

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响

王兴^{1,2}, 钟泽坤^{1,2}, 简俊楠^{1,2}, 张硕宏^{1,2}, 杨改河^{1,2}, 任成杰^{1,2}, 冯永忠^{1,2}, 任广鑫^{1,2}, 王晓娇^{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: 土壤胞外酶活性是催化土壤有机质分解的关键限速步骤, 而且对外界环境的变化极其敏感, 然而却很少有研究聚焦于土壤胞外酶活性对气候变化的响应, 尤其是在黄土高原地区. 以黄土丘陵区撂荒草地为研究对象, 野外模拟气候变暖和降水增加, 通过测定土壤理化性质、植被群落特征和土壤酶活性, 探究土壤酶活性及计量比对气候变化的响应特征及驱动因素. 结果表明, 增温、增雨以及二者的交互作用均显著降低了土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)和纤维二糖水解酶(CBH)活性, 然而, 土壤 β -1,4-木糖苷酶(BX)活性在气候变化处理下却呈现出增加趋势, 其中, 增温处理的增幅最大, 达到了 63.15%. 增温增雨的交互显著增加了 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和亮氨酸胺肽酶(LAP)以及碱性磷酸酶(ALP)活性, 分别增加了 34.32%、12.97% 和 44.86%. 增温显著增加了过氧化物酶(PER)活性, 而增雨显著降低了 PER 酶活性, 增雨以及增温增雨显著降低了多酚氧化酶(PPO)活性, 这主要归因于植物群落组成的变化. 增雨和增温增雨处理下碳降解酶活性: 氮降解酶活性(CEs: NEs)和氮降解酶活性: 磷降解酶活性(NEs: PEs)显著降低, 而碳降解酶活性: 磷降解酶活性(CEs: PEs)在增温、增雨及其交互作用下均显著降低, 增雨以及增温增雨处理下土壤酶化学计量的向量长度均低于对照处理, 且向量角度均大于对照处理, 表明土壤微生物在暖湿条件下的碳限制和氮限制程度有所减弱. 主成分分析和冗余分析结果表明土壤水分含量和土壤有机碳含量是引起酶活性及计量特征变化的主要驱动因子. 综上所述, 气候变化下黄土丘陵区撂荒草地植被群落组成的变化, 尤其是木质素含量较低且具有固氮能力的豆科植物数量的增加以及土壤有机碳含量的增加会减弱土壤微生物的碳氮限制, 研究结果可为理解脆弱生境地区在气候变化背景下土壤微生物的养分限制情况提供依据.

关键词: 气候变化; 撂荒草地; 土壤胞外酶活性; 酶计量比; 养分需求和限制

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2812-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109219

Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland

WANG Xing^{1,2}, ZHONG Ze-kun^{1,2}, JIAN Jun-nan^{1,2}, ZHANG Shuo-hong^{1,2}, YANG Gai-he^{1,2}, REN Cheng-jie^{1,2}, FENG Yong-zhong^{1,2}, REN Guang-xin^{1,2}, WANG Xiao-jiao^{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: Soil extracellular enzyme activities (EEA) catalyze the key rate-limiting step in the decomposition of soil organic matter and are extremely sensitive to changes in environmental factors. However, few studies have focused on the response of soil EEA to climate change, especially in the Loess Plateau. To explore the response characteristics and driving factors of soil EEA and enzymatic stoichiometry of abandoned grassland in the Loess hilly area under the conditions of climate warming and increasing precipitation, the physical and chemical properties of the soil, vegetation community, and EEA were determined. The results showed that warming (W), increased precipitation (P), and their interaction (WP) significantly reduced soil β -1,4-glucosidase (BG) enzyme and cellobiosidase (CBH) activities. However, the activity of β -1,4-xylosidase (BX) showed an increasing trend under the climate change treatment. Among them, the W treatment reached 63.15%. The WP treatment significantly increased the activities of β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG), leucine aminopeptidase (LAP), and alkaline phosphatase (ALP) by 34.32%, 12.97%, and 44.86%, respectively. The analysis of soil oxidase activity found that W significantly increased peroxidase (PER) activity, whereas increased P significantly reduced PER enzyme activity, and P and WP significantly reduced phenol oxidase (PPO) activity, mainly due to changes in the composition of the plant community. CEs: NEs and NEs: PEs were significantly reduced under the P and WP treatments, and CEs: PEs was significantly reduced under W, P, and WP. The vector lengths of the soil enzymatic stoichiometry under the W, P, and WP treatments were both lower than those of the control treatment, and the vector angle was larger than that of the control treatment, indicating that the carbon limitation and nitrogen limitation of soil microbial communities under W and increased P conditions were weakened. The results of principal component analysis and redundancy analysis indicated that the soil moisture content and soil organic carbon content were the main driving factors causing changes in EEA and enzymatic stoichiometry. In summary, the conditions of climate change led to changes in the family composition of the vegetation community of the abandoned grassland in the Loess hilly region, especially the increase in the number of legumes with low lignin content and the ability to fix nitrogen. Additionally, the increase in soil organic carbon content weakened the carbon and nitrogen limitations of soil microbial communities. These results provide a basis for understanding the carbon, nitrogen, and phosphorus requirements and limitations of soil microbial communities in fragile ecosystems under the background of climate change.

Key words: climate change; abandoned grassland; soil extracellular enzyme activity; enzymatic stoichiometry; nutrient requirements and limitations

收稿日期: 2021-09-25; 修订日期: 2021-10-16

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(41907031)

作者简介: 王兴(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化与环境生态学, E-mail: wangxing1996@nwfau.edu.cn

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

据预测到 21 世纪末,全球平均气温可能继续升高 $2.0 \sim 4.9^{\circ}\text{C}$,且相较于 1986 ~ 2005 年全球大部分草原的平均降水量可能会增加,高海拔地区降水强度和频率的增加尤为明显^[1]. 鉴于温度和降水都是生态系统过程的重要驱动因素,气候变化势必会改变生态系统元素循环,进而改变土壤微生物的养分供应和生存策略^[2]. 土壤胞外酶活性是参与调控土壤有机质分解的关键步骤,反映了土壤养分可利用性和微生物代谢需求之间的生物化学平衡,因此可作为微生物响应气候变化的功能指标^[3]. 因此,阐明土壤关键胞外酶活性的变化特征,对预测气候变化背景下土壤微生物的代谢需求以及土壤养分可利用性具有重要的科学意义.

通常情况下,气候变暖会通过刺激蒸发蒸腾作用和降低土壤水分来降低土壤水分有效性^[4],从而限制酶和底物的扩散,但同时微生物可能会分泌更多的胞外酶,以补偿气候变暖对水分不足的限制效应^[5]. 但目前关于增温对土壤胞外酶活性的影响的研究结果并不一致,例如,Allison 等^[6]和 McDaniel 等^[7]的研究发现增温对酶活性没有影响或者不显著. 与增温相反,增雨可增加土壤水分有效性从而促进植物生长以及由微生物驱动的生物过程,从而促进了酶的分泌以及底物的扩散,进而有利于酶活性^[8]. 尽管如此,针对气候变暖和降水增加的交互作用如何影响酶活性的研究仍然较少. 此外,由于气候变化引起的土壤养分有效性不足以及植被组成变化驱动的凋落物的元素计量不平衡,可能导致微生物受到相应的能量和养分限制^[9]. 在此背景下,土壤微生物为了获取限制性养分以满足自身生长和代谢需求而对特定胞外酶活性的分泌可能是土壤酶活性变化的内在途径. 因此,土壤酶计量比可作为上述途径的外在表征,从另一个角度揭示微生物在气候变化背景下的元素限制状况.

黄土丘陵区由于历史和人类活动导致的水土流失问题在 1999 年退耕还林还草工程实施以后得到了显著的改善,但该区的气候和土壤质地等因子使得该地区仍然属于典型的生态环境脆弱区. 因此,需要加强黄土丘陵区 and 气候变化相关研究^[10]. 已有证据表明黄土丘陵区未来会同时发生气候变暖和降水增加两种全球气候变化因子^[11]. 鉴于草地是黄土丘陵区最主要的土地利用类型,并且自然撂荒而成的次生草地生态系统稳定性较差^[12]. 本文以黄土丘陵区撂荒草地作为研究对象,从酶活性以及计量特征角度分析微生物在气候变暖和降水增加以及二者的交互作用下的养分限制情况,同时从土壤和植物群落变化的角度探讨影响酶活性及计量特征变化的关

键因子. 结果将有助于深刻理解气候变化背景下植物群落-土壤养分-酶活性的交互响应.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于陕西省延安市安塞区五里湾流域(东经 $109.31^{\circ} \sim 109.35^{\circ}$ 、北纬 $36.85^{\circ} \sim 36.86^{\circ}$),该区属典型黄土丘陵沟壑区,平均海拔 $1061 \sim 1371\text{ m}$. 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,降水量少且主要集中于 7 ~ 9 月,年均温 9.5°C ,无霜期 160 d 左右,年日照时数 $2352 \sim 2573\text{ h}$,日照百分率达 $50\% \sim 70\%$,光能丰富,蒸散量大,干燥度在 $1.4 \sim 2.0$ 之间,年总辐射量为 $552.61\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$. 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^[10]. 该区域在 20 世纪 70 年代就开始实施生态治理,特别是自 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. 根据中国科学院地理科学与资源研究所数据共享中心基于 Landsat 8 遥感影像的栅格数据,截至 2018 年,安塞区五里湾撂荒草地的面积有 184.18 hm^2 ,占该流域总面积约 40% ,是该地区主要的土地利用类型.

1.2 研究方法

于 2016 年 7 月对研究区域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,撂荒期间无人干扰,灌溉依靠自然降雨. 土壤基本理化性状为:容重 $1.16\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,黏粒 15% ,粉粒 43% ,砂粒 42% ,优势植被为以狗尾草和糙隐子草为主的禾本科和以蒿类为主的菊科. 采用开顶式气候箱(OTC)实现土壤增温,采用截留相邻样方的自然降水之后再回流到增雨样方实现增加自然降雨,本研究中,挡雨板占样方有效面积的 50% ,因此可认为相邻样方增加了 50% 的降雨. 每两个相邻样方之间横向设置 $>5\text{ m}$ 的过渡带,纵向设置 $>1\text{ m}$ 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. 2017 年 7 月试验场搭建完毕. 本研究共计 4 个处理:增雨(P: $+50\%$ precipitation)、增温(W: warming)、增温 + 增雨(WP: warming + 50% precipitation)和对照(CK). 实验样地布置以及具体的实验装置参考文献[10].

1.3 植被调查与样品采集

于处理两年后(2019 年 7 月)对各处理下的植被特征开展调查,分别记录样方内每一个植物物种

名称、数量、高度和盖度以及样方内所有物种的个体数和总数. 植被调查结束后在每个处理样方内随机布置 3 个 50 cm × 50 cm 的小样方, 采用剪刀剪取小样方内所有植物的成熟叶片, 随后装入网袋带回实验室, 105℃ 杀青后再 80℃ 烘干至恒重, 最后用粉碎机粉碎后过 0.25 mm 筛用于后续测定. 叶片采集结束后在有效采样区用传统土钻法 (直径为 9 cm) 随机钻取 3 个 0 ~ 10 cm 土样, 去除石块、植物残根后充分混合, 过 2 mm 筛并分装为两部分, 一部分低温运输至实验室, 并在 -20℃ 冰箱长期保存, 另一部分经自然风干后密封保存.

1.4 理化性质测定方法

土壤含水量 (soil water content, SWC) 在每次取样结束后采用烘干法测定 (105℃ 烘干至恒重); 土壤容重 (soil bulk density, SBD) 采用环刀法测定; 土壤机械颗粒组成包括: 黏粒 (< 2 μm)、粉粒 (2 ~ 50 μm) 和砂粒 (50 ~ 2 000 μm), 采用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, 英国) 测定^[13]; 土壤 pH 采用土壤-蒸馏水悬浮液 (1: 2.5, 质量体积比) 摇匀 (200 r·min⁻¹ 后静置 60 min) 后使用 pH 计测得; 土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[14]; 土壤全氮 (total nitrogen, TN) 在用硫酸钾-五水硫酸铜 (10: 1, 质量比) 作为催化剂, 并用浓硫酸消煮后采用连续流动分析仪 (SEAL & AA3 Analytical, 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^[15].

1.5 酶活性测定方法

土壤胞外水解酶 (表 1) 采用 96 孔黑色微孔板荧光光度法测定^[11]. 简要步骤为: 提前 7 d 将土样

从 -20℃ 转移到 4℃ 进行复苏, 称取 1 g 新鲜土样并加入 125 mL 去离子水, 置于 180 r·min⁻¹ 旋转式摇床 (25℃) 振荡 2 h, 均质化后取 200 μL 土壤悬浊液加入到 96 孔微孔板中, 移液时持续摇动瓶身保持均质化, 样品微孔中加入 50 μL 200 μmol·L⁻¹ 底物, 空白微孔中加入 50 μL 去离子水, 淬灭微孔板中加入 50 μL 标准物质 (10 μmol·L⁻¹ 4-MUB), 同时设有阴性对照 (50 μL 底物 + 200 μL 去离子水) 和参考标准 (50 μL 标准物质 + 200 μL 去离子水), 每个样品有 3 个微孔作为重复, 在加入样品悬浊液后将微孔板放置于 25℃ 黑暗条件下培养 4 h, 培养结束后向每个孔中加入 10 μL 0.5 mol·L⁻¹ NaOH 溶液提高反应液的 pH 值以获得最佳的荧光值 (Donovan P, 2011), 再利用多功能酶标仪 (Tecan Infinite M200, 奥地利) 检测荧光值, 激发和发射波长分别为 365 nm 和 450 nm, 在校正淬灭和阴性对照后, 土壤酶活性表示为 nmol·(g·h)⁻¹.

土壤胞外氧化酶采用 96 孔透明微孔板测定^[16]. 简要步骤为: 提前 7 d 将土样从 -20℃ 转移到 4℃ 进行复苏, 称取 1.00 g 新鲜土样加入 125 mL 醋酸钠缓冲液 (Buffer), 迅速用手快速摇动 1 min, 将土壤在 Buffer 中充分均质化, 在阴性参考中加入 200 μL 缓冲液和 50 μL 底物溶液, 空白孔中加入 200 μL 土壤悬浊液和 50 μL 缓冲液 (Buffer), 样品孔中加入 200 μL 土壤悬浊液和 50 μL 底物溶液, 对于过氧化物酶, 在所有微孔中还需加入 10 μL 0.3% 的 H₂O₂ 溶液. 每个样品有 4 个微孔作为重复. 置于 25℃ 黑暗条件培养 20 h 后采用多功能酶标仪测定, 吸收光波长为 460 nm. 土壤酶活性 (以鲜土计) 单位表示为 μmol·(g·h)⁻¹.

表 1 本研究中的土壤胞外酶所对应的缩写、酶委员会编号、功能和相对应的底物
Table 1 Abbreviations, enzyme commission numbers, functions, and corresponding substrates of soil extracellular enzymes assayed in this study

酶名称	缩写	EC ¹⁾	功能	底物
β-1,4-葡萄糖苷酶	BG	3.2.1.21	降解纤维素	4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡萄糖苷
纤维二糖水解酶	CBH	3.2.1.91	降解纤维素	4-甲基伞形酮酰-β-D-纤维二糖糖苷
β-1,4-木糖苷酶	BX	3.2.1.37	降解半纤维素	4-甲基伞形酮酰-β-D-木吡喃糖苷
β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	NAG	3.1.6.1	降解几丁质和壳寡糖	4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡萄糖苷
亮氨酸胺酶	LAP	3.4.11.1	裂解蛋白质中的肽键	L-亮氨酸-7-氨基-4-甲基香豆素盐酸盐
碱性磷酸酶	ALP	3.1.3.1	矿化有机磷为磷酸盐	4-甲基伞形酮磷酸酯
过氧化物酶	PER	1.11.1.7	降解木质素和催化氧化反应	左旋多巴和乙二胺四乙酸二钠
多酚氧化酶	PPO	1.10.3.2	降解木质素和其他芳香族化合物	左旋多巴和乙二胺四乙酸二钠

1) EC 为详细描述酶功能的酶委员会编号, 共有 4 个数字, 第一个数字区分酶类型 (1: 氧化还原酶, 2: 转移酶, 3: 水解酶, 4: 裂解酶, 5: 异构酶和 6: 连接酶)

1.6 数据处理和统计分析

本研究采用将单一物种的盖度、密度、高度结合同物种重要值来反映某一物种在样方中的优势

程度, 将分属菊科、豆科、禾本科的物种重要值相加, 计算植物科在群落中的占比, 以此反映不同处理下植物科组成的变化特征. 物种重要值的计算公式

如下：

重要值 = (相对盖度+相对密度+相对高度) / 3 × 100% (1)

式中：

相对盖度 = 某一物种的覆盖度 / 全部物种的覆盖度之和 (2)

相对密度 = 某一物种的密度 / 全部物种的密度之和 (3)

相对高度 = 某一物种的高度 / 全部物种的高度之和 (4)

采用 Gleason 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数来反映不同处理下的植被群落特征。计算公式如下：

Gleason 丰富度指数 = (S - 1) / lnN (5)

Shannon-Wiener 多样性指数 = - Σ (Pi lnPi) (6)

Pielou 均匀度指数 = Shannon-Wiener / lnS (7)

式中，S 为样方中物种总数，N 为样方物种个体数，Pi 为第 i 个物种占有所有物种个体数的百分比。

BG、CBH 和 BX 这 3 种酶活性之和为碳降解酶活性 (CEs)，NAG 和 LAP 两种酶活性之和为氮降解酶活性 (NEs)，ALP 为磷降解酶活性 (PEs)，相应的酶化学计量比可表征微生物的元素限制状况。此外，基于 Moorhead 等^[17] 的酶化学向量理论，本研究使用酶化学计量比计算的向量长度 (vector length, VL) 和向量角度 (vector angle, VA) 来表征不同处理下土壤微生物的元素限制情况。VL 和 VA 的计算公式为：

VL = SQRT[(CEs : PEs)² + (CEs : NEs)²] (8)

VA = Degrees[Atan2(CEs : PEs,CEs : NEs)] (9)

式中，SQRT 为开平方函数，Degrees 为弧度转角度函数，Atan2 为反正切函数。VL 越长，表明微生物受能量 (碳) 限制的程度越高；VA 大于 45° 表明微生物受磷限制，VA 小于 45° 表明微生物受氮限制。

使用 EXCEL 2016 和 SPSS 22.0 对实验数据进行计算分析。不同气候处理下土壤理化性质、植被特征、土壤胞外酶活性及酶化学计量比、酶化学计量比的向量长度和角度的差异均采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 进行分析，所有数据均采用最小显著差异 (least significant difference, LSD) 法进行多重比较 (α = 0.05)。使用 OriginPro. 2016 软件作图。使用 R (V. 4.0.3) 中的 FactoMine 和 factoextra 包对数据进行主成分排序 (Principal component analysis, PCA) 并作图。冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 使用 Canoco5.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 植被特征的变化

不同处理下撂荒草地的植被特征的变化见表 2。与对照相比，增温显著增加了菊科植物占比 (23.48%)，而增雨以及增温增雨却降低了菊科植物占比，其中增温增雨处理的降低幅度最大，达到了 55.65%；与之相反，增雨显著增加了禾本科植物占比，增温增雨显著增加了豆科植物占比，增幅分别达到了 38.72% 和 58.91% (P < 0.05)。植物科占比的变化改变了植被多样性特征，增雨显著增加了

表 2 不同处理下撂荒草地的植被特征¹⁾

Table 2 Vegetation characteristics of abandoned grassland under different treatments

植被特征	项目	气候变化处理			
		P	WP	W	CK
植物科组成	菊科占比/%	19.83(1.92)BC	12.24(1.21)C	34.08(4.21)A	27.60(1.48)AB
	禾本科占比/%	32.23(2.16)A	28.59(3.14)AB	27.88(1.50)AB	23.23(3.04)B
	豆科占比/%	21.89(2.73)AB	29.04(3.03)A	14.07(1.04)B	18.27(2.30)B
	其他科占比/%	26.06(3.94)A	27.59(3.14)A	23.97(4.70)A	30.90(5.78)A
植物多样性	Gleason 丰富度指数	3.39(0.06)A	2.06(0.06)C	1.78(0.15)C	2.89(0.15)B
	Shannon-Wiener 多样性指数	2.02(0.13)AB	1.68(0.13)B	1.99(0.06)AB	2.14(0.14)A
	Pielou 均匀度指数	0.68(0.05)B	0.72(0.04)AB	0.84(0.02)A	0.75(0.06)AB
叶片养分	ω(SOC)/g·kg ⁻¹	491.42(3.20)AB	498.32(3.61)A	485.37(3.89)AB	478.39(7.42)B
	ω(TN)/g·kg ⁻¹	21.77(0.72)A	22.00(1.67)A	19.47(0.12)A	18.58(0.89)A
	ω(TP)/g·kg ⁻¹	1.68(0.11)A	2.00(0.30)A	1.41(0.10)A	1.59(0.18)A
	碳氮比	22.63(0.83)A	22.93(1.84)A	24.93(0.34)A	25.85(1.14)A
	碳磷比	294.76(22.10)A	260.51(38.86)A	348.66(25.38)A	306.96(31.01)A
	氮磷比	13.02(0.84)A	11.23(0.81)A	13.99(1.01)A	12.01(1.63)A

1) 同一行不同大写字母表示在不同处理之间差异达到显著水平 (P < 0.05)；P 表示增加 50% 降雨，WP 表示增加 50% 降雨和增温的交互处理，W 表示增温，CK 表示对照，下同；表中数据为平均值 (标准误)，n = 3

Gleason 丰富度指数,而增温增雨交互以及单独增温均显著降低了 Gleason 丰富度指数 ($P < 0.05$); Shannon-Wiener 多样性指数在增温增雨交互处理下显著降低,而 Pielou 均匀度指数最高值和最低值分别出现在增温处理和增雨处理下 ($P < 0.05$). 此外,发现增温增雨处理显著增加了叶片有机碳含量 ($P < 0.05$),而叶片总氮、总磷以及叶片元素化学计量比在各个处理下无显著差异 ($P > 0.05$).

2.2 土壤理化性质的变化特征

不同处理下撂荒草地土壤理化性质的变化特征

如表 3 所示. 与对照相比,增雨和增温增雨交互处理显著增加了土壤含水量,增幅分别为 16.41% 和 7.72%;增雨处理显著增加了土壤有机碳含量 ($P < 0.05$). 有机碳含量的变化改变了土壤元素计量比,尤其是碳氮比和碳磷比的改变,由表 3 可知,增雨处理土壤碳氮比和碳磷比值显著高于对照 ($P < 0.05$). 土壤 pH、总氮、总磷和氮磷比在不同处理下变化差异不显著 ($P > 0.05$).

2.3 土壤胞外酶活性及计量比的变化特征

撂荒草地土壤胞外酶活性在不同处理下的变化

表 3 不同处理下撂荒草地的土壤理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties of abandoned grassland under different treatments

土壤理化性质	气候变化处理			
	P	WP	W	CK
pH	8.10(0.03) A	8.14(0.11) A	8.15(0.01) A	8.28(0.04) A
土壤含水量/%	14.86(0.05) A	13.75(0.41) B	12.70(0.27) C	12.77(0.22) C
$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.47(0.09) A	5.65(0.24) B	5.10(0.39) B	4.92(0.17) B
$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.46(0.02) A	0.51(0.04) A	0.50(0.04) A	0.49(0.02) A
$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.62(0.01) A	0.61(0.01) A	0.61(0.01) A	0.62(0.01) A
碳氮比	13.66(0.65) A	11.12(0.58) AB	10.46(1.52) B	10.05(0.28) B
碳磷比	9.89(0.71) A	9.22(0.50) AB	8.42(0.58) AB	7.99(0.26) B
氮磷比	0.72(0.03) A	0.83(0.07) A	0.83(0.07) A	0.80(0.04) A

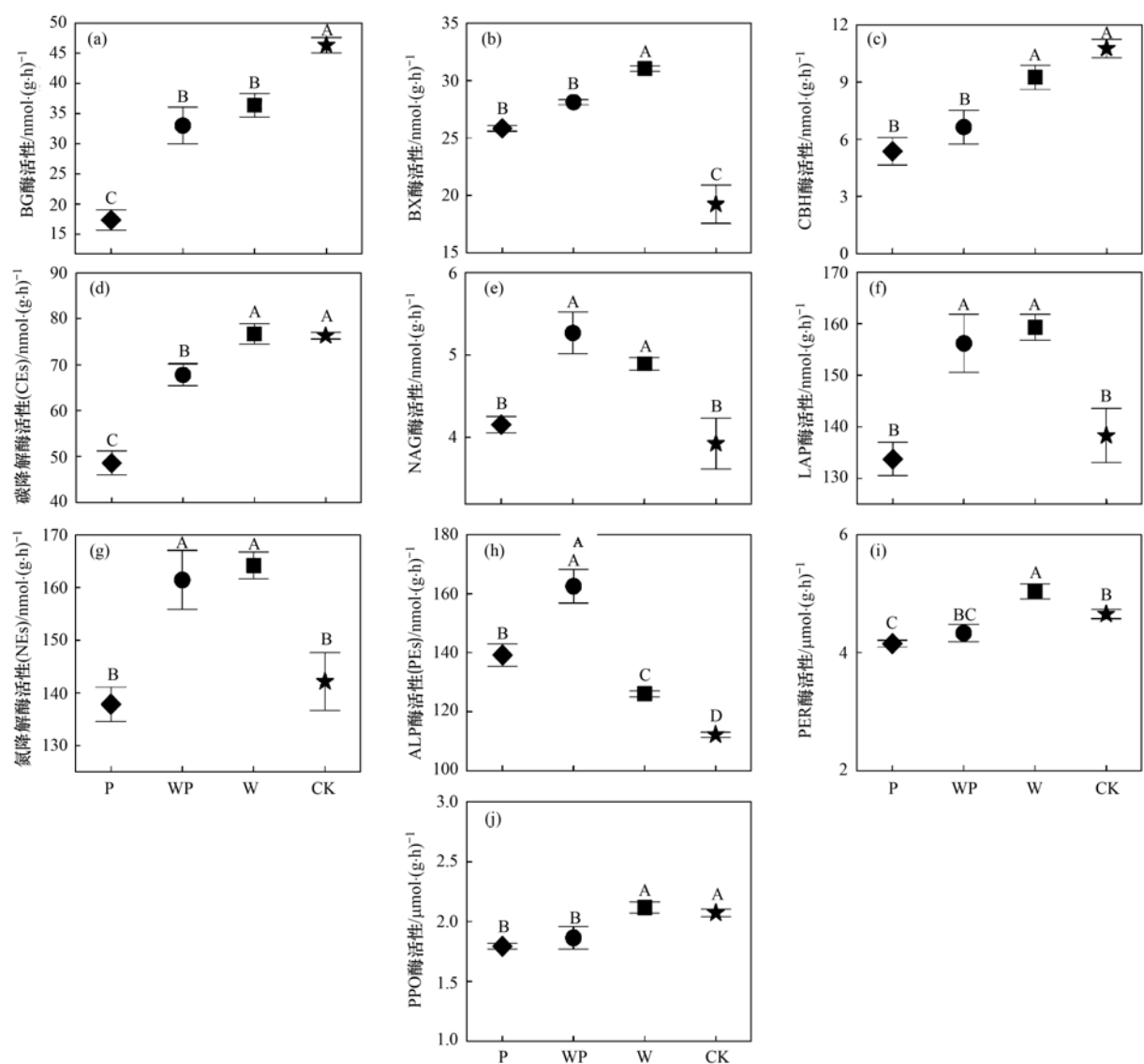
特征如图 1(a)~1(d)所示. 增温、增雨和二者的交互作用均显著降低了土壤 β -1,4-葡糖苷酶(BG)酶活性,降低幅度分别为 62.55%、28.72% 和 21.45%,而在增雨的基础上增温可提高 BG 酶活性. 对于与 BG 酶功能相似的纤维二糖水解酶(CBH),与对照相比,增雨以及增温增雨交互分别降低了 50.27% 和 38.38% 的 CBH 酶活性,而增温对 CBH 酶活性影响不显著 ($P > 0.05$). β -1,4-木糖苷酶(BX)表现出与上述两种酶不同的变化趋势,增温、增雨和二者的交互均显著增加了土壤 BX 酶活性,增温处理的增幅最大,达到了 63.15%. 土壤总碳降解酶活性表现出增温和对照 > 增温增雨交互 > 增雨的趋势 ($P < 0.05$). 土壤胞外氮降解酶和磷降解酶活性的变化特征如图 1(e)~1(h)所示, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和亮氨酸胺肽酶(LAP)在不同处理下的变化趋势相似,增雨对 NAG 和 LAP 酶活性无显著影响,而增温、增温增雨的交互均显著增加了 NAG 酶和 LAP 酶活性,分别增加了 27.74%、15.24% 和 34.32%、12.97%. 土壤总氮降解酶活性和 NAG、LAP 酶活性的变化趋势相似. 磷降解酶(碱性磷酸酶:ALP)在各个处理下表现出增温增雨交互 > 增雨 > 增温 > 对照的趋势 ($P < 0.05$),增温增雨处理下土壤碱性磷酸酶活性高出对照 44.86%. 土壤氧化酶活性的变化特征如图 1(i)~1(j)所示,增温显著增加了过氧化物酶(PER)活性 (8.20%),而增雨显著降低了 PER 酶活性

(10.77%),增温增雨对 PER 酶活性影响不显著 ($P > 0.05$);增雨以及增温增雨的交互显著降低了多酚氧化酶(PPO)活性 ($P < 0.05$),而增温对 PPO 酶活性影响不显著.

土壤酶化学计量比在不同处理下的变化特征如图 2 所示. CEs: NEs、CEs: PEs 和 NEs: PEs 在不同处理下的变化范围分别为 0.35~0.53、0.35~0.68 和 0.99~1.30. 增雨和增温增雨交互下 CEs: NEs 和 NEs: PEs 显著降低,CEs: PEs 在增温、增雨及其交互作用下均显著降低,表现出对照 > 增温 > 增温增雨 > 增雨的差异趋势 ($P < 0.05$). 土壤胞外酶化学计量的向量特征的变化如图 3 所示. 增温、增雨和二者的交互作用下土壤酶化学计量的向量长度均显著低于对照处理,且呈现出对照 > 增温 > 增温增雨 > 增雨的变化趋势 ($P < 0.05$),降幅分别为 42.73%、31.58% 和 11.62%,表明暖湿的气候变化趋势下微生物受碳限制的程度减弱. 土壤酶化学计量的向量角度在 4 个处理下分别为 45.27°(P)、45.19°(WP)、37.52°(W) 和 38.33°(CK),说明该生态系统主要受氮限制,在降水增加以及变暖和降水增加同时发生的两种气候变化趋势下可能会减弱氮限制程度,有利于元素的均衡供应(图 3).

2.4 植被特征和土壤理化性质对土壤酶活性及计量比的影响

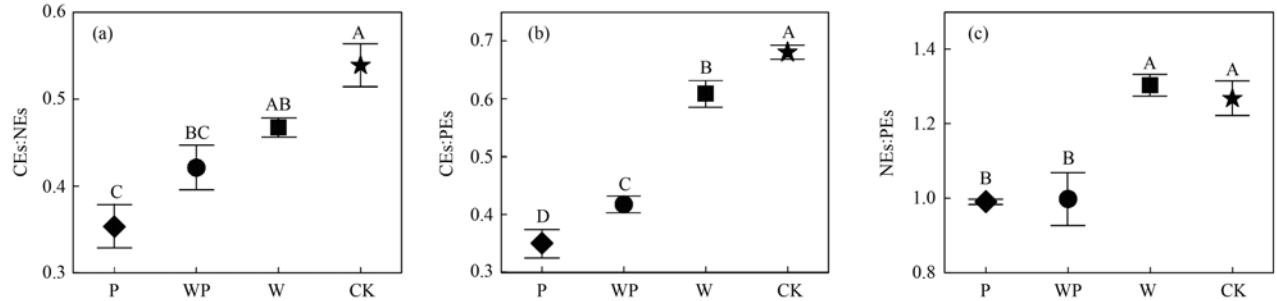
对本研究所涉及到的所有因子进行降维后的主成分结果如图 4. 增雨和增温增雨交互处理与对照



不同大写字母表示在不同处理之间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图1 不同处理下土壤胞外酶活性变化

Fig. 1 Changes in soil extracellular enzymatic activity of abandoned grassland under different treatments

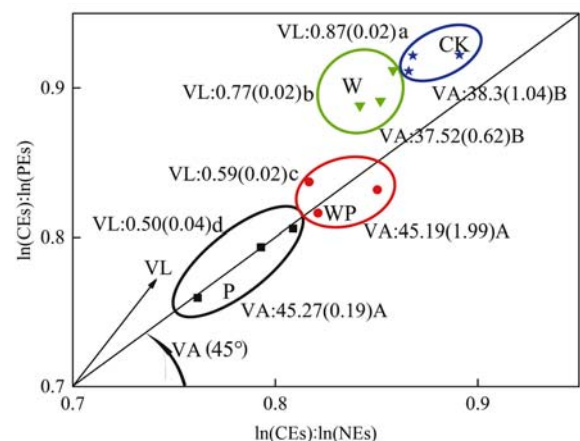


不同大写字母表示在不同处理之间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图2 不同处理下土壤胞外酶化学计量比变化

Fig. 2 Changes in soil extracellular enzymatic stoichiometry of abandoned grassland under different treatments

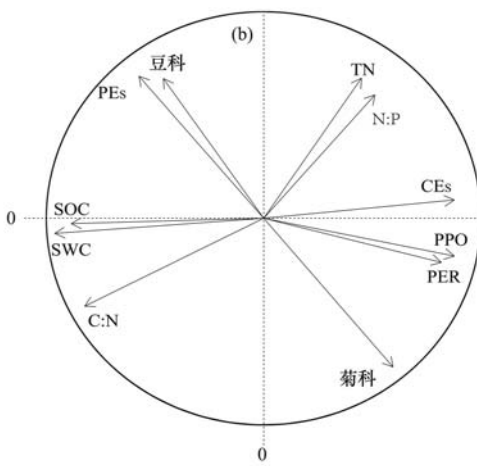
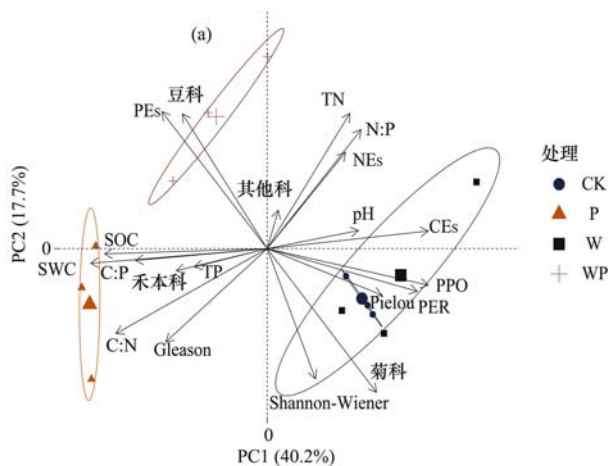
处理在 PC1 上有明显差异,其中 SWC、SOC 和 CEs 是主要的差异因子;增雨和增温增雨交互处理在 PC2 上差异明显,增温增雨交互处理明显高于增雨处理,Gleason 指数和 PEs (ALP) 酶活性是主要的差异因子;但增温 and 对照处理在 PC1 上无明显差异 [图 4(a)]. SOC、SWC、ALP、豆科占比、菊科占比、TN、C:N、N:P、CEs、PPO 和 PER 等变量对两个主成分的贡献最高[图 4(b)]. 根据向量的余弦值可判断出 SWC 与有机碳正相关,与 CEs 负相关,除 PEs 酶活性和向量角度 VA 与 SWC 或 SOC 正相



VA 和 VL 分别代表酶化学计量的向量角度和长度,图中数据为平均值(标准误),不同的大写字母表示向量角度在不同处理间有显著差异,不同的小写字母表示向量长度在不同处理间有显著差异($P < 0.05$)

图 3 不同处理下土壤胞外酶化学计量的向量长度和角度变化特征

Fig. 3 Changes in the vector length and angle of soil extracellular enzymatic stoichiometry of abandoned grassland under different treatments



(a) 表示主成分分析双标,不同颜色的椭圆代表不同处理,点的距离越远代表样本差异越大,向量在坐标轴的投影代表对某一主成分的载荷系数,向量的余弦值可反映变量之间的相关性;(b) 根据 $\cos^2$ (变量在主成分分析中的质量) > 0.6 所筛选出贡献较大的 11 个变量

图 4 不同处理下植被-土壤-酶活性因子的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis(PCA) of vegetation -soil-enzymatic activity factors under different treatments

施后形成的重要生态系统,对该脆弱生境的生态保护和监测极为重要. 本研究是中国知网上首次对黄土丘陵区撂荒草地生态系统土壤胞外酶活性及计量特征与气候变化响应关系的报道.

土壤酶是生态系统代谢的重要动力,其活性以及计量特征不仅可作为指示气候变化条件下土壤微生物变化的早期指标,也可表征微生物对元素的需求和限制情况^[18]. 纤维素酶(BG、CBH 和 BX)与相对不稳定的碳库有关,其中 BG 和 CBH 是纤维素酶的主要组成部分,主要参与纤维素中原子团之间糖苷键的水解过程,BX 是半纤维素酶的主要成分,主

要参与木聚糖等半纤维素的水解,形成对微生物生命活动极为必要的木糖^[19]. 由于增温以及增雨所引起的土壤微环境诸如水分、氮、磷等的改善为 BX 酶活性提供了充足的水分和元素供应,因此 BX 酶活性在气候变化处理下有显著地增加. Steinweg 等^[20]在撂荒农田的研究也发现了 BX 酶活性在增温增雨下有显著增加. BX 酶活性的增加进一步加速了土壤中半纤维素的降解,提高了土壤有机碳含量^[21](表 3),同时碳含量相对较高的禾本科植物的增加将更多的碳归还到土壤(表 2 和表 3),从而为微生物提供了充足的碳源,降低了微生物受能量

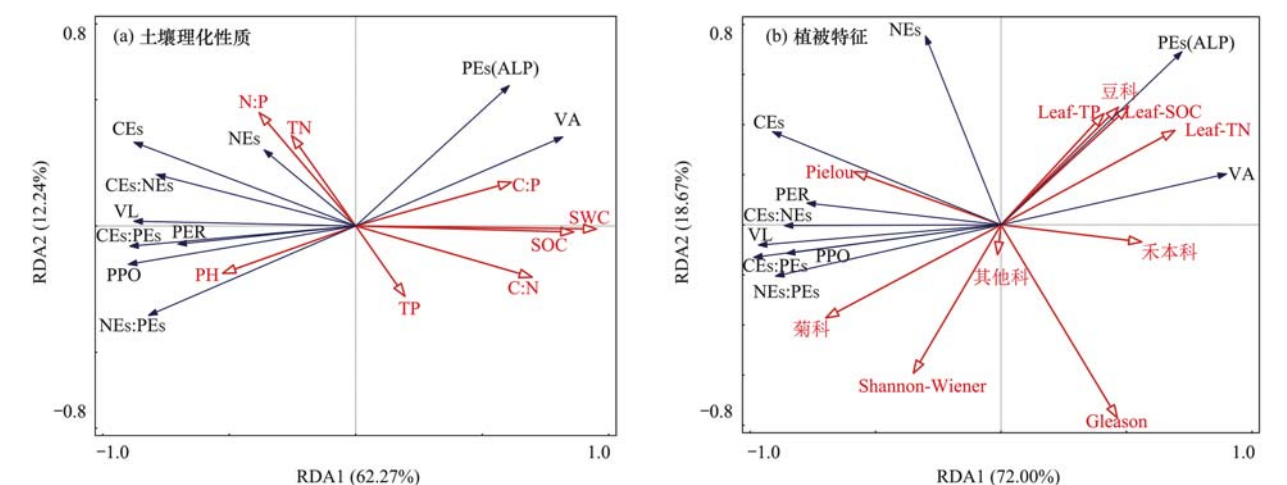
关之外,其余酶活性和计量特征均与 SWC 或 SOC 负相关[图 4(a)].

以土壤酶活性和计量特征作为响应变量,分别以土壤理化性质和植被特征作为解释变量进行 RDA 分析,结果如图 5. 土壤理化性质与酶活性及计量特征的冗余分析中,RDA1 轴和 2 轴的解释比例分别为 62.27% 和 12.24%,其中 SWC 解释了 56.5% 的变异量[图 5(a)]. 植被特征对土壤酶活性及计量特征影响的冗余分析中,RDA1 轴和 2 轴的

解释比例分别为 72.00% 和 18.67%,其中菊科占比、Gleason 丰富度指数、禾本科占比、叶片 TN 和 Shannon-Wiener 多样性指数分别解释了 38.3%、22.3%、16.1%、5.6% 和 5.1% 的变异量[图 5(b)].

3 讨论

本研究结果表明黄土丘陵区撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征对增温和增雨存在差异响应. 黄土丘陵沟壑区撂荒草地是国家退耕还林还草工程实



蓝色箭头表示酶活性及酶化学计量特征,红色箭头表示土壤理化性质及植被特征

图5 土壤酶活性分别与土壤理化性质和植被特征的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis(RDA) of soil extracellular enzymatic activity constrained by soil physicochemical properties and vegetation characteristics

(碳)限制的程度^[22](图3).然而,禾本科植物增加的同时意味着输入土壤的有机质质量相对较低^[23],BG和CBH酶活性可反映有机质质量的高低,因此禾本科植物的增加可能是本研究中BG和CBH酶活性降低的重要影响因素(图1和图5),表明植物科组成的变化会引起输入土壤的有机质元素配比发生变化,从而改变了微生物的元素限制状况^[24].钟泽坤等^[12]的研究也表明植被特性可通过改变土壤理化因子间接影响酶活性.具体来说,禾本科植物(碳含量较高,氮磷含量较低)占比的显著增加引起了输入土壤的有机质元素化学计量不平衡(表2),提供了更多的植物源C用于微生物代谢,导致微生物对C元素的需求降低,而对N和P元素的需求变大^[25].元素需求的变化刺激了微生物分泌更多的N和P降解酶以缓解养分代谢限制,同时豆科植物的增加促进了土壤固氮能力提升,提供了土壤氮的可行又有效的来源^[26].因而微生物增加了对N和P降解酶的相对有效的投资以缓解N和P缺乏状况(图3),减少了C降解酶(BG和CBH)的相对投资,故而降低了CEs:NEs和CEs:PEs,缓解了微生物的元素限制^[27].值得注意的是,单独增温处理时豆科植物占比降低,导致了氮素供应不足引起氮限制的加剧(图3中增温处理酶化学计量的向量角度小于对照处理,且均小于45°证明了氮限制加剧).因此从养分资源获取角度来理解,氮限制加剧反映了微生物需要将更多的功能发挥在获取N的过程中(增加N降解酶的分泌和活性),以维持自身的元素平衡^[28].

对于土壤氧化酶,本研究发现土壤增温显著增加了过氧化物酶(PER)活性,增雨以及增温增雨降低了过氧化物酶(PER)和多酚氧化酶(PPO)活性,

其原因可能是增温环境下木质素含量较高的植被(例如禾本科)成为优势种群导致土壤不稳定有机碳含量的持续降低以及顽固性碳化合物的增加,促使土壤微生物群落逐渐适应利用以前难以分解的顽固C库来为其代谢活动提供能量^[29];而增雨环境下由于豆科等木质素含量相对较低的植被数量增加,使得凋落物的有效投入增加导致微生物可利用碳源的增加从而降低了微生物对难降解碳的需求^[30],因此氧化酶活性较低.此外,Freeman等^[31]的研究发现,土壤环境中的可利用性氧气含量和氧化酶的活性成正比,因此增雨处理下引起的土壤氧气含量相对不足可能是PER和PPO活性降低的原因.上述结果证实了微生物可通过改变胞外酶的分泌水平来调整其生理代谢以适应外部环境的变化.

酶化学计量比的向量长度在增雨和增温增雨交互下显著增加对应了本研究中土壤有机碳含量在两个处理中的大幅提升,表明土壤水分含量(SWC)和有机碳(SOC)在调控该区域土壤碳降解酶活性及相关计量比响应气候变化的过程中发挥了重要作用.增加的SOC含量减少了微生物对C降解酶的需求以及相对投资,使得更多的C用于合成获取限制性养分的胞外酶^[12].SWC是土壤理化性质中对土壤酶活性及计量比影响最为重要的因子,也是区分不同的气候变化处理下土壤酶活性和计量比特征显著差异的主要因子(图4和图5).土壤水分可直接参与土壤生化反应影响微生物和植物的生命活动,高的水分可利用性有利于土壤养分的扩散以及有效元素向微生物的渗透^[27],但同时水分过多可能会改变土壤含氧状态(降水量增加在一定程度上使土壤形成厌氧环境)影响酶的分泌^[31,32];另一方面,SWC与

SOC 存在极显著正相关关系,有研究表明,土壤水分增加可促进凋落物的淋溶作用,使得地表层凋落物和腐殖质中的黏粒、有机质和碳酸盐等物质进入土壤,增加了土壤有机质含量^[33].在此基础上,当以 SWC 作为协变量对土壤理化因子各项指标与酶活性进行偏回归分析时(未展示),发现与酶活性及计量比原本显著相关的 SOC 未能通过显著性检验,因此有理由推测 SWC 驱动了土壤 SOC 含量的增加从而间接改变了相应的酶活性及计量特征.全球尺度上,CEs:NEs:PEs 酶活性计量比值大体呈现1:1:1的尺度关系,反映了 C、N 和 P 循环之间的一种耦合关系^[34],而本研究却发现黄土丘陵区撂荒草地 CEs:NEs:PEs 酶活性比在4个处理下的变化范围从1:1.86:1.47到1:2.83:2.86,平均为1:2.24:1.98,大大偏离了1:1:1.表现出 C 降解酶活性小于 N 或者 P 降解酶活性,并且 N 降解酶活性在三者中最大的特征,这说明了微生物对参与土壤 C、N 和 P 循环相关酶的投入在不同水热条件下有明显差异,同时凸显了黄土丘陵区撂荒草地的区域性特征^[35].

4 结论

(1)增温显著增加了 β -1,4-木糖苷酶(BX)活性,但对总碳降解酶活性(CEs)几乎无影响,增雨和增温增雨均降低了 CEs,增温和增温增雨显著增加了氮降解酶活性(NEs)和磷降解酶活性(PEs),增雨显著增加了 PEs.

(2)增温显著增加了过氧化物酶(PER)活性,而增雨显著降低了 PER 酶活性,增雨以及增温增雨显著降低了多酚氧化酶(PPO)活性.

(3)增雨以及增温增雨处理下土壤养分含量和植被科组成的变化可减弱该生态系统土壤微生物的氮限制程度,土壤水分和有机碳含量是引起土壤酶活性特征改变的关键因子.

(4)本研究反映了黄土丘陵区撂荒草地土壤酶活性和计量特征的相对特异性,同时验证了土壤酶活性和计量特征在反映土壤元素限制方面的重要作用,这对研究未来气候变化背景下流域尺度养分可利用性和受限制情况具有重要意义.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013-The physical science basis. Contribution to working group I the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Meng C, Tian D H, Zeng H, *et al.* Global meta-analysis on the responses of soil extracellular enzyme activities to warming[J]. Science of the Total Environment, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135992.
- [3] 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.
- [4] Liu W X, Zhang Z, Wan S Q. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. Global Change Biology, 2009, **15**(1): 184-195.
- [5] Allison S D, Wallenstein M D, Bradford M A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology[J]. Nature Geoscience, 2010, **3**(5): 336-340.
- [6] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(12): 2898-2909.
- [7] McDaniel M D, Kaye J P, Kaye M W. Increased temperature and precipitation had limited effects on soil extracellular enzyme activities in a post-harvest forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **56**: 90-98.
- [8] Vargas R, Collins S L, Thomey M L, *et al.* Precipitation variability and fire influence the temporal dynamics of soil CO₂ efflux in an arid grassland[J]. Global Change Biology, 2012, **18**(4): 1401-1411.
- [9] Guo Z M, Zhang X Y, Green S M, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry along a gradient of vegetation restoration at the Karst Critical Zone Observatory in Southwest China[J]. Land Degradation & Development, 2019, **30**(16): 1916-1927.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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.
- [13] 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.
- [14] 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 等. 黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 411-421.
- [15] Zhong Z K, Yang G H, Ren C J, *et al.* Effects of farmland abandonment on soil enzymatic activity and enzymatic stoichiometry in the loess hilly region, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 411-421.
- [16] 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): 8.
- [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] 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): 2416-2424.
- [19] 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.
- [20] Allison S D. A trait-based approach for modelling microbial litter decomposition[J]. Ecology Letters, 2012, **15**(9): 1058-1070.

- [17] Moorhead D L, Sinsabaugh R L, Hill B H, *et al.* Vector analysis of ecoenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 1-7.
- [18] 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.
- [19] Chen J, Luo Y Q, Li J W, *et al.* Costimulation of soil glycosidase activity and soil respiration by nitrogen addition[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(3): 1328-1337.
- [20] Steinweg J M, Dukes J S, Paul E A, *et al.* Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, **4**: 146.
- [21] Nottingham A T, Turner B L, Whitaker J, *et al.* Temperature sensitivity of soil enzymes along an elevation gradient in the Peruvian Andes[J]. *Biogeochemistry*, 2016, **127**(2-3): 217-230.
- [22] 乔文静, 戴银月, 张伟, 等. 黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5687-5698.
- Qiao W J, Dai Y Y, Zhang W, *et al.* Relationship between the vegetation community and soil nutrient and enzyme activity during the restoration of abandoned land in the loess hilly region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5687-5698.
- [23] 王启基, 李世雄, 王文颖, 等. 江河源区高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 草甸植物和土壤碳、氮储量对覆被变化的响应[J]. *生态学报*, 2008, **28**(3): 885-894.
- Wang Q J, Li S X, Wang W Y, *et al.* The dependences of carbon and nitrogen reserves in plants and soils to vegetations cover change on *Kobresia pygmaea* meadow of Yellow River and Yangtze River source region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(3): 885-894.
- [24] 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(5): 979-986.
- Guo M, Zheng F L, He W X, *et al.* Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in lands of different abandoned years in the Loess Hilly-Gully region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(5): 979-986.
- [25] 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.
- [26] 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 等. 基于 N: P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1131-1137.
- Zhang R Y, Xu D H, Chen L Y, *et al.* Plant N status in the alpine grassland of the Qinghai-Tibet Plateau: base on the N: P stoichiometry[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1131-1137.
- [27] 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.
- [28] 田静, 盛茂银, 汪攀, 等. 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4278-4286.
- Tian J, Sheng M Y, Wang P, *et al.* Influence of land use change on litter and soil C, N, P stoichiometric characteristics and soil enzyme activity in Karst ecosystem, southwest China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4278-4286.
- [29] De Gonzalo G, Colpa D I, Habib M H M, *et al.* Bacterial enzymes involved in lignin degradation [J]. *Journal of Biotechnology*, 2016, **236**: 110-119.
- [30] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, *et al.* Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau[J]. *Ecology*, 2008, **89**(8): 2140-2153.
- [31] Freeman C, Ostle N, Kang H. An enzymic 'latch' on a global carbon store[J]. *Nature*, 2001, **409**(6817): 149.
- [32] 闫钟清, 齐玉春, 李秦俭, 等. 降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响研究进展[J]. *微生物学通报*, 2017, **44**(6): 1481-1490.
- Yan Z Q, Qi Y C, Li S J, *et al.* Soil microorganisms and enzyme activity of grassland ecosystem affected by changes in precipitation pattern and increase in nitrogen deposition-a review [J]. *Microbiology China*, 2017, **44**(6): 1481-1490.
- [33] Henry H A L, Juarez J D, Field C B, *et al.* Interactive effects of elevated CO₂, N deposition and climate change on extracellular enzyme activity and soil density fractionation in a California annual grassland[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(10): 1808-1815.
- [34] 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.
- [35] Yang Y, Liang C, Wang Y Q, *et al.* Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects the shift from P-to N-limitation of microorganisms with grassland restoration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **149**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107928.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)