

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

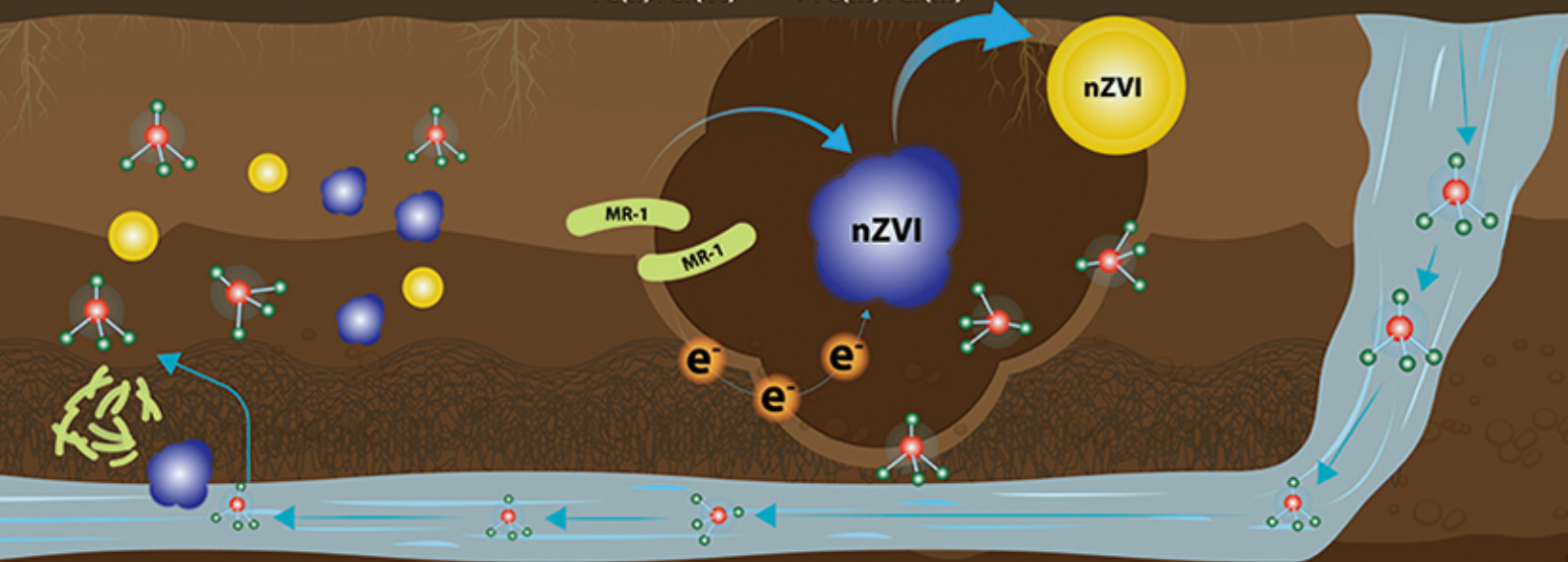
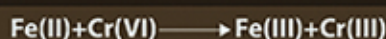
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)	

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响

蒿廉伊¹, 张丽华^{1*}, 谢忠奎², 赵锐锋¹, 王军锋¹, 郭亚飞¹, 高江平¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院皋兰生态与农业综合试验站, 兰州 730000)

摘要: 全球气候变化使得降水格局发生显著改变. 土壤呼吸作为土壤碳库向大气释放 CO₂ 的重要途径, 其对降水变化的响应可能会影响陆地生态系统碳循环进程, 并对全球气候变化产生反馈作用, 但目前关于土壤呼吸对降水变化的响应没有一致的结论. 以黄土高原西部荒漠草原为对象, 通过野外降水控制实验减水 40% (-40%)、减水 20% (-20%)、自然降水、增水 20% (20%) 和增水 40% (40%), 探究降水变化对土壤呼吸动态的影响及其与土壤含水量、土壤温度、地上生物量、土壤有机碳、微生物量碳和碳氮比(有机碳总氮比)等因素的关系. 结果表明, 在 3 a 期间不同降水处理下土壤呼吸的日变化呈现较一致的单峰和双峰模式. 土壤呼吸随降水量的增加均呈增加趋势, 且相较对照, 土壤呼吸在降水控制实验第二年(偏湿年份)和第三年(偏干年份)表现出显著差异, 表明降水变化对土壤呼吸产生了遗留效应. 同时, 相比对照, 偏湿年土壤呼吸在 -40% 处理下显著最低, 在 40% 处理下显著最高, 土壤呼吸对减水处理的负响应强于对增水处理的正响应; 偏干年土壤呼吸在增水处理下显著高于对照, 且对增水处理的正响应明显强于减水处理. 此外, 土壤含水量、地上生物量、土壤有机碳和碳氮比是显著影响土壤呼吸的环境因子, 且随降水量的增加而增加; 土壤呼吸随土壤含水量、地上生物量、土壤有机碳和碳氮比的增加而增加, 随微生物量碳的增加而减少, 其中土壤含水量对土壤呼吸的解释率最高, 这表明土壤含水量是控制荒漠草原区土壤呼吸的主要环境因子. 无论在偏湿或偏干年份, 降水变化下, 植物生物量输入幅度均低于土壤呼吸输出幅度, 表明降水变化可能不利于土壤碳固存, 尤其偏干年份降水变化对碳库输出的影响更强. 因此, 荒漠草原区不同干湿年份降水变化对土壤呼吸的影响可能对生态系统碳循环过程产生不同的影响, 进而为区域碳预算评估提供参考.

关键词: 降水处理; 土壤呼吸 (SR); 地上生物量; 土壤碳库; 荒漠草原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4527-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012204

Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland

HAO Lian-yi¹, ZHANG Li-hua^{1*}, XIE Zhong-kui², ZHAO Rui-feng¹, WANG Jun-feng¹, GUO Ya-fei¹, GAO Jiang-ping¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Gaolan Comprehensive Experimental Station of Ecology and Agriculture, Northwest Institute of Ecology and Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Global climate change has significantly changed precipitation patterns. Soil respiration (SR), as an important pathway through which CO₂ is released from the soil carbon pool into the atmosphere, may affect the carbon cycle process of terrestrial ecosystems and have a feedback effect on global climate change in response to precipitation change. However, at present there is limited understanding of how SR is affected by precipitation change. Field precipitation control experiments were conducted (with -40%, -20%, natural, 20%, and 40% precipitation) on desert grassland in the west of the Loess Plateau, to investigate the influence of precipitation change on SR dynamics and its relationship with soil water content, soil temperature, aboveground biomass, soil organic carbon, microbial biomass carbon, carbon-nitrogen ratio, and other factors. The results show that the diurnal variations of SR under different precipitation treatments were consistent in unimodal and bimodal models over three years. SR showed an increasing trend with added precipitation, relative to the control, and significant differences were observed between the second year (wetter) and the third year (drier) of the precipitation-manipulation experiment, indicating that precipitation changes had a legacy effect on SR. At the same time, SR was lowest under the -40% treatment and highest under the 40% treatment during the wetter year. The negative response of SR to precipitation exclusion treatments was stronger than the positive response to precipitation addition treatments. SR in drier years was significantly higher under precipitation addition treatments than the control, and the positive response of SR to increased precipitation treatment was significantly stronger than that under decreased precipitation treatment. In addition, soil water content, aboveground biomass, soil organic carbon, and carbon-nitrogen ratio were the environmental factors that obviously affected SR and increased with additional precipitation. SR increased with increases in soil water content, aboveground biomass, soil organic carbon, and carbon-nitrogen ratio, but decreased with increases in microbial biomass carbon. Among these factors, soil water content had the highest interpretation rate for SR, indicating that soil water content was the main environmental factor controlling SR in desert grassland. In both wetter and drier years, the amplitude of plant biomass input was lower than the amplitude of SR output under

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761043, 41201196, 41261047); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN2020-06, NWNU-LKQN-17-7); 甘肃省科技计划项目(20YF3FA042)

作者简介: 蒿廉伊(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为荒漠草原土壤碳库对降雨变化的响应, E-mail: haolianyi2020@126.com

* 通信作者, E-mail: zhanglihua@126.com

precipitation change, indicating that precipitation change may be unfavorable to soil carbon sequestration, especially in drier years, when precipitation change has a stronger influence on carbon pool output. Therefore, precipitation changes on SR in desert grassland in various dry and wet years may have different influences on the carbon cycle process of ecosystems, thus providing a reference for regional carbon budget assessment.

Key words: precipitation treatment; soil respiration(SR); aboveground biomass; soil carbon pool; desert grassland

全球气候变化模型预测 21 世纪下半叶降水格局将发生重大改变^[1],这将对陆地生态系统碳循环过程产生显著影响^[2,3]. 土壤呼吸(soil respiration, SR)作为全球碳循环中最关键的组分,其微小变化都会显著影响大气 CO₂ 浓度,进而影响区域和全球的碳平衡和气候变化^[4]. 在以水分为主要限制因子的半干旱区,SR 主要受土壤水分和土壤温度的控制^[5,6],所以降水变化将通过改变土壤微气象条件(如土壤水分和土壤温度)影响土壤 CO₂ 通量,进而增加对区域碳预算评估的不确定性. 因此,揭示 SR 对降水变化的响应将在很大程度上提升人们对全球和区域碳平衡的了解.

目前,国内外学者在不同生态系统类型下开展了大量控制降水实验,研究了 SR 对降水变化的响应,包括 SR 的日变化及其年变化^[7-12]. 从 SR 对降水变化响应的日变化方面来看,目前研究结果并不一致,例如,在高寒草甸生长季,SR 的日变化呈双峰模式,最大值出现在 13:00~14:00 和 16:00^[7];而在中国内蒙古西部的荒漠草原区,不同降水条件下的 SR 日变化随时间呈单峰模式,峰值在 09:00~13:00^[8]. 从年变化来看,在不同干湿条件下的 SR 对降水变化的响应规律并不相同. 例如,在西双版纳热带雨林中,由于降水丰富,土壤含水量对土壤呼吸的影响远小于土壤温度^[9];在高寒湿地,相比于其他环境因素,土壤水分是影响土壤呼吸的主要因素,并与土壤呼吸呈极显著正相关^[10];在加利福尼亚一年生草原中,干季 SR 对降水增加的响应显著,而在湿季对降水变化无明显响应^[11];在中国南部 3 种常见的亚热带森林区(包括马尾松林,针阔混交林和季风常绿阔叶林),旱季 SR 随降水量的增加而增加,而湿季 SR 随降水的减少而增加^[12]. 可见,在干旱条件下 SR 对降水增加的响应比湿润条件下更明显^[13,14]. 尽管在多个研究中已经报道了多地点和多年控制降水实验中 SR 对降水变化的响应呈非线性模式^[15,16],但关于 SR 对降水变化的响应规律并不一致,以及降水变化下主导土壤呼吸的环境因素亦不明确. 因此,仍然需要从多梯度降水实验中获得大量证据来表征这一响应模式^[17],因为验证这一关系对在干旱半干旱地区模拟气候变化下生态系统碳循环的稳定性至关重要.

本研究采用野外控制实验的方法,模拟降水变

化对荒漠草原 SR 的日变化和年变化的影响,研究降水梯度下 SR 的响应规律及其与环境因素(土壤温度、土壤湿度、地上生物量、土壤有机碳、微生物量碳和碳氮比等)的关系,以期为全球气候变化背景下荒漠生态系统中碳库变化及区域碳预算评估提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验地点位于中国科学院西北生态环境资源研究院皋兰生态与农业综合试验站(36°13'N, 103°47'E; 海拔为 1 780 m). 气候类型为半干旱大陆性气候. 年平均降水量为 263 mm,其中 70% 的降水发生在 5~9 月. 年平均气温为 8.4℃,月平均最高气温为 20.7℃(7 月),月平均最低气温为 -9.1℃(1 月). 平均土壤有机碳和总氮的含量分别为 7.5 g·kg⁻¹ 和 1.0 g·kg⁻¹, pH 为 8.52. 该地区土壤由风积黄土母质发育而成,具有均匀的粉砂壤土质地,在联合国粮农组织/联合国教科文组织中被分类为普通钙积土. 该地以典型的荒漠草原植被为主,包括小半灌木的灌木:亚菊(*Ajania fruticulosa*)、红砂(*Reaumuria songarica*)和多年生草本短花针茅(*Stipa breviflora*). 常见的伴生多年生草本植物有:骆驼蓬(*Peganum harmala*)、阿尔泰狗哇花(*Heteropappus altaicus*)、蝎虎驼蹄瓣(*Zygophyllum mucronatum*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*). 一年生草本植物丰度较低,常见的物种包括刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、锋芒草(*Tragus racemosus*)和地锦(*Euphorbia humifusa*)等.

1.2 实验设计

本实验采用完全随机区组设计,根据研究区近 50 a 的降水变率(-41.1%~39.2%)设置 5 个降水梯度,分别为在自然降水量的基础上减水 40%(-40%)、减水 20%(-20%)、增水 20%(20%)、增水 40%(40%)和对照(自然降水). 在皋兰站植被分布较均匀的地段,每个降水处理重复 3 次,共设置 15 个 2.5 m×2.5 m 的固定样方,每个样方四周用防锈铁皮埋深 30 cm,露出地表 15 cm,防止样方内外表层水分径向流动. 降水频率和时间没有改变. 在 2013~2015 年每年 5~9 月实施降水处理^[18].

减水处理:利用遮雨棚截留降雨,减少每次降雨量的 20% 和 40%。遮雨棚由固定位置的金属框架组成,顶部装有透明的 V 型丙烯酸条带(夹角为 60° , 宽为 10 cm),遮雨板通过遮挡样方面积的 20% 和 40% 形成减水区^[19]。遮雨棚的平均高度为 0.50 m。与塑料或聚氯乙烯相比,丙烯酸的透光率较高,对光合有效辐射的拦截量也比其他遮挡设计要少。由于空气流动不受限制,温室效应可被消除。并在遮雨棚框架较低端安装集雨槽,将截留的降水收集到密闭容器中。

增水处理:在每次降水事件发生后 8 h 内,通过将减水处理样方中被拦截的降水手动均匀地添加到增水处理的样方中,以达到增水 20% 和 40% 处理。

对照处理:无遮雨棚和增水处理,其他环境条件与减水和增水处理保持一致。

1.3 植物生物量

在生物量高峰时期(9 月初)使用收获法对地上生物量进行了评估。在每个大样方(2.5 m × 2.5 m)中排除固定植物调查的 1 m × 1 m 的小样方外,随机选择两个 0.5 m × 0.5 m 的样方测生物量,且每年测生物量的位置选前年没干扰的位置,所有植物按物种剪切到土壤表面。在 65°C 的烘箱中烘干 48 h 后称量干重以测定各物种生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。群落的地上生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)是根据所有物种地上生物量的总和估算的。另外,从固定植物调查的 1 m × 1 m 的小样方中收集凋落物并用烘干法进行凋落物测定^[19]。

1.4 土壤数据

0 ~ 20 cm 深的土壤含水量在 2013、2014 和 2015 年选择在大样方(2.5 m × 2.5 m)中固定调查植物性状样方的周围无植物生长的空隙用土钻法进行测量。5 cm 深的土壤温度通过与 LI-6400-09 土壤室(Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA)连接的热电偶探头测定。

土壤样品分别于 2013、2014 和 2015 年每年 8 月在 15 个样方中和测土壤含水量的样品同时采集,土壤样品采集量以保证分析使用即可,采集完土壤样品后进行土壤回填,并做好标记,以减少对样方中植物和土壤的影响。在每个样方中用土钻(直径 5 cm)分别在深度 0 ~ 5、5 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 取 3 个土样。手动去除可见的根和石头后,先将土壤通过 2 mm 的筛,再将通过 0.25 mm 筛后的样品自然风干用于化学分析。

采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物量碳和氮^[20]。土壤有机碳的测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 氧化法;总氮采用微量凯氏定氮法测定;速效磷采用 Bray 法进行测定;速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法进

行测定;土壤 pH 值由玻璃电极测定,电导率由电导率仪在土水比率为 1:2.5 的情况下测定^[21]。

1.5 SR 的测量

为了测定 SR,在每个样方(2.5 m × 2.5 m)两个对角线位置,将两个内径为 11 cm 和高为 5 cm 的聚氯乙烯项圈插入土壤 3 cm。至少在测量前 1 d 要人工将土壤项圈内的所有活植物取出。使用 LI-6400-09 的土壤室(Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA)测定 SR 的值。每个项圈中观察时间为 2 ~ 3 min。将每个样方中的两个项圈的值取平均作为一个重复。SR 在 2013、2014 和 2015 年的 6 ~ 9 月每月中下旬选择无雨的 2 d,在 08:00 ~ 18:00 每 2 h 测定一次。最后,根据测量日一周的天气情况选择 2013 年的 7 月 28 日和 8 月 21 日、2014 年的 6 月 27 日和 7 月 15 日、2015 年的 7 月 21 日和 8 月 28 日的土壤呼吸数据作为本研究的数据。

1.6 数据分析

极端降雨年份被定义为统计学上罕见发生的年份^[22],先前已有研究将小于历史年降雨量第 10 百分位与大于第 90 百分位定义为极端干旱和极端湿润,第 45 ~ 55 百分位定义为正常年份^[23,24],利用皋兰气象站过去 50 a(1957 ~ 2012 年)生长季降雨量的概率密度函数(probability density functions)和实验期间生长季降雨量,确定 2013、2014 和 2015 年分别属于正常年份、偏湿年份和偏干年份(图 1)。

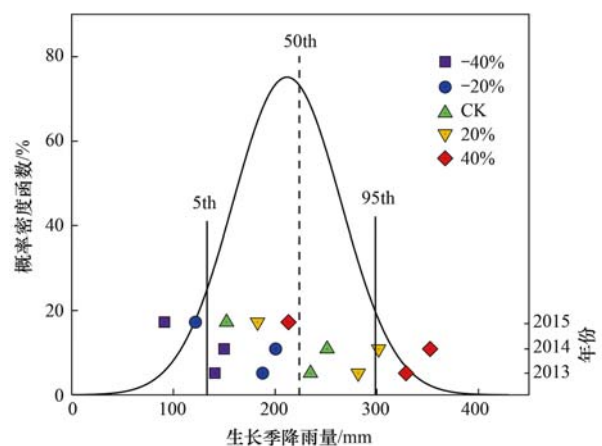


图 1 55 a(1957 ~ 2012) 年生长季降雨量的概率密度函数

Fig. 1 Probability density function of precipitation during the growing season, over 55 years (1957-2012)

单因素方差分析用来确定降水处理对土壤温度、土壤湿度、地上生物量、土壤有机碳、微生物量碳和碳氮比等和年 SR 的影响,差异显著($P < 0.05$)则采用 LSD 检验进行事后多重比较。最后,采用回归分析确定降水 and 环境因子(土壤温度、土壤湿度、地上生物量、土壤有机碳、微生物量碳和碳氮比等)与 SR 之间的关系。所有统计分析均采用 SPSS 25.0 进行。

2 结果与分析

2.1 降水变化对 SR 的影响

2.1.1 SR 的日变化

由图 2 可知,在 2013 年,各降水处理下的 SR 日变化均呈双峰模式,峰值均出现在 10:00 和 15:00,且 7 月和 8 月较高的峰值分别出现在 15:00 和 10:00;在 2014 年,各降水处理下的 SR 日变化均呈单峰模式,6 月和 7 月的峰值分别出现在 10:00 ~ 13:00 和 13:00 ~ 15:00;在 2015 年,SR 的日变化在 7 月的 08:00 出现最大值,而 8 月的峰值基本上也出现在 08:00。

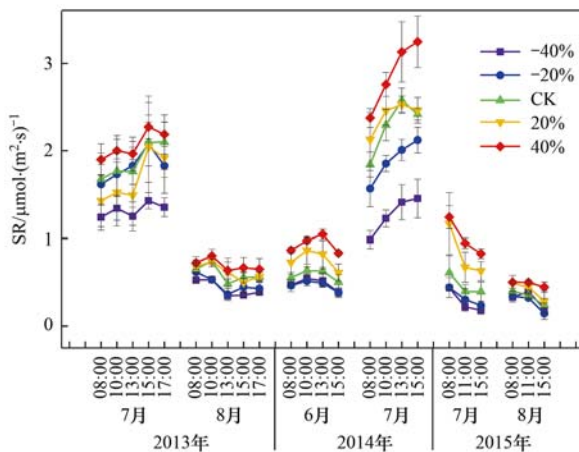


图 2 3 a 不同降水处理下生长季土壤呼吸的日变化 ($n=3$)

Fig. 2 Diurnal change in soil respiration during the growing season of three years, under different precipitation treatments ($n=3$)

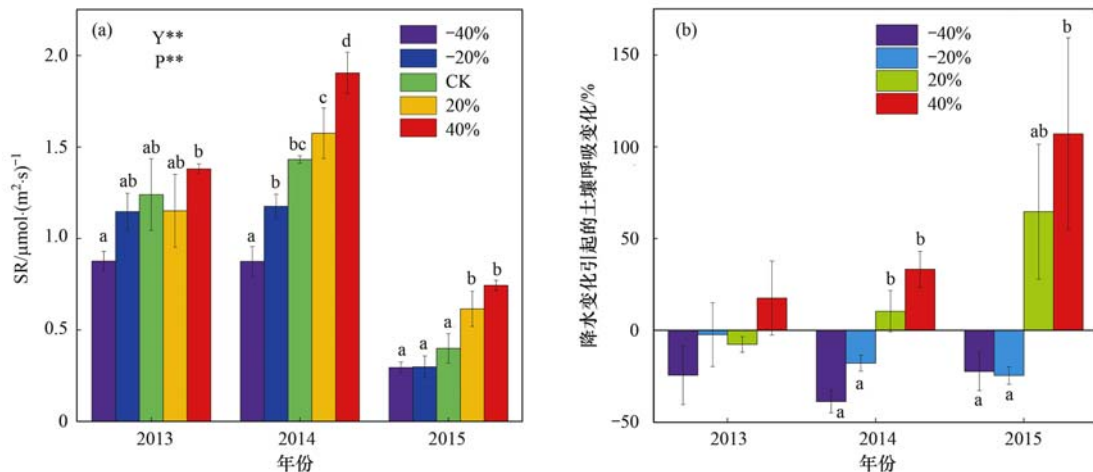
2.1.2 降水处理下 SR 的年际变化

由图 3(a)可知,SR 的年际变化受降水处理 ($P < 0.01$) 和年际变化 ($P < 0.01$) 的显著影响,且在 3 a 中均随着降水量的增加而增加。其中,2013 年 SR

只在 40% 和 -40% 处理之间表现出显著差异 ($P < 0.05$);而在 2014 年,SR 在 40% 和 -40% 处理下与对照相比都存在显著差异 ($P < 0.01$),尤其在 2015 年,增水处理下的 SR 均显著高于对照 ($P < 0.05$)。另外,从图 3(b)中可得出,在 2013 年 SR 在增水与减水处理之间没有表现出显著差异 ($P > 0.05$);而在 2014 年相比于增水处理 SR 对减水处理的负响应更显著 (SR 在减水处理下的减幅比在增水处理下的增幅高 13.65%, $P < 0.05$);在 2015 年相比于减水处理 SR 对增水处理的正响应更显著 (SR 在增水处理下的增幅比在减水处理下的减幅高 88.71%, $P < 0.05$),这反映出在干、湿年份降水处理对 SR 的影响是不一致的。

2.2 降水处理下环境因素的变化

土壤温度在 3 a 期间都没有受到降水处理的显著影响 ($P > 0.05$),见表 1,而土壤含水量在 2013 年没有受到降水处理的影响 ($P > 0.05$),但在 2014 年和 2015 年却受到了降水处理的显著影响 ($P < 0.05$),且在 40% 处理下的土壤含水量都明显高于减水处理下的土壤含水量 ($P < 0.05$),见表 2。此外,降水处理对速效磷 (AP)、速效钾 (AK)、碳氮比 (C/N)、有机碳 (SOC) 和微生物量碳 (MBC) 的影响不显著,对 pH、总氮 (TN)、电导率 (EC)、地上生物量 (AGB)、凋落物 (L) 和微生物量氮 (MBN) 的影响显著 ($P < 0.05$)。其中, pH 在 20% 处理下显著高于 -40% 处理 ($P < 0.05$); TN 在对照处理下显著高于 -20% ($P < 0.01$); EC 在 -40% 处理下显著高于 20% ($P < 0.05$); AGB 在增水处理和对照处理下分别显著高于减水处理和 -40% 处理 ($P < 0.05$, $P < 0.01$),且在 20% 处理下呈更高趋势; L 在 40% 处理



(a) 不同降水处理下土壤呼吸的年变化, ** 表示 $P < 0.01$, (b) 3 a 不同降水处理下降水引起的土壤呼吸变化; 竖线代表均值的标准误差, $n=6$, 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 不同降水处理下和降水引起的土壤呼吸年变化

Fig. 3 Annual variation of precipitation-induced soil respiration under different precipitation treatments

下显著高于-40% ($P<0.01$)；MBN 在-40% 处理下显著低于其他处理 ($P<0.05$)，见表 3。

2.3 SR 和环境因素之间的关系

由图 4 可以看出，降水量与土壤含水量、土壤含水量与呼吸之间存在着显著的正相关关系，但降水量与土壤温度、土壤温度和呼吸之间无显著相关关系。SOC、AGB、C/N 与降水量呈显著正相关关系[图

5(a)、5(c)和5(g)]，而 MBC 与降水量呈显著负相关关系[图 5(e)]；但 L、MBN、TN、AP、AK、EC 和 pH 与降水量和 SR 无显著相关关系(图 6)。其中，降水量对 AGB 解释率最高(30%)，其次是 C/N (24%)、MBC(17%)和 SOC(10%)；而 C/N 对 SR 解释率最高(27%)，其次是 SOC(20%)、AGB (16%)和 MBC(15%)(图 5)。

表 1 降水处理下 5 cm 深土壤温度的单因素方差分析¹⁾ (均值±标准误差, $n=3$)

年份	降水处理				
	-40%	-20%	CK	20%	40%
2013	24.99±0.48a	24.48±0.38a	25.04±0.47a	24.68±0.93a	24.87±0.84a
2014	26.38±0.55a	25.70±0.39a	26.33±0.38a	25.97±0.40a	26.65±0.50a
2015	25.42±0.31a	24.96±0.54a	24.80±0.36a	24.67±0.18a	25.41±0.64a

1) 不同小写字母代表降水处理间的差异显著 ($P<0.05$)，下同

表 2 降水处理下 20 cm 深的土壤含水量的单因素方差分析 (均值±标准误差, $n=3$)

年份	降水处理				
	-40%	-20%	CK	20%	40%
2013	4.04±0.68a	4.96±0.13a	4.87±0.69a	5.04±0.81a	5.78±0.62a
2014	6.66±0.13a	6.29±0.36ab	7.29±0.35abc	7.53±0.60bc	8.25±0.06c
2015	2.78±0.15a	2.73±0.24a	3.60±0.19ab	3.46±0.52ab	4.18±0.45b

表 3 降水处理下土壤和植物因素的变化 (均值±标准误差, $n=9$)

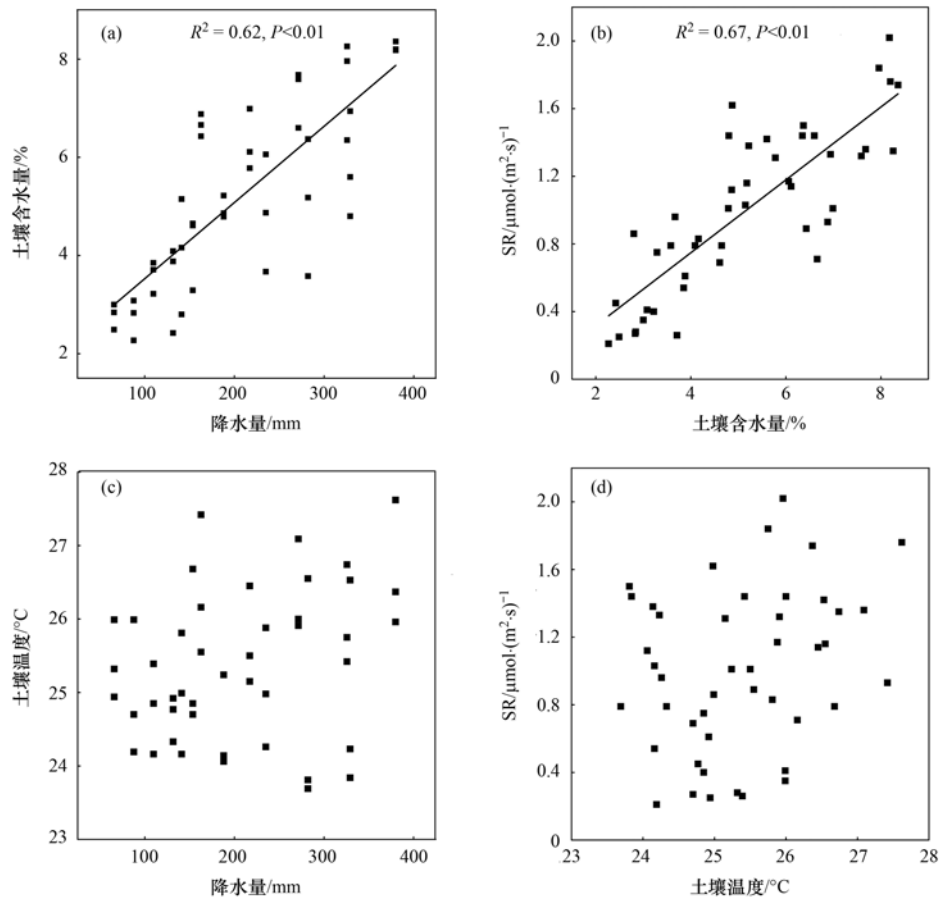
土壤和植物因素	降水处理				
	-40%	-20%	CK	20%	40%
pH	8.38±0.043a	8.43±0.03ab	8.43±0.03ab	8.50±0.03b	8.48±0.04ab
总氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.76±0.04bc	1.51±0.03a	1.79±0.07c	1.57±0.11ab	1.68±0.05abc
土壤有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	13.50±0.34	12.75±0.41	14.14±0.65	12.62±0.99	12.82±0.63
碳氮比	7.71±0.31	8.49±0.29	7.94±0.37	8.09±0.36	7.63±0.31
速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.05±0.41	6.80±0.25	6.57±0.49	5.61±0.52	5.86±0.51
速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	166.94±8.83	165.28±7.69	156.94±2.35	155.28±5.08	167.78±11.00
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	608.81±146.35b	509.11±81.73ab	415.44±41.08ab	320.36±15.23a	391.08±53.18ab
微生物量氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.65±1.39a	16.66±2.02b	20.48±2.23b	15.08±1.59ab	19.60±2.06b
微生物量碳/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	170.00±23.89	212.53±28.84	235.27±29.34	178.45±26.63	209.88±38.46
地上生物量/g	43.91±7.29a	78.54±8.86b	103.35±9.79bc	125.99±11.57c	115.07±11.36c
凋落物/g	1.82±0.16a	2.50±0.33ab	2.20±0.25ab	2.49±0.49ab	3.33±0.50b

3 讨论

3.1 降水变化对 SR 日变化特征的影响及其控制因素

SR 的日变化呈单峰或双峰的模式，SR 的日变化(图 2)与气温日变化(图 7)基本一致。在 2013 年 8 月，SR 呈双峰模式，其中较高的峰值出现在 10:00，较低的峰值出现在 15:00，而气温最高值出现在 13:00。这可能是因为 8 月 8~21 日之间没有发生降水事件(图 8)，土壤中的水分不足，而早上 10:00 温度不高且有露水补充土壤中的水分，所以呼吸出现了最高值，而随着温度继续增加，土壤中的水分蒸发加强，影响地下可溶性有机质的扩散和分

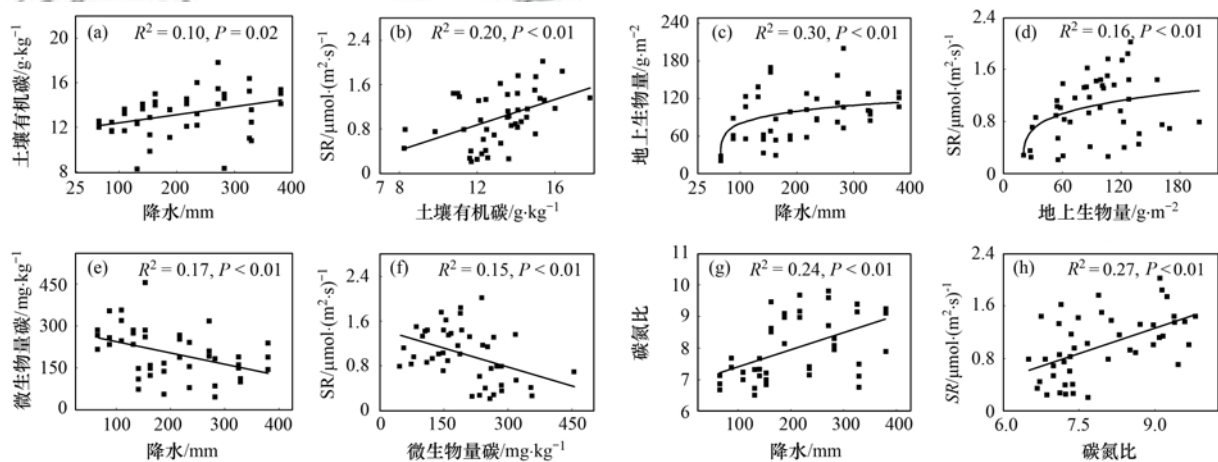
解、减缓微生物和根系的生命活动，从而减弱土壤中的根呼吸和异养呼吸^[25]，而当 15:00 时，温度逐渐降低，土壤中水分蒸发减弱，减缓了对地下可溶性有机质扩散和分解的影响，同时一定程度上促进了微生物和根系活性，所以 SR 有了一定程度的增强^[25]。在 2015 年 7 月，SR 最高值出现在 08:00，且随着时间变化呈下降趋势(图 2)，而气温呈上升趋势(图 7)。SR 最高值出现在 08:00 的原因如下，在测量 SR 日的 3 d 前(即 7 月 18 日前)降水事件频繁(图 8)，较多的降雨增加了土壤水分，且西北地区昼夜温差大，使早晨露水较多，短时间(1 h)内的替代效应对土壤呼吸产生了激发^[26]；另外，2015 年是偏干年份，降水整体较少，所以土壤呼吸对土壤含水



(a)和(c)分别表示土壤含水量和土壤温度随降水量的变化;(b)和(d)分别表示土壤呼吸随土壤含水量和土壤温度的变化

图4 土壤含水量和土壤温度随着降水变化对土壤呼吸的影响

Fig. 4 Effects of soil water content and soil temperature on soil respiration with precipitation



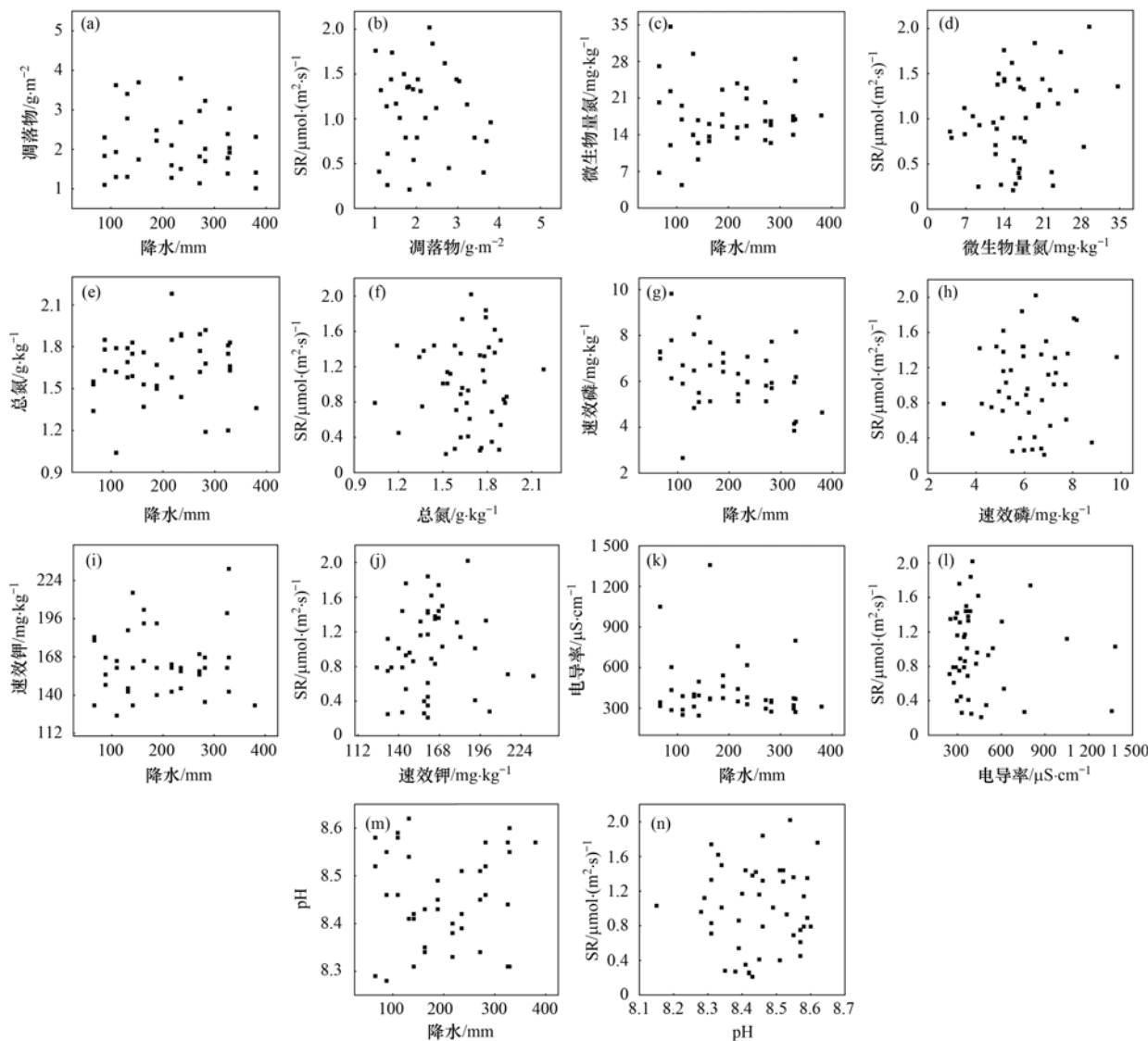
(a)、(c)、(e)和(g)分别表示生长季土壤有机碳、地上生物量、微生物量碳和碳氮比与降水的关系;(b)、(d)、(f)和(h)分别表示生长季土壤有机碳、地上生物量、微生物量碳和碳氮比与土壤呼吸的关系; $n=9$

图5 环境因素随着降水变化对土壤呼吸产生显著影响

Fig. 5 Environmental factors that had a significant effect on soil respiration with changes in precipitation

量的变化较敏感,因此,在早晨土壤含水量充足的情况下,土壤可溶性有机物的有效性和流动性增强,有机物的增加会促进微生物活性并提供给微生物繁殖足够的底物,进而增加土壤呼吸^[27,28]。但随着温度的增加,蒸发加强,对植物和微生物产生一定的水分

胁迫,可能抵消了增温对SR带来的促进作用,从而间接导致了SR的减弱^[29,30];也可能与降雨和温度对微生物活性的直接作用有关,如短期内较大的降雨会直接影响微生物的渗透势,限制土壤微生物的活性和数量^[31],因此影响了有机物的分解速率和微



(a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k)和(m)分别表示生长季凋落物、微生物量氮、总氮、速效磷、速效钾、电导率和 pH 与降水的关系；(b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l)和(n)分别表示生长季凋落物、微生物量氮、总氮、速效磷、速效钾、电导率和 pH 与土壤呼吸的关系； $n=9$

图6 环境因素随着降水变化对土壤呼吸无显著影响

Fig. 6 Environmental factors that had no significant effect on soil respiration with changes in precipitation

生物的呼吸速率；另外,增温可能通过降低土壤含水量与充足的降雨产生拮抗的交互作用影响微生物群落结构直接影响微生物的呼吸^[32]. 因此, 先前降雨事件和测量当日气温变化是影响 SR 日变化的主要因素. 在 2015 年 8 月, SR 日变化随着时间的变化呈下降的趋势,且峰值出现在 08:00 左右,而气温随着时间的变化呈上升的趋势,且峰值出现在 11:00 ~ 15:00. 因为在 08:00 温度较低蒸发很弱且露水充足,又因为呼吸测量前一周内又出现了较大的降水事件(图 8),所以这一时间段呼吸值较高,但随着温度的增加,土壤呼吸逐渐降低. 因此,在该月降水和气温对 SR 日变化影响的具体过程和 2015 年 7 月类似.

一般地,土壤温度和湿度通常是控制 SR 最重要的环境因子^[5]. SR 在湿润的环境下对土壤温度的

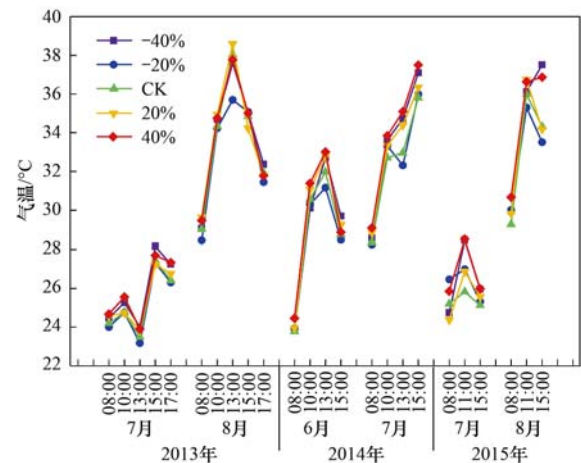


图7 3 a 不同降水处理下生长季气温的日变化($n=3$)

Fig. 7 Diurnal change of air temperature during the growing season of three years, under different precipitation treatments ($n=3$)

变化更敏感^[33],而在干燥的环境下对土壤含水量的

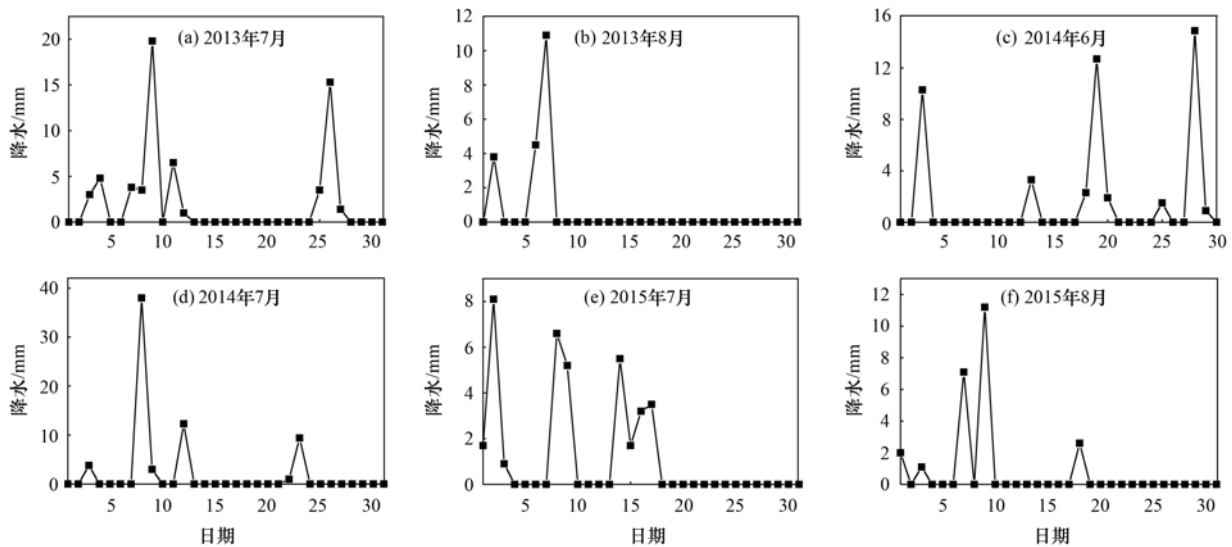


图8 土壤呼吸同期的降雨月变化

Fig. 8 Monthly variation in soil respiration during the same period of rainfall

变化更敏感^[13,14]. 内蒙古干旱半干旱典型草原上的研究也指出, SR 与土壤含水量、土壤温度均具有显著的正相关关系, 但主要由土壤含水量决定^[30], 这与本研究中的结果一致, 即 SR 与土壤含水量之间存在着显著的正相关关系(图4), 而与土壤温度之间的关系并不明显, 这反映出在干旱条件下, 土壤含水量是控制 SR 的一个重要因素. 在本文中温度对呼吸没有产生明显作用的原因可能主要是在干旱的环境中, 土壤水分是限制温带草原生态系统最主要的因子^[34], 因此增温将导致土壤进一步干旱化, 然后对植物产生水分胁迫, 从而抵消了增温对 SR 带来的促进作用, 甚至对 SR 产生抑制作用^[29].

3.2 降水变化对 SR 年际变化的影响及其控制因素

在降水处理后的第一年, 增减水处理下的 SR 与对照并无显著差异 ($P > 0.05$), 而在第二年和第三年相比对照表现出显著差异 ($P < 0.05$), 其中, 降水处理第二年(偏湿年份), 40% 处理下 SR 显著增加 33.0%, -40% 处理显著降低 SR 38.9%; 第三年(偏干年份), 40% 处理显著增加 SR 达 86.3%, 而减水处理并未显著降低 SR(图3). 这表明, 降水变化对 SR 的影响具有遗留效应, 也反映出 SR 对降水变化的响应与当年降水背景值有关, 即偏湿年 SR 对减水的响应更明显, 而偏干年对增水的响应更明显. SR 主要由自养呼吸和异养呼吸所组成, 其中, 自养呼吸主要为根系呼吸和根际微生物呼吸, 而异养呼吸包含微生物呼吸. 有研究表明, 降水变化对半干旱草原地上生物量的影响具有滞后性^[35], 因此, 降水变化对植物生长状况的滞后性可能导致根系呼吸及根际微生物呼吸也表现出滞后性. 另外, 也有研究

发现, 土壤微生物群落结构及多样性对气候变化的响应存在滞后性^[36,37], 因此, 土壤微生物群落对气候变化的滞后响应可能会导致异养呼吸也表现出滞后响应. 由此可知, 植物群落和土壤微生物群落对降水变化的滞后响应可能是形成 SR 表现出遗留效应的主要原因.

SR 在不同干湿年对降水变化的响应规律与多数的研究结果一致^[13,25,38], 即偏湿条件下 SR 对降水减少更敏感, 而偏干条件下对降水增加更敏感. 偏湿年份, 降水减少对呼吸的作用比降水增加更明显, 可能与偏湿年份自然降水量较多, 植物生长以及微生物活性并未受到水分限制, 因此增加降水对植物和微生物活性的促进作用有限, 从而使 SR 也并未表现出更大幅度的增加^[25,39]. 但减少降水, 对植物生长和微生物活性的抑制作用更明显, 本研究结果也反映出, 植物地上生物量在 -40% 条件下显著最低. 有研究发现植物 AGB 与 SR 存在显著正相关关系, 因此, 在评价生态系统碳循环时还应考虑植物生长对 SR 的影响^[40], 植物生长的降低可能直接导致根系自养呼吸的减弱, 并间接通过碳输入的减少抑制微生物活性, 进而也降低异养呼吸^[41,42], 本研究结果也反映出 SOC、C/N 与 SR 存在显著的正相关关系. 这与在内蒙古 3 种典型草原的研究结果一致, 降水后, 微生物可用底物的增加, 加快了其土壤呼吸速率^[43], 有研究也发现在草地和森林土壤中, 微生物呼吸速率与底物呈正相关关系, 此外, 底物的化学计量比(可溶性有机碳氮比)也可能影响微生物对底物分解的有效性, 从而影响呼吸中的异养呼吸^[44]. 然而, 另一项位于内蒙古半干旱草原的研究发现随着降水增加基质有效性降低会进一步增强土

壤呼吸,这可能是由于可溶解碳在干燥的土壤中扩散和周转率较低,而在湿土中的分解率较高,所以在干燥的土中,可溶性有机碳较多从而有助于增强土壤呼吸^[45]. 偏干年份,SR 对增水的响应更明显. 偏干年份的自然降水量本身偏少,甚至接近极端干旱,所以自然降水条件本身对植物生长和微生物活性产生抑制作用^[41,42]. 因此,降水的进一步减少对 SR 的抑制作用有限. 有研究表明,SR 在湿润的环境下对土壤温度的变化更敏感^[33],而在干燥的环境下对土壤含水量的变化更敏感^[13,14]. 本研究结果也表明,土壤含水量与 SR 存在显著正相关关系,且解释率达 67%. 这可能是由于在干土再润湿后,土壤会通过裂解活微生物细胞释放更多的碳,细胞溶质的释放和受保护的有机物暴露在微生物中及碳的可用性都可能是增加碳释放的原因之一^[46]. 因此,干旱条件下土壤水分增加对植物和微生物活性的刺激作用尤为明显,进而促进根系呼吸和微生物呼吸,最终导致 SR 对增水的响应更为明显^[10,13,14]. 由于每年仅通过两次的观测数据来分析不同处理间 SR 的显著性以及年际差异确实可能会因观测次数较少而影响结果的比较,在今后的研究中会完善相应的研究.

3.3 降水变化对土壤碳库的可能影响

土壤碳库作为固定大气 CO₂ 的主要形式,其含量的变化调控着大气 CO₂ 的浓度,进而影响全球气候变化^[4]. 碳库主要包括植物生物量碳库和土壤碳库(土壤有机碳库、微生物生物量碳库)^[24,25]. 本研究结果表明,在正常年,增水 20% 可能有利于土壤碳固存,由于植物生物量输入幅度大于 SR 输出幅度,而其他降水处理均不利于碳固存,由于植物生物量输入的幅度小于 SR 输出的幅度;无论在偏湿还是偏干年,SR 输出幅度均大于植物生物量输入幅度,表明降水变化并不利于土壤碳固存;另外,偏干年 SR 输出幅度比偏湿和正常年份均要明显,表明在降水偏少的背景下降水变化对土壤碳库的扰动作用更强. 综上所述,AGB 和 SR 对降水变化的不同响应可能会影响荒漠草原的碳输入和输出,从而对土壤碳平衡产生显著的影响. 未来,极端湿润或干旱可能会使荒漠草原生态系统从碳平衡变成碳负债. 本研究将有助于对于干旱半干旱生态系统进行碳预算和碳循环的评估,长时间序列控制降水实验对于荒漠草原生态系统碳平衡可能提供更好地支撑.

4 结论

通过在荒漠草原上为期 3 a 的控制降水实验,本研究发现不同降水处理下 SR 的日变化随时间呈单峰和双峰模式,这主要与土壤水分状况和气温有

关. SR 的年际变化整体上均随降水的增加呈增加趋势,偏湿年减少降水对 SR 的抑制作用更为明显,而偏干年增加降水对 SR 的促进作用尤为明显. SR 主要受土壤含水量、土壤有机碳、地上生物量、C/N、微生物生物量碳的影响. 降水变化下,碳库输出高于碳库输入,尤其在偏干年份更为明显,这可能会使荒漠草原土壤成为碳源.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part a: global and sectoral aspects. Contribution of working group ii to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 35-94.
- [2] 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.
- [3] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, *et al.* The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink [J]. *Science*, 2015, **348**(6237): 895-899.
- [4] Li W, Wang J L, Zhang X J, *et al.* Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2018, **111**: 134-142.
- [5] Vicca S, Bahn M, Estiarte M, *et al.* Can current moisture responses predict soil CO₂ efflux under altered precipitation regimes? A synthesis of manipulation experiments [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(1): 2991-3013.
- [6] Niu F R, Chen J, Xiong P F, *et al.* Responses of soil respiration to rainfall pulses in a natural grassland community on the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *CATENA*, 2019, **178**: 199-208.
- [7] 葛怡情, 闫玉龙, 梁艳, 等. 模拟降水氮沉降对藏北高寒草甸土壤呼吸的影响 [J]. *中国农业气象*, 2019, **40**(4): 214-221.
Ge Y Q, Yan Y L, Liang Y, *et al.* The effects of nitrogen deposition on soil respiration in an alpine meadow in Northern Tibet [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, **40**(4): 214-221.
- [8] Zhang R, Zhao X Y, Zuo X A, *et al.* Effect of manipulated precipitation during the growing season on soil respiration in the desert-grasslands in Inner Mongolia, China [J]. *CATENA*, 2019, **176**: 73-80.
- [9] 蔡子良, 邱世平. 西双版纳热带季节雨林土壤呼吸季节动态及驱动因素 [J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(2): 283-290.
Cai Z L, Qiu S P. Seasonal variation of soil respiration and its impact factors in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Yunnan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(2): 283-290.
- [10] 包振宗, 侯艳艳, 朱新萍, 等. 干湿交替和模拟氮沉降对巴音布鲁克高寒湿地土壤 CO₂ 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(3): 598-604.
Bao Z Z, Hou Y Y, Zhu X P, *et al.* Effect of alternating wetting and drying and simulated nitrogen deposition on soil CO₂ emission in alpine wetlands of Bayinbulak [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(3): 598-604.
- [11] Chou W W, Silver W L, Jackson R D, *et al.* The sensitivity of annual grassland carbon cycling to the quantity and timing of

- rainfall[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(6): 1382-1394.
- [12] Jiang H, Deng Q, Zhou G, *et al.* Responses of soil respiration and its temperature/moisture sensitivity to precipitation in three subtropical forests in southern China[J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(6): 3963-3982.
- [13] 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.
- [14] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 等. 降雨量改变对常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(14): 4734-4742.
- Xiang Y B, Zhou S X, Xiao Y X, *et al.* Effects of precipitation variations on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest during dry and wet seasons[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(14): 4734-4742.
- [15] Talmon Y, Sternberg M, Grönzweig J M. Impact of rainfall manipulations and biotic controls on soil respiration in Mediterranean and desert ecosystems along an aridity gradient [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(2): 1108-1118.
- [16] Zhang B W, Li S, Chen S P, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi regulate soil respiration and its response to precipitation change in a semiarid steppe[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep19990.
- [17] 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.
- [18] Yahdjian L, Sala O E. A rainout shelter design for intercepting different amounts of rainfall[J]. *Oecologia*, 2002, **133**(2): 95-101.
- [19] Zhang L H, Xie Z K, Zhao R F, *et al.* Plant, microbial community and soil property responses to an experimental precipitation gradient in a desert grassland [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, **127**: 87-95.
- [20] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] Knapp A K, Avolio M L, Beier C, *et al.* Pushing precipitation to the extremes in distributed experiments; Recommendations for simulating wet and dry years[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(5): 1774-1782.
- [23] Smith M D. The ecological role of climate extremes; current understanding and future prospects [J]. *Journal of Ecology*, 2011, **99**(3): 651-655.
- [24] Knapp A K, Hoover D L, Wilcox K R, *et al.* Characterizing differences in precipitation regimes of extreme wet and dry years: Implications for climate change experiments[J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(7): 2624-2633.
- [25] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 等. 降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响: 进展与展望[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(2): 567-575.
- Li X G, Han G X, Zhu L Q, *et al.* Effects of drying-wetting cycle caused by rainfall on soil respiration: Progress and prospect [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(2): 567-575.
- [26] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, **23**(5): 972-978.
- Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5): 972-978.
- [27] 陈荣荣, 刘全全, 王俊, 等. 人工模拟降水条件下旱作农田土壤“Birch 效应”及其响应机制[J]. *生态学报*, 2016, **36**(2): 306-317.
- Chen R R, Liu Q Q, Wang J, *et al.* Response of soil “Birch Effect” to simulated rainfalls in dry croplands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(2): 306-317.
- [28] 王丽丽, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原不同土地利用方式下凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3130-3135.
- Wang L L, Song C C, Guo Y D, *et al.* Contribution of litter to soil respiration under different land-use types in Sanjiang Plain [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3130-3135.
- [29] 赵慢, 王蕊, 李如剑, 等. 半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2714-2720.
- Zhao M, Wang R, Li R J, *et al.* Response of soil respiration to extreme precipitation in semi-arid regions [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2714-2720.
- [30] 康静, 任海燕, 王悦骅, 等. 短花针茅荒漠草原土壤呼吸对长期增温和氮素添加的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, **33**(5): 151-157.
- Kang J, Ren H Y, Wang Y H, *et al.* Responses of soil respiration to long-term climate warming and nitrogen fertilization in a desert steppe [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, **33**(5): 151-157.
- [31] Sherman C, Sternberg M, Steinberger Y. Effects of climate change on soil respiration and carbon processing in Mediterranean and semi-arid regions: an experimental approach[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, **52**: 48-58.
- [32] Zhang N L, Liu W X, Yang H J, *et al.* Soil microbial responses to warming and increased precipitation and their implications for ecosystem C cycling [J]. *Oecologia*, 2013, **173**(3): 1125-1142.
- [33] Yu C Q, Wang J W, Shen Z X, *et al.* Effects of experimental warming and increased precipitation on soil respiration in an alpine meadow in the Northern Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 1490-1497.
- [34] Christensen L, Coughenour M B, Ellis J E, *et al.* Vulnerability of the Asian typical steppe to grazing and climate change [J]. *Climatic Change*, 2004, **63**(3): 351-368.
- [35] Gong Y H, Zhao D M, Ke W B, *et al.* Legacy effects of precipitation amount and frequency on the aboveground plant biomass of a semi-arid grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135899.
- [36] Ladau J, Shi Y, Jing X, *et al.* Existing climate change will lead to pronounced shifts in the diversity of soil prokaryotes [J]. *mSystems*, 2018, **3**(5), doi: 10.1128/mSystems.00167-18.
- [37] Shi Y, Zhang K P, Li Q, *et al.* Interannual climate variability and altered precipitation influence the soil microbial community structure in a Tibetan Plateau grassland[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136794.
- [38] Felton A J, Zavislan-Pullaro S, Smith M D. Semiarid ecosystem sensitivity to precipitation extremes; weak evidence for vegetation constraints[J]. *Ecology*, 2019, **100**, doi: 10.1002/ecy.2572.
- [39] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, *et al.* Soil extractable carbon and nitrogen, microbial biomass and microbial metabolic activity in response to warming and increased precipitation in a semiarid Inner Mongolian grassland[J]. *Geoderma*, 2013, **206**: 24-31.
- [40] Huang J, Gao Z J, Chen J, *et al.* Diurnal and seasonal variations of soil respiration rate under different row-spacing in a *Panicum virgatum* L. field on semi-arid Loess Plateau of China [J].

- Journal of Arid Land, 2016, **8**(3): 341-349.
- [41] Ye J S, Reynolds J F, Maestre F T, *et al.* Hydrological and ecological responses of ecosystems to extreme precipitation regimes: a test of empirical-based hypotheses with an ecosystem model [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2016, **22**: 36-46.
- [42] Sun G, Wang Z Y, Zhu-Barker X, *et al.* Biotic and abiotic controls in determining exceedingly variable responses of ecosystem functions to extreme seasonal precipitation in a Mesophytic alpine grassland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, **228-229**: 180-190.
- [43] 徐敏, 边红枫, 徐丽, 等. 脉冲式降水对不同类型草地土壤微生物呼吸碳释放量的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(5): 1562-1571.
- Xu M, Bian H F, Xu L, *et al.* Effects of precipitation pulse on soil carbon released by microbes in different grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(5): 1562-1571.
- [44] He N P, Yu G R. Stoichiometrical regulation of soil organic matter decomposition and its temperature sensitivity[J]. Ecology and Evolution, 2016, **6**(2): 620-627.
- [45] Zhang B W, Li W J, Chen S P, *et al.* Changing precipitation exerts greater influence on soil heterotrophic than autotrophic respiration in a semiarid steppe [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, **271**: 413-421.
- [46] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **83**: 52-56.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020 年 12 月 29 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2019 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2019 年度总被引频次 12 057,影响因子 2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)