

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

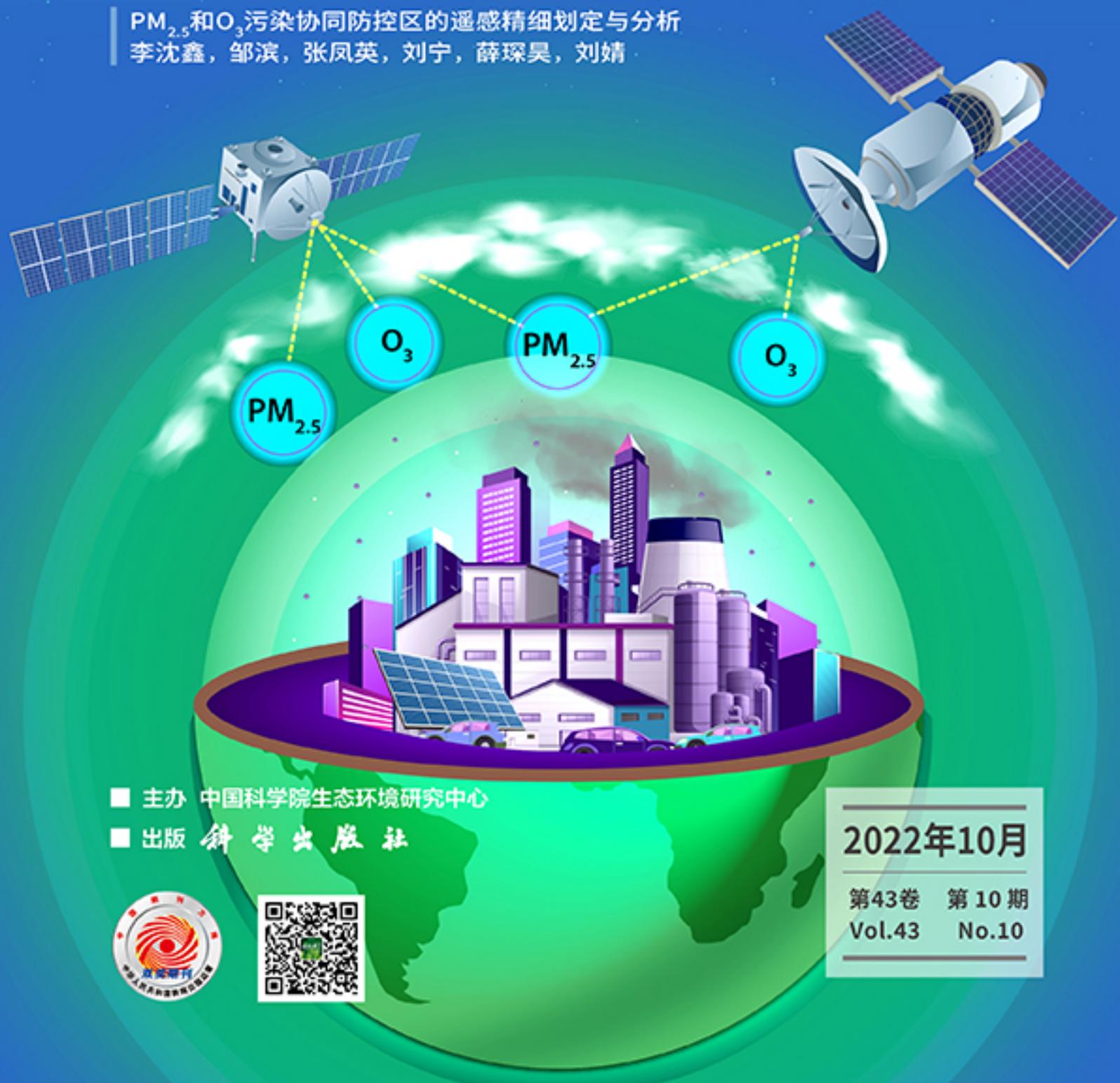
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨昉, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞潼, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仑, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂@FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应

孙亚荣¹, 王亚娟¹, 赵敏¹, 薛文艳¹, 梁思琦², 刘乐², 刘超¹, 陈云明^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 明确气候变化背景下生态脆弱区土壤呼吸速率特征和土壤温湿度对其影响, 对准确评估和预知该区碳收支具有重要意义. 以陕北黄土丘陵区自然撂荒地 22 a 柠条人工纯林为研究对象, 通过 CO₂ 分析仪和温湿度传感器测定不同土层 (10、50 和 100 cm) CO₂ 浓度平均值和土壤温湿度, 采用 Fick 第一扩散系数法计算土壤呼吸速率, 探究不同土层土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率的动态变化特征, 并进一步分析不同土层土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应. 结果表明, 土壤呼吸速率日变化随土层深度增加显著降低 ($P < 0.05$), 峰值出现时间存在滞后现象, 相邻土层间 (10、50 和 100 cm) 土壤呼吸速率由上至下均滞后 1 h; 6~9 月土壤呼吸速率月变化为多峰曲线, 其中 10、50 和 100 cm 土层土壤呼吸速率最大值分别在 7 月 25 日、8 月 6 日和 8 月 10 日, 达 13.96、2.96 和 1.47 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 土壤温度对土壤呼吸速率影响随土层深度增加而减弱, 50 cm 及以下土层土壤温度对土壤呼吸速率无显著影响 ($P > 0.05$), 10 cm 土层指数拟合最优, $R^2 = 0.96$, 50 cm 和 100 cm 土层拟合较差, R^2 分别为 0.00 和 0.01, 温度敏感系数 Q_{10} 随土层深度增加而减小; 不同土层土壤湿度对土壤呼吸速率影响均显著 ($P < 0.05$), 二次拟合表现为 50 cm ($R^2 = 0.35$) > 10 cm ($R^2 = 0.22$) > 100 cm ($R^2 = 0.31$); 10、50 和 100 cm 土层土壤温度与土壤湿度的综合作用可解释土壤呼吸速率的 96%、6%~50% 和 22%~24%. 综上所述, 黄土丘陵区柠条人工纯林不同深度土壤温湿度对土壤呼吸速率影响存在差异, 10 cm 土层土壤呼吸速率受土壤温湿度的综合影响, 但土壤温度的相对贡献更高, 50 cm 土层及以下土壤湿度为关键因子. 研究结果有助于更好地预测未来气候变化对该区陆地生态系统碳循环影响, 为温室气体调控提供理论依据.

关键词: 不同深度; 土壤呼吸速率; 土壤温度; 土壤湿度; 滞后效应

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4648-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112253

Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of *Caragana korshinskii* Plantation in the Loess-Hilly Region

SUN Ya-rong¹, WANG Ya-juan¹, ZHAO Min¹, XUE Wen-yan¹, LIANG Si-qi², LIU Le², LIU Chao¹, CHEN Yun-ming^{1,2*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: It is of great significance to clarify the influence of soil temperature and moisture on soil respiration rate and its characteristics in ecologically fragile regions under the background of climate change for the accurate assessment and prediction of carbon budgets in this region. The average CO₂ concentration and soil temperature and moisture at different soil depths (10, 50, and 100 cm) were measured using a CO₂ analyzer and temperature and moisture sensors. The soil respiration rate was calculated using Fick's first diffusion coefficient method. The dynamic characteristics of soil temperature, soil moisture, and soil respiration rate in different soil depths were explored, and the response of soil respiration rate to soil temperature and moisture were further analyzed. The results showed that the diurnal variation in soil respiration rate decreased significantly with the increase in soil depth ($P < 0.05$), and the peak time lagged behind. Soil respiration rate in adjacent soil depths (10, 50, and 100 cm) lagged 1 h from top to bottom. The monthly variation in soil respiration rate was a multi-peak curve, in which the maximum soil respiration rates of 10, 50, and 100 cm soil depths were on July 25th, August 6th, and August 10th, reaching 13.96, 2.96, and 1.47 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively. The effect of soil temperature on soil respiration rate decreased with the increase in soil depth. Soil temperature at 50 cm and below had no significant effect on soil respiration rate ($P > 0.05$). The fitting index of 10 cm soil depth was the best ($R^2 = 0.96$), but the fitting indexes of 50 cm and 100 cm soil depths were poor ($R^2 = 0.00$ and $R^2 = 0.01$, respectively). The temperature sensitivity coefficient Q_{10} decreased with the increase in soil depth. Soil moisture in different soil depths had significant effects on soil respiration rate ($P < 0.05$), and the quadratic fitting indicated that 50 cm ($R^2 = 0.35$) > 10 cm ($R^2 = 0.22$) > 100 cm ($R^2 = 0.31$). The combined effects of soil temperature and moisture in different soil depths could explain 96%, 6%~50%, and 22%~24% of soil respiration rate, respectively. In summary, the effects of soil temperature and moisture at different soil depths of the *Caragana korshinskii* plantation in the loess-hilly region on soil respiration rate differed. The soil respiration rate of the 10 cm soil depth was affected by the comprehensive effect of soil temperature and moisture; however, the relative contribution of soil temperature was higher, and soil moisture at and below a soil depth of 50 cm was the key factor. These results could help improve predictions on the impact of future climate change on the carbon cycle of terrestrial ecosystems in the region and provide a theoretical basis for greenhouse gas regulation in the future.

Key words: different depths; soil respiration; soil temperature; soil moisture; hysteresis effect

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771556); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501703); 陕西省水保研发项目(2017sbkj-01)

作者简介: 孙亚荣(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: Twosleyouth@163.com

* 通信作者, E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

随着大气中碳排放的急剧增加, 伴随而来的全球气候变暖引发了学术界的广泛关注^[1,2]. 土壤呼吸作为陆地生态系统碳排放的重要来源^[3], 是全球气候变暖、大气碳增加和生态系统碳循环的关键^[4]. 有研究表明, 全球陆地生态系统中由土壤呼吸释放到大气中的碳通量占全球碳通量的 10%, 相当于化石燃料释放的 11 倍多, 其轻微波动就可能打破全球碳平衡, 影响区域和全球气候变化^[5]. 土壤呼吸是一个复杂的生物过程, 受到一系列生物因素(植被根系、土壤微生物和土壤有机质等)与非生物因素(土壤温度、土壤湿度和凋落物等)影响, 而这些因子中土壤温湿度可解释土壤呼吸速率的大部分变异^[6-8]. 因此, 剖面土壤气候的微弱变化都可能影响土壤 CO₂ 排放, 进而增加对区域碳预算评估的不确定性^[9]. 目前, 对剖面土壤呼吸速率研究非常有限, 特别是土壤呼吸速率的具体过程及其空间异质性认识鲜见报道^[10], 如不同深度土壤呼吸碳释放规律? 不同深度土壤碳释放对土壤温湿度的响应机制? 这些都是值得深入研究的科学问题. 因此, 揭示深层(1 m)土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应将进一步提升人们对全球和区域碳平衡的认识.

目前, 国内外学者针对黄土丘陵区土壤呼吸速率的动态变化特征及土壤温湿度对其影响展开了研究, 并取得了丰硕成果^[11-14], 但主要集中于表层 20 cm, 对深层土壤呼吸速率涉及较少, 尤其是深层土壤碳释放对土壤温湿度响应比较缺乏. 有研究表明, 土壤碳储量(1 m)是陆地生态系统碳储量的 2 倍^[15], 30 cm 以下深层土壤碳储量占 1 m 土层的 46%~63%^[16]. 有学者认为深层和表层土壤呼吸速率动态变化的潜在机制一致, 但这一假设在对深层和表层土壤碳动态变化的比较研究中受到质疑, 认为其对深层土壤碳动态变化的描述可能不准确^[17]. 然而, 深层土壤环境特征(土壤湿度和土壤温度等)与表层存在很大差异, 其对深层土壤碳的影响也不同于表层. 因此, 充分认识土壤呼吸速率在垂直剖面分布中的异质性具有重要意义.

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)属豆科锦鸡儿属, 为黄土高原水土保持主要树种. 延安市地处黄土高原腹地, 自实施退耕还林(草)工程以来, 以柠条为主的人工林在当地得到了大规模推广, 显著改善了区域生态环境^[18], 但关于该植被对大气碳排放影响研究鲜见. 鉴于此, 本试验以柠条人工纯林为研究对象, 采用二氧化碳分析仪和土壤温湿度传感仪进行野外监测, 对黄土丘陵区典型柠条人工纯林不同深度土壤呼吸速率及土壤温湿度进行观测, 分析

土壤呼吸速率与土壤温湿度的时空变异模式, 阐明不同土层土壤呼吸速率对土壤温度和土壤湿度的响应机制, 通过丰富黄土高原土壤碳平衡基础数据库, 以期了解区域土壤呼吸速率规律提供一定的参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区纸坊沟小流域(36°43'48" N, 109°15'16" E, 海拔 1 283.3 m), 属典型的森林草原带和梁峁状沟壑区(图 1). 暖温带半干旱大陆性气候, 年均气温 8.8℃, 无霜期 162 d 左右, 年均降雨量约 500 mm, 降水分配不均, 其中 6~9 月降水占全年总降水量的 81%. 自 1999 年黄土高原地区大面积实施退耕还林(草)工程以来, 植被恢复成效显著, 目前人工林树种以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主, 撂荒坡面以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为主要优势种的草本群落.

本试验地为柠条人工纯林地, 占地 100 m² (10 m×10 m), 位于半阴坡, 坡度 26°, 退耕年限为 20 a, 平均冠幅为 1.7 m×2.1 m, 平均丛高为(1.8~2.1) m, 土壤类型以黄绵土为主, 样地草本主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)和覆盆子(*Rubus idaeus*), 样地土壤养分(平均值±标准差)特征见表 1.

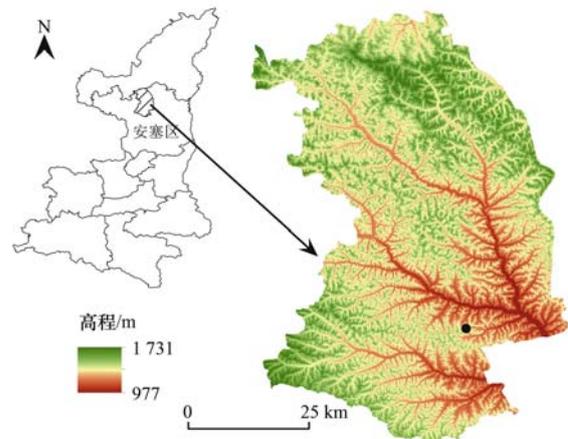


图 1 陕西安塞区样点位置示意

Fig. 1 Location of sample sites in Ansai district, Shaanxi

1.2 研究方法及数据处理

1.2.1 土壤呼吸速率及环境因子观测方法

为了使监测数据更具代表性, 2018 年 12 月, 分别选取研究区坡上、坡中和坡下 3 个深度(10、50 和 100 cm)安装 CO₂ 分析仪(GMP343 Vaisala 公司,

表 1 研究区样地土壤养分特征

Table 1 Soil nutrient characteristics of the sample plots in the study area

土层深度 /cm	$\omega(\text{C})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{N})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{C})/\omega(\text{N})$
10	6.13 ± 0.2	0.71 ± 0.02	8.63 ± 0.19
50	1.79 ± 0.7	0.33 ± 0.07	5.42 ± 0.24
100	1.31 ± 0.3	0.29 ± 0.04	4.52 ± 0.47

德国)和土壤温湿度传感器(CS655 Campbell Scientific 公司,美国),测定不同土层 CO_2 浓度、土壤温度和土壤湿度.每个小区设置了3个监测深度,每个深度设置了3个重复,共计9个监测点.仪器可24 h连续观测,观测频率为1次 $\cdot\text{h}^{-1}$.年降水量利用GMX一体式气象仪器自动观测(GMX501 Gill公司,英国),GMX提供小时数据可满足土壤呼吸速率在时间尺度上连续性变化研究需要.

1.2.2 数据处理

采用 Fick 第一扩散定律计算不同深度土壤呼吸速率^[19]:

$$R_s = C_s \cdot \Delta D(z) / \Delta z \quad (1)$$

$$C_s = \varepsilon C_a \quad (2)$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$], C_s 为 CO_2 扩散系数 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), $D(z)$ 为深度 z (m) 土层 CO_2 浓度 ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), ε 为气体扩散系数, C_a 自由大气中 CO_2 扩散系数, $C_a = 1.47 \times 10^{-5} \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

采用 Penman^[20] 模型推算不同深度气体扩散系数:

$$\varepsilon = 0.66(\varphi - \theta) \quad (3)$$

式中, θ 为土壤体积含水量 ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$), φ 为土壤孔隙度.

$$\varphi = p/m \quad (4)$$

式中, p 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), m 为土壤比重, 矿质土壤 $m = 2.65 \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

采用指数模型拟合不同土层(10、50和100 cm)土壤温度和土壤呼吸速率间关系:

$$R_s = ae^{bT} \quad (5)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (6)$$

式中, b 为土壤温度反应系数, T 为土壤温度平均值 ($^{\circ}\text{C}$), Q_{10} 为土壤呼吸速率的温度敏感性.

采用二次模型拟合10、50和100 cm土壤湿度和土壤呼吸速率间关系:

$$R_s = cW^2 + dW + f \quad (7)$$

式中, W 为土壤湿度(%), c 、 d 和 f 为待定系数.

采用复合模型拟合土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率间关系,分别为:

$$\left. \begin{aligned} R_s &= a_1 e^{b_1 T} W^{c_1}, \\ R_s &= a_1 + b_1(TW), \\ R_s &= a_1 + b_1 T + c_1 W, \\ R_s &= a_1 T^{b_1} W^{c_1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, a_1 、 b_1 和 c_1 为待定系数.

不同土层土壤呼吸速率、土壤温度、土壤湿度日变化特征和相关性拟合数据均使用6~9月的3个重复测量点每小时连续监测数据的平均值.为减小计算中土壤呼吸速率误差,在拟合方程式(5)、(7)和(8)时,首先通过方程式(1)计算土壤呼吸速率,再对数据进行平均处理,为平均每小时土壤呼吸速率.采用方程式(5)拟合土壤呼吸速率和土壤温度变化特征,方程式(7)拟合土壤呼吸速率和土壤湿度变化特征,方程式(8)分析土壤呼吸速率和土壤温湿度的综合响应.

采用 Microsoft Excel 2020 进行数据整理, Origin 2018 制图,重复测量分析(ANOVA)检验10、50和100 cm土层土壤呼吸速率、土壤温度和土壤湿度日变化,采用 Pearson 相关分析法分析土壤呼吸速率与土壤温度和土壤湿度间相关关系.

2 结果与分析

2.1 不同深度土壤呼吸速率及温湿度随时间变化特征

2.1.1 不同土层土壤呼吸速率及温湿度昼夜变化特征

10、50和100 cm土壤呼吸速率昼夜变化存在明显的单峰趋势(图2).其中10 cm土层土壤呼吸速率在00:00~11:00呈降低趋势,11:00~20:00缓慢回升,并于20:00达到峰值后减小;50 cm土层土壤呼吸速率00:00~07:00趋于稳定,07:00~12:00不断降低,在12:00达到最小值后逐渐上升,在21:00达最大值,之后趋于下降;100 cm土层变化趋势与10 cm和50 cm土层相近,土壤呼吸速率最大值与最小值出现时间分别在22:00和13:00.

土壤呼吸速率垂直变化表现为随土层深度增加而减小,由上而下相邻土层间滞后1 h.单因素方差分析表明,10、50和100 cm土层土壤呼吸速率昼夜变化间差异显著($P < 0.01$),分别在6.02~6.99、1.79~1.91和1.02~1.06 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 波动,日平均值为6.51、1.87和1.05 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,10 cm土壤呼吸速率平均值分别是50 cm和100 cm的3.48倍和6.20倍.

10、50和100 cm土层土壤温度差异显著($P < 0.01$,图3).其中10 cm土层土壤温度和土壤呼吸

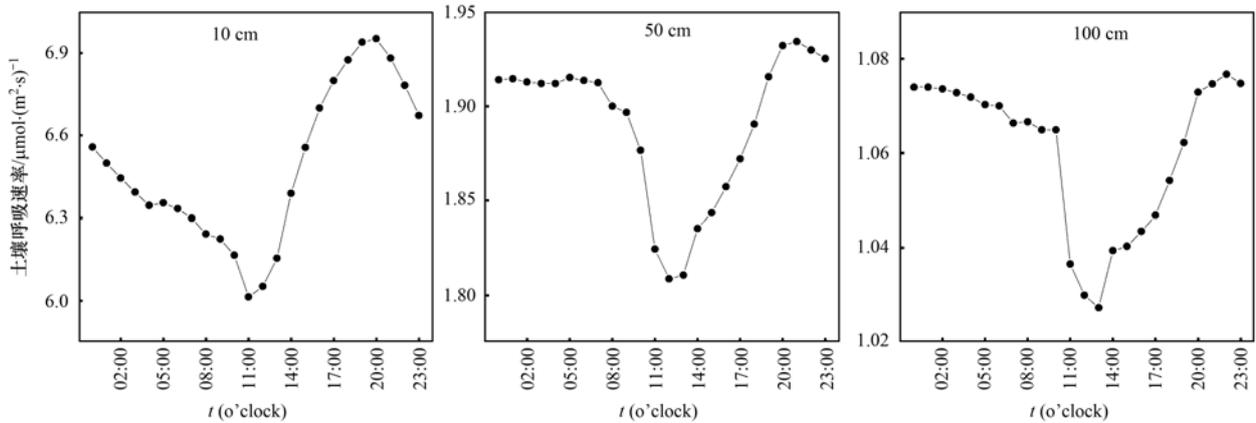


图2 土壤呼吸速率昼夜变化特征

Fig. 2 Day and night variation characteristics of soil respiration rate

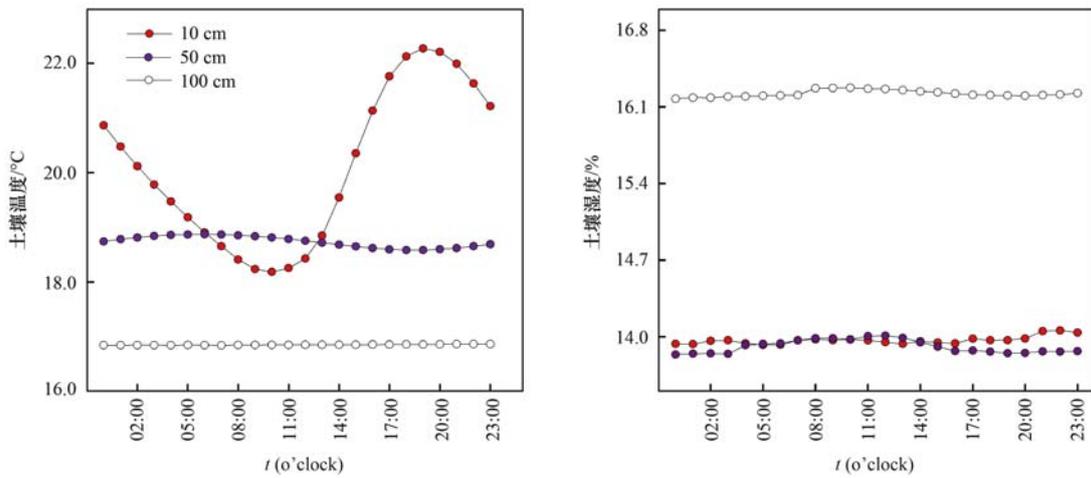


图3 不同土层土壤温湿度昼夜变化特征

Fig. 3 Day and night variation characteristics of soil temperature and moisture at different soil depths

速率具有相似的变化趋势,表现为土壤呼吸速率滞后土壤温度 1 h, 50 cm 和 100 cm 土层土壤温度无明显变化,分别在 18.58 ~ 18.87°C 和 16.84 ~ 16.86°C,变化率仅为 1.56% 和 0.12%,不同土层土壤温度平均值为 20.09 (10 cm)、18.74 (50 cm) 和 16.85°C (100 cm). 土壤湿度在 10 cm 和 50 cm 土层差异不显著($P > 0.05$),而 100 cm 与 10 cm 土层土

壤湿度和 50 cm 土层差异均显著($P < 0.01$),且不同土层间土壤湿度均无明显波动,平均值分别为 13.78%、13.75% 和 16.04%.

2.1.2 土壤呼吸速率及土壤温湿度月变化特征

6~9 月 10、50 和 100 cm 土层土壤呼吸速率变化规律相近,呈多峰变化(图 4). 最大值分别在 7 月 25 日、8 月 6 日和 8 月 10 日,峰值滞后明显,和表

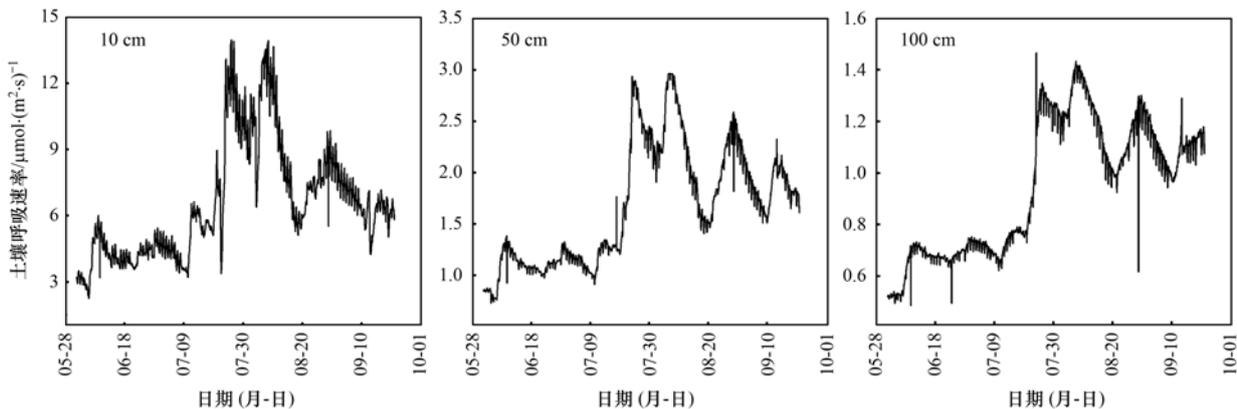


图4 不同土层土壤呼吸速率变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of soil respiration rate at different soil depths

层 10 cm 土层相比, 50 cm 土层滞后 11 d, 100 cm 土层达 15 d. 不同土层(10、50 和 100 cm)土壤呼吸速率分别在 2.39 ~ 13.66、0.63 ~ 2.97 和 0.33 ~ 1.46 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 间波动.

不同土层土壤温度变化特征迥异(图 5). 10 cm 土层土壤温度波动最大, 7 月初达最大值, 50 cm 土层相对 10 cm 土层土壤温度存在滞后现象, 在

7 月末和 8 月中旬达到峰值, 100 cm 土层无显著波动, 不同土层土壤温度分别为 13.27 ~ 28.48 (10 cm)、15.02 ~ 21.86 (50 cm) 和 13.45 ~ 18.80 $^{\circ}\text{C}$ (100 cm). 土壤湿度变化规律在不同土层均为相似的多峰变化, 10、50 和 100 cm 土层土壤湿度分别在 8.50% ~ 23.68%、9.18% ~ 22.69% 和 11.85% ~ 20.92% 间波动.

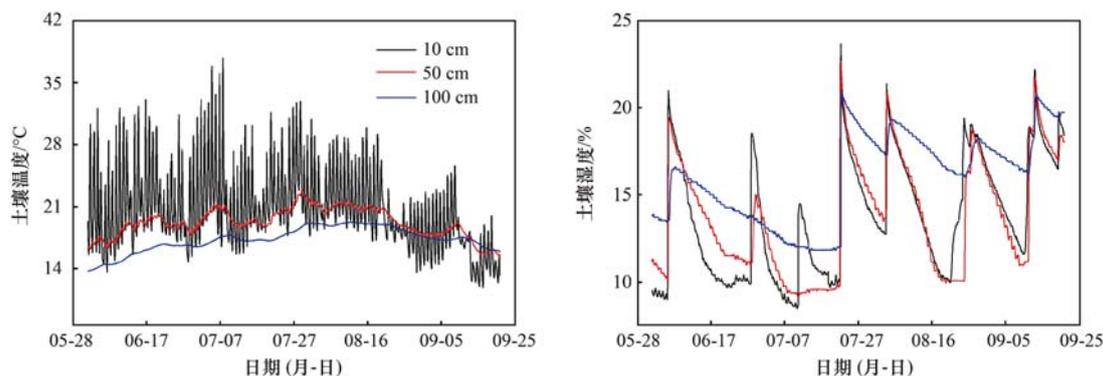


图 5 不同土层土壤温湿度变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of soil temperature and moisture at different soil depths

2.2 土壤呼吸速率与土壤温湿度相关关系

2.2.1 土壤呼吸速率与土壤温度间相关关系

不同深度土壤温度与土壤呼吸速率关系互异(图 6). 各土层除 10 cm 土壤呼吸速率与土壤温度

显著相关外($P < 0.05$), 50 cm 和 100 cm 两层均不相关($P > 0.05$), 说明深层土壤温度对土壤呼吸速率的影响随深度增加影响减小, 50 cm 以下土层土壤温度对土壤呼吸速率无显著影响($P > 0.05$).

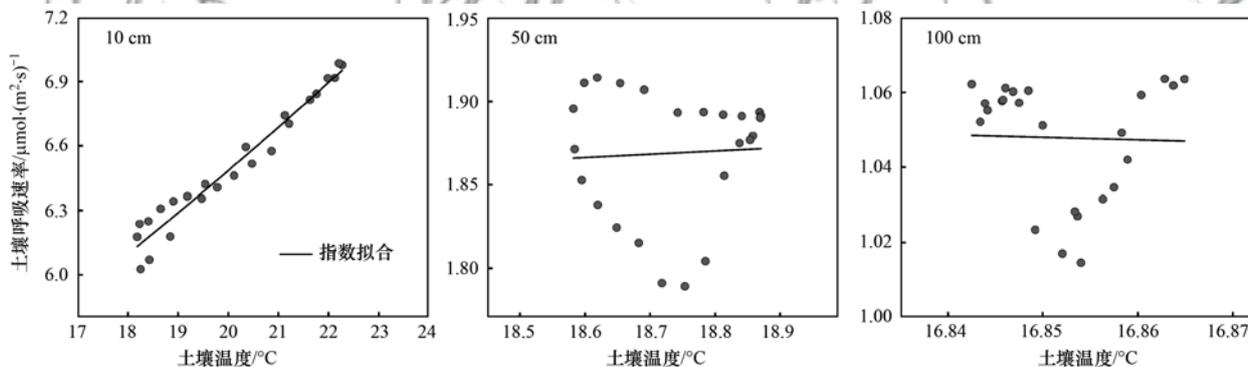


图 6 土壤呼吸速率对土壤温度响应

Fig. 6 Response of soil respiration rate to soil temperature

通过对不同土层土壤呼吸速率与土壤温度进行指数拟合(表 2), 其中 10 cm 土层土壤温度可解释土壤呼吸速率的 96%. 50 cm 和 100 cm 指数拟合均较差, 决定系数 R^2 分别为 0.00 和 0.01. 温度敏感系数 Q_{10} 随土层深度增加而减少, 10 cm 土层 Q_{10} 分

别是 50 cm 和 100 cm 的 1.22 倍和 13.5 倍.

2.2.2 土壤呼吸速率与土壤湿度间相关关系

10、50 和 100 cm 土层土壤湿度对土壤呼吸速率影响均显著($P < 0.05$, 图 7). 通过对不同深度土壤呼吸速率与土壤湿度进行二次回归分析, 结果见图 8. 由拟合系数 R^2 可知, 不同土层土壤湿度与土壤呼吸速率拟合存在差异, 拟合系数 R^2 在 10、50 和 100 cm 土层具体为 0.22 ($P < 0.05$)、0.35 ($P < 0.01$) 和 0.31 ($P < 0.05$).

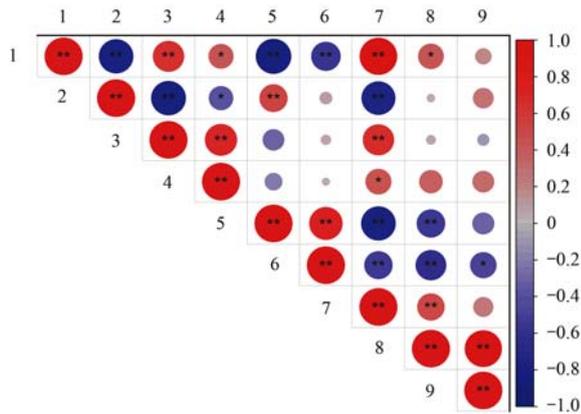
2.3 土壤呼吸速率与土壤湿度的综合响应

本研究以 10、50 和 100 cm 土层土壤温度和湿度为自变量, 采用复合回归方程分析土壤温度、土

表 2 不同深度土壤呼吸速率与土壤温度间回归方程

Table 2 Regression equation between soil respiration rate and soil temperature at different depths

土层深度 /cm	指数拟合	R^2	P	Q_{10}
10	$R_s = 3.51e^{0.037T}$	0.96	0.00	1.35
50	$R_s = 1.53e^{0.017T}$	0.00	0.81	1.11
100	$R_s = 53.20e^{-0.237T}$	0.01	0.63	0.10



圆形为 10、50 和 100 cm 土层土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率两两因子间的皮尔逊相关性, 红色圆形和蓝色圆形分别表示正相关和负相关, 颜色越深和圆形越大表示相关性越强, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; 1. 10 cm 土层土壤温度, 2. 50 cm 土层土壤温度, 3. 100 cm 土层土壤温度, 4. 10 cm 土层土壤湿度, 5. 50 cm 土层土壤湿度, 6. 100 cm 土层土壤湿度, 7. 10 cm 土层土壤呼吸速率, 8. 50 cm 土层土壤呼吸速率, 9. 100 cm 土层土壤呼吸速率

图 7 土壤呼吸速率与温湿度相关性分析

Fig. 7 Response of soil respiration rate to soil moisture

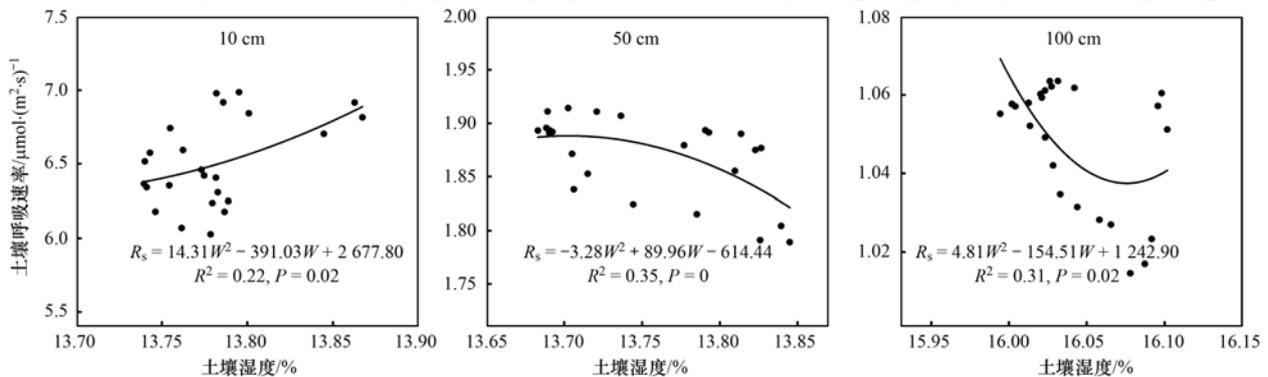


图 8 土壤呼吸速率对土壤湿度响应

Fig. 8 Correlation analysis of soil respiration rate and environmental factors

6%~50% 和 22%~24%. 从 4 种复合效果分析 (表 4), 10 cm 拟合相同; 随土层深度增加, 4 种复合最优模型存在差异, 如 50 cm 土层最优模型为 $R_s = a + bT + cW$, $R^2 = 0.50$, 而 $R_s = a + b(TW)$ 仅可解释土壤温湿度的 6%; $R_s = ae^{bT}W^c$ 在 50 cm 和 100 cm 土层均无拟合结果, 说明不同模型在不同土层中存

壤湿度与土壤呼吸速率相互关系. 结果表明不同土层土壤呼吸速率与土壤温湿度拟合存在差异. 10 cm 土层土壤温湿度交互影响可解释土壤呼吸速率的 96%, 而典范分析表明 10 cm 土层土壤温度对土壤呼吸速率的解释率更高; 50 cm 和 100 cm 土层相比单因素均有一定程度增加, 但土壤湿度对深层土壤呼吸速率影响远大于土壤温度 (表 3).

表 3 不同土层单因素对土壤呼吸速率的解释率

Table 3 Shared individual single factors of different soil layers to soil respiration rate

土层深度/cm	土壤温度/%	土壤湿度/%
10	86	9
50	6	39
100	0	20

不同土层决定系数 R^2 随土层深度增加而减少, 说明随土层深度增加土壤呼吸速率对土壤温湿度的综合响应减弱, 即土层越深, 影响土壤呼吸速率的因子越复杂. 不同土层土壤温度和土壤湿度可以共同解释 10、50 和 100 cm 土层土壤呼吸速率的 96%、

在差异, 在分析土壤呼吸速率与土壤温湿度的复合模型时需进行多模型比较, 获取最优拟合, 提高预测精度.

图 9 为土壤呼吸速率预测值和实测值得到的残差值, 可以看出, $R_s = a + b(TW)$ 的预测效果在不同土层均较低, 而 $R_s = aT^bW^c$ 的模型预测效果可靠性

表 4 土壤呼吸速率与土壤温度和湿度的回归分析

Table 4 Regression equation of soil respiration rate, soil temperature and moisture

土层深度/cm	线性关系		非线性关系	
	$R_s = a + b(TW)$	$R_s = a + bT + cW$	$R_s = aT^bW^c$	$R_s = ae^{bT}W^c$
10	$R_s = 2.55 + 0.01(TW)$ $R^2 = 0.96$	$R_s = -2.60 + 0.20T + 0.38W$ $R^2 = 0.96$	$R_s = 0.12T^{0.61}W^{0.82}$ $R^2 = 0.96$	$R_s = 0.67e^{0.03T}W^{0.64}$ $R^2 = 0.96$
50	$R_s = 2.95 - 0.01(TW)$ $R^2 = 0.06$	$R_s = 6.05 + 0.19T - 0.56W$ $R^2 = 0.50$	$R_s = 22.03T^{2.17}W^{-3.37}$ $R^2 = 0.45$	$R_s = 0.01e^{0.31T}W^{-0.10}$ —
100	$R_s = 4.68 - 0.01(TW)$ $R^2 = 0.24$	$R_s = 7.37 - 0.16T - 0.23W$ $R^2 = 0.24$	$R_s = 14.45T^{2.43}W^{-3.42}$ $R^2 = 0.22$	$R_s = 1.54 \times 10^{-7}e^{0.92T}W^{0.07}$ —

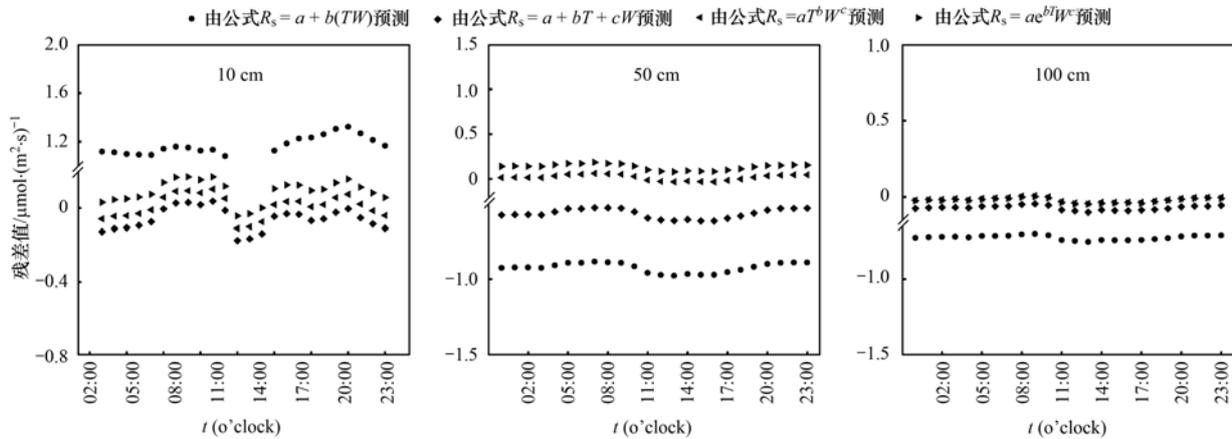


图9 不同土层土壤呼吸速率预测值和实测值得残差值

Fig. 9 Predicted and measured values of soil respiration rates are equal to the residual value at different soil depths

更高。

3 讨论

3.1 不同土层土壤呼吸速率动态变化特征

本研究中不同土层土壤呼吸速率日变化均为单峰曲线,最大值出现在 20:00 ~ 22:00,最小值在 11:00 ~ 13:00. 这与王超等^[21]的研究结果存在差异,其以杉木人工林为研究对象,分析 10、40 和 60 cm 土层土壤呼吸速率动态变化特征,并表明不同深度土壤呼吸速率日变化均呈单峰变化趋势,最大值出现在 12:00 ~ 14:00 之间,最小值出现在 07:00 ~ 09:00 之间. 这是因为本研究为生长旺盛期,虽然正午时太阳高度角最大,但地面受热或遇冷后需经过传导、对流等形式将能量不断传给大气,因此导致本研究中大气土壤温度平均值最大和最小出现在 16:00 和 07:00 (图 10),但地面植被的覆盖和土壤的热传导作用使得土壤温度存在滞后^[22],因此,导致本研究中土壤呼吸速率最大值和最小值出现在 20:00 ~ 22:00 和 11:00 ~ 13:00. 这一结论在韩乐等^[23]的研究中得到了很好地证明. 此外,不同土层土壤呼吸速率日平均值在 15:00、18:00 和 19:00 分别为 6.56、1.89 和 1.06 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,这与王胜等^[24]分析柠条人工林 10 cm 土层土壤呼吸速率在 19:00 左右最接近日均值存在差异. 本研究中 19:00 时 10 cm 土壤呼吸速率高于日均值 7.01%,而 50 cm 和 100 cm 土层接近,仅比各层平均土壤呼吸速率高 1.38% 和 0.1%,这可能是由于不同地区气温、降水和地形等存在差异,导致不同地区土壤呼吸速率最接近日均值的时间迥异. 同时,不同土层土壤呼吸速率昼夜变化有明显滞后现象,这与文献^[25]的研究结果一致. 这主要是不同土层间由于土壤的热传导作用而表现出滞后现象.

6 ~ 9 月不同土层土壤呼吸速率均存在明显的

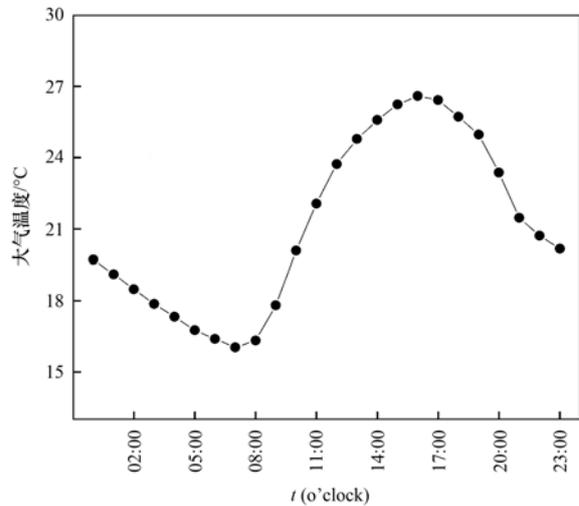


图 10 大气温度变化特征

Fig. 10 Characteristics of atmospheric temperature changes

多峰现象,这与涂志华等^[26]测量剖面土壤呼吸速率结果一致,主要是 6 ~ 9 月降水充沛,土壤温湿度条件适宜,促进微生物繁殖和代谢,加之植被生长,根系活力增强等^[27],因而导致了土壤呼吸速率出现多峰变化趋势. 而不同土层每次峰值的出现主要和降水有关,一方面,降水使得土壤结构破坏,土壤呼吸速率通过土壤孔隙和被破坏的土壤结构中得到释放^[28]. 另一方面,降水使得水分入渗和滞留,从而增加了不稳定的有机质分解,使得微生物生物量和活性增强,因此导致土壤呼吸速率出现峰值^[29]. 这一现象在各个生态系统中均被广泛观察到^[30,31]. 此外,不同土层土壤呼吸速率随深度增加而减少,Fang 等^[32]的研究也得出相似的结果. 这主要是不同土层土壤微生物生物量、有机碳、植被根系和凋落物分解等随深度增加锐减的结果^[33,34]. 植被凋落物和根系作为黄土高原生态系统碳输入的主要来源^[35],表层土壤易于接收含有较高的易分解碳,加速了微生物的分解速率,而深层土壤输入新碳较少,可直接被

微生物利用的有机碳更少,因此,可分解有机物较低。

3.2 不同土层土壤呼吸速率与土壤温湿度相关关系

土壤呼吸速率是一个多因子综合作用的生物学过程,受土壤温度(T)和土壤湿度(W)两个主要环境因子密切影响。图6反映了不同土层土壤呼吸速率与土壤温度的关系,其中10 cm土层可用指数方程描述,但深层拟合效果均较差, R^2 分别为0.96(10 cm)、0.00(50 cm)和0.01(100 cm)。结果表明,10 cm土层土壤呼吸速率与土壤温度相关性达到显著水平($P < 0.01$),这与多数学者研究结果一致^[36~38]。然而深层土壤呼吸速率与土壤温度间的相关关系还存在许多不确定性。邓钰婧等^[39]的研究表明深层(20、40和70 cm)土壤呼吸速率与土壤温度存在显著二次相关性。本研究中50 cm和100 cm土层土壤呼吸速率与土壤温度均表现为不相关,这可能是随着土层深度增加土壤温度变幅减小,加之深层土壤氧气稀薄,难分解有机质比重高^[40],土壤孔隙度、微生物活性等均较低,从而导致土壤呼吸速率对土壤温度的响应较差^[41]。这在Kellman等^[42]的研究中得到证实,这也说明不同深度土壤呼吸速率对土壤温度的响应存在差异。此外,温度敏感系数 Q_{10} 是评价土壤呼吸速率的重要指标,对未来气候变化下土壤碳平衡预测至关重要。通过计算不同土层土壤呼吸速率温度敏感系数发现该区柠条人工林表层10 cm土层土壤呼吸速率温度敏感系数为1.35,介于中国森林土壤呼吸速率温度敏感系数 Q_{10} 值1.09~6.24之间^[43]。但随着土层深度增加温度敏感系数降低,降幅达0.24~1.25,较低的 Q_{10} 可能与深层土壤有机碳含量、微生物群落结构和土壤条件等有关。本研究中深层土壤温度变化幅度较小,在18.58~18.87℃(50 cm)和16.84~16.86℃(100 cm)间波动,使氧气扩散受限、导致微生物活性和有机质分解等受到抑制^[44]。

土壤湿度对土壤呼吸速率影响可分为两方面,一方面土壤湿度通过影响微生物、有机质分解等间接影响土壤呼吸速率,另一方面通过影响土壤温度影响土壤呼吸速率。本研究通过分析6~9月的10、50和100 cm土层土壤湿度与土壤呼吸速率相关关系,结果表明在不同土层土壤呼吸速率与土壤湿度均存在显著性相关关系。其中表层10 cm土壤湿度在13.92%~14.06%间波动,土壤呼吸速率与其为显著正相关关系,这与Xu等^[45]的研究结果一致。然而,随着土层深度增加,土壤呼吸速率与土壤水分表现为负相关。这是因为试验条件下降水充沛,充足的

雨水补充使土壤中氧气稀薄,加之深层难分解有机质多,微生物活性降低,从而对土壤呼吸速率产生抑制作用^[46,47]。这一结论在郑蔚等^[48]对10~40 cm土层土壤水分与土壤呼吸速率关系的研究中得到了证实。

不同土层土壤呼吸速率受土壤温度和湿度的深刻影响,忽视这些因素在很大程度上可能低估区域的碳排放。本研究针对不同土层间土壤呼吸速率的动态变化特征及其滞后效应仅从土壤温度和湿度两方面出发进行初步探讨,而在复杂生态环境中土壤呼吸速率是一个多因子综合作用的结果,影响因素研究有限。因此,剖析深层土壤呼吸速率与环境因子间关系可作为今后的研究方向。

4 结论

(1) 黄土丘陵区柠条人工纯林不同深度土壤呼吸速率日变化均呈单峰曲线,不同土层间差异显著($P < 0.05$),由上而下相邻土层间土壤呼吸速率滞后1 h;土壤呼吸速率在不同土层间月变化均为多峰,其中10 cm土层7月达最大值,50 cm和100 cm土层较10 cm滞后,8月达峰值;不同土层间土壤温度差异显著($P < 0.05$),10 cm土壤温度为单峰曲线,50 cm和100 cm无明显波动;不同土层土壤湿度除10 cm和50 cm无显著差异外($P > 0.05$),其余土层间土壤湿度差异均显著($P < 0.05$)。

(2) 10 cm土层温度和土壤呼吸速率为显著指数相关($R^2 = 0.96$, $P < 0.05$),50 cm和100 cm不显著($R^2 < 0.02$, $P > 0.05$);土壤呼吸速率和土壤湿度在不同土层相关性均显著($P < 0.05$)。

(3) 不同土层间土壤呼吸速率对土壤温湿度的综合响应存在差异,10 cm土层土壤呼吸速率受土壤温度和土壤湿度的综合影响,但土壤温度的相对贡献率更高,而50 cm土层以下主要受土壤湿度影响。

参考文献:

- [1] IPCC Report AR6 Climate Change 2021: the physical science basis Greenpeace USA response [Z]. Athena Information Solutions Pvt. Ltd, 2021.
- [2] 姜大膀,王晓欣. 对IPCC第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 650-653.
Jiang D B, Wang X X. A brief interpretation of drought change from IPCC Sixth assessment report [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 650-653.
- [3] Mauritz M, Lipson D A. Plant community composition alters moisture and temperature sensitivity of soil respiration in semi-arid shrubland[J]. Oecologia, 2021, 197(4): 1003-1015.
- [4] Duan L M, Liu T X, Ma L Q, et al. Analysis of soil respiration and influencing factors in a semiarid dune-meadow cascade ecosystem[J]. Science of the Total Environment, 2021, 796,

- doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148993.
- [5] Li W, Wang J L, Zhang X J, *et al.* Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2018, **111**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.10.013.
- [6] Hou T T, Wang Y P, Guo F X, *et al.* Soil respiration characteristics and influencing factors for apple orchards in different regions on the Loess Plateau of Shaanxi province[J]. *Sustainability*, 2021, **13**(9), doi: 10.3390/su13094780.
- [7] Zhong Z K, Li W J, Lu X Q, *et al.* Adaptive pathways of soil microorganisms to stoichiometric imbalances regulate microbial respiration following afforestation in the Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **151**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.108048.
- [8] Sun Q Q, Wang R, Hu Y X, *et al.* Spatial variations of soil respiration and temperature sensitivity along a steep slope of the semiarid Loess Plateau[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0195400.
- [9] 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 等. 降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4527-4537.
Hao L Y, Zhang L H, Xie Z K, *et al.* Influence of precipitation change on soil respiration in desert grassland[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4527-4537.
- [10] Fischer Z, Dubis L. Soil respiration in the profiles of forest soils in inland dunes[J]. *Open Journal of Soil Science*, 2019, **9**(5): 75-90.
- [11] 刘鹏, 贾昕, 杨强, 等. 毛乌素沙地油蒿灌丛生态系统的土壤呼吸特征[J]. *林业科学*, 2018, **54**(5): 10-17.
Liu P, Jia X, Yang Q, *et al.* Characterization of soil respiration in a shrubland ecosystem of *Artemisia ordosica* in Mu Us Desert [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(5): 10-17.
- [12] 朱黎黎, 周忠发, 汤云涛, 等. 白云岩地区土壤呼吸日变化及其与土壤湿度的响应关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(8): 1947-1956.
Zhu C C, Zhou Z F, Tang Y T, *et al.* Diurnal variation of soil respiration and its response to soil temperature and humidity in the dolomite region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(8): 1947-1956.
- [13] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(6): 945-951.
- [14] 富利, 张勇勇, 赵文智. 荒漠-绿洲区不同土地利用类型土壤呼吸对温湿度的响应[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(9): 2690-2697.
Fu L, Zhang Y Y, Zhao W Z. Response of soil respiration to temperature and soil moisture under different land use types in a desert-oasis region, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(9): 2690-2697.
- [15] 孙文义, 郭胜利. 天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30**(10): 2611-2620.
Sun W Y, Guo S L. Effects of secondary and manmade forests on soil organic C and N in subsurface soil in hilly region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(10): 2611-2620.
- [16] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 等. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO₂ 通量对土壤增温的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 288-297.
Pu X T, Lin W S, Yang Y S, *et al.* Vertical profile of soil CO₂ flux in a young Chinese fir plantation in response to soil warming [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 288-297.
- [17] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, *et al.* Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(1): 416-426.
- [18] Wang S, Fu B J, Piao S L, *et al.* Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(1): 38-41.
- [19] Maier M, Schack-Kirchner H. Using the gradient method to determine soil gas flux: a review [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **192-193**: 78-95.
- [20] 董莉茹, 许明祥, 孙会. 黄土丘陵区刺槐林土壤碳通量模拟研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, **42**(6): 122-130.
Dong L R, Xu M X, Sun H. Modeling soil CO₂ flux of *Robinia pseudoacacia* woodland in the loess hilly region [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, **42**(6): 122-130.
- [21] 王超, 黄群斌, 杨智杰, 等. 杉木人工林不同深度土壤 CO₂ 通量[J]. *生态学报*, 2011, **31**(19): 5711-5719.
Wang C, Huang Q B, Yang Z J, *et al.* Analysis of vertical profiles of soil CO₂ efflux in Chinese fir plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5711-5719.
- [22] Liu Z, Zhang Y Q, Fa K Y, *et al.* Rainfall pulses modify soil carbon emission in a semiarid desert[J]. *CATENA*, 2017, **155**: 147-155.
- [23] 韩乐, 苏永红, 王尚涛, 等. 敦煌葡萄园地土壤呼吸特征及其与水热因子的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, **34**(7): 185-193.
Han L, Su Y H, Wang S T, *et al.* Respiration characteristics and the relation with the hydrothermal factors in Dunhuang vineyard [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(7): 185-193.
- [24] 王胜, 樊军, 王建国, 等. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸特征及其对水热因子的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(9): 1770-1781.
Wang S, Fan J, Wang J G, *et al.* Soil respiration and its responses to soil temperature and water in interlaced zone of water-wind erosions in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(9): 1770-1781.
- [25] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 220-235.
- [26] 涂志华, 赵阳, 郑力文, 等. 基于非分散红外(NDIR)技术的土壤剖面二氧化碳浓度的测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(4): 997-1000.
Tu Z H, Zhao Y, Zheng L W, *et al.* Detection of carbon dioxide concentration in soil profile based on nondispersive infrared spectroscopy technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(4): 997-1000.
- [27] 陈阳, 周俊杰, 陈志飞, 等. 氮磷添加下黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸速率日变化特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 5779-5792.
Chen Y, Zhou J J, Chen Z F, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on diurnal variations of soil respiration rate in the grassland and farm withdrawing cultivation on Loess Hilly-Gully region [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 5779-5792.
- [28] Vargas V P, Cantarella H, Martins A A, *et al.* Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture

- conditions[J]. Sugar Tech, 2014, **16**(2): 174-179.
- [29] Zhao M, Guo S L, Wang R. Diverse soil respiration responses to extreme precipitation patterns in arid and semiarid ecosystems [J]. Applied Soil Ecology, 2021, **163**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.103928.
- [30] Moyano F E, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **59**: 72-85.
- [31] Metcalfe D B, Fisher R A, Wardle D A, et al. Plant communities as drivers of soil respiration: pathways, mechanisms, and significance for global change [J]. Biogeosciences, 2011, **8**(8): 2047-2061.
- [32] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, et al. Erratum: similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature[J]. Nature, 2005, **436**, doi: 10.1038/nature04044.
- [33] Bae K, Lee D K, Fahey T J, et al. Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems [J]. Agroforestry Systems, 2013, **87**(1): 131-139.
- [34] 张智才, 刘峻杉, 朱锴, 等. 内蒙古典型草原土壤不同剖面深度 CO₂ 通量格局及其驱动因子[J]. 生态环境, 2008, **17**(5): 2024-2030.
Zhang Z C, Liu J S, Zhu K, et al. Temporal patterns and driving factors of CO₂ flux at different soil depth profiles on typical steppe, Inner Mongolia [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(5): 2024-2030.
- [35] 张浩, 叶成龙, 王益, 等. 云雾山草原不同深度土壤的呼吸特征及其对温度变化的响应[J]. 草业科学, 2017, **34**(2): 224-230.
Zhang H, Ye C L, Wang Y, et al. Characteristics of soil microbial respiration and its response to temperature change in different soil depths in Yunwu Mountain grassland [J]. Pratacultural Science, 2017, **34**(2): 224-230.
- [36] 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 等. 黄土高原成龄苹果园生态系统 CO₂ 通量特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2339-2350.
Yang J F, Yang X N, Wang J H, et al. Characteristics of CO₂ flux in a mature apple (*Malus demestica*) orchard ecosystem on the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2339-2350.
- [37] 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 等. 增温和增雨对黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1657-1667.
Wang X, Zhong Z S, Zhu Y F, et al. Effects of warming and increased precipitation on soil respiration of abandoned grassland in the loess-hilly regions [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1657-1667.
- [38] Lu S B, Xu Y, Fu X P, et al. Patterns and drivers of soil respiration and vegetation at different altitudes in southern China [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, **17**(2): 3097-3106.
- [39] 邓钰婧, 李小雁, 胡霞, 等. 高寒草甸生态系统降雨事件对不同深度土壤碳释放的试验分析[J]. 生态学报, 2022, **42**(8): 3315-3324.
- Deng Y J, Li X Y, Hu X, et al. Experimental analysis of soil carbon release at different depths by rainfall events in alpine meadow ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(8): 3315-3324.
- [40] Morishita T, Noguchi K, Kim Y, et al. CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of upland black spruce (*Picea mariana*) forest soils after forest fires of different intensity in interior Alaska [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, **61**(1): 98-105.
- [41] Vargas R, Allen M F. Environmental controls and the influence of vegetation type, fine roots and rhizomorphs on diel and seasonal variation in soil respiration [J]. New Phytologist, 2008, **179**(2): 460-471.
- [42] Kellman L, Myette A, Beltrami H. Depth-dependent mineral soil CO₂ production processes: sensitivity to harvesting-induced changes in soil climate [J]. PLoS One, 2015, **10**(8), doi: 10.1371/journal.pone.0134171.
- [43] 郑甲佳, 黄松宇, 贾昕, 等. 中国森林生态系统土壤呼吸温度敏感性空间变异特征及影响因素 [J]. 植物生态学报, 2020, **44**(6): 687-698.
Zheng J J, Huang S Y, Jia X, et al. Spatial variation and controlling factors of temperature sensitivity of soil respiration in forest ecosystems across China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, **44**(6): 687-698.
- [44] 张彦军, 郭胜利. 环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响 [J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1446-1456.
Zhang Y J, Guo S L. Effect of environmental factors on variation characteristics of soil microbial respiration and its temperature sensitivity [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1446-1456.
- [45] Xu W F, Li X L, Liu W, et al. Spatial patterns of soil and ecosystem respiration regulated by biological and environmental variables along a precipitation gradient in semi-arid grasslands in China [J]. Ecological Research, 2016, **31**(4): 505-513.
- [46] 李键, 刘鑫铭, 姚成硕, 等. 武夷山国家公园不同林地土壤呼吸动态变化及其影响因素 [J]. 生态学报, 2021, **41**(9): 3588-3602.
Li J, Liu X M, Yao C S, et al. Dynamic change of soil respiration and its effecting factors in different forest lands of Wuyishan National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(9): 3588-3602.
- [47] Arca V, Power S A, Delgado-Baquerizo M, et al. Seasonal effects of altered precipitation regimes on ecosystem-level CO₂ fluxes and their drivers in a grassland from Eastern Australia [J]. Plant and Soil, 2021, **460**(1-2): 435-451.
- [48] 郑蔚, 李超, 元晓春, 等. 皆伐火烧对亚热带森林不同深度土壤 CO₂ 通量的影响 [J]. 生态学报, 2017, **37**(4): 1221-1231.
Zheng W, Li C, Yuan X C, et al. The impact of clear-cutting and slash burning on soil CO₂ flux at different soil depths in a subtropical forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(4): 1221-1231.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, Ji Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)