

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸的影响

王兴^{1,2}, 钟泽坤^{1,2}, 朱玉帆^{1,2}, 王佳懿^{1,2}, 杨改河^{1,2}, 任成杰^{1,2}, 韩新辉^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 明确气候变化背景下脆弱生境地区生态系统土壤呼吸的变化趋势及驱动因素, 对理解区域碳循环以及生态系统碳源汇功能转换具有重要意义. 以陕北黄土丘陵区自然撂荒恢复 12 a 的草地为研究对象, 采用人工气候箱 (OTC) 和人工增加自然降雨的方式模拟了气候变暖、降水增加及其交互作用. 通过结合野外监测与室内分析, 探究了土壤水热、养分和土壤呼吸速率对增温增雨的响应特征, 并进一步分析了影响土壤呼吸改变的关键因素. 结果表明: ① 增温显著提高了 5 cm 土壤温度, 在整个取样年平均增加 1.34℃, 而增雨显著降低了 5 cm 土壤温度, 在整个取样年平均降低了 0.88℃, 同时增加了土壤水分含量, 2018 年和 2019 年增雨处理土壤水分含量分别高出对照 13.12% 和 16.45%. 此外, 与对照相比, 增温增雨的交互作用既增加了土壤温度, 也提高了土壤水分, 增温和增雨在影响土壤温度和水分含量上起到了相互拮抗的作用. ② 增雨显著增加了土壤有机碳、可溶性有机碳和活性有机碳含量, 改变了土壤元素计量比以及活性-惰性碳组分的分配特征, 而增温对有机碳的影响不显著. 此外, 土壤全氮全磷以及速效氮磷养分在不同处理间差异不显著. ③ 增雨显著增加了土壤呼吸速率, 而增温对土壤呼吸速率的影响主要取决于降水量和季节温度, 表现为冬季和降雨充沛季节增温对土壤呼吸速率具有显著促进作用. 土壤呼吸速率和 5 cm 土壤温度的指数拟合发现, 增雨处理下土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 最高, 达到 1.68, 而增温处理下 Q_{10} 最低 (1.50). ④ 线性回归显示土壤有机碳、可溶性有机碳和活性有机碳均与土壤呼吸速率显著正相关. 方差分解分析表明, 土壤水热和养分特性共同可解释 64.43% 的土壤呼吸速率的变异, 其中土壤水热因子是土壤呼吸速率变化的主控因子, 解释度为 31.16%. 相关性分析也表明, 土壤水热与土壤呼吸速率、土壤有机碳、可溶性有机碳、活性有机碳、碳氮比和碳磷比存在显著相关关系. 综上所述, 黄土丘陵区撂荒草地趋于暖湿的气候预测会显著影响区域水热环境和养分特征, 改变土壤活性和惰性碳的分配比例, 同时促进了区域土壤碳排放, 分析结果表明驱动黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸速率改变的关键因素是土壤水热特征.

关键词: 气候变化; 撂荒草地; 活性有机碳; 土壤呼吸速率; 呼吸温度敏感性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1657-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106094

Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions

WANG Xing^{1,2}, ZHONG Ze-kun^{1,2}, ZHU Yu-fan^{1,2}, WANG Jia-yi^{1,2}, YANG Gai-he^{1,2}, REN Cheng-jie^{1,2}, HAN Xin-hui^{1,2*}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Clarifying the changing trends and driving factors of soil respiration in fragile habitats under the background of climate change is of great significance for understanding the regional carbon cycle and the conversion of ecosystem carbon source and sink functions. This research focused on grasslands that had been naturally abandoned and restored for 12 years in the loess hilly region of northern Shaanxi, using an open top chamber (OTC) and artificially increased natural rainfall to simulate climate warming and precipitation increase and their interaction. Furthermore, we used a combination of field monitoring and indoor analysis to explore soil water content, temperature, and nutrient characteristics and the response characteristics of soil respiration rate to warming and increased precipitation and further analyzed the key factors driving changes in soil respiration. The results showed that: ① warming (W) significantly increased the 5 cm soil temperature, with an average increase of 1.34℃ throughout the sampling year, whereas the increased precipitation (P50%) treatment significantly reduced the 5 cm soil temperature, reducing the average 5 cm soil temperature during the entire sampling year by 0.88℃ and increasing the soil water content (SWC) at the same time. The SWC was 13.12% and 16.45% higher than that in the control (CK), respectively. In addition, compared with that in the CK, the treatment of warming and increased precipitation (WP50%) not only increased soil temperature but also increased SWC; in general, the increase in temperature and precipitation played an antagonistic effect on the influence of soil temperature and humidity. ② P50% significantly increased the content of soil organic carbon, dissolved organic carbon, and labile organic carbon, causing changes in the soil stoichiometric ratio and the distribution characteristics of labile-recalcitrant carbon components, whereas W did not have a significant impact on organic carbon. In addition, soil total nitrogen and phosphorus and available nitrogen and phosphorus nutrients were not significantly different between treatments. ③ P50% significantly increased the R_s rate, and the effect of W on the soil respiration rate mainly depended on the seasonal precipitation and temperature. It was demonstrated that warming in winter and seasons with abundant rainfall had a significant promotion effect on the soil respiration rate. The exponential fitting of soil respiration rate and 5 cm soil temperature found that the soil respiration temperature sensitivity (Q_{10}) was the highest under the precipitation treatment, reaching 1.68, whereas the Q_{10} was the lowest under the warming treatment (1.50). ④ Linear regression analysis showed that soil organic carbon, dissolved organic carbon, and labile organic carbon were all significantly positively correlated with soil respiration rate. Variation partitioning analysis showed that soil temperature, SWC, and nutrient characteristics explained 64.43% of the variation in soil respiration rate. The soil temperature and SWC were the main controlling factors of the change in soil respiration rate, with an explanation degree of 31.16%. Correlation analysis also showed that there was a significant correlation between SWC, soil

收稿日期: 2021-06-11; 修订日期: 2021-08-03

基金项目: 国家林业和草原局林草科技创新发展与研究项目(2020132111); 国家自然科学基金项目(41877543)

作者简介: 王兴(1997~), 男, 硕士, 主要研究方向为气候变化和土壤生态学, E-mail: wangxing1996@nwfau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hanxinhui@nwsuaf.edu.cn

temperature and respiration rate, soil organic carbon, dissolved organic carbon, labile organic carbon, C:N, and C:P. In summary, the climate prediction of abandoned grassland tending toward warm temperatures and high humidity in the loess hilly region will significantly affect the regional hydrothermal environment and nutrient characteristics, change the distribution ratio of soil labile and recalcitrant carbon, and promote regional soil carbon emissions. The analysis results showed that the key factor driving the change in soil respiration rate of abandoned grassland in the loess hilly region was soil temperature and SWC characteristics.

Key words: climate change; abandoned grassland; labile organic carbon; soil respiration rate; temperature sensitivity of soil respiration

全球气候变化问题正深刻影响着人类赖以生存的生态环境,是当今国际社会关注的重点环境问题.工业化进程中化石燃料大量消耗引起的大气中 CO₂ 及其它温室气体浓度的不断上升导致的全球气候变暖早已是不争的事实^[1],此外,全球降雨格局的区域性差异改变以及极端降水事件也伴随着温室气体增加对陆地生态系统的结构和功能产生了深远影响^[2],尤其是对与气候变化形成直接反馈关系的土壤碳排放的影响极为重要.土壤呼吸是陆地生态系统向大气排放 CO₂ 最大的源,由于土壤碳库储量巨大(约 2700Gt C 储存在土壤中),气候变化引起的土壤呼吸速率细微的改变都会显著改变大气 CO₂ 浓度^[3],反馈于全球碳收支,加速或减缓气候变化进程.现有的研究普遍认为气候变暖可刺激土壤呼吸,加速土壤碳排放,并且呈现出多种相关关系(线性、指数和幂函数方程等)^[4].同样,降雨改变作为全球气候变化的另一个关键因子,其与土壤呼吸的响应也得到了广泛研究,尤其是在极度干旱或者极度湿润的地区^[5],但研究结果却不尽相同.例如 Wu 等^[5]的研究发现降雨增加可显著提高土壤呼吸速率,反之则显著降低土壤呼吸速率;而 Vidon 等^[6]的研究却发现降雨增加引起土壤水分饱和甚至积水抑制土壤呼吸.气候变化往往有多个因子共同发生,多个环境变化因素的相互作用可能会增强或者抵消单因素对土壤的影响^[7],因此对于土壤温度和水分交互作用的研究也受到了广泛关注^[8].以往的大多数研究表明当土壤水分不再是限制因子时,土壤温度会和土壤呼吸呈正相关,然而近期的研究表明当土壤水分和温度同时增加时,温度对土壤呼吸的促进作用可能会减弱甚至消失^[9].由此可见,气候变化条件下,尤其是变暖和降雨的共同变化下土壤碳排放的响应更依赖于温度还是水分条件尚未可知.因此,充分了解土壤呼吸在区域尺度上对气候变化的响应和适应过程,有助于加强对未来陆地生态系统碳循环过程的认识.

黄土高原地区水土流失严重,植被覆盖率低,是我国典型的生态脆弱区和生态恢复重点区域,也是世界上生态环境最为脆弱的地区之一.自 1999 年在该地区实施退耕还林还草工程以来,该地区的植被覆盖度从 1999 年的 31.6% 提升到了 2018 年的 62.8%,生态环境得到了极大地改善^[10],但这种形

成时间较短且极为脆弱的生态系统,对于外界环境因子的变化更加敏感,极易受到气候变化的严重影响^[11].多个研究通过调用和拟合气象数据预测未来黄土高原中部地区呈现气候变暖和降雨增加的总体趋势,但降水多集中于夏季,总降水日数呈现减少趋势,降水强度增加趋势明显^[12].

面对未来的黄土高原地区暖湿的气候预测,本文以黄土丘陵区作为研究区域,以自然撂荒恢复形成的次生草地生态系统作为研究对象,通过野外模拟土壤增温和降水增加,探究气候变化引起的水热因子的改变对撂荒草地土壤碳排放的影响特征,并结合土壤活性和惰性碳组分的变化特征,分析土壤碳组分与土壤呼吸的相关性,以期研究脆弱生境地区气候变化背景下生态系统土壤碳循环提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于陕西省延安市安塞区五里湾流域,属于典型的黄土丘陵沟壑植被恢复区(东经 109.31°~109.35°、北纬 36.85°~36.86°),平均海拔 1 061~1 371 m.气候类型为中温带大陆性半干旱季风气候,年平均降雨量 525 mm 左右,主要集中于 7~9 月,年均温 9.5℃,无霜期 160 d 左右,年日照时数 2 352~2 573 h,日照百分率达 50%~70%,光能丰富,降水量少且集中,蒸散量大,干燥度在 1.4~2.0 之间.流域内的土壤以黄土母质发育而成的黄绵土为主,土壤贫瘠,土质疏松,抗侵蚀能力差^[13].自 1999 年大规模退耕还林还草工程实施以来,该区域植被恢复加速推进,大面积的农田转为林地、灌木地或者撂荒后成为次生草地.

1.2 样地布设

于研究区域经过实地考察后选取了干扰程度较低的平坡撂荒地建立长期模拟增温和降雨处理的试验场,所选样地 2006 年被撂荒,撂荒前主要种植玉米和谷子.每两个相邻样方之间横向设置 >5 m 的过渡带,纵向设置 >1 m 的过渡带.各样方四周隆起 20 cm,用于阻止地表径流的流入和样方内雨水的流出.每个样方实际有效面积为 2 m×2 m.共计 4 种处理:即对照(CK)、增温(warming, W)、增雨 50%

(+ 50% precipitation, P50%)、增温增雨 50% (Warming + 50% precipitation, WP50%)。每种处理

设有 3 个重复。研究区位、样方分布和增雨装置示意图如图 1, 试验样地基本特征见表 1。

表 1 试验样地基本特征

Table 1 Geographical features and dominant species of the experimental sites

样地	位置	坡向	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	优势科	优势物种
撂荒草地	109.355°E 36.869°N	北偏西 18°	1.16	15	43	42	菊科和禾本科	铁杆蒿、猪毛蒿、 狗尾草和糙隐子草

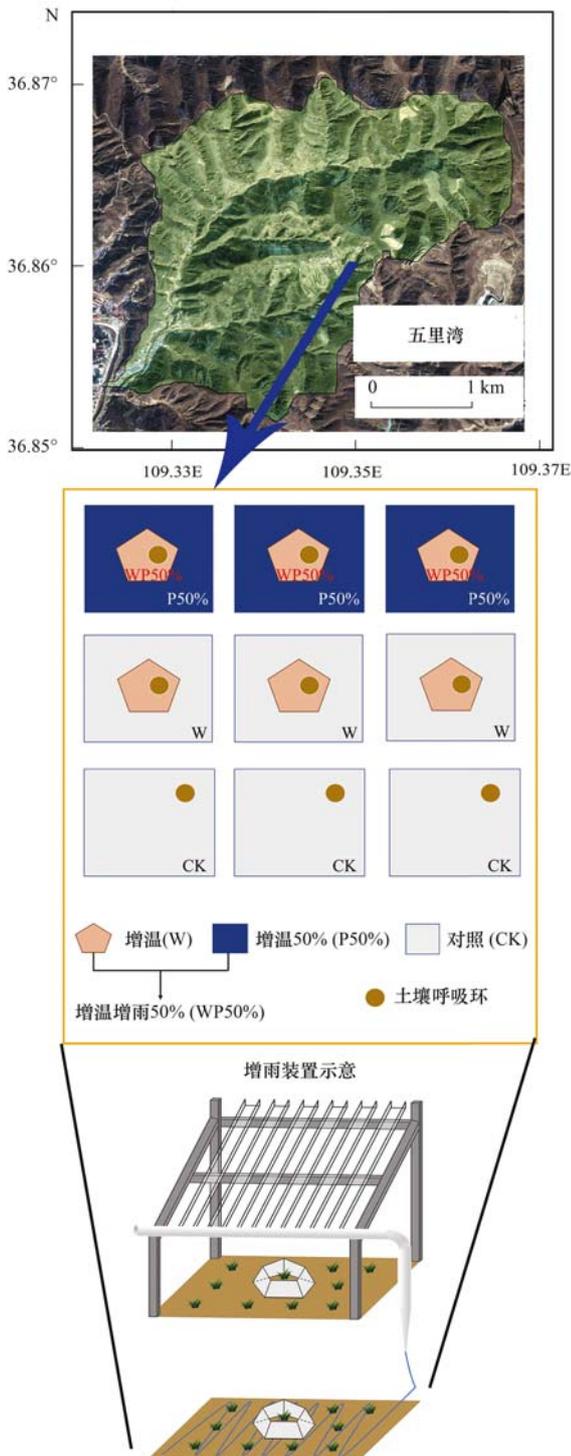


图 1 研究区位和试验样方分布示意

Fig. 1 Location of study area and schematic diagram of quadrat distribution

1.3 试验装置

本研究采取传统开顶式气候箱 (open top chamber, OTC) 进行模拟增温。OTC 底面积为 1.10 m^2 , 高 0.51 m , 顶部开口面积为 0.79 m^2 , 四周采用有机玻璃纤维板密闭。增雨采用自制的挡雨架截留并通过管道流入增雨样方内。顶端安装的挡雨板遮挡面积为减雨样方面积的 50%, 挡雨架上端离地 $1.40 \sim 1.80 \text{ m}$ 处, 用 25 cm 宽的瓦面状透明凹槽板搭建相应面积的挡雨板, 并均匀分布在镀锌钢管架上。挡雨板截留的雨水经过 PVC 导水槽流入集雨装置中, 随即通过导流槽流到增雨样方, 从而实现了增雨 50% 的处理。在每个增雨处理样方中心安装一个 OTC 实现增温和降雨量变化的交互处理。在每个处理的样方中安装一个内径为 20 cm , 露地高度为 5 cm 的 PVC 圈作为呼吸环, 用于搭配土壤呼吸仪测定土壤呼吸。样地布置完成后, 对试验所在核心区域四周修建围栏, 防止被其他外来人员和动物所破坏。2016 年末开始搭建试验场, 2017 年 7 月搭建完毕后, 所有样方自然恢复一年, 于 2018 年 7 月开始第一次试验采样。

1.4 土壤样品采集与处理

土壤样品分别于处理后的第一年 (2018 年 7 月) 和第二年 (2019 年 7 月) 采集。在有效采样区 (避开可能具有边际效应的位置) 用传统土钻法 (直径为 9 cm) 随机钻取 3 个 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土样, 将石块、植物残根等分离后充分混合, 随后过 2 mm 筛并分装为干土和鲜土, 鲜土存放在有冰盒的保温箱中运输至实验室, 并在 -20°C 冰箱长期保存, 干土经彻底自然风干后密封保存。

1.5 土壤水热因子和养分含量测定方法

土壤含水量在每次取样结束后立刻测定, 采用烘干法测定 (105°C 烘干至恒重); 土壤容重采用环刀法测定; 土壤机械颗粒组成包括黏粒 ($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒 ($2 \sim 50 \mu\text{m}$) 和砂粒 ($50 \sim 2000 \mu\text{m}$) 并采用激光粒度分析仪 (Mastersizer-2000, 马尔文仪器有限公司, 英国) 测定^[14]; 土壤 pH 采用土壤-蒸馏水悬浮液 (质量体积比为 $1:2.5$) 摇匀 ($200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 后静置 60 min) 后使用 pH 计测得^[13]; 5 cm 土壤温度于

2018年7月至2019年11月在测定土壤呼吸的同时采用Li-8100A仪器自带的热电偶温度探头在呼吸环周围测定. 土壤有机碳采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[13]. 土壤可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和可溶性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON): 采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸钾(K_2SO_4)溶液浸提, 过滤后采用TOC-TN分析仪器(TOC-L CPH, 岛津公司, 日本)测定. 土壤活性有机碳(labile organic carbon, LOC)和惰性有机碳(recalcitrant organic carbon, ROC)采用HCl水解法提取, 之后采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定得到惰性有机碳含量, 活性有机碳含量采用差值法可得. 土壤全氮(total nitrogen, TN)在用硫酸钾-无水硫酸铜(质量比为10:1)作为催化剂, 并用浓硫酸消煮后采用连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3, SEAL公司, 德国)测定, 土壤全磷(total phosphorus, TP)在浓硫酸-高氯酸消煮后采用连续流动分析仪测定. 土壤速效磷(available phosphorous, AP)采用碳酸氢钠浸提法测定, 土壤硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)采用氯化钾(KCl)提取, 在连续流动分析仪上比色测定.

1.6 土壤呼吸速率测定方法

土壤呼吸 R_s (soil respiration): 于2018年7月至2019年11月的每个月末, 选择晴好的天气, 在09:00~11:00采用Li-8100A便携式土壤呼吸测量系统(Li-Cor, 美国)测定土壤呼吸.

1.7 数据处理

土壤呼吸温度敏感性根据方程^[15]: $R_s = \alpha e^{\beta T}$ 与5 cm土壤温度数据拟合而得, $Q_{10} = e^{10\beta}$, 式中, R_s 为呼吸速率, α 为土壤基础呼吸速率(0°C 时的土壤呼吸速率), β 为温度反应系数, T 为土壤表层温

度, Q_{10} 为温度每增加 10°C 土壤呼吸增加的倍数.

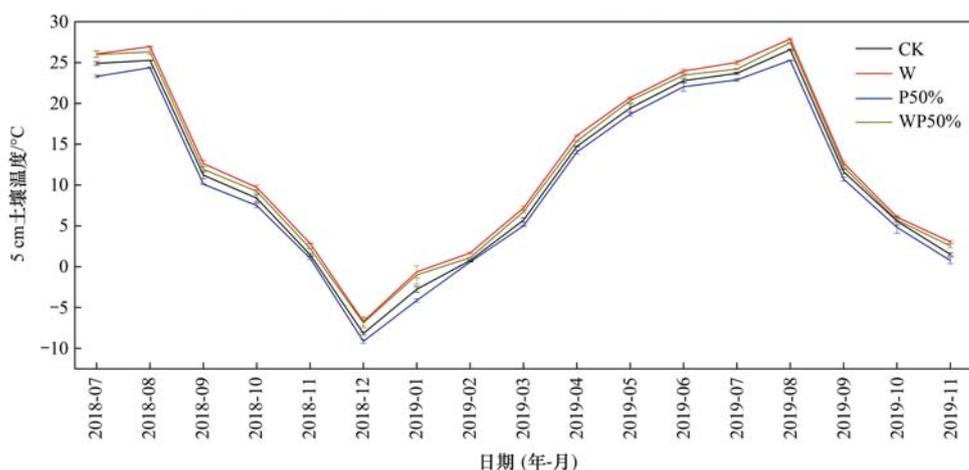
使用EXCEL 2016和SPSS 22.0软件对测定数据进行常规计算和标准化处理, 其中, 不同处理下土壤理化性质以及呼吸速率的平均值的差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA), 均采用最小显著差异(least significant difference, LSD)法进行多重比较($P=0.05$ 或 0.01). 采用双因素方差分析法探究增温和增雨处理及其交互作用对土壤呼吸速率的影响显著性, 分别在 $P<0.05$ 水平和 $P<0.01$ 水平上评价差异的统计学意义. 采用OriginPro 2016绘图并对有机碳和土壤呼吸速率进行线性拟合, 其中的土壤呼吸速率值分别取2018年和2019年生长季节(7~9月)的平均值. 指数拟合采用OriginPro 2016完成并绘图. 斯皮尔曼相关性分析以及可视化采用R(V. 4.0.3)中的Corrplot包实现, 结果的显著性采用Hmisc包计算; 方差分解分析(VPA)采用R(V. 4.0.3)中的Vegan包的varpart函数实现.

2 结果与分析

2.1 土壤微环境的响应特征

数据表明, 5 cm土壤温度在整个取样时间范围呈现出降低-升高-降低的总趋势, 在12月最低, 8月最高. 增温处理增加了5 cm土壤温度, 增雨50%处理显著降低了5 cm土壤温度, 土壤温度在不同处理之间基本表现出增温>增温增雨>对照>增雨处理的趋势(图2). 与对照相比, 整个取样期5 cm土壤温度在增温处理平均增高了 1.34°C , 增雨处理平均降低了 0.88°C , 增温增雨处理平均增高了 0.83°C (图2).

土壤水分含量数据表明在两个取样年份表现出较大的年际差异, 2018年各个处理下的土壤水分含



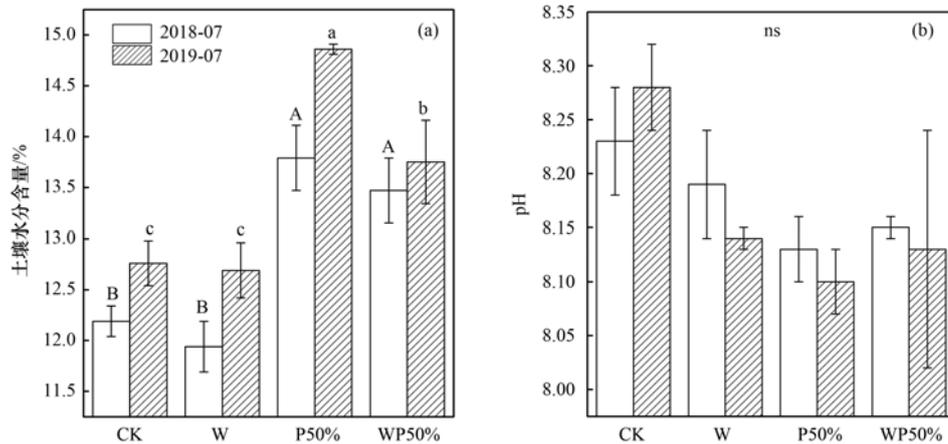
CK:对照; W:增温; P50%:增雨50%; WP50%:增温增雨50%,下同

图2 不同气候变化处理下5 cm土壤温度的月监测

Fig. 2 Monthly monitoring map of 5cm soil temperature under different climate change treatments

量均显著低于 2019 年[图 3(a)]. 与对照相比, 增雨以及增温增雨交互处理均显著增加了土壤水分含量(在 2018 年分别增加了 13.12% 和 12.46%; 2019 年分别增加了 16.45% 和 7.75%), 而增温和对照处理的土壤水分含量差异不显著, 但增温和增雨的交互作用相对单独增雨处理而言, 土壤水分含量有降

低的趋势, 说明增温和增雨的交互作用会削弱由单个因子所引起的土壤水分含量变化, 但处理对土壤水分的直接影响(增雨)大于间接影响(增温). 整体上土壤水分含量在 2018 年和 2019 年的处理间变化趋势相似. 土壤 pH 在各个处理下均呈降低趋势, 但差异不显著, 均维持在 8.10~8.28 之间.



不同大小写字母分别表示在 2018 年和 2019 年的不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平有显著差异, ns (not significant) 表示各处理间差异均不显著

图 3 不同气候变化处理下土壤水分含量和 pH 的变化

Fig. 3 Changes in soil moisture content and pH under different climate change treatments

2.2 土壤养分含量的响应特征

气候变化处理下土壤养分含量变化特征见表 2, 其中增雨显著增加了土壤有机碳含量 ($P < 0.05$), 而全氮和全磷含量在各个处理间均无显著差异. 由于土壤有机碳含量在不同处理之间的差异, 导致土壤化学计量比发生了相应的变化, 尤其是土

壤 C:N 和 C:P 比, 2018 年土壤 C:N、C:P 比变化范围分别在 10.08~13.28 和 7.42~9.47, 2019 年土壤 C:N 和 C:P 比变化范围分别在 10.04~14.23 和 7.99~10.46. 2018 和 2019 年增雨处理的土壤碳磷比均显著高于对照处理, 此外, 2019 年土壤碳氮比也显著高于其他处理 ($P < 0.05$).

表 2 土壤养分含量变化特征¹⁾

Table 2 Variation characteristics of soil nutrient content

年份	理化性质	CK	W	P50%	WP50%
2018	$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.71 ± 0.25B	4.94 ± 0.10B	5.82 ± 0.11A	5.24 ± 0.17B
	$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.46 ± 0.01A	0.48 ± 0.02A	0.45 ± 0.06A	0.46 ± 0.04A
	$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.64 ± 0.03A	0.62 ± 0.01A	0.61 ± 0.01A	0.67 ± 0.06A
	C:N	10.08 ± 0.43A	10.29 ± 0.48A	13.28 ± 1.72A	11.45 ± 0.57A
	C:P	7.42 ± 0.51B	7.88 ± 0.25AB	9.47 ± 0.09A	7.96 ± 0.90AB
	N:P	0.73 ± 0.04A	0.77 ± 0.05A	0.73 ± 0.09A	0.70 ± 0.11A
	$\omega(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	39.78 ± 3.02B	45.89 ± 3.77AB	53.97 ± 4.22A	49.80 ± 2.50AB
	$\omega(\text{DON})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.15 ± 0.27A	7.75 ± 0.13A	7.02 ± 0.57A	7.64 ± 0.76A
	$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.13 ± 0.27A	3.30 ± 0.58A	3.44 ± 0.05A	3.22 ± 0.14A
	$\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.48 ± 0.45B	2.88 ± 0.16AB	2.7 ± 0.23AB	3.50 ± 0.08A
$\omega(\text{NO}_3^- - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.57 ± 0.15A	1.27 ± 0.19AB	0.83 ± 0.20B	1.16 ± 0.19AB	
2019	$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.92 ± 0.17B	5.09 ± 0.39B	6.47 ± 0.09A	5.65 ± 0.23B
	$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.49 ± 0.02A	0.49 ± 0.04A	0.45 ± 0.01A	0.51 ± 0.03A
	$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.61 ± 0.01A	0.60 ± 0.01A	0.61 ± 0.01A	0.61 ± 0.01A
	C:N	10.04 ± 0.28B	10.45 ± 1.51B	14.23 ± 0.35A	11.12 ± 0.58B
	C:P	7.99 ± 0.25B	8.41 ± 0.57B	10.46 ± 0.15A	9.22 ± 0.50AB
	N:P	0.79 ± 0.03A	0.82 ± 0.07A	0.73 ± 0.02A	0.83 ± 0.06A
	$\omega(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	53.87 ± 2.33B	61.5 ± 3.74AB	67.25 ± 3.61A	69.63 ± 4.1A
	$\omega(\text{DON})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.58 ± 1.06A	8.35 ± 0.63A	7.91 ± 0.65A	8.72 ± 0.73A
	$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.29 ± 0.26A	3.62 ± 0.53A	4.19 ± 1.74A	3.65 ± 0.04A
	$\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.60 ± 0.29A	3.10 ± 1.0A	3.96 ± 0.52A	3.22 ± 0.28A
$\omega(\text{NO}_3^- - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.63 ± 0.20A	1.22 ± 0.05A	1.13 ± 0.14A	1.31 ± 0.57A	

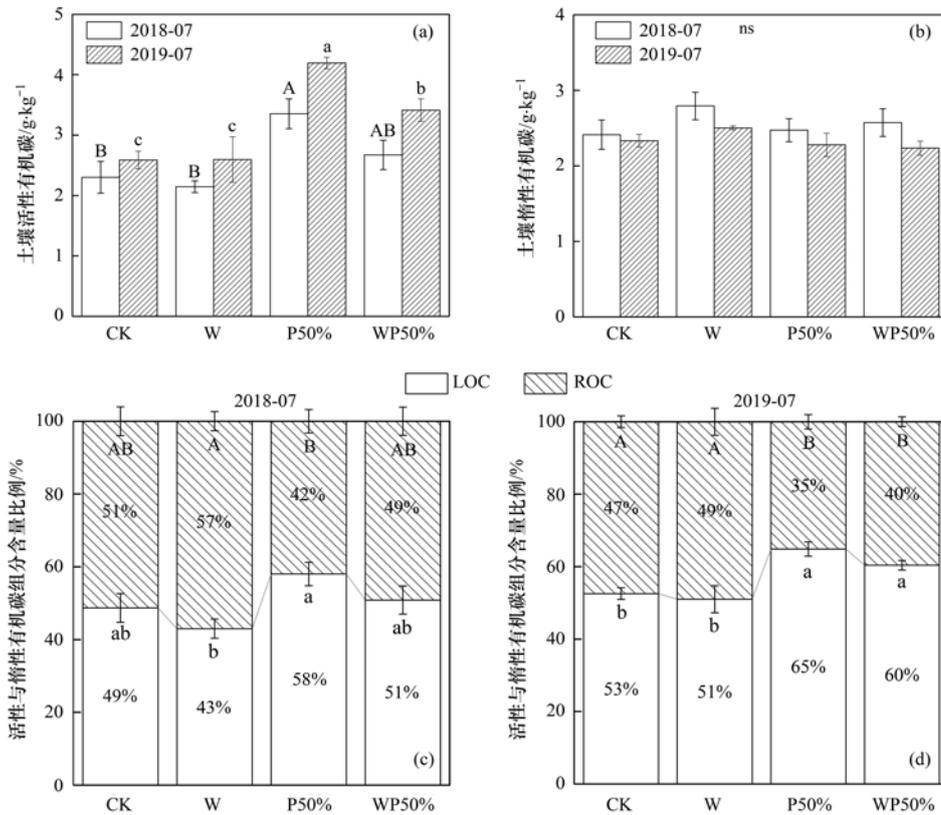
1) 同一行不同大写字母表示在不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平有显著差异; CK: 对照; W: 增温; P50%: 增雨 50%; WP50%: 增温增雨 50%, 下同

土壤活性有机碳和惰性碳组分以及分配比例在不同处理和不同取样年的变化趋势如图 4 所示. 增雨在两个取样年均显著增加了土壤活性有机碳组分含量, 而增温增雨处理在 2019 年显著增加了土壤活性有机碳组分含量 [图 4 (a)], 但惰性有机碳含量在两个取样年均未发现在不同处理下有显著差异 [图 4 (b)]. 从分配比例特征图可看出, 增温在两个取样年均不显著地降低了 LOC 占 SOC 的比值, 增加

了 ROC 占 SOC 的比值, 而增雨及增温增雨的交互均增加了 LOC 占比 [图 4 (c) 和 4 (d)], 尤其是在 2019 年增幅均达到显著水平 ($P < 0.05$).

2.3 土壤碳排放的响应特征

土壤呼吸速率在整个测量期间的变化趋势如图 5 所示, 与土壤表层温度变化趋势基本相似, 均为生长旺盛季较高, 非生长季较低的趋势. 而由于 2019 年生长季降雨量显著高于 2018 年, 导致 2019 年生



(c)2018-07, (d)2019-07; LOC 表示活性有机碳; ROC 表示惰性有机碳; (a) 和 (b) 中不同大小写字母分别表示 2018 年和 2019 年的不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平有显著差异, (c) 和 (d) 中不同大小写字母分别表示惰性有机碳占比 (ROC) 和活性有机碳占比 (LOC) 在 $P < 0.05$ 水平有显著差异

图 4 不同气候处理下土壤活性和惰性碳组分含量的变化趋势以及分配比例特征

Fig. 4 Trend of soil labile and recalcitrant organic carbon content and distribution ratio characteristics under different treatments

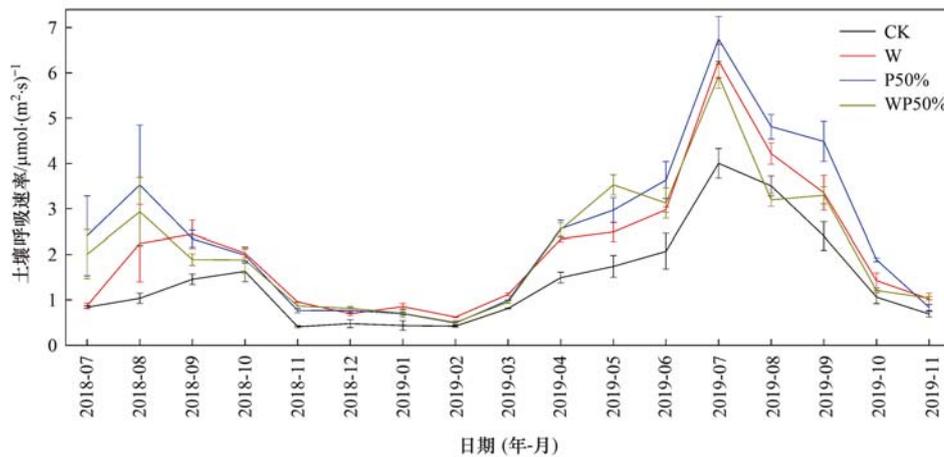


图 5 不同气候变化处理下土壤呼吸速率的月监测

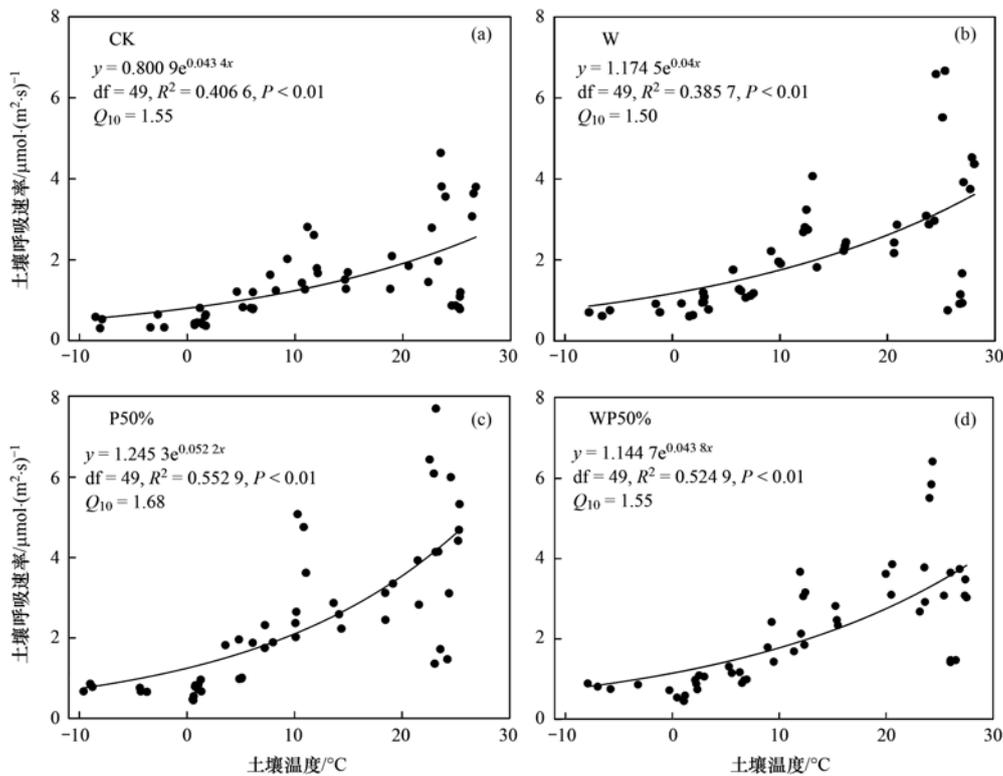
Fig. 5 Diagram of soil respiration rate for each month under different climate change treatments

长季土壤呼吸速率(以 CO_2 计,下同)与 2018 年同期相比平均增长了 $2.37 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (2.2 倍),尤其是 2019 年 7 月相比 2018 年 7 月增加了 $3.96 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (3.37 倍)(图 5). 增温对土壤呼吸的影响在不同的降雨月份表现出不同的作用,冬季增温对土壤呼吸的促进作用高于其他处理(图 5). 取样年份、增温、增雨及其交互作用对于土壤呼吸速率的三因素方差分析结果见表 3,取样年、增雨和增温增雨的交互作用对土壤呼吸速率的影响均达到了极显著水平($P < 0.001$).

2.4 土壤碳排放与土壤理化特性的关系分析

采取指数方程($R_s = \alpha e^{\beta T}$)对整个测量期间的土壤呼吸速率和 5 cm 土壤温度进行了指数拟合(图

6),并采取公式: $Q_{10} = e^{10\beta}$ 计算了土壤呼吸温度敏感性. 土壤呼吸速率和土壤温度呈现一定的指数关系,土壤温度分别解释了 40.66% (CK)、38.57% (W)、55.29% (P50%) 和 52.49% (WP50%) 的土壤呼吸速率的变异, P 均小于 0.01. 增雨处理以及增温增雨交互处理的土壤温度对土壤呼吸速率的解释度高于对照和单独增温处理. 各个处理下的土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 介于 1.50 ~ 1.68 之间,增雨处理和增温处理分别对应呼吸温度敏感性的最高和最低值,但差异不显著[图 6(b) 和图 6(c)]. 土壤呼吸速率与土壤有机碳和活性有机碳含量显著正向相关($R^2 = 0.3072$, $P < 0.01$; $R^2 = 0.3998$, $P < 0.01$)[图 7 和图 8(a)].



df 表示自由度

图 6 不同处理下土壤呼吸速率和土壤温度的指数拟合关系以及土壤呼吸温度敏感性 Q_{10}

Fig. 6 Exponential fitting relationship between soil respiration rate with soil temperature and the temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}) under different treatments

利用方差分解(VPA)定量分析了土壤水热因子和土壤养分特征两个组别对土壤呼吸速率变异的贡献量[图 8(a)]. 土壤水热因子和土壤养分特征共可以解释 64.43% 的土壤呼吸速率的变异,其中土壤水热因子、土壤水热因子和养分特征的交互、土壤养分特征分别可以解释 31.16%、31.04% 和 2.22% 的土壤呼吸速率的变异量. 说明土壤水热因子是土壤呼吸速率变异的关键驱动因子. 土壤水热

因子和土壤养分特征、土壤呼吸速率和土壤养分特征的斯皮尔曼相关性分析结果见图 8(b). 土壤含水量与土壤有机碳、可溶性有机碳、活性有机碳、C:N 和 C:P 比存在显著的正相关,而 5 cm 土壤温度呈现完全相反的负相关. 土壤呼吸速率与土壤含水量显著正相关,与 5 cm 土壤温度负相关,与土壤有机碳含量及可溶性有机碳、活性有机碳含量显著正相关.

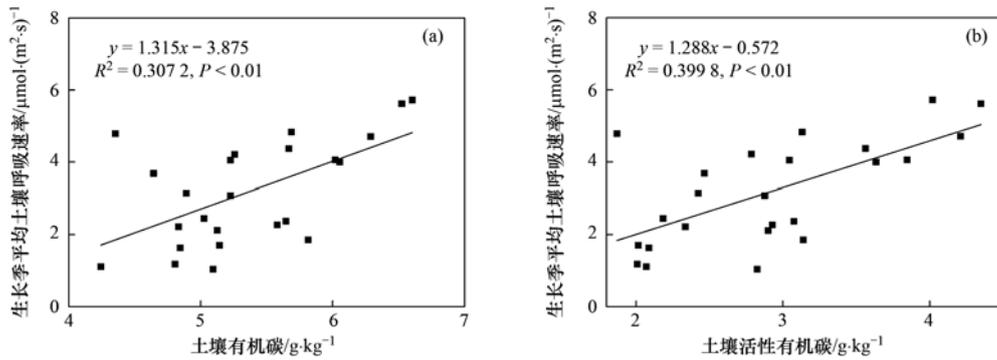
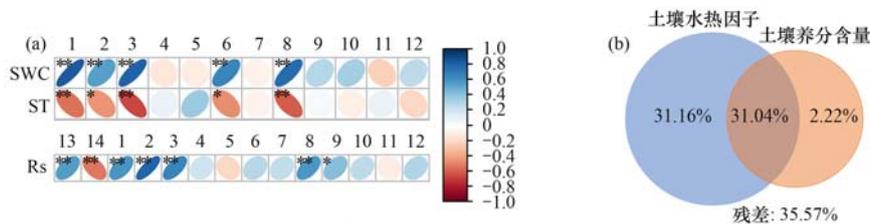


图 7 生长季平均土壤呼吸速率与土壤有机碳和活性有机碳的线性拟合

Fig. 7 Linear fitting of soil respiration rate, soil organic carbon, and labile organic carbon



(a) 为土壤水热和养分含量、土壤呼吸速率的斯皮尔曼相关性分析,其中的椭圆图形上端朝右(蓝色)和上端朝左(红色)分别代表正相关和负相关,颜色越深和图形越扁表示相关性越强,*表示显著($P < 0.05$),**表示极显著($P < 0.01$);1. SOC:土壤有机碳,2. DOC:可溶性有机碳,3. LOC:活性有机碳,4. TN:全氮,5. TP:全磷,6. C:N,7. N:P,8. C:P,9. DON:可溶性有机氮,10. $\text{NH}_4^+\text{-N}$:铵态氮,11. $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝态氮,12. AP:速效磷,13. SWC:土壤水分含量,14. ST:5cm 土壤温度;(b) 为土壤呼吸速率受土壤水热因子、养分特征影响的方差分解分析,其中重叠部分表示共同影响,残差表示未解释的变异性

图 8 影响土壤呼吸速率的关键因子分析

Fig. 8 Analysis of key factors affecting soil respiration rate

表 3 取样年份、增温、增雨及其交互作用对于土壤呼吸速率的三因素方差分析结果¹⁾

Table 3 Results (P -values) of three-way ANOVA on the effects of year, warming, precipitation, and their interactions on soil respiration rate

因子	自由度 (df)	土壤呼吸 (R_s)	
		F	P
Y	1	107.082	<0.001
W	1	1.414	0.252
P	2	24.950	<0.001
W × P	2	28.209	<0.001
Y × W × P	2	2.386	0.142

1) Y 表示取样年份, W 表示增温效应, P 表示增雨效应, × 为交互作用; 表内黑体字表示有显著性, $P < 0.05$ 表示有显著影响, $P < 0.01$ 表示有极显著影响

3 讨论

3.1 土壤水热因子、养分特征对增温增雨的影响

本研究中,黄土丘陵区撂荒地单独增温处理的 5 cm 土壤年平均温度为 13.06°C,对照处理为 11.78°C,相差 1.28°C,与之相比, Bai 等^[16]的研究在黄土高原地区的控制试验采用 OTC 装置实现了 1.4°C 左右的土壤增温,与本研究的 1.28°C 增幅接近. 一般来说,土壤增温势必会影响土壤水分,但土壤水分的降低幅度还受到气象条件、立地条件以及

不同处理下的植被特征的影响. 本研究中,增温加速了水分蒸发降低了土壤含水量,而增雨显著增加了土壤水分(13.12%),且在交互处理中,增雨会弱化增温引起的土壤水分流失,最终引起土壤水分显著增加,这说明增雨对土壤水分的增益效果显著高于增温对水分的负面影响. 上述土壤水热状况的变化特征说明本研究采用的试验处理方法有效地模拟了气候变暖和降雨增多以及二者的交互作用. 此外,土壤 pH 在经过增温和增雨处理后有微弱的降低趋势,但与对照相比差异不显著,可能与处理持续时间较短有关^[17],有待于后续试验的验证.

土壤有机碳是有机质含量的化学量度,衡量土壤有机碳含量对气候变化的响应至关重要. 本研究中,增雨和增温增雨的交互作用显著增加了土壤有机碳以及可溶性有机碳含量,表明土壤水分增加促进了植物生长代谢固碳作用和改善了腐殖质分解环境,使得微生物分解腐殖质的速度加快,导致更多的碳输入到土壤中,从而促进了有机碳的积累,与之伴随的是由于植物根系和微生物的活跃度较高,土壤呼吸速率也在增雨和增温增雨的交互下显著增加^[18]. 此外,由于土壤有机质的溶解往往是吸热过程,因此温度升高会直接促进植物残体和有机质向

可溶性有机碳的溶解转化过程,进一步促进可溶性有机碳含量的增加^[19,20],故而导致了增温增雨的交互作用下土壤可溶性有机碳含量相对较高.对于土壤元素计量特征,增雨和增温增雨的交互作用显著增加了土壤的 C:N 和 N:P,说明土壤 N 和 P 元素相对土壤 C 元素的缺乏,且在气候变化处理下,N 和 P 元素的增加缓慢也表明该生态系统受到土壤 N、P 元素的限制较为严重.土壤不同活性有机碳组分含量可深刻反映土壤碳库的分配特征,对于明确土壤碳库结构及其稳定性具有重要意义.本研究中,增雨和增温增雨的交互显著增加了 LOC 含量和占比,这与 Zhou 等^[21]的研究结果相一致,这可能是由于 LOC 含有大量的外源新鲜碳,是反映植被输入和微生物分解的重要部分,因此会对外界环境条件产生快速的响应而增雨促进生态系统净生产力和植被生物量增加,从而使得植被向土壤输入新鲜碳的速率加快,故而导致 LOC 含量以及分配比例增加^[22].本研究发现,相同的增雨条件下,增温降低了 LOC 含量,增加了 ROC 含量,这和单独增温的影响趋势相同,说明增温和增雨在调控土壤活性和惰性有机碳组分的过程中具有一定的拮抗交互作用,且交互作用中增雨占据主导地位. Song 等^[18]的研究同样得出在水分有效性为主导的干旱半干旱草原,降水增加的正效应远大于土壤温度增加的负效应.

3.2 驱动土壤呼吸变异的关键因素

土壤呼吸与土壤温度和水分含量具有良好的相关性.本研究结果显示,在不同处理之间,增雨在生长季土壤呼吸速率较其他处理高,但在较为寒冷的冬季,增温处理土壤呼吸速率较其他处理高,这说明增温增雨显著改变了土壤呼吸速率,但影响方向和程度在不同季节有所差异.其中增雨对土壤呼吸速率的影响极显著(表 3),增雨显著增加了土壤呼吸速率,尤其是在 2019 年生长季,由于在本研究区域降雨时间较为集中,在 7 月之前降雨量甚少,因此土壤在 7 月之前处于水分相对亏缺状态,因此在这种情况下,生长季丰富的降雨引发的干湿交替使得土壤呼吸速率随着土壤水分的增大而急剧增加^[23],且这种促进作用有可能会持续 2~3 d^[24],有研究表明,降雨激发导致的土壤呼吸增量可以占到全年土壤呼吸总量的 16%~21%^[25],这可能是 2019 年生长季呼吸速率显著高于 2018 年的原因(与 2018 年同期相比,增幅最多达到了 3.37 倍).而增温引起土壤呼吸速率的改变主要取决于降雨量和季节温度,在降雨较多的生长季增温会引起土壤呼吸速率显著高于对照处理, Wang 等^[26]的研究也表明在水分状况良好的生态系统,增温可以显著增强呼吸效应.此

外,在寒冷的冬季,由于温度是土壤微生物活动的限制性因子,因此增温对土壤呼吸速率的促进作用也相对较为显著. Fierer 等^[27]对土壤呼吸和温度的拟合研究也表明在温度较低时,根系和土壤微生物的代谢活动主要受温度变化控制,因此温度升高会引起呼吸速率的显著改变.

通过计算 6 种处理下的土壤呼吸温度敏感性发现,该区域撂荒地土壤呼吸温度敏感性介于 1.50~1.68 之间,这与周小刚等^[28]在黄土高原地区和 Wang 等^[29]收集的全球各生态系统的的结果中撂荒草地的 Q_{10} 变化范围一致.本研究中,增雨增加了 Q_{10} ,而增温降低了 Q_{10} ,说明 Q_{10} 受土壤温度和水分的影响.有研究表明,土壤呼吸的温度敏感性的拟合方程在低温下的拟合效果明显好于高温时的拟合效果,这说明温度较低时,温度是限制根系和微生物代谢活动的关键因子,而温度较高时,温度不再是限制因子,因此温度的变化对土壤呼吸速率的影响力也就随之下降,从而导致 Q_{10} 降低^[27],也有一些研究表明,在干旱生态系统中,温度升高会降低土壤水分导致土壤呼吸底物扩散受到影响从而导致土壤呼吸与温度解耦联^[30],最终导致 Q_{10} 降低.本研究中,增雨引起的土壤含水量增加会提高 Q_{10} ,这与 Almagro 等^[31]的研究结果相一致,主要是由于在受水分限制的地区,增雨会增加可溶性物质的扩散速度,为胞外酶和底物的接触反应创造条件,最终导致 Q_{10} 增高.

土壤呼吸速率和有机碳的线性拟合、方差分解分析以及相关性分析表明,气候变化引起的土壤水热状况和土壤理化特性的改变会深刻影响土壤碳排放.由于温度和水分处理导致土壤碳库活性组分分配改变引起的土壤有机质矿化过程(土壤呼吸的微生物过程)的加速,因此,土壤碳组分和土壤呼吸关系密切,尤其是土壤活性有机碳和土壤呼吸之间呈正向相关性(图 6 和图 7)^[32].本研究中,土壤呼吸强度和土壤水分含量呈极显著正相关,土壤水分主要通过促进土壤碳矿化(无机碳酸盐分解过程)、缓解根系的水盐胁迫从而增加植物浅层细根的快速生长进而促进根系呼吸、增加微生物呼吸底物及其可利用性促进微生物呼吸、缓解微生物呼吸的水盐限制,提高微生物活性、改变微生物群落,增加微生物总量和物种丰度^[33~36]等来促进土壤碳排放.方差分解分析结果也表明,土壤水热对土壤呼吸变异的解释度远高于由增温增雨处理引起的土壤养分特征的改变所造成的土壤呼吸速率的变异,即土壤水热的直接影响大于间接影响,因此气候变化引起的土壤水热状况的改变是土壤呼吸速率变异的关键驱动

因素.

4 结论

(1) 增温增雨处理显著改变了土壤水热环境, 增温增雨的交互作用对 5 cm 土壤温度和水分的影响具有相互拮抗的作用.

(2) 增温增雨会显著改变土壤养分特征、尤其是增雨 50% 显著增加了土壤碳含量(总有机碳、可溶性有机碳和活性有机碳), 继而改变了土壤元素计量特征.

(3) 增雨极显著促进了土壤呼吸速率的增加, 而增温对土壤呼吸速率的影响取决于当季降雨和温度; 土壤活性有机碳组分和土壤呼吸具有显著相关性.

(4) 增雨增加了土壤呼吸温度敏感性, 而增温降低了土壤呼吸温度敏感性. 驱动黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸速率改变的关键因素是土壤水热特征.

参考文献:

- [1] Haaf D, Six J, Doetterl S. Global patterns of geo-ecological controls on the response of soil respiration to warming[J]. *Nature Climate Change*, 2021, **11**(7): 623-627.
- [2] Du Y, Wang Y P, Su F L, *et al.* The response of soil respiration to precipitation change is asymmetric and differs between grasslands and forests[J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(10): 6015-6024.
- [3] de Oliveira T B, de Lucas R C, de Almeida Scarcella A S, *et al.* Effects of multiple climate change factors on exoenzyme activities and CO₂ efflux in a tropical grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **148**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107877.
- [4] Grace J, Rayment M. Respiration in the balance[J]. *Nature*, 2000, **404**(6780): 819-820.
- [5] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, *et al.* Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(2): 927-942.
- [6] Vidon P, Marchese S, Welsh M, *et al.* Impact of precipitation intensity and riparian geomorphic characteristics on greenhouse gas emissions at the soil-atmosphere interface in a water-limited riparian zone[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, **227**(1), doi: 10.1007/S11270-015-2717-7.
- [7] Rillig M C, Ryo M, Lehmann A, *et al.* The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity[J]. *Science*, 2019, **366**(6467): 886-890.
- [8] Wang X, Liu L L, Piao S L, *et al.* Soil respiration under climate warming: differential response of heterotrophic and autotrophic respiration[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(10): 3229-3237.
- [9] Dietzen C A, Larsen K S, Ambus P L, *et al.* Accumulation of soil carbon under elevated CO₂ unaffected by warming and drought[J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(9): 2970-2977.
- [10] Wang X, Zhong Z K, Li W J, *et al.* Effects of *Robinia pseudoacacia* afforestation on aggregate size distribution and organic C dynamics in the central Loess Plateau of China: a chronosequence approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **268**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110558.
- [11] Huang Q, Jiao F, Huang Y M, *et al.* Response of soil fungal community composition and functions on the alteration of precipitation in the grassland of Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142273.
- [12] 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 1980~2014年中国生态脆弱区气候变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2019, **24**(4): 455-468.
- Sun K H, Zeng X D, Li F. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980-2014[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, **24**(4): 455-468.
- [13] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 422-430.
- Wang X, Zhong Z K, Zhang X Y, *et al.* Relationship between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2416-2424.
- [14] Zhong Z K, Han X H, Xu Y D, *et al.* Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil aggregate fractions on the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, **30**(9): 1070-1082.
- [15] 严俊霞, 郝忠, 荆雪镨, 等. 太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3625-3633.
- Yan J X, Hao Z, Jin X K, *et al.* Interannual variations of soil respiration and its temperature sensitivity in an orchard in Jinci Region of Taiyuan City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3625-3633.
- [16] Bai T S, Wang P, Hall S J, *et al.* Interactive global change factors mitigate soil aggregation and carbon change in a semi-arid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(9): 5320-5332.
- [17] Alatalo J M, Jägerbrand A K, Juhanson J, *et al.* Impacts of twenty years of experimental warming on soil carbon, nitrogen, moisture and soil mites across alpine/subarctic tundra communities[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/SREP44489.
- [18] Song B, Niu S L, Zhang Z, *et al.* Light and heavy fractions of soil organic matter in response to climate warming and increased precipitation in a temperate steppe[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0033217.
- [19] Fang X, Zhou G Y, Qu C, *et al.* Translocating subtropical forest soils to a warmer region alters microbial communities and increases the decomposition of mineral-associated organic carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107707.
- [20] 焦宏哲, 李欢, 陈惠, 等. 增温、施氮对中亚热带杉木林土壤可溶性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(5): 1249-1258.
- Jiao H Z, Li H, Chen H, *et al.* Effects of soil warming and nitrogen addition on soil dissolved organic matter of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1249-1258.
- [21] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, *et al.* Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **444**: 552-558.

- [22] Althuizen I H J, Lee H, Sarneel J M, *et al.* Long-term climate regime modulates the impact of short-term climate variability on decomposition in alpine grassland soils[J]. *Ecosystems*, 2018, **21**(8): 1580-1592.
- [23] Rey A, Oyonarte C, Morán-López T, *et al.* Changes in soil moisture predict soil carbon losses upon rewetting in a perennial semiarid steppe in SE Spain[J]. *Geoderma*, 2017, **287**: 135-146.
- [24] 王旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(18): 5631-5635.
Wang X, Yan Y C, Yan R R, *et al.* Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5631-5635.
- [25] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002, **17**(3): 401-409.
- [26] Wang Y H, Song C, Liu H Y, *et al.* Precipitation determines the magnitude and direction of interannual responses of soil respiration to experimental warming[J]. *Plant and Soil*, 2021, **458**(1): 75-91.
- [27] Fierer N, Craine J M, McLauchlan K, *et al.* Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition[J]. *Ecology*, 2005, **86**(2): 320-326.
- [28] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1026-1033.
Zhou X G, Zhang Y J, Nan Y F, *et al.* Differences in soil respiration between cropland and grassland ecosystems and factors influencing soil respiration on the loess plateau [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1026-1033.
- [29] Wang Q K, Zhao X C, Chen L C, *et al.* Global synthesis of temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition: latitudinal patterns and mechanisms [J]. *Functional Ecology*, 2019, **33**(3): 514-523.
- [30] Wang J Y, Song C C, Zhang J, *et al.* Temperature sensitivity of soil carbon mineralization and nitrous oxide emission in different ecosystems along a mountain wetland-forest ecotone in the continuous permafrost of Northeast China[J]. *CATENA*, 2014, **121**: 110-118.
- [31] Almagro M, López J, Querejeta J I, *et al.* Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(3): 594-605.
- [32] Xu G, Chen J, Berninger F, *et al.* Labile, recalcitrant, microbial carbon and nitrogen and the microbial community composition at two *Abies faxoniana* forest elevations under elevated temperatures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **91**: 1-13.
- [33] Jin V L, Haney R L, Fay P A, *et al.* Soil type and moisture regime control microbial C and N mineralization in grassland soils more than atmospheric CO₂-induced changes in litter quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 172-180.
- [34] Kim D G, Vargas R, Bond-Lamberty B, *et al.* Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research[J]. *Biogeosciences*, 2012, **9**(7): 2459-2483.
- [35] Doughty C E, Metcalfe D B, Girardin C A J, *et al.* Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia [J]. *Nature*, 2015, **519**(7541): 78-82.
- [36] Shi A D, Marschner P. Soil respiration and microbial biomass in multiple drying and rewetting cycles-effect of glucose addition [J]. *Geoderma*, 2017, **305**: 219-227.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)