

百方知库
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.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季 PM_{2.5} 化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O₃ 分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘 PM_{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敏(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响

徐学池^{1,2,3}, 黄媛⁴, 何寻阳¹, 王桂红⁵, 苏以荣^{1*}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 环江 547100; 4. 广西药用植物园, 南宁 530000; 5. 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了探明环境因子对喀斯特土壤碳酸盐转化的影响, 从而为深入理解土壤生态过程及碳循环提供理论依据. 以典型喀斯特地区棕色石灰土和地带性红壤(对照)为研究对象, 采用添加¹⁴C-CaCO₃室内培养100 d的方法, 研究3种温度(15、25、35℃)和水分(30%、65%和100% WHC)条件下土壤无机碳释放特征. 结果表明, 不同水分和温度条件下, 棕色石灰土无机碳释放速率最大值和100d累积最大释放量为0.7~16.8 mg·(kg·d)⁻¹和5.9~29.4 mg·kg⁻¹, 红壤为39.7~103.3 mg·(kg·d)⁻¹和83.3~135.1 mg·kg⁻¹; 干旱条件下(30% WHC)两种土壤无机碳累积释放量最大, 随温度升高而增加, 而且在65% WHC和100% WHC条件下, 升温仍促进土壤无机碳释放; 棕色石灰土无机碳释放的温度敏感性大于红壤, 受土壤水分影响显著. 添加碳酸钙后土壤pH和MBC含量均显著增加, 两种土壤差异显著. 方差分解结果表明, 温度可解释无机碳释放7.6%的变异, 水分解释变异的2.0%. 因此在全球气候变化和极端降水事件增加的背景下, 研究西南喀斯特土壤碳循环及其动态变化规律时, 应充分考虑土壤水分和温度对土壤无机碳释放的影响.

关键词: 棕色石灰土; 温度; 水分; ¹⁴C-碳酸钙

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1965-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807213

Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China

XU Xue-chi^{1,2,3}, HUANG Yuan⁴, HE Xun-yang¹, WANG Gui-hong⁵, SU Yi-rong^{1*}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China; 4. Guangxi Botanical Garden of Medicinal Plants, Nanning 530000, China; 5. College of Agricultural, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to understand the influence of environmental factors on the carbonate conversion of the Karst soil, typical brown limestone and red soil samples were collected from the Karst ecosystem, and a 100-day incubation experiment was conducted. The characteristics of inorganic carbon release from the soil under three temperature gradients (15, 25, and 35°C) and water contents (30%, 65%, and 100% WHC) were studied by adding ¹⁴C-CaCO₃ for 100 d. The results showed that under the different soil moisture and temperature conditions, the maximum rate and the cumulative amount of inorganic carbon release from the soil over 100 days varied between 0.7-16.8 mg·(kg·d)⁻¹ and 5.9-29.4 mg·kg⁻¹, respectively, in the brown limestone soil, and varied between 39.7-103.3 mg·(kg·d)⁻¹ and 83.3-135.1 mg·kg⁻¹, respectively in the red soil. Under drought conditions (30% WHC), the cumulative amount of inorganic carbon release was the highest for the two soils and increased with increasing temperature. At 65% WHC and 100% WHC, increasing temperature can still promote inorganic carbon release from the soil. The temperature sensitivity of the soil inorganic carbon release in the brown limestone soil is greater than that of the red soil, which is significantly affected by soil moisture. The soil pH and MBC content were remarkably increased after adding CaCO₃, and the difference between the two soils was significant. The variance partition showed that temperature and soil moisture can explain 7.6% and 2.0% of the soil inorganic carbon release variability, respectively. In conclusion, warming and drought aggravate inorganic carbon release from brown limestone soil in the southwestern Karst region. Therefore, in the context of global warming and more frequent extreme precipitation events, the effects of soil moisture and temperature on inorganic carbon conversion in soil should be fully considered when studying the soil carbon cycle and its dynamic changes in southwestern Karst. This research can provide a scientific basis for further understanding the influence of climate change on the global carbon cycle.

Key words: brown limestone soil; temperature; soil moisture; ¹⁴C-labeled calcium carbonate

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502404); 国家自然科学基金项目(41471199); 中国科学院西部之光人才培养计划“西部青年学者”项目(Y62305040)

作者简介: 徐学池(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态与农业环境, E-mail: xuxuechi16@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yrsu@isa.ac.cn

土壤碳库是陆地生态系统中最大碳库^[1], 全球土壤有机碳储量约 1 500 ~ 2 000 Pg, 土壤无机碳储量约为 700 ~ 1 000 Pg, 约占总碳库的 38%^[2], 由于土壤有机碳较为活跃, 受人类影响较大, 而无机碳周转周期长^[3], 因此近阶段土壤无机碳相关研究比较薄弱, 但其积累速率高于有机碳, 可以生成稳定性强的碳酸盐^[4], 所以它在全球碳循环中的重要地位不容忽视. 国内外学者对土壤无机碳转化的研究主要针对干旱或半干旱地区的石灰性土壤, 应用的技术包括定位监测、同位素组成等^[5,6]. 有研究表明干旱地区土壤无机碳稳定, 其中溶解性无机碳活跃, 占比达 20%, 最新研究表明它源于土壤呼吸或土壤空气, 而不是溶解的碳酸盐^[5], 促进了对土壤碳循环的理解. 土壤无机碳转化主要与人为因素、环境因素密切相关^[5,7-9], 其中人为活动如灌溉增加干旱土壤无机碳含量^[5]、过量施肥加剧西北石灰性土壤无机碳释放等^[7]; 环境条件如土壤水分和温度对土壤无机碳释放具有重要影响^[8,9], 土壤呼吸等产生的 CO₂ 与土壤水作用形成碳酸, 后与 Ca²⁺ 等结合形成碳酸盐, 在这一过程中, 土壤水分状况变化会使土壤有机碳和无机碳发生溶解的逆过程, 从而影响土壤 CO₂ 释放^[8]. 王忠媛等^[9]的研究发现干旱区土壤无机碳释放 CO₂ 主要受温度调控, 呈线性关系, 高温显著促进无机碳释放 CO₂, 因此在全球气候变化和极端降水事件增加的背景下, 分析土壤水分和温度对土壤无机碳释放的影响具有重要意义.

我国西南喀斯特地区面积约为 55 万 km²^[10], 由于碳酸盐岩的可溶性导致成土条件差且成土速率

十分缓慢^[11], 土壤浅薄、贫瘠且分布不连续, 基岩裸露面积大^[12], 而且该地区生境脆弱, 对气候变化敏感^[11], Liu 等^[13]在 2014 年基于模型预测发现西南地区年降雨量和降雨次数逐渐下降, 造成干旱强度普遍逐年升高, 而且极端降水事件增多, 其渗漏和潜蚀作用造成该地区碳酸盐集聚层变浅、土壤无机碳库流失巨大^[12]. 目前土壤水分变异对土壤无机碳释放的影响暂不明确, 因此本试验以西南典型喀斯特土壤棕色石灰土和地带性红壤为研究对象, 采用定量添加外源¹⁴C-CaCO₃ 进行室内培养试验的方法, 设置不同土壤水分和温度条件, 研究土壤水分和温度对喀斯特土壤外源碳酸钙释放的关系, 以此明确环境因子对喀斯特土壤无机碳释放的影响, 以期全面认识土壤无机碳转化过程奠定基础, 并为全球气候变化背景下喀斯特土壤碳循环和固存提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤为棕色石灰土和红壤土(表 1), 分别发育于石灰岩和第四纪红土, 采自广西河池市环江毛南族自治县国家级自然保护区木论(地理坐标为 107°53' ~ 108°05'E, 25°06' ~ 25°12'N)和环境移民开发示范区肯福(地理坐标为 108°16'E, 24°31'N), 属于亚热带季风气候, 年平均气温为 19.9℃, 年均降雨量 1389.1 mm, 选择样地时保证其植被类型(均为多年生灌丛)、坡位、坡度和坡向等生境情况基本一致, 具体采样方式参见文献[14].

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 General properties of the studied soils

土壤类型	pH	饱和含水量 /%	有机碳 /g·kg ⁻¹	微生物量碳 /mg·kg ⁻¹	碳酸盐 /g·kg ⁻¹
棕色石灰土	6.73	56.07	19.93	229.97	12.60
红壤	4.21	51.43	16.03	120.18	3.08

1.2 试验设计

预培养: 将土壤样品湿度调节至约 30% 饱和持水量, 置于 25℃ 培养一周, 一部分用于无机碳释放培养试验, 一部分用于土壤培养试验.

培养试验处理设置 3 个温度条件: 15、25、35℃ (记为 T1、T2、T3); 3 个土壤水分条件: 30%、65%、100% 饱和持水量(记为 W1、W2、W3), 共 9 个处理, 各 3 个重复, 9 个无土空白对照.

取两种土壤各 3 份, 共 34.2 kg(以风干基计, 下同), 将¹⁴C-CaCO₃ 粉末(50 g·kg⁻¹, 干土)与土壤充分混匀, 调整含水量为 3 个不同土壤水分(W1、W2、W3), 然后取不同处理的 50 g 土壤装入 1 L 广

口瓶中, 并将装有 20 mL、1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的小广口瓶置入其中, 密封后于不同温度条件下(T1、T2、T3)进行培养试验, NaOH 溶液用来收集土壤释放的 CO₂, 于 1、5、10、15、20、30、40、60、80 和 100 d 更换 NaOH 溶液并测定指标; 再取以上不同土壤水分条件的土壤 900 g 装入 1 L 广口瓶中, 于不同温度条件下进行土壤培养试验, 于 1、5、10、15、20、30、60 和 100 d 取土壤并测定指标.

1.3 分析方法

土壤 pH 用蒸馏水浸提后 Metro-pH 320 计测定; 土壤含水量采用 105℃ 烘干法测定; 土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定; 土壤碳酸盐采用中和

滴定法测定^[15]; 土壤¹⁴C-CO₂ 释放量采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪 (TOC 仪) 测定试验装置中 NaOH 吸收液的 CO₂ 量, 再采用 Beckman LS-6500 型自动液体闪烁仪测定溶液的¹⁴C 放射性强度^[16]; 土壤微生物量碳 MBC 含量采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪 (TOC 仪) 测定已熏蒸处理土壤的 K₂SO₄ 浸提液中有机碳含量, 利用 Beckman LS-6500 型自动液体闪烁仪测定溶液的¹⁴C 放射性强度, 通过计算已熏蒸和未熏蒸土壤测定值之差得出土壤 MBC 和¹⁴C-MBC 含量^[17]

1.4 数据处理统计分析

$^{14}\text{C-CO}_2$ 累积释放量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (NaOH 吸收液¹⁴C 每分钟裂变量 - 本底值) \times 吸收液体积 / (土样干重 \times ¹⁴C-CaCO₃ 放射性强度)

$^{14}\text{C-CO}_2$ 释放速率 ($\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$) = 某段时间¹⁴C-CO₂ 累积释放量 / 该段时间长度

熏蒸或非熏蒸土壤浸提液中有机碳含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (TOC 仪测定值 - 空白值) \times (浸提液体积 + 土壤重量 \times 含水率) / 土壤干基计重量

熏蒸或非熏蒸土壤浸提液中¹⁴C 标记的有机碳含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (熏蒸土壤浸提液¹⁴C 每分钟裂变量 - 本底值) \times (熏蒸土壤浸提液体积 + 土样含水体积) / (土样干重 \times ¹⁴C-CaCO₃ 放射性强度)

MBC 含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (熏蒸土壤 - 非熏蒸土壤浸提液中有机碳含量) / k_{EC}

¹⁴C-MBC 含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (熏蒸土壤浸提液中¹⁴C 标记的有机碳含量 - 不熏蒸土壤浸提液中¹⁴C 标记的有机碳含量) / k_{EC}

式中, k_{EC} 为转化系数 0.45.

参照土壤有机碳矿化的温度敏感性定义^[18,19], 以环境温度每升高 10°C, 土壤无机碳释放 CO₂ 速率的增加倍数来表征土壤无机碳释放的温度敏感性, 其值可通过以下公式计算:

$$\text{温度敏感性 } Q_{10} = R(t, T + 10) / R(t, T)$$

式中, $R(t, T)$ 为 $T^\circ\text{C}$ 条件下 t 时刻土壤无机碳释放 CO₂ 速率, $R(t, T + 10)$ 为 $T + 10^\circ\text{C}$ 条件下 t 时刻土壤无机碳释放 CO₂ 速率.

数据采用 Excel 2003 软件进行整理, Origin Pro 8.5 软件进行绘制图表, 使用 SPSS 16.0 软件进行协方差分析, 使用 Duncan 法 ($P < 0.05$) 进行多重比较, 使用 Canoco 5.0 软件进行方差分解.

2 结果与分析

2.1 土壤水分和温度对土壤无机碳释放的影响

2.1.1 土壤水分和温度对土壤无机碳释放速率的影响

总体上, 培养期间各处理无机碳释放速率 ($^{14}\text{C-CO}_2$ 释放速率) 动态变化规律具有一致性 (图 1), 各处理均在培养 1 d 时达到高峰, 分别为 $0.7 \sim 16.8 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $39.7 \sim 103.3 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 之间, 此时棕色石灰土无机碳释放速率均显著小于红壤 ($P < 0.05$), 之后直线下降, 趋于缓和, 两种土壤各处理差异均不显著 ($P > 0.05$). 结果表明两种土壤无机碳释放速率高峰均在干旱条件下最大, 且随着温度升高而增大, 而在 W2 和 W3 情况下, 升温 (T2 和 T3) 仍促进无机碳释放, 两种土壤无机碳释放速率最大值为 $1.2 \sim 8.2 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 74.0

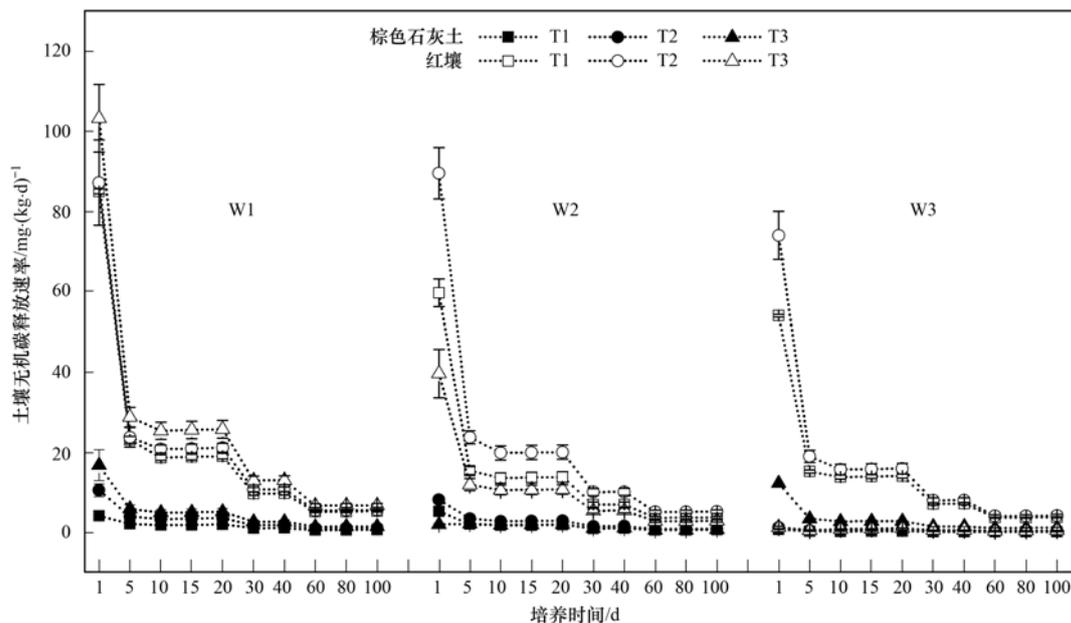


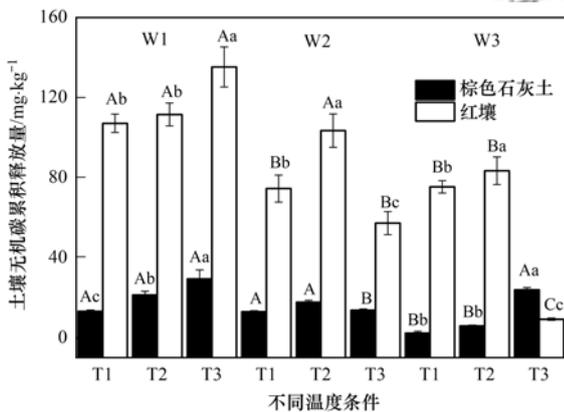
图 1 不同土壤水分和温度条件下土壤无机碳释放速率

Fig. 1 Rate of inorganic carbon release from the soil under different soil moisture and temperature conditions

~89.6 mg·(kg·d)⁻¹之间。

2.1.2 土壤水分和温度对土壤无机碳累积释放量的影响

培养结束后，棕色石灰土无机碳累积释放量 (¹⁴C-CO₂ 累积释放量) 为 5.9 ~ 29.4 mg·kg⁻¹ 之间 (图 2)，红壤一般为 83.3 ~ 135.1 mg·kg⁻¹ 之间，均在 W1 条件下无机碳累积释放量最大，此时温度越高，两种土壤无机碳累积释放量越高，分别约为 29.4 mg·kg⁻¹ 和 135.1 mg·kg⁻¹；而在 W2 和 W3 条件下，升温 (T2 和 T3) 仍能促进无机碳释放，分别为 5.9 ~ 17.8 mg·kg⁻¹ 和 83.3 ~ 103.4 mg·kg⁻¹ 之间，不过在水分饱和条件下，高温增加棕色石灰土无机碳释放 (24.0 mg·kg⁻¹)，且显著大于同等条件下的红壤 (9.3 mg·kg⁻¹)，*P* < 0.05。总体来说，在同一土壤水分或者温度下，棕色石灰土无机碳累积释放量显著小于红壤，因此，棕色石灰土无机碳稳定性高于红壤，即棕色石灰土更利于无机碳固定。



图中不同小写字母代表同一土壤水分、不同温度处理间的差异，不同大写字母代表不同土壤水分、同一温度间的差异，显著水平 *P* < 0.05

图 2 不同土壤水分和温度条件下土壤无机碳累积释放量

Fig. 2 Cumulative amounts of inorganic carbon released from the soil under different soil moisture and temperature conditions

2.1.3 土壤水分对无机碳释放的温度敏感性影响

在不同温度阶段，土壤水分对不同土壤无机碳释放的温度敏感性影响不同 (图 3)。W1 条件下，两种土壤各不同阶段温度敏感性差异并不显著 (*P* > 0.05)，均处于 1.04 ~ 1.88 之间；W2 条件下，两种土壤温度敏感性均为 T2 ~ T3 阶段的 *Q*₁₀ (分别为 1.71 ~ 4.32、1.46 ~ 1.51) 显著大于 T1 ~ T2 阶段的 *Q*₁₀ (分别为 0.23 ~ 0.45、0.45 ~ 0.55, *P* < 0.05)；W3 条件下，棕色石灰土温度敏感性普遍较高，分别为 1.63 ~ 2.84、4.06 ~ 8.86，而且均显著大于处于同一条件下的红壤，分别为 1.14 ~ 1.37、0.01 ~ 0.11。总体来说，土壤水分对两种土壤无机碳释放的温度敏感性影响显著，且在同一条件下，棕色石

灰土无机碳释放的温度敏感性显著大于红壤。

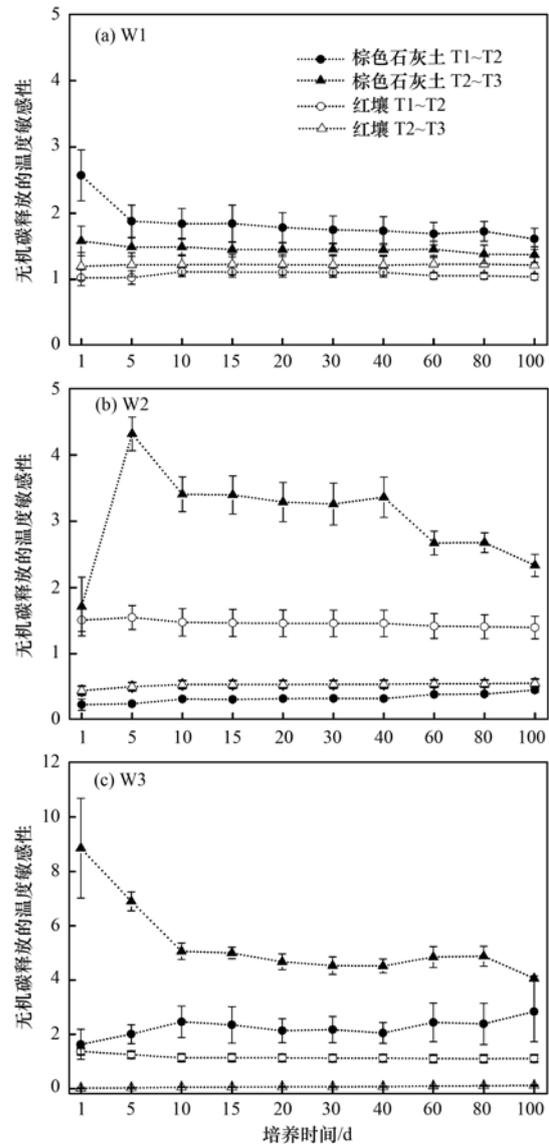


图 3 不同土壤水分条件下土壤无机碳释放的温度敏感性

Fig. 3 Temperature sensitivity of inorganic carbon release from the soil under the different soil moisture conditions

2.2 添加碳酸钙后土壤 pH 和微生物量的变化

添加碳酸钙后，两土壤 pH 均显著增大 (*P* < 0.05)，在 0 ~ 1 d，各处理土壤 pH 迅速增大 (图 4)；在 1 ~ 20 d，仍表现为缓慢增加；在 20 ~ 40 d，各处理均出现缓慢下降的趋势，最终棕色石灰土 pH 值增加并稳定在 8.7 左右，红壤 pH 值增加并稳定在 7.5 ~ 8.2 范围内。

培养初期 (1 ~ 20 d)，添加碳酸钙后各处理土壤 MBC 含量均显著增加，且红壤显著高于棕色石灰土 (*P* < 0.05)，分别为 31.6 ~ 640.4 mg·kg⁻¹ 和 2.8 ~ 225.5 mg·kg⁻¹ 之间，之后波动频繁至逐步稳定，两种土壤各处理差异均不显著 (*P* > 0.05)。另外，1 d 时各处理土壤 ¹⁴C-MBC 含量均较高，分别处于 14.3 ~ 40.1 mg·kg⁻¹ 和 8.0 ~ 78.9 mg·kg⁻¹ 之间，

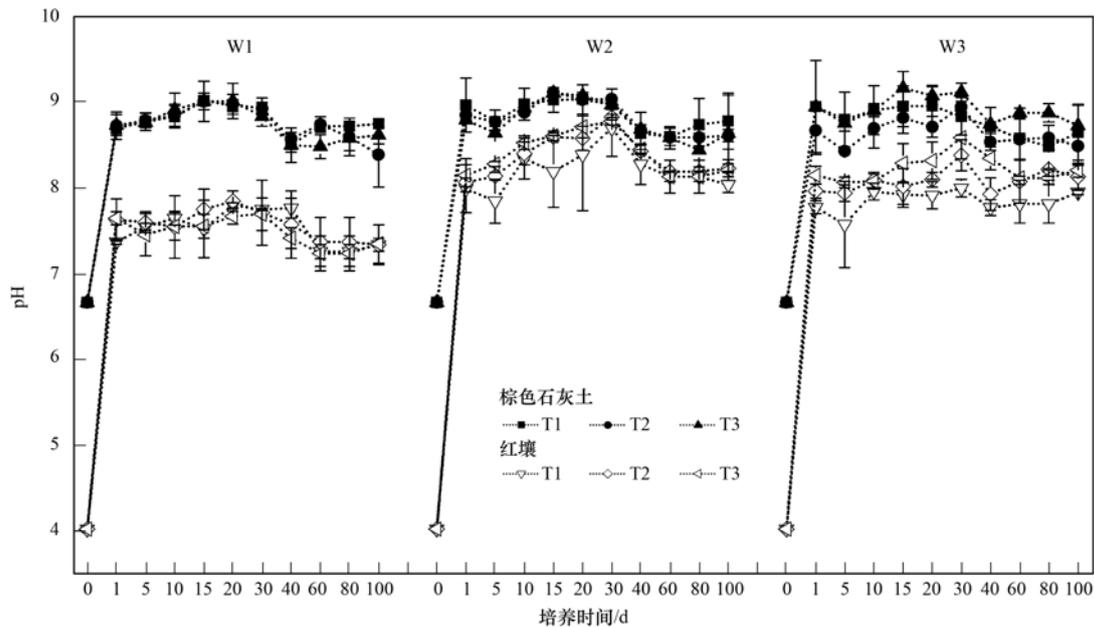


图4 土壤 pH 含量变化

Fig. 4 Variation of the soil pH

之后骤减, 继续波动逐步稳定(图5)。

2.3 土壤无机碳释放的影响因子分析

以土壤 pH 为协变量分析土壤类型、温度和水分

对无机碳释放的影响, 结果如表2所示, 土壤类型、温度和水分这3个影响因子对无机碳释放均影响显著, 其交互作用仍具有显著性影响($P < 0.05$)。

表2 土壤类型、温度和水分对无机碳释放的影响分析¹⁾

Table 2 Effects of soil type and temperature and moisture on soil inorganic carbon release

项目	土壤类型	温度	水分	土壤类型 × 温度	土壤类型 × 水分	温度 × 水分	土壤类型 × 温度 × 水分
<i>F</i>	93.67 ***	11.85 ***	13.74 ***	93.67 ***	374.64 ***	12.08 ***	265.31 ***
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

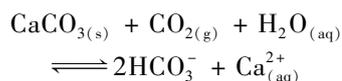
1) *** 表示在 0.00 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

使用方差分解方法, 分析影响因子对土壤无机碳释放变异的解释率, 结果如图6所示, 本研究中已知变量土壤类型、温度、水分和 pH 值、培养时间及其交互作用一共可解释无机碳释放的 78.1% 变异, 无法解释占 21.9%, 其中温度可解释无机碳释放 7.6% 的变异, 与其他已知变量的交互效应解释率为 3.6%, 水分解解释变异的 0.2%。

3 讨论

3.1 土壤水分对喀斯特土壤无机碳释放的影响

土壤无机碳释放 CO_2 由于土壤碳酸盐溶解作用, 属于非生物因素主导过程, 主要受环境条件影响^[5]。Wu 等^[20]的研究发现当外界或者土壤空气分压较高、pH 较低时, 碳酸钙溶解时可消耗 1 mol CO_2 , 当土壤水分含量较少、pH 值较高且存在足够 Ca^{2+} 时, 会发生促进碳酸钙形成的逆向反应, 其机制为:



该化学反应发生在 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ 三相系统中, 影响其平衡状态的因素主要包括碳酸盐含量、 CO_2 、 Ca^{2+} 浓度等反应基质以及土壤水分和温度。本研究方差分析表明土壤水分对棕色石灰土和红壤无机碳释放影响显著, 与 Deneff 等^[21]的研究发现土壤水分变化导致无机碳溶解和沉淀过程反复进行的结果一致, 而且本研究发现干旱条件下喀斯特棕色石灰土无机碳累积释放量最高。董燕婕等人认为 70% WHC 是影响石灰性壤土无机碳释放 CO_2 速率的阈值^[22], 低于此值时无机碳释放 CO_2 速率随着土壤水分增加而增加, 高于此值时随土壤水分增加而减少, 存在差异的原因可能是本试验中 $^{14}\text{C-CaCO}_3$ 易与土壤中 H^+ 发生溶蚀反应, 生成钙离子、水和 $^{14}\text{C-CO}_2$ ^[14], 这也可解释 pH 较低的红壤 $^{14}\text{C-CO}_2$ 累积释放量显著大于 pH 较高的棕色石灰土的情况。

本研究中培养前期土壤 MBC 含量升高, 与 Zornoza 等^[23]的研究结果一致, 原因可能是碳酸钙加入后导致 pH 升高, 致使部分微生物死亡, 从而

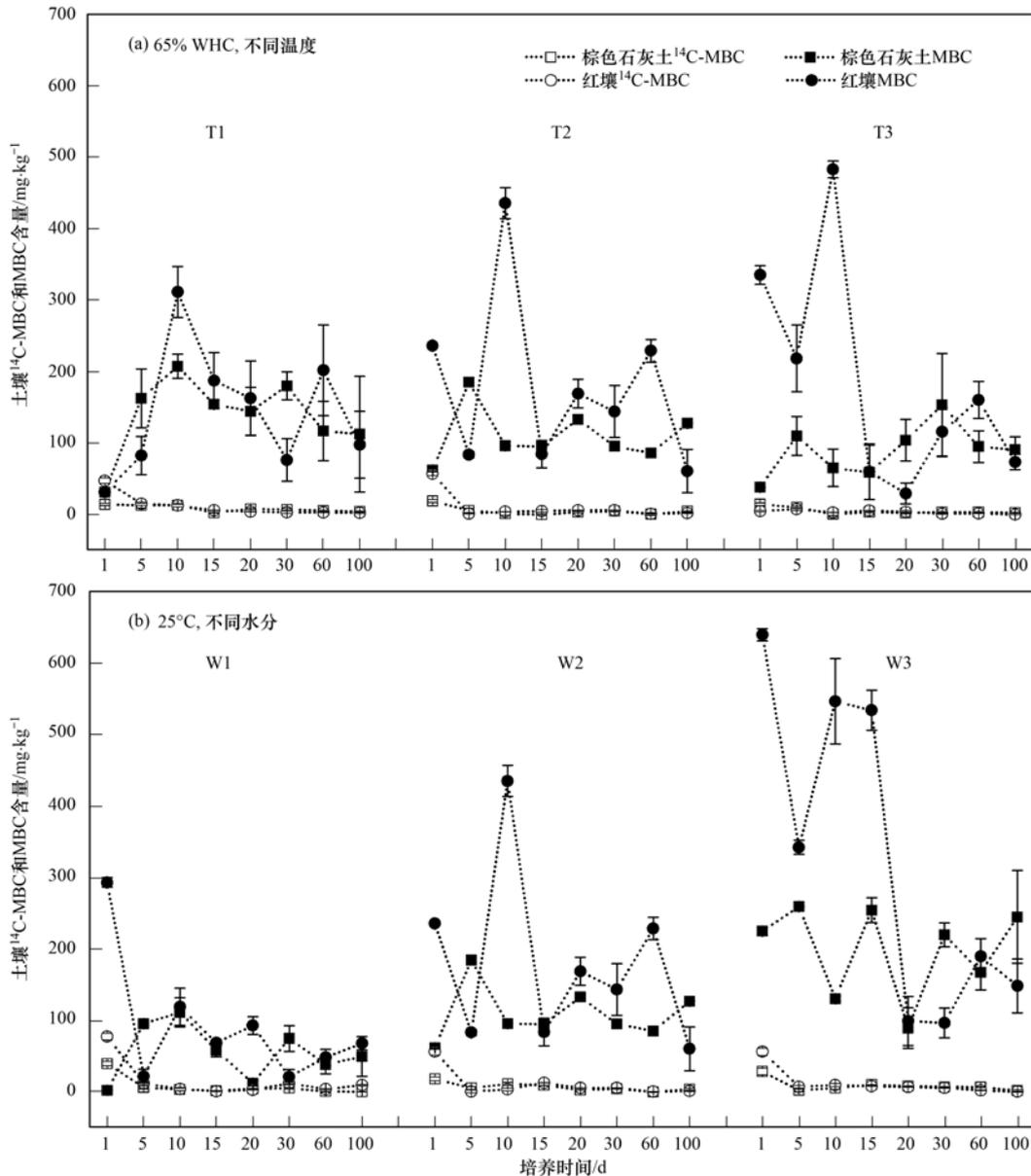


图5 在不同温度和水分条件下土壤 ^{14}C -MBC和MBC含量变化

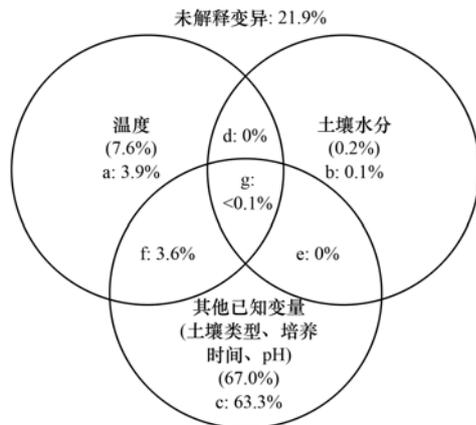
Fig. 5 Variation of soil ^{14}C -MBC and MBC content under different temperature and soil moisture conditions

为耐受型微生物提供营养和碳源,促进其生长繁殖^[24],它们可以通过吸收 HCO_3^- 、络合或螯合 Ca^{2+} 等形式影响无机碳释放^[25].此外,本研究表明干旱和升温加剧西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放,原因可能是升温条件下土壤水分运动加快、能量提高^[26],碳酸钙也具有更高能量易于发生溶解反应,从而释放 CO_2 ^[5],而且 CO_2 溶解度随温度升高而降低^[26],从而促进土壤无机碳释放. Raheb等^[27]的研究发现与半湿润和半干旱地区相比,干旱地区土壤无机碳占总碳储量比例更高,但更难存储无机碳.因此在全球气候变暖和西南喀斯特地区干旱强度升高的背景下,应多考虑土地管理等措施对土壤无机碳固持的作用,如Zhao等^[28]的研究证明施入草木灰可增加土壤pH、EC和MBC含量,从而减少

土壤无机碳释放 CO_2 .

3.2 温度对喀斯特土壤无机碳释放的影响

温度对土壤有机碳矿化影响研究甚多^[18,19],通常使用 Q_{10} 值表示不同类型的土壤有机碳矿化对温度变化的敏感性,数值越大表明土壤有机碳矿化对温度变化越敏感^[18].温度和水分能解释自然生态系统中 Q_{10} 值大部分变异^[18],如一般情况下温度升高时 Q_{10} 值下降,水分过高或者过低时 Q_{10} 值下降^[19].本研究通过计算温度每增加 10°C ,土壤无机碳释放 CO_2 速率增加的倍数反映它对温度变化的敏感性,结果表明在不同水分条件下,棕色石灰土无机碳释放 CO_2 对温度变化比红壤敏感,受土壤水分影响显著,主要原因可能是其理化性质差异,前者土壤有机质、钙离子、黏粒等含量均比后



a、b、c 分别表示影响因子剔除因子间交互作用后的解释率，
d、e、f、g 分别表示影响因子间交互作用的解释率

图 6 无机碳释放的方差分解结果

Fig. 6 Variance partition of inorganic carbon release from the soil

者高^[23]，棕色石灰土中胡敏酸与钙离子结合后稳定性更高，形成腐殖质，温度和土壤水分变化显著影响碳酸钙溶解产生钙离子的转化机制，而红壤腐殖质中胡敏酸并不倾向于与钙离子结合，而是与 R_2O_3 结合形成活性胡敏酸^[29]，因此红壤无机碳转化对温度敏感性较棕色石灰土弱。

本研究方差分析结果表明，温度对土壤无机碳释放 CO_2 影响显著，随温度升高而增加，王忠媛等^[9]关于盐碱土研究与本结果一致；而且刘加彬^[30]的研究发现在不同时间尺度上，碱性沙土无机碳释放 CO_2 对温度变化反应十分灵敏，温度直接影响土壤无机碳固定和释放，因此重视土壤无机碳释放 CO_2 过程及温度等影响因素的作用，将能更加准确评估全球变化背景下土壤碳循环及固定。

4 结论

土壤水分和温度对棕色石灰土和红壤无机碳释放影响显著，其无机碳释放速率和累积释放量随土壤水分增加而降低，随温度增加而升高。棕色石灰土无机碳释放对温度变化的反应比红壤更敏感，且土壤水分是其重要影响因素。由于特殊的成土背景，喀斯特地区棕色石灰土含有一定含量的碳酸盐，因此在全球气候变暖和西南喀斯特地区降雨分布不均匀的背景下，富含碳酸盐的棕色石灰土无机碳释放应该受到关注。

参考文献:

[1] Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Changes in ecosystem carbon pool and soil CO_2 flux following post-mine reclamation in dry tropical environment, India [J]. Science of the Total Environment, 2017, **583**: 153-162.
[2] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's ' Grain-for-Green' Program: a synthesis [J]. Global Change Biology, 2014, **20**

(11): 3544-3556.

[3] Basher L, Betts H, Lynn I, *et al.* A preliminary assessment of the impact of landslide, earthflow, and gully erosion on soil carbon stocks in New Zealand [J]. Geomorphology, 2018, **307**: 93-106.
[4] Hirmas D R, Amrhein C, Graham R C. Spatial and process-based modeling of soil inorganic carbon storage in an arid piedmont [J]. Geoderma, 2010, **154**(3-4): 486-494.
[5] Li Y, Wang Y G, Houghton R A, *et al.* Hidden carbon sink beneath desert [J]. Geophysical Research Letters, 2015, **42**(14): 5880-5887.
[6] 李杨梅, 贡璐, 安申群, 等. 基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 [J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3867-3875.
Li Y M, Gong L, An S Q, *et al.* Transfer of soil organic carbon to inorganic carbon in arid oasis based on stable carbon isotope technique [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3867-3875.
[7] 孟延, 蔡苗, 师倩云, 等. 氮肥用量对石灰性土壤二氧化碳释放的影响 [J]. 土壤通报, 2015, **46**(4): 948-954.
Meng Y, Chai M, Shi Q Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emission from calcareous soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **4**(6): 948-954.
[8] 张林. 荒漠草原土壤有机碳向土壤无机碳酸盐转移的定性及定量研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
Zhang L. Qualitative and quantitative research of soil organic carbon transfer to soil inorganic carbon in desert grassland [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
[9] 王忠媛, 谢江波, 王玉刚, 等. 温度对盐土和碱土土壤无机 CO_2 通量的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, **32**(10): 2525-2531.
Wang Z Y, Xie J B, Wang Y G, *et al.* Effects of temperature on inorganic CO_2 flux of saline soil and alkaline soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(10): 2525-2531.
[10] Yan J H, Li J M, Ye Q, *et al.* Concentrations and exports of solutes from surface runoff in Houzhai Karst Basin, southwest China [J]. Chemical Geology, 2012, **304-305**: 1-9.
[11] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征 [J]. 生态学报, 2011, **31**(21): 6353-6362.
Fan F D, Wang K L, Xiong Y, *et al.* Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(21): 6353-6362.
[12] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理 [J]. 植物生态学报, 2011, **35**(10): 991-999.
Guo K, Liu C C, Dong M. Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of Southwest China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, **35**(10): 991-999.
[13] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, *et al.* Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? [J]. Environmental Research Letters, 2014, **9**(6): 479-489.
[14] 黄媛. 桂西北典型土壤有机碳矿化对碳酸钙、水分及温度的响应 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2013.
Huang Y. The response of Northwest Guangxi typical soil organic carbon mineralization to calcium carbonate, water content and temperature [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2013.
[15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-108.
[16] Wu J, O'Donnell A G. Procedure for the simultaneous analysis of total and radioactive carbon in soil and plant materials [J]. Soil

- Biology and Biochemistry, 1997, **29**(2): 199-202.
- [17] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [18] Zhu B, Cheng W X. Rhizosphere priming effect increases the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition[J]. Global Change Biology, 2011, **17**(6): 2172-2183.
- [19] Allison S D, Wallenstein M D, Bradford M A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology [J]. Nature Geoscience, 2010, **3**(5): 336-340.
- [20] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, *et al.* Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, **129**(4): 413-421.
- [21] Deneff K, Stewart C E, Brenner J, *et al.* Does long-term center-pivot irrigation increase soil carbon stocks in semi-arid agroecosystems[J]. Geoderma, 2008, **145**(1-2): 121-129.
- [22] 董燕婕. 壤土剖面不同碳库贮量及释放特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
Dong Y J. Carbon stock and stabilization in Lou soil [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [23] Zornoza R, Acosta J A, Faz A, *et al.* Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation[J]. Geoderma, 2016, **272**: 64-72.
- [24] Fernández-Calviño D, Bååth E. Growth response of the bacterial community to pH in soils differing in pH[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, **73**(1): 149-156.
- [25] Li W, Zhou P P, Jia L P, *et al.* Limestone dissolution induced by fungal mycelia, acidic materials, and carbonic anhydrase from fungi[J]. Mycopathologia, 2009, **167**(1): 37-46.
- [26] 高红贝. 温度对土壤水分运动及参数的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Gao H B. Research on the effect of temperature on soil water movement and parameters [D]. Yangling: Northwest A and F University, 2011.
- [27] Raheb A, Heidari A, Mahmoodi S. Organic and inorganic carbon storage in soils along an arid to dry sub-humid climosequence in northwest of Iran[J]. Catena, 2017, **153**: 66-74.
- [28] Zhao H L, Tian X H, Chen Y L, *et al.* Effect of exogenous substances on soil organic and inorganic carbon sequestration under maize stover addition [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, **63**(6): 591-598.
- [29] 董雪, 王春燕, 黄丽, 等. 侵蚀红壤腐殖酸组分特点及其对水稳性团聚体的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(1): 114-125.
Dong X, Wang C Y, Huang L, *et al.* Characteristics of humus fraction in erosion ultisols and their effects on water-stable aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(1): 114-125.
- [30] 刘加彬. 植被恢复及地气间 CO₂ 无机交换对典型沙地土壤碳的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Liu J B. Effects of vegetation rehabilitation and abiotic CO₂ exchange between soil and atmosphere on soil carbon in a desert ecosystem[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)