

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



2019

Vol.40 No.5

第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响

曾蔓漫, 慈恩*, 樊晶晶, 李江文, 翁昊璐, 李松

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 农业农村部西南耕地保育重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 在自然状态下, 土壤外界的环境温度日变化明显, 并呈周期性波动, 然而目前有关这种周期性变温如何影响土壤有机碳(SOC)矿化尚无统一观点。为此, 以西南地区广泛分布的紫色土为供试对象, 采用室内模拟培养的方法, 开展周期性变温对其有机碳矿化的影响。培养试验涉及温度和水分两个因子, 其中, 温度设有4个模式, 分别为3个恒温(15、20和25℃)、1个周期性变温(15/25℃变温); 水分设有2个梯度, 分别为70% WHC和淹水。在66 d培养期内, 好气和淹水条件下, 变温(15/25℃变温)培养的紫色土SOC累积矿化量和矿化强度与恒温20℃无明显差异, 这表明可用20℃恒温来评估变温(15/25℃)SOC矿化的影响效应。此外, 除恒温15℃, 各温度处理均表现为淹水培养的紫色土有机碳累积矿化量显著高于好气(70% WHC)培养($P < 0.05$)。在变温条件下, 土壤微生物量碳含量与紫色土有机碳矿化速率之间无显著相关。结合矿化动力学分析可知, 淹水条件能有效增加紫色土的易分解碳库大小, 但变温不能有效影响紫色土的易分解碳库大小。

关键词: 土壤有机碳; 周期性变温; 水分; 紫色土; 矿化动力学参数

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2435-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809158

Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil

ZENG Man-man, CI En*, FAN Jing-jing, LI Jiang-wen, WENG Hao-lu, LI Song

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Southwest China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing 400715, China)

Abstract: In the natural state, the soil temperature changes periodically throughout the day, but there is no unified opinion on whether the daily variation of soil temperature affects the mineralization of soil organic carbon. Therefore, the effect of cyclical temperature fluctuations on organic carbon mineralization of purple soil, widely distributed in southwest China, was studied by an incubation experiment in the laboratory. These soils were incubated at three constant temperatures (15, 20, and 25℃) with cyclically fluctuating temperatures (the range was within 15/25℃) and two moisture levels (70% water holding capacity (WHC) and submerged condition). In the entire incubation period (66 d), aerobic and submerged condition, variable temperature (15/25℃) cultivation of purple soil, SOC cumulative mineralization and the mineralization intensity had no obvious differences with constant temperature of 20℃. This indicated that the periodic variable temperature treatment (15/25℃) of SOC mineralization of purple soil with the same accumulated temperature of constant temperature processing (20℃). In addition, except for constant temperature of 15℃, the temperature processing of submerged condition of purple soil SOC cumulative mineralization was significantly higher than 70% WHC treatment ($P < 0.05$). During the entire incubation period, soil microorganism carbon content could not reflect the SOC mineralization differences under constant temperature and cyclically fluctuating temperature. According to two-pool first-order model, the submerged condition can effectively increase the labile SOC pool size of purple soil, but the cyclically fluctuating temperature cannot effectively affect the labile SOC pool size of purple soil.

Key words: soil organic carbon; cyclical temperature fluctuations; soil moisture; purple soil; mineralization kinetic parameters

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)矿化是陆地生态系统中有机碳库循环的重要过程, 在全球碳循环中起着重要作用^[1,2]。通常认为, 在一定的温度范围内, 土壤有机碳矿化与温度呈正相关^[3,4], 温度越高, 土壤碳释放速率越快。此外, 水分也是影响SOC矿化的主要因素之一, 有研究指出, 在恒温条件下, 土壤有机碳矿化在一定范围内随土壤水分增加而增大^[5,6], 但也有研究认为, 好气条件下土壤有机碳更易分解^[7]。自然状态下, 土壤外界环境温度受气温影响显著^[8,9], 外界温度的变化对土壤碳矿化的影响更为显著。然而, 目前大多数有关碳矿化的研究仅围绕恒温领域开展, 变温领域温度

和水分对SOC矿化的规律又如何? 相关研究则相对缺乏^[10]。

紫色土主要集中分布于四川盆地, 是川渝地区重要的耕作土壤^[11]。四川盆地的紫色土分布区属亚热带季风性湿润气候, 昼夜温差明显, 通常情况可达到10℃^[12]。在自然状态下, 土壤外界的环境温度日变化明显, 并呈周期性波动, 然而目前有关

收稿日期: 2018-09-19; 修订日期: 2018-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 国家科技基础性工作专项(2014FY110200); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017B027)

作者简介: 曾蔓漫(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环, E-mail: zmanman551@163.com

* 通信作者, E-mail: cien777@163.com

这种周期性变温如何影响土壤有机碳(SOC)矿化尚无统一观点. 因此, 本文选取紫色丘陵区典型旱地土壤——紫色土为供试土壤, 从温度和水分两个方面进行研究, 探讨周期性变温条件下紫色土有机碳的矿化特征, 分析周期性变温对SOC矿化的影响差异, 以期为全面认识紫色土有机碳矿化的温度动态影响机制和环境效应提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

供试紫色土采自重庆市北碚区澄江镇马台村(106°23'E, 29°53'N), 采样点海拔为296 m; 马台村属亚热带季风性湿润气候, 雨量充沛, 云雾多, 日照少, 年均气温18.2℃, 年均降雨量1134.4 mm, 无霜期334 d; 供试土壤的成土母质为侏罗系沙溪庙组(J_{2s})紫色泥岩、砂岩风化残坡积物; 样地轮(套)种作物为玉米、红薯、油菜等. 在样地内, 沿“S”形路线, 多点采集表层(0~20 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, 于室内自然风干后, 磨细、过筛, 以用于土壤理化指标测定及矿化培养试验. 供试土壤基本理化性质为: pH 5.4, 土壤有机碳含量14.05 g·kg⁻¹, 全氮(N)含量1.42 g·kg⁻¹, 全磷(P)含量2.33 g·kg⁻¹, 全钾(K)含量48.27 g·kg⁻¹, 黏粒(<2 μm)含量18.19%.

1.2 培养试验

本试验从水分和温度2个方面进行设置. 其中水分共设置2个梯度: 70%田间持水量(WHC)和淹水(水土比1:2), 分别记为M1、M2; 温度共设置4种模式: 恒温15℃培养(T1)、恒温20℃培养(T2)、恒温25℃(T3)培养和周期性变温15/25℃(VT)培养. 变温培养按照15℃→20℃→25℃→20℃→15℃的顺序变温, 每个温度恒温6 h后变为下一个温度, 每个变温循环为24 h, 前一个变温循环结束后立即进入下一个循环. 依据上述两个因素的水平数, 本培养试验设有8个处理, 分别记为M1T1、M1T2、M1T3、M1VT、M2T1、M2T2、M2T3、M2VT.

取20 g已剔除根系并过2 mm筛的供试土壤, 均匀平铺于250 mL培养瓶底部, 培养瓶瓶口中间用有一小孔的橡胶塞塞住, 瓶塞小孔处涂上硅胶防止漏气. 调节土壤含水量至60% WHC, 置于25℃恒温培养箱中开盖预培养5 d. 预培养结束后, 利用称重法补充水分, 并设置无土空白对照. 分别在培养后第1、2、3、5、7、10、13、17、21、25、29、34、39、44、50、56和66 d用注射器从培养瓶的瓶塞小孔处抽取约9 mL气体, 并运用气相色谱仪

(Agilent, 7820A)分析CO₂浓度, 每个处理重复4次. 定期测定培养瓶重量, 添加去离子水以保证瓶内水分恒定. 气体采集后打开瓶塞约20 min, 待培养瓶内外气体交换充分后, 盖上瓶塞并封闭抽气孔, 将密封培养瓶放入培养箱继续培养. 根据所测定的CO₂浓度, 计算培养期内SOC矿化速率和累积矿化量. 同时在第1、5、10、25、44和66 d测定培养土壤的微生物量碳(MBC)含量, 每个处理重复3次.

1.3 分析方法

土壤pH采用酸度计法测定, 水土比为2.5:1; 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; 黏粒含量采样吸管法测定; 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法^[13,14]测定.

1.4 数据处理

累积矿化量(mg·kg⁻¹)以单位质量土壤(105℃烘干土重)整个培养期内(66 d)矿化释放的总碳量表示; 矿化速率[mg·(kg·d)⁻¹]以单位质量土壤单位时间内矿化释放的碳量表示; 矿化强度(‰)以整个培养期内矿化释放的总碳量与培养土壤初始土壤有机碳含量的比值表示.

土壤有机碳矿化采用双库一级矿化动力学模型模拟^[15,16]:

$$C_t = C_0 \times (1 - e^{-kt}) + (T_e - C_0) \times (1 - e^{-ht})$$

式中, C_t 表示培养 t (d) 时的有机碳含量 (mg·kg⁻¹); C_0 、 T_e 、 $(T_e - C_0)$ 分别表示土壤中易分解有机碳含量 (mg·kg⁻¹)、供试土壤初始总有机碳含量 (mg·kg⁻¹) 以及土壤中难分解有机碳含量 (mg·kg⁻¹); k 、 h 分别表示土壤中易分解有机碳的分解速率 (d⁻¹) 以及难分解有机碳的分解速率 (d⁻¹); t 表示培养时间 (d).

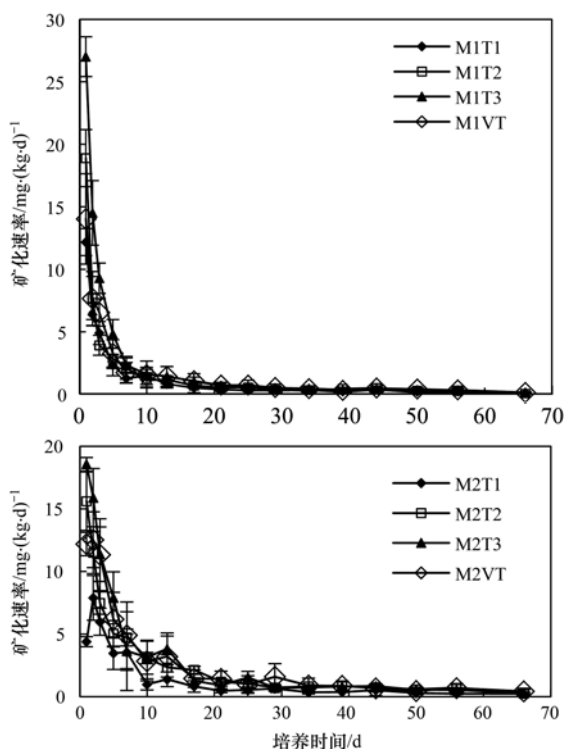
采用 Microsoft Excel 2016 制图, 利用 SPSS 21.0 软件进行数据统计与分析. 采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较($P < 0.05$), 运用非线性回归分析进行双库一级动力学模型拟合和参数计算.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量

由图1所示, 在整个培养期间(0~66 d), 所有温度范围内的日均土壤矿化速率呈相同的变化趋势. 在培养前期1~14 d急剧下降, 此后在小范围内浮动并逐渐平稳. 淹水时的矿化速率在第1、2 d内达到峰值后下降, 且前期矿化速率下降幅度较好气(70% WHC)平缓. 在相同水分处理下, 前14 d各恒温培养的SOC矿化速率的快慢顺序依次为:

25℃ > 20℃ > 15℃. 对比恒温和变温培养, 15/25℃ 周期性变温培养(15/25℃ 培养) 矿化速率在 20℃ 恒温培养上下波动, 除第 1、3 d 的平均有机碳矿化速率与 20℃ 差异显著($P < 0.05$)外, 其余培养时间均无显著差异; 培养前 5 d, 70% WHC 时的 15/25℃ 培养显著低于 25℃ 恒温培养, 而淹水时的 15/25℃ 培养在第 1、2 d 时与 25℃ 培养差异显著, 而恒温 20℃ 的矿化速率更接近 15/25℃ 培养. 除第 1 d 外, 淹水条件时 15/25℃ 培养的矿化速率显著大于好气培养($P < 0.05$). 至培养结束时, 淹水和 70% WHC 下, 各温度培养紫色土的 SOC 矿化速率分别降为第 1 d 的 1.4% ~ 5.2% 和 0.6% ~ 1.0%.



不同字母组合表示不同水热处理: M1、M2 分别表示 70% WHC 和淹水处理, T1、T2、T3、VT 分别表示恒温 15℃、20℃、25℃ 和周期性变温 15/25℃ 培养, 下同

图 1 不同水热条件下紫色土有机碳矿化速率

Fig. 1 Mineralization rate of organic carbon in purple soil under different hydrothermal conditions

从图 2 可看出, 各水热处理下, 紫色土有机碳累积矿化量均呈现前期增速较快, 而随培养时间延长增幅减慢渐趋平缓; 第一周的 SOC 累积量显著高于其余 9 周的含量($P < 0.05$), 且不同温度下的累积矿化量均在第一周达到整个培养期的 50% 左右(表 1). 整个培养期内, 相同水分状况下, 各温度处理的 SOC 累积矿化总量的高低顺序依次为: 25℃ > 15/25℃ > 20℃ > 15℃; 其中, 70% WHC 时, 在 25℃ 培养下的紫色土有机碳累积矿化量均显著高于 15℃ 和 20℃, 且与 15/25℃ 也存在明显差异($P < 0.05$);

淹水时, 紫色土在 20℃、15/25℃ 和 25℃ 培养下的 SOC 累积矿化量均显著大于 15℃ 培养($P < 0.05$), 且分别是 15℃ 的 1.9、2.0 和 2.1 倍. 此外, 同一水分条件下, 15/25℃ 的平均积温与 20℃ 培养无明显差异, 且至培养结束时, 15/25℃ 培养和恒温 20℃ 培养间的 SOC 累积矿化量仍未出现显著差异. 另外, 同一温度模式下, 供试土壤有机碳累积矿化量均表现为淹水大于 70% WHC, 且除恒温 15℃ 外, 其余温度均表现为淹水时的 SOC 累积矿化量显著高于 70% WHC($P < 0.05$). 由表 1 可得, 在相同水分条件下, 15/25℃ 周期性变温培养与恒温 20℃ 培养在各培养时段的 SOC 累积矿化均无显著差异, 这表明, 好气和淹水条件下紫色土可用恒温 20℃ 来评估 15/25℃ 周期性变温的 SOC 矿化的影响效应.

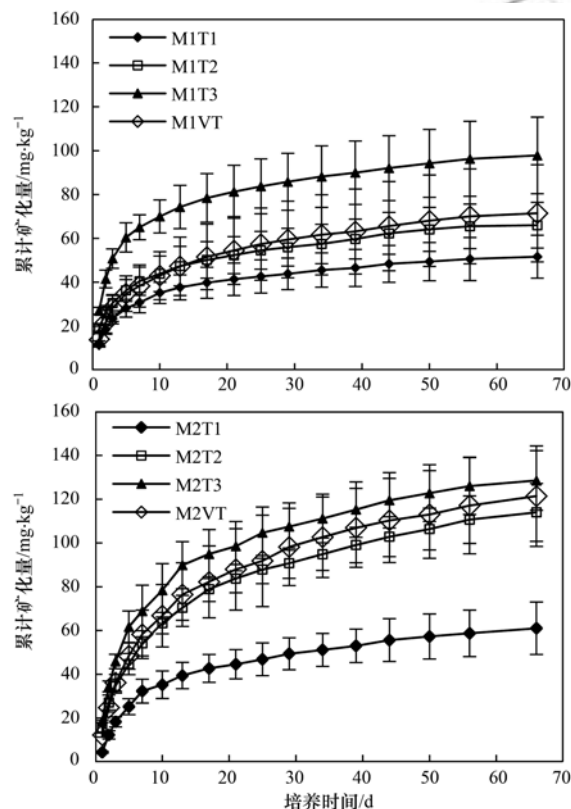


图 2 不同水热条件下紫色土土壤有机碳累积矿化量

Fig. 2 Cumulative mineralization of soil organic carbon in purple soil under different hydrothermal conditions

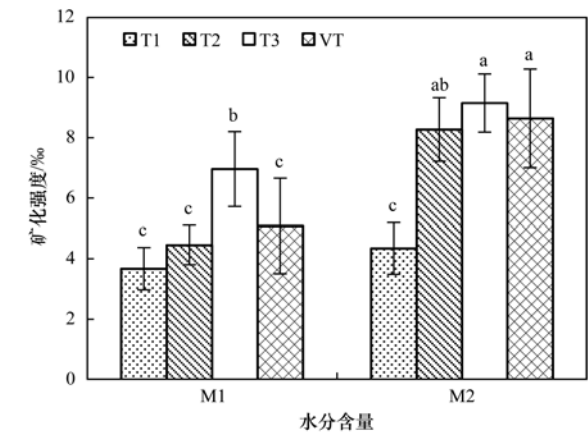
图 3 反映了整个培养期间(0 ~ 66 d), 不同温度处理条件下紫色土有机碳矿化强度. 在相同水分条件下, 紫色土各温度培养的 SOC 矿化强度的高低顺序依次为: 25℃ > 15/25℃ > 20℃ > 15℃, 与 SOC 累积矿化量的变化规律一致, 其最大值均出现在恒温 25℃ 培养. 其中, 在 70% WHC 时, 15/25℃ 培养下的 SOC 矿化强度与 25℃ 差异显著($P < 0.05$), 但与 15℃ 和 20℃ 无明显差异; 淹水时, 15/25℃ 培养的矿化强度显著大于恒温 15℃, 与 20℃ 和 25℃ 无

显著差异. 此外, 从图 3 中也可看出, 相同温度培养期间, 供试土壤在淹水时的 SOC 矿化强度大于 70% WHC, 其中, 淹水时 15/25℃ 培养的矿化强度显著大于 70% WHC.

表 1 不同培养时段紫色土土壤有机碳累积矿化量¹⁾

Table 1 Cumulative mineralization of soil organic carbon in purple soil at different incubation periods									
处理	水分	温度/℃	SOC 累积矿化量/mg·kg ⁻¹						
			0~3 d	3~7 d	7~17 d	17~29 d	29~44 d	44~66 d	0~66 d
M1T1	70% WHC	15	23.46 ^c	7.26 ^b	9.06 ^b	4.07 ^d	4.52 ^b	3.25 ^b	51.62 ^c
M1T2	70% WHC	20	30.51 ^{bc}	9.98 ^b	9.68 ^b	5.81 ^{cd}	6.30 ^b	3.73 ^b	66.01 ^c
M1T3	70% WHC	25	50.78 ^a	14.30 ^b	13.36 ^b	7.35 ^c	6.25 ^b	5.78 ^b	97.82 ^b
M1VT	70% WHC	15/25	28.25 ^c	10.05 ^b	13.25 ^b	7.94 ^c	6.10 ^b	5.84 ^b	71.43 ^c
M2T1	淹水	15	18.27 ^d	14.04 ^b	10.40 ^b	6.68 ^{cd}	6.21 ^b	5.41 ^b	61.00 ^c
M2T2	淹水	20	34.61 ^b	19.52 ^{ab}	23.39 ^a	13.23 ^{ab}	12.09 ^a	11.13 ^a	113.96 ^{ab}
M2T3	淹水	25	45.84 ^a	23.07 ^{ab}	26.03 ^a	12.57 ^b	11.99 ^a	9.05 ^{ab}	128.55 ^a
M2VT	淹水	15/25	36.06 ^b	22.18 ^a	25.47 ^a	14.45 ^a	12.11 ^a	11.12 ^a	121.39 ^a

1) 不同小写字母表示在同一培养时段内差异达显著水平($P < 0.05$), 下同



柱上不同小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$), 下同

图 3 不同水热条件下紫色土有机碳矿化强度

Fig. 3 Mineralization intensity of organic carbon in purple soil under different hydrothermal conditions

2.2 土壤微生物量碳

由图 4 所示, 紫色土在培养前期(1~10 d)各水分状态的波动较大, 在培养后期(25~66 d), 除

15℃外, 其余温度培养下 70% WHC 的 MBC 均大于淹水, 且在较高温(25℃)时存在显著差异($P < 0.05$). 培养前期, 15℃和 20℃时的 MBC 含量在第 1 d 达到最大值, 1~10 d 逐渐下降; 25℃和 15/25℃的 MBC 含量最大值则出现在第 5 d, 呈现出先升高后下降的趋势; 在第 25 d, 各温度培养下的土壤 MBC 含量又出现峰值, 后随着培养时间的延长而逐渐降低. 此外, 在 70% WHC 时, 各温度培养下, 紫色土 MBC 含量在第 1 d 无明显差异, 随后在 5~66 d 培养时间内, 恒温 25℃培养的 MBC 高于其余处理, 但只与恒温 15℃培养有显著差异($P < 0.05$), 说明在恒温培养下, 温差要达到 10℃时才有可能显著影响土壤微生物量碳含量; 15/25℃变温培养在培养中期(5~25 d)与恒温 20℃培养有显著差异, 第 5 d 时显著高于 15℃和 20℃, 第 10~25 d 时又显著低于 20℃和 25℃. 淹水时, 变温培养与恒温间 MBC 含量的变化则不

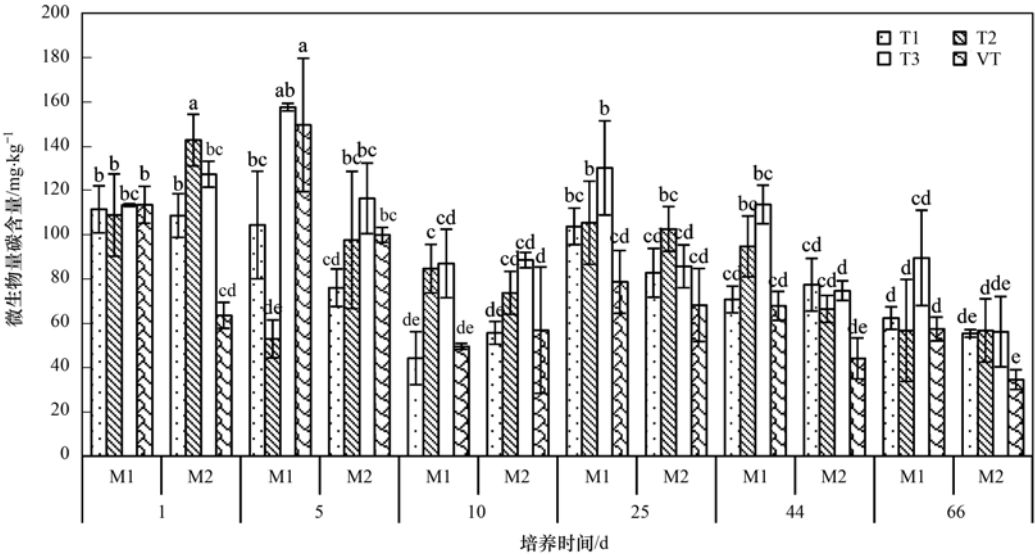


图 4 不同水热条件下紫色土微生物量碳含量

Fig. 4 Microbial biomass carbon content in purple soil under different hydrothermal conditions

显著, 不同水分状态也会影响土壤 MBC 含量. 对比不同水分条件下的变温培养, 除第 10 d 所测 MBC 值为 70% WHC 小于淹水外, 其余培养时间均为 70% WHC 显著大于淹水 ($P < 0.05$). 结合紫色土有机碳矿化速率, 分析各处理下 MBC 含量与 SOC 矿化速率的相关性, 由表 2 可知, 在 70% WHC 时, 各温度培养下紫色土的 MBC 含量与 SOC 矿化速率相关关系不显著; 而淹水时, 仅在 20℃ 和 25℃ 培养时, MBC 含量与 SOC 矿化速率存在显著的线性正相关关系.

表 2 各处理下紫色土微生物量碳与土壤有机碳矿化速率的相关性¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between microbial biomass carbon and SOC mineralization rate of pueple soil under different temperature treatments

处理	水分	温度/℃	R
M1T1	70% WHC	15	0.53
M1T2	70% WHC	20	0.45
M1T3	70% WHC	25	0.08
M1VT	70% WHC	15/25	0.51
M2T1	淹水	15	0.46
M2T2	淹水	20	0.87*
M2T3	淹水	25	0.89*
M2VT	淹水	15/25	0.46

1) R 为相关系数, * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关

2.3 土壤有机碳矿化动力学特征

由表 3 可见, 整个培养期间, 在相同水分条件下, 紫色土各温度培养的 C_0 值大小顺序依次为: 25℃ > 15/25℃ > 20℃ > 15℃. 同一温度不同水分下, 紫色土在淹水时的 C_0 值均大于 70% WHC, 且

除恒温 15℃ 外, 其余温度培养 C_0 值含量均差异显著 ($P < 0.05$). 各水分状态下, 恒温培养时, 紫色土 C_0 含量随温度的升高而增大, 与 SOC 累积矿化量变化规律一致. 比较变温与恒温培养, 15/25℃ 培养下的 C_0 值与 20℃ 无明显差异, 但与 15℃ 和 25℃ 差异显著. C_0/C_{66} 为易分解有机碳占 66 d 培养期内总累积矿化量的比例, 70% WHC 和淹水时紫色土在各温度下 C_0/C_{66} 的变化范围分别为: 65.19% ~ 73.93% 和 62.77% ~ 68.00%, 各处理间 C_0/C_{66} 差异不显著, 但均高于 60%. 另外, C_0/SOC 值的大小反映了 SOC 矿化能力, 在相同水分状况下, 紫色土表现为 25℃ 培养的 SOC 矿化能力强于其余培养温度; 而 15/25℃ 周期性变温与恒温 20℃ 间的 SOC 矿化能力无明显差异. 相同温度培养下, 紫色土在淹水时的 SOC 矿化能力强于好气 ($P < 0.05$). 淹水培养时, 易分解有机碳矿化速率常数 k 值在各温度间没有明显差异; 而 70% WHC 时变温培养的 k 值显著低于 20℃ ($P < 0.05$), 恒温 25℃ 和 20℃ 培养下的 k 值分别是 15/25℃ 培养时的 1.5 和 1.4 倍. 在同一温度培养下, 不同水分含量对 k 值有显著影响 ($P < 0.05$), 好气状态处理的 k 值均大于淹水处理. 在 70% WHC 条件下, 各处理间的难分解有机碳矿化速率常数 h 无明显差异; 而在淹水条件下, 15℃ 培养温度下的 h 显著低于 ($P < 0.05$) 其余温度处理. 对比恒温 20℃ 和 15/25℃ 培养, 好气条件恒温 20℃ 培养 k 值大于 15/25℃ 培养, 而淹水条件则无明显差异; 在两种水分条件下, 恒温 20℃ 和 15/25℃ 培养的 h 值均无明显差异.

表 3 不同水热条件下紫色土有机碳矿化动力学参数¹⁾

Table 3 Kinetic parameters for organic carbon mineralization of purple soil under different hydrothermal conditions

处理	水分	温度/℃	$C_0/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$C_0/C_{66}/\%$	k/d^{-1}	$h \times 10^{-5}/\text{d}^{-1}$	$C_0/SOC/\%$	R^2
M1T1	70% WHC	15	37.09 ± 5.36c	72.32 ± 3.49a	0.38 ± 0.07b	2.09 ± 0.52b	2.64 ± 0.38c	0.98
M1T2	70% WHC	20	44.89 ± 8.47c	68.01 ± 6.17a	0.48 ± 0.10a	2.96 ± 0.73b	3.20 ± 0.60c	0.97
M1T3	70% WHC	25	71.68 ± 8.56b	73.93 ± 5.50a	0.44 ± 0.07ab	3.56 ± 1.10b	5.10 ± 0.61b	0.99
M1VT	70% WHC	15/25	45.97 ± 11.87c	65.19 ± 5.07a	0.33 ± 0.05b	3.43 ± 1.32b	3.27 ± 0.85c	0.98
M2T1	淹水	15	40.91 ± 5.27c	67.88 ± 7.59a	0.20 ± 0.06c	2.52 ± 0.96b	2.91 ± 0.38c	0.99
M2T2	淹水	20	70.86 ± 5.59b	62.77 ± 8.01a	0.20 ± 0.01c	5.35 ± 1.41a	5.04 ± 0.40b	0.99
M2T3	淹水	25	87.59 ± 12.30a	68.00 ± 3.98a	0.23 ± 0.02c	5.23 ± 0.59a	6.23 ± 0.88a	0.99
M2VT	淹水	15/25	77.41 ± 20.41ab	63.59 ± 11.90a	0.20 ± 0.06c	5.43 ± 1.86a	5.51 ± 1.45b	0.99

1) C_0 表示土壤中易分解有机碳含量; C_{66} 表示 66 d 的土壤有机碳累积矿化量; C_0/C_{66} 表示土壤易分解有机碳占 66 d 培养期土壤有机碳累积矿化量的比例; k 、 h 分别表示土壤中易分解有机碳和难分解有机碳的分解速率; C_0/SOC 表示易分解有机碳占总有机碳的比例; R^2 为拟合方程的决定系数

3 讨论

温度和水分是影响土壤矿化的重要因素, 本试验恒温培养下的土壤 CO_2 累积释放量随着温度升高而显著增加, 这与其他研究得出结果一致^[5,17,18], 且淹水高温下土壤矿化量最大. 本研究

中, 15/25℃ 周期性变温培养的积温为 20℃, 与恒温 20℃ 培养相同, 在两种水分处理下, 15/25℃ 培养在各时段的累积矿化量总是略高于恒温 20℃, 且与 20℃ 无显著差异, 即可用 20℃ 恒温来评估变温 (15/25℃) SOC 矿化的影响效应. 这与 Zhu 等^[9] 的研究结果类似, 表明温度模式的变化 (恒温或变温)

对 SOC 矿化无明显影响, 变温处理下的 SOC 矿化受温度范围的限制, 其值接近与其积温相同的恒温处理. 但也有研究表明温度模式的变化可以显著影响培养土壤的 SOC 矿化^[10,19], 其原因如下, 一是本次试验中变温培养的温度变化幅度较小(5℃), 而已有研究中的温度变幅为 10℃; 二是本试验变温处理在较低温度下培养, 并没有探讨较高温度时, 土壤周期性变温与恒温之间的矿化; 三是土壤类型也是影响 SOC 矿化的重要因素, 土壤理化性质(如土壤有机质的化学组成等)也会影响土壤的矿化机制^[20]. 本研究中, 不同温度条件下, 紫色土前 14 d 的 SOC 矿化速率均显著高于后 52 d ($P < 0.05$), SOC 矿化累积量在前 14 d 内达到整个培养期的 65% ~ 75% 之间, 这表明在整个培养过程中 SOC 矿化累积量主要由矿化速率决定. 由图 3 所示, 除恒温 15℃ 培养外, 相同温度下不同水分的矿化强度与 SOC 浓度间存在显著相关性 ($P < 0.05$), 这与 Dimassi 等^[21]的研究结果类似. 在同一水分下低温与高温也存在显著相关性, 表明温度和水分均影响 SOC 矿化强度 (C_0/SOC). 在以往的研究中, 有研究认为淹水条件下土壤有机碳矿化高于好气条件^[6,22,23], 但也有部分研究持相反意见^[5,24]. 本研究表明, 相较于 70% WHC, 淹水条件更有利于紫色土有机碳的矿化, 其可能原因如下: ①本研究设置的是浅层淹水培养, 淹水层深度约为 1.5 cm, 较浅的淹水层使得水层外的氧气易于扩散到土水接触面, 这能及时补充因土壤有机碳矿化导致的氧气耗损, 再加上供试土壤的有机碳含量水平一般, 其矿化所需的供氧强度要求不高, 土水接触面的氧气供应能持续满足供试土壤有机碳矿化的需求, 使得氧气未成为淹水条件下供试土壤有机碳矿化的限制因子; ②淹水培养导致供试土壤的土粒间或孔隙中充满水, 为微生物在不同的土粒表面或孔隙面之间移动提供了便利通道, 这或许能有效增加土体内微生物的移动性及其群落的扩散性, 使微生物有更多的机会去接触和代谢土体内有机物质, 进而有利于土壤有机碳矿化. 土壤有机碳矿化和土体内微生物群体活性之间有着密切的联系^[25], 土壤微生物量碳含量是常被选作衡量土体内微生物群体活性或代谢能力的一个重要指标^[26]. 然而, 目前有关土壤有机碳矿化和土壤微生物量碳含量之间是否存在显著相关的观点并不一致, 有研究认为在恒温条件下土壤矿化强度与微生物量碳之间有一定的相关性^[27,28], 也有研究认为土壤有机碳矿化和微生物量碳不存在显著相关性^[29]. 本研究表明, 变温条件下紫色土有机碳矿化速率和土壤微生物量碳含量之间无显著相

关, 笔者认为导致该现象的主要原因可能是: 变温条件下土壤微生物量碳含量不能即时反映土壤微生物群体的真实代谢能力, 微生物量对变温条件的响应敏感度不及微生物活性, 其可能存在一定的滞后效应. 由此可见, 土壤微生物量碳含量不宜被选作即时反映变温条件下土壤微生物群体活性或代谢能力的指标.

矿化动力学方程拟合表明, 温度和水分均能影响各处理 C_0 (土壤中易于被矿化的那部分有机碳) 的含量. 对比恒温处理, C_0 值随着培养温度的升高而增大, 这与 SOC 累积矿化量的变化规律相一致, 大部分前人研究也得出一致结论^[17,30,31], 即温度升高导致土壤有机碳的有效性增强, 部分缓效性碳转化为活性碳. 在相同培养温度下, 紫色土 C_0 含量均为淹水大于 70% WHC, 且除恒温 15℃ 外, 其余培养温度均差异显著 ($P < 0.05$), 而变温培养亦有此规律, 原因可能为在淹水条件下土壤微生物活性增强, 微生物利用 C_0 的能力增强, 且长期淹水可改变土壤性质(团聚体等), 从而增大易分解碳库含量. 对比所有处理, 淹水条件下恒温 25℃ 培养的 C_0 值显著高于其它处理 ($P < 0.05$), 其 C_0/SOC 值也最高, 即升高温度和淹水条件均能够通过影响土壤 C_0 含量进而影响 SOC 矿化量. 在 66 d 培养期内, 各处理 C_0 含量占其整个培养期 SOC 矿化累积总量的比值均大于 60%, 这表明有部分难分解有机碳可能发生矿化, 且在易分解有机碳库中发挥重要作用. 通过对 15/25℃ 培养和 20℃ 培养进行比较, 发现 15/25℃ 培养的 C_0 值与恒温 20℃ 培养无明显差异, 说明温度的周期性变化主要是通过影响积温而不是通过影响有机碳库大小 (C_0) 和难分解有机碳矿化速率常数 (h) 影响有机碳矿化过程. k 和 h 值分别反映了土壤中易分解和难分解有机碳的相对矿化速率. 如表 3 所示, k 和 h 在不同水分条件下均有差异, 不论恒温或变温培养, 紫色土在好气条件下的 k 值均显著大于淹水条件; h 值则是除恒温 15℃ 外, 其余处理淹水条件显著大于好气条件. 紫色土在好气状态下的 k 值较高, C_0/SOC 值较低, 反映其微生物活性较高, 易分解有机碳库的分解较快, h 值虽然明显低于 k 值, 但土壤难分解有机碳库大小远大于易分解有机碳库大小, 且好气条件下紫色土的 C_0 值较小, 故好气条件下 SOC 矿化速率仍较低.

4 结论

(1) 无论淹水还是好气培养, 变温 15/25℃ 的紫色土累积矿化量总是处于恒温 15℃ 和 25℃ 之间,

且紫色土有机碳累积矿化量和矿化强度与恒温 20℃ 无明显差异, 这表明紫色土有机碳累积矿化量受到温度范围的限制, 可用恒温 20℃ 来评估变温 (15/25℃) SOC 矿化的影响效应。

(2) 除恒温 15℃ 外, 在不同培养温度模式 (恒温或变温) 下, 其紫色土有机碳累积矿化量均表现为淹水处理显著高于 70% WHC 处理 ($P < 0.05$), 这主要归因于淹水条件增加了紫色土易分解碳库的大小。

(3) 变温 15/25℃ 和恒温 20℃ 培养的易分解有机碳库 (C_0) 和矿化速率差异不显著, 表明在积温相同的情况下, 相较于恒温, 周期性变温不能通过改变土壤中易分解有机碳库含量和难分解有机碳矿化速率来影响 SOC 矿化。

参考文献:

- [1] Stockmann U, Padarian J, McBratney A, *et al.* Global soil organic carbon assessment[J]. *Global Food Security*, 2015, **6**: 9-16.
- [2] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J]. *水土保持学报*, 2015, **29** (3): 130-135.
Wu J H, Pan J J, Ge X J, *et al.* Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29** (3): 130-135.
- [3] 葛序娟, 潘剑君, 邬建红, 等. 培养温度对水稻土有机碳矿化参数的影响研究[J]. *土壤通报*, 2015, **46** (3): 562-569.
Ge X J, Pan J J, Wu J H, *et al.* Effects of incubation temperature on parameters of organic carbon mineralization in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46** (3): 562-569.
- [4] 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2017, **37** (1): 12-24.
Huang J X, Xiong D C, Liu X F, *et al.* Effects of warming on soil organic carbon mineralization: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37** (1): 12-24.
- [5] 孙中林, 吴金水, 葛体达, 等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30** (1): 214-220.
Sun Z L, Wu J S, Ge T D, *et al.* Effects of soil texture and water content on the mineralization of soil organic carbon in paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2009, **30** (1): 214-220.
- [6] 王媛华, 苏以荣, 李杨, 等. 水田和旱地土壤有机碳周转对水分的响应[J]. *中国农业科学*, 2012, **45** (2): 266-274.
Wang Y H, Su Y R, Li Y, *et al.* Response of the turnover of soil organic carbon to the soil moisture in paddy and upland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45** (2): 266-274.
- [7] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 好气和淹水处理间苏南水稻土有机碳矿化量差异的变化特征[J]. *中国农业科学*, 2010, **43** (6): 1164-1172.
Hao R J, Li Z P, Che Y P. Characteristics of organic carbon mineralization under aerobic and submerged conditions in paddy soils of southern Jiangsu province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, **43** (6): 1164-1172.
- [8] Noormets A, Desai A R, Cook B D, *et al.* Moisture sensitivity of ecosystem respiration: comparison of 14 forest ecosystems in the upper Great Lakes region, USA[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148** (2): 216-230.
- [9] 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.
- [10] 王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 等. 变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35** (11): 4291-4297.
Wang L G, Gao Y H, Ding C H, *et al.* Effects of variable temperature on organic carbon mineralization in typical limestone soils[J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (11): 4291-4297.
- [11] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [12] 樊晶晶, 慈恩, 唐江, 等. 紫色丘陵区典型旱地土壤有机碳矿化对突发性变温的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, **31** (1): 286-290.
Fan J J, Ci E, Tang J, *et al.* Soil organic carbon mineralization response to sudden temperature change in the typical dry land distributed in the purple hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31** (1): 286-290.
- [13] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2007, **26** (2): 278-285.
Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farm land ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26** (2): 278-285.
- [14] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [15] Reichstein M, Bednorz F, Broll G, *et al.* Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32** (7): 947-958.
- [16] Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, *et al.* Effect of N and P addition on soil organic C potential mineralization in forest soils in South China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20** (9): 1082-1089.
- [17] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, **27** (1): 38-42.
Yang J S, Liu J S, Sun L N. Effects of temperature and soil moisture on wetland soil organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27** (1): 38-42.
- [18] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, **55** (1): 225-235.
Guo Z, Wang X L, Duan J J, *et al.* Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55** (1): 225-235.
- [19] CI E, Al-Kaisi M M, Wang L G, *et al.* Soil organic carbon mineralization as affected by cyclical temperature fluctuations in a karst region of Southwestern China[J]. *Pedosphere*, 2015, **25** (4): 512-523.
- [20] Haddix M L, Plante A F, Conant R T, *et al.* The role of soil characteristics on temperature sensitivity of soil organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, **75** (1): 56-68.
- [21] Dimassi B, Mary B, Fontaine S, *et al.* Effect of nutrients availability and long-term tillage on priming effect and soil C mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **78**: 332-339.
- [22] 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 等. 水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37** (7): 2763-2769.
Ding C H, Wang L G, Tang J, *et al.* Effects of soil moisture and

- temperature variations on organic carbon mineralization of purple soil in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2763-2769.
- [23] 黄东迈, 朱培立, 王志明, 等. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑[J]. *土壤学报*, 1998, **35**(4): 482-492.
Huang D M, Zhu P L, Wang Z M, *et al.* A study and question on the decomposition rate of organic carbon under upland and submerged soil conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(4): 482-492.
- [24] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, **13**(6): 1013-1019.
Zhang W, Wang Z F, Wang H, *et al.* Organic carbon mineralization affected by water content and plant residues in purple paddy soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, **13**(6): 1013-1019.
- [25] Verburg P S J, Van Dam D, Hefting M M, *et al.* Microbial transformations of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature[J]. *Plant and Soil*, 1999, **208**(2): 187-197.
- [26] Bárcenas-Moreno G, Gómez-Brandón M, Rousk J, *et al.* Adaptation of soil microbial communities to temperature: comparison of fungi and bacteria in a laboratory experiment[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(12): 2950-2957.
- [27] 柴雪思, 雷利国, 江长胜, 等. 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2979-2988.
- Chai X S, Lei L G, Jiang C S, *et al.* Characteristics and influencing factors of soil microbial biomass carbon and nitrogen in drawdown area in the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2979-2988.
- [28] 赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3223-3230.
Zhao T, Jiang Y L, Yan H, *et al.* Effects of different aspects on soil microbial biomass and dissolved organic carbon of the Loess Hilly Area [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3223-3230.
- [29] Barbhuiya A R, Arunachalam A, Pandey H N, *et al.* Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2004, **40**(3-4): 113-121.
- [30] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 等. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1105-1110.
Yang T, Dai W, An X J, *et al.* Organic carbon and carbon mineralization characteristics in nature forestry soil [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1105-1110.
- [31] 高菲, 姜航, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳库及周转[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(7): 1913-1920.
Gao F, Jiang H, Cui X Y. Soil organic carbon pools and their turnover under two different types of forest in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 1913-1920.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)