

DOI: 10.20103/j.stxb.202211273419

许培轩, 熊银洪, 陈天松, 刘宏强, 程希平, 郭雪莲, 董李勤, 张昆. 若尔盖高寒草本沼泽土壤呼吸对水位下降的响应. 生态学报, 2023, 43(22): 9247-9255.

Xu P X, Xiong Y H, Chen T S, Liu H Q, Cheng X P, Guo X L, Dong L Q, Zhang K. Responses of soil respiration to water table drawdown in an alpine marsh on the Ruorgai Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9247-9255.

若尔盖高寒草本沼泽土壤呼吸对水位下降的响应

许培轩^{1,2,3}, 熊银洪⁵, 陈天松⁴, 刘宏强^{1,2,3}, 程希平⁴, 郭雪莲^{1,2,3}, 董李勤⁴,
张 昆^{1,2,3,*}

1 西南林业大学云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 昆明 650224

2 西南林业大学国家高原湿地研究中心/湿地学院, 昆明 650224

3 西南林业大学云南滇池湿地生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224

4 西南林业大学地理与生态旅游学院, 昆明 650224

5 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650100

摘要: 土壤呼吸会影响全球碳循环, 而湿地水位与土壤呼吸息息相关。然而, 由于原位观测有限, 目前尚不清楚高寒沼泽土壤呼吸及其组分如何响应水位下降。在若尔盖高原纳勒乔沼泽建立了水位下降控制实验平台, 定位监测土壤呼吸及其组分的变化, 并初步探讨土壤呼吸及其组分与生物和非生物因素的潜在联系。结果发现, 水位下降对高寒草本沼泽土壤呼吸(R_s)没有显著影响, 但自养呼吸(R_a)和异氧呼吸(R_h)对水位下降表现出明显不同反应。其中, 自养呼吸速率下降了 67.2%, 异养呼吸速率上升了 67.3%。异养呼吸和自养呼吸在土壤呼吸中的占比发生显著变化, 水位下降后, R_h/R_s 较对照增加了 88%, R_a/R_s 减少了 61%。水位下降引起的自养呼吸和异养呼吸变化的驱动因素不同, 植株高度、地上及地下生物量解释了自养呼吸的变化, 土壤温度、C:N 则是异氧呼吸变化的关键影响因素。综上, 在高寒草本沼泽生态系统中, 水位下降对土壤呼吸组分的影响强度及其驱动因素存在明显差异, 这需要在陆地表层碳循环模型中加以考虑, 以便更好评估高寒草本沼泽碳循环对气候变化的反馈作用。

关键词: 土壤呼吸; 碳循环; 高寒沼泽; 水位下降

Responses of soil respiration to water table drawdown in an alpine marsh on the Ruorgai Plateau

XU Peixuan^{1,2,3}, XIONG Yinong⁵, CHEN Tiansong⁴, LIU Hongqiang^{1,2,3}, CHENG Xiping⁴, GUO Xuelian^{1,2,3},
DONG Liqin⁴, ZHANG Kun^{1,2,3,*}

1 Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 National Plateau Wetlands Research Center/College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

3 National Wetland Ecosystem Fixed Research Station of Yunnan Dianchi, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

4 School of Geography and Tourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

5 Kunming Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Kunming 650100, China

Abstract: Soil respiration affects the global carbon cycle, and wetland water level is closely related to soil respiration. However, due to the limited in situ observations, it is unclear how alpine marsh soil respiration and its components respond to falling water levels. Establishing an experimental platform for water level decline control in the Naleqiao march of the

基金项目: 国家自然科学基金项目(42261009, 41101097); 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室开放基金(202105AG070002); 云南省基础研究专项(202001AT070132)

收稿日期: 2022-11-27; **网络出版日期:** 2023-09-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangkun@swfu.edu.cn

Ruoergai Plateau, we conducted in situ monitoring of the changes of soil respiration and its components, and preliminarily explored the potential relationship between soil respiration and its components and biotic and abiotic factors. The results showed that the decrease in water level did not have a significant effect on soil respiration (Rs) in alpine marsh, but autotrophic respiration (Ra) and heterotrophic respiration (Rh) showed significantly different responses to water table drawdown. Among them, the autotrophic respiration rate decreased by 67.2%, and the heterotrophic respiration rate increased by 67.3%. The proportion of heterotrophic respiration and autotrophic respiration in soil respiration changed significantly. After the water table drawdown, Rh/Rs increased by 88% compared with the control, and Ra/Rs decreased by 61%. The driving factors of autotrophic respiration and heterotrophic respiration caused by water level decline were different. The plant height, aboveground and underground biomass explained the changes of autotrophic respiration, and soil temperature and C:N were the key influencing factors of the heterotrophic respiration. The study shows that there are significant differences in the intensity of the effects of water level decline on soil respiration components and their drivers in alpine marsh ecosystems, which need to be considered in terrestrial surface carbon cycle models to better assess the feedback effect of alpine herbaceous marsh carbon cycle on climate change.

Key Words: soil respiration; carbon cycle; alpine marsh; water table drawdown

CO₂等温室气体排放一直是科学界重点关注的问题^[1]。土壤呼吸作为土壤与大气之间碳交换最大的通量之一,其微小变化都会显著改变大气 CO₂浓度,从而直接影响全球碳循环过程^[2]。土壤呼吸是土壤碳同化和分解代谢的平衡,主要包括自养呼吸和异养呼吸两个组分,自养呼吸主要源于植物根系呼吸,异养呼吸主要源于根际微生物呼吸以及凋落物分解等^[3]。水分是土壤呼吸的重要影响因素^[4]。在之前的研究中,水位变化对土壤呼吸影响的结果存在较大争议。Chen 等在研究中发现,在温带森林中,土壤呼吸及其组分均与水位呈显著正相关^[5]。但 Song 等在研究中发现,在黄河三角洲湿地中,水位与土壤呼吸关系密切,且土壤呼吸与湿地水位呈显著负相关^[6]。也有研究表明,水位对土壤呼吸的影响并不是线性的。张蕊等在长江中下游滩涂湿地中研究发现,水位下降首先会显著增强土壤呼吸,继续下降会显著降低土壤呼吸甚至完全停止^[7]。Han 等在黄河三角洲滨海湿地的研究表明,土壤呼吸与水位有时显著相关,有时关系并不显著^[8]。此外,水位变化的时间长短,对土壤呼吸的影响也尚未明确。Muhr 等在德国东部沼泽中,人工模拟水位下降,连续观测三年后发现,土壤呼吸的变化并不显著^[9]。仲启铖等在崇明滩涂湿地研究水位调控对土壤呼吸的影响,连续观测一年后发现,土壤呼吸速率最高的是中水位,最低是高水位,低水位介于二者之间^[10]。综合来看,土壤呼吸与水位变化关系密切^[11],然而水位变化如何影响土壤呼吸尚不明确。水位变化是否会驱动不同生物、非生物因素改变从而影响土壤呼吸,以及土壤呼吸组分对水位下降的响应相关的研究还较少。

泥炭沼泽湿地是生物圈中最大的碳储存库之一^[12],全球泥炭地的碳储藏量约是全球土壤碳总量的 33%^[13]。20 世纪以来,由于人类保护不当以及气候变化,湿地在以前所未有的速度退化^[14]。水位下降是湿地退化的重要因素,水位下降会极大的改变湿地土壤环境、植物群落组成及生长过程,从而影响动物栖息地,进而对湿地产生巨大影响^[15]。若尔盖高原泥炭沼泽是我国碳储量最大的高原泥炭沼泽湿地^[16]。但是自 1960 年以来,由于修建排水渠等人为原因以及气候变化,若尔盖高原泥炭沼泽水位不断下降^[17]。已有研究表明若尔盖高寒湿地水位变化会显著影响土壤的固碳能力,但是关于水位下降引起的生物因素和非生物因素对土壤碳排放动力学途径和相对重要性尚未量化^[18]。因此,本研究以若尔盖高寒泥炭湿地为研究对象,通过设置原位对照实验,模拟水位下降。探究土壤呼吸及其组分对水位下降的响应,探究水位下降对生物、非生物因素的影响及其对土壤呼吸及其组分的影响机制。这项研究将为高寒沼泽湿地生态系统的保护与恢复以及碳减排政策提供基础数据支撑。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

实验样地位于青藏高原东缘的若尔盖湿地国家级自然保护区(33°31'N,102°39'E),地势平坦(图1)。保护区平均海拔3450m,平均气温1.4℃,年降水量为648.5mm^[19]。研究区内发育有常年积水沼泽,水深为15—30cm,沼泽植被以多年沼生草本植物为主,木里薹草(*Carex muliensis*)是沼泽建群种,也是单一优势种,伴随微地貌差异引起的水位变化常出现海韭菜(*Triglochin maritimum*)、水问荆(*Equisetum fluviatile*)、杉叶藻(*Hippuris vulgaris* L.)、矮泽芹(*Chamaesium paradoxum* Wolff)和睡菜(*Menyanthes trifoliata*)等伴生物种^[20]。保护区内沼泽土占地面积最大,泥炭厚度平均5.4m^[21]。

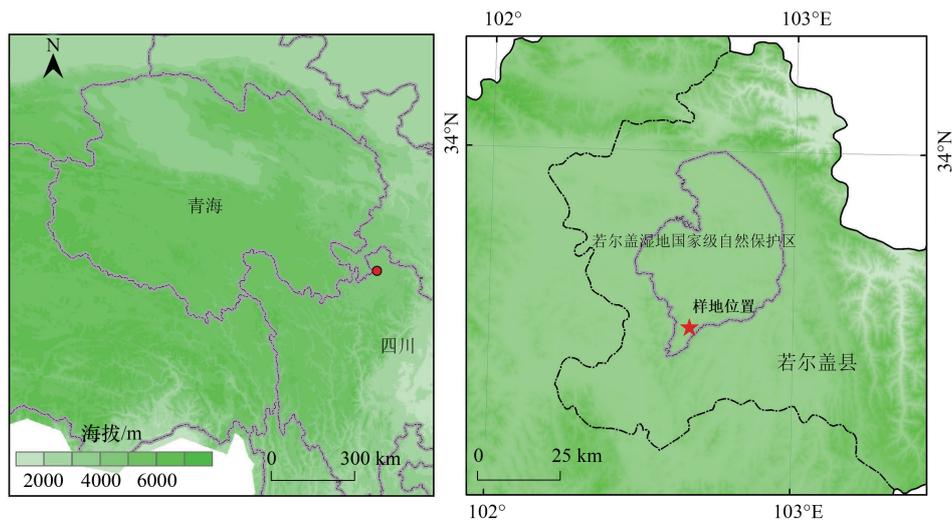


图1 研究区地理位置

Fig.1 The location of the study area

1.2 实验设计与研究方法

实验设置2种水位处理:原水位(CK),和水位降低20cm(WTD),即处理单元被动抬升20cm,在2020年11月,将6块规格为1m×1m,厚度45cm的长有植物的土块,进行原位整体抬升后垫入20cm厚度的塑钢框,对其进行原位模拟水位降低20cm的处理。试验前在每个小样方区分别放入一个深PVC环,长度55cm,埋入土中50—53cm。由于超过90%的植物根系分布在表土(0—50cm)中,因此55cm深的PVC环可以切断旧植物的根部,并防止新的根系在环内生长。该实验于2020年开始,为PVC环内的植物根系死亡留下了足够的时间。因此,深PVC环中的通量可以代表土壤异养呼吸。并将另一个浅PVC环,长度5cm,埋入土中2—3cm,代表土壤总呼吸。土壤自养呼吸(R_a)由土壤总呼吸(R_s)减土壤异养呼吸(R_h)得到。在2021年全年,使用Li-8100A便携式土壤碳通量自动测量系统测定土壤总呼吸和异养呼吸,频率为每月3次。同时使用Li-8100A自带的温度探针测量不同土层处的土壤温度。使用E型热电偶土壤温度探头、ML2x土壤水分传感器在靠近呼吸环的3个点处测量土层的土壤温度、湿度,测量结果为土壤温度和体积含水量。在实验样地放置Odyssey电容式水位记录仪对水位进行长期动态监测。在8月份生长季生物量最大时,分别对水位下降样地和对照样地的12个样方(1m×1m)进行物种调查,详细记录每个样方内植物的高度、株数,然后采用20cm×20cm的小样方框随机对其中的6个样方的植物地上部分齐地面剪集,带回实验室称鲜重,在80℃恒温下烘干48h后称干重。同时在每一个样方内取深度为30cm,直径为10cm的土样,区分根系以及土壤,清洗根系后烘干,称重。总碳含量用干烧法通过总有机碳分析仪测定;总氮、总磷含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮后使用连续流动分析仪测定。土壤pH值采用台式精密pH计测量,将玻璃电极球浸入土样的上清液中,待读数稳定

后,记录。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行初步整理,采用 SPSS 24.0 对数据进行方差齐性检验(F-test),显著性水平设置为 0.05,若方差不齐则进行对数转换。采用独立样本 t 检验分析土壤呼吸、自养呼吸、异养呼吸对水位下降的响应差异,利用皮尔逊双变量相关性分析方法比较不同处理样地之间土壤呼吸速率与相关变量之间的关系,以分析水位下降后相关环境的变化对土壤呼吸的影响。最后使用 Origin 22.0 对分析结果作图。

2 结果与分析

2.1 水位下降对非生物、生物因素的影响

实验开始后,水位下降处理样地水位相对于对照处理样地水位明显下降($P<0.05$),达到试验预期水平。从结果看(表 1),在水位对非生物因素的影响中,土壤的含水率和土壤的 pH 值均未发生显著变化。在水位下降处理中,土壤表面温度波动较大,而对照土壤表面温度则较为平稳。水位下降处理中土壤温度显著高于对照处理中土壤温度($P<0.05$)。土壤有机碳含量在水位下降后有小幅上升,但并不显著,土壤氮含量也未表现出显著变化,土壤磷含量则显著下降($P<0.05$)。

表 1 水位下降对非生物因素的影响

Table 1 Effects of water level drop on abiotic factors

处理 Treatment	土壤含水率 Soil moisture content/%	5cm 土壤温度 5cm soil temperature/°C	土壤 pH 值 Soil pH	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content/(mg/g)	土壤氮含量 Soil N content/ (mg/g)	土壤磷含量 Soil P content/ (mg/g)
CK	89.1±2.74	1.42±0.20	6.24±0.38	303.83±8.97	26.72±0.43	1.80±0.76
WTD	86.8±4.16	2.74±0.91*	6.70±0.75	322.54±10.03	26.51±0.8	1.57±0.67*

CK:对照处理 control check;WTD:水位下降处理 water table drawdown;*: $P<0.05$

在水位对生物因素的影响中(表 2),对样地进行植物生物量调查发现,水位下降处理样地中植物高度显著下降($P<0.05$),但植物密度却有了显著的提高($P<0.05$)。地上生物量和地下生物均显著减少($P<0.05$)。

表 2 水位下降对生物因素的影响

Table 2 Effects of water level drop on biological factors

处理 Treatment	植物高度 Plant height/cm	植物密度 Plant density/(株/m ²)	地上生物量 Aboveground biomass/(g/m ²)	地下生物量 Subsurface biomass/(g/m ²)
CK	86.88±3.49	795.83±99.27	778.33±42.77	590.75±20.01
WTD	35.08±5.86*	1166.67±147.20*	275.58±18.56*	270.98±13.52*

*: $P<0.05$

2.2 水位下降对土壤呼吸及其组分的影响

从季节上看(图 2),研究区域土壤呼吸存在明显的季节动态。在水位下降处理中,土壤呼吸速率最高在 7 月份为 $2.28\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,而最低出现在 1 月份为 $0.06\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。自养呼吸、异养呼吸与土壤总呼吸季节变化规律相似,最高均出现在 7 月份,最低均出现在 1 月份。

从总体上看(图 3),水位下降处理中土壤呼吸速率和自养呼吸速率分别下降了 12.39%、67.21%,而异养呼吸速率提高了 67.28%。水位下降后土壤呼吸速率未发生显著变化,而异养呼吸速率和自养呼吸速率却有显著的上升和下降趋势($P<0.05$)。对照处理的 R_h/R_s 、 R_a/R_s 分别为 0.41、0.59,而水位下降后, R_h/R_s 、 R_a/R_s 分别为 0.78、0.22, R_h/R_s 较对照增加了 88%, R_a/R_s 减少了 61%。水位下降后,异养呼吸和自养呼吸的占比发生显著变化。异养呼吸的占比显著增加($P<0.05$),自养呼吸的占比显著减小($P<0.05$)。

2.3 土壤呼吸与生物、非生物因素的关系

图 4 显示了土壤呼吸与诸环境因子的相关性。水位变化与自养呼吸、地上生物量、地下生物量、植物高

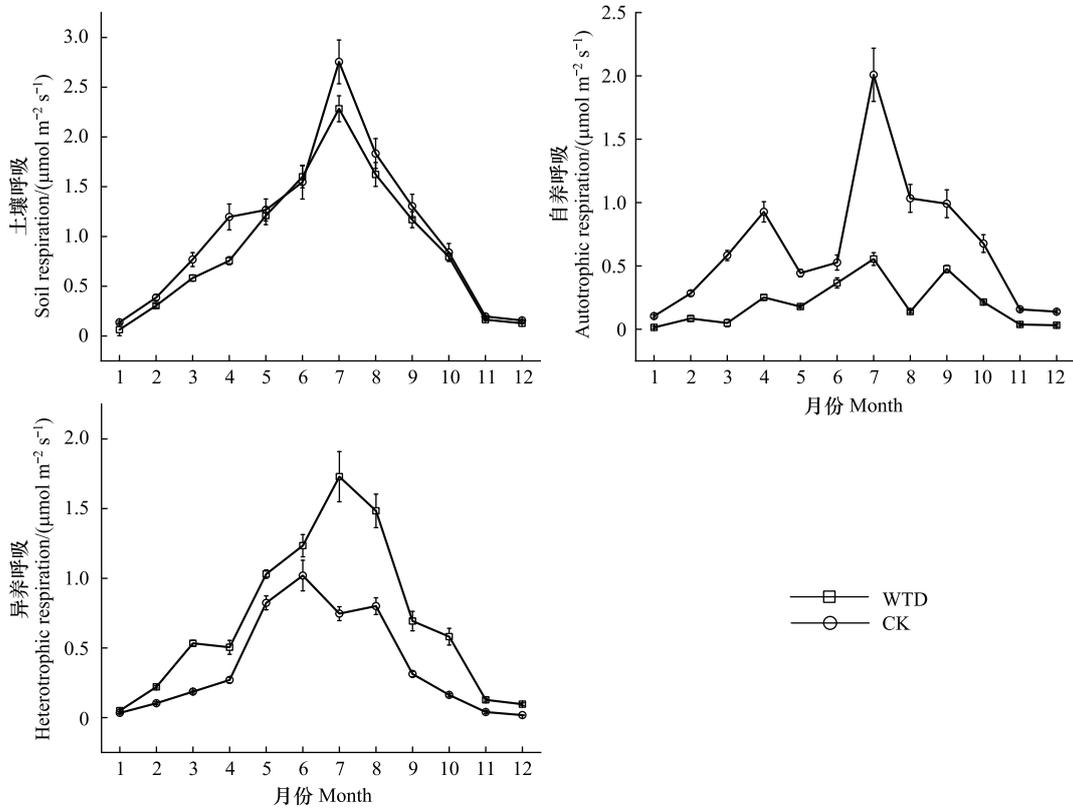


图 2 水位下降后土壤呼吸速率的月变化

Fig.2 Monthly change in soil respiration rate after water levels drop

CK: 对照处理; WTD: 水位下降处理

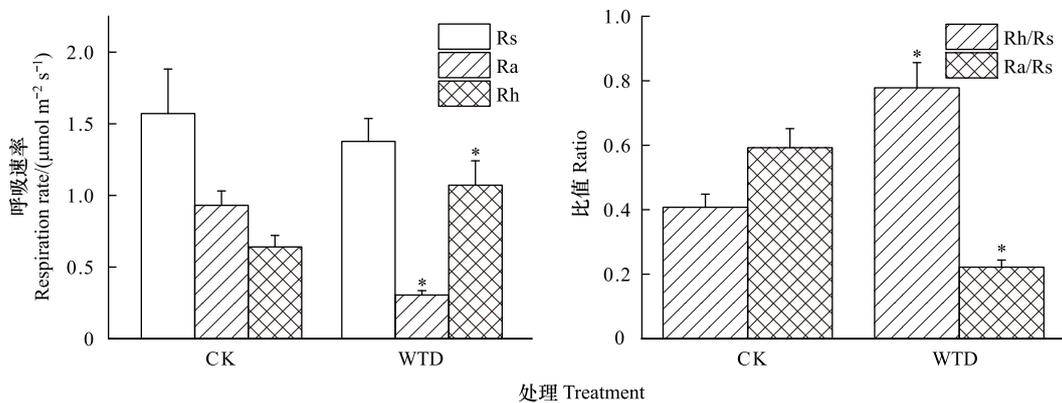


图 3 水位下降后土壤呼吸速率及其组分的变化

Fig.3 Changes in soil respiration rate and its composition after water level drops

*: $P < 0.05$; Rs: 土壤呼吸; Ra: 自养呼吸; Rh: 异养呼吸

度、土壤全磷含量呈显著相关关系,与异养呼吸、土壤温度、植物密度呈显著负相关关系。水位变化与土壤总呼吸、土壤含水率、土壤有机碳、土壤氮含量以及土壤 pH 值的相关性不高。土壤总呼吸与地上生物量呈显著相关关系。自养呼吸与地上生物量、地下生物量、植物高度、水位呈显著正相关关系,与土壤温度及植物密度呈显著负相关关系。异养呼吸与土壤温度、植物密度呈显著相关关系,与地上生物量、植物高度、土壤全磷含量、水位、呈显著负相关关系。

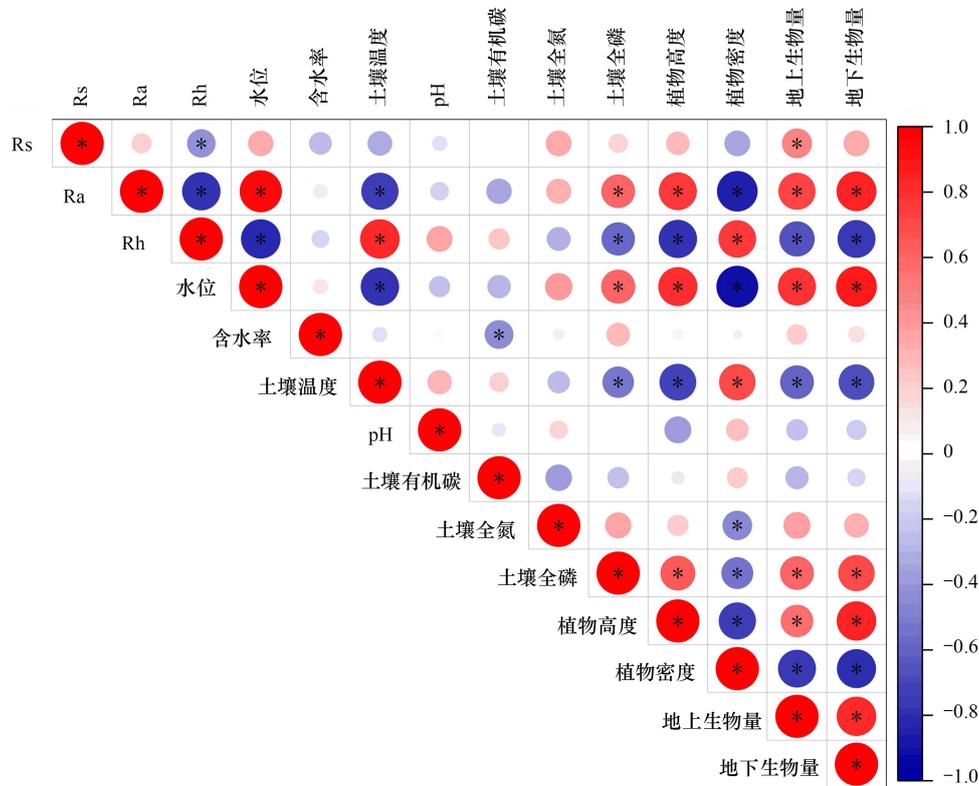


图 4 土壤呼吸与相关环境因子的关系

Fig.4 Relationship between soil respiration and associated environmental factors

* : $P < 0.05$

3 讨论

3.1 土壤呼吸的季节变化

在不同的季节,土壤呼吸速率可能会有很大差异,土壤总呼吸会在生长季达到一年的最高值,即单峰型的变化规律^[22]。在本研究中,结论与其类似,在水位下降处理中以及对照处理中的土壤呼吸均具有明显的季节差异。土壤总呼吸速率在生长季7月份达到最大值,最小值则在1月份。土壤含水率与土壤温度是影响土壤呼吸的两个主要因子^[23]。随着环境温度不断上升、大气降水不断增加,土壤总呼吸也不断的上升,并在7月份达到一年中的最大值,之后随着气温的降低以及大气降水的减少而缓慢下降。土壤异养呼吸的情况与土壤总呼吸的情况类似,即水位下降处理中以及对照处理中的异养呼吸均具有明显的季节差异。有研究表明,异养呼吸主要是由土壤微生物呼吸产生,且水分的增加以及温度的上升会显著增强土壤微生物活性^[24-25]。这就很好的解释了土壤异养呼吸的季节变化与温度与降水的变化相吻合。在本研究中,土壤自养呼吸的会在生长季初期5月有小幅的下降,并且在生长季末期8月份也有一个小幅度的下降。这与张俊兴等人的研究类似,在油松林中自养呼吸速率没有随着温度升高而上升,没有表现出显著的季节变化^[26]。这可能是生物因素对土壤呼吸的调控作用,在生长季初期,植物根系并没有随着温度升高而显著增加。这与 Huang 等人之前的研究中发现相同,在温度升高时,自养呼吸速率的变化出现了滞后性^[27]。而在生长后期,可能是凋落物的增加而影响到了土壤自养呼吸^[28],这需要后期结合凋落物进一步研究。

3.2 水位下降对土壤呼吸的影响

本研究发现,水位下降对土壤总呼吸没有显著影响。在以往的研究中,水位下降会显著影响土壤总呼吸,水位下降会使土壤含水率降低,使土壤水分成为土壤呼吸的限制性因子^[29]。但在本研究中,水位与土壤含水

率并没有显著相关关系。一方面,这可能暗示本实验的研究区纳勒乔沼泽湿地的土壤含水情况与 Minick 等人的研究情况类似,即土壤含水率过饱和,土壤水分状况超过了土壤的田间最大持水率^[30]。由于研究区湿地水位较高,使得水位下降处理样地中水位仍有较长时间保持在地表以上。这可能是在水位下降处理中,土壤含水率没有显著变化的原因,也导致了水位与土壤呼吸相关性不显著。另一方面,水位下降会改善土壤透水性,从而增强土壤呼吸^[31]。在本研究中,土壤呼吸与地上生物量显著相关,地上生物量的减少,使土壤总呼吸速率降低。Björn 等在研究中发现,湿地植物会在不同的器官中形成气孔,气孔能够加强植物气体交换以及气体储存的能力,当湿地中水位较高,土壤透气性较差时,通过植物向大气中排放温室气体的比例将显著上升,这表明植物传输对湿地土壤呼吸影响巨大^[32]。这与 Huang 等人的研究结果类似,在地上生物量更高的湿地中土壤呼吸速率显著更高^[33]。因此,在本研究中,可能是土壤透气性改善使土壤呼吸增强的部分,与生物量下降使土壤呼吸限制的部分相互影响,导致了水位变化与土壤呼吸相关性不显著。但在更长期实的实验中,结论可能有所不同。杨娇等研究表明,湿地植物在水位下降的前两年中,因不适应水位变化而大量减少,但在第三年及以后,陆生植物会占据优势地位,使得生物量反而有所增加^[34]。因此,长期来看,水位下降可能会显著增强土壤呼吸。Metcalf 等人研究也认为,在未来气候持续恶化的趋势下,许多水生植物种群会转变为能快速生长的陆生种群,这会大大促进土壤呼吸速率的增加,使土壤碳排放超出之前研究的预期^[35]。此外,有研究表明,植物多样性的减少会显著降低土壤呼吸^[36]。这可能在暗示在本研究中,水位下降没有显著减少植物多样性,但这可能也与观测时间较短有关,需要在更多的研究中证实。

3.3 水位下降对土壤呼吸组分的影响

我们的研究结果与之前的研究类似,水位下降会对土壤自养呼吸产生显著影响,这种现象的原因是水位下降改变了与调控土壤自养呼吸变化密切相关的生物与非生物因素^[37]。具体而言,土壤 P 含量显著减少,植株高度、地上生物量和地下生物量随水位下降而显著降低。自养呼吸的主要来源是植物根系呼吸,植物根系的减少会直接影响土壤自养呼吸^[38]。在 Huang 等人的研究中也证实了这一点,水位下降的情况下,植物根系活性严重减弱,自养呼吸显著下降,并导致其对土壤总呼吸的贡献也显著降低^[39]。其次,植物根系养分浓度和生物量大小通过影响能量供应来调控蛋白质周转,从而进一步影响土壤自养呼吸变化^[40]。根系经济学谱经典理论表明,较高的根系养分浓度维系更强的生理新陈代谢活动,进而表现出更高的土壤自养呼吸^[40]。然而,与之前强调的根系氮含量增加促进自养呼吸的研究不同,我们的研究发现土壤自养呼吸与根系磷浓度显著正相关^[41]。这也反映了磷在影响碳循环过程中的关键作用,磷作为植物生长所必需的养分,磷可能通过改变一系列生理过程来影响植物代谢,例如三磷酸腺苷和烟酰胺-腺嘌呤二核苷酸磷酸的合成^[42]。水位下降后,根系磷含量显著下降,进而限制根系代谢活动而降低土壤自养呼吸。

异养呼吸的主要来源是土壤微生物呼吸^[43]。研究结果与之前的研究类似,水位下降会对土壤异养呼吸产生显著影响,这种现象可以由以下原因来解释^[37]。水位下降改变了与调控土壤异养呼吸变化密切相关的生物与非生物因素。具体而言,土壤温度显著上升,植株密度显著升高。有研究表明,土壤温度升高可以刺激土壤微生物量,显著增强微生物活性,从而显著提高土壤异养呼吸^[44]。同时,土壤温度的升高可以提高土壤酶活性,从而加快酶与底物碰撞和分解的速度^[45],再加上 CO₂浓度的增加,会增加土壤微生物群落活动,这可以理解为是对根系分泌物的潜在反应^[46]。所以,这样的结果会使土壤自养呼吸在土壤呼吸的比重下降,异养呼吸在土壤呼吸的比重显著上升。有研究表明,提高植物功能多样性可以显著提高土壤异养呼吸^[47]。在本研究中,水位下降后,可能环境更适宜陆生植物生长,植物密度增加,提高了地上植物的功能性,从而提高了土壤异养呼吸。此外,有研究表明,植物密度的增加将有助于土壤中共生微生物的生长^[48],有待深入研究。

4 结论

本研究以若尔盖高寒草本沼泽湿地为例,研究了水位下降后对区域土壤呼吸速率的影响。结果发现土壤呼吸有所下降,但不显著。自养呼吸及其占比显著下降,异养呼吸及其占比显著上升。同时,水位下降导致了

地上生物量、地下生物量的减少、植物高度的下降以及土壤温度显著上升,提高了土壤微生物的活性。这会使土壤自养呼吸在土壤总呼吸中的占比下降,异养呼吸在土壤总呼吸中的占比上升。土壤呼吸在季节变化中受土壤温度与大气降水的控制,在生长季达到最大值,同时生物因素对土壤呼吸的季节变化有调控作用。

参考文献 (References):

- [1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] Li W, Wang J L, Zhang X J, Shi S L, Cao W X. 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. *Ecological Engineering*, 2018, 111: 134-142.
- [3] 吴侯, 杜剑卿, 刘强, 杨幼清, 吕文聪, 潘佳音, 牛海山. 基于文献计量的青藏高原土壤呼吸研究进展. *生态学报*, 2023; (07): 1-10.
- [4] Zheng P F, Wang D D, Yu X X, Jia G D, Liu Z Q, Wang Y S, Zhang Y E. Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107267.
- [5] Chen F, Yan G Y, Xing Y J, Zhang J H, Wang Q G, Wang H L, Huang B B, Hong Z M, Dai G H, Zheng X B, Liu T. Effects of N addition and precipitation reduction on soil respiration and its components in a temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 271: 336-345.
- [6] Song X L, Zhu Y H, Chen W F. Dynamics of the soil respiration response to soil reclamation in a coastal wetland. *Scientific Reports*, 2021, 11: 2911.
- [7] 张蕊. 滩地杨树林土壤呼吸对模拟氮沉降与淹水的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [8] Han G X, Sun B Y, Chu X J, Xing Q H, Song W M, Xia J Y. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 292-303.
- [9] Muhr J, Höhle J, Otieno D O, Borken W. Manipulative lowering of the water table during summer does not affect CO₂ emissions and uptake in a Fen in Germany. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2011, 21(2): 391-401.
- [10] 仲启铖, 关阅章, 刘倩, 曹流芳, 陆颖, 王璐, 王开运. 水位调控对崇明东滩围垦区滩涂湿地土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2013; 24(08): 2141-2150.
- [11] Jian J S, Steele M K, Zhang L, Bailey V L, Zheng J Q, Patel K F, Bond-Lamberty B P. On the use of air temperature and precipitation as surrogate predictors in soil respiration modelling. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13149.
- [12] Halimanjaya A, Belcher B, Suryadarma D. Getting forest science to policy discourse: a theory-based outcome assessment of a global research programme. *International Forestry Review*, 2018, 20(4): 469-487.
- [13] Dargie G C, Lewis S L, Lawson I T, Mitchard E T A, Page S E, Bocko Y E, Ifo S A. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 2017, 542(7639): 86-90.
- [14] Davidson NC. How much wetland has the world lost Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014; 65(10): 934-941.
- [15] Liu Q, Liu J L, Liu H F, Liang L Q, Cai Y P, Wang X, Li C H. Vegetation dynamics under water-level fluctuations: implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124418.
- [16] 刘利娟, 刘欣蔚, 鞠佩君, 朱单, 薛丹, 刘建亮, 何奕忻, 陈槐. 15000 年以来若尔盖高原泥炭地发育及其碳动态. *生态学报*, 2018, 38(18): 6493-6501.
- [17] 崔斌, 张学霞, 张雪, 方宇, 郭长庆. 若尔盖县湿地稳态转换的水文地貌生态阈值. *生态学报*, 2020; 40(23): 8794-8804.
- [18] 周文昌, 索郎夺尔基, 崔丽娟, 王义飞, 李伟. 排水对若尔盖高原泥炭地土壤有机碳储量的影响. *生态学报*, 2016, 36(8): 2123-2132.
- [19] 郭洁, 李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响. *高原气象*, 2007; (02): 422-428.
- [20] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 李珂. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式. *生态学报*, 2011, 31(20): 5946-5955.
- [21] 王文波, 白冰, 张鹏骞, 胡理乐. 若尔盖湿地土壤有机碳含量和密度的分布特征. *生态学杂志*, 2021; 40(11): 3523-3530.
- [22] 李键, 刘鑫铭, 姚成硕, 宫欢欢, 吴承祯, 范海兰. 武夷山国家公园不同林地土壤呼吸动态变化及其影响因素. *生态学报*, 2021; 41(09): 3588-3602.
- [23] Liu X F, Chen S D, Yang Z J, Lin C F, Xiong D C, Lin W S, Xu C, Chen G S, Xie J S, Li Y Q, Yang Y S. Will heterotrophic soil respiration be more sensitive to warming than autotrophic respiration in subtropical forests? *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(3): 655-663.
- [24] Engelhardt I C, Welty A, Blazewicz S J, Bru D, Rouard N, Breuil M C, Gessler A, Galiano L, Miranda J C, Spor A, Barnard R L. Depth matters: effects of precipitation regime on soil microbial activity upon rewetting of a plant-soil system. *The ISME Journal*, 2018, 12(4): 1061-1071.
- [25] Nottingham A T, Bååth E, Reischke S, Salinas N, Meir P. Adaptation of soil microbial growth to temperature: using a tropical elevation gradient to predict future changes. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 827-838.

- [26] 张俊兴, 苏宏新, 刘海丰, 高润宏. 3种温带森林土壤呼吸季节动态及其驱动机制. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(4): 160-167.
- [27] Zhang Q, Phillips R P, Manzoni S, Scott R L, Oishi A C, Finzi A, Daly E, Vargas R, Novick K A. Changes in photosynthesis and soil moisture drive the seasonal soil respiration-temperature hysteresis relationship. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 184-195.
- [28] 段北星, 蔡体久, 宋浩, 肖瑞晗. 寒温带兴安落叶松林凋落物层对土壤呼吸的影响. 生态学报, 2020; 40(04): 1357-1366.
- [29] Liu Y R, Delgado-Baquerizo M, Wang J T, Hu H W, Yang Z M, He J Z. New insights into the role of microbial community composition in driving soil respiration rates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 118: 35-41.
- [30] Minick K J, Mitra B, Li X F, Fischer M, Aguilos M, Prajapati P, Noormets A, King J S. Wetland microtopography alters response of potential net CO₂ and CH₄ production to temperature and moisture: evidence from a laboratory experiment. *Geoderma*, 2021, 402: 115367.
- [31] 魏杰, 王晶苑, 陈昌华, 温学发. 植物源和土壤有机质源土壤呼吸组分的拆分原理、方法与应用进展. 生态学报, 2022, 42(20): 8508-8520.
- [32] Olof B L, Middleton Beth A, Mateja G, Alenka G. Ventilation systems in wetland plant species. *Diversity*, 2022, 14(7): 517.
- [33] Huang N, Wang L, Song X P, Black T A, Jassal R S, Myneni R B, Wu C Y, Wang L, Song W J, Ji D B, Yu S S, Niu Z. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabb8508.
- [34] 杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. 湿地科学, 2014; 12(06): 807-813.
- [35] Metcalfe D B, Fisher R A, Wardle D A. Plant communities as drivers of soil respiration: pathways, mechanisms, and significance for global change. *Biogeosciences*, 2011, 8(92): 2047-2061.
- [36] Chen X L, Chen H Y H. Plant diversity loss reduces soil respiration across terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 2019, 25(4): 1482-1492.
- [37] Li C B, Peng Y F, Nie X Q, Yang Y H, Yang L C, Li F, Fang K, Xiao Y M, Zhou G Y. Differential responses of heterotrophic and autotrophic respiration to nitrogen addition and precipitation changes in a Tibetan alpine steppe. *Scientific Reports*, 2018, 8: 16546.
- [38] Tang X L, Pei X J, Lei N F, Luo X R, Liu L, Shi L L, Chen G, Liang J J. Global patterns of soil autotrophic respiration and its relation to climate, soil and vegetation characteristics. *Geoderma*, 2020, 369: 114339.
- [39] Huang S D, Ye G F, Lin J, Chen K T, Xu X, Ruan H H, Tan F L, Chen H Y H. Autotrophic and heterotrophic soil respiration responds asymmetrically to drought in a subtropical forest in the Southeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 242-249.
- [40] Luo R Y, Fan J L, Wang W J, Luo J F, Kuzyakov Y, He J S, Chu H Y, Ding W X. Nitrogen and phosphorus enrichment accelerates soil organic carbon loss in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 303-312.
- [41] Meng B, Ochoa-Hueso R, Li J Q, Zhong S Z, Yao Y, Yang X C, Collins S L, Sun W. Nonlinear decoupling of autotrophic and heterotrophic soil respiration in response to drought duration and N addition in a meadow steppe. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(2): 281-291.
- [42] Liu Y Z, Zhao C C, Guo J W, Zhang L N, Xuan J, Chen A Q, You C M. Short-term phosphorus addition augments the effects of nitrogen addition on soil respiration in a typical steppe. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143211.
- [43] Du Y, Wang Y P, Su F L, Jiang J, Wang C, Yu M X, Yan J H. The response of soil respiration to precipitation change is asymmetric and differs between grasslands and forests. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): 6015-6024.
- [44] Bond-Lamberty B, Bailey V L, Chen M, Gough C M, Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature*, 2018, 560(7716): 80-83.
- [45] Liu Y C, Liu S R, Wan S Q, Wang J X, Wang H, Liu K. Effects of experimental throughfall reduction and soil warming on fine root biomass and its decomposition in a warm temperate oak forest. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1448-1455.
- [46] Keiser A D, Smith M, Bell S, Hofmockel K S. Peatland microbial community response to altered climate tempered by nutrient availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 137: 107561.
- [47] Zhang D Y, Peng Y F, Li F, Yang G B, Wang J, Yu J C, Zhou G Y, Yang Y H. Changes in above-/ below-ground biodiversity and plant functional composition mediate soil respiration response to nitrogen input. *Functional Ecology*, 2021, 35(5): 1171-1182.
- [48] Mohanram S, Kumar P. Rhizosphere microbiome: revisiting the synergy of plant-microbe interactions. *Annals of Microbiology*, 2019, 69(4): 307-320.