

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.033.

周祉蕴, 崔博亮, 陈克龙, 等. 模拟降雨量变化对高寒湖滨湿地土壤呼吸的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 130-137.

ZHOU Zhiyun, CUI Boliang, CHEN Kelong, et al. Effects of Simulated Changes in Precipitation on Soil Respiration in Alpine Lakeshore Wetlands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 130-137.

模拟降雨量变化对高寒湖滨湿地土壤呼吸的影响

周祉蕴^{1,2,3}, 崔博亮^{2,3}, 陈克龙^{2,3,4}, 杜岩功¹

(1.青海师范大学 地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室,

西宁 810008; 2.青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008;

3.青海湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 青海 海北 812200; 4.高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

摘要:[目的]探究降水变化对青海湖高寒湖滨湿地土壤呼吸速率的影响, 阐明驱动土壤呼吸变化的主控因素, 为高寒湿地生态系统碳库变化及区域碳预算提供技术支撑。[方法]以地处青海湖西岸的鸟岛高寒湖滨湿地为研究对象, 建立9个投影面积为3 m×3 m的小区, 通过原位减水50%、自然对照、增水50%试验处理, 解析降雨量变化对湿地土壤呼吸速率的影响强度及过程。[结果]模拟减雨和增雨处理促使土壤温度分别增加0.79、0.68℃。减雨显著提高湿地植被地下根系生物量, 增雨显著提高土壤含水量, 增幅分别为10.3%和13.2% ($p < 0.05$)。增雨和减雨处理均降低土壤呼吸速率, 且增雨处理抑制效果更明显。2020年不同处理降水量变化对土壤呼吸速率影响不显著。减雨处理土壤呼吸速率与0—10 cm土壤温度、湿度、pH、土壤全氮以及地下生物量呈二次项正相关关系, 与土壤全碳呈二次项负相关关系; 增雨处理下土壤呼吸与0—10 cm土壤湿度、pH、地下生物量二次项负相关, 与0—10 cm土壤温度、土壤全碳、全氮二次项正相关。[结论]降水格局改变降低青海湖鸟岛湿地土壤呼吸速率, 且其速率受多重因素影响, 其中土壤温度贡献最大。

关键词:降雨处理; 土壤呼吸; 高原湿地; 植被生物量; 青海湖鸟岛

中图分类号: P463.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0130-08

Effects of Simulated Changes in Precipitation on Soil Respiration in Alpine Lakeshore Wetlands

ZHOU Zhiyun^{1,2,3}, CUI Boliang^{2,3}, CHEN Kelong^{2,3,4}, DU Yangong¹

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental

Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2. Key Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Surface Process and Ecological Conservation, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Qinghai Lake Wetland Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Haibei, Qinghai 812200, China; 4. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, China)

Abstract:[Objective] This study aims to investigate the effects of precipitation changes on soil respiration rate in alpine lakeshore wetlands of Qinghai Lake, to elucidate the main controlling factors driving the changes of soil respiration rate, and to provide technical support for the changes of carbon pool in alpine wetland ecosystem and regional carbon budget. [Methods] Nine plots with projection area of 3 m×3 m were established in the alpine lakeshore wetland of Bird Island, located on the west bank of Qinghai Lake, and the intensity and process of rainfall variation on soil respiration rate in the wetland were analyzed by in situ water reduction of 50%, natural control and water increase of 50% experimental treatments. [Results] The

收稿日期: 2022-07-25

修回日期: 2022-08-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41661023); 青海省创新平台建设专项青海省自然地理与环境过程重点实验室(2020-ZJ-Y06); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0405)

第一作者: 周祉蕴(1999—), 女, 四川德阳人, 在读硕士生, 研究方向为湿地草地学。E-mail: 824465275@qq.com

通信作者: 陈克龙(1965—), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 研究方向为自然地理与生态环境过程。E-mail: ckl7813@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

simulated rainfall reduction and rainfall increase treatments induced the increase in soil temperature by 0.79 and 0.68°C, respectively, compared with the control. Rainfall reduction significantly increased the below-ground root biomass of wetland vegetation, and rainfall increase significantly increased soil water content by 10.3% and 13.2%, respectively ($p < 0.05$). Both rainfall increase and rainfall reduction treatments reduced soil respiration rate, and the inhibition effect was more pronounced in the rainfall increase treatment. Precipitation changes under different treatments in 2020 did not have significant effects on soil respiration rate. Soil respiration rate under rainfall reduction treatment was positively correlated with 0—10 cm soil temperature, moisture, pH, total soil nitrogen and below-ground biomass in quadratic terms and negatively correlated with total soil carbon in quadratic terms; soil respiration under rainfall increase treatment was negatively correlated with 0—10 cm soil moisture, pH and below-ground biomass in quadratic terms and positively correlated with 0—10 cm soil temperature, total soil carbon and total nitrogen in quadratic terms. [Conclusion] Altered precipitation patterns reduced soil respiration rates in Bird Island Wetlands of Qinghai Lake, and the rates were influenced by multiple factors, with soil temperature contributing the most.

Keywords: precipitation treatment; soil respiration; highland wetlands; vegetation biomass; Qinghai Lake Bird Islands

湿地是陆地生态系统巨大的有机碳库,尽管其面积仅占陆地面积的4%~6%,但湿地总碳储量约为300~600 Gt,占陆地生态系统总碳储存的12%~24%^[1];其单位面积碳储量是温带森林和苔原生态系统的3倍和5倍^[2]。同时湿地也是温室气体的源,直接影响大气碳库平衡。在全球变暖的背景下,湿地生态系统能量收支受到影响,气体排放强度和碳循环模式发生改变。湿地作为陆地生态系统的碳源/汇“转换器”,是全球大气温室气体含量变化的一个不可忽视的重要因素^[3]。

湖滨带作为重要的生态交错带,对温室气体的固定和释放起着重要的转换作用,也是生态系统对人类活动响应最敏感的部分。湖滨带具有丰富的碳、氮源,面积虽小,但其温室气体的排放在整个淡水水体温室气体中占主导地位^[4]。湖滨湿地土壤呼吸作用是土壤碳循环的重要组成部分^[5],土壤呼吸作用(Soil respiration, SR)是湿地生态系统碳释放到大气的主要途径,湿地土壤呼吸的微小变动都可能引起大气CO₂浓度明显变化,对全球气候产生显著影响^[6]。土壤呼吸的影响因素包括土壤温、湿度^[7]、土壤盐度^[8]、土壤pH、有机物以及土壤通气状况等^[9]非生物因子,以及根系生物量^[10]、土壤微生物等^[11]生物因子。湖滨湿地海拔较低且靠近湖泊,地下水位较浅,土壤呼吸受大气降水和湖水水位变化影响显著。降雨量增减一方面通过改变土壤水盐条件^[12],显著影响湖滨湿地土壤和根系微生物的活性,调控土壤微生物异养呼吸^[13];另一方面,水分盈亏改变土壤通气条件,通过物理替代及其底物供应改变机制影响土壤

呼吸作用^[14]。不同时空和强度的降雨对土壤呼吸的影响相差很大,可能促进、抑制或不影响。在对西双版纳次生林和橡胶林SR的研究中显示了降雨具有激发效应^[15]。在长期放牧的短花针荒漠草原增设模拟降水试验得出了SR在减水50%处理下显著低于自然降水的结论^[16]。此外有研究指出,在较干旱年份减水处理并未显著降低半干旱地区草原SR^[17]。说明土壤呼吸对降雨量的响应方向,不仅取决于降雨本身,并且与前期土壤水分状况、底物数量与有效性以及土壤微生物的分布密切相关^[18]。因此,在全球气候变化背景下,对湖滨湿地土壤呼吸速率的影响因素及其对降雨量的响应机制进行研究就极为重要。

青海湖是青藏高原最大的湖泊湿地,受全球气候变化影响,极端降雨频发,其水位自2004年以来不断上升。青海湖湖滨带是青海湖湿地的核心区域,湖滨带的空间范围、结构、组分和功能等显著受其邻接湖泊水位涨落影响。全球气候变化模型预测,2050年以后全球或局部降水格局将继续产生重大变化,出现更多极端降雨事件^[19]。未来降雨格局的变化将显著改变湖滨湿地水文状况,进而影响湿地温室气体排放强度及碳循环模式^[20]。当前土壤呼吸对降雨量的响应机制尚不明确,影响青藏高原高寒湿地寒区碳源、碳汇功能转换因素还不确定,对降雨量变化影响湿地碳循环和碳平衡仍需进一步研究。因此,本研究以青海湖鸟岛湖滨湿地为对象,设置增减雨固定样地,通过模拟降雨量变化对高寒沼泽草甸SR的月变化及其影响,研究不同降水变化下SR的响应规律及其与土壤理化性质的关系,以期为全球气候变化背景下高寒湿地生态系统中碳库变化及区域碳预算评估提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地布设于青海湖湿地生态系统国家定位观测研究站——鸟岛站(36°59' N, 99°57' E), 该站位于布哈河入湖三角洲的顶部, 河口的北侧, 海拔 3 194~3 226 m, 地势自西北向东南降低。属高原半干旱高寒气候区, 干旱、少雨、多风、太阳辐射强烈、气温日较差大, 具有典型的大陆性气候特点, 多年平均气温和降雨量为-0.7℃和 322.7 mm, 降水主要集中在 6—9 月。研究区地势平坦, 易受湖水淹没, 地下水为咸水, 植被覆盖度较高, 草地植被以赖草(*Leymus secalinus*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、青甘韭(*Allium przewalskianum*)、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)为主, 土壤砾石含量较高, 为砂壤土。自 2004 年青海湖水位持续上涨以来, 鸟岛岸线不断后退, 季节性地淹没部分试验样地。

1.2 降雨控制试验设计

试验站于 2018 年建立模拟降雨试验平台, 自然恢复 1 a 后, 于 2020 年生长季开始持续监测。试验采用随机区组设计, 共包括 3 种降雨处理: 减雨 50% (PR-50%)、对照 (CK)、增雨 50% (PA+50%), 每种处理 3 个重复。共计 9 (3 m×3 m) 个小区, 各小区间间隔 3 m, 每个小区内设置规格为 2 m×3 m 的样方, 样地四周预留 0.5 m 缓冲带以减少边缘效应。

采用固定式截留雨棚实现降雨量变化模拟试验, 在 PR 处理小区垂直埋下顶部规格为 3 m×4 m, 两侧高度分别为 2 m (高端) 和 1.5 m (低端) 的支撑骨架。将开口向上的“V”字型透明减雨片均匀排列并平行固定在支撑骨架顶部 (遮挡降水部分与总面积之比即为降雨量减少比例)。由于高低端存在落差, 截留的自然降雨可顺减雨片流入固定在骨架低端的集雨槽内, 并通过聚氯乙烯 (polyvinylchloride, PVC) 管道输送至增雨处理样地, 达到增雨目的。在每个处理样方中安装一个内径为 20 cm, 露地高度为 5 cm 的 PVC 呼吸环, 用于后续搭配便携式土壤呼吸仪测定土壤呼吸速率。完成试验样地布置后, 在四周修建围栏, 防止受到外来干扰。

1.3 土壤微环境监测

10 cm 土壤温度和土壤湿度于 2020 年 5 月至 8 月在测定 SR 的同时采用便携式土壤呼吸仪自带的温、湿度探头在呼吸环周围进行测定。土壤 pH 采用土壤—蒸馏水悬浮液 (质量体积比为 1:2.5) 摇匀 (200 r/min 后静置 60 min) 后使用 pH 计进行测量; 地下生物量的获取采用根钻法, 于 0—10 cm 深度利

用直径 10 cm 的根钻获取土壤, 每个小区内于呼吸环附近取一钻土, 并进行回填处理, 避免破坏样地。所取土壤用清水洗出土壤中活根, 然后在烘箱中设置恒温 80℃, 烘干至恒重后称重。全氮 (TN)、全碳 (TC) 含量采用高温燃烧法, 称取预处理好的土壤样品 20 mg, 在元素分析仪 (Elemental Analyzer) 中测定。

1.4 土壤呼吸速率测定

2020 年植物生长季 (5—8 月) 使用便携式土壤呼吸测定仪 (LI-8 100, LI-COR, Lincoln, USA) 对其土壤呼吸进行测定。具体方法为选取每月中旬的一天晴天, 进行土壤呼吸日进程 (6:00—18:00) 监测, 每次监测间隔 2 h, 并在测定前剪去土壤环中植物。

1.5 数据统计分析

不同降雨处理下 10 cm 深土壤温、湿度、SR 及地下根系生物量利用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和多重比较, 显著性水平 $\alpha=0.05$, 置信区间为 95%。所有图像均由 Origin 2022 和 Excel 软件绘制。

CO₂ 排放通量与其主要影响因素的相关性运用 Person 相关分析方法进行分析, 并通过回归分析方法将影响因素与 SR 进行拟合, 对其分析结果作图。

土壤呼吸速率与土壤温度间的相关性关系采用指数回归方程描述, 拟合模型为:

$$R_s = R_0 e^{bT}$$

式中: R_s 表示土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; R_0 表示温度为 0℃ 时的土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; b 为温度敏感系数; T 表示 10 cm 深土壤温度 (℃)。

2 结果与分析

2.1 降雨变化对湿地生态系统环境因子的影响

如图 1 所示, 研究期间试验平台近地面温度和土壤温度最大值均出现在 8 月, 最小值出现在 5 月; 近地面湿度最大值为 7 月, 早于土壤湿度最大值出现月份 8 月, 最小值均为 5 月。不同降雨处理下, 青海湖湿地土壤温度和湿度均呈现增加趋势 (图 2)。与对照处理相比, PR 和 PA 处理使土壤温度分别增加 0.79℃ 和 0.68℃。3 种处理下均呈上升趋势, 但增雨的增长幅度略高于减雨, 在时间尺度上均具有先快后慢的变化特征, 且未达到显著性差异 (表 1)。土壤温度于 6 月、7 月大幅提升, 最大增幅出现在 6 月, PR 和 PA 处理分别使土壤温度较上月增长了 92.4% 和 94.4%。随着生长季的到来, 增温速率于 7 月、8 月趋于稳定, 3 种处理的增温幅度都迅速降低, 并于 8 月降至最低。土壤湿度具有明显的季节变化特征, 总体呈现先降后升的单峰型趋势。与温度增幅特征相反, 土壤湿度变化幅度在 5 月、6 月份较平稳, PR 和 PA 处理变化幅度仅为 7.6% 和 12.7%; 而

在 7 月、8 月变化幅度最大,PA 处理下达到了 21.5%。经过 3 个月的处理,增雨显著提升了土壤湿度($p < 0.05$),于 8 月达到最大值 57.6%,而减雨处理则使 8 月土壤湿度降低了 4.7%。

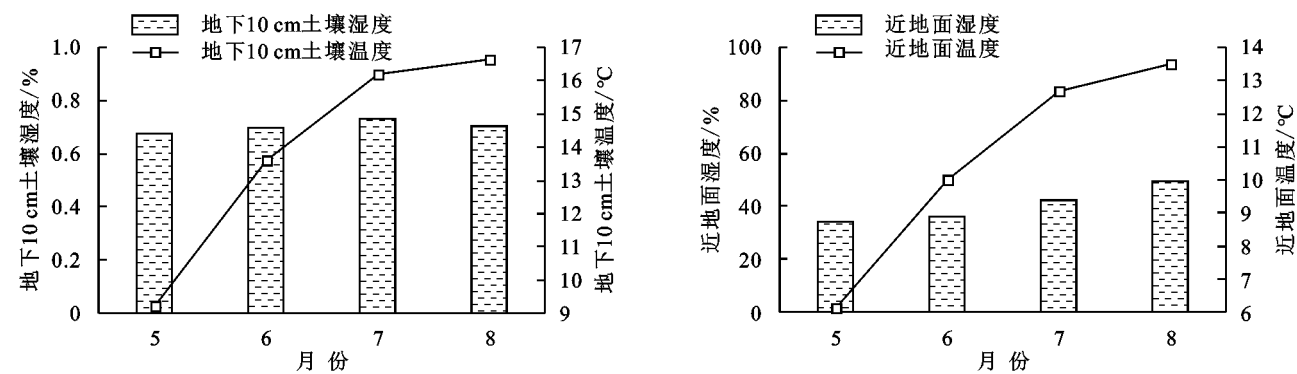


图 1 2020 年湿地近地面温度、湿度及地下 10 cm 土壤温度、土壤湿度月变化

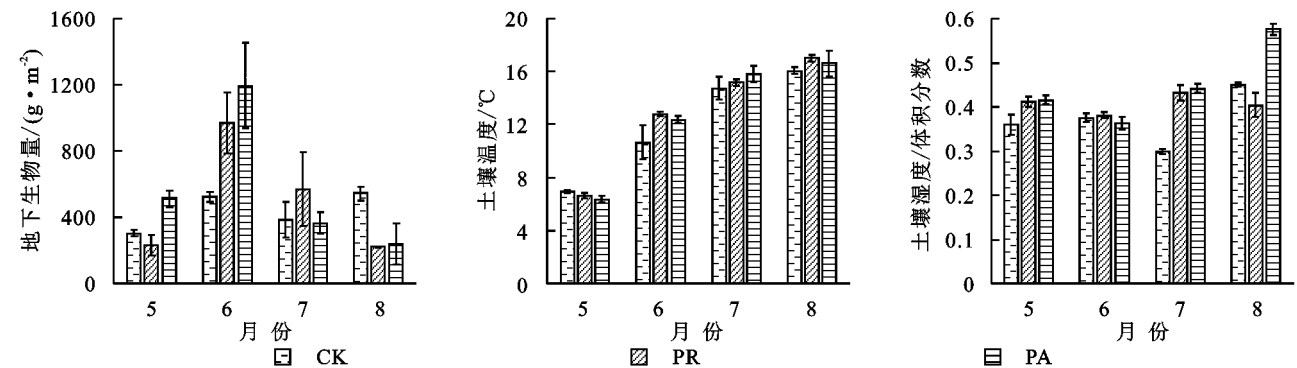


图 2 不同降雨处理下 0—10 cm 土壤温度、湿度和地下生物量变化

各处理下鸟岛湖滨湿地表土层的地下生物量整体上呈先增后减的单峰型趋势(图 2),其变化幅度 $PR > PA$ 。从时间上看,6 月增减雨处理大幅改变了湿地地下生物量,使其较上月分别增长了 1.3、3.2 倍。从变幅上看,生物量均于 6 月大幅增加,达到最大值后又迅速减少。从不同处理来看,减雨显著提高 13.2% 的植被地下根系生物量($p < 0.05$),而增雨虽然使地下生物量提高了 16.3%,但影响不显著($p > 0.05$)。

表 1 增减雨条件下环境因子及土壤呼吸显著性差异分析

因子	处理	均值	均值差	均值的标准误	差分的 95%置信区间		<i>p</i>
					下限	上限	
土壤呼吸速率/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	PR	1.42750	0.18472	0.10051	-0.06122	0.43066	0.116
	PA	1.46166	0.15055	0.10051	-0.09538	0.39649	0.185
0—10 cm	PR	12.79500	-0.68344	0.34355	-1.52410	0.15720	0.094
	PA	12.90638	-0.79483	0.34355	-1.63549	0.04581	0.060
0—10 cm 土壤 湿度/体积分数	PR	0.40672	-0.03608	0.03603	-0.10940	0.03722	0.324
	PA	0.44866	-0.07803	0.03603	-0.15135	-0.00471	0.038
地下生物量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	PR	8.21166	0.13833	0.04741	0.02231	0.25435	0.027
	PA	8.27083	0.07917	0.04741	-0.03685	0.19519	0.146

2.2 降雨变化对土壤呼吸速率的影响

试验结果表明,鸟岛湖滨湿地不同降雨处理土壤呼吸月动态变化趋势总体一致(图 3),5—7 月下降,于 7 月达到最低值后迅速回升。整体上,不同降雨处理下的土壤呼吸均呈单峰趋势,但 PA 处理略有不同,表现为先小幅度升、降,然后大幅增加的趋势,同时 CK 处理下的变幅显著大于增减雨处理,7 月、8 月高达 51.6% 和 159%,8 月份达到了 $2.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。5—8 月 PR 和 PA 处理分别使土壤呼吸速率平均值

降低了 0.15、0.18 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,单因素方差分析显示对两种处理对监测期土壤呼吸速率影响均不显著($p > 0.05$),这可能与 7 月以后青海湖水位上涨淹没鸟岛部分湖滨湿地,各处理均被地表水淹没从而抑制了土壤呼吸速率有关。

2.3 降雨变化处理下高寒湿地土壤呼吸与环境因子的耦合关系

相关性分析表明(表 2),5 月份 3 种处理下土壤呼吸速率与 0—10 cm 土壤温度均呈正相关。其中

PA 处理下呈显著正相关趋势($p < 0.05$), 相关系数为 0.998; 与 0—10 cm 土壤湿度负相关, 与土壤全氮正相关, 但均不显著。CK 处理下与地下生物量显著负相关($p < 0.05$), 相关系数为 -0.999。6 月份 CK 处理下与土壤全碳显著正相关($p < 0.05$), 相关系数为 0.997, 3 种处理下均与 0—10 cm 土壤湿度正相关, 与土壤 pH 负相关, 但均不显著。7 月份 PR 处理下土壤呼吸速率与土壤全碳和土壤 pH 均显著正相关($p < 0.05$), 与地下生物量显著负相关, 3 种处理下均与 0—10 cm 土壤温度正相关, 但不显著。8 月份 CK 处理下与 0—10 cm 土壤温度显著正相关($p < 0.05$), 相关系数为 0.999, 与土壤全碳呈现极显著正相关($p < 0.01$), 相关系数为 1, PR 处理下与生物量显著正相关($p < 0.05$), 相关系数为 0.999。增减雨处理下与 0—10 cm 土壤温度呈正相关关系, 但不显著。

表 2 湖滨湿地土壤呼吸速率与环境因子相关性

环境因子	处理	均值		5 月		6 月		7 月		8 月	
		相关系数	p	相关系数	p	相关系数	p	相关系数	p	相关系数	p
0—10 cm 土壤温度	CK	0.687	0.518	0.911	0.271	0.145	0.907	0.573	0.612	0.999	0.034 *
	PR	0.714	0.494	0.990	0.091	-0.405	0.734	0.958	0.186	0.324	0.790
	PA	0.437	0.712	0.998	0.039 *	-0.573	0.612	0.602	0.588	0.274	0.824
0—10 cm 土壤湿度	CK	-0.001	0.999	-0.992	0.081	0.869	0.329	-0.719	0.490	-0.995	0.067
	PR	0.473	0.686	-0.419	0.725	0.364	0.763	-0.853	0.350	-0.953	0.196
	PA	-0.110	0.930	-0.353	0.770	0.114	0.927	0.509	0.660	0.500	0.667
pH	CK	-0.345	0.776	0.366	0.761	-0.863	0.339	-0.070	0.955	-0.544	0.634
	PR	0.832	0.374	0.330	0.786	-0.996	0.080	0.998	0.038 *	-0.432	0.716
	PA	-0.994	0.069	-0.996	0.058	-0.997	0.052	0.628	0.568	0.918	0.260
土壤全碳	CK	-0.846	0.358	0.202	0.870	0.997	0.045 *	-0.962	0.176	1.000	0.007 **
	PR	-0.648	0.552	0.317	0.795	-0.990	0.089	0.999	0.021 *	-0.973	0.149
	PA	0.870	0.320	-0.129	0.917	0.907	0.277	0.286	0.815	-0.726	0.483
土壤全氮	CK	-0.814	0.394	0.366	0.761	-0.381	0.751	-0.964	0.172	0.948	0.206
	PR	0.939	0.224	0.317	0.795	-0.992	0.080	0.834	0.372	-0.937	0.228
	PA	0.128	0.918	0.909	0.274	0.509	0.660	-0.803	0.407	0.691	0.515
地下生物量	CK	-0.053	0.966	-0.999	0.035 *	-0.996	0.057	-0.090	0.942	-0.274	0.823
	PR	0.178	0.880	0.993	0.075	0.870	0.328	-0.999	0.027 *	0.999	0.027 *
	PA	-0.989	0.096	0.990	0.089	-0.971	0.154	-0.431	0.717	-0.114	0.928

注: * 表示增减雨处理与对照差异显著, $p < 0.05$; ** 表示增减雨处理与对照差异极显著, $p < 0.01$ 。

回归分析结果显示(表 3), 不同处理下的土壤呼吸速率与 0—10 cm 土壤湿度和土壤全碳具有较好的拟合优度, 而其他环境因子 R^2 较低, 同时除 0—10 cm 土壤温度的回归模型为指数模型拟合效果较好外, 其余各要素与土壤呼吸速率间的回归拟合均为二次线性模型为佳。其中, 土壤湿度在 CK, PR, PA 处理下分别能够解释土壤呼吸速率 18.82%, 22.50% 和 22.54% 的变化。虽然土壤湿度对土壤呼吸的贡献较小, 但相较而言, PA 和 PR 处理下对土壤呼吸的影响要高于 CK 处理。而土壤

土壤呼吸速率与 0—10 cm 土壤温度、0—10 cm 土壤湿度、土壤 pH、土壤全碳和土壤全氮的相关系数分别为 0.483, -0.244, -0.138, 0.077, 0.041, 由此可知, 0—10 cm 土壤温度对土壤呼吸速率的贡献最高, 而土壤全碳的贡献最低。

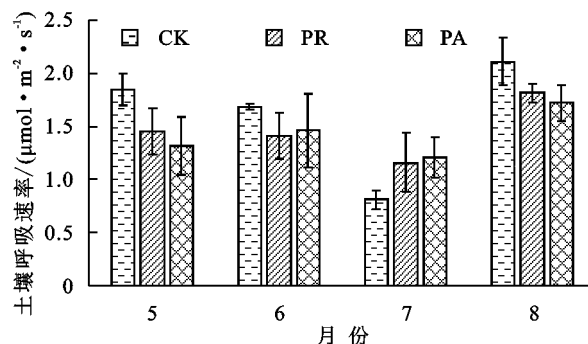


图 3 2020 年 5—8 月鸟岛湖滨湿地土壤呼吸速率对模拟降雨量变化的响应

全碳在 CK 处理下与土壤呼吸呈显著正相关($p < 0.05$), 能够解释土壤呼吸 52.73% 的变化。另外, 土壤全氮在 CK 处理下能够解释土壤呼吸 25.38% 的变化, 在 PR 处理下能够解释其 12.33% 的变化, 而 PA 处理下对其贡献较小, 仅有 6.10%。地下生物量在 PR 和 PA 处理下分别能解释土壤呼吸速率 21.80% 和 22.86% 的变化。回归系数 R^2 和 F 值均随着降雨量增多而先上升后降低, p 值则出现相反趋势。说明在该模式下, 减雨模拟下的 R^2 和 F 都小于增雨。

表 3 不同处理下湖滨湿地土壤呼吸速率与环境因子的拟合模式

环境因子	处理	回归模式	拟合优度 R^2	方差检验量 F	p
0—10 cm 土壤温度	CK	$y=1.911e^{-0.01416x}$	0.02456	48.181	7.34577 E-6
	PR	$y=-1.87583e^{-701756.34833x}$	-14.61454	0	1
	PA	$y=-4.50811e^{-70320.83676x}$	-12.15481	0	1
0—10 cm 土壤湿度	CK	$y=0.92314+6.65667x-11.74635x^2$	0.18819	1.0431	0.39134
	PR	$y=-8.75023+56.43833x-76.59797x^2$	0.22494	1.3059	0.3177
	PA	$y=6.25809-22.54111x+25.42432x^2$	0.22535	1.3090	0.31693
pH	CK	$y=-1142.85527+274.27815x-16.43018x^2$	0.27792	1.7320	0.23101
	PR	$y=1168.06116-283.68176x+17.24355x^2$	0.1547	0.8235	0.4694
	PA	$y=-17.5306+5.57444x-0.39747x^2$	0.20103	1.1322	0.36424
土壤全碳	CK	$y=1.21119+0.46771x-0.03672x^2$	0.52734	5.0206	0.03431
	PR	$y=1.27595+0.34256x-0.0314x^2$	0.21019	1.1975	0.34582
	PA	$y=1.37838-0.01698x+0.00267x^2$	0.24043	1.4243	0.29011
土壤全氮	CK	$y=0.51459+5.44724x-4.24641x^2$	0.25384	1.5309	0.26775
	PR	$y=1.62226-0.44988x+0.04936x^2$	0.12328	0.6327	0.5532
	PA	$y=1.32669+0.22264x-0.01987x^2$	0.06097	0.2922	0.75344
地下生物量	CK	$y=-4.24641+5.44724x-0.51459x^2$	0.25384	1.5091	0.26775
	PR	$y=1.95906-0.00196x-1.2458E-6x^2$	0.21795	0.2835	0.75959
	PA	$y=1.71968-6.84153x-1.47236E-7x^2$	0.22856	1.3332	0.31106

3 讨论

3.1 降雨变化对湿地土壤湿度和地下生物量的影响

全球降雨模式的变化会对土壤环境和植被生长产生重要影响^[21],本研究结果表明增减雨处理均提高了湖滨湿地土壤湿度。其中减雨条件下提高了土壤含水量主要是由于湖滨湿地地下水位较浅,降雨量减少导致地表干旱,从而促进了地下水通过毛管蒸发、上升至地表^[7],因此即使降雨量减少也会导致土壤湿度增加。本试验中减雨 50%显著提高湿地植被地下生物量,表明植物在降雨量减少时通过延长根系生长适应干旱条件,进而提高植被地下根系生物量^[22]。

3.2 模拟降水对土壤呼吸速率的影响

湖滨湿地发育于水陆过渡带,水文条件对其生态过程起决定性作用,进而对湿地生态系统产生重要影响^[3]。研究发现,在一定土壤水分范围内,SR 与土壤含水量呈正相关,而当土壤处于过干或过湿状态时,土壤呼吸则会受到抑制^[23]。在一些研究中,增加降水对土壤呼吸具有“激发效应”^[24],促进土壤碳通量的排放,在本试验中,相对于自然对照组,增雨使其降低了 3.5%,模拟降水量增加试验抑制了湖滨湿地土

壤呼吸速率。主要原因是湖滨湿地处于淹水环境下,其土壤含水量上升至饱和,使土壤形成厌氧环境,一方面,凋落物由于受到通气状况限制而降低其分解速率^[25],对土壤碳排放的贡献逐渐降低;另一方面也通过抑制根呼吸和微生物活性而减少碳积累^[14]。同时随着降雨量增加,土壤孔隙中充满水分子,使得土壤透气能力下降,土壤中的碳向外排放的通道和途径受阻,反而抑制土壤呼吸,使得土壤呼吸速率随着降雨量增加而降低^[26]。当模拟降雨量减少时,土壤水分降低,土壤溶液中溶解性有机碳扩散受阻,使得细菌等微生物处于饥饿状态,也抑制了土壤呼吸。本试验中降水增加的抑制作用比降水减少更加明显,主要与湖滨湿地土壤湿度较大有关,水分已经成为植物和微生物的限制因子,增加降水对其生物量和活性抑制作用显著,从而使 SR 表现出更大幅度的变化^[27]。由于研究区域土壤含水量较大,达到饱和水平,因此在研究期间各处理间差异不显著。

3.3 土壤呼吸速率与环境因子的关系

对于湿地生态系统,温度和降水在碳输入和碳排放过程中起决定性作用^[28]。本研究结果显示,2020 年湖滨湿地土壤呼吸速率在 3 种处理下均与 0—10 cm 土壤温度间表现出明显的正相关关系,这与王铭

等^[29]发现植物根系 SR 会随着土壤温度增加而呈指数型升高趋势的结论相一致。主要原因是温度升高提高了土壤酶活性,从而使得土壤微生物数量增加及其活性增强,刺激微生物的生理代谢,提高土壤碳矿化速度,进而通过增加土壤异养呼吸来促进土壤碳排放^[30]。降水通过改变土壤有效含水量显著影响土壤呼吸。我们的研究发现土壤呼吸速率与 PR 处理下的土壤湿度呈正相关关系,而在 PA 处理下则呈现出相反的趋势,这与肖波等^[31]研究得出土壤呼吸在低含水量时具有正效应,但在高含水量时具有负效应的结论一致。土壤呼吸在水分亏缺时受到促进作用而在饱和时受到抑制,在自然降水的基础上增雨,使得土壤水分饱和或积水,堵塞土壤孔隙并限制氧气进入土壤,形成还原状态限制气体排放^[32],从而使得土壤湿度与土壤中碳通量呈现出负相关关系。

pH 值与微生物的生长及土壤呼吸有密切的关系。鸟岛表层土 pH 均值为 8.27,呈弱碱性,在增雨处理下土壤呼吸与土壤 pH 值呈明显负相关,可能是由于随着 pH 值降低,更有利于植物根系生长,进而促进土壤呼吸。植被的生物量变化会改变土壤中残渣与凋落物数量,从而引起土壤微生物的活性以及群落结构变化^[33],进而可以间接地影响土壤呼吸强度。本研究发现在降水量减少 50% 时地下生物量与土壤呼吸强度呈正相关。主要原因是湖滨湿地地下水位较浅,植被常处于淹水状态,使得植被光合有效叶面积降低,同时植物根部和微生物由于土壤厌氧环境而缺氧,导致植物代谢变缓、微生物群落改变^[34];而雨水分配减少一方面使得植物个体改变生物量分配政策更多地向地下延伸,提高了地下生物量,另一方面可以补偿淹水胁迫负效应,促进土壤呼吸^[22]。

4 结论

通过对湖滨湿地的控制降水试验,发现不同降水处理下土壤呼吸的月变化呈先降后升的单峰模式。增减雨均抑制了土壤呼吸速率,且增雨的抑制作用更加明显。降雨量变化显著影响湿地环境因素,增减雨均提高了土壤温度、土壤湿度和地下生物量,降低了土壤 pH、全氮;增雨增加了全碳,减雨则相反。各处理下土壤呼吸速率与环境因子相关性均不显著,其中土壤温度对土壤呼吸速率的贡献最高,而土壤全碳的贡献最低。

湖滨湿地土壤呼吸速率与土壤温度呈指数型关

系,而与其他环境要素呈二次线性模型,且在增雨模式下拟合效果更佳。

本试验通过模拟全球降雨量格局变化背景下湖滨湿地土壤呼吸速率的变化,研究了碳通量的主要影响因素及其函数关系,未来更应针对土壤动物、微生物等生物因素以及土壤养分、土壤有机碳、土壤无机碳等非生物因素对植被—土壤—大气各环节碳循环过程的影响进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘子刚,张坤民.湿地生态系统碳储存功能及其价值研究[J].环境保护,2002,9:31-33.
- [2] 刘子刚.湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究[J].地理科学,2004,24(5):634-639.
- [3] 宋长春.湿地生态系统碳循环研究进展[J].地理科学,2003,23(5):622-628.
- [4] 王洪君,王为东,卢金伟,等.太湖湖滨带秋、冬季 CH₄ 排放特征及其影响因素初步研究[J].湿地科学,2006,4(1):20-28.
- [5] Yanhong L I, Zhao M, Fadong L I. Soil respiration in typical plant communities in the wetland surrounding the high-salinity Ebinur Lake[J]. Frontiers of Earth Science, 2018,12(3):611-624.
- [6] 杨文英,邵学新,吴明,等.短期模拟增温对杭州湾滨海湿地芦苇群落土壤呼吸速率的影响[J].西南大学学报,2012,34(3):83-89.
- [7] Han G X, Chu X J, Xing Q H, et al. Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO₂ exchange of a supratidal wetland in the Yellow River Delta[J]. Journal of Geophysical Research, 2015,120(8):1506-1520.
- [8] Han G X, Sun B Y, Chu X J, et al. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018,256:292-303.
- [9] Whitney M K, Irving A M, John R W. Biogeochemical recovery of oligohaline wetland soils experiencing a salinity pulse[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013,77(6):2205-2215.
- [10] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. Oecologia, 2004,141(2):254-268.
- [11] Wu J, Brookes. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grass and soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(3):507-515.
- [12] Xie W P, Yang J S. Assessment of soil water content

- in field with antecedent precipitation index and groundwater depth in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013,12(4):711-722.
- [13] 陈亮,孙宝玉,韩广轩,等.降雨量增减对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸和芦苇光合特性的影响[J].*应用生态学报*,2017,28(9):2794-2804.
- [14] 王义东,王辉民,马泽清,等.土壤呼吸对降雨响应的研究进展[J].*植物生态学报*,2010,34(5):601-610.
- [15] 董丽媛,武传胜,高建梅,等.模拟降雨对西双版纳热带次生林和橡胶林土壤呼吸的影响[J].*生态学杂志*,2012,31(8):1888-1891.
- [16] 王忠武,宋晓辉,王悦骅,等.模拟降水对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响[J].*中国草地学报*,2020,42(1):111-116.
- [17] 蒿廉伊,张丽华,谢忠奎,等.降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响[J].*环境科学*,2021,42(9):4527-4537.
- [18] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004,141(2):221-235.
- [19] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. *Science*, 2008,321:1481-1484.
- [20] Zhu B, Cheng W X. Impacts of drying-wetting cycles on rhizosphere respiration and soil organic matter decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 63:89-96.
- [21] Reynolds J F, Kemp P R, Kiona O, et al. Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America:precipitation pulses, soil water, and plant responses[J]. *Oecologia*, 2004,141(2):194-210.
- [22] 种培芳,刘晟彤,姬江丽,等.模拟 CO₂ 浓度升高和降雨量变化对红砂生物量分配及碳氮特征的影响[J].*生态学报*,2018,38(6):2065-2073.
- [23] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J].*生态学报*,2004, 24(4):831-836.
- [24] Shi A D, Marschner P. Drying and rewetting frequency influences cumulative respiration and its distribution over time in two soils with contrasting management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014,72:172-179.
- [25] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995,9:23-26.
- [26] Kursar T A. Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama[J]. *Plant and Soil*, 1989,113:21-29.
- [27] 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.
- [28] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake:global distribution and covariation with climate[J]. *Science*, 2010,329:834-838.
- [29] 王铭,刘兴土,李秀军,等.松嫩平原西部草甸草原典型植物群落土壤呼吸动态及影响因素[J].*应用生态学报*,2014,25(1):45-52.
- [30] Dominguez M T, Holthof E, Smith A R, et al. Contrasting response of summer soil respiration and en-plane activities to long-term warming and drought in a wet shrubland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 110: 151-155.
- [31] 肖波,郭成久,赵东阳,等.黄土和风沙土藓结皮土壤呼吸对模拟降雨的响应[J].*生态学报*,2017, 37(11): 3724-3732.
- [32] 窦韦强,田乐乐,肖波,等.黄土高原藓结皮土壤呼吸速率对降雨量变化的响应[J].*生态学报*,2022, 42(5): 1703-1715.
- [33] Lohila A, Aurela M, Regina K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields:effect of soil and crop type[J]. *Plant and Soil*, 2003,251(2):303-317.
- [34] Chu X J, Han G X, Xing Q H, et al. Dual effect of precipitation redistribution on net ecosystem CO₂ exchange of a coastal wetland in the Yellow River Delta [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018,249: 286-296.