

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸

王佳懿^{1,2}, 王兴^{1,2}, 王源苗¹, 房景博¹, 夏开拉·阿克拜¹, 祖丽皮耶·居热艾提¹, 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: 降水作为全球气候变化的关键因子,其变化会影响土壤呼吸。微生物是土壤呼吸的关键驱动因素,但是在不同降雨梯度下,针对脆弱生境地区,微生物化学计量与呼吸的关系还不明确。以黄土丘陵区典型撂荒草地为研究对象开展了原位模拟降雨变化的实验(5个降水梯度),测定了土壤呼吸、养分、微生物生物量和胞外酶,并计算微生物计量特征。结果表明:①土壤呼吸(SR)在增雨处理下土壤呼吸显著升高,而在减雨处理下显著降低。②降水变化影响了化学计量不平衡,其中活性资源库氮(N)与磷(P)之间的不平衡(N:P不平衡)整体呈现出近“U”型趋势,活性资源库碳(C)与P之间的不平衡(C:P不平衡)仅在2019年变化显著,变化趋势为:P50>P25>CK>D25>D50,表明C:P不平衡对降雨变化更敏感。③随降雨量的增加土壤 β -1,4-葡糖苷酶(BG)降低,氮降解酶活性 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和亮氨酸胺肽酶(LAP)之和(NAG+LAP)在两年减雨处理期间显著下降;碱性磷酸酶(ALP)在增雨条件下活性显著增强,而在减雨条件下活性显著减弱;BG:(NAG+LAP)和BG:ALP均在增雨条件下显著减少而在减雨条件下显著增强。④偏最小二乘路径模型(PLS-PM)表明,降水变化通过影响化学计量C和P的不平衡和土壤酶的产生改变了土壤呼吸。这些结果突出了降水变化下化学计量不平衡在调节土壤呼吸中的重要性,有助于预测降水变化引起的化学计量变化对陆地生态系统碳循环和养分流动过程的调控。

关键词: 撂荒草地; 降水变化; 土壤呼吸; 化学计量不平衡; 胞外酶活性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4689-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209153

Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration

WANG Jia-yi^{1,2}, WANG Xing^{1,2}, WANG Yuan-zhuo¹, FANG Jing-bo¹, Xiakaila Akebai¹, Zulipiye Jureaiti¹, 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: As a key factor of global climate change, precipitation can affect soil respiration. Microorganisms are the key drivers of soil respiration, but the relationship between microbial stoichiometry and respiration in vulnerable habitat areas under different precipitation gradients is unclear. In this study, five precipitation gradients were simulated on a typical abandoned grassland in the loess hilly region. Soil respiration, nutrients, microbial biomass, and extracellular enzymes were measured, and the microbial measurement characteristics were calculated. The results showed that: ① soil respiration (SR) increased significantly under rainfed treatment but decreased significantly under D50 treatment. ② Precipitation changes affected the stoichiometric imbalance, and the N:P imbalance of the active resource pool presented a u-shaped trend, whereas the C:P imbalance changed significantly only in 2019, with a trend of P50>P25>CK>D25>D50. Additionally, the stoichiometric imbalance was caused by the soil stoichiometry. In 2019, the C:P imbalance of the active resource pool showed a trend of P50>P25>CK>D25>D50, whereas the N:P imbalance of the active resource pool showed a u-shaped trend, and the stoichiometric imbalance was caused by soil stoichiometry changes. ③ Soil β -1,4-glucosidase (BG) enzyme decreased with increasing precipitation, and the sum activities of β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG) and leucine aminopeptidase (LAP) significantly decreased during two years of rainfall reduction treatment. The activity of alkaline phosphatase (ALP) significantly increased under increasing rainfall but significantly decreased under decreasing rainfall. BG:(NAG+LAP) and BG:ALP were significantly decreased under increasing precipitation conditions but significantly increased under decreasing precipitation conditions. ④ The partial least squares path model (PLS-PM) showed that precipitation had an impact on soil respiration through influencing C:P stoichiometric imbalance and soil enzyme stoichiometric ratio. These results highlight the importance of stoichiometric imbalances in regulating soil respiration and may help predict how they are caused by precipitation change control carbon cycling and nutrient flow in terrestrial ecosystems.

Key words: abandoned grassland; precipitation change; soil respiration; stoichiometric imbalance; extracellular enzymatic activity

全球变暖会加剧地球上的水文过程,引起的全球范围内降水格局的变化,并大大增加全球极端降水事件的频率^[1],从而对陆地生态系统形成重大影响^[2]。降水会改变土壤环境因子(土壤湿度和底物化学计量等),并通过改变土壤呼吸来影响温室气体的排放从而进一步影响陆地生态系统的结构及功能,陆地生态系统碳排放直接作用于大气碳库系统来影响地球的碳循环系统^[3,4]。土壤呼吸每年向大气排放的碳高达68~98 Pg^[5],土壤呼吸作为陆地生

态系统碳循环的重要环节,其微小的变化便可引发碳循环大幅度的波动。因此,探究土壤呼吸如何响应降水变化有助于在气候变化背景下对全球碳循环进行预测^[6]。特别是在干旱地区,土壤呼吸对降雨变

收稿日期: 2022-09-16; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 陕西省农业科技创新计划项目(NYKJ-2022-YL(XN)16); 国家林业和草原局林草科技创新发展与研究项目(2020132111)

作者简介: 王佳懿(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为气候变化与环境生态学, E-mail: wangjiayi@nwfau.edu.cn

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

化的响应将更加强烈且复杂,如 Ren 等^[7]研究发现在黄土高原地区增雨可能极大地促进土壤呼吸.然而,目前针对干旱地区降水变化下土壤呼吸的调控因素仍未形成定论,在干旱地区降水对土壤呼吸的影响依旧值得进一步探讨^[8].

生态化学计量学理论认为,微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)和磷(MBP)与底物资源之间并不平衡^[9,10].换句话说,土壤中的底物资源C、N和P并不能全部满足微生物的生长需求,因此产生底物与微生物之间的不平衡现象.这种不平衡性往往会影响微生物的生长代谢进而影响土壤中碳库的变化,例如 Zhong 等^[11]在不同生长年限刺槐研究中发现这种不平衡性可能被用来更好地解释土壤呼吸的变化.而已有研究也发现降水变化会引起土壤底物改变,从而使微生物生物量化学计量与土壤化学计量之间出现不平衡的现象,进而影响微生物生长代谢的养分限制的程度并改变微生物的元素利用效率,最终改变土壤和大气之间的碳交换量^[11,12].然而,目前关于降水变化下化学计量不平衡如何变化,微生物如何适应化学计量失衡并在营养限制条件下如何驱动土壤呼吸的改变仍知之甚少.

黄土丘陵干旱区一直以来都是水土流失严重,土壤质量和生态系统严重退化的地区^[13].自国家实施退耕还林还草政策以来,生态环境持续转好,但该地区依然属于生态环境脆弱区,也是未来极端天气发生后受影响较大的地区.黄土高原作为典型干旱区域草地的土壤呼吸对降水变化可能更敏感^[14,15].因此,需要加强黄土丘陵区土壤呼吸和气候变化相关研究,自然撂荒草地作为黄土丘陵区最主要且生态系统稳定性较差的土地利用类型之一^[16],对其展开研究有助于挖掘未来气候变化下脆弱生境区应对极端天气的策略.基于此,本文以黄土丘陵区多年撂荒草地为研究对象,通过野外模拟降水变化来研究降水变化下化学计量不平衡变化特征及微生物适应化学计量失衡和影响土壤呼吸的机制,以期更好地了解降水变化对陆地生态系统中土壤碳动态的影响,并为未来气候变化下脆弱生境区土壤碳排放研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择陕西省延安市安塞区五里湾流域(东经109.33°~109.36°,北纬36.85°~36.86°)为研究区域,平均海拔为1061~1371 m.该地区为温带大陆性半干旱季风气候,年均气温9.5℃,年均降水量为525 mm,降水少且集中于7~9月.该区域属黄土丘陵沟壑区,土壤类型以黄绵土为主,土壤耐侵

蚀能力差,被认为是典型的黄土侵蚀区.自1999年实施退耕还林还草工程实施至今,该区域大量农田退耕为林地或者撂荒草地.撂荒草地主要植被有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芦苇(*Phragmites communis*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)等.

1.2 样地选择与装置布设

2016年7月于研究区域选取了撂荒10a的平坡地作为试验样地,所选样地撂荒前主要种植作物为玉米和谷子.在样地上建立了长期模拟降水改变的试验场,场内随机布置3个区组,每个区组内设置5个3 m×3 m的样方,分别对应增雨50%(P50)、增雨25%(P25)、对照(CK)、减雨25%(D25)和减雨50%(D50)这5个处理的样方.每个样地上均安装雨量控制装置,于减雨处理样方上设置挡雨板,减雨处理样方的自然降水被挡雨板截取并回流至增雨处理样方中实现增减自然降水,其中,D25处理挡雨板有效面积为样方的25%,D50处理挡雨板有效面积为样方的50%.在每个样方中布设一个内径20 cm,露出地面高度5 cm的PVC环用作土壤呼吸测定,具体方案见钟泽坤^[16]的研究.样地于2017年7月搭建完毕,经自然恢复一年后于2018年7月开始第一次采样.

1.3 土壤样品采集

分别于2018年7月(处理后1a)与2019年7月(处理后2a)采集土壤样品.用内径5 cm土钻随机钻取3个0~10 cm土样,去除肉眼可见的石块与植物残体后充分混合,过2 mm筛后分装为鲜土和干土.其中,鲜土存放在装有冰盒的保湿箱中运回实验室,并于-20℃冰箱内长期保存,其余则自然风干后密封保存.

1.4 理化性质与土壤呼吸测定方法

土壤有机碳(SOC)采用K₂Cr₂O₇-浓H₂SO₄外加热法测定^[17].土壤全氮(TN)用K₂SO₄-CuSO₄·5H₂O为催化剂,浓H₂SO₄消煮后用AA3流动分析仪测定^[18].土壤全磷(TP)用浓H₂SO₄-HClO₄消煮后用AA3流动分析仪测定^[11].MBC、MBN和MBP的分析采用氯仿熏蒸-浸提法测定^[17].土壤可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(AN)采用K₂SO₄溶液浸提后用TOC-TN分析仪器测定^[19,20].土壤速效磷(AP)用NaHCO₃浸提后用AA3流动分析仪测定^[21].土壤呼吸选择晴朗的天气在09:00~11:00用Li-8100A便携式土壤呼吸测量系统测定.

1.5 酶活性测定方法

土壤胞外酶活性提前将土样在4℃冰箱中复苏一周后用96孔微孔板荧光光度法测定^[22],在培养结束后用酶标仪检测其荧光值,激发光和检测波长

分别为 365 nm 和 450 nm; 其中 β -1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 底物为 4-甲基伞形酮酰- β -D-吡喃葡萄糖苷, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 底物为 4-甲基伞形酮酰- β -D-吡喃葡萄糖苷, 亮氨酸胺酶 (LAP) 底物为 L-亮氨酸-7-氨基-4-甲基香豆素盐酸盐, 碱性磷酸酶 (ALP) 底物为 4-甲基伞形酮磷酸酯。

1.6 数据处理与分析

本研究通过土壤活性资源化学计量比 (DOC: AN、DOC: AP 和 AN: AP) 与微生物生物量化学计量比 (MBC: MBN、MBC: MBP 和 MBN: MBP) 来计算土壤微生物与其资源之间的化学计量失衡^[11]。计算公式如下:

$$C:N \text{ 不平衡性} = (DOC/AN)/(MBC/MBN) \quad (1)$$

$$C:P \text{ 不平衡性} = (DOC/AP)/(MBC/MBP) \quad (2)$$

$$N:P \text{ 不平衡性} = (AN/AP)/(MBN/MBP) \quad (3)$$

本研究用土壤酶化学计量比计算的矢量角度 (VA) 和矢量长度 (VL) 表示不同降水条件下土壤微生物的元素限制状况。计算公式如下:

$$VL = \text{SQRT}[(CE_s:PE_s)^2 + (CE_s:NE_s)^2] \quad (4)$$

$$VA = \text{Degrees}[\text{Atan2}(CE_s:PE_s, CE_s:NE_s)] \quad (5)$$

式中, CE_s 为土壤碳降解酶活性 (BG), NE_s 为土壤氮降解酶活性 (NAG + LAP), 45° 和大于 45° 分别表明微生物受氮和磷限制。

微生物代谢特征采用以下方程式估算:

$$CUE_{C:X} = CUE_{\max} \times [S_{C:X}/(S_{C:X} + K_X)] \quad (6)$$

$$S_{C:X} = \left[\frac{1/EEA_{C:X}}{(MBC/MBX)/(DOC/AX)} \right] \quad (7)$$

式中, $CUE_{C:X}$ 为基于 C:N 或 C:P 计算的微生物碳利用效率, 本文中微生物碳利用效率 (CUE) 为两者的几何平均值; K_X 为半饱和常数 (0.5); $CUE_{\max}$ 为微生物生长效率上限 (0.6); $EEA_{C:X}$ 为微生物 C 和 N(P) 获取酶的比值, 即 BG:(NAG + LAP) 或 BG:ALP; MBC/MBX 为 MBC 和 MBN (MBP) 比; DOC/AX 为 DOC 与 AN (AP) 比。

$$XUE_{X:C} = XUE_{\max} \times [S_{X:C}/(S_{X:C} + K_C)] \quad (8)$$

$$S_{X:C} = (1/EEA_{X:C}) \times [(MBX/MBC)/(AX/DOC)] \quad (9)$$

式中, $XUE_{\max}$ ($NUX_{\max}$ 或 $PUX_{\max}$) 的值均为 1.0, K_C 的值为 0.5^[11]。

微生物周转速率 (BTR), 计算公式如下:

$$BTR = qCO_2 \times CUE_{C:N}/(1 - CUE_{C:N}) \quad (10)$$

式中, qCO_2 为土壤呼吸熵 (d^{-1}), 为呼吸速率与 MBC 的比值。

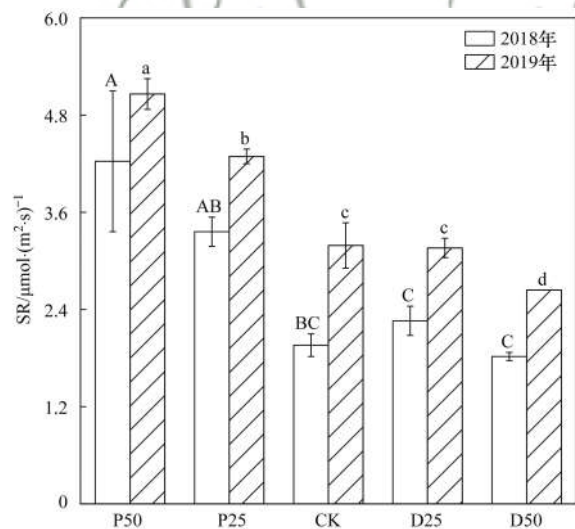
本研究中采用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 对实验

数据进行统计分析。用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 对不同降水条件下土壤理化性质、微生物量、胞外酶活性、元素利用效率和土壤呼吸的差异进行分析, 各项数据采用最小显著差异 (least significant difference, LSD) 法进行多重比较 ($\alpha = 0.05$)。相关性分析和 Mantel 分析用来确定土壤理化性质、微生物量、胞外酶活性、元素利用效率和土壤呼吸之间关系。使用偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 分析土壤呼吸的调控机制。相关性分析、Mantel 分析和偏最小二乘路径模型使用 R 软件 (4.0.1 版本) 完成, 图形用 Origin 2022 和 R 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸变化特征

如图 1 所示, 降水处理显著改变了生长季的土壤呼吸。总体而言, 土壤呼吸 (SR) 在 2018 年变化范围为 $1.82 \sim 4.23 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 而在 2019 年, 变化范围为 $2.64 \sim 5.06 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。具体来说, 和对照相比, 两个年份增雨处理下土壤呼吸显著升高了 $0.34 \sim 1.16$ 倍 ($P < 0.05$), 而减雨仅在 50% 处理下土壤呼吸显著降低 ($P < 0.05$)。



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

图 1 降水改变下土壤呼吸变化特征

Fig. 1 Characteristics of soil respiration under precipitation change

2.2 土壤理化性质及微生物特性

降水变化处理下撂荒草地土壤及微生物化学计量变化特征如表 1 所示。两个年份随着降水量改变 SOC 含量与 DOC 含量呈现如下趋势: $P50 > P25 > CK > D25 > D50$, 同时土壤 TN 含量随降水改变而降低; 2018 年 AP 含量与 DOC 含量趋势相似, 且降水减少显著降低土壤 AP 含量, 2019 年 AP 含量则为: $P25 > CK > D25 > D50 > P50$; 此外, 两个年份的 MBP 含量

仅在增雨处理下显著增加,而土壤 TP、AN、MBC 和 MBN 在各降水处理间差异相对不显著.

此外,降水改变引起的土壤碳和磷的变化导致土壤化学计量比发生了变化,其中 DOC: AP 变化尤为明显.2018 年 DOC: AP 和 AN: AP 变化范围分别在12.23 ~ 15.68 和 1.99 ~ 2.57; 2019 年 DOC: AP 和 AN: AP 变化范围分别在10.8 ~ 27.53 和 2.03 ~ 3.23. 其中,2019 年土壤 DOC: AP 在 P50 处理下增

加了 67%,而在 D50 处理下降低了 34%. 对于微生物化学计量比,除 2019 年 P50 处理下 MBC: MBP 显著高于其他降水处理外,2018 和 2019 年 MBC: MBN 与 MBN: MBP 在各降水处理间差异均不显著. BTR 仅在增雨 50% 显著提高,而在其他处理中虽然有所增加,但不显著. CUE 在增雨处理下显著升高 ($P < 0.05$),微生物磷利用效率(PUE)仅在增雨 25% 处理下显著降低.

表 1 土壤理化性质及微生物特性¹⁾

Table 1 Soil physical and chemical properties and microbial properties

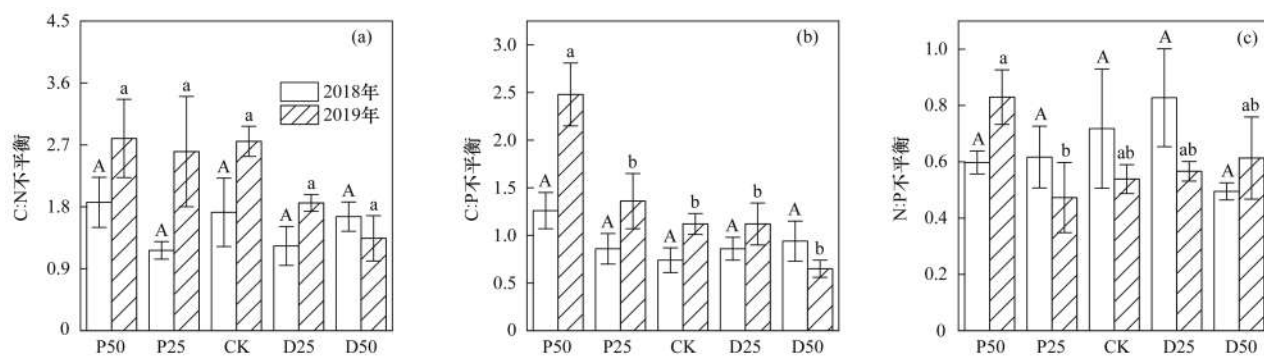
年份	来源	项目	P50	P25	CK	D25	D50
2018	土壤	$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.83 ± 0.11a	4.95 ± 0.17b	4.71 ± 0.25b	4.15 ± 0.12c	3.73 ± 0.19c
		$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.45 ± 0.06a	0.42 ± 0.05a	0.47 ± 0.01a	0.35 ± 0.08a	0.33 ± 0.02a
		$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.61 ± 0.01a	0.59 ± 0.01a	0.64 ± 0.03a	0.61 ± 0.01a	0.62 ± 0.01a
		$\omega(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	53.97 ± 4.22a	41.34 ± 2.84b	39.79 ± 3.03b	38.31 ± 2.57b	34.77 ± 2.97b
		$\omega(\text{AN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.02 ± 0.57a	7.10 ± 0.11a	6.15 ± 0.27a	6.54 ± 0.42a	6.19 ± 0.29a
		$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.44 ± 0.06a	3.41 ± 0.16a	3.13 ± 0.27a	2.57 ± 0.11b	2.42 ± 0.11b
		DOC: AN	7.89 ± 1.29a	5.83 ± 0.42a	6.5 ± 0.6a	5.86 ± 0.18a	5.68 ± 0.75a
		DOC: AP	15.68 ± 1.15a	12.23 ± 1.19a	13.06 ± 2.04a	15.07 ± 1.66a	14.47 ± 1.62a
		AN: AP	2.05 ± 0.19a	2.1 ± 0.13a	1.99 ± 0.16a	2.57 ± 0.29a	2.56 ± 0.06a
	微生物	$\omega(\text{MBC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	132.24 ± 8.92ab	141.13 ± 10.09a	129.93 ± 0.47ab	109.19 ± 8.82bc	95.85 ± 12.14c
		$\omega(\text{MBN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	35.25 ± 10.96ab	32.86 ± 0.97ab	37.96 ± 0.15a	21.95 ± 2.7ab	19.56 ± 3.92b
		$\omega(\text{MBP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.45 ± 0.65a	9.68 ± 0.67a	7.35 ± 0.52b	6.23 ± 0.71b	5.89 ± 0.51b
		MBC: MBN	5.05 ± 2.2a	4.28 ± 0.18a	3.42 ± 0.01a	5.14 ± 0.75a	5.31 ± 1.24a
		MBC: MBP	12.84 ± 1.57a	14.72 ± 1.44a	17.86 ± 1.19a	17.66 ± 0.87a	16.85 ± 3.61a
		MBN: MBP	3.28 ± 0.86a	3.43 ± 0.27a	5.21 ± 0.34a	3.58 ± 0.53a	3.49 ± 0.99a
		CUE	0.53 ± 0.01ab	0.55 ± 0.01a	0.5 ± 0.01bc	0.49 ± 0.01c	0.47 ± 0.02c
		NUE	0.38 ± 0.08ab	0.33 ± 0.04b	0.53 ± 0.01a	0.48 ± 0.03ab	0.53 ± 0.04a
		PUE	0.28 ± 0.02cd	0.21 ± 0.04d	0.36 ± 0.03bc	0.44 ± 0.03ab	0.51 ± 0.06a
		BTR	1.37 ± 0.38a	1.05 ± 0.04ab	0.66 ± 0b	0.83 ± 0.1ab	0.69 ± 0.07b
2019	土壤	$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.47 ± 0.09a	5.13 ± 0.12b	4.92 ± 0.17b	4.58 ± 0.29bc	4.31 ± 0.11c
		$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.46 ± 0.02ab	0.45 ± 0.05ab	0.49 ± 0.02a	0.37 ± 0.05b	0.34 ± 0.01b
		$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.62 ± 0b	0.59 ± 0.01a	0.62 ± 0ab	0.63 ± 0.01b	0.62 ± 0.01b
		$\omega(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	67.25 ± 3.61a	59.43 ± 4.91ab	53.88 ± 2.33bc	46.41 ± 3.99c	26.57 ± 2.68d
		$\omega(\text{AN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.92 ± 0.65a	7.65 ± 0.52a	6.59 ± 1.06a	7.00 ± 0.91a	6.79 ± 0.64a
		$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.44 ± 0.04b	3.63 ± 0.2a	3.29 ± 0.26a	2.64 ± 0.12b	2.47 ± 0.12b
		DOC: AN	8.56 ± 0.53a	7.93 ± 1.15a	8.63 ± 1.43a	6.73 ± 0.59ab	4.03 ± 0.67b
		DOC: AP	27.53 ± 1.57a	16.39 ± 1.35b	16.47 ± 0.86b	17.6 ± 1.37b	10.8 ± 1.11c
		AN: AP	3.23 ± 0.23a	2.12 ± 0.23b	2.03 ± 0.37b	2.64 ± 0.24ab	2.75 ± 0.22ab
	微生物	$\omega(\text{MBC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	134.2 ± 13.48ab	140.12 ± 10.07a	122.2 ± 5.13ab	106.16 ± 2.83b	109.67 ± 11ab
		$\omega(\text{MBN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	44.75 ± 7.34a	45.93 ± 10.12a	39.34 ± 4.49a	32.69 ± 6.43a	30.06 ± 1.03a
		$\omega(\text{MBP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.82 ± 0.55a	11.29 ± 1.1a	8.32 ± 0.67b	6.68 ± 0.97b	6.56 ± 0.76b
		MBC: MBN	3.09 ± 0.31a	3.38 ± 0.79a	3.18 ± 0.36a	3.64 ± 1a	3.64 ± 0.3a
		MBC: MBP	11.34 ± 0.95b	12.65 ± 1.45ab	14.79 ± 0.68ab	16.56 ± 2.42a	16.81 ± 0.87a
		MBN: MBP	3.75 ± 0.47a	4.01 ± 0.55a	4.79 ± 0.64a	4.9 ± 0.85a	4.67 ± 0.37a
		CUE	0.52 ± 0.01a	0.51 ± 0.02a	0.45 ± 0bc	0.41 ± 0.03c	0.5 ± 0.01ab
		NUE	0.41 ± 0.02c	0.9 ± 0.08bc	0.63 ± 0.02ab	0.69 ± 0.04a	0.49 ± 0.06bc
		PUE	0.38 ± 0.03bc	0.31 ± 0.04c	0.48 ± 0.02ab	0.58 ± 0.06a	0.38 ± 0.02bc
		BTR	1.58 ± 0.16a	1.14 ± 0.03b	0.86 ± 0.04b	0.86 ± 0.07b	1.06 ± 0.14b

1) 数据为平均值 ± 标准误差 ($n = 3$), 每行不同小写字母表示在不同处理之间差异达到显著水平 ($P < 0.05$); P50 表示增加 50% 降雨处理, P25 表示增加 25% 降雨处理, D25 表示减少 25% 降雨处理, D50 表示减少 50% 降雨处理, CK 表示对照; CUE 表示微生物碳利用效率, NUE 表示微生物氮利用效率, PUE 表示微生物磷利用效率, BTR 表示微生物周转速率

2.3 土壤微生物化学计量不平衡的变化特征

降水变化下撂荒草地土壤微生物及其活性资源库的化学计量不平衡变化特征如图 2 所示. 2018 年

降水改变引起的化学计量不平衡改变并不显著. 2019 年活性资源库 C: N 不平衡在降水减少条件下会减弱, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 2019 年活性资



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

图 2 降水改变下土壤微生物及其活性资源库的化学计量不平衡

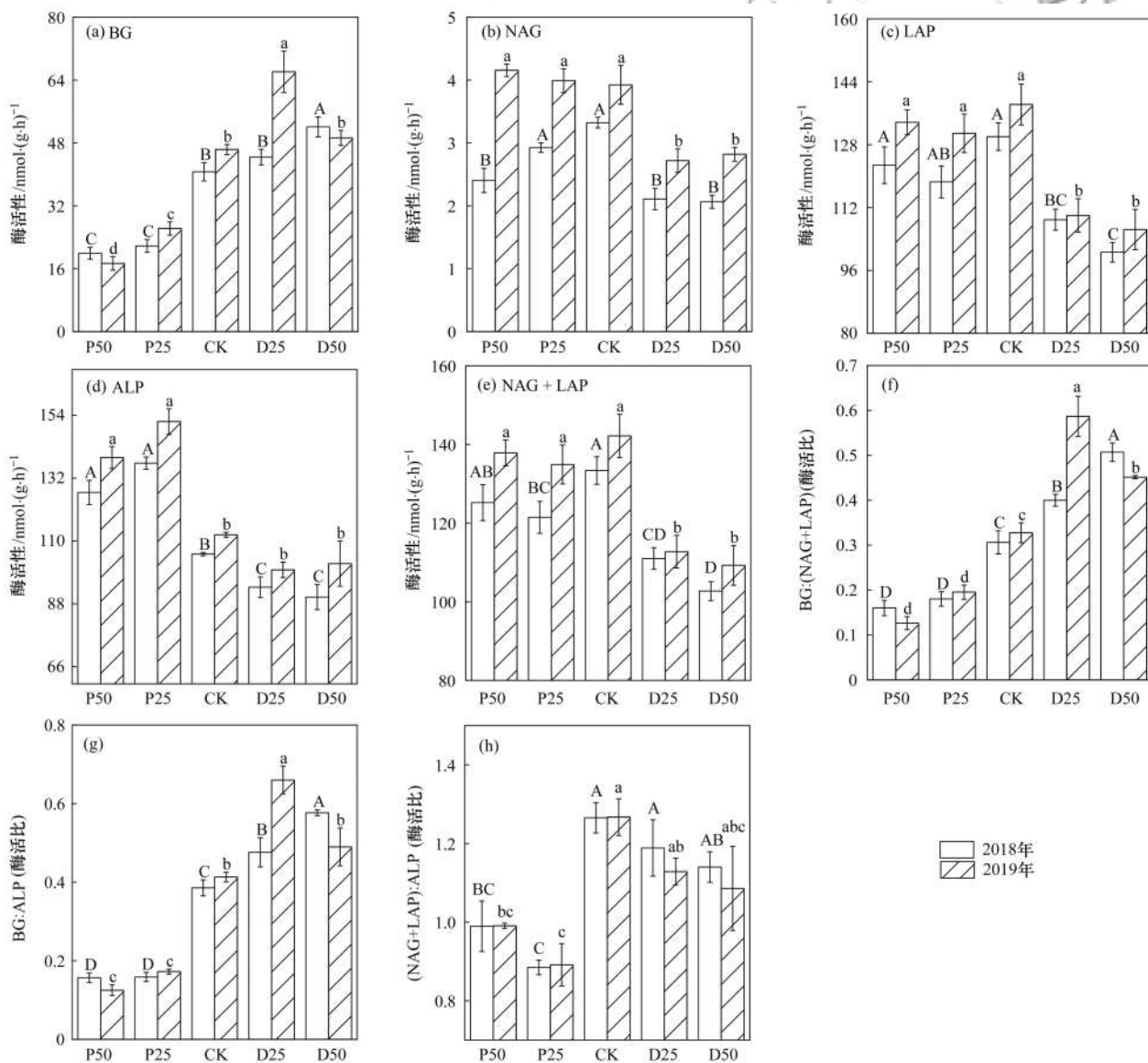
Fig. 2 Stoichiometric imbalance of soil microbial community and its labile resource under precipitation change

源库 C:P 不平衡呈现出: $P50 > P25 > CK > D25 > D50$ 的趋势, 其中 P50 处理 C:P 失衡显著升高 ($P < 0.05$); 此外, 活性资源库 N:P 不平衡呈现出近“U”型趋势, 即降水变化 (升高/降低) 会引起活性资源

库 N:P 失衡升高。

2.4 土壤微生物胞外酶的变化特征

降水变化处理下撂荒草地土壤胞外酶活性变化特征如图 3 所示。增雨处理显著降低了土壤 β -1,4-



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

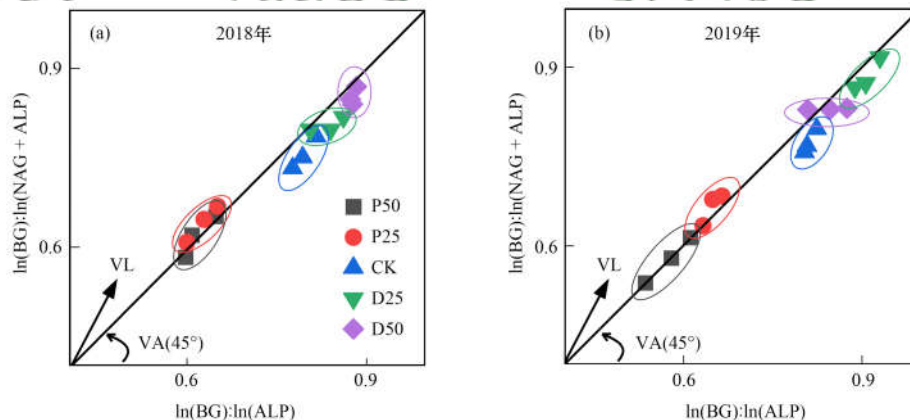
图 3 降水改变下土壤胞外酶活性变化

Fig. 3 Changes in soil extracellular enzyme activity under precipitation change

葡萄糖苷酶(BG)酶活性($P < 0.05$),而减雨处理则增强了土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)酶活性,即土壤中碳降解酶活性与降雨量呈现出负相关($P < 0.05$).土壤磷降解酶碱性磷酸酶(ALP)与碳降解酶趋势相反,2018年ALP酶在增雨50%和25%条件下活性显著增强($P < 0.05$),增强幅度为20.48%和30.2%,而在减雨25%和50%条件下活性显著减弱($P < 0.05$),降低幅度为11%和14.28%.增雨对NAG和LAP酶活性的无显著影响,而减雨在2018年显著降低了NAG酶和LAP酶活性($P < 0.05$),降水量减少25%和50%条件下NAG酶活性降低幅度分别为36.53%和37.86%,LAP酶活性降低16.27%和22.61%.不同降水条件下土壤胞外酶化学计量比变化特征如图3(f)~3(h)所示,BG:(NAG+LAP)、BG:ALP和(NAG+LAP):ALP在2018年不同降水条件下变化范围为0.16~0.51、0.16~0.58和0.88~1.27,2019年变化范围为0.13~0.59、0.13~0.66和0.89~1.27.其中BG:(NAG+LAP)和BG:ALP趋势相似,均表现出在增雨条件下显著减少($P < 0.05$)而在减雨条件下

显著增强($P < 0.05$).

不同降水条件下土壤胞外酶化学计量的向量特征的变化如图4所示.增雨处理下土壤酶化学计量的向量长度均显著低于对照处理($P < 0.05$),而减雨处理的向量长度均显著高于对照处理($P < 0.05$),并在2018年呈现出 $P50 < P25 < CK < D25 < D50$ 的趋势,而在2019年呈现出 $P50 < P25 < CK < D50 < D25$ 的趋势.表明极干旱气候下微生物受碳限制增强而湿润气候下微生物受碳限制的程度减弱.2018年土壤酶化学计量的向量角度在P50、P25、CK、D50和D25这5个处理下分别为45.42°、48.52°、38.35°、40.2°和41.29°,2019年为45.27°、48.38°、38.33°、41.57°和42.96°.各处理酶化学计量向量角度均接近45°,表明该生态系统受氮磷限制弱,主要受碳限制.其中两种增雨处理土壤的酶化学计量向量角度大于45°,而对照和减雨处理向量角度小于45°,说明该撂荒草地生态系统受到轻微氮限制,在减雨条件下该生态系统N限制程度可能会减弱,而在增雨条件下该生态系统还受到了轻微P限制.



VA 和 VL 分别表示酶化学计量的向量角度和长度

图4 不同降水条件下土壤胞外酶化学计量的向量长度和角度变化特征

Fig. 4 Changes in the vector length and angle of soil extracellular enzymatic stoichiometry under precipitation change

2.5 土壤微生物呼吸的影响因子

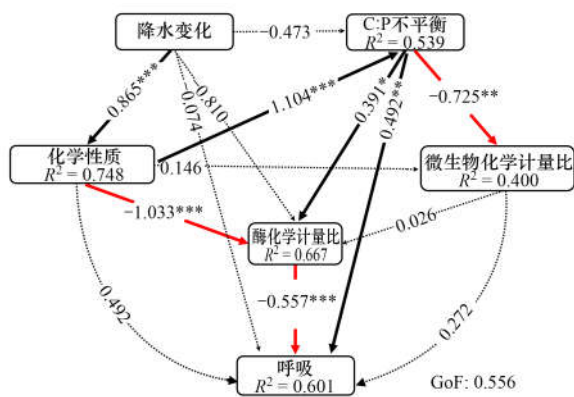
利用结构方程模型(PLS-PM)分析呼吸与其潜在在影响因子之间的关系,结果表明C:P不平衡与酶活性的化学计量比直接影响了土壤呼吸,C:P不平衡对呼吸有显著的正向直接影响(0.492,标准路径系数,下同; $P < 0.01$),酶活性的化学计量比对呼吸有显著的负向直接影响(-0.557, $P < 0.001$).降水改变对化学性质有显著的正向影响(0.865, $P < 0.001$).化学性质与微生物群落和土壤资源之间的化学计量失衡呈显著正相关($P < 0.001$),而与土壤酶化学计量比呈显著负相关($P < 0.001$).土壤化学性质通过影响化学计量不平衡和土壤酶化学计量比

对土壤呼吸产生间接影响(图5).

3 讨论

3.1 化学计量不平衡和土壤呼吸对降雨变化的响应

土壤的化学计量不平衡性反映了土壤微生物自身元素需求与土壤底物状况之间的相对关系^[23,24].在本研究中,土壤C:N不平衡性和C:P不平衡性随降雨量减少而下降(图2),表明降雨变化改变了微生物与土壤底物之间的关系.这个结果可能与干旱处理下的低植物源碳输入有关^[23].与土壤化学计量不同,本研究中MBC:MBN、MBC:MBP和MBN:MBP随着降水变化差异不显著,说明微生物群落生



降水变化、土壤化学性质 (NH_4^+ 、 NO_3^- 、C:N、C:P 和 N:P)、C:P 不平衡、微生物化学计量比 (MBC: MBP、MBC: MBN 和 MBN: MBP) 和酶化学计量比 [BG: (NAG + LAP)、BG: ALP 和 ALP: (NAG + LAP)] 作为影响土壤呼吸驱动因素构建偏最小二乘路径模型; 红色和黑色箭头显示了重要路径 ($P < 0.05$), 黑色箭头表示正相关, 红色箭头表示负相关, 数字表示标准路径系数; * 表示 0.05 水平差异显著, ** 表示 0.01 水平差异显著, *** 表示 0.001 水平差异显著

图 5 降水变化下土壤呼吸影响因素的偏最小二乘路径模型

Fig. 5 Partial least squares path model of soil respiration under precipitation change

物养分并不受降水改变的影响,这与 Yuan 等^[25]关于草原研究的结果一致,推测降水变化引起的土壤化学计量失衡不是由微生物生物量化学计量的变化引起的,而是由资源化学计量的动态引起的。化学计量的不平衡往往直接影响了土壤酶的产生^[24]。土壤酶是生态系统循环中的重要环节,代表了生态化学计量理论和生态代谢理论交叉环节^[24,26]。降水的变化显著改变了土壤胞外酶活性,干旱处理下撂荒地 BG: (NAG + LAP) 和 BG: ALP 值显著增加 (图 3),这可能与干旱条件下土壤碳含量显著下降有关 ($P < 0.05$, 表 1),土壤底物中的碳源无法满足微生物的生长需求,进而促使更多的微生物投向碳降解酶来从土壤环境中获取更多的碳源供自身生长代谢^[27]。酶化学计量的向量角度模型表明,微生物在干旱条件下受到 C 和 N 限制;干旱促使土壤碳的各组分 (SOC 和 DOC) 和 TN 含量减少,且 C 和 N 获取酶含量增加,也证明了土壤干旱条件下微生物受 N 限制 (表 1 和图 3)。相反的是,降水增加了土壤 C、N 和 P 元素养分含量,而由于土壤碳含量增加高于土壤 N 和 P 含量,微生物有更多的碳源供微生物生长代谢,导致微生物对 N 和 P 的需求增大^[28],相对于 C 供应,生态系统 N 和 P 供应不足而倾向于 N 和 P 共限制。因而微生物通过分泌更多的 N 和 P 降解酶来缓解土壤中 N 和 P 元素的匮乏,减少了碳降解酶的分泌 (图 4)。这符合微生物生长的 Y-A-S-P 策略^[29],即相对湿润土壤中,在资源限制的条件下土

壤微生物会通过强化 A 策略分泌更多的胞外酶以获取充分的养分供生物量积累,而相对于干旱的土壤中,微生物通过较强的抗胁迫能力快速响应水分和养分可用性。土壤水分参与了植物-土壤-微生物系统的生化反应,降水量增加促进植物残体的淋溶会使土壤表层的有机物质进入土壤,增加土壤中的有机质含量^[30]。然而,降水过多会导致土壤内部形成厌氧环境,通过影响土壤化学性质也会干扰微生物胞外酶的分泌,影响土壤酶化学计量比^[30]。化学计量失衡和微生物氮磷限制的改变可归因于降水改变下土壤养分有效性和凋落物质量的变化^[31]。本研究发现,活性资源库中的 C:N 不平衡性和 C:P 不平衡性与土壤 C:N 和 C:P 变化一致,这与 Zhao 等^[32]研究的结果一致。结构方程模型也表明土壤化学性质对化学计量失衡有直接显著的影响 (图 5)。总之,本研究结果表明,撂荒草地在减雨条件下受 N 限制;而在增雨条件下微生物受 N 和 P 限制,且受化学计量不平衡所调控。

3.2 土壤化学计量平衡与呼吸的关系研究

化学计量平衡关系决定了微生物的生长和代谢从而改变土壤与大气之间的碳交换。本研究结果表明降水变化造成的土壤化学性质变化及 C:P 的化学计量失衡会引起土壤酶化学计量比的变化,进而引起土壤呼吸改变,且化学计量不平衡和土壤酶化学计量比对土壤呼吸有直接的正效应 (图 5)。本研究数据表明增雨促进了土壤呼吸,减雨降低了土壤呼吸,且土壤呼吸对降雨变化的响应随控制实验时间增加。这可能是由于降水变化引起了冲刷和淋溶作用改变,影响了植物有机质的输入,改变了土壤的养分状况,进而影响植物输入及土壤微生物生长代谢强度^[33]。例如,高降水形成的富碳环境会引起土壤碳以呼吸外溢的形式流失^[27]。增雨条件下 C:P 化学计量不平衡增大代表了相对高的 DOC^[25] (图 2 和表 1),也就是充足的可利用性碳环境促使微生物分泌的碳获取酶含量降低从而减少酶合成中的碳消耗,从而导致更高的生物量进而增加了 CUE,同时 CUE 升高表明更多的有机碳被用于微生物的生长 (表 1),而土壤微生物生长也促使呼吸增加^[24,25];而干旱条件下化学计量不平衡降低促使微生物的 CUE 轻微下降,低的 C:P 化学不平衡性表明低的 DOC 迫使微生物投向更多的 C 获取酶来满足自身生长代谢需求,且相较于增雨处理更难得到足够的碳去增加自生的生物量 (表 1)。正如 Manzoni 等^[34]研究发现微生物会调节其元素利用效率来应对化学计量不平衡,即微生物及其可利用的资源化学计量不平衡时微生物不能改变外界环境中的可利用资源

的元素,只能通过调控自身元素利用效率吸收利用这些资源并释放其不需要的营养元素,保持自身生长的同时维持自身化学计量稳态. 研究中降水变化引起化学计量失衡后 SR 与 CUE 和 BTR 变化趋势一致,这与前文观点一致(图 5). 因此,化学计量的失衡是不同降雨条件下改变土壤呼吸的首要原因,且通过调控微生物生长代谢(各种胞外酶分泌和元素利用效率)来影响土壤呼吸. 值得注意的是,减雨处理只有 P50 处理下土壤呼吸速率显著降低($P < 0.05$),说明半干旱地区草地生态系统对干旱有一定耐受力,适度的降水减少不会限制土壤呼吸^[35]. 同时,2019 年土壤呼吸速率明显高于 2018 年,这可能是由于研究区集中的生长季降雨引起了土壤的干湿交替,在两年降雨激发下造成了土壤呼吸速率升高^[36,37]. 因此,相关的机制需要进一步考虑. 综上,本文的研究结果表明,土壤呼吸对降水变化的响应是微生物对土壤资源与微生物自身生长之间不平衡做出调节的结果.

4 结论

(1)降水增加通过影响土壤化学性质增加了土壤微生物与其资源之间的化学计量 C:P 不平衡,降水减少则降低了 C:P 的化学不平衡性.

(2)降水改变了土壤呼吸,增雨增加土壤呼吸,减雨减少土壤呼吸且随年限增加土壤呼吸对降雨变化的响应增强.

(3)化学计量失衡下土壤微生物通过调节其胞外酶的分泌和元素的利用效率,以维持其化学组成的动态平衡,影响土壤呼吸.

(4)土壤化学计量失衡引起的微生物及其资源之间的化学计量不平衡影响微生物资源获取策略而改变了土壤呼吸,鉴于未来“湿”气候的变化及化学不平衡的响应机制,未来揭示该区域微生物呼吸变化应综合考虑土壤与微生物养分不平衡关系的影响.

参考文献:

- [1] Smith M D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research[J]. *Journal of Ecology*, 2011, **99**(3): 656-663.
- [2] Luo Y Q, Jiang L F, Niu S L, *et al.* Nonlinear responses of land ecosystems to variation in precipitation[J]. *New Phytologist*, 2017, **214**(1): 5-7.
- [3] Xu W H, Wan S Q. Water-and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 679-687.
- [4] Zhou Z H, Wang C K. Reviews and syntheses: soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(22): 6751-6760.
- [5] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 579-582.
- [6] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, *et al.* Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation[J]. *BioScience*, 2003, **53**(10): 941-952.
- [7] Ren C J, Zhao F Z, Shi Z, *et al.* Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **115**: 1-10.
- [8] Liu L L, Wang X, Lajeunesse M J, *et al.* A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes[J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(4): 1394-1405.
- [9] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [10] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, *et al.* The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization[J]. *Science*, 2008, **321**(5889): 684-686.
- [11] Zhong Z K, Zhang X Y, Wang X, *et al.* C:N:P stoichiometries explain soil organic carbon accumulation during afforestation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, **117**(2): 243-259.
- [12] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**(11): 1252-1264.
- [13] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, *et al.* Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 236-244.
- [14] Su F L, Wei Y N, Wang F W, *et al.* Sensitivity of plant species to warming and altered precipitation dominates the community productivity in a semiarid grassland on the Loess Plateau[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, **9**(13): 7628-7638.
- [15] 许红梅, 高清竹, 黄永梅, 等. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟[J]. *生态学报*, 2006, **26**(9): 2939-2947.
- Xu H M, Gao Q Z, Huang Y M, *et al.* Simulated the impact of climate change on net primary production in hilly area of Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9): 2939-2947.
- [16] 钟泽坤. 增温和降雨改变对黄土丘陵区撂荒地土壤碳循环关键过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] Bremner J M. Nitrogen-total[A]. In: Sparks D L, Page A L, Helmke P A, *et al.* (Eds.). *Methods of Soil Analysis* [M]. Madison: Soil Science Society of America, 1996.
- [19] Zhang S H, Pan Y, Zhou Z H, *et al.* Resource limitation and modeled microbial metabolism along an elevation gradient[J]. *CATENA*, 2022, **209**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105807.
- [20] Ren C J, Zhao F Z, Kang D, *et al.* Linkages of C: N: P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **376**: 59-66.
- [21] 许森平. 黄土高原刺槐枯落叶分解过程碳氮磷耦合关系与微生物作用机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [22] 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.
- [23] 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 等. 模拟增温和降雨增加对撂荒地土壤胞外酶活性及计量特征的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2812-2821.
- Wang X, Zhong Z K, Jian J N, *et al.* Effects of simulated warming and increased precipitation on soil extracellular enzyme activity and enzymatic stoichiometry of abandoned grassland[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2812-2821.
- [24] 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.
- [25] Yuan X B, Niu D C, Gherardi L A, *et al.* Linkages of stoichiometric imbalances to soil microbial respiration with increasing nitrogen addition: evidence from a long-term grassland experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **138**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107580.
- [26] Moorhead D L, Rinkes Z L, Sinsabaugh R L, *et al.* Dynamic relationships between microbial biomass, respiration, inorganic nutrients and enzyme activities: informing enzyme-based decomposition models[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, **4**, doi: 10.3389/fmicb.2013.00223.
- [27] Zhu Z K, Ge T D, Luo Y, *et al.* Microbial stoichiometric flexibility regulates rice straw mineralization and its priming effect in paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **121**: 67-76.
- [28] 邓健, 张丹, 张伟, 等. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J]. *生态学报*, 2019, **39**(15): 5527-5535.
- Deng J, Zhang D, Zhang W, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and homeostasis characteristics of leaves, soil, and microbial biomass of *Robinia pseudoacacia* forests in the Loess Hilly Region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(15): 5527-5535.
- [29] Li C N, Liao H J, Xu L, *et al.* The adjustment of life history strategies drives the ecological adaptations of soil microbiota to aridity[J]. *Molecular Ecology*, 2022, **31**(10): 2920-2934.
- [30] Deng L, Peng C H, Huang C B, *et al.* Drivers of soil microbial metabolic limitation changes along a vegetation restoration gradient on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2019, **353**: 188-200.
- [31] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, **462**(7274): 795-798.
- [32] Zhao Y Z, Liang C F, Shao S, *et al.* Linkages of litter and soil C: N: P stoichiometry with soil microbial resource limitation and community structure in a subtropical broadleaf forest invaded by Moso bamboo[J]. *Plant and Soil*, 2021, **465**(1-2): 473-490.
- [33] Gupta S R, Singh J S. Soil respiration in a tropical grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, **13**(4): 261-268.
- [34] Manzoni S, Taylor P, Richter A, *et al.* Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. *New Phytologist*, 2012, **196**(1): 79-91.
- [35] Hinko-Najera N, Fest B, Livesley S J, *et al.* Reduced throughfall decreases autotrophic respiration, but not heterotrophic respiration in a dry temperate broadleaved evergreen forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **200**: 66-77.
- [36] 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.
- [37] 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 等. 增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1657-1667.
- Wang X, Zhong Z K, 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.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)