

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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何睿, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺曝气量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征

丁梦凯¹, 胡晓农^{1*}, 曹建华², 吴夏², 黄芬², 王奇岗², 闵佳²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为了研究岩溶非岩溶交错区不同土地利用方式下土壤呼吸的空间变异特征及其影响因素, 在桂林毛村进行野外观测试验, 测定了土壤呼吸速率、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 值及相应的环境、土壤、植被因子, 分析了土壤呼吸的空间变异性及与这些因子之间的关系。结果表明, 土壤呼吸速率变化范围为 $1.39 \sim 5.31 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 最高值约为最低值的 3.8 倍。毛村不同岩性区下土地利用方式的变化对土壤呼吸具有重要影响, 相同岩性区土地利用方式改变前 G2 点松树林的土壤呼吸速率约为半坡毁林后 G1 点沙糖桔园的 2.3 倍。土壤呼吸导致大气中 CO_2 浓度增高及 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 值降低, 并且两者之间的统计关系可以用反比例函数来描述。结果还发现, 在水热条件与全年均值较接近的 4 月中旬, 土地利用方式对土壤呼吸的影响要大于土壤温度、土壤湿度等环境因子。土地利用方式造成的土壤有机碳含量不同是影响土壤呼吸空间变异性的关键因子。在所有观测的生态系统中, 土壤呼吸与有机碳含量和全氮含量之间的关系可以用二元线性回归方程描述, 并能解释土壤呼吸 92.5% 的空间变异性。

关键词: 桂林毛村; 土地利用方式; 土壤呼吸; $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$; 土壤有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0924-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805251

Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin

DING Meng-kai¹, HU Xiao-long^{1*}, CAO Jian-hua², WU Xia², HUANG Fen², WANG Qi-gang², MIN Jia²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: To investigate the factors influencing the spatial variability in soil respiration among different land use patterns in a karst non-karst interactive distribution area, field experiments were conducted in Maocun Village, Guilin. Soil respiration, $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ value, and relevant environment, vegetation, and soil factors were measured. The spatial variability in soil respiration and the relationship between soil respiration and these measured factors were examined. The results indicated that soil respiration rates ranged from $1.39 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ to $5.31 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, with the highest value being approximately 3.8 times the minimum. Soil respiration varied significantly among different land use patterns under different lithology zones. The soil respiration rate of the G2 pines in the same lithology area was 2.3 times higher than that in the orchard G1 point after the destruction of the forest. The soil respiration caused an increase in CO_2 concentration in the atmosphere and a decrease in the $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ value; the relationship between the two could be described by an inverse proportional function. The study found that in mid-April, the average water heat condition was close to that of the entire year. The difference in soil organic carbon content caused by land use was a driving factor of the spatial variability in soil respiration. In all ecosystems studied, the relationship between soil respiration and soil organic carbon content and total nitrogen content could be described by a two-element linear regression equation and explained 92.8% of the spatial variability in soil respiration.

Key words: Maocun Village; land use patterns; soil respiration; $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$; soil organic carbon

土壤呼吸是陆地碳库中的有机碳以 CO_2 形式归还到大气碳库中的主要途径, 亦是目前全球变暖、大气中碳增加的一个重要来源和全球碳循环中的主要通量之一^[1-3]; 同时也是土壤中出现生命活动的重要标志之一^[4]。在我国地质背景多变、土地利用方式多样、植被覆盖种类复杂的背景下, 研究各个地质背景不同土地利用方式下的土壤呼吸变异性显得尤为重要^[2]。

高金芳等^[5]测定了半干旱区不同土地利用方式下的土壤呼吸速率, 认为不同土地利用方式下土壤呼吸与水热因子均呈正相关。付微等^[6]指出黄土

高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式下土壤呼吸与土壤温度呈现显著指数函数关系。周洪华等^[7]认为干旱区塔里木河下游 6 种土地利用方式下的土壤呼吸速率日变化主要受控于大气温度和土地利用方式。王旭等^[8]、刘惠等^[9]和马俊等^[10]也分别指出长白山地区、华南丘陵区、内蒙古农牧交错区土地利用方式的改变显著影响土壤呼吸。然而, 在岩溶

收稿日期: 2018-05-30; 修订日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530316)

作者简介: 丁梦凯(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶动力学、岩溶生态学, E-mail: 1195286344@qq.com

* 通信作者, E-mail: bill.x.hu@gmail.com

地区, 土地利用方式对土壤呼吸的影响研究较少. 在我国西南岩溶区, 土壤碳库以 CO_2 、 HCO_3^- 、溶解性有机碳等为主要形式存在, 它驱动和制约着“ CO_2 -有机碳-碳酸盐岩”表层岩溶系统的碳转移^[11]. 岩溶土壤有机碳赋予了岩溶区区域特殊性, 它既是陆地生态系统的重要碳库, 又影响着岩溶地质碳汇^[12, 13]. 岩溶区耕地资源匮乏, 为了生存和发展, 长期的盲目毁林毁草垦荒, 陡坡耕种, 改变了土地利用方式, 引起了当地生态系统功能和碳收支格局的变化, 进而对局部乃至全球气候变化造成影响^[14].

本文通过静态密闭气室法, 结合土壤物理化学参数和碳同位素值等原位监测数据, 选择岩溶区和非岩溶区交互分布、土地利用方式较多多样化的桂林毛村为研究对象, 分析影响土壤呼吸空间变异性的关键影响因素, 以期较为准确地认识该地区土壤呼吸这一重要的碳循环过程提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 观测点概况

观测点位于桂林市灵川县潮田乡东侧毛村境

表 1 观测地点概况

Table 1 Survey of the measurement sites

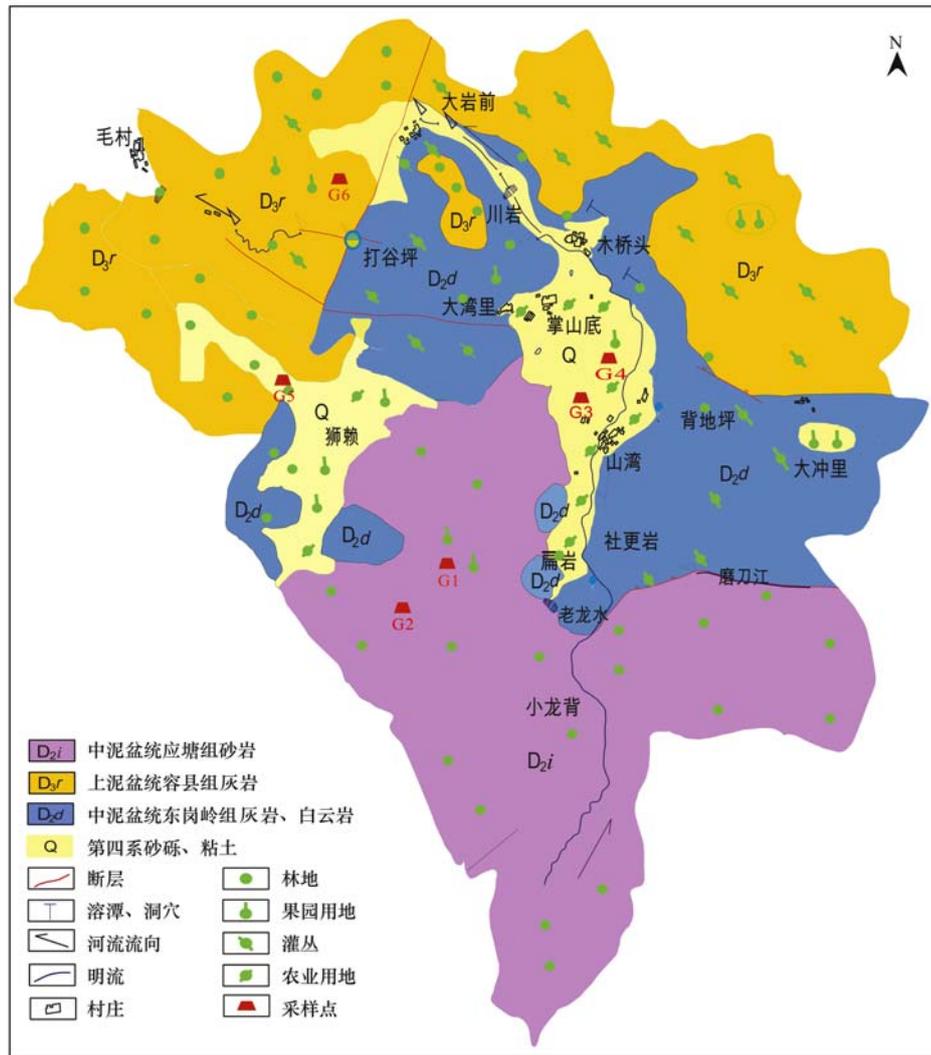
样点	经度(E)	纬度(N)	地名	海拔/m	植被类型
G1	110°32'33"	25°10'20"	小龙背	348	沙糖桔
G2	110°32'39"	25°10'24"	小龙背	349	松树
G3	110°33'05"	25°10'59"	山湾	260	沙糖桔
G4	110°33'4.9"	25°11'00"	山湾	260	桂花树
G5	110°32'17"	25°11'27"	狮赖	218	木荷树
G6	110°31'30"	25°11'42"	毛村	331	柚子树

G1 点种植的 3 年生沙糖桔苗木弱小, 半坡毁林后其长期处于亚健康生长状态. 为了保梢保叶, 当地居民采取了“勤施薄施”的施肥方式, 撒施和叶面喷施并举, 每 10 d 进行一次施肥. 其中撒施主要以尿素为主; 叶面喷施以补充沙糖桔树体内的微量元素, 加速树梢的成熟与开花为目的, 喷施浓度为 0.3% ~ 0.5% 的尿素和 0.2% ~ 0.3% 磷酸二氢钾. 由于土壤水分流失严重, 每 15 d 用软 PVC 管从潮田河支流引水漫灌. 4 年生沙糖桔园 G3, 位于土质疏松、土层相对较为深厚的第四纪沉积层山湾. 农户同样采用了“勤施薄施”的施肥方式, 主要以叶面喷施为主, 每 15 d 喷施浓度为 0.3% ~ 0.5% 的尿素. 由于附近有引水渠, 几乎不需要人工灌溉. G6 点 8 年生柚子林位于毛村地下河总出口处, 由于水热条件良好, 柚子树枝繁叶茂. 当地农户仅每隔 30 d 喷施浓度为 0.3% ~ 0.5% 的尿素. 其他各观测点属于天然林地, 无人工管理.

内. 在观测点布设时, 除考虑地质背景外, 还结合了当地土地利用方式和人类活动的影响. 选择毛村 3 种不同地质背景下 4 个不同研究区共 6 个观测点进行比较研究. 这 6 个观测点分别是: ①砂页岩区小龙背: 毁松树林垦荒后的 3 年生沙糖桔园 G1 点, 因 G1 被毁后而部分残留的 15 年生松树林 G2; 该地区主要分布中泥盆统下部应塘组 (D_2i) 石英砂岩、粉砂岩夹页岩; 主要发育地带性硅酸盐红壤, 层次明显, 土壤 pH 呈酸性. ②第四纪覆盖和沉积层研究区山湾: 4 年生沙糖桔园 G3, 6 年生桂花树林 G4; 该地区是当地居民的主要生活聚集区之一, 主要分布第四纪覆盖和沉积层 (Q) 冲洪积卵、砾石、砂土和亚黏土. ③第四纪覆盖和沉积层研究区狮赖: 12 年生木荷树林 G5; 该地区地层特征与②相似. ④石灰岩地区毛村: 8 年生柚子树林 G6. 该地区主要分布上泥盆统融县组 (D_3r) 厚层状灰岩及部分中泥盆统东岗岭组 (D_2d) 灰岩、白云岩. 该观测点广泛分布棕色石灰土, 土壤分层明显, pH 为中性偏碱, 附近是毛村地下河总出口, 水热资源丰富, 大量的果园分布于此. 观测点概况如表 1 和图 1 所示.

1.2 土壤呼吸观测

本研究选择在天气晴朗的 2018 年 4 月 10 日于各个观测点进行土壤呼吸同步观测. 在观测前, 预先将测定土壤呼吸的不锈钢底座埋入监测点土壤中, 同时为避免植物光合作用的影响, 去除底座内的植物; 在选取监测点时, 避免选取坡度很大的区域对 CO_2 通量的影响. 采用自主设计制作的静态密闭气室箱进行土-气界面 CO_2 脱气通量观测. 在圆筒状镀锌箱体放置在监测面上之前, 打开箱体内部的风扇并将箱体倒置 5 min, 使箱体内气体混合均匀, 随即用小型气泵采集箱体内气体作为背景浓度. 然后打开箱体可自动开关的底盖, 重复上述采集背景气体之前的步骤, 之后将箱体放置于不锈钢底座内, 用水快速液封接触面后, 将底盖打开, 10 min 后闭合底盖, 形成静态密闭气室, 进行第一次样品采集. 之后重复第一次样品采集的操作, 分别于 20 min, 30 min 后进行气体采集, 每次采样前均打开



根据文献[15]修改

图1 毛村各观测点分布示意

Fig. 1 Distribution map of measurement sites in Maocun Village

风扇 1 min 使气体混合均匀. 气体样本装入便携式气体采样袋中, 带回中国地质科学院岩溶地质研究所自然资源部岩溶动力学重点实验室后立即使用 picarro 进行 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值测试, 并进行线性拟合得到静态密闭箱体内的时间-浓度关系曲线, 从而计算出各观测点的土壤呼吸速率^[16, 17].

$$\text{Flux} = F_1 \times M_1 / M_2 \times T_1 \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{\text{Slope} \times M_3 \times T_2 \times V}{S} \quad (2)$$

$$M_3 = \frac{M_2 \times \text{Atmp}}{R \times (273.13 + T)} \quad (3)$$

式中, Flux 为土壤呼吸速率 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, F_1 为土-气界面土壤脱气量 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, M_1 为 mmol 和 μmol 的转换系数(1000), M_2 为 CO_2 的分子摩尔质量 ($44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), T_1 为 s 和 h 的转换系数(3600), Slope 为静态密闭箱内时间-浓度关系曲线中的斜率 (10^{-6} min^{-1}), M_3 是标准状态下 CO_2 浓

度从 ppm 到 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的转换系数, T_2 是 min 和 h 的转换系数(60), V 为静态密闭箱体内套入的空气体积 (m^3), S 为底座上自动底盖打开后静态密闭箱体的底面积 (m^2), Atmp 是实测大气压 (kPa), R 是气体常数 [$8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$], T 是实测大气温度 ($^{\circ}\text{C}$).

$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 测试结果采用 V-PDB (vienna pee dee belemnite) 进行标准化, 其值按如下公式计算:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[\frac{R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{样品}}}{R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (4)$$

式中 $R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}}$ 为国际标准物 V-PDB 的碳同位素丰度比值.

1.3 环境因子观测

在测定土壤呼吸速率的同时, 对各观测点大气温度及 10 cm 深处土壤温、湿度进行实时观测. 在各观测点选取 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的植被观测样方, 进行土地利用方式调查. 采用五点取样法, 调查树木距

地面 1.3 m 处的胸高直径并取均值(树高不足 1.3 m 的取距地面 0.3 m 处地径)。同时调查统计样方内树木的品种、棵数、树高、凋落物厚度等指标。之后在各观测点采集 10 cm 深处土壤样品,测定土壤 pH、有机碳含量、全氮含量等指标。

1.4 数据统计分析

数据处理、统计分析和图件绘制分别在 Excel 2010、SPSS 24.0 和 Origin 9.0 等软件中进行。对 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值进行综合分析,利用有效测定结果得到各个观测点不同观测时刻的土壤呼吸值,利用 Origin 9.0 分析 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值随时间的变化规律及两者之间的相互关系。在此基础上,利用 SPSS 20.0 对多个土壤呼吸影响因素进行因子分析,经 KMO 和 Bartlett 检验和最大方差法旋转后,选取特征值最大且符合实际要求的几组综合因子进一步分析其对土壤呼吸速率的影响;并建立基于上述综合因子的多因子模型,分析毛村各观测点土壤呼吸空间变异性的影响因素,并由多个影响参数的最佳组合共同评估和预测研究区土壤呼吸的空间变化。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸时空变化特征

如图 2 所示,研究区内各观测点 4 个观测时刻的土壤呼吸速率分别在 1.39 ~ 1.68、2.97 ~ 4.00、1.53 ~ 1.81、1.75 ~ 1.99、2.38 ~ 3.30 和 3.97 ~ 5.31 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 范围内波动,各观测点样本的标准差分别为: 0.16、0.44、0.12、0.10、0.39 和 0.61 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。上述土壤呼吸速率观测样本较小的离散程度,可以较好地忽略土壤呼吸的时间变异性,在此基础上,对 6 个观测点 4 个观测时刻的土壤呼吸数据取均值,更好地研究土壤呼吸的空

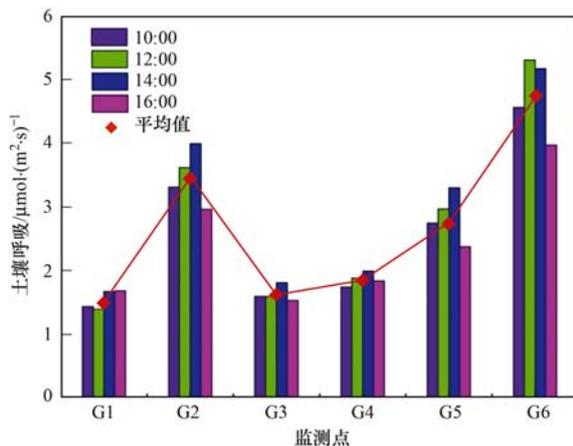


图 2 不同监测点各监测时段土壤呼吸速率

Fig. 2 Soil respiration rates at different measurement sites during each sampling period

间变化特征。结合图 2 分析可知,土壤呼吸速率最高值出现在灰岩地区 G6 毛村柚子林观测样地中,最低值出现在砂页岩区 G1 小龙背沙糖桔园,最高值约为最低值的 3.8 倍;G1 点的土壤呼吸速率为 $1.5 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,因 G1 被毁后而残留的松树林 G2 点的土壤呼吸速率为 $3.47 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,G2 点的土壤呼吸速率值约为 G1 点的 2.3 倍,表明了土壤呼吸的差异可以一定程度上反映所在区域土壤理化性质的改变^[4]。位于第四纪沉积层研究区的山湾,作为当地居民的主要生活聚集区,土地利用方式显著受人类活动影响,其 4 年生沙糖桔园 G3、6 年生桂花树 G4 点的土壤呼吸速率差异不大,分别为 $1.63 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $1.73 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。

2.2 土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 演变特征

由图 3 可知,各个观测点箱体内存气体的 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 在 $-10.09\text{‰} \sim -19.63\text{‰}$ 内逸,同一观测点不同观测时段相同采样时刻 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值无明显变化。图 3 中 6 个观测点第一个 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值均为箱体内存气体背景值,随着时间推移,土壤 CO_2 脱气使富含 ^{12}C 的 CO_2 气体优先从土壤中逸出,因此使得箱体内存 CO_2 浓度增高而 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值偏负;各观测点 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值-时间关系曲线斜率分别为: -0.18 、 -0.25 、 -0.19 、 -0.2 、 -0.23 和 -0.26 ,且具有 $K_{G6} < K_{G2} < K_{G5} < K_{G4} < K_{G3} < K_{G1}$ 的斜率变化特征, $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值与观测时间之间均表现出显著的负相关关系 ($R^2 > 0.89$, $P < 0.01$),这与各观测点箱体内存 CO_2 浓度随着观测时间的推移而升高的变化特征正好相反。

为了探究静态密闭气室箱体内存随着观测时间推移而升高的 CO_2 浓度和偏负的 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值之间的关系,得到图 4 中的方程,该关系式显示了静态密闭气室内部的 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 值间存在显著的负相关关系 ($R^2 = 0.99$, $P = 0$)。但是对条件较为复杂的静态气室内部是否适用,以及两者间这种统计关系的理论解释,需要在更长时间尺度和更广空间尺度上做更为广泛深入的研究加以证实。

2.3 土壤及植被因子变化特征

各观测点表层土壤基础化学性质如表 2。其中,土壤温度变化范围为 $19.98 \sim 21.68^\circ\text{C}$,6 个观测点土壤温度的标准差为 0.59°C ,表明了观测样本土壤温度较小的离散程度。土壤湿度处于 $13.85\% \sim 26.33\%$ 范围内,不同观测点同一观测时刻的土壤湿度具有较大的变化幅度,最大变化值可达 12.48% 。

观测点植被类型样方调查结果如表 3,各观测点的树木年龄具有 $G2 > G5 > G6 > G4 > G3 > G1$ 的

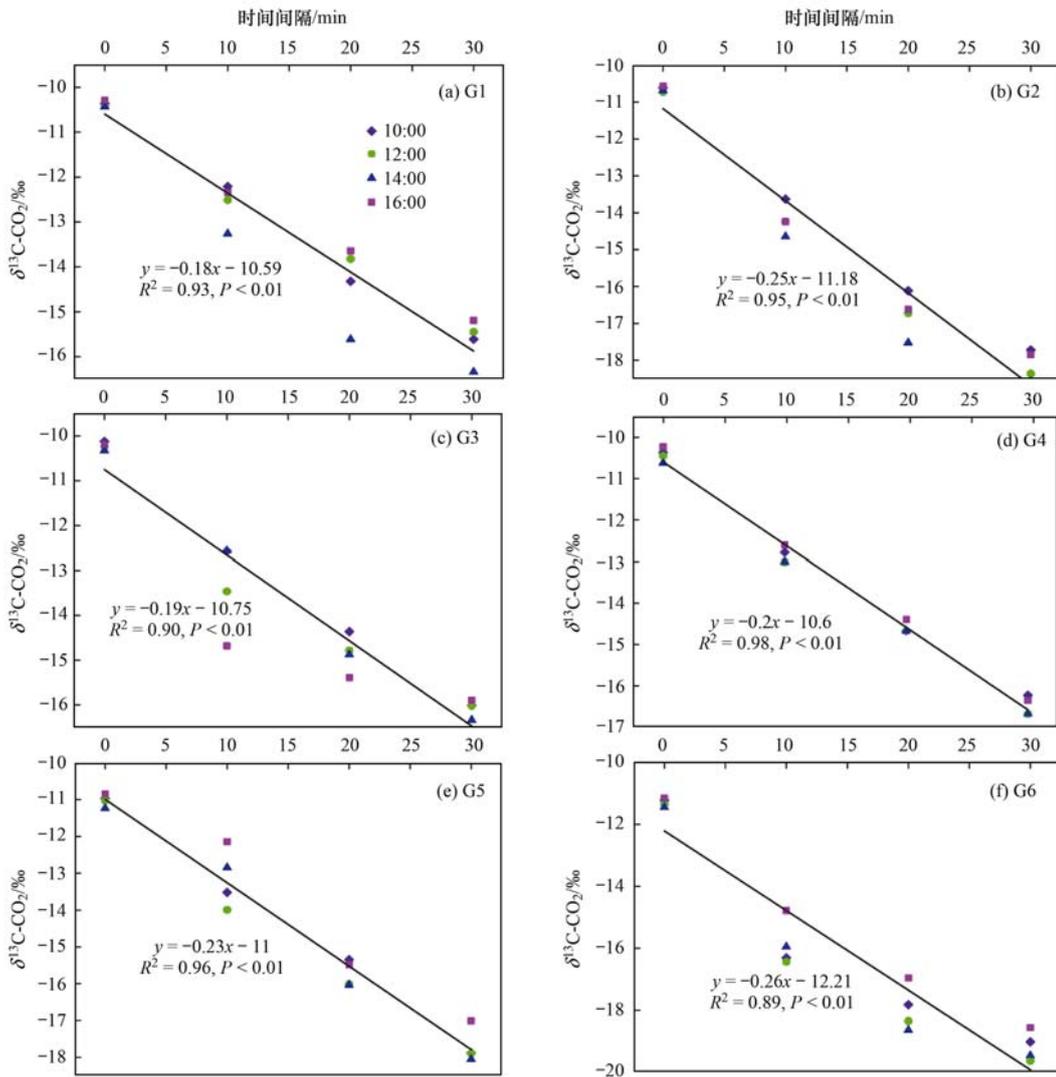


图3 不同观测点 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 浓度-时间关系

Fig. 3 Diagram of $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ concentration over time at different measurement sites

表2 观测点表层土壤基础化学性质

Table 2 Basic chemical properties of the soil samples from the upper 10 cm layer

样点	G1	G2	G3	G4	G5	G6
近地表温度/ $^{\circ}\text{C}$	25.73	22.93	24.18	23.38	22.47	23.48
土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	21.68	20.34	20.78	19.98	20.35	20.70
土壤湿度/%	13.85	24.7	17.33	18.40	15.28	26.33
土壤有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	15.9	23.6	17.2	18.9	21.3	33.2
土壤全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.8	3.2	1.7	1.9	2.3	14.7
土壤 pH	5.13	5.24	6.52	6.63	6.43	6.91

表3 观测点样方植被调查结果

Table 3 Results of the vegetation surveys from the measurement sites

样点	G1	G2	G3	G4	G5	G6
树木类型	沙糖桔	松树	沙糖桔	桂花树	木荷树	柚子树
树龄/a	3	15	4	6	12	8
树高/m	0.63	12.2	1.37	4.5	6.63	4.8
树木胸径/cm	5.66	63	9	50.1	54	55.25
棵数/ $\text{棵}\cdot\text{hm}^{-2}$	3 200	4 200	800	800	3 600	750
凋落物厚度/cm	—	0.9	—	0.3	0.6	0.7

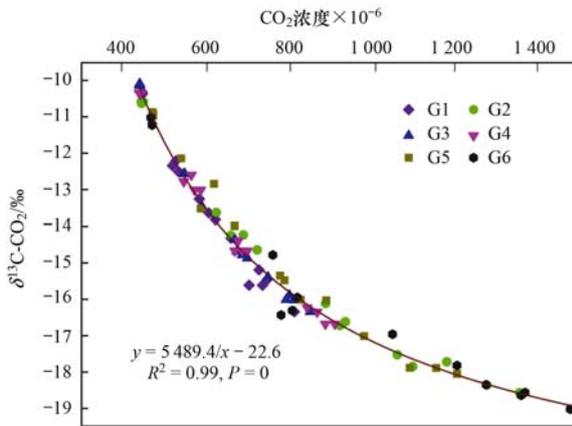


图4 各观测点 CO₂ 浓度与δ¹³C-CO₂ 值关系

Fig. 4 Relationship between CO₂ concentration and the value of δ¹³C-CO₂ for each sampling point

变化特征, 树木高度介于0.63 ~ 12.2 m 之间, 同样表现为 G2 > G5 > G6 > G4 > G3 > G1, 各观测点的树木胸径/地径变化范围为 5.66 ~ 63 cm, 具有与树龄和树高基本一致的变化特征. G2、G4、G5 和 G6 点地表均具有一定厚度的凋落物, 但厚度普遍较低.

2.4 土壤呼吸空间变异性影响因素

影响土壤呼吸的因素包括土壤温、湿度等环境指标, 土壤有机碳、土壤全氮等土壤生物化学指标及树木类型、树木胸径、凋落物厚度等植被因子也与土壤呼吸存在着直接的相关关系^[2, 7], 各因素之间相互影响(表4), 且复杂多变, 因而有必要进行因子分析.

经因子分析后, 选取特征值最大的3个因子(M1、M2、M3), 其旋转成分矩阵和累积方差贡献

表4 毛村土壤呼吸影响因素(Pearson)相关性系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficient for influential factors of soil respiration in Maocun Village

	气温	土温	土壤湿度	树龄	树高	树木胸径	棵数	凋落物厚度	土壤无机碳	土壤全氮	土壤有机碳
气温	1.00	0.87*	-0.97**	-0.51	-0.56	-0.65	0.17	-0.50	-0.41	0.57	-0.31
土温		1.00	-0.94**	-0.11	-0.15	-0.31	0.41	-0.05	0.01	0.71	0.06
土壤湿度			1.00	0.38	0.40	0.48	-0.24	0.31	0.23	-0.67	0.15
树龄				1.00	0.96**	0.83*	0.68	0.92**	0.56	-0.25	0.44
树高					1.00	0.84*	0.61	0.91*	0.55	-0.27	0.41
树木胸径						1.00	0.26	0.93**	0.73	-0.08	0.66
棵数							1.00	0.44	-0.04	-0.20	-0.14
凋落物厚度								1.00	0.82*	0.07	0.74
土壤无机碳									1.00	0.45	0.98**
土壤全氮										1.00	0.57

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

率如表5所示, 可以看出 M1、M2、M3 的方差贡献率分别为 51.02%、28.73% 和 18.35%, 累计贡献率达 98.10%. 与 M1 紧密相关的是土壤温度(ST)、土壤湿度(SH)等环境因子, 而 M2 则与树龄、树木棵数、树高、凋落物厚度和树木胸径(DHB)等指标密切相关, 表明 M2 反映的是植被因子对土壤呼吸空间变异性的影响, 与 M3 紧密相关的是土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)等土壤因子.

从表6中可以看出, 毛村土壤呼吸的空间变异性与土壤因子尤其是土壤有机碳(SOC)含量之间显现出高度相关性(P < 0.01), 由土壤有机碳(SOC)和土壤全氮(TN)控制的二元线性回归方程可以解释研究区土壤呼吸 92.5% 的空间变异性; 土壤呼吸与土壤温度(ST)、湿度(SH)之间的相关性则较差

表5 影响因素的载荷及方差贡献率

Table 5 Component loading and variance contribution

指标	rate of influential factors		
	M1	M2	M3
土温	0.99	0.10	0.05
土壤湿度	-0.98	0.12	0.11
气温	0.93	-0.24	-0.28
土壤全氮	0.72	-0.30	0.63
树龄	-0.23	0.92	0.31
棵数	0.33	0.90	-0.27
树高	-0.27	0.89	0.31
凋落物厚度	-0.16	0.75	0.65
树木胸径	-0.38	0.63	0.60
土壤有机碳	-0.01	0.13	0.99
土壤无机碳	-0.08	0.26	0.96
方差贡献率/%	51.02	28.73	18.35
累计方差贡献率/%	51.02	79.75	98.10

表6 毛村土壤呼吸影响因素多元线性回归分析

Table 6 Multiple linear regression analysis of soil respiration in Maocun Village

影响因素	回归模型	R ²	P	N(样本个数)
环境因子	y = 2.15ST + 2.14SH	0.251	0.3	72
植被因子	y = -0.5DHB + 1.29	0.55	0.14	72
土壤因子	y = 1.01SOC - 0.06TN	0.925	<0.01	72

($P=0.3$), 这主要是由于此次研究人为控制观测因子所致; 由于各个观测点在树木类型、树龄、树高、凋落物厚度等上的不同, 以致于树木胸径 (DHB) 无法进行标准化比较, 因此不宜作为描述毛村土壤呼吸空间变异性的优先指标 ($P=0.14$).

3 讨论

3.1 土壤呼吸 C 组成的影响因素

关于土壤呼吸 C 组成的影响因素, 国内外已有相关研究. Craig^[18] 观察到土壤呼吸能够释放出数量显著的 CO_2 , 夏季土壤空气中的 CO_2 浓度比大气中的可高出 1 000 倍, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-21\text{‰} \sim -10\text{‰}$ 之间, 显著轻于大气背景值. 张柳明等^[19] 在研究中国西北地区大气 CO_2 浓度及其碳、氧同位素组成特征时指出: 由于土壤呼吸释放的 CO_2 进入到大气中, 并且其数量大于植物光合作用固定的量, 造成了研究区森林区的大气 CO_2 高浓度、轻 $\delta^{13}\text{C}$ 值的情况; 此外, 兰州市 $\delta^{13}\text{C}$ 与 CO_2 浓度在总体上成反相关, 张柳明基于 Keeling^[20] 提出的 $\delta^{13}\text{C} = M/\text{CO}_2 + I$ 的关系式, 在 $\alpha=0.5$ 的可信度下剔除离散值, 用全年 154 个样品中的 117 个样品数据得出回归方程:

$$\delta^{13}\text{C} = (5756/\text{CO}_2) - 22.7 (R^2 = 0.77)$$

证明上述 Keeling 方程对以年为时间尺度的大气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化是适用的, 用该方程有可能确定 CO_2 气源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[19,20]. 此外, 日本学者 Inoue 等^[21] 在 Keeling 提出的关系式基础上, 利用 3 a 中的 322 个样品数据得到以下回归方程:

$$\delta^{13}\text{C} = (4860/\text{CO}_2) - 22 (R^2 = 0.67)$$

进一步证明了 Keeling 方程对以年为时间尺度的大气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化是适用的.

本研究采用静态密闭气室法, 利用有效测定数据探究 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 之间的相互关系. 本研究发现, 此次静态密闭气室箱内部的 $\delta^{13}\text{C}$ 背景值在 $-11.21\text{‰} \sim -10.09\text{‰}$ 之间, CO_2 的体积分数在 $443.6 \times 10^{-6} \sim 473.7 \times 10^{-6}$ 之间; 土壤表层 10 cm 左右的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-23.21\text{‰} \sim -20.09\text{‰}$ 之间, CO_2 的体积分数在 $1356.2 \times 10^{-6} \sim 5421.7 \times 10^{-6}$ 之间. 造成这一现象的主要原因是土壤表层中动物的呼吸作用, 植物根系的呼吸作用以及土壤微生物的呼吸作用这 3 个生物学过程产生的生物源 CO_2 相对富集 ^{12}C , 从而导致土壤表层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负; 由于土壤表层 10cm 左右的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏负于静态密闭气室箱内部的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 而其 CO_2 体积分数显著高于箱体内部的背景值, 随着时间推移, 土壤 CO_2 脱气使富含 ^{12}C 的 $^{12}\text{CO}_2$ 气体优先从土壤中逸出, 加上在观测

前去除了底座内的植物, 避免了光合作用的影响, 因此使得箱体内部 CO_2 浓度增高而 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 值偏小更加明显. 通过对此次 96 个样品数据进行分析得到的回归方程(图 4):

$$y = (5489.5/x) - 22.6 (R^2 = 0.99)$$

从而证明了 Keeling 方程在以日时间尺度上的土壤呼吸为研究对象时, 其对 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 值的变化是适用的.

3.2 环境因子

与 M1 紧密相关的是土壤温度、湿度、气温等环境因子. 赵景波等^[22] 对西安不同植被条件下土壤 CO_2 释放量进行了昼夜观测, 发现土壤呼吸日变化主要受控于土壤温度, 而土壤湿度等其他重要的环境因子在同一观测点日时间尺度上的变幅相对较小. 为研究土壤呼吸与其他因子的关系, 此次观测选取了温度在日时间尺度上波动较小和降雨量相对较少, 水热条件与全年均值较为接近的 4 月上旬^[2]. 较小的土壤温度范围, 可以较好地忽略时间动态, 重点研究土壤呼吸的空间变异; 选择无雨的晴朗天气, 土壤呼吸相对较强, 也有利于各项研究工作的开展.

3.3 植被因子

与 M2 紧密相关的是树木类型、树龄、树木胸径、凋落物厚度等植被因子. 在模拟土壤呼吸的时空变化特征时, 叶面指数、根系生物量和凋落物等常被用作植被特征变量^[23,24]. 有研究表明, 在各个空间尺度上, 土壤呼吸速率均随叶面指数的增大而增强. Bond-Lamberty 等^[25] 认为全球土壤呼吸速率与叶面指数之间呈正相关关系, Bahn 等^[26] 在欧洲草地生态系统观测到的土壤呼吸速率则表现为与叶面指数之间呈现指数关系. 叶面指数作为表征植物光合作用能力的一个关键指标, 它与土壤呼吸的内在联系体现了输送到地下的植物光合产物对土壤呼吸具有重要影响^[1]. 根系的自养呼吸在土壤总呼吸中占有相当大的比例. 由于土壤微生物活动依赖于植物地上部分和根系输入的有机物, 并且植物根系也是土壤呼吸的重要组成部分, 因此植被及地表凋落物的影响是十分重要的^[27]. Pypker 等^[28] 在对加拿大北部森林所有采伐迹地进行研究时发现, 土壤呼吸与地表凋落物呈正相关, 陈光水等^[29] 发现中国森林土壤呼吸年通量与凋落物之间同样呈正相关. 植物根系会对土壤呼吸产生重要影响, 孙文娟等^[30] 在研究作物的生物学特征对土壤呼吸的影响后指出, 作物根系的参与极大地促进了土壤呼吸, Hanson 等^[31] 的研究发现根系呼吸作用的比例占土壤呼吸作用总量在 10% ~ 90% 之间. 在本研究

中, 由于各生态系统在树木类型、树木胸径和生长期上的差异等使得叶面指数无法进行标准化比较。而凋落物厚度和根系生物量可以通过直接或间接影响土壤有机碳含量来影响土壤呼吸^[32], 其对土壤呼吸的影响可转化为土壤有机碳的影响来考虑。因此, 在本研究这种土地利用方式复杂的背景下, 以上这些因子不宜作为描述土壤呼吸空间变异性的优先指标。

3.4 土壤因子

与 M3 紧密相关的是土壤有机碳、土壤全氮等土壤因子。陈书涛等^[2]的研究发现, 在以北亚带代表性落叶阔叶林为主的南京老山及紫金山、镇江宝华山森林生态系统中, 土壤呼吸与有机碳含量之间的关系均可用幂函数描述。Bahn 等^[26]发现草地生态系统的土壤呼吸随表土有机碳含量的增加而呈对数形式增加, Rodeghiero 等^[33]发现森林土壤呼吸与土壤有机碳含量之间存在显著的线性正相关性关系。此次对毛村 6 个不同土地利用方式观测点的研究表明: 无论是在较少扰动的生态系统中, 还是扰动较大的生态系统(G1 点)中, 土壤呼吸速率均随土壤有机碳含量的增大而增大, 说明了土壤有机碳库和土壤碳通量之间具有良好的正相关性的内在联系。

土壤有机碳主要来源于土壤腐殖质、动植物和微生物残体及排泄分泌物、部分分解产物, 不同土地利用方式中植物的根系分布、凋落物分解及人类活动程度的不同, 都会对土壤有机碳含量产生直接或间接的影响^[33]。6 个观测点土壤 10 cm 处 SOC 含量从大到小依次为: G6 > G2 > G5 > G4 > G3 > G1, 与各监测点的凋落物厚度 G2 > G6 > G5 > G4 > G3 = G1 具有基本一致的变化规律。SOC 含量具有上述的变化规律, 可能是由于各观测点的地下根系生物量具有相同的变化顺序, 增加了 SOC 的来源^[34]。G6 点 SOC 含量最高, 可能是因为该监测点临近毛村地下河, 良好的水热条件增加了土壤动植物和微生物的活动量, 从而增加了有机碳来源。此外, 该监测点 SOC 含量最高还可能与定期施肥有关。6 个观测点全氮含量从大到小依次为: G6 > G1 > G2 > G5 > G4 > G3。土壤氮水平对土壤碳固定有正效应, 施用氮肥会直接影响到土壤氮素富集, 它很可能通过根系生物量的贡献而促进土壤有机碳的积聚^[35]。G1 点最低的 SOC 含量有以下几个原因: 一方面 G1 为 G2 松树林半坡砍伐焚烧后的产物, 为平整土地, 清洁焚烧产物, 农户会清除土壤中的残余根系和地表凋落物, 并且长时间的引水半坡灌溉, 导致了土壤有机碳的人为流失, 表层土壤碳储量低; 另一方

面, G1 点新种植的三年生沙糖桔幼苗, 几乎无法残存地表凋落物, 加上强烈的太阳辐射导致了 G1 点最为干燥的土壤环境, 而当地农户撒施的肥料多为挥发性较强的尿素, 这就导致了氮的大量流失, 依然无法促进土壤有机碳的聚集。

4 结论

(1) 毛村岩溶非岩溶交错区不同土地利用方式下土壤呼吸存在显著性差异, 这是环境因子、植被因子和土壤因子综合作用的结果; 土地利用方式的改变会显著影响土壤的理化性质, 相同岩性区土地利用方式改变前 G2 点的土壤呼吸速率是半坡毁林后 G1 点的 2.3 倍, 这表明了土壤呼吸的差异可以一定程度上反映所在区域土壤理化性质的改变。

(2) 土壤呼吸导致研究区各观测点大气中 C 组成发生演变, 具体表现为大气中 CO₂ 浓度增高及 δ¹³C-CO₂ 值降低, 并且两者之间的相互关系可以用反比例函数来描述。

(3) 土壤有机碳是影响毛村土壤呼吸空间变异性的关键性因子, 在此次研究所观测的各岩性区不同土地利用方式下的生态系统中, 土壤有机碳可作为标准化指标来描述对比各观测点的土壤呼吸, 土壤呼吸与有机碳含量和全氮含量之间的关系可以用二元线性回归方程描述, 并可以解释土壤呼吸 92.5% 的空间变异性。

参考文献:

- [1] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 689-704.
Wei S J, Luo B Z, Sun L, et al. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: a review[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(4): 689-704.
- [2] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1017-1025.
Chen S T, Liu Q H, Hu Z H, et al. Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1017-1025.
- [3] Jenkins D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. Nature, 1991, 351(6324): 304-306.
- [4] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, et al. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation[J]. Plant and Soil, 1998, 205(2): 135-146.
- [5] 高金芳, 周波, 马涛, 等. 半干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 89-93.
Gao J F, Zhou B, Ma T, et al. Soil respiration characteristics under different land use patterns in semi-arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 89-93.
- [6] 付微, 黄明斌, 邵明安, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同

- 立地条件下土壤呼吸特征[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(13): 74-80.
- Fu W, Huang M B, Shao M A, *et al.* Soil respiration characteristics under different site conditions in wind-water crisscross erosion region on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(13): 74-80.
- [7] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J]. 地理科学, 2011, **31**(2): 190-196.
- Zhou H H, Li W H, Yang Y H, *et al.* Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in arid land[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, **31**(2): 190-196.
- [8] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山红松针阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(6): 887-893.
- Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, *et al.* Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai mountains, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(6): 887-893.
- [9] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(12): 2021-2027.
- Liu H, Zhao P, Lin Y B, *et al.* Soil respiration under different land-use types in a hilly area of South China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26**(12): 2021-2027.
- [10] 马骏, 唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(2): 167-175.
- Ma J, Tang H P. Variations of soil respiration rate and its temperature sensitivity among different land use types in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, **35**(2): 167-175.
- [11] 潘根兴, 曹建华. 表层带岩溶作用: 以土壤为媒介的地球表层生态系统过程——以桂林峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 中国岩溶, 1999, **18**(4): 289-296.
- Pan G X, Cao J H. Karstification in epikarst zone: the Earth surface ecosystem processes taking soil as a medium——case of the Yaji karst experiment site, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 1999, **18**(4): 289-296.
- [12] 刘再华. 大气 CO₂ 两个重要的汇[J]. 科学通报, 2000, **45**(21): 2348-2351.
- Liu Z H. Two important sinks for atmospheric CO₂[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, **45**(21): 2348-2351.
- [13] 袁道先. 地质作用与碳循环研究的回顾和展望[J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2157.
- [14] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 15-16.
- [15] 汪进良. 桂林毛村地下河出口电导率及 NO₃⁻ 动态变化研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2005.
- [16] 张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 等. 桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2773-2783.
- Zhang T, Li J H, Pu J B, *et al.* Spatial variations of CO₂ degassing across water-air interface and its impact factors in summer in Guijiang river, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2773-2783.
- [17] 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 等. 亚热带典型岩溶溪流气界面 CO₂ 交换通量变化过程及其环境影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2487-2495.
- Li L, Pu J B, Li J H, *et al.* Variations of CO₂ exchange fluxes across water-air interface and environmental meaning in a surface stream in subtropical karst area, SW China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2487-2495.
- [18] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [19] 张柳明, 徐永昌. 中国西北地区大气 CO₂ 浓度及其碳、氧同位素组成特征[J]. 科学通报, 1992, **37**(5): 441-444.
- Zhang L M, Xu Y C. The characteristics of atmospheric CO₂ concentration and its carbon-oxygen isotopic composition in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, **37**(5): 441-444.
- [20] Keeling C D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere[J]. Tellus, 2010, **12**(2): 200-203.
- [21] Inoue H, Sugimura Y. The carbon isotopic ratio of atmospheric carbon dioxide at Tsukuba, Japan[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1985, **2**(4): 331-344.
- [22] 赵景波, 杜娟, 袁道先, 等. 西安地区土壤 CO₂ 释放量和释放规律[J]. 环境科学, 2002, **23**(1): 22-25.
- Zhao J B, Du J, Yuan D X, *et al.* The release amount and its change law of CO₂ from soils in Xi'an area[J]. Environmental Science, 2002, **23**(1): 22-25.
- [23] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, *et al.* An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems[J]. Biogeochemistry, 2005, **73**(1): 29-70.
- [24] 周广胜, 贾丙瑞, 韩广轩, 等. 土壤呼吸作用普适性评估模型构建的设想[J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2008, **38**(3): 293-302.
- [25] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, **464**(7288): 579-582.
- [26] Bahn M, Rodeghiero M, Anderson-Dunn M, *et al.* Soil respiration in european grasslands in relation to climate and assimilate supply[J]. Ecosystems, 2008, **11**(8): 1352-1367.
- [27] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, **17**(5): 469-476.
- Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, **17**(5): 469-476.
- [28] Pypker T G, Fredeen A L. Below ground CO₂ efflux from cut blocks of varying ages in sub-boreal British Columbia[J]. Forest Ecology and Management, 2003, **172**(2-3): 249-259.
- [29] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. 生态学报, 2008, **28**(4): 1748-1761.
- Chen G S, Yang Y S, Lu P P, *et al.* Regional patterns of soil respiration in China's forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(4): 1748-1761.
- [30] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO₂ 排放的影响[J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 1-6.
- Sun W J, Huang Y, Chen S T, *et al.* CO₂ emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue n content[J]. Environmental Science, 2004, **25**(3): 1-6.
- [31] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 115-146.
- [32] 赵竑绯, 赵阳, 徐小牛. 不同土地利用对土壤有机碳储量及土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(7): 1738-1744.
- Zhao H F, Zhao Y, Xu X N. Effects of different land use types on soil organic carbon storage and soil respiration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(7): 1738-1744.

- [33] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. *Global Change Biology*, 2010, **11**(7): 1024-1041.
- [34] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*, 2005, **25**(11): 2875-2882.
Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(11): 2875-2882.
- [35] 宇万太, 姜子绍, 李新宇, 等. 不同土地利用方式对潮棕壤有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(12): 2760-2764.
Yu W T, Jiang Z S, Li X Y, *et al.* Effects of land use type on soil organic carbon storage in aquic brown soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(12): 2760-2764.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2018年11月1日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续17次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。



CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)