

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM_{2.5}时空演变过程 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)

西安市PM_{2.5}健康损害价值评估 魏国茹,史兴民 (3014)

河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 江琪,王飞,孙业乐 (3022)

南京北郊秋季PM_{2.5}碳质组分污染特征及来源分析 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)

临安夏季霾和清洁天气PM_{2.5}化学组成特征比较 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)

盘锦市秋冬季节PM_{2.5}中碳组分特征及来源解析 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)

南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)

夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)

杭州地区大气CO₂体积分数变化特征及影响因素 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)

典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)

地级市域工业VOCs排放源排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)

青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)

轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)

南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金凤,李慧明 (3118)

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 石栋奇,卢新卫 (3126)

三峡库区主要河流秋季pCO₂及其影响因素 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 李立青,刘雨情,杨佳敏,王娟 (3150)

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)

抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)

蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 王永平,谢瑞,晁建颖,姬晶辉,于剑 (3179)

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)

Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)

Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)

铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)

铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)

制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)

电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)

基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)

采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)

基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)

纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)

气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)

耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)

PFOS前体物质(PreFOs)降解菌的分离鉴定及其降解特性 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳雨芬 (3321)

采油井场土壤微生物群落结构分布 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)

铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)

邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)

塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)

施硼对水稻幼苗吸收和分泌硼的影响 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)

不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)

南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)

三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)

人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 时红蕾,王晓昌,李倩 (3434)

COD/SO₄²⁻对青霉素菌渣厌氧消化影响 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH₃挥发的影响 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)

《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制

唐国勇, 张春华, 刘方炎, 马艳

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650233)

摘要: 探明有机碳稳定的温度作用机制, 是评估全球变化背景下土壤碳源/汇演变趋势的关键. 应用土壤密度分组和酸水解技术, 采用红外线辐射增温法, 对比研究不同升温情景下高原喀斯特土壤及其物理和生化组分中有机碳密度的短期(4a)变化特征. 升温情景包括不升温(对照)、对称升温(全年同步升温 2.0°C)和非对称升温(冬春/夏秋季升温幅度为 2.5°C/1.5°C、3.0°C/1.0°C、3.5°C/0.5°C 和 4.0°C/0°C, 低度、中度、高度和极端非对称升温), 其中中度非对称升温与该区域多年升温情景类似. 结果表明, 不同升温情景下表层(0~15 cm)土壤有机碳密度在 1.95~2.02 kg·m⁻² 之间, 其差异不显著, 且与对照(1.94 kg·m⁻²) 差异不显著. 升温处理间土壤轻组和重组碳密度、重组顽固性碳密度差异不显著, 且与对照差异不显著. 5 个升温处理轻组顽固性碳平均密度是对照的 1.18 倍, 其中对称升温、低度和中度非对称升温处理显著高于对照. 轻组顽固性碳密度和轻组顽固性碳指数随升温的非对称性增加而降低, 其中对称升温处理均显著高于中度、高度和极端非对称升温. 亚表层(15~30 cm)土壤及其物理和生化组分中有机碳密度对短期升温均不敏感. 研究揭示: 短期内, 升温提高了高原喀斯特土壤非保护组分中有机碳顽固性. 基于对称升温情景并不一定会误估全球变暖对土壤有机碳数量和土壤碳物理保护能力的影响, 但可能会高估表层土壤(0~15 cm)非保护组分有机碳顽固性.

关键词: 非对称升温; 对称升温; 土壤密度组分; 酸水解; 有机碳顽固性; 有机碳稳定性; 高原喀斯特

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2018)07-3391-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201710068

Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil

TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, MA Yan

(Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650233, China)

Abstract: Elucidating the mechanisms of warming-induced stability for soil organic C is one of the keys for evaluating the tendency of soil C sources/sinks in projected global warming models. Organic C densities in soil, and soil physical and biochemical fractions, under different warming scenarios in the Karst Plateau were investigated following a 4-yr continuous warming using infrared radiators, *via* density fractionation and acid hydrolysis. Six treatments were arranged: no warming (ambient temp, CK); symmetric warming (ambient +2.0°C full year); and lowly, moderately, highly, and extremely asymmetric warming (ambient +2.5°C/1.5°C, 3.0°C/1.0°C, 3.5°C/0.5°C, and 4.0°C/0°C in winter-spring/summer-autumn seasons, respectively; LAW, MAW, HAW, and EAW). The moderately asymmetric warming was highly similar to a multi-year warming scenario in the study region. The results showed there were no significant differences in soil organic C densities in the surface layer (0-15 cm) among the warming treatments, with a range of 1.95 kg·m⁻² to 2.02 kg·m⁻², which is insignificantly different to the CK (1.94 kg·m⁻²). There were no significant differences in the C density of light and heavy fractions, and the recalcitrant heavy-fraction among the warming treatments, and between the warming and no warming treatments. The average recalcitrant C density of the light fraction in the warming treatments was 1.18 times higher than the CK, with a significantly higher recalcitrant C density of the light fraction in the symmetric warming, and lowly and moderately asymmetric warming treatments, compared to that of the CK. The recalcitrant C density and recalcitrant C index of the light fraction showed a tendency to decrease as the asymmetry of warming increased under the five warming scenarios. Warming had negligible effects on the organic C density in soil, and soil physical and biochemical fractions in the subsurface layer (15-30 cm). The results revealed that in the short-term, warming may increase the recalcitrance of non-protected C in the Karst Plateau soil. This is not necessarily an over- or underestimation of the effects of global warming on soil organic C density and the capacity of soil to protect C when subjected to symmetric warming, but may potentially overestimate the recalcitrance of organic C in the non-protected fraction of the surface layer (0-15 cm).

Key words: asymmetric warming; symmetric warming; density fractionation; acid hydrolysis; organic carbon recalcitrance; organic carbon stability; Karst Plateau

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出^[1]: 1880~2012年间全球表面气温升高了0.85°C, 而且全球气候仍将持续变暖. 关于升温过程, 研究证实气候变暖过程存在明显的

收稿日期: 2017-10-12; 修订日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670613)

作者简介: 唐国勇(1980~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为喀斯特土壤与环境生态, E-mail: tangguoyong1980@gmail.com

季节差异,表现为冬春季升温幅度大于夏秋季,即季节非对称升温^[1,2].

全球 1 m 土层内土壤有机碳(SOC)储量估计为 2 000 Pg(以 C 计),是陆地生态系统中最大的、最活跃的碳库,其微小变化对大气 CO₂ 浓度产生巨大的影响^[1,3]. 而全球变化对 SOC 分解、转化、积累也有深远的影响. 全球变暖能促进土壤呼吸、加速有机碳分解,导致全球尺度上土壤碳库减少,释放更多的 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体,进而加剧全球变暖^[4-7],但幅度因生态系统类型、模拟增温方式和幅度及增温季节与持续时间的不同而存在很大差异,甚至敏感性随温度的升高而降低^[5],使全球变暖对土壤碳释放的影响机制异常复杂^[8]. 关于土壤碳释放对全球变暖的响应/适应机制,目前尚未达到共识. 要理解土壤碳释放对全球变暖的适应性,以及全球变化背景下土壤作为碳汇/源的演变趋势,首先应弄清 SOC 稳定的温度作用机制. SOC 稳定主要通过化学稳定、物理保护和生化顽固这 3 种方式实现. 其中,物理保护和生化顽固是 SOC 稳定的主要途径^[9].

受青藏高原和东亚季风、西南季风的共同影响,地处低纬高原的滇中喀斯特地区气候变化更明显、更复杂,属于气候变化敏感区^[10,11],如昆明地区 1961~2007 年平均气温升高了 2.08℃^[11]. 然而并不清楚气候变暖,尤其是非对称升温情景下,该地区 SOC 稳定性的变化情况,也不清楚这种变化对土壤碳源/汇的影响,而正确评估这种影响将为生态模型参数估算和验证提供参考和依据^[8]. 基于此,笔者应用土壤密度分组和酸水解技术,采用红外线辐射增温法对高原喀斯特小样地进行增温,对比研究不同升温情景下土壤及其物理和生化组分中有机碳密度的短期(4a)变化特征,通过探明该地区土壤有机碳稳定的温度作用机制,以期评估全球变暖情景下土壤碳源/汇演变趋势提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省石林县境内(24°40'N, 103°22'E),海拔为 1 750~1 800 m,属亚热带季风气候区,是高原喀斯特的典型代表. 该区域年平均温为 15.8℃,最高和最低月均温为 20.9℃(6 月)和 8.6℃(1 月). 年均降水量为 948 mm,雨季(5~10 月)降水量约占全年的 80%. 1961~2016 年(数据来源于石林县气象局,其气象站距离本研究区约为

0.8 km),研究区年平均升温幅度为 0.29℃·(10 a)⁻¹,其中冬春季和夏秋季升幅分别为 0.44℃·(10 a)⁻¹和 0.14℃·(10 a)⁻¹.

2012 年,在研究区内选取面积为 1 hm² 的石漠化生态系统(非农地)作为固定样地,该样地立地条件相对一致,地势平坦,最大相对高差不足 5 m,地表岩石出露率为 17%. 研究区内乔灌木已被破坏,多低矮植物如苦刺花(*Sophora viciifolia*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)等,植被高度低于样地大部分出露岩石. 2012 年 8 月,该区域植被盖度为 35%. 样地土壤类型为钙质红色石灰土,质地为砂质黏壤土(美国制),<0.05 mm 土粒含量为 45.41%,容重为 1.21 g·cm⁻³,总孔隙度为 54.34%,pH 值为 7.5, SOC 含量为 14.75 g·kg⁻¹,无机碳(以碳酸钙计)所占质量分数为 6.8%.

1.2 试验设计

2012 年在固定样地内设置 18 个 2 m×2 m 的小区,开展升温试验,设不升温(对照,CK)、对称升温(全年同步升温 2.0℃,SW)和非对称升温处理,其中非对称升温包括低度非对称升温(Δ2.5℃/Δ1.5℃,12~翌年 5 月升温 2.5℃,6~11 月升温 1.5℃, LAW)、中度非对称升温(Δ3.0℃/Δ1.0℃,12~翌年 5 月升温 3.0℃,6~11 月升温 1.0℃,MAW)、高度非对称升温(Δ3.5℃/Δ0.5℃,12~翌年 5 月升温 3.5℃,6~11 月升温 0.5℃,HAW)和极端非对称升温(Δ4.0℃/Δ0℃,12~翌年 5 月升温 4.0℃,6~11 月不升温,EAW). 每处理 3 个小区,即 3 次重复,完全随机区组设计. 采用生态系统小样地控制试验中模拟增温的主流方法——红外线辐射增温法对样地进行增温^[5,12,13],即在每个小区内悬挂 2 根功率可调的红外辐射增温管(增温管最大功率 2.0 kW,长度 2 m,悬挂高度 1.2~1.5 m). 在每个试验小区内随机安设 7 个温度探头(Decagon, DC, 美国),测定试验小区内空气温度(T_1);小区外(距离小区至少 0.5 m)安设 5 个温度探头,测定环境空气温度(T_0),裸露岩石处不安设,安装高度离地表 5 cm. 温度探头与高精度自动控温器(SMUL4,精度为 ±0.01℃,国产)电连,利用控温器实时自动调节增温管输出功率,使实际增温幅度($T_1 - T_0$)与试验设定的增温幅度相同(±0.01℃误差范围内). 本研究中所指升温幅度均以地表上方 5 cm 处空气温度为基准,试验升温期为 2012 年 12 月至 2016 年 11 月. 本研究设定的各处理年平均升温幅度均为 2.0℃(对照除外),主要是由于过去 50

年滇中地区升温幅度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ^[11], 据此预测未来 100 年该地区升温幅度将达 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这相当于 IPCC^[1] 所预测的较低的全局升温情景。

为持续研究较长时间段内土壤 CO_2 通量变化情况, 本研究采用成熟稳定可靠、适合长期研究的碱液吸收法测定 CO_2 通量, 即 2015 年 12 月, 在每个小区随机安设 3 个具塞 PVC 管 (长度 15 cm, 内径 15 cm), PVC 管另一端插入土体 3 cm 左右. 在 PVC 管内放一盛有 50 mL $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液的吸收瓶 (吸收土壤释放的 CO_2), 密闭. 每隔 10 d 左右更换吸收瓶, 测定其溶液中的 $\text{CO}_2\text{-C}$, 换算成期间的土壤 CO_2 通量, 即每个月测定 3 次土壤通量. 试验期为 2015 年 12 月至 2016 年 11 月. 同时设置 3 个空白试验, 即 PVC 管底部封闭, 仅放置盛有 NaOH 溶液的吸收瓶.

2015 年 10 月 (雨季末期) 在各小区内分别收集新鲜凋落物 (枯落物), 风干. 称取 10.0 g 风干凋落物, 平铺于尼龙网分解袋 (15 cm \times 20 cm, 网孔 1 mm \times 1 mm). 在每个小区随机放置 12 个分解袋, 其中凋落物采自相应小区. 放置分解袋时, 清除地表凋落物层, 再将分解袋紧贴地表放置, 覆盖约 5 mm 厚的凋落物. 试验期 12 个月, 每隔 3 个月从各小区随机取 3 个分解袋, 剔除长入袋内的根系, 用清水小心冲洗分解袋表面的泥沙, 烘干.

1.3 样品采集与植被调查

在每个试验小区内安装 5~6 个土壤温湿度监测探头 (ZK-ZD10A, 国产), 自动监测土壤 15 cm 和 30 cm 处温度和含水量. 分别于 2016 年 4 月和 10 月, 在每个小区内按“S”形多点采集土壤表层 (0~15 cm) 和亚表层样 (15~30 cm), 采样时除去地表凋落物, 小区内土样混合形成一个混合样. 每处理采集表层和亚表层土壤混合样各 3 个, 共 36 个.

2016 年 10 月 (雨季末期) 用收获法调查植被地上生物量, 即各试验小区内植被地上部全部收割、称重, 取部分植物样烘干, 剩余植物样归还相应小区.

1.4 分析和测定方法

土样采回后, 用手选法除去活体根系和可见植物残体, 在室内风干、磨细、过 10 目筛, 用于测定微生物生物量碳 (MBC) 和可溶性有机碳 (DOC). 取 2016 年 10 月采集的土样, 部分磨细过 100 目筛, 用于测定了土壤及其物理和生化组分中有机碳含量, 以及其他理化性质.

土壤密度分组参照 Janzen 等^[14] 的方法, 并根据

实际情况作了一定的改动, 即称取 25 g 风干土于 200 mL 离心管中, 加入浓度为 $1.7\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 NaI 溶液, 手摇 30 s, 超声波分散 10 min (200 W) 后离心 10 min ($4\ 200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 虹吸法吸取悬浮液, 悬浮物置于尼龙滤纸上, 用去离子水洗涤, 以上分散、离心和过滤操作重复 3 次, 滤纸上的收集物即为轻组, 离心管中的剩余物为重组^[14].

轻组和重组碳顽固性按照 Rovira 等^[15] 的酸水解法, 即称取分离的轻组 (200 mg) 和重组 (1 000 mg) 放入具塞硬质试管中, 加入 1 mL $2.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 , 沸水浴 30 min, 加入 20 mL 去离子水、离心, 用虹吸法吸取水解液, 未水解部分 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干, 加入 2 mL $13\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 , 振荡过夜, 加水稀释至该酸到 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 沸水浴 3 h, 依上述方法回收水解液, 硬质试管中剩余物即顽固性组分^[15].

土壤有机碳浓度、分离得到的密度组分 (轻组和重组) 及其顽固性组分中碳浓度用重铬酸钾氧化-外加加热法测定; NaOH 溶液吸收的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 和土壤 DOC 用碳-自动分析仪 (Phoenix-8000) 测定, 其中 DOC 提取方法详见文献^[16]; MBC 用熏蒸提取法测定^[17].

1.5 数据计算与统计分析

凋落物分解过程用指数模型模拟:

$$X_t/X_0 = e^{-kt}$$

式中, X_0 和 X_t 为分解袋内凋落物起始量和分解 1 a 后残留量, k 为分解常数 (a^{-1}), t 为分解时间 (a). 基于 k 可以计算分解 50% (t_{50}) 和 95% 所需时间 (t_{95}), 公式分别为: $t_{50} = \ln(2/k)$ 和 $t_{95} = \ln(20/k)$.

轻组 (或重组) 碳分配比例是轻组 (或重组) 碳密度占土壤有机碳密度的百分比. 顽固性碳指数 (I_{RC}) 是轻组 (或重组) 中顽固性碳密度与轻组 (或重组) 碳密度的比值, 反映土壤或物理组分中土壤有机碳的生化稳定性^[9, 15]. 总顽固性碳比例为总顽固性碳密度占土壤有机碳密度的百分比. 本研究涉及的土壤有机碳密度、物理组分中碳密度、顽固性碳密度等参数计算方法详见文献^[18].

用一维方差分析 (ANOVA, LSD) 比较不同处理土壤温湿度、可溶性碳、微生物生物量碳、土壤碳通量、凋落物分解参数、碳密度等差异的显著性; 用独立样本 t 检验分析对称升温与非对称升温、对称升温与对照、非对称升温与对照之间差异的显著性; 用成对样本 t 检验分析轻组与重组间有机碳密度、顽固性碳密度等差异的显著性. 以上分析均在 SPSS 17.0 软件上完成.

2 结果与分析

2.1 升温对土壤性质和凋落物分解的影响

在平均升温 2.0℃ 的情景下,各升温处理中表层

和亚表层土壤全年平均升温幅度分别为 2.3~2.5℃ 和 1.8~1.9℃ (表 1),其中夏秋季和冬春季表层土壤温度升幅分别为 0~2.4℃ 和 2.5~5.0℃,亚表层升温幅低于表层,分别为 0~1.9℃ 和 1.9~3.7℃.

表 1 不同升温情景样地土壤基本性质¹⁾

Table 1 Basic features of the soil in the experimental plots

土层 /cm	处理	土壤温度/℃			土壤含水量/%			可溶性有机碳/mg·kg ⁻¹		微生物生物量碳/mg·kg ⁻¹	
		全年	夏秋	冬春	全年	夏秋	冬春	夏秋	冬春	夏秋	冬春
0~15	不升温	18.5 b	21.8 e	15.1 f	30.2 a	44.6 a	15.8 a	145.4 a	70.8 a	285.2 b	75.2 a
	对称升温	20.9 a	24.2 a	17.6 e	28.3 b	44.1 a	12.5 b	128.7 a	69.2 a	357.1 a	80.5 a
	低度非对称升温	20.8 a	23.5 b	18.2 d	28.2 b	44.3 a	12.1 bc	137.5 a	74.3 a	327.6 ab	82.4 a
	中度非对称升温	20.9 a	23.0 c	18.8 c	28.0 b	44.2 a	11.8 bc	140.7 a	75.4 a	320.4 ab	77.8 a
	高度非对称升温	21.0 a	22.4 d	19.5 b	27.6 bc	44.3 a	10.8 cd	146.9 a	72.1 a	300.2 b	80.7 a
	极端非对称升温	21.0 a	21.8 e	20.1 a	27.3 c	44.5 a	10.1 d	148.0 a	75.6 a	288.8 b	86.7 a
15~30	不升温	16.8 b	19.4 e	14.2 f	29.3 a	42.0 a	16.5 a	104.8 a	60.1 a	229.8 a	74.8 a
	对称升温	18.7 a	21.3 a	16.1 e	28.7 a	41.1 a	16.2 a	99.7 a	58.2 a	256.6 a	78.5 a
	低度非对称升温	18.7 a	20.8 b	16.5 d	28.7 a	41.2 a	16.2 a	100.2 a	58.8 a	247.2 a	79.9 a
	中度非对称升温	18.6 a	20.3 c	16.9 c	28.7 a	41.3 a	16.0 a	103.7 a	60.2 a	239.1 a	81.4 a
	高度非对称升温	18.6 a	19.8 d	17.4 b	28.9 a	41.8 a	15.9 a	103.1 a	60.4 a	230.7 a	83.5 a
	极端非对称升温	18.7 a	19.4 e	17.9 a	28.8 a	41.8 a	15.8 a	105.5 a	60.5 a	230.8 a	85.7 a

1) 土壤温湿度分别为 15 cm 和 30 cm 处土壤温度和含水量;同一土层内各列字母不同表示处理间均值差异达 95% 显著水平 (LSD),下同

持续升温第 4 年,升温处理中表层土壤年平均含水量在 27.3%~28.3% 之间,显著低于对照 (30.2%,表 1). 其中夏秋季各处理表层土壤含水量差异不显著,但冬春季 5 个升温处理中土壤平均含水量比对照低 27%. 亚表层各处理土壤含水量差异均不显著,且与季节无关.

升温对土壤 DOC 含量的影响不显著,且与采样季节和土层深度无关 (表 1). 同一处理中夏秋季表层 DOC 含量约为冬春季的 1.9~2.1 倍,夏秋季亚表层 DOC 含量是冬春季的 1.7 倍左右. 对称升温处理夏秋季表层土壤 MBC 含量显著高于高度非对称、极端非对称升温 and 对照处理,而不同处理间冬春季表层土壤 MBC 含量差异不显著. 升温对亚表层土壤 MBC 含量的影响不显著 (表 1).

持续升温对土壤 CO₂ 释放量有显著影响 (图 1). 升温样地 CO₂ 释放量 [1.60~1.86 μmol·(m²·s)⁻¹] 显著高于对照 [1.47 μmol·(m²·s)⁻¹], 比对照高 8.8%~26.5%. 对称升温处理 CO₂ 释放量显著高于中度、高度非对称和极端非对称升温处理. 夏秋季土壤 CO₂ 释放量随升温的非对称性增加而降低,冬春季释放量大小顺序则正好相反. 高度非对称和极端非对称升温处理土壤 CO₂ 夏秋季释放量与对照差异不显著. 除此之外,升温能显著提高不同季节土壤 CO₂ 释放量. 夏秋季提高幅度为 14%~30%,冬春季为 19%~33%. 同一处理中,夏秋季土壤 CO₂ 释放量远

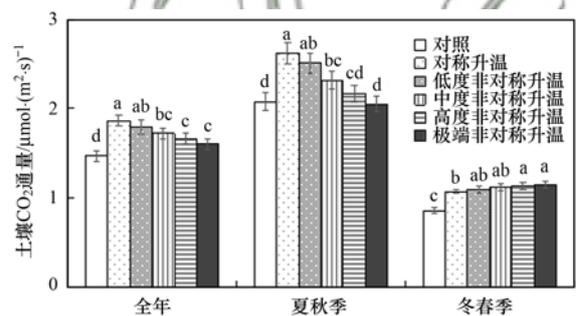


图 1 不同升温情景下土壤 CO₂ 释放量

Fig. 1 Soil CO₂ efflux under different warming scenarios

高于冬春季,是后者的 1.8~2.6 倍.

6 个处理间植被地上生物量差异明显 (表 2), 对称升温样地生物量最高 (428.7 g·m⁻²), 其次为低度和中度非对称升温样地,高度、极端非对称升温 and 对照样地最低,其中对照样地生物量 (350.8 g·m⁻²) 约为对称升温的 80%. 升温处理中植被地上生物量平均值为 389.0 g·m⁻², 比对照高 10%.

经过 1 a 的分解,6 个处理样地分解袋内凋落物残留率为 22.8%~37.5% (表 2). 升温处理中凋落物分解速度均大于对照,其分解常数 (k) 是对照的 1.05~1.51 倍. 升温处理间, k 值随升温的非对称增加而降低. 除高度和极端非对称升温处理 k 值差异不显著外,5 个升温处理间 k 值差异达到显著水平. t_{50} 在 0.30~0.71 a 之间,而 t_{95} 在 2.03~3.06 a 之间.

表 2 不同升温情景下植被地上生物量和凋落物分解参数

Table 2 Above-ground biomass of the vegetation and decomposition parameters of litters under different warming scenarios

处理	地上生物量 /g·m ⁻²	凋落物分解参数				
		失重率/%	残留率/%	分解常数(k)/a ⁻¹	t ₅₀ /a	t ₉₅ /a
不升温	350.8 ± 28.8 c	62.5 ± 1.61 d	37.5 ± 1.61 a	0.98 ± 0.04 e	0.71 ± 0.05 a	3.06 ± 0.14 a
对称升温	428.7 ± 22.0 a	77.2 ± 1.11 a	22.8 ± 1.11 d	1.48 ± 0.05 a	0.30 ± 0.03 d	2.03 ± 0.07 d
低度非对称升温	404.2 ± 29.7 ab	74.9 ± 1.11 a	25.1 ± 1.11 d	1.38 ± 0.05 b	0.37 ± 0.04 d	2.17 ± 0.07 d
中度非对称升温	389.4 ± 27.2 abc	71.1 ± 1.28 b	28.9 ± 1.28 c	1.24 ± 0.05 c	0.48 ± 0.04 c	2.41 ± 0.09 c
高度非对称升温	365.4 ± 25.5 bc	66.2 ± 1.61 c	33.8 ± 1.61 b	1.08 ± 0.05 d	0.61 ± 0.04 b	2.77 ± 0.12 b
极端非对称升温	357.2 ± 20.3 bc	64.4 ± 1.44 cd	35.6 ± 1.44 ab	1.03 ± 0.04 de	0.66 ± 0.04 ab	2.90 ± 0.11 ab

2.2 升温对土壤有机碳密度和分布格局的影响

短期持续升温对高原喀斯特表层和亚表层土壤有机碳密度(SOCD)的影响均不显著(表3)。5种升温情景下表层SOCD为1.95~2.02 kg·m⁻²,平均值

为1.99 kg·m⁻²,略高于对照(1.94 kg·m⁻²)。升温处理中亚表层SOCD(1.53~1.56 kg·m⁻²)也稍高于对照(1.52 kg·m⁻²)。各处理中表层SOCD均显著高于亚表层,比后者高27%~30%。

表 3 不同升温情景下土壤有机碳密度和物理组分碳密度

Table 3 Organic C density in soil and density fractions under different warming scenarios

土层/cm	处理	有机碳密度 /kg·m ⁻²	轻组碳密度 /kg·m ⁻²	重组碳密度 /kg·m ⁻²	轻组碳分配比例 /%	重组碳分配比例 /%
0~15	不升温	1.94 ± 0.06 a	0.56 ± 0.03 a	1.33 ± 0.06 a	28.85 ± 1.23 a	68.54 ± 1.49 a
	对称升温	2.02 ± 0.08 a	0.63 ± 0.03 a	1.34 ± 0.06 a	31.19 ± 1.57 a	66.33 ± 0.59 a
	低度非对称升温	2.01 ± 0.07 a	0.63 ± 0.03 a	1.32 ± 0.06 a	31.33 ± 1.49 a	65.66 ± 0.64 a
	中度非对称升温	1.97 ± 0.07 a	0.62 ± 0.02 a	1.30 ± 0.06 a	31.47 ± 1.14 a	65.98 ± 1.43 a
	高度非对称升温	1.98 ± 0.07 a	0.62 ± 0.03 a	1.30 ± 0.07 a	31.14 ± 1.22 a	65.63 ± 1.07 a
	极端非对称升温	1.95 ± 0.08 a	0.60 ± 0.02 a	1.29 ± 0.07 a	30.77 ± 1.21 a	66.13 ± 1.08 a
15~30	不升温	1.52 ± 0.03 a	0.40 ± 0.01 a	1.10 ± 0.02 a	26.56 ± 0.88 a	72.31 ± 1.23 a
	对称升温	1.56 ± 0.03 a	0.44 ± 0.02 a	1.10 ± 0.03 a	28.13 ± 0.92 a	70.59 ± 1.18 a
	低度非对称升温	1.55 ± 0.04 a	0.43 ± 0.02 a	1.09 ± 0.02 a	27.79 ± 0.74 a	70.40 ± 1.06 a
	中度非对称升温	1.54 ± 0.03 a	0.43 ± 0.01 a	1.07 ± 0.02 a	27.84 ± 0.74 a	69.61 ± 1.14 a
	高度非对称升温	1.53 ± 0.02 a	0.42 ± 0.01 a	1.08 ± 0.02 a	27.54 ± 0.66 a	70.52 ± 0.98 a
	极端非对称升温	1.54 ± 0.03 a	0.42 ± 0.01 a	1.08 ± 0.02 a	27.32 ± 0.58 a	70.17 ± 1.20 a

升温样地表层轻组碳密度比对照高7.1%~12.5%,但差异不显著,表层重组碳密度与对照相当(表3)。亚表层两组分碳密度也呈现类似规律,变幅小于表层。5个升温处理表层轻组碳分配比例平均值为31.18%,稍高于对照(28.86%),其差异不显著。升温处理中表层重组碳分配比例为65.66%~66.33%,略低于对照(68.54%)。升温处理间表层土壤两组分碳密度和碳分配比例变化趋势不明显。随土层的加深,两组分碳密度、轻组碳分配比例均明显降低,重组碳分配比例增加。

2.3 升温对土壤顽固性碳密度的影响

不同升温情景下土壤顽固性碳密度和顽固性碳指数见表4。升温处理表层土壤轻组顽固性碳密度平均值为0.39 kg·m⁻²,比对照(0.33 kg·m⁻²)高18.18%。升温处理之间,中度、高度和极端非对称升温处理表层轻组顽固性碳密度显著低于对称升温处理。而升温对表层重组顽固性碳密度的影响不显著,其变幅为0.72~0.78 kg·m⁻²,与对照相当

(0.74 kg·m⁻²)。升温处理表层土壤总顽固性碳密度比对照高7.48%,其中对称升温 and 低度非对称升温处理总顽固性碳密度显著高于对照。升温处理中亚表层两物理组分顽固性碳密度以及总顽固性碳密度与对照差异均不显著,且升温处理间差异也不显著。

升温对喀斯特表层土壤轻组顽固性碳指数(I_{RC} 值)的影响明显(表4),其中对称升温 and 低度非对称升温处理中轻组 I_{RC} 值显著高于对照,是后者的1.1~1.2倍。升温处理之间表层重组 I_{RC} 值(55.87~58.38)略高于对照(55.67),其差异不显著。升温处理表层土壤总顽固性碳比例比对照高0.4%~8.9%,其中对称升温 and 低度非对称升温处理总顽固性碳比例显著高于对照。亚表层土壤有机碳总顽固性、两物理组分碳顽固性对升温的响应与表层类似,但敏感性降低。此外,随土层深度的增加,两物理组分 I_{RC} 值和总顽固性碳比例均有不同程度的下降,尤其是轻组 I_{RC} 值。

表 4 不同升温情景下土壤物理组分中顽固性碳密度和顽固性碳指数

Table 4 Recalcitrant C density and C index in density fractions under different warming scenarios

土层 /cm	处理	轻组顽固性碳密度 /kg·m ⁻²	重组顽固性碳密度 /kg·m ⁻²	总顽固性碳密度 /kg·m ⁻²	轻组顽固性碳指数	重组顽固性碳指数	总顽固性碳比例/%
0~15	不升温	0.33 ± 0.01 d	0.74 ± 0.03 a	1.07 ± 0.03 c	58.98 ± 1.38 b	55.67 ± 1.69 a	55.15 ± 1.15 b
	对称升温	0.43 ± 0.02 a	0.78 ± 0.03 a	1.21 ± 0.05 a	68.80 ± 2.70 a	58.26 ± 2.51 a	60.08 ± 1.70 a
	低度非对称升温	0.42 ± 0.02 ab	0.77 ± 0.03 a	1.19 ± 0.04 ab	67.22 ± 0.96 a	58.38 ± 2.73 a	59.38 ± 1.75 a
	中度非对称升温	0.38 ± 0.02 bc	0.75 ± 0.03 a	1.13 ± 0.04 abc	61.82 ± 0.62 b	57.72 ± 1.28 a	57.53 ± 1.29 ab
	高度非对称升温	0.37 ± 0.02 cd	0.74 ± 0.03 a	1.11 ± 0.04 abc	59.98 ± 1.45 b	56.99 ± 2.99 a	56.07 ± 1.34 ab
	极端非对称升温	0.36 ± 0.02 cd	0.72 ± 0.03 a	1.08 ± 0.04 bc	59.97 ± 1.74 b	55.87 ± 2.06 a	55.39 ± 1.14 b
15~30	不升温	0.20 ± 0.01 a	0.55 ± 0.02 a	0.75 ± 0.03 a	50.23 ± 1.67 a	50.21 ± 2.22 a	49.45 ± 1.25 a
	对称升温	0.23 ± 0.01 a	0.58 ± 0.02 a	0.81 ± 0.03 a	52.22 ± 1.88 a	52.67 ± 2.08 a	51.66 ± 1.43 a
	低度非对称升温	0.23 ± 0.01 a	0.57 ± 0.02 a	0.80 ± 0.03 a	53.35 ± 1.94 a	52.34 ± 1.75 a	51.58 ± 1.07 a
	中度非对称升温	0.23 ± 0.01 a	0.56 ± 0.02 a	0.79 ± 0.02 a	53.47 ± 2.23 a	52.35 ± 1.89 a	51.30 ± 1.24 a
	高度非对称升温	0.22 ± 0.01 a	0.56 ± 0.02 a	0.78 ± 0.03 a	52.38 ± 1.38 a	51.89 ± 1.23 a	50.98 ± 1.37 a
	极端非对称升温	0.22 ± 0.01 a	0.56 ± 0.02 a	0.78 ± 0.02 a	52.39 ± 1.10 a	51.86 ± 1.55 a	50.62 ± 1.16 a

3 讨论

3.1 升温对喀斯特土壤有机碳密度的影响

土壤有机碳密度取决于碳输入量与输出量之间的动态平衡。就石漠化生态系统(非农地)而言,有机碳输入主要来源于植物凋落物、根系及其分泌物,以及土壤径流;输出主要通过土壤有机碳矿化或异养呼吸(释放 CO₂、CH₄ 等)和土壤径流。土壤有机碳矿化或异养呼吸又受到土壤理化性质和环境因子的控制,其中土壤温度和含水量是关键环境因子^[4, 6, 7, 19~21]。本研究中不同升温情景下土壤有机碳密度稍高于对照,差异不显著(表 3),表明短期升温对石漠化(非农地)土壤有机碳密度的影响有限。一方面升温显著提高了土壤 CO₂ 释放量(图 1),平均提高幅度为 17.69%,表明升温促进了有机碳矿化和土壤呼吸^[4~7],这必然消耗更多的土壤碳;另一方面升温加速了地表凋落物的分解转化,分解速度平均提高了 26.7%(表 2),这有效补充了土壤有机碳。而且升温样地中植被平均地上生物量比对照高 10.89%,有理由推断升温增加了样地 NPP(生态系统净第一性生产力),进而增加了 NPP 通过根系输入土壤的有机碳数量^[19],这在一定程度上补充了升温导致的有机碳消耗。本研究中升温对可溶性有机碳含量的影响不显著(表 1),暗示土壤潜流对土壤有机碳密度的收支可能有限。

尽管短期升温并不能显著影响土壤有机碳密度,但明显提高了凋落物分解速率(有机碳输入)和土壤呼吸(有机碳输出),表明升温加速了土壤有机碳的周转。Trumbore 等^[7]用¹⁴C 示踪法对内华达山脉不同海拔土壤有机碳周转特征进行研究,发现土

壤碳周转期随海拔的升高而增加,或随温度的降低而增加,即升高温度提高了土壤碳的周转速率。

3.2 升温对喀斯特土壤有机碳物理保护能力的影响

土壤有机质与土壤颗粒(尤其是黏粒和粉粒)形成复合体,或被包裹在团聚体内,在有机碳和分解者之间形成了物理屏障(物理保护),即重组有机碳,其分解速度较慢,在土壤中相对稳定,是土壤有机碳稳定的重要途径,是土壤碳固定和碳汇的核心和关键^[3, 9]。而轻组碳主要为游离腐殖酸、植物残体及其分解产物和根系分泌物,缺乏物理保护,周转时间短,能反映人为活动或自然变化所引起的土壤微小变化^[9, 14, 22, 23]。通常,不同生态系统或土地利用方式下轻组比例和土壤物理保护碳的能力各异。耕作土壤轻组碳分配比例通常不超过 20%,低于森林和草原^[14, 23, 24]。在同等立地条件下,未经扰动土壤其重组碳分配比例高于扰动土壤,退化土壤高于未退化土壤^[18, 23~26]。本研究中升温对两组分碳密度及其分配比例的影响均不显著,表明短期升温并未明显改变石漠化(非农地)土壤有机碳的物理保护能力。这可能是由于:①升高温度在一定程度上提高了微生物数量(表 1)和微生物利用有机碳的能力,促进有机碳的矿化,尤其是未受物理保护的组分^[22, 27]。②升高温度可能会破坏土壤团聚体,尤其是频繁降雨及其干湿交替条件下,导致重组碳和分解者之间的物理屏障被破坏,成为游离有机碳(即轻组碳),或被土壤微生物分解矿化^[21, 26]。③升高温度加速了地表凋落物的分解,一方面“新鲜”有机质优先进入轻组^[25, 28, 29],补充了轻组组分;另一方面研究样地土壤黏粒和粉粒含量较高(黏粒和粉粒

含量分别为 30.45% 和 14.96%), 有利于与“新鲜”有机质形成复合体, 即重组组分^[3, 9].

3.3 升温对喀斯特土壤有机碳顽固性的影响

Tang 等^[25]对干热河谷燥红土有机碳稳定性进行长期(20a)研究, 发现不同造林树种或生态恢复模式下, 轻组碳顽固性显著高于重组. 因此, 其作者认为轻组和重组碳在分解矿化上的差异并非是由于其生化顽固性存在差异, 而是由于轻组缺少物理保护使微生物更容易侵入, 重组有机碳受到土壤物理保护导致微生物较难接触. 由于外部输入的有机物本身化学性质顽固, 或在土壤微生物(或酶)作用下形成生化性质稳定的有机质, 导致该部分土壤有机碳难以被土壤微生物利用和分解, 即生化顽固, 是土壤有机碳稳定的主要途径^[9, 30]. Rovira 等^[15]的酸水解法分离测定的顽固性碳是生化性质稳定的有机碳, 顽固性碳指数常用来评价土壤或物理组分中有机碳的顽固性, 顽固性碳指数小表明有机碳顽固性低^[18, 25, 28, 30, 31]. 本研究持续升温第 4 年, 升温样地表层土壤轻组顽固性碳密度、总顽固性碳密度、总顽固性碳比例明显高于对照, 而且各处理土壤轻组碳顽固性均明显高于重组(表 4), 表明短期升温在一定程度上能提高石漠化(非农地)表层土壤有机碳顽固性, 尤其是非保护组分. 其原因可能是由于: ①轻组中顽固性碳生化性质相对稳定, 较活性碳(非顽固性碳)难被分解, 升温加速了土壤活性碳的矿化, 导致组分中顽固性碳相对积累^[5, 18, 25]. ②升温促进凋落物中易分解组分的转化, 导致进入土壤中的外源有机物本身化学性质顽固^[29]. ③在土壤高钙(全钙含量为 $24.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和升温背景下, 新鲜的凋落物分解或半分解产物易与钙离子发生化学反应, 形成化学性质顽固、逐步分解的有机连续体, 实现土壤有机碳的化学稳定^[30, 32].

升温对亚表层土壤有机碳密度、轻组和重组碳密度及其顽固性的影响均不显著(表 3 和表 4). 温度和含水量是影响土壤有机碳数量和质量的关键^[4, 6, 7, 19~21]. 由于土壤导热率较低, 本研究中 5 个升温处理亚表层土壤温度仅升高了 $1.8 \sim 1.9^\circ\text{C}$, 明显低于表层土壤($2.3 \sim 2.5^\circ\text{C}$)和地表气温(2.0°C)的平均升高幅度(表 1), 而且不同季节各处理间亚表层土壤温度变幅也小于表层. 这不仅降低了土壤有机碳分解矿化的增温效应, 也可能降低了土壤蒸发的增温效应, 导致各处理间亚表层土壤含水量差异明显低于表层(表 1), 这削弱了增温对亚表层土壤有机碳的影响. 另一方面在未经人为扰动下, 地

表凋落物分解可能主要补充了表层土壤有机碳^[27]. 基于此, 可以推断在升温 2.0°C 的情景下, 从短期看(4 a)全球变暖主要影响表层(如 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层)土壤有机碳顽固性, 对深层土壤有机碳的影响可能有限. 这与他人的研究结果类似^[6, 27].

3.4 全球变暖对高原喀斯特土壤有机碳稳定性的影响

SOC 稳定主要通过化学稳定、物理保护和生化顽固这 3 种方式实现. 其中, 物理保护和生化顽固是 SOC 稳定的主要途径^[9]. 重组碳分配比例和顽固性碳指数能较好地反映土壤有机碳的物理保护能力和生化顽固性^[18, 23~26, 31]. 研究区 1961~2016 年间冬春/夏秋季升温比为 3.1 [冬春季为 $0.44^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 夏秋季为 $0.14^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$], 而全球尺度上冬春/夏秋季升温比在 3 左右^[1, 2]. 本研究对称升温、低度非对称升温、中度非对称升温、高度非对称升温和极端非对称升温处理中冬春/夏秋季升温比分别为 1.0、1.7、3.0、7.0 和夏秋季不升温(无穷大), 即中度非对称升温情景与本区和全球气候变暖的非对称性接近, 可表征该地区季节性升温特征. 表 3 和表 4 显示中度非对称升温处理土壤有机碳密度、两物理组分中碳密度、重组顽固性碳密度及其顽固性碳指数与对称升温处理差异不显著, 但表层土壤轻组顽固性碳密度及其顽固性碳指数显著低于对称升温. 这表明基于短期对称升温并不一定会高估或低估全球变暖对土壤有机碳密度和土壤碳物理保护能力的影响, 但可能会高估全球变暖对石漠化(非农地)表层土壤非保护组分有机碳的顽固性, 进而影响未来全球变化情况下土壤碳源/汇演变趋势的判断. 由于升温是一个长期过程, 土壤轻组碳顽固性提高将有利于土壤有机碳的积累^[9, 28, 30, 31]. 夏秋季土壤温度和含水量有利于有机碳矿化和凋落物分解, 如前文所述在升温背景下这有利于表层土壤轻组顽固性碳的积累; 而在冬春季持续干旱情况下, 温度并不一定是有机碳矿化和凋落物分解的主控因子, 此时升温对土壤轻组顽固性碳积累的贡献可能有限. 在年均温增幅相同的情况下(本研究升温处理中年平均升温幅度均为 2°C), 非对称升温处理夏秋季升温幅度小于对称升温, 因而非对称升温情景下土壤轻组碳顽固性也低于对称升温.

需要说明的是, 本研究为升温初期(4 a)土壤碳密度及其稳定性变化特征, 相关结论还需在更大范围、更长升温期、更多土壤/植被类型的喀斯特地

区验证.

4 结论

(1)持续升温第4年,不同升温情景下石漠化(非农地)表层土壤有机碳密度、轻组和重组碳密度、重组顽固性碳密度差异不显著,且与对照(不升温)差异不显著;升温处理中表层土壤轻组顽固性碳平均密度比对照高18.18%,其中对称升温处理轻组顽固性碳密度显著高于中度、高度和极端非对称升温.而亚表层土壤及其物理和生化组分中有机碳密度对升温的响应均不显著.

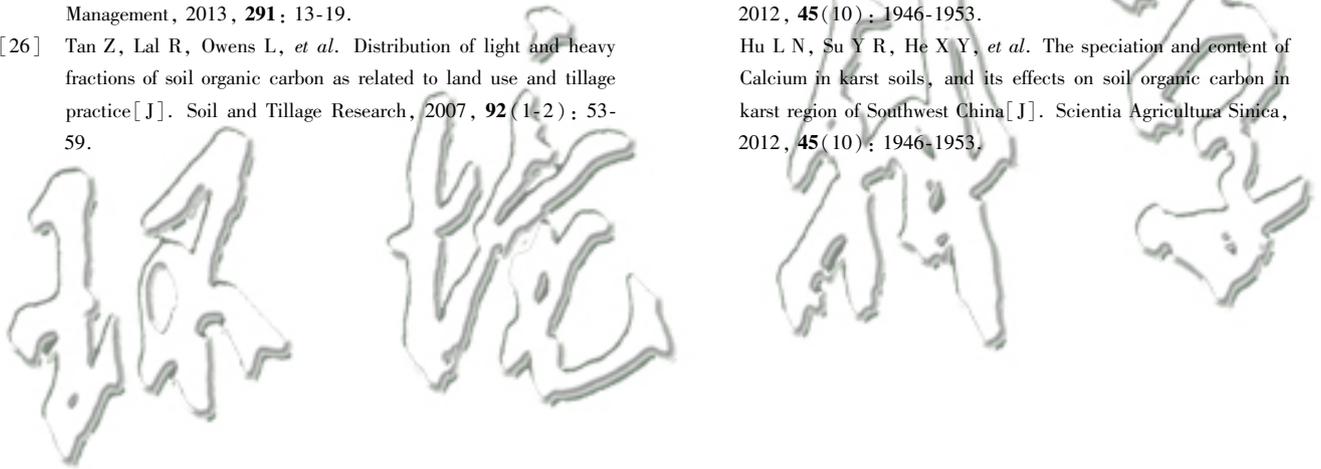
(2)在年平均升温2.0℃的情景下,短期升温并不能显著影响土壤有机碳密度和土壤碳物理保护能力,但能明显提高表层土壤轻组碳顽固性.而升温对15 cm以下土层有机碳的影响可能有限.

(3)基于短期对称升温并不一定会误估全球变暖对土壤有机碳密度和土壤碳物理保护能力的影响,但可能会高估全球变暖对石漠化(非农地)表层土壤非保护组分有机碳顽固性的影响.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Easterling D R, Horton B, Jones P D, *et al.* Maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. *Science*, 1997, **277**(5324): 364-367.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [4] 苏宏新,李广起.模拟蒙古栎林生态系统碳收支对非对称性升温的响应[J].*科学通报*, 2012, **57**(17): 1544-1552.
Su H X, Li G Q. Simulating the response of the *Quercus mongolica* forest ecosystem carbon budget to asymmetric warming [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(17): 1544-1552.
- [5] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 622-625.
- [6] Leirós M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S, *et al.* Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(3): 327-335.
- [7] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change[J]. *Science*, 1996, **272**(5260): 393-396.
- [8] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [9] 潘根兴,周萍,李恋卿,等.固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J].*土壤学报*, 2007, **44**(2): 327-337.
Pan G X, Zhou P, Li L Q, *et al.* Core issues and research progresses of soil science of C sequestration [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(2): 327-337.
- [10] 郑建萌,任菊章,张万诚.云南近百年来温度雨量的变化特征分析[J].*灾害学*, 2010, **25**(3): 24-31.
Zheng J M, Ren J Z, Zhang W C. Analysis on variation characteristics of temperature and rainfall in Yunnan in the last 100 years [J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, **25**(3): 24-31.
- [11] Li Z X, He Y Q, Theakstone W H, *et al.* Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961-2008 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, **22**(3): 416-430.
- [12] 陈智,尹华军,卫云燕,等.夜间增温和施氮对川西亚高山针叶林土壤有效氮和微生物特性的短期影响[J].*植物生态学报*, 2010, **34**(11): 1254-1264.
Chen Z, Yin H J, Wei Y Y, *et al.* Short-term effects of night warming and nitrogen addition on soil available nitrogen and microbial properties in subalpine coniferous forest, Western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(11): 1254-1264.
- [13] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, *et al.* Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂ [J]. *Science*, 2014, **298**(5600): 1987-1990.
- [14] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(6): 1799-1806.
- [15] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach [J]. *Geoderma*, 2002, **107**(1-2): 109-141.
- [16] 唐国勇,李昆,孙永玉,等.干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J].*环境科学*, 2010, **31**(5): 1365-1371.
Tang G Y, Li K, Sun Y Y, *et al.* Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(5): 1365-1371.
- [17] 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.
- [18] 唐国勇,李昆,孙永玉,等.干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性[J].*环境科学*, 2012, **33**(2): 551-557.
Tang G Y, Li K, Sun Y Y, *et al.* Characteristics of carbon sequestration and apparent stability of new sequestered carbon in forested torrid red soil at dry-hot valley [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 551-557.
- [19] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, **94**(16): 8284-8291.
- [20] 唐国勇,童成立,苏以荣,等.含水量对¹⁴C标记秸秆和土壤原有有机碳矿化的影响[J].*中国农业科学*, 2006, **39**(3): 538-543.
Tang G Y, Tong C L, Su Y R, *et al.* Effects of soil moisture content on the mineralization of added ¹⁴C-labelled straw and

- native soil organic carbon in upland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, **39**(3): 538-543.
- [21] Inglima I, Alberti G, Bertolini T, *et al.* Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO₂ efflux[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(5): 1289-1301.
- [22] Wick B, Tiessen H. Organic matter turnover in light fraction and whole soil under Silvopastoral land use in semiarid Northeast Brazil[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2008, **61**(3): 275-283.
- [23] Wang W Y, Wang Q J, Lu Z Y. Soil organic carbon and nitrogen content of density fractions and effect of meadow degradation to soil carbon and nitrogen of fractions in alpine *Kobresia* meadow [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(5): 660-668.
- [24] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[A]. In: Stewart B A (Eds.). *Advances in Soil Science*[M]. New York: Springer, 1992.
- [25] Tang G Y, Li K. Tree species controls on soil carbon sequestration and carbon stability following 20 years of afforestation in a valley-type savanna[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **291**: 13-19.
- [26] Tan Z, Lal R, Owens L, *et al.* Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **92**(1-2): 53-59.
- [27] Coûteaux M M, Bottner P, Anderson J M, *et al.* Decomposition of ¹³C-labelled standard plant material in a latitudinal transect of European coniferous forests: Differential impact of climate on the decomposition of soil organic matter compartments [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **54**(2): 147-170.
- [28] Marin-Spiotta E, Silver W L, Swanston C W, *et al.* Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(6): 1584-1597.
- [29] 宋飘, 张乃莉, 马克平, 等. 全球气候变暖对凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(6): 1327-1339.
Song P, Zhang N L, Ma K P, *et al.* Impacts of global warming on litter decomposition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(6): 1327-1339.
- [30] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, **528**(7580): 60-68.
- [31] Wang G, Wang C Y, Wang W Y, *et al.* Capacity of soil to protect organic carbon and biochemical characteristics of density fractions in Ziwulin Haplic Greyxems soil[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(1): 27-32.
- [32] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳, 等. 西南喀斯特石灰土中钙的形态与含量及其对土壤有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(10): 1946-1953.
Hu L N, Su Y R, He X Y, *et al.* The speciation and content of Calcium in karst soils, and its effects on soil organic carbon in karst region of Southwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(10): 1946-1953.



CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City .....	..... HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qí, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai .....	..... YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor .....	..... FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion .....	..... SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	..... ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil .....	..... ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin .....	..... ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin .....	..... AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland .....	..... HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues .....	..... QIANG Hong, LI Yu-yu, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure .....	..... PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)