

DOI: 10.5846/stxb201908251761

周文昌,崔丽娟,王义飞,李伟,康晓明.若尔盖高原沼泽湿地 CO₂ 排放时空变化特征.生态学报, 2021, 41(7): 2652-2662.

Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, Li W, Kang X M. Temporal and spatial variability of ecosystems CO₂ emissions in the Zoigê Plateau marsh. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2652-2662.

若尔盖高原沼泽湿地 CO₂ 排放时空变化特征

周文昌^{1,2}, 崔丽娟^{1,*}, 王义飞^{1,3}, 李 伟¹, 康晓明^{1,3}

¹ 中国林业科学研究院 湿地研究所 北京湿地生态功能与恢复重点实验室, 北京 100091

² 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075

³ 若尔盖高寒湿地生态系统国家定位观测研究站, 阿坝藏族羌族自治州 624500

摘要: 为了更好地理解若尔盖高原不同微生境下沼泽湿地生态系统 CO₂ 排放通量的变化特征, 以若尔盖高原湿地自然保护区为研究对象, 2013 和 2014 年生长期期间, 采用了静态箱和快速温室气体法原位观测了 3 种湿地 5 种微生境下沼泽湿地 CO₂ 排放通量时空变化规律。结果表明: 长期淹水微地貌草丘区湿地 (PHK) 和洼地区湿地 (PHW) CO₂ 排放通量变化范围分别为 38.99—1731.74 mg m⁻² h⁻¹ 和 46.69—335.22 mg m⁻² h⁻¹, 季节性淹水区微地貌草丘区湿地 (SHK) 和洼地区湿地 (SHW) CO₂ 排放通量变化范围分别为 193.90—2575.60 mg m⁻² h⁻¹ 和 49.93—1467.45 mg m⁻² h⁻¹, 而两者过渡区的无淹水区沼泽湿地 (Lawn) CO₂ 排放通量变化范围 194.20—898.75 mg m⁻² h⁻¹。相关性分析表明 5 种微地貌区沼泽湿地 CO₂ 排放通量季节性变化与不同深度土壤温度均存在显著正相关, 与水位存在显著负相关 (PHW、SHW、SHK、Lawn) 或不相关 (PHK), 并且水位和温度 (5 cm) 共同解释了 CO₂ 排放通量季节性变化的 87%。3 种湿地 5 种微生境下沼泽湿地 CO₂ 排放通量存在空间变化规律, 主要受水位影响, 但植物也影响沼泽湿地 CO₂ 排放通量空间变化规律, 并且表明沼泽湿地 CO₂ 排放通量与水位平均值存在显著负相关。

关键词: CO₂ 排放通量; 沼泽湿地; 微地貌; 若尔盖高原

Temporal and spatial variability of ecosystems CO₂ emissions in the Zoigê Plateau marsh

ZHOU Wenchang^{1,2}, CUI Lijuan^{1,*}, WANG Yifei^{1,3}, LI Wei¹, KANG Xiaoming^{1,3}

¹ Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

² Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075, China

³ Zoigê Wetland Ecosystem National Research Station, Aba 624500, China

Abstract: The objective of this study is to better understand the CO₂ emission flux characteristics in different microtopographic marshes of the Zoigê Plateau. The temporal and spatial variability of CO₂ emission flux in five sampling sites among three marshes were measured by the dark static chamber method and Fast Greenhouse Gas Analyzer during the growing seasons in 2013 and 2014. The three typical marshes were the permanently flooded zone, the seasonally flooded zone, and the transition zone between them. The results showed that the seasonal CO₂ emission fluxes of the permanently flooded hummock zone (PHK) and hollow zone (PHW) in the Zoigê Plateau marsh ranged from 38.99 to 1731.74 mg m⁻² h⁻¹ and 46.69 to 335.22 mg m⁻² h⁻¹, respectively. In addition, the seasonal CO₂ emission fluxes of the seasonally flooded hummock zone (SHK) and hollow zone (SHW) in the Zoigê Plateau marsh varied from 193.90 to 2575.60 mg m⁻² h⁻¹ and 49.93 to 1467.45 mg m⁻² h⁻¹, respectively. The non-flooded zone (Lawn) was located in the transition zone. The seasonal

基金项目: 国家自然科学基金 (31971474); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501804); 国家林业局公益行业科研专项项目 (201204201)

收稿日期: 2019-08-25; **网络出版日期:** 2021-01-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lkyclj@126.com

CO₂ emission flux in the Lawn changed from 194.20 to 898.75 mg m⁻² h⁻¹. During the growing seasons, the mean CO₂ emission fluxes in the PHW, PHK, Lawn, SHW and SHK zones in the Zoigê Plateau marsh were 143.73, 443.55, 522.86, 552.60, and 946.95 mg m⁻² h⁻¹, respectively. In general, the peak value of the CO₂ emission flux in the Zoigê Plateau marsh was achieved between July and August, while the low value of the CO₂ emission flux occurred in the early Spring and/or late Autumn. The results indicated that there was a significant and positive correlation between the seasonal CO₂ emission flux and soil temperatures at the 5—45 cm depth in the PHK, PHW, and SHK zones in the Zoigê Plateau marsh. Meanwhile, the seasonal CO₂ emission flux was also positively correlated with the soil temperature at 5 and 15 cm depth in the Lawn zone in the Zoigê Plateau marsh. Besides, the seasonal CO₂ emission flux in the SHW zone in the Zoigê Plateau marsh was positively correlated with the soil temperature at 5—30 cm depth. Additionally, the seasonal CO₂ emission flux was negatively correlated with water table depth in the PHW, SHW, SHK, and Lawn zones, while not correlated with water table depth in the PHK. Overall, about 87% of the seasonal variation of CO₂ emission flux could be explained by the changes of soil temperature (5 cm depth) and water table depth (CO₂ emission flux = 56.479 T_5 - 11.170 WT - 156.617, $R^2 = 0.874$, $P < 0.001$). Our results revealed that the CO₂ emission flux in five sampling sites among three marshes in the Zoigê Plateau exhibited an obvious spatial variability. The spatial variability of the CO₂ emission flux in the Zoigê Plateau marsh was mainly controlled by water table depth, and could be affected by the type of plant. In addition, the results also exhibited that the mean CO₂ emission flux was negatively correlated with the mean water table depth.

Key Words: CO₂ emission flux; marsh; microtopography; Zoigê Plateau

气候变暖已成为当今全球最重要的环境问题,引起气候变暖的主要原因是由于人类活动导致温室气体排放的快速增加^[1]。二氧化碳(CO₂)作为最重要的温室气体,其源/汇问题已成为国内外学者研究的热点^[2-4]。由于湿地(尤其是泥炭地)是一个重要的大气碳汇,仅泥炭地土壤存储了全球陆地土壤碳储量的30%和大气碳库(CO₂)的70%^[1,5-6],这可能导致它在减缓气候变化过程中发挥着重要作用^[7]。因此,加强泥炭沼泽湿地碳源/汇的研究具有重要意义。

天然泥炭沼泽湿地常作为大气的CO₂汇^[4,8],但同时是CO₂排放源^[9]。当前有关泥炭沼泽湿地土壤呼吸或温室气体CO₂排放的时间变化(昼夜、季节和年际)研究取得许多成果,并且主要影响因子为温度(气温、土壤温度)、降水量、水位(或土壤湿度)和植被类型^[2-3,9-13]。因此,面临当前气候变化,泥炭沼泽湿地CO₂排放存在不确定性,进而长期对泥炭沼泽湿地CO₂等温室气体排放加强研究,不仅有助于为区域湿地温室气体排放清单提供基础数据,更有助于为气候变化和CO₂排放预测提供数据参考。目前,我国泥炭沼泽湿地CO₂等温室气体排放的研究集中在三江平原、大小兴安岭和青藏高原等^[14-21]。然而,针对于青藏高原东部边缘的若尔盖湿地,曾有王德宣^[11]2003—2005年报道泥炭沼泽野外样点CO₂排放通量年际间变化;Zhu等^[19]报道湖泊CO₂排放存在高度空间变化规律;Gao等^[20]通过室内孵化试验,报道温度从5℃增加到35℃,显著增加了湿地CO₂排放2—4倍,而淹没处理的湿地又比无淹没处理的湿地高出6%—60%(泥炭地比沼泽地增加比例高);Yang等^[22]的孵化试验,结果显示土壤变暖和降雨量减少,促进泥炭沼泽湿地CO₂排放增加了96.8%,表明干旱和变暖可能促进若尔盖沼泽CO₂排放。因此,面临当前若尔盖高原气候变化^[23]及其湿地动态变化^[24-25],加强若尔盖沼泽湿地CO₂排放的原位研究,有助于深入了解当前区域气候变化下若尔盖沼泽湿地CO₂排放通量变化规律。

由于高海拔的冷湿气候条件,青藏高原东部边缘的若尔盖发育着许多泥炭沼泽,是我国泥炭沼泽最大分布区,也是世界最大的高原型泥炭沼泽(3400—3600m),泥炭沼泽面积46万hm²^[26-27]。本区域上的植被类型主要为嵩草-苔草和甜茅泥炭沼泽,其西藏嵩草(*Kobresia tibetica* Maxim.)是这个区域上的特有种^[27]。通常本区域发育的泥炭沼泽,地表草丘地貌发育良好,主要由苔草、嵩草形成各样的草丘^[26-27],并且草丘周围形成一

定积水深度的许多洼地。因此,本研究选择湖滨边缘的 3 种沼泽湿地 5 种微生境下的沼泽湿地研究 CO_2 排放通量变化规律,并同步观测环境因子(土壤温度、水位和植被生物量)。本研究目的是为了揭示不同微生境下沼泽湿地 CO_2 排放通量时空变化规律,进而为气候变化下预测沼泽湿地 CO_2 排放和区域温室气体排放清单及其湿地保护修复提供数据支撑。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于若尔盖湿地自然保护区($102^{\circ}29'—102^{\circ}59'E, 33^{\circ}25'—34^{\circ}80'N$),保护区面积 16670.6 hm^2 , 2008 年被列入国际重要湿地名录。该区域属于高原寒温带湿润气候,常年无夏,11 月至次年 4 月受西伯利亚和蒙古冷空气控制,5 月至 10 月受西南季风控制,无绝对无霜期,每年 9 月下旬土壤开始冻结,5 月中旬完全解冻,冻土最深达 72 cm,年平均气温 $0.7—1.0^{\circ}\text{C}$,最高气温和最低气温出现于 7 月和 1 月,各自气温均值 10.7°C 和 -10.3°C ,年均降水量 650 mm,集中在 6 月至 9 月,相对湿度 78%^[28-29]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究样点位于若尔盖湿地自然保护区的花湖滨岸带($33.92^{\circ}\text{N}, 102.82^{\circ}\text{E}$,海拔为 3 441m),选择 5 种不同水位梯度的 3 种沼泽湿地 5 种微生境区,从花湖开阔水域向花湖岸带边缘选择水位梯度变化;第一种沼泽湿地靠近花湖水域,属于长期淹水区域,该区域发育了两种微生境,不同形状的草丘和洼地,草丘有圆形或方形的,洼地围绕在草丘周围而发育,但地表草丘比地表洼地要高出 10—30 cm,此区域湿地草丘和洼地的微地貌用 PHK 和 PHW 符号表示,野外观测为 2013 年和 2014 年两个生长季;第二种沼泽湿地在花湖边缘外,属于季节性淹水状态,有时是夏季初期淹水(2013 年),有时是秋季初期淹水(2014 年)。同时与第一种长期淹水区域,形成类似的微生境地貌,发育了许多草丘和洼地,此区域湿地草丘和洼地微地貌用 SHK 和 SHW 符号表示,野外观测为 2013 年和 2014 年两个生长季;第三种沼泽湿地位于第一种沼泽湿地和第二种沼泽湿地的过渡带,生境趋向平坦,地貌略有抬高,此区域湿地用符号 Lawn 表示,野外观测为 2014 年生长季。

3 种湿地 5 种微地貌区湿地 PHK 优势植被类型为木里苔草(*Carex muliensis* Hand.-Mazz.), PHW 主要植被类型为沉水植物小眼子菜(*Potamogeton pusillus* L.)、狸藻(*Utricularia vulgaris* L.)和杉叶藻(*Hippuris vulgaris* L.),伴生稀疏的木里苔草,Lawn 主要植被类型为西藏嵩草(*Kobresia tibetica* Maxim.)和花葶驴蹄草(*Caltha scaposa* Hook. f. et Thoms.), SHK 主要植被类型为西藏嵩草,伴生具刚毛荸荠(*Heleocharis valliculosa* Ohwi f. setosa (Owhi) Kitag)和花葶驴蹄草,SHW 主要植被为木里苔草,伴生少些蕨麻(*Potentilla anserina* L.)。

1.2.2 沼泽湿地生态系统呼吸 CO_2 排放通量测定及相关环境因子测定

根据 2 篇研究报道我国高山湿地非生长季的 CO_2 排放通量大大低于生长季,即 CO_2 排放主要集中在生长季期间^[12,21]。因此,本研究于 2013 年 6 月至 10 月和 2014 年 5 月至 10 月生长季开展野外实验研究,沼泽湿地生态系统呼吸 CO_2 排放通量(包含土壤呼吸-植物呼吸)测量采用静态箱法和快速温室气体分析仪原位观测^[30]。每个样地重复设置 3 个静态箱,静态箱由铝皮制作,规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$,为防止箱内温度波动,箱外用塑料泡沫包裹,箱内顶部有 2 个小型风扇,静态箱顶部中央附有 2 个橡皮塞小圆孔,连接快速温室气体分析仪(FGGA, DLT-100, Los Gatos Research Inc., San Jose, USA)的 2 根附有橡皮塞的透明导气管,长度约 4 m(内径为 4 mm),仪器通过 12 V 的蓄电池供电,数据采集设置为 1 Hz^[30-31]。仪器启动后,在测量生态系统呼吸 CO_2 排放通量前,将底座水槽加满水,防止箱内气体泄漏,然后密闭静态箱,测量箱内顶部气体 CO_2 浓度,密闭测量 5 min,然后揭开静态箱,置于开放状态超过 2 min,目的是等待箱顶部气体含量稳定,紧接着连续操作以上过程,测量下一个静态箱区沼泽湿地 CO_2 排放通量,直到完成所有测量样点。 CO_2 排放通量测量时间为北京时间 08:30—11:30。 CO_2 排放通量是以封闭箱内顶部 CO_2 浓度随时间变化的直线斜率计算^[30-31], CO_2 排放通量计算公式:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{T_0}{T_0 + t}$$

式中, $F(\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1})$ 为静态箱密闭时的 CO₂排放通量; dc/dt 为箱内 CO₂浓度随时间变化的斜率; $t(^{\circ}\text{C})$ 为采样箱内温度; $V(\text{m}^3)$ 为箱内体积(水面之上的箱内空气体积), $A(\text{m}^2)$ 静态箱底座面积, M 为 CO₂气体摩尔质量(44 g/mol), $P(\text{hPa})$ 为采样点大气气压, $P_0(\text{hPa})$ 、 $V_0(\text{L/mol})$ 和 $T_0(273.15 \text{ K})$ 为标准大气压的标准大气压、气体摩尔体积和空气绝对温度。

同时,采用数字温度计(JM624,天津今明仪器有限公司),测量采样点 5、10、15、20、30、45 cm 深度地温;在静态箱附近挖了一个小井,测量沼泽湿地水位,水位为正值表示水位位于土壤地表之上,水位为负值表示水位位于土壤地表之下。

植被生物量采集于 2013 年 8 月和 2014 年 8 月,生物量测量分为地上和地下生物量。地上生物量测量采用 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 样方,全部收割地上生物量,地下生物量采用 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 样方内挖取 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 20 cm 土壤深度内的根系测量地下生物量。地下根系通过自来水清洗,所有植物样品通过恒温烘箱 70°C 下烘干 48 h,直至恒重。

1.2.3 数据处理

采用 t 检验比较 3 种沼泽湿地 5 种微生境区之间的 CO₂排放通量差异,采用 Pearson 相关关系检验 CO₂排放通量与土壤温度、水位和植被生物量的相互关系,揭示其影响规律及主控因子。数据分析采用 SPSS 18.0 软件包;制图采用 OriginPro 2015 软件。

2 结果与分析

2.1 沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量时空变化规律

若尔盖高原 5 种微地貌区沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量存在季节性变化:生长季初期 CO₂排放通量较低,随着气温的增加,通常生态系统呼吸 CO₂排放通量逐渐增加。然后,在植物生长季旺盛期 7 月或 8 月达到峰值(除了 2013 年长期淹水 PHK 在 6 月底达到峰值),随后,在生长季结束后的秋季逐渐降低(图 1)。2013 年和 2014 年生长季 CO₂排放通量,5 种微地貌区沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量常在春季初期(5 月)和秋季末(10 月)分别存在较低 CO₂排放通量和最低 CO₂排放通量。季节性 CO₂排放通量表明,长期淹水区洼地湿地 PHW CO₂排放通量范围($46.69\text{—}335.22 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、长期淹水区草丘湿地 PHK 排放通量范围($38.99\text{—}1731.74 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、过渡带 Lawn CO₂排放通量范围($194.20\text{—}898.75 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、季节性淹水区洼地湿地 SHW CO₂排放通量范围($49.93\text{—}1467.45 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)和季节性淹水草丘区湿地 SHK CO₂排放通量范围($193.90\text{—}2575.60 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)(图 1)。

经统计分析, t -检验,若尔盖高原 5 种微地貌区沼泽湿地生态系统 CO₂排放通量存在空间变化差异($P < 0.05$),PHW、PHK、Lawn、SHW 和 SHK 的 CO₂排放通量平均值 \pm 标准差分别为(143.73 ± 75.57)、(443.55 ± 375.82)、(522.86 ± 238.04)、(552.60 ± 388.48)和(946.95 ± 627.65) $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$,样点 SHK CO₂排放通量平均值为最大,较样点 PHW CO₂排放通量平均值显著增加了约 600%($P < 0.05$),SHW CO₂排放通量平均值较样地 Lawn 增加为最小,仅为 6%,但不显著($P > 0.05$)。经差异性检验,2013 年和 2014 年所有数据(每个样点 21 个平均值)检验发现,长期淹水草丘湿地和季节性淹水洼地区湿地 CO₂排放通量无显著差异($P > 0.05$),而 2014 年生长季数据(每个样地 12 个平均值数据)发现过渡带 Lawn 和季节性淹水洼地区湿地 CO₂排放通量无显著差异($P > 0.05$),其他均存在显著差异($P < 0.05$)。

2.2 若尔盖高原沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量与环境因子的相关性

从季节性上说(时间变化),Pearson 相关性分析表明长期性淹水区湿地 PHW 和 PHK 的季节性 CO₂排放通量变化与土壤 5—45 cm 温度均存在显著线性相关($N = 21, P < 0.05$)(表 1)。过渡带 Lawn 区湿地 CO₂排放通量与土壤 5 cm 和 15 cm 温度存在显著线性相关($N = 12, P < 0.05$)(表 1)。季节性淹水洼地区湿地 CO₂排放

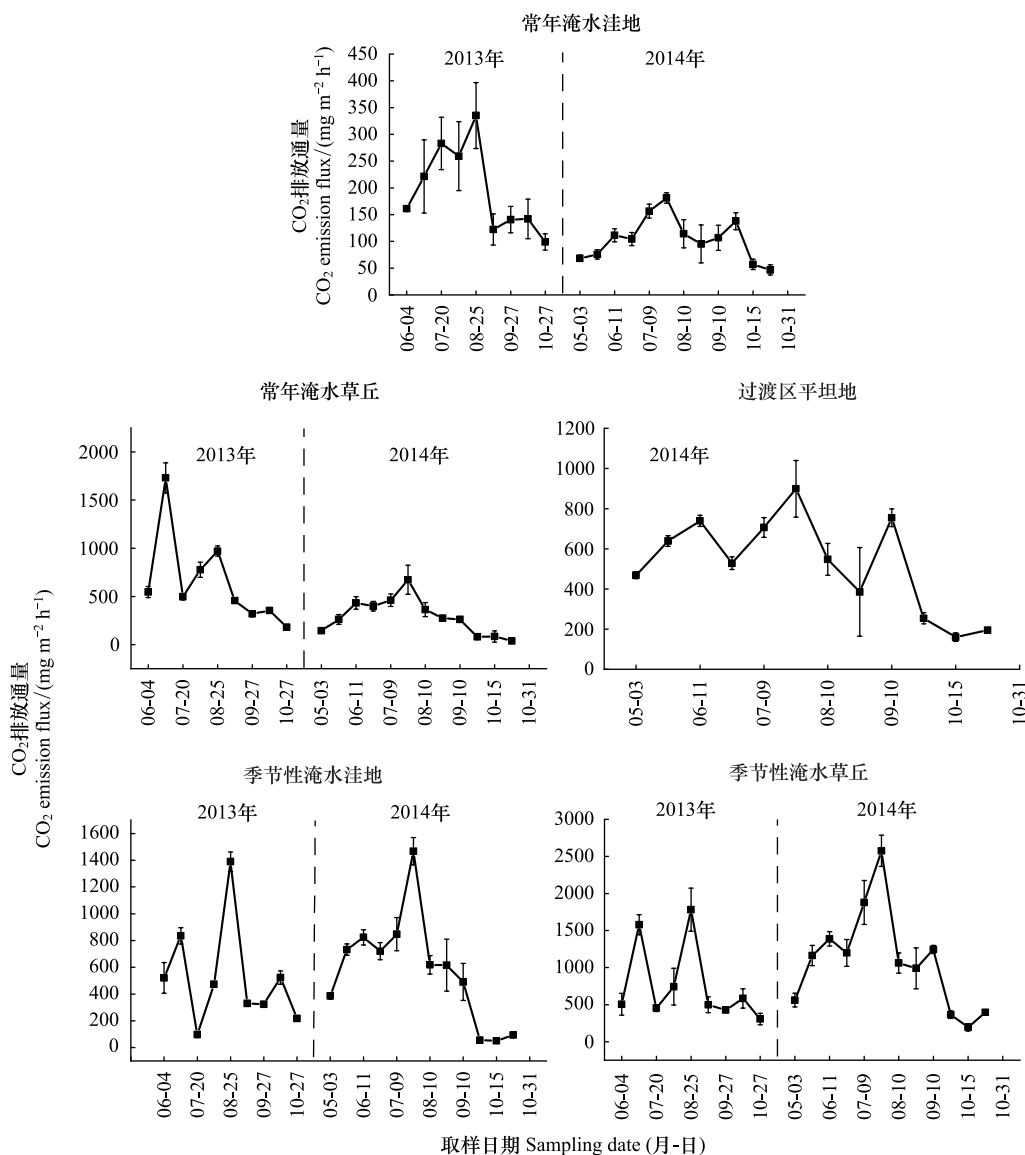


图1 5种微生境区沼泽湿地生态系统呼吸CO₂排放通量季节动态

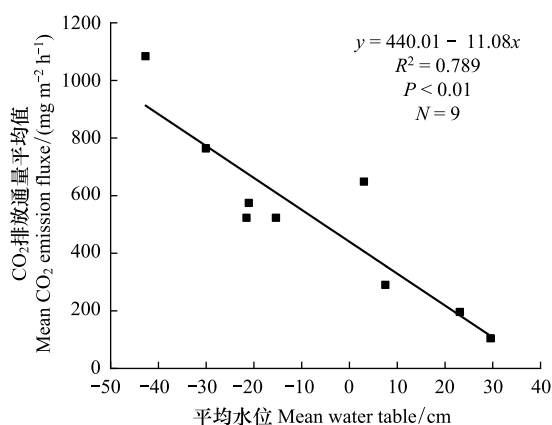
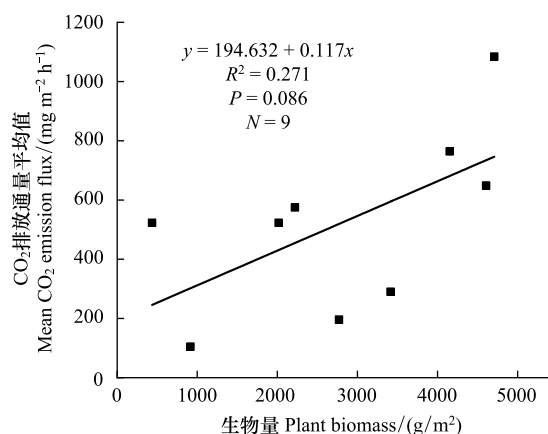
Fig.1 Seasonal dynamic in ecosystem respiration from three marsh ecosystems on five microtopography in 2013 and 2014

通量与土壤5—30 cm温度存在显著线性相关,而季节性淹水草丘区湿地CO₂排放通量与土壤5—45 cm温度存在显著线性相关($N=21, P<0.05$) (表1)。表1中相关系数表明,随着土壤深度的降低,越趋向地表,相关系数越大,相关性越强。本研究除了长期淹水草丘区湿地外($P>0.05$),其他4个微地貌区沼泽湿地CO₂排放通量与水位存在显著负相关($P<0.05$) (表1)。此外,为了解释水位和温度的重要性,以便今后通过观测土壤温度和水位环境因子,预测若尔盖高原沼泽湿地在气候变化下CO₂排放通量变化趋势,通过SPSS 18.0软件包进行逐步线性回归方程分析,最终模型为 $y = 56.479T_5 - 11.170WT - 156.617$ ($R^2 = 0.874, N = 96, P < 0.001$), T_5 表示土壤5 cm温度, WT 表示沼泽湿地水位,土壤5 cm温度和水位共同解释CO₂排放通量变化的87.4%。

从空间上说(5个样点),本研究5个样点CO₂排放通量平均值与土壤温度5—45 cm平均值不存在显著线性相关,但与水位平均值存在显著线性负相关(图2),与植被生物量存在线性关系,但未达到显著水平($P = 0.086$) (图3)。

表 1 CO₂排放通量与土壤温度和水位相互关系Table 1 Correlation between seasonal CO₂ emission flux and soil temperatures and water table

样点 Site	土壤温度 Soil temperature/℃						水位/cm Water table
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	45 cm	
常年淹水洼地 Permanently flooded hollow	0.746 **	0.723 **	0.768 **	0.663 **	0.604 **	0.53 *	-0.581 **
常年淹水草丘 Permanently flooded hummock	0.627 **	0.608 **	0.605 **	0.563 **	0.539 *	0.465 *	-0.392
过渡带或无淹水带 Transition zone or Non-flooded zone	0.637 *	0.563	0.582 *	0.514	0.459	0.214	-0.618 *
季节淹水洼地 Seasonally flooded hollow	0.705 **	0.570 **	0.537 **	0.515 *	0.466 *	0.349	-0.816 **
季节淹水草丘 Seasonally flooded hummock	0.774 **	0.684 **	0.639 **	0.624 **	0.598 **	0.490 *	-0.740 **

图 2 CO₂排放通量平均值与水位平均值的关系Fig.2 Correlation between mean CO₂ emission flux and mean water table图 3 CO₂排放通量与植被生物量的关系Fig.3 Correlation between mean CO₂ emission flux and plants biomass

3 讨论

3.1 若尔盖高原沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量与其他研究的比较

采用静态箱法观测的生态系统 CO₂排放通量,主要包含植物、根系和土壤微生物呼吸以及极少部分土壤动物呼吸和化学氧化^[14-15,32]。本研究表明生态系统呼吸 CO₂排放通量范围(46.69—2575.60) mg m⁻² h⁻¹在其他研究沼泽湿地的 CO₂排放通量范围(2.36—3300) mg m⁻² h⁻¹(表 2)。但从若尔盖高原研究的沼泽湿地 CO₂排放通量,本研究结果要高于 2003—2005 年生长季(观测时间为 09:00—10:00)若尔盖沼泽和沼泽化湿地 CO₂排放通量(30.39—891.74) mg m⁻² h⁻¹^[11]。这可能表明在当前若尔盖高原气候干旱变暖条件下^[23],沼泽湿地 CO₂排放通量呈增加趋势,证实了 Yang 等^[22]通过控制实验研究的若尔盖高原沼泽湿地 CO₂排放呈增加趋势的结论。然而,我国温带大陆性季风气候三江平原(年均气温 1.9℃ 高于本研究区年均气温 0.7—1.0℃)沼泽湿地研究的 CO₂排放通量最高值约达 1400 mg m⁻² h⁻¹^[14],仅研究日变化时在下午 13:00 时最高值达到 2903 mg m⁻² h⁻¹^[2],这说明了最近几年若尔盖高原沼泽湿地生态系统 CO₂排放通量呈增高趋势或者趋向于复杂化。例如,最近 Zhu 等^[19]研究表明若尔盖高原湖泊湿地 2009 年生长季 5—8 月 CO₂排放通量平均值仅达 488.63 mg m⁻² h⁻¹,但标准差却达 1036.17 mg m⁻² h⁻¹,变化范围从 -126.92 mg m⁻² h⁻¹增加到 1131.12 mg m⁻² h⁻¹。如此,说明若尔盖高原沼泽湿地 CO₂排放通量存在高度时空变化规律,强调需加强若尔盖高原沼泽湿地 CO₂排放通量及其影响因素的研究,为人类预测区域气候变化提供基础数据。

表 2 不同区域沼泽湿地 CO₂ 排放通量比较
Table 2 The CO₂ emission fluxes in different regional marshes

研究区 Site	湿地类型 Wetland type	水位 Water table	植被类型 Plant type	CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	参考文献 References
若尔盖高原 Zoigé Plateau	泥炭沼泽	水淹	木里苔草 (<i>Carex muliensis</i>), 乌拉苔草 (<i>Carex meyeriana</i>)	203.22 (30.39—456.19)	[11]
	沼泽草甸	地表无积水	藏嵩草 (<i>Kobresia tibetica</i>), 花茎驴蹄草 (<i>Caltha scaposa</i>)	348.31 (40.33—891.74)	
	湖泊湿地	常年淹水 (浅水湖泊)	金鱼藻 (<i>Ceratophyllum demersum</i>), 篦齿眼子菜 (<i>Potamogeton pectinatus</i>)	488.63 (—126.92—1131.12)	[14]
	高山湿地	季节性淹水	黑花苔草 (<i>Carex melantha</i>)	76.7	[12]
新疆天山山脉 Tianshan Mountains in Xinjiang province	泥炭沼泽	常年淹水	毛苔草 (<i>Carex lasiocarpa</i>)	548.04 (峰值约 1100)	[14]
	沼泽湿地	常年淹水	漂筏苔草 (<i>Carex pseudo-curaica</i>)	221.3 (峰值约 1000)	[15]
	沼泽	常年淹水或季节淹水	毛苔草 (<i>Carex lasiocarpa</i>), 乌拉苔草 (<i>Carex meyeriana</i>), 小叶章 (<i>Deyeuxia angustifolia</i>)	2.36—965.4	[32]
	沼泽	常年淹水	毛苔草 (<i>Carex lasiocarpa</i>)	467.19 (85.47—928.21)	[33]
三江平原 Sanjiang Plain	沼泽	常年淹水	毛苔草 (<i>Carex lasiocarpa</i>)	188.17—2903.43	[2]
	沼泽草甸	季节性积水	小叶章 (<i>Deyeuxia angustifolia</i>)	713.08 (峰值约达 1400)	[14]
	沼泽草甸	季节性积水	小叶章 (<i>Deyeuxia angustifolia</i>)	384.9	[15]
	沼泽草甸	季节性积水	小叶章 (<i>Deyeuxia angustifolia</i>)	897.59 (249.72—1287.59)	[33]
小兴安岭 Xiaoxing'an Mountains	沼泽	长期淹水	瘤囊薹草 (<i>Carex schmidtii</i>), 小叶章 (<i>Deyeuxia angustifolia</i>)	487.89 (76.07—809.25)	[16]
	沼泽	水淹	瘤囊薹草 (<i>Carex schmidtii</i>)	369.09 (峰值达 807.10)	[18]
	天然泥炭地	无淹水 (0—-35 cm)	泥炭藓 (<i>Sphagnum</i> spp.)	290	[34]
	垦殖的泥炭地	无淹水 (-20—<-60 cm)	马铃薯 (<i>Solanum tuberosum</i>)	730—1050 (峰值达 3310)	[34]
温带区沼泽 Temperate marshes	泥炭沼泽	无淹水 (<-53.2cm)	燕麦草 (<i>Arrhenatherum elatius</i>), 鸭茅 (<i>Dactylis glomerata</i>)	200 (峰值达 700)	[35]
若尔盖高原 Zoigé Plateau	湖滨沼泽湿地	常年淹水到无淹水	苔草属 (<i>Carex</i>), 嵩草属 (<i>Kobresia</i>)	46.69—2575.60	本研究

3.2 环境因子对若尔盖高原沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量时空变化规律的影响

大多数研究表明,沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量的季节性变化主要受温度因子的影响^[14-15]。已有研究表明若尔盖高原湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量与气温和地温存在显著正相关^[3,36];Song 等^[14]和郝庆菊等^[15]研究表明三江平原沼泽湿地生态系统呼吸 CO₂排放通量与土壤温度(5—40 cm)和水温存在显著正相关,这些研究结果与本研究吻合(表 1)。因此,沼泽湿地常在生长季温度最高的 7—8 月观测到 CO₂排放通量峰值,其通量季节性变化规律常与温度季节性变化规律保持一致(图 4)。这种结果一方面是源于气温增加,植物开始分裂、生长,并逐步达到植物生长旺盛期,植物呼吸最大,然后随着植物的衰老而植物呼吸又逐渐降低^[3,30,32,37];另一方面是温度为土壤微生物活性的重要影响因子,土壤呼吸与温度密切相关^[3,37],当气温增加,促进了土壤微生物有氧分解活动,促使沼泽湿地土壤呼吸达到最大值^[16,18,37-38]。

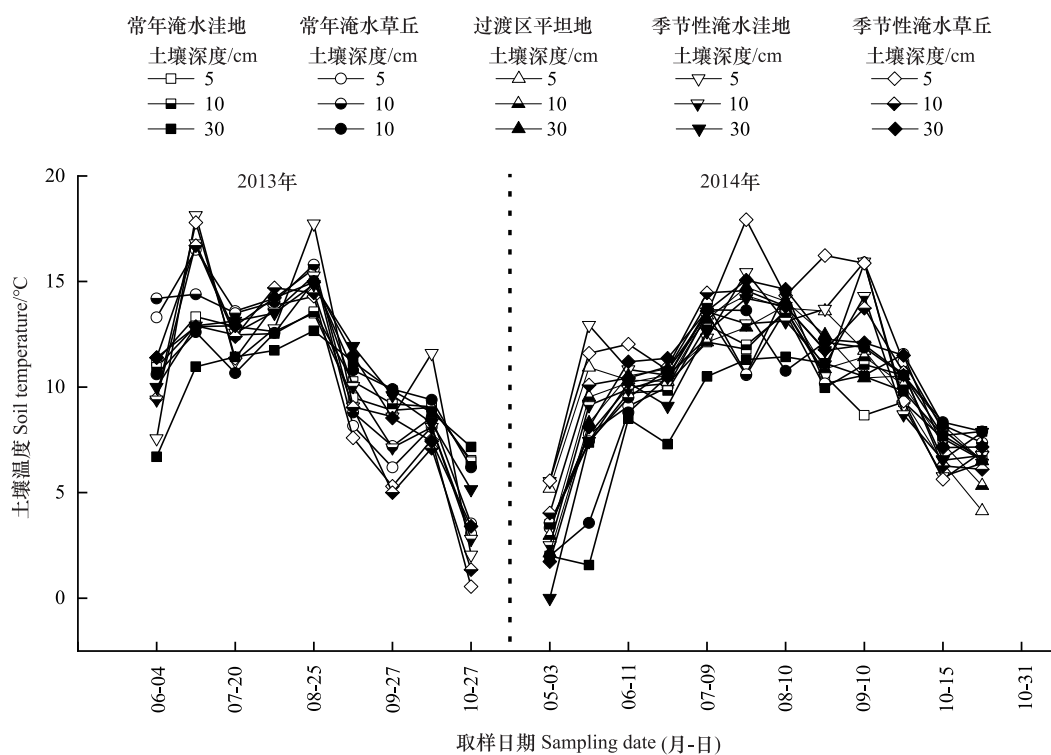


图 4 5 种微生境区沼泽土壤 5 cm、10 cm 和 30 cm 温度的季节变化

Fig.4 Seasonal variations of soil temperature at 5 cm, 10 cm and 30 cm depth from three marshes on five microtopography in 2013 and 2014

然而,本研究沼泽湿地 CO₂排放通量季节变化与水位变化存在显著负相关或不相关(表 1),这与郝庆菊等^[15]研究的三江平原沼泽湿地或草甸 CO₂排放速率与水深存在显著负相关,以及与牟长城等^[16]研究的小兴安岭草丛沼泽 CO₂排放通量与水位存在不显著相关类似,这可能说明不同区域沼泽湿地有其自身的 CO₂释放特征。同时,沼泽湿地水位的降低(图 5),增加太阳辐射进入下层土壤,促进地温增加和随之增加沼泽湿地 CO₂排放通量,这与其他研究的沼泽湿地水位降低而增加了土壤温度和室内孵化增温实验,促进湿地 CO₂排放,或与更暖气候带的泥炭地土壤呼吸高于更冷气候带的结果是吻合的^[20,36,39]。许多研究认为,湿地水位深度是影响不同湿地类型 CO₂排放通量差异的主要因素^[14,32],这是由于地表的常年淹水,土壤中的植物残体、根系及有机物质分解受到了限制,沼泽湿地厌氧土壤的 CO₂产生速率低,表现为随水位深度的增加,其常年淹水沼泽湿地比季节性淹水沼泽湿地 CO₂排放通量低^[3,14,40],已有研究表明湿地平均 CO₂排放通量与平均水位存在显著负相关^[41],本研究图 2 中也显示类似结果。说明水位调控不同湿地类型生态系统 CO₂排放通量的空间变化规律。为阐明温度和水位对沼泽湿地 CO₂排放通量的影响,本研究通过逐步回归分析表明水位和温

度(土壤 5 cm)共同解释了沼泽湿地 CO_2 排放通量季节变化的 87.4%。这表明沼泽湿地 CO_2 排放通量季节变化受到水位和温度的共同作用,类似于 Gao 等^[20]研究的若尔盖高原泥炭地增加土壤温度促进泥炭地 CO_2 排放通量,但增加土壤水分,降低泥炭地 CO_2 排放通量。

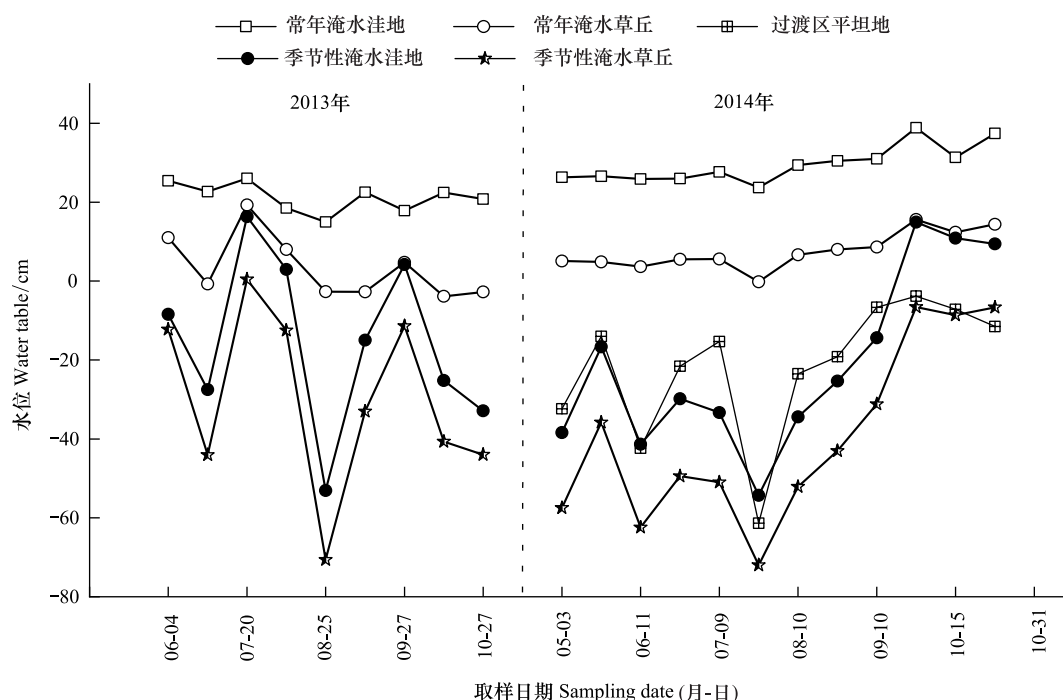


图 5 5 种微生境区沼泽水位季节变化

Fig.5 Seasonal variations of water table from three marshes on five microtopography in 2013 and 2014

此外,沼泽湿地生态系统呼吸包含土壤呼吸(根呼吸、微生物呼吸)和植物呼吸,宋长春等^[32]研究三江平原沼泽湿地小叶章种群土壤呼吸受到植物生长的影响,在 7 月份植物生长率最快时期的呼吸通量最大。本研究沼泽湿地生态系统呼吸与平均植被生物量存在线性关系,它们之间虽然不显著(图 3),但从图 3 中可知植物生长影响着沼泽湿地生态系统呼吸通量。诸如,Magenheimer 等^[41]研究北方盐沼湿地 CO_2 排放通量与地上平均植被生物量存在显著正相关,合并地上植物生物量和水位两种因子共同解释了 CO_2 排放通量平均值变化的 63%。因此,面临当前气候变化,许多学者加强了气候变化下湿地碳通量的响应过程研究,包含湿地土壤呼吸(根呼吸、泥炭呼吸和凋落物呼吸)和植物呼吸。据苏联专家研究苏联沼泽生态系统的土壤呼吸占生态系统总呼吸的最大部分(85%—90%),而植物呼吸占据比例较小(15%)^[15,42]。然而,Crow 和 Wieder^[9]研究加拿大泥炭藓泥炭地植物呼吸和土壤呼吸,泥炭地维管植物呼吸 CO_2 排放通量占总呼吸通量的 35%—57%,这与我国学者研究三江平原沼泽植物呼吸是生态系统呼吸重要贡献者(24%—76%)类似^[33];而 Jovani-Sancho 等^[13]研究温带泥炭地土壤呼吸中,根呼吸占据土壤呼吸 44%,泥炭呼吸和凋落物呼吸分别占土壤呼吸 35%和 21%。这些结果表明了不同区域沼泽湿地植物呼吸、根系呼吸、土壤微生物呼吸对土壤-植物系统呼吸的贡献程度不同,这种差异可能与不同区域土壤、气候和植物生长环境密切相关。

4 结论

(1) 若尔盖高原沼泽湿地生态系统呼吸 CO_2 排放通量存在显著季节变化规律, CO_2 排放通量变化范围在 $(46.69—2575.60) \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。同时指出面临当前气候变化,若尔盖高原沼泽湿地生态系统 CO_2 排放通量有呈增加或复杂化趋势。本研究 3 种沼泽湿地 5 种微生境区湿地生态系统 CO_2 排放通量与不同深度土壤温度存

在显著正相关,与水位存在显著负相关或不显著相关。另外,本研究表明了温度(土壤 5 cm)和水位共同解释了沼泽湿地生态系统 CO₂排放通量季节性变化 87.4%,建立了线性方程模型,为预测气候变化提供了参考。

(2)若尔盖高原沼泽湿地生态系统 CO₂排放通量空间变化规律随水位增加而降低,并且与平均水位存在显著线性负相关。尽管植被生物量与沼泽湿地生态系统 CO₂排放通量相关性未达到显著水平,但植被生长影响着沼泽湿地生态系统 CO₂排放通量。今后有待于加强沼泽湿地生态系统 CO₂排放不同呼吸组分(根呼吸、微生物呼吸和植物呼吸)在变化生境下的响应过程研究,为区域气候变化下湿地碳通量的响应过程提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2013: the physical science basis//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 卢妍, 宋长春, 王毅勇, 赵志春. 三江平原毛苔草沼泽 CO₂排放通量日变化研究. 湿地科学, 2008, 6(1): 69-74.
- [3] 王德宣, 宋长春, 王毅勇, 赵志春. 若尔盖高原沼泽湿地与草地二氧化碳通量的比较. 应用生态学报, 2008, 19(2): 285-289.
- [4] Hao Y B, Cui X Y, Wang Y F, Mei X R, Kang X M, Wu N, Luo P, Zhu D. Predominance of precipitation and temperature controls on ecosystem CO₂ exchange in Zoige Alpine wetlands of southwest China. Wetlands, 2011, 31(2): 413-422.
- [5] Gorham E. Northern Peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. Ecological Applications, 1991, 1(2): 182-195.
- [6] Yu Z C, Loisel J, Brosseau D P, Beilman D W, Hunt S J. Global peatland dynamics since the last glacial maximum. Geophysical Research Letters, 2010, 37(13): L13402.
- [7] 周文昌, 崔娟娟, 王义飞, 李伟. 若尔盖高原泥炭地生态系统碳储量. 生态学杂志, 2016, 35(8): 1981-1987.
- [8] Wei D, Zhao H, Huang L, Qi Y H, Wang X D. Feedbacks of alpine wetlands on the Tibetan Plateau to the atmosphere. Wetlands, 2019. doi: 10.1007/s13157-019-01220-4.
- [9] Crow S E, Wieder R K. Sources of CO₂ emission from a northern peatland: root respiration, exudation, and decomposition. Ecology, 2005, 86(7): 1825-1834.
- [10] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 沼泽湿地 CO₂、CH₄、N₂O 排放对氮输入的响应. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1112-1118.
- [11] 王德宣. 若尔盖高原泥炭沼泽二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放通量研究. 湿地科学, 2010, 8(3): 220-224.
- [12] He G X, Li K H, Liu X J, Gong Y M, Hu Y K. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in an alpine wetland and an alpine grassland of the Tianshan Mountains, China. Journal of Arid Land, 2014, 6(6): 717-724.
- [13] Jovani-Sancho A J, Cummins T, Byrne K A. Soil respiration partitioning in afforested temperate peatlands. Biogeochemistry, 2018, 141(1): 1-21.
- [14] Song C C, Yan B X, Wang Y S, Wang Y Y, Lou Y J, Zhao Z C. Fluxes of carbon dioxide and methane from swamp and impact factors in Sanjiang Plain, China. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(24): 2749-2753.
- [15] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 王毅勇, 王明星. 三江平原湿地土壤 CO₂和 CH₄排放的初步研究. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 846-851.
- [16] 牟长城, 石兰英, 孙晓新. 小兴安岭典型草丛沼泽湿地 CO₂、CH₄和 N₂O 的排放动态及其影响因素. 植物生态学报, 2009, 33(3): 617-623.
- [17] Wang J Y, Song C C, Hou A X, Wang L L. CO₂ emissions from soils of different depths of a permafrost peatland, Northeast China: response to simulated freezing-thawing cycles. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, 177(4): 524-531.
- [18] 李娜, 牟长城, 王彪, 张妍, 马莉. 小兴安岭天然森林沼泽湿地生态系统碳源/汇. 生态学报, 2017, 37(9): 2880-2893.
- [19] Zhu D, Chen H, Zhu Q A, Wu Y, Wu N. High carbon dioxide evasion from an alpine peatland lake: the central role of terrestrial dissolved organic carbon input. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(5): 2563-2569.
- [20] Gao J Q, Ouyang H, Lei G C, Xu X L, Zhang M X. Effects of temperature, soil moisture, soil type and their interactions on soil carbon mineralization in Zoige alpine wetland, Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Geographical Science, 2011, 21(1): 27-35.
- [21] Ma W W, Alhassan A R M, Wang Y S, Li G, Wang H, Zhao J M. Greenhouse gas emissions as influenced by wetland vegetation degradation along a moisture gradient on the eastern Qinghai-Tibet Plateau of North-West China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 112(3): 335-354.
- [22] Yang G, Wang M, Chen H, Liu L F, Wu N, Zhu D, Tian J Q, Peng C H, Zhu Q, He Y X. Responses of CO₂ emission and pore water DOC concentration to soil warming and water table drawdown in Zoige Peatlands. Atmospheric Environment, 2017, 152: 323-329.
- [23] Li B Q, Yu Z B, Liang Z M, Song K C. Effects of climate variations and human activities on runoff in the Zoige alpine wetland in the eastern edge

- of the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5): 1026-1035.
- [24] Qiu P F, Wu N, Luo P, Wang Z Y, Li M H. Analysis of dynamics and driving factors of wetland landscape in Zoige, Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(1): 42-55.
- [25] Yao L, Zhao Y, Gao S J, Sun J H, Li F R. The peatland area change in past 20 years in the Zoige Basin, eastern Tibetan Plateau. *Frontiers of Earth Science*, 2011, 5(3): 271-275.
- [26] 孙广友. 论若尔盖高原泥炭赋存规律成矿类型及资源储量. *自然资源学报*, 1992, 7(4): 334-346.
- [27] 张则有. 我国冻土区泥炭沼泽形成的特征. *冰川冻土*, 1993, 15(2): 225-229.
- [28] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟, 康晓明. 若尔盖高原湿地不同微地貌区甲烷排放通量特征. *植物生态学报*, 2016, 40(9): 902-911.
- [29] 王智平, 段毅, 杨居荣, 陈全胜, 韩兴国. 青藏高原若尔盖沼泽潜在 CH_4 氧化与生成的分布特征. *植物生态学报*, 2003, 27(6): 786-791.
- [30] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟, 康晓明. 2014 年若尔盖泥炭沼泽中草丘和洼地 CO_2 和 CH_4 排放通量. *湿地科学*, 2018, 16(6): 693-699.
- [31] McEwing K R, Fisher J P, Zona D. Environmental and vegetation controls on the spatial variability of CH_4 emission from wet-sedge and tussock tundra ecosystems in the Arctic. *Plant and Soil*, 2015, 388(1/2): 53-54.
- [32] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 赵志春. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化. *地理科学*, 2006, 26(1): 82-86.
- [33] 卢妍, 宋长春, 王毅勇, 赵志春. 植物对沼泽湿地生态系统 CO_2 和 CH_4 排放的影响. *西北植物学报*, 2007, 27(11): 2306-2313.
- [34] Kandel T P, Lærke P E, Elsgaard L. Annual emissions of CO_2 , CH_4 and N_2O from a temperate peat bog: comparison of an undrained and four drained sites under permanent grass and arable crop rotations with cereals and potato. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 470-481.
- [35] Danevčič T, Mandić-Mulec I, Stres B, Stopar D, Hacin J. Emissions of CO_2 , CH_4 and N_2O from southern European peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1437-1446.
- [36] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟, 康晓明. 排水对若尔盖高寒沼泽 CO_2 和 CH_4 排放通量的影响. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 3040-3047.
- [37] 王金龙, 李艳红, 李发东. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量. *生态学报*, 2018, 38(2): 668-677.
- [38] Oberbauer S F, Gillespie C T, Cheng W, Gebauer R, Serra A S, Tenhunen J D. Environmental effects on CO_2 efflux from riparian tundra in the northern foothills of the Brooks Range, Alaska, USA. *Oecologia*, 1992, 92(4): 568-577.
- [39] Chimner R A. Soil respiration rates of tropical peatlands in Micronesia and Hawaii. *Wetlands*, 2004, 24(1): 51-56.
- [40] Glatzel S, Basiliko N, Moore T. Carbon dioxide and methane production potentials of peats from natural, harvested and restored sites, Eastern Québec, Canada. *Wetlands*, 2004, 24(2): 261-267.
- [41] Magenheimer J F, Moore T R, Chmura G L, Daoust R J. Methane and carbon dioxide flux from a macrotidal salt marsh, Bay of Fundy, New Brunswick. *Estuaries*, 1996, 19(1): 139-145.
- [42] 博奇 M C, 马津格 B B. 苏联沼泽生态系统. 戴国良, 译. 北京: 科学出版社, 1991: 64-65.