a}$	$58.68 \pm 10.09\text{cd}$	$0.11 \pm 0.01\text{b}$	0.940
	变温	$2.05 \pm 0.25\text{a}$	$55.89 \pm 7.50\text{d}$	$0.12 \pm 0.01\text{ab}$	0.890

1) 表中同列小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$)

2.3 可溶性有机碳的动态变化

土壤 DOC 含量的动态变化大致分为 3 个阶段:0~7 d 显著下降,7~28 d 缓慢下降,28~56 d 逐渐趋于稳定或略有波动(图 3).森林和旱地石灰土恒、变温处理第 1 d 的 DOC 含量分别为 254.90、

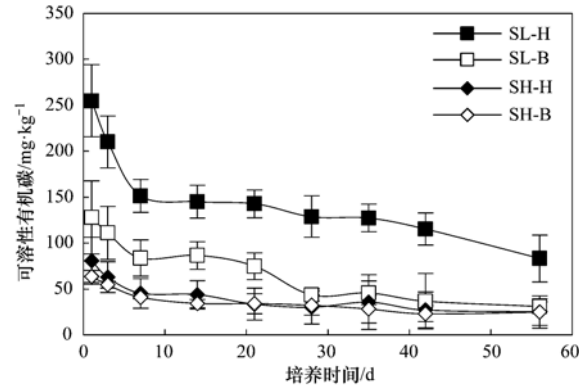


图 3 不同温度模式下森林和旱地石灰土的可溶性有机碳含量

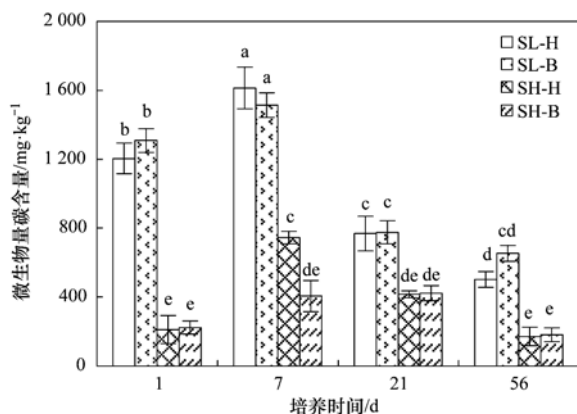
Fig. 3 Dissolved organic carbon in two types of limestone soils under two temperature regimes

127.92 、 80.64 和 $63.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,培养结束后则分别下降到 83.17 、 30.87 、 24.91 和 $24.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.整个培养期间森林石灰土的 DOC 含量均高于旱地石灰土(图 3);森林石灰土变温处理的 DOC 含量小于恒温,且于第 1~3 d 达到显著差异($P < 0.05$),其后则未出现明显差异;旱地石灰土 2 种温度模式之间的 DOC 含量始终未出现显著性差异.培养期间,2 种温度模式的 DOC 含量与 SOC 日均矿化量动态变化的趋势相一致,两者间呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数(r)分别为 0.933^{**} (SL-H)、 0.810^{**} (SL-B)、 0.938^{**} (SH-H)和 0.900^{**} (SH-B).

2.4 微生物量碳的动态变化

土壤微生物量碳含量呈先上升后降低趋势,森林石灰土和旱地石灰土(恒温)的 MBC 含量于培养第 7 d 达到峰值,而旱地石灰土变温处理的 MBC 含量于 21 d 达到峰值(图 4).培养结束后恒、变温处理的森林和旱地石灰土 MBC 含量分别较峰值下降了 69%、57%、77% 和 57%.整个培养过程中,森林石灰土的 MBC 含量均显著($P < 0.05$)高于旱地

石灰土. 森林和旱地石灰土的 MBC 含量除第 7 d 变温略小于恒温外, 均表现为变温大于恒温, 但并未达到显著性差异, 说明 MBC 含量不能有效反映恒温 and 变温下的 SOC 矿化差异.



方柱上不同小写字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)

图4 不同温度模式下森林和旱地石灰土微生物量碳含量

Fig. 4 Microbial biomass carbon in two types of limestone soils under two temperature regimes

3 讨论

3.1 变温和恒温对石灰土有机碳矿化的影响

森林石灰土的矿化速率和累积矿化量均高于旱地石灰土, 这与 2 种土地利用类型石灰土的 SOC 含量密切相关^[7]. 森林石灰土变温处理的累积矿化量和矿化强度显著低于恒温处理, 而旱地石灰土 2 种温度处理之间的累积矿化量和矿化强度则无明显差异, 这与 Zhu 等^[10]草地和农田土壤碳矿化对变温条件响应规律一致性的研究结果明显不同, 在其研究中, 供试的农田和草地土壤均为砂壤土, 且未标明土壤的相关属性. 本研究认为, 森林和旱地石灰土的自身属性可能是导致这种差异的重要原因. 在土壤属性指标中, 土壤有机碳是与土壤呼吸有重要关联的变量^[16-18], 其含量与组成是影响 SOC 矿化及其温度敏感性的主导因素^[7]. 森林石灰土表层 SOC 含量 ($109.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著 ($P < 0.05$) 高于旱地石灰土 ($30.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这可能是导致 2 种土壤 SOC 矿化对变温响应明显不同的一个重要因素. 有资料显示^[19], SOC 含量较高的土壤, 其易分解 SOC 所占比例较高. 另外, 土地利用方式的差异也会导致土壤 SOC 含量和组成有显著不同. 在旱地土壤中, 受人为耕作活动影响, 导致有机物质输入量减少、土壤团聚体破坏、SOC 矿化加快等, 使得其土壤 SOC 含量往往低于邻近的森林土壤^[20], 这与本研究的结果一致; 同时, 不同土地利用方式下, 植被类型不

同, 使得土壤 SOC 来源亦有差异, 势必影响 SOC 组成^[21], 其中, 森林土壤 SOC 主要来自于地表枯枝落叶的分解补充与累积, 含有较多简单易分解的有机化合物^[22], 而旱地土壤 SOC 则含有较多的难分解碳^[23]. 土壤 C/N 作为土壤质量的敏感指标, 在一定程度上也能反映土壤有机质的组成和化学性质^[24]. 本研究中, 森林石灰土 C/N 高于旱地石灰土 (表 1), 这也进一步说明了森林土壤有机质腐殖化程度较低, 粗有机质比例较高^[25]. 依据热力学原理, 分子结构越复杂的底物, 即越难以分解的有机物, 具有的活化能就越高, 对温度的敏感性就越大^[26]. 据此推测, 森林石灰土含有较多的粗有机质, 其土壤微生物群落分解 SOC 的温度敏感性必然要低于旱地石灰土, 这与人^[27]研究结果类似. 总体来看, 2 种不同土地利用类型石灰土的表层 SOC 含量和组成差异显著, 使得森林石灰土的土壤微生物群落分解 SOC 的温度敏感性较低, 可能会导致其微生物群落对变温环境的适应性弱于旱地石灰土, 使得其土壤微生物在变温环境下很难快速地形成最优的群落结构, 影响微生物群落的总体活性, 致使其 SOC 累积矿化量和矿化强度显著降低. 由此可见, SOC 含量和组成等自身属性可能是影响其矿化过程对外界温度变化响应的重要原因. 另外, 鉴于土地利用类型与表土 SOC 含量、组成及其矿化之间的关联性, 在喀斯特地区, 可通过人为调控石灰土的土地利用类型, 适度、合理地采取退耕还林等措施减少土壤碳损失, 提高石灰土的碳增汇效应.

3.2 变温和恒温对石灰土活性有机碳组分的影响

在整个培养期间内, SOC 含量较高的森林石灰土的 DOC 含量始终高于旱地石灰土, 这主要归因于培养土壤的 DOC 溶出量与 SOC 含量的关联性^[28]. 土壤所处的培养温度不同, 其 DOC 溶出量亦有差异, 其中, 森林石灰土变温处理的 DOC 含量小于恒温, 且于培养初始阶段达到显著差异, 而旱地石灰土 2 种温度模式之间的 DOC 含量则未出现显著性差异, 这主要与土壤有机碳的温度敏感性及其不同温度条件下土壤微生物群落活性相关. 一般认为, 有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件, 有机碳在转化为 CO_2 、 CH_4 等气态产物前必须先进入溶液中^[29], 这是由于土壤液相状态是有机质降解的媒介^[30], 水溶性的有机碳较易为微生物利用, 而固相中的有机碳较难分解^[31]. 因此, 土壤可溶性有机碳的含量动态和周转与 SOC 矿化密切相关. 有研究表明, 土壤中 DOC 的多少可以解释土壤 CO_2 的释放

量^[31]. 本研究中,不同温度处理下石灰土 DOC 含量与 SOC 日均矿化量均呈极显著正相关,土壤 DOC 溶出量的高低显著影响 SOC 的累积矿化量,这与以往^[32,33]的研究结果一致,表明制约土壤 DOC 生成是温度影响有机碳矿化的一个重要途径.

土壤微生物量碳是土壤有机碳库中最活跃、最易变化的部分,指能反映参与调控土壤中能量、养分循环以及有机物转化的对应微生物数量^[34]. 本研究中,森林石灰土的 MBC 含量显著高于旱地石灰土,这主要是由于土壤微生物量碳受土壤 SOC 含量影响所致^[34]. 不同温度处理中,土壤 MBC 含量与 SOC 的日均矿化量、矿化强度无显著相关;另外,土壤 MBC 也不能有效反映恒温 and 变温之间石灰土 SOC 矿化的差异,该现象表明,同恒温相比,变温不能通过显著改变土壤微生物数量来影响 SOC 矿化过程. 另外,有资料显示^[31,35],温度因子能通过影响微生物活性进而对土壤 DOC 的产生和分解起调节作用. 微生物活性反映了土壤微生物新陈代谢的能力和强度,直接反映微生物对土壤碳氮分解的强度^[36]. 潜在矿化量(C_0)可以很好地反映不同温度条件下微生物利用 SOC 的能力. 本研究中,变温处理下森林石灰土的潜在矿化量显著低于恒温,而旱地石灰土则无明显差异,表明变温环境中森林石灰土的微生物代谢活性显著下降,微生物对碳源的利用效率降低. 可见,土壤中微生物群落活性的变化是影响 SOC 矿化的关键,变温环境能通过改变土壤微生物群落的活性来影响 SOC 矿化过程.

4 结论

(1)在培养期内,旱地石灰土变温处理的 SOC 累积矿化量与恒温处理之间差异不显著,而森林石灰土变温处理的 SOC 累积矿化量显著低于恒温处理($P < 0.05$),表明不同土地利用类型的石灰土表层 SOC 矿化对变温环境的响应不同;不同土地利用类型的石灰土 SOC 含量和组成差异明显,可能是影响其土壤有机碳矿化对外界温度变化响应的一个重要原因.

(2)培养过程中,不同温度模式下,DOC 含量与 SOC 日均矿化量均呈极显著正相关($P < 0.01$),表明制约土壤 DOC 生成是温度影响土壤有机碳矿化的一个重要途径;MBC 含量不能显著反映不同温度处理间 SOC 矿化的差异;同恒温相比,变温虽不能通过显著改变微生物数量来影响 SOC 矿化,但能通过影响微生物群落的总体活性,改变其对碳库的

利用能力来影响 SOC 矿化.

参考文献:

- [1] Lai R. World soils and greenhouse effect[J]. IGBP Global Change Newsletter, 1999, **37**: 4-5.
- [2] Lai R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [3] Wu Q B, Wang X K, Ren Y F. Application of CO₂ infrared analyzer to measurement of mineralization of soil organic carbon[J]. Soils, 2006, **38**(3): 304-308.
- [4] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(2): 155-165.
- [5] Wang X W, Li X Z, Hu Y M, *et al.* Effect of temperature and moisture on soil organic carbon mineralization of predominantly permafrost peatland in the Great Hing'an Mountains, Northeastern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(7): 1057-1066.
- [6] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(6): 709-714.
- [7] Zhou P, Li Y, Ren X E, *et al.* Organic carbon mineralization responses to temperature increases in subtropical paddy soils[J]. Journal of Soil and Sediments, 2014, **14**(1): 1-9.
- [8] 梁福源, 宋林华, 王静. 土壤 CO₂ 浓度昼夜变化及其对土壤 CO₂ 排放量的影响[J]. 地理科学进展, 2003, **22**(2): 170-176.
- [9] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(6): 753-760.
- [10] Zhu B, Cheng W X. Constant and diurnally-varying temperature regimes lead to different temperature sensitivities of soil organic carbon decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(4): 866-869.
- [11] 席承藩. 土壤分类学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994. 259-260.
- [12] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. 中国岩溶, 1983, **2**(2): 147-150.
- [13] 李杨, 苏以荣, 何寻阳, 等. 桂西北棕色石灰土和红壤有机碳矿化特征和差异[J]. 农业现代化研究, 2012, **33**(5): 632-635.
- [14] 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.
- [15] Van Veen J A, Ladd J N, Amato M. Turnover of carbon and nitrogen through the microbial biomass in a sandy loam and a clay soil incubated with [¹⁴C(U)] glucose and [¹⁵N](NH₄)₂SO₄ under different moisture regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(6): 747-756.
- [16] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005, **11**(7): 1024-1041.
- [17] Bahn M, Rodeghiero M, Anderson-Dunn M, *et al.* Soil respiration in European grasslands in relation to climate and

- assimilate supply[J]. *Ecosystems*, 2008, **11**(8): 1352-1367.
- [18] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1017-1025.
- [19] Updegraff K, Pastor J, Bridgman S D, *et al.* Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands[J]. *Ecological Applications*, 1995, **5**(1): 151-163.
- [20] Sun G, Wu N, Luo P. Soil N pools and transformation rates under different land uses in a subalpine forest-grassland ecotone[J]. *Pedosphere*, 2005, **15**(1): 52-58.
- [21] 房飞, 唐海萍, 李滨勇. 不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分影响研究[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(11): 1774-1779.
- [22] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(3): 24-28.
- [23] Conant R T, Drijber R A, Haddix M L, *et al.* Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(4): 868-877.
- [24] Dignac M F, Kogel-Knabner I, Michel K, *et al.* Chemistry of soil organic matter as related to C:N in Norway spruce forest (*Picea abies*(L.) Karst.) floors and mineral soils[J]. *Journal of Plant and Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(3): 281-289.
- [25] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2006, **25**(4): 58-67.
- [26] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, **440**(7081): 165-173.
- [27] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 1960-1968.
- [28] 苏冬雪, 王文杰, 邱岭, 等. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2012, **32**(21): 6705-6714.
- [29] Ellert B H, Gregorich E G. Management-induced changes in the actively cycling fractions of soil organic matter[A]. In: Mcfee W W, Kelly J M (Eds.). *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*[C]. Wisconsin, Madison, USA: Soil Science Society of America, 1995. 119-138.
- [30] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils[J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 211-235.
- [31] Marschner B, Bredow A. Temperature effects on release and ecologically relevant properties of dissolved organic carbon in sterilised and biologically active soil samples[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(4): 459-466.
- [32] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(4): 544-552.
- [33] 刘德燕, 宋长春, 王丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3525-3530.
- [34] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil[J]. *Biological Reviews*, 1992, **67**(3): 321-358.
- [35] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(10): 1397-1402.
- [36] Lovell R D, Jarvis S C. Soil microbial biomass and activity in soil from different grassland management treatments stored under controlled conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(14): 2077-2085.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(Ⅲ) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行