DOI: 10.20103/j.stxb.202304240857
李美霖,牟长城,孙梓淇,王婷,王文婧.长白山亚高山针叶林沼泽湿地碳源/汇沿水分环境梯度变化规律.生态学报,2024,44(6):2256-2269.
Li M L, Mu C C, Sun Z Q, Wang T, Wang W J.Variation of carbon source/sink of subalpine coniferous forested wetland along water environmental gradient in Changbai Mountains of China.Acta Ecologica Sinica,2024,44(6):2256-2269.

长白山亚高山针叶林沼泽湿地碳源/汇沿水分环境梯度变化规律

李美霖,牟长城*,孙梓淇,王　婷,王文婧
东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨　150040

摘要:高纬度和高海拔区为气候变化敏感区,该区域湿地碳循环与气候反馈关系倍受关注。为探究在全球变暖背景下高海拔区沼泽湿地碳源/汇功能是否发生了转化,以长白山高海拔区沿水分环境梯度分布的 5 种沼泽类型(草丛沼泽-C、灌丛沼泽-G、落叶松泥炭藓沼泽-LN、落叶松藓类沼泽-LX、落叶松苔草沼泽-LT)为对象,采用静态箱-气相色谱法和相对生长方程法,同步测定各沼泽类型全年尺度上的土壤异养呼吸碳排放量(CO_2和 CH_4)、植被年净固碳量及相关环境因子(温度、水位和土壤有机碳等),并依据生态系统净碳收支平衡,量化各沼泽类型的碳源/汇作用,揭示其沿水分环境梯度变化规律及形成机制。结果表明:(1)5 种沼泽类型土壤 CO_2年均通量((97.68±8.64)—(291.01±18.31) mg m^{-2} h^{-1})沿水分环境梯度呈阶梯式递增规律性(环境梯度上部生境地段的落叶松苔草沼泽和落叶松藓类沼泽最高,中部生境地段的落叶松泥炭藓沼泽和灌丛沼泽居中,草丛沼泽最低);(2)CH_4年均通量((-0.051±0.003)—(0.087±0.001) mg m^{-2} h^{-1})在水分环境梯度经常积水生境地段的草丛沼泽和灌丛沼泽表现出 CH_4排放源,而在偶有积水生境地段的 3 种针叶林沼泽却表现为 CH_4吸收汇;(3)这些沼泽类型土壤 CO_2排放量均受 5 或 10 cm 土壤温度所促进(C 和 G 还分别受土壤有机碳或水位所抑制);草丛沼泽和灌丛沼泽 CH_4排放量分别受 10 cm 土壤温度促进或 10 cm 土壤温度和水位共同促进,而 3 种森林沼泽 CH_4吸收量仅受 0 或 5 cm 土壤温度所促进;(4)植被年净固碳量((1.22±0.29)—(3.14±0.36) t C hm^{-2} a^{-1})沿水分环境梯度也呈阶梯式递增规律性;(5)5 种沼泽类型均表现为碳的排放源((-3.84±0.20)—(-1.12±0.45) t C hm^{-2} a^{-1}),且均表现为气候变暖效应(GWP:(4.31±1.65)—(13.96±0.72) t CO_2 hm^{-2} a^{-1}),二者沿水分环境梯度呈阶梯式递增规律性(环境梯度上部生境地段的落叶松苔草沼泽和落叶松藓类沼泽最高,中部生境地段的落叶松泥炭藓沼泽和灌丛沼泽居中,草丛沼泽最低)。因此,在目前全球气候变暖背景下,长白山高海拔区草丛沼泽、灌丛沼泽和森林沼泽湿地均起着碳源作用且其源强依次递增,并对气候变化产生了正反馈效应,且其形成机制源于土壤碳排放过程强于植被固碳过程, 为高海拔区域湿地碳源/汇管理提供了重要参考依据。

关键词:高海拔;沼泽湿地;温室气体排放;年净固碳量;碳源/汇;全球增温潜势

Variation of carbon source/sink of subalpine coniferous forested wetland along water environmental gradient in Changbai Mountains of China

LI Meilin, MU Changcheng*, SUN Ziqi, WANG Ting, WANG Wenjing
Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, *China*

Abstract: The high latitude and altitude areas are sensitive to climate change, and the feedback relationship between the wetland carbon cycle and climate in these areas has attracted much attention. This article aimed to explore whether the carbon source/sink function of swamp wetlands has been transformed under the background of global warming in the high altitude area. The carbon emissions (CO_2 and CH_4) of soil heterotrophic respiration, annual net carbon sequestration of

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0600803)
收稿日期:2023-04-24;　　**网络出版日期**:2023-12-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: muccjs@163.com

vegetation, and related environmental factors (e.g., temperature, water level, and soil organic carbon) were measured over one year by the static chamber gas chromatography and the relative growth equation method in five kinds of natural swamps (*Carex schmidtii* marsh- C, *Shrub* Swamp- G, *Larix olgensis-Sphagnum magellanicum* swamp- LN, *Larix olgensis-moss* swamp- LX, and *Larix olgensis-Carex schmidtii* swamp- LT) distributed along the water environment gradient in the high altitude area of Changbai Mountain. According to the net carbon balance of the ecosystem, the carbon source/sink effect of each swamp type was quantified, and the change law and formation mechanism were revealed along the water environment gradient. The results showed that: (1) the annual average emission fluxes of CO_2 from five swamps ((97.68±8.64)—(291.01±18.31) mg m^{-2} h^{-1}) increased by the stepped type along the water environment gradient (LT and LX were the highest in the upper habitat section of the environmental gradient, LN and G were in the middle while C was the lowest); (2) The annual average fluxes of CH_4((−0.051±0.003)—(0.087±0.001) mg m^{-2} h^{-1}) from C and G showed CH_4 emission sources at the lower moisture gradient; while three coniferous swamps showed CH_4 absorption sink at the upper habitat; (3) The fluxes of CO_2 emission from the five kinds of swamps were promoted by 5 or 10 cm soil temperature (C and G was inhibited by soil organic carbon or water level); the fluxes of CH_4 emission from C and G were mainly promoted by 10 cm soil temperature or 10 cm soil temperature and water level, while the fluxes of CH_4 absorption from the three forested wetlands were mainly promoted by the 0 or 5 cm soil temperature; (4) The annual net carbon sequestration of vegetation ((1.22±0.29)—(3.14±0.36) t C hm^{-2} a^{-1}) increased along the water environment gradient; (5) The five swamps all showed carbon sources ((−3.84±0.20)—(−1.12±0.45) t C hm^{-2} a^{-1}) and climate warming effects (GWP was (4.31±1.65)—(13.96±0.72) t CO_2 hm^{-2} a^{-1}), and they all increased along the water environment gradient (LT and LX were the highest in the upper habitat section of the environmental gradient, LN and G were in the middle while C was the lowest). Our results suggested that under the background of global climate warming, marsh, shrub swamp and forested wetland all acted as carbon sources and their intensity of sources increased sequentially in the high altitude area of Changbai Mountain. They had positive feedback effects on climate change, and their formation mechanism is that the soil carbon emission process was stronger than the vegetation carbon sequestration process. It provides an important reference for the management of carbon sources/sinks in wetlands at high altitudes.

Key Words: high altitude; swamp wetland; greenhouse gas emissions; carbon sequestration; carbon source/sink; global warming potential

湿地仅覆盖全球陆地表面的 5%—8%,但却储存 20%—30%的全球土壤碳[1—2]。湿地能够吸收固定大气 CO_2,被认为是地球表层系统的主要碳汇[3—4];湿地每年向大气中排放 115—227 Tg 的 CH_4[5—7],占全球 CH_4排放量的 20%—25%,又被认为是最大的 CH_4天然排放源[8],因此湿地在全球碳动态扮演着重要的角色[9—10]。加之湿地位于水、陆之间的过渡地带,湿地对气候变化特别敏感[11],在未来气候变暖和变干的情景下湿地有可能由碳汇转化为碳源[12—13]。因此,研究处于气候变化敏感的高纬度或高海拔区的湿地碳源/汇具有重要意义。

现有研究表明:湿地碳汇形成机制在于植被固碳速率大于厌氧环境限制的分解速率[14—15],且植被固碳和土壤有机质分解过程均受到多种生物因子和环境因子所影响,如升温可能会导致初级生产力和生态系统呼吸不同程度的增加,这两个相反过程的差值可能会使泥炭地从碳汇转变成碳源[16—17]。同时,水位控制着土壤有氧和厌氧环境的边界,被认为是影响温室气体排放的关键因子[18],水位低时,泥炭层呼吸作用增强,土壤碳排放可能会超过植被固碳,进而使湿地由碳汇转化碳源[19—21];高水位时,易形成厌氧环境,能够抑制微生物分解活动,降低土壤异养呼吸 CO_2排放,且可能提高植被固碳[22],进而使湿地成为大气 CO_2的吸收汇[21],但同时厌氧环境还有利于产甲烷菌活动,也会增加 CH_4的排放[23—24],故湿地在干旱年份一般吸收 CH_4,在湿润年份排放 CH_4[25—26],由于 CH_4的全球增温潜势为 CO_2的 25—34 倍[7],湿地 CH_4排放的增加能够部分甚至全部抵消

CO_2汇的作用[27],进而可能会改变湿地碳循环-气候变化的反馈关系[21,28]。因此,在揭示高纬度或高海拔区湿地的碳源/汇对气候变化响应规律时应综合考虑植被固碳和土壤 CO_2和 CH_4排放过程。

高纬度和高海拔区为气候变化的敏感区,该区域湿地在调节全球气候变化和稳定温室气体排放方面发挥着重要作用[11],近年来全球气候呈现变暖变干趋势,导致了湿地碳排放发生了明显变化[29],因此在全球变暖条件下,高纬度和高海拔区泥炭地碳循环研究倍受关注[12,13,30]。目前我国高纬度和高海拔区湿地碳循环研究尚处于起步阶段,主要集中在青藏高原和东北大小兴安岭湿地的温室气体排放方面[31—37],且涉及湿地碳源/汇研究相对较少[38—40],如温带小兴安岭森林沼泽湿地为碳汇[41],气候变暖和冻土退化后湿地碳源/汇功能已经发生了转化[42],青海湖高寒湿地为碳汇[40],青藏高原高山湿地却为碳源[43]。然而,有关温带长白山高海拔区湿地在现有气候条件下究竟发挥着碳源还是碳汇作用仍不清楚。

本研究选取长白山高海拔区沿水分环境梯度依次分布的 5 种天然沼泽湿地类型(草丛沼泽-C、灌丛沼泽-G、落叶松泥炭藓沼泽-LN、落叶松藓类沼泽-LX、落叶松苔草沼泽-LT)为研究对象,采用静态暗箱-气相色谱法、碳氮分析仪测定法以及相对生长方程法,同步测定各沼泽类型土壤异养呼吸年碳排放量(CO_2和 CH_4)和植被年净固碳量。进而依据生态系统净碳收支平衡,定量评价各沼泽湿地类型的碳源/汇功能和全球增温潜势,揭示两者沿水分环境梯度的空间变化规律,并结合环境因子(温度、水位和土壤有机碳等)分析其碳源/汇形成机制,进而探寻高海拔区湿地碳源/汇功能对气候变化响应规律,以便为我国东北地区湿地碳汇管理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

实验区位于吉林省长白山林区白河林业局东方红林场(41°42′—42°45′N,127°33′—128°16′E)。长白山地区为温带大陆性气候,研究区海拔平均 1282 m,大概坡度在 5°—10°之间,年平均气温约 2.8℃,最高温度在 7 月份,平均气温 27.9℃,最低温度在 1 月,平均气温达到-32℃,无霜期 110 d;降水主要集中在 6—8 月,平均年降水量为 700 mm。土壤为暗棕色。本研究区地势相对平缓,随着微地形逐渐升高,生长季积水量逐渐减少,地下水位逐渐降低(-3.2—-62.3 cm),泥炭层越来越薄,植物长期适应不同的积水环境,依次形成了草丛沼泽、灌丛沼泽、落叶松泥炭藓沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽。试验地主要乔木树种是落叶松(*Larix olgensis*);灌木树种主要为柴桦(*Betula fruticosa*);草本层主要是彭囊苔草(*Carex schmidtii*)。且其植被和水分环境梯度几乎未受到人为活动干扰,为本研究揭示长白山高海拔区湿地碳源汇沿水分梯度变化规律及其形成机制提供了理想试验场所。

1.2 样地设置

本研究于 2021 年 5 月上旬从沼泽至森林方向沿水分环境梯度依次设置草丛沼泽-C、灌丛沼泽-G、落叶松泥炭藓沼泽-LN、落叶松藓类沼泽-LX、落叶松苔草沼泽-LT 5 种沼泽类型的标准样地。每个沼泽类型设置 3 个面积为 30 m×20 m 的重复样地,共计设置 15 块。每个样地重复设置 2 个静态箱,共计设置 30 个,对土壤 CO_2和 CH_4气体同时进行取样观测,从而揭示其沼泽土壤异养呼吸碳排放规律。

1.3 植物净初级生产力与年净固碳量测定

草本层年净初级生产力:每个标准样地里随机设置 10 个草本样方,每个样方面积为 1 m×1 m,将地上绿色部分与靠近茎干且颜色较浅的地下部分进行全收获,得到生物量的鲜重,在 70℃下烘干至恒重获得的生物量干重为草本层净初级生产力。

灌木层年净初级生产力:在每个标准样地里随机设置 5 个灌木样方,每个样方面积为 2 m×2 m,将其枝干叶和根全收获得到生物量鲜重,在 70℃下烘干至恒重获得灌木层生物量干重。灌木层的净初级生产力是用其生物量除以平均年龄(5a)得到的。

乔木层净初级生产力:2021 年 5 月初对样地中的树木在树干 1.3 m 处测量胸径,每 2 cm 划分一个径级,

每个径级选 2—3 棵作为标准木,在同年 9 月末用生长锥钻取标准木生长芯,然后用树木年轮分析仪测定各径级树木近五年的胸径生长量取均值作为当年的生长量,并采用现有的长白山森林沼泽群落建群种落叶松相对生长方程($Y=b_0+b_1D+b_2D^2+b_3D^3$)(表 1)[44—45]计算乔木层生长初期和末期的生物量,取两者的差值对乔木层净初级生产力进行估算。

表 1　温带长白山针叶林沼泽群落建群种落叶松相对生长方程

Table 1　Relative growth equation for the dominant species Larix olgensis of coniferous forested wetland community in temperate Changbai Mountain of China

树种 Species	生物量 Biomass/kg	回归系数 Regression coefficient				相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance
		b_0	b_1	b_2	b_3		
长白山落叶松	全树	3.1490	-2.6870	0.6410	-0.0014	0.999	0.000
Larix olgensis	树干	2.6390	-1.7430	0.3470	-0.0002	0.999	0.000
	树根	1.0800	-1.2970	0.3170	-0.0054	0.999	0.000
	树枝	-2.4390	0.7490	-0.0560	0.0034	0.999	0.000
	树叶	-0.0930	0.1130	-0.0220	0.0024	0.999	0.000

b_0、b_1、b_2、b_3为相对生长方程的系数

细根净初级生产力:细根(<2 mm)是地下净初级生产力的重要贡献者,且模型和草本和灌木采集生物量时没有包含细根生产力,故本文将细根 7、8 月间(新根生产主要集中时间)的生物量作为其当年的净初级生产力,细根是通过土钻取 50 cm 深土芯用水洗法获得。

植被年净固碳量测定:分别将细根、草本层、灌木层和乔木层用碳氮分析仪 Multi N/C 3100 通过 1300℃干烧法干烧从而得到其有机碳含量。植被年净固碳量计算公式如下[46—48]:

$$ANCS=NPP_{Tree}\times OC_{Tree}+NPP_{Shurb}\times OC_{Shurb}+NPP_{Grass}\times OC_{Grass}+NPP_{Fineroot}\times OC_{Fineroot}$$

式中,ANCS 为年净固碳量,NPP_{Tree}、NPP_{Shrub}、NPP_{Grass}和 $NPP_{Fine\ root}$分别表示乔木层、灌木层、草本层和细根的年净初级生产力;OC_{Tree}、OC_{Shrub}、OC_{Grass}和 $OC_{Fineroot}$分别表示乔木层、灌木层、草本层和细根的有机碳含量。

1.4　气体采集与分析

气体收集采用静态暗箱-气相色谱法。取样时间为 8:00—12:00,全年共计取样 24 次。静态暗箱由不锈钢顶箱和底座组成,在顶箱外部安装了保温材料能减少温度波动,且为了减小气体浓度差在顶箱内部上方安装了一个直径为 10 cm 的小风扇用于搅拌箱内空气。取样前,为了防止植物自养呼吸干扰,清除底座内的植物及其根系。底部凹槽用注水密封,隔绝空气。用 60 mL 医用注射器抽取气体注入到 100 mL 的气体采样袋,每隔 10 min 取样一次,共采集 4 次,采集的气体在一周内用 Agilent 7890A 气相色谱仪完成测定。最后计算各沼泽土壤异养呼吸年碳排放量。温室气体通量计算公式:

$$F=\frac{dc}{dt}\frac{MP}{V_0}\frac{T_0}{P_0T}H$$

式中,F 为气体通量($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$),正值为排放,负值为吸收;dc/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率;M 为被测气体摩尔质量;P、T 为采样点的实际大气压和温度;V_0、P_0、T_0为标准状态下的气体摩尔体积、标准大气压和绝对温度;H 为采样箱高度。CH_4和 CO_2的碳含量是根据其碳元素所占分子式比例进行折算,进而推算碳排放量。

$$ANCE=(F_{CO_2}\times 27.27\%+F_{CH_4}\times 75\%)\times 24\times 365$$

式中,ANCE 为土壤年碳排放总量($t\ C\ hm^{-2}\ a^{-1}$);F_{CO_2}和F_{CH_4}分别为温室气体 CO_2和 CH_4平均通量($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$)。

温室气体增温潜势计算:结合 100 年尺度上的 CO_2、CH_4的全球增温潜势依次为其排放总量的 1、28 倍[7],计算各样地的增温效果,公式(F 为各温室气体年排放总量)如下:

$$GWP=F_{总CO_2}+28F_{总CH_4}$$

1.5 环境因子的测定

在采集气体样品的同时用 JM 便携式数字温度计来测量测定气温、箱温和土壤温度(0、5、10、20、30、40、50 cm),水位用钢卷尺来测量。使用土钻采集土样,土壤共取 4 层(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm)。土壤有机碳含量由 Multi N/C 3100 碳氮分析仪(Analytik Jena AG, Germany)测定。测定的环境因子见表 2。

1.6 碳源/汇的测定

根据天然沼泽湿地生态系统的净碳收支平衡(植被年净固碳量与土壤异养呼吸年碳排放量的差值,负值代表生态系统净碳排放,正值代表生态系统净碳吸收)来揭示长白山高海拔区针叶林沼泽湿地碳源/汇问题。

1.7 数据处理

本文数据采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),使用最小显著差异法(LSD)检验不同数据间的显著差异性,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$。采用多元逐步线性回归对气体 CO_2、CH_4与环境因子的关系进行分析。用 SigmaPlot 14.0 软件作图,图表中的数据是平均值±标准差。

表 2 长白山高海拔区 5 种沼泽环境因子概况

Table 2 Overview of five environmental factors of swamps at high altitude area in Changbai Mountain

环境因子 Environmental factors	土壤深度 Soil depth/cm	样地 Sites				
		C	G	LN	LX	LT
气温 Air temperature/℃		7.31±0.55AB	7.49±0.22AB	7.83±0.20A	6.82±0.43B	6.98±0.34B
水位 Water level/cm		-3.15±1.86A	-23.11±1.71B	-33.17±0.96C	-50.50±0.80D	-62.29±6.46E
有机碳	0—10	26.12±0.74D	28.86±2.27D	154.27±11.65A	92.93±11.21B	52.68±2.34C
Organic carbon/(g/kg)	10—20	40.17±1.87A	22.14±1.78C	39.78±2.80A	31.09±6.72B	28.13±0.87BC
	20—30	151.70±16.57A	15.72±0.38B	19.24±2.59B	22.42±2.38B	19.86±1.21B
	30—50	228.06±5.15A	13.07±0.38B	12.83±1.21B	17.72±2.83B	13.00±1.86B
	年均值	111.51±4.17A	19.95±0.53E	56.53±4.37B	41.04±5.77C	28.42±0.48D
含水量	0—10	1.08±0.10B	0.80±0.01C	2.46±0.07A	0.89±0.02C	0.80±0.04C
Soil humidity/(cm^3/cm^3)	10—20	1.24±0.11A	0.71±0.03B	1.43±0.18A	0.46±0.04C	0.36±0.01C
	20—30	1.57±0.24A	0.69±0.01B	0.64±0.06B	0.41±0.03C	0.32±0.02C
	30—50	2.30±0.25A	0.80±0.04B	0.49±0.01C	0.33±0.02C	0.29±0.00C
	年均值	1.55±0.16A	0.75±0.01C	1.25±0.03B	0.52±0.01D	0.44±0.01D
土温	0	3.63±0.84C	4.91±0.17A	4.54±0.10AB	4.62±0.12AB	3.97±0.38BC
Soil temperature/℃	5	3.20±0.46A	2.92±0.17A	2.92±0.17A	3.16±0.28A	2.76±0.20A
	10	3.18±0.35A	2.86±0.18AB	2.67±0.18B	3.11±0.12A	2.64±0.13B
	20	3.00±0.28AB	3.29±0.28A	2.75±0.22B	2.75±0.04B	3.13±0.14AB
	30	2.88±0.38A	2.97±0.34A	2.69±0.22A	2.83±0.11A	3.12±0.32A
	40	2.69±0.33B	2.83±0.25B	2.62±0.18B	2.79±0.11B	3.32±0.07
	50	2.38±0.26B	3.05±0.22A	2.52±0.16B	2.95±0.05A	3.19±0.05A
	均值	3.08±0.36A	3.18±0.34A	2.96±0.16A	3.30±0.17A	3.15±0.03A

C:草丛沼泽 *Carex schmidtii* marsh;G:灌丛沼泽 *Shrub* Swamp;LN:落叶松泥炭藓沼泽 *Larix olgensis-Sphagnum magellanicum* swamp;LX:落叶松藓类沼泽 *Larix olgensis-moss* swamp;LT:落叶松苔草沼泽 *Larix olgensis-Carex schmidtii* swamp;每列数据后的大写字母为不同样地同一处理比较($P<0.05$)

2 结果与分析

2.1 长白山高海拔区沼泽湿地土壤 CO_2排放通量

由图 1 和表 3 得到,长白山高海拔区沿水分环境梯度依次分布的 5 种沼泽类型的土壤 CO_2年均通量存在显著差异性。其土壤 CO_2年均通量分布在(97.68±8.64)—(291.01±18.31) mg m^{-2} h^{-1},其中, LT 和 LX 显著高于其它 3 种沼泽(LN、G 和 C)52.1%—197.9%($P<0.05$); LN 和 G 又显著高于下部生境地段的 C 71.9%—

74.5%($P<0.05$);而 C 最低。

此外,5 种沼泽类型土壤 CO_2通量季节动态趋势基本一致(早春开始升高,夏季达到峰值,秋季开始下降,冬季维持低排放),但各沼泽类型土壤 CO_2排放峰值数目及其出现时间却不同。G(在 5 月和 7 月的下半月 444.32 mg m^{-2} h^{-1}和 577.73 mg m^{-2} h^{-1})和 LN(在 6 月和 8 月的上半月 381.44 mg m^{-2} h^{-1}和 527.50 mg m^{-2} h^{-1})出现 2 个峰值,且后者的排放峰值出现时间较前者延迟了半个月;而 LX(6 月下半月 949.09 mg m^{-2} h^{-1})、LT(7 月下半月 1198.32 mg m^{-2} h^{-1})和 C(8 月下半月 303.00 mg m^{-2} h^{-1})仅出现一个峰值,且峰值出现时间依次延迟一个月。

2.2　长白山高海拔区沼泽湿地土壤 CH_4排放通量

由图 1 和表 3 得到,长白山高海拔区这 5 种沼泽类型土壤 CH_4年均通量也存在显著差异性。其土壤 CH_4年均通量为(-0.051±0.003)—(0.087±0.001) mg m^{-2} h^{-1},其中,C 和 G 为 CH_4的排放源,且 C 的 CH_4源强显著高于 G 83.3%($P<0.05$);而 3 种森林沼泽为 CH_4的吸收汇,且 LX 和 LT 的 CH_4汇强显著高于 LN 112.6%—134.9%($P<0.05$)。

此外,5 种沼泽类型土壤 CH_4通量的季节动态趋势不一致。C 和 G 土壤 CH_4排放主要集中在夏秋季,但两者排放峰值数目和峰值出现时间不同,C 在 8、9 月的上半月出现 2 个排放峰值(0.494 和 0.375 mg m^{-2} h^{-1}),而 G 仅在 7 月下半月出现 1 个排放峰值(0.269 mg m^{-2} h^{-1});3 种森林沼泽 CH_4吸收峰值数目和出现时间也不同,LT 出现 3 个吸收峰值(在 6 月下半月和 8、9 月上半月出现 3 个峰值-0.096、-0.112 和-0.104 mg m^{-2} h^{-1}),LX 仅在 6 月下半月出现 1 个峰值(-0.162 mg m^{-2} h^{-1}),而 LN 在全年观测期土壤 CH_4吸收均较低且波动较小,近似于恒定。

表 3　长白山高海拔区 5 种沼泽湿地土壤 CO_2和 CH_4排放年通量及季节通量/(mg m^{-2} h^{-1})

Table 3　Annual and seasonal fluxes of CO_2 and CH_4 emissions from five kinds of swamps at high altitude area in Changbai Mountain

指标 Item	观测时期 Observation period	样地 Sites				
		C	G	LN	LX	LT
二氧化碳通量	春季	98.500±22.80C	178.310±38.92B	128.040±11.99C	186.620±30.14B	234.810±4.63A
CO_2 Flux	夏季	151.280±13.22C	304.680±83.94B	335.340±69.63B	631.080±45.03A	676.270±78.19A
	秋季	83.710±2.81B	135.020±15.96A	127.800±24.43A	134.910±39.60A	144.950±2.15A
	冬季	61.020±1.57D	73.980±8.51CD	87.120±8.28BC	91.350±5.88B	113.280±11.72A
	年均值	97.680±8.46C	170.450±28.75B	167.880±24.47B	259.170±25.09A	291.010±18.31A
甲烷通量	春季	0.027±0.002A	0.013±0.001B	-0.023±0.002C	-0.034±0.001D	-0.032±0.002D
CH_4 Flux	夏季	0.138±0.008A	0.108±0.030B	-0.024±0.002C	-0.119±0.010E	-0.084±0.005D
	秋季	0.1903±0.006A	0.035±0.002B	-0.026±0.001C	-0.032±0.001C	-0.057±0.005D
	冬季	0.021±0.002A	0.021±0.001A	-0.015±0.001B	-0.020±0.003C	-0.017±0.003BC
	年均值	0.087±0.001A	0.044±0.008B	-0.022±0.001C	-0.051±0.003D	-0.046±0.002D

大写字母为同一季节不同样地间比较($P<0.05$)

2.3　长白山高海拔区沼泽湿地土壤 CO_2和 CH_4通量时空变化的主控因子

长白山高海拔区 5 种沼泽类型土壤 CO_2和 CH_4排放与环境因子的多元逐步回归结果表明(表 4):在季节变化方面,C 的土壤 CO_2排放与 10 cm 土壤温度显著正相关,与土壤有机碳含量显著负相关,二者可以解释其变差的 71.8%,其中,土壤温度和有机碳含量分别解释 57.0%和 14.8%;G 与 5 cm 土壤温度显著正相关,与水位显著负相关,二者可以解释其变差的 69.0%,土壤温度和水位分别解释 46.6%和 22.4%;而 3 种针叶林沼泽均仅与 5 cm 土壤温度显著正相关,可以解释其变差的 58.5%—65.9%。C 的土壤 CH_4排放仅与 10 cm 土壤温度显著正相关,可以解释其变差的 55.0%;G 与 10 cm 土壤温度和水位均显著正相关,二者可解释其变差的 62.1%,土壤温度和水位可解释 40.7%和 21.4%;LN 和 LX 的 CH_4吸收仅与表层土壤温度显著正相关,可解释其变差的 28.5%和 71.2%;LT 的 CH_4吸收仅与 5 cm 土壤温度显著正相关,可解释其变差的 82.1%。

在空间变化方面,5 种沼泽类型土壤 CO_2排放沿水分环境梯度的空间变化与水位呈显著负相关,可以解

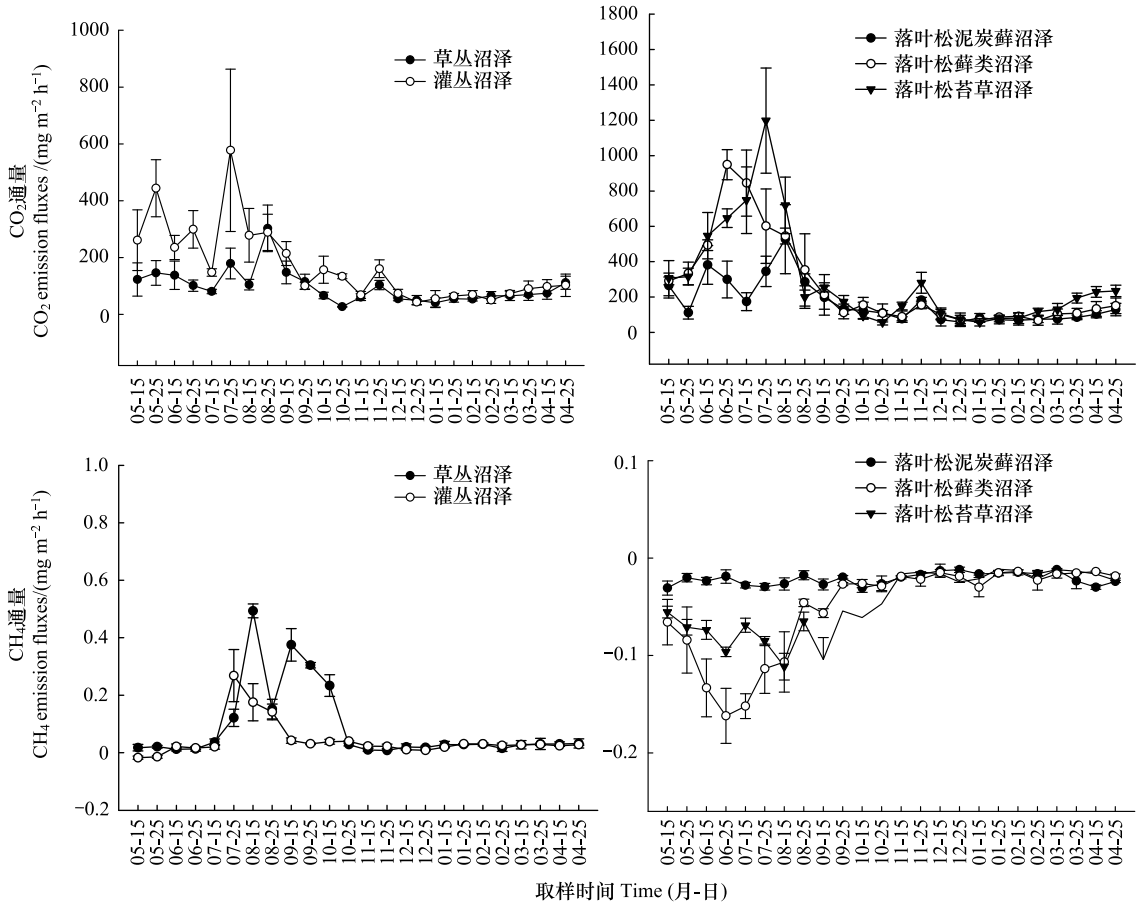

图 1 长白山高海拔区 5 种沼泽湿地土壤 CO_2 和 CH_4 排放通量季节动态

Fig.1 Seasonal dynamics of CO_2 and CH_4 emission fluxes from five kinds of swamps at high altitude area in Changbai Mountain

释其变差的 83.3%;而其土壤 CH_4 排放沿水分环境梯度的空间变化与水位却显著正相关,可解释其变化的 87.6%。

表 4 5 种沼泽湿地土壤 CO_2 和 CH_4 排放通量与环境因子多元逐步线性回归分析

Table 4 Multiple stepwise linear regression analysis of CO_2 and CH_4 emission fluxes and environmental factors from five swamps

气体 Gas	样地 Sites	模型 Model	R^2	F	P
二氧化碳 CO_2	C	$F=7.357T_{10}-0.864SOC+170.602$	0.718	41.919	<0.001
	G	$F=12.402T_5-0.864WL+332.587$	0.690	36.649	<0.001
	LN	$F=14.029T_5+126.980$	0.659	65.645	<0.001
	LX	$F=21.113T_5+192.494$	0.637	59.649	<0.001
	LT	$F=21.057T_5+232.894$	0.585	48.021	<0.001
	整体	$F=-3.233WL+85.865$	0.833	98.071	<0.001
甲烷 CH_4	C	$F=0.014T_{10}+0.041$	0.550	41.517	<0.001
	G	$F=0.006T_{10}+0.004WL+0.116$	0.621	26.992	<0.001
	LN	$F=-0.533T_0-0.020$	0.285	13.527	<0.001
	LX	$F=-0.003T_0-0.035$	0.712	84.219	<0.001
	LT	$F=-0.003T_5-0.038$	0.821	155.452	<0.001
	整体	$F=0.002WL+0.081$	0.876	91.443	<0.001

F:气体通量 Gas fluxes;T_0、T_5、T_{10}:0、5、10 cm 土壤温度 0、5、10 cm Soil temperature;WL:水位 Water level;SOC:土壤有机碳含量 Soil organic carbon

2.4　长白山高海拔区沼泽湿地的植被净初级生产力与年净固碳量

由图 2 可知,长白山高海拔区 5 种沼泽类型的植被净初级生产力和年净固碳量存在显著差异性。其植被净初级生产力分布在(3.10±0.73)—(7.09±0.81)t hm^{-2} a^{-1},其中,LT 和 LX 显著高于其他 3 种沼泽 38.5%—128.7%($P<0.05$);G 和 LN 显著高于或较大幅度高于 C 56.8%($P<0.05$)和 26.1%($P>0.05$)。其植被年净固碳量分布在(1.22±0.29)—(3.14±0.36) t C hm^{-2} a^{-1},其中,LT 和 LX 显著高于其他 3 种沼泽 60.9%—157.4%($P<0.05$);G 和 LN 又显著高于 C 45.9%—50.8%($P<0.05$)。

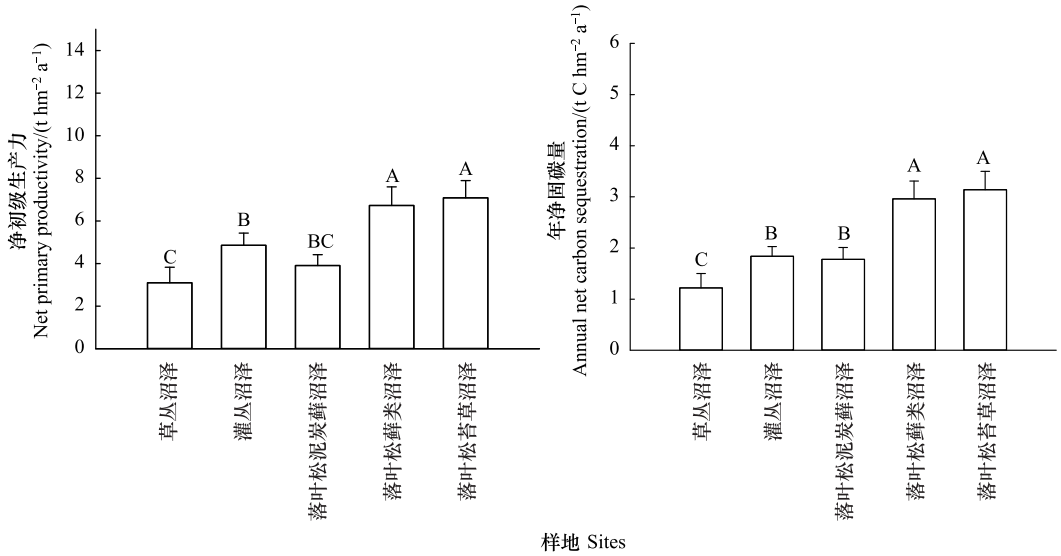

图 2　长白山高海拔区 5 种沼泽湿地植被净初级生产力和年净固碳量

Fig.2　Net primary productivity and annual net carbon sequestration of vegetation in five swamps at high altitude area in Changbai Mountain

大写字母不同代表不同沼泽类型之间差异性显著($P<0.05$)

2.5　长白山高海拔区沼泽湿地的生态系统碳源/汇和全球增温潜势

由表 5 得到,长白山高海拔区沿水分环境梯度依次分布的 5 种沼泽湿地的生态系统碳源/汇存在显著差异性。其生态系统净碳收支分布在(-3.84±0.20)—(-1.12±0.45)t C hm^{-2} a^{-1},5 种沼泽类型均表现为碳的排放源,且 LX 和 LT 的源强显著高于其他 3 种沼泽类型 44.2%—241.8%($P<0.05$);G 和 LN 源强又显著高于 C 99.4%—101.1%($P<0.05$)。

表 5　长白山高海拔区 5 种沼泽湿地生态系统碳源/汇作用/(t C hm^{-2} a^{-1})

Table 5　The source or sink of carbon from five kinds of swamps at high altitude area in Changbai Mountain

指标 Item	样地 Sites				
	C	G	LN	LX	LT
植被年净固碳量(ANCS)	1.220±0.285C	1.839±0.193B	1.782±0.229B	2.961±0.352A	3.138±0.356A
土壤年 CO_2-C 排放(CO_2-C)	2.338±0.204C	4.096±0.699B	4.024±0.589B	6.220±0.604A	6.983±0.442A
土壤年 CH_4-C 排放(CH_4-C)	0.006±0.000A	0.003±0.001B	-0.001±0.000C	-0.003±0.000D	-0.003±0.000D
土壤年碳排放量(ANCE)	2.344±0.204C	4.099±0.699B	4.023±0.589B	6.216±0.604A	6.980±0.442A
碳源/汇(CSS)	-1.124±0.450A	-2.260±0.816B	-2.241±0.382B	-3.255±0.253C	-3.842±0.198C

ANCS:植被年净固碳量 Annual net carbon sequestration by plants;CO_2-C:土壤年 CO_2-C 排放 Annual soil CO_2-C emissions;CH_4-C:土壤年 CH_4-C 排放 CH_4-C Annual soil CH_4-C emissions;ANCE:土壤年碳排放量 Annual soil carbon emissions;CSS:碳源/汇 Carbon sources/sinks;大写字母不同代表不同沼泽类型之间差异性显著($P<0.05$)

同时,这 5 种沼泽类型的 GWP 也存在显著差异(表 6)。其生态系统净 GWP 收支分布在(4.31±1.65)—

(13.96±0.72) t CO_2 hm^{-2} a^{-1}之间,5 种沼泽类型均为正的 GWP 值,均表现为气候变暖效应,且 LX 和 LT 的 GWP 显著高于其他 3 种沼泽类型 40.9%—223.9%($P<0.05$);G 和 LN 的 GWP 又显著高于 C 89.3%—94.7%($P<0.05$)。

此外,将 5 种沼泽类型的植被年净固碳量、土壤年碳排放量(CO_2-C 和 CH_4-C)、生态系统碳源和全球增温潜势(GWP)与其相应的环境因子进行多元逐步线性回归分析(表 7),得到长白山高海拔区沼泽湿地的植被年净固碳量、土壤年碳排放量、生态系统碳源和全球增温潜势沿过渡带水分环境梯度空间变化量均与水位显著负相关,水位依次可解释其变化的 84.1%、88.2%、80.0%和 78.8%。

表 6 长白山高海拔区 5 种沼泽湿地温室气体全球增温潜势(GWP)/(t CO_2 hm^{-2} a^{-1})

Table 6 GWP values of soil greenhouse gases in five swamps at high altitude area in Changbai Mountain

指标 Item	样地 Sites				
	C	G	LN	LX	LT
土壤排放 GWP_{CO_2} Soil emissions GWP_{CO_2}	8.58±0.75C	15.02±2.56B	14.76±2.16B	22.81±2.22A	25.61±1.62A
植被固定 GWP_{CO_2} Vegetation sequestration GWP_{CO_2}	4.48±1.04C	6.75±0.71B	6.53±0.84B	10.86±1.29A	11.51±1.30A
系统净交换 GWP_{CO_2} Net exchange of ecosystems GWP_{CO_2}	4.10±1.65C	8.28±2.99B	8.21±1.40B	11.94±0.93A	14.07±0.72A
土壤排放 GWP_{CH_4} Soil emissions GWP_{CH_4}	0.21±0.00A	0.11±0.02B	−0.05±0.00C	−0.12±0.01D	−0.11±0.00D
总 GWP Total GWP	4.31±1.65C	8.39±3.01B	8.16±1.40B	11.82±0.93A	13.96±0.72A
CO_2贡献率/%(CO_2 contribution)	94.35	98.64	100.66	101.06	100.81
CH_4贡献率/%(CH_4 contribution)	5.65	1.36	−0.66	−1.06	−0.81

GWP:增温潜势 Global warming potential;大写字母不同代表不同沼泽类型之间差异性显著($P<0.05$)

表 7 长白山高海拔区样地整体间各指标与环境因子多元逐步线性回归分析

Table 7 Stepwise linear regression analysis of all indexes and environmental factors at high altitude area in Changbai Mountain

指标 Item	模型 Model	R^2	F	P
植被年净固碳量(ANCS)	$F=-0.034WL+1.014$	0.841	68.855	<0.001
土壤年碳排放量(ANCE)	$F=-0.078WL+2.058$	0.882	97.061	<0.001
碳源(CS)	$F=-0.043WL-1.049$	0.800	51.924	<0.001
全球增温潜势(GWP)	$F=-0.154WL+4.027$	0.787	48.106	<0.001

CS:碳源 Carbon source

3 讨论

3.1 长白山高海拔区沼泽湿地 CO_2排放通量时空动态及主控因子

本研究得到长白山高海拔区 5 种沼泽类型土壤 CO_2年均通量沿水分梯度呈阶梯式递增规律,这与我国高纬度区各沼泽类型土壤 CO_2年均通量沿水分梯度呈恒定型[37, 41]明显不同,但与高原草丛沼泽湿地生态系统呼吸随水位降低而增加相类似[35]。

其原因是湿地土壤异养呼吸受温度、水位、底物等多种因素影响[22,49],其中,水位控制有氧和厌氧环境边界及氧化还原反应水平[18],是控制湿地土壤 CO_2排放空间变化的关键因子,且水位降低有氧反应空间增大,土壤 CO_2排放增加[22]。本研究同样得到高海拔区湿地土壤 CO_2排放的空间变化主要受水位控制,二者呈显著负相关(表 4)。这源于草丛沼泽处于水分环境梯度下部经常积水生境地段,生长季平均水位最高(−3.2 cm),有氧反应空间最小,土壤 CO_2排放最低;灌丛沼泽和落叶松泥炭藓沼泽处于中部季节性积水生境地段,生长季平均水位有所降低(−23.1—−33.2 cm),有氧反应空间增大,土壤 CO_2排放有所增加;落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽因处于上部偶有积水生境地段,生长季平均水位最低(−62.3—−50.5 cm),有氧反应空间进一步增大,微生物分解活动最强,土壤 CO_2排放最高。故这 5 种沼泽类型土壤 CO_2年均通量沿水分环境

梯度呈阶梯式递增规律性。

此外,还发现这 5 种沼泽类型土壤 CO_2季节动态存在单峰型和双峰型 2 种类型,其原因在于土壤 CO_2排放受微地形、水位和温度联合控制。草丛沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽分别处于水分梯度下部和上部生境,生长季平均水位相对较高或较低,土壤长期处于水淹或有氧状态,水位对其土壤 CO_2排放的影响较弱,主要受土壤温度控制(表 4),呈现与温度变化相似的单峰型(C、LT 和 LX 分别在 8 月、7 月、6 月下半月 0—10 cm 土壤温度较高时 13.7℃、23.4℃和 14.0℃,形成排放峰值),且因草丛沼泽水位下降时间晚,土壤 CO_2排放峰值出现也晚,落叶松藓类沼泽的林分密度低于落叶松苔草沼泽使其升温较快,CO_2峰值出现时间早于后者;灌丛沼泽和落叶松泥炭藓沼泽处于水分梯度中部生境地段,生长季平均水位较高,有氧/厌氧反应空间相近,水位和土壤温度共同控制土壤 CO_2排放,两者在水位较低和土壤温度较高时形成最大排放峰值(G 在 7 月下半月(水位-23.5 cm 和土壤温度 17.7℃)和 LN 在 8 月上半月(水位-46.0 cm 和土壤温度为和 17.5℃)形成峰值),同时 G 在 5 月下半月水位较低(-20.4 cm)以及 LN 在 6 月上半月土壤温度较高(9.2℃)时,各自形成一个排放次峰值,故两者土壤 CO_2排放呈双峰型,至于落叶松泥炭藓沼泽土壤 CO_2排放峰值较灌丛沼泽延迟半个月的原因,则在于前者存在林冠层遮光升温缓慢。

3.2　长白山高海拔区沼泽湿地 CH_4排放通量时空动态及主控因子

长白山高海拔区 5 种沼泽类型土壤 CH_4排放沿水分环境梯度呈下部经常积水生境排放(C 和 G)和上部偶有积水生境吸收(LN、LX 和 LT)的规律,这与高纬度区各沼泽类型沿水分梯度土壤均为 CH_4排放源不同[41,50],但与高山草丛湿地常年和季节性积水区为 CH_4排放源,常年干燥区为 CH_4吸收汇相似[51]。

其原因在于 CH_4排放是甲烷产生、氧化和传输综合作用的结果[52—53],受温度、水位和底物等多种因素影响[23,24,54]。其中,水位通过调节土壤有氧—厌氧界面位置来影响 CH_4的产生和氧化[55],是控制土壤 CH_4排放空间变化的主要因子,水位高时厌氧反应空间增大,CH_4排放增加[23—24]。本研究也同样得到高海拔湿地土壤 CH_4排放的空间变化与水位显著正相关。源于草丛沼泽位于微地形引起的经常积水下部生境,厌氧反应空间大,土壤 CH_4排放最高;灌丛沼泽处于季节性积水中下部生境,生长季水位有所降低(-23.1 cm),厌氧反应空间有所减小,CH_4 排放降低;而落叶松泥炭藓沼泽处于季节性积水中上部生境,生长季平均水位较低(-33.2 cm),有氧反应空间大于厌氧反应空间,使之成为 CH_4的弱吸收汇;落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽处于上部偶有积水生境,生长季平均水位低(-62.3—-50.5 cm),有氧反应空间占绝对优势地位,故增强了两者对 CH_4的吸收。

此外,这 5 种沼泽类型土壤 CH_4排放或吸收季节动态存在 5 种类型(排放单峰型(G)和双峰型(C);吸收单峰型(LX)、多峰型(LT)和恒定型(LN)(图 1),其原因在于 CH_4排放或吸收受微地形、水位和温度联合控制。草丛沼泽在水分梯度下部生境,8—9 月水位与土壤温度较高(-7.0—5.7 cm、10.6—13.1℃),形成了 CH_4排放高峰期,但 8 月下半月水位过高(5.7 cm)可能限制了 CH_4的扩散,使其 CH_4排放呈双峰型;灌丛沼泽地势略升高,水位波动幅度相对较小(-9.2—-24.3 cm),其 CH_4排放主要受土壤温度控制,随土壤温度变化而呈现单峰型;落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽处于水分梯度上部生境,生长季水位低,水位对其 CH_4的吸收影响不大,其 CH_4吸收主要受土壤温度控制(LX 在 6 月下半月土温较高时 14.0℃形成一个吸收峰值;LT 在 6 月下半月、8 月上半月和 9 月上半月土温相对较高时(15.1℃、20.0℃和 12.8℃),形成了 3 个吸收峰值);落叶松泥炭藓沼泽尽管处于水分梯度中部,但因其具有独特的泥炭层,起到隔热作用,在生长季大部分时期(5—7 月)平均土壤温度均较低(0.1—3.3℃),使其生长季土壤 CH_4吸收维持在较低水平且呈恒定型。

3.3　长白山高海拔区沼泽湿地植被净初级生产力及年净固碳量

长白山高海拔区 5 种沼泽湿地植被净初级生产力(3.1—7.1 t hm^{-2} a^{-1})和年净固碳量(1.2—3.1 t C hm^{-2} a^{-1})沿水分梯度呈阶梯式递增规律与高纬度小兴安岭森林沼泽湿地沿水分梯度呈恒定型规律不同[41]。其原因在于后者没有涉及到草丛沼泽和灌丛沼泽,而森林沼泽类型也不尽相同,且各研究区气候、水文、土壤等也不同。

5 种沼泽类型的植被净初级生产力与年净固碳量沿水分环境梯度呈阶梯式递增的原因,主要源于这些沼泽类型在微地形引起的水分梯度上所处的生境地段不同,水文梯度对湿地植被的组成有重要影响[56—57]。草丛沼泽处于经常积水下部生境,生长季水位最高,积水生境限制了灌木和乔木种的生存,群落层次结构简单(仅有草本层),植被净初级生产力及固碳能力最低;灌丛沼泽和落叶松泥炭藓沼泽处于季节性积水中部生境,水位有所降低,一些耐水湿灌木和乔木种能够在此生境中生存,群落层次结构趋于完善,但长时间淹水会抑制树木直径生长和限制种群密度[58],进而导致落叶松在该生境中生长缓慢且形成老头树,故其植被固碳能力相对较低;而落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽因处于上部偶有积水生境地段,生长季平均水位相对较低,土壤养分循环加快,植被初级生产力较高[59],故两者的植被固碳能力在 5 种沼泽类型中最高,这与 Davidson 等人的研究结果木本沼泽的净生产力高于生长着树木的泥炭藓沼泽[60]相符。

3.4 长白山高海拔区沼泽湿地碳源/汇作用及增温潜势

长白山高海拔区 5 种沼泽类型均表现为碳的排放源,且源强沿水分梯度呈阶梯式递增规律,这与全球变暖情景下高原沼泽湿地[61]、北方泥炭地[62]以及温带与寒温带沼泽湿地[42]仍为碳汇的现有结论不同,但与青藏高原高山沼泽湿地及意大利北部高山泥炭地为碳源[30,43]相一致,并提供了温带高海拔区内的各沼泽湿地类型均为碳源的实验证据。

其原因在于湿地碳源/汇主要受植被固碳和土壤异养呼吸碳排放所调控[14—15],这两个过程又受温度、湿度、微地形、土壤理化性质、水文和植被等因素影响[16,17,63],故不同湿地碳源/汇功能有所不同。本研究中 5 种沼泽类型均表现为碳源,主要由于土壤异养呼吸年碳排放量高于植被年净固碳量约 1 倍(0.9—1.3 倍)(表 5)。进一步将这 5 种沼泽类型土壤年碳排放量和植被年净固碳量与我国温带小兴安岭和寒温带大兴安岭相应沼泽类型[42]加以比较,得到除草丛沼泽降低(0.58 和 0.39 倍)外其它 4 种沼泽的土壤碳排放均较大幅度增加(0.21—2.00 倍和 0.26—1.37 倍),而 5 种沼泽的植被固碳均降低(0.10—0.60 倍和 0.07—0.60 倍),说明长白山高海拔区温度升高(近百年我国东北地区气温上升近 2℃[64])确实较大幅度增加了土壤呼吸碳排放,同时其植被固碳较低(可能源于高海拔区存在较强的低温限制,目前的增温幅度并未对其产生实质性影响),进而使这些沼泽湿地类型成为碳源。这与温度升高刺激微生物活性,加速土壤有机质分解,增加土壤呼吸碳释放[61],以及土壤有机质分解比植被光合固碳对温度更加敏感[65]的现有研究结果相一致。至于 5 种沼泽类型的源强沿水分环境梯度呈阶梯式递增主要源于处于水分梯度上部的 LX 和 LT 和中部的 LN 和 G 的植被年固碳量高于下部的 C 约 1.44—1.57 倍和 0.46—0.51 倍,土壤年碳排放量高于 C 约 1.65—1.98 倍和 0.72—0.75 倍(表 5),两者虽均呈现阶梯式递增趋势,但土壤碳排放增加幅度大于植被固碳,导致其源强沿水分梯度也呈阶梯式递增趋势。

此外,5 种沼泽类型的全球增温潜势(GWP)均为正值,均表现为气候变暖效应,沿水分梯度也呈阶梯式递增规律。主要源于这 5 种沼泽类型均为碳的排放源且 GWP 均以 CO_2净交换占主体地位(94.35%—101.06%),CH_4的排放或吸收对 GWP 的贡献占次要地位(C 和 G 的 CH_4排放仅占 GWP 的 1.36%—5.65%及 3 种针叶林沼泽的 CH_4吸收仅占 GWP 的-1.06%—-0.66%)(表 6),故其气候变暖效应主要取决于沼泽湿地与大气之间的 CO_2净交换,且沿水分环境梯度变化规律与碳源/汇的变化趋势相一致。这与我国高纬度地区沼泽湿地和北美泥炭地冻土退化后 CH_4排放增加会部分甚至全部抵消 CO_2汇作用[42,66]的现有结论明显不同,说明高海拔区沼泽湿地碳循环与气候变化反馈机制方面具有其特殊性,即以沼泽湿地与大气之间的 CO_2净交换为主,CH_4排放或吸收影响并不大。

4 结论

本研究通过定量评价长白山高海拔区 5 种沼泽类型的年尺度上的土壤异养呼吸碳排放量(CO_2-C 和 CH_4-C)和植被固碳量这两个关键碳循环过程,发现在全球变暖情景下:(1)长白山高海拔区沿水分环境梯度依次分布的 5 种沼泽类型目前均表现为碳的排放源,其形成机制为温度升高导致高海拔沼泽湿地土壤异养呼

吸碳排放明显强于植被固碳;(2)其源强沿水分环境梯度呈现出阶梯式递增规律性(LT=LX>LN=G>C),源于土壤碳排放与植被固碳沿水分环境梯度均呈阶梯式递增,但土壤碳排放增加幅度要大于植被固碳;(3)5 种沼泽类型的全球增温潜势(GWP)均为正值,均表现为气候变暖效应,且其变暖效应沿水分环境梯度同样呈现出阶梯式递增规律性,其形成机制在于高海拔湿地 GWP 主要取决于沼泽湿地与大气之间的 CO_2 净交换(阶梯式递增),CH_4 排放或吸收影响并不大,表明高海拔区沼泽湿地碳循环与气候变化反馈机制方面具有其特殊性。故本项研究结果可为我国高海拔地区湿地碳汇管理实践提供重要科学依据。

参考文献(References):

[1] Xiao D R, Deng L, Kim D G, Huang C B, Tian K. Carbon budgets of wetland ecosystems in China. Global Change Biology, 2019, 25(6): 2061-2076.

[2] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. Landscape Ecology, 2013, 28(4): 583-597.

[3] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. Current Science, 2005, 88(1): 25-35.

[4] 刘耀迪, 肖钰蕙, 华坤. 碳中和背景下湿地碳汇的现状研究及未来趋势. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(13): 185-186, 192.

[5] Whalen S. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. Environmental Engineering Science, 2005, 22(1): 73-94.

[6] Bloom A A, Palmer P, Fraser A, Reay D, Frankenberg C. Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data. Science, 2010, 327(5963): 322-325.

[7] Zhu Q A, Peng C H, Liu J X, Jiang H, Fang X Q, Chen H, Niu Z G, Gong P, Lin G H, Wang M, Wang H, Yang Y Z, Chang J, Ge Y, Xiang W H, Deng X W, He J S. Climate-driven increase of natural wetland methane emissions offset by human-induced wetland reduction in China over the past three decades. Scientific Reports, 2016, 6: 38020.

[8] Inubushi K, Otake S, Furukawa Y, Shibasaki N, Ali M, Itang A M, Tsuruta H. Factors influencing methane emission from peat soils: comparison of tropical and temperate wetlands. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 71(1): 93-99.

[9] Bridgham S D, Megonigal J P, Keller J K, Bliss N B, Trettin C. The carbon balance of North American wetlands. Wetlands, 2006, 26(4): 889-916.

[10] Zheng Y M, Niu Z G, Gong P, Dai Y J, Shangguan W. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(6): 662-670.

[11] Yang Z W, Chen K L, Liu F M, Che Z H. Effects of rainfall on the characteristics of soil greenhouse gas emissions in the wetland of Qinghai Lake. Atmosphere, 2022, 13(1): 129.

[12] Dise N B. Peatland response to global change. Science, 2009, 326(5954): 810-811.

[13] Limpens J, Berendse F, Blodau C, Canadell J, Freeman C, Holden J, Roulet N, Rydin H, Schaepman - Strub G. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications - a synthesis. Biogeosciences, 2008, 5(6): 1739-1739.

[14] Kang X M, Li Y, Wang J Z, Yan L, Zhang X D, Wu H D, Yan Z Q, Zhang K R, Hao Y B. Precipitation and temperature regulate the carbon allocation process in alpine wetlands: quantitative simulation. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(9): 3300-3315.

[15] Glooschenko W A. Mires: swamp, bog, Fen and moor. general studies. ecosystems of the world, 4A. Science of the Total Environment, 1985, 41(1): 91.

[16] Beer J, Blodau C. Transport and thermodynamics constrain belowground carbon turnover in a northern peatland. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(12): 2989-3002.

[17] Gong J N, Kellomäki S, Wang K Y, Zhang C, Shurpali N, Martikainen P J. Modeling CO_2 and CH_4 flux changes in pristine peatlands of Finland under changing climate conditions. Ecological Modelling, 2013, 263: 64-80.

[18] Dinsmore K J, Skiba U M, Billett M F, Rees R M. Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. Plant and Soil, 2009, 318(1): 229-242.

[19] Laine A M, Mehtätalo L, Tolvanen A, Frolking S, Tuittila E S. Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes. Science of the Total Environment, 2019, 647: 169-181.

[20] Ise T, Dunn A L, Wofsy S C, Moorcroft P R. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback. Nature Geoscience, 2008, 1(11): 763-766.

[21] Fortuniak K, Pawlak W, Siedlecki M, Chambers S, Bednorz L. Temperate mire fluctuations from carbon sink to carbon source following changes in

water table. Science of the Total Environment, 2021, 756: 144071.

[22] Chivers M R, Turetsky M R, Waddington J M, Harden J W, McGuire A D. Effects of experimental water table and temperature manipulations on ecosystem CO_2 fluxes in an Alaskan rich Fen. Ecosystems, 2009, 12(8): 1329-1342.

[23] Chen Q F, Guo B B, Zhao C S, Xing B X. Characteristics of CH_4 and CO_2 emissions and influence of water and salinity in the Yellow River delta wetland, China. Environmental Pollution, 2018, 239: 289-299.

[24] 王毅勇, 赵志春, 宋长春. 三江平原沼泽湿地 CH_4排放及贴地层浓度分布特征. 云南大学学报: 自然科学版, 2005, 27(S2): 239-244.

[25] Sakabe A, Itoh M, Hirano T, Kusin K. Ecosystem-scale methane flux in tropical peat swamp forest in Indonesia. Global Change Biology, 2018, 24(11): 5123-5136.

[26] Dalmagro H J, Zanella de Arruda P H, Vourlitis G L, Lathuillière M J, de S Nogueira J, Couto E G, Johnson M S. Radiative forcing of methane fluxes offsets net carbon dioxide uptake for a tropical flooded forest. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1967-1981.

[27] Ma A N, Lu J J, Wang T H. Effects of elevation and vegetation on methane emissions from a freshwater estuarine wetland. Journal of Coastal Research, 2012, 28(6): 1319-1329.

[28] Oechel W C, Hastings S J, Vourlrtis G, Jenkins M, Riechers G, Grulke N. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. Nature, 1993, 361(6412): 520-523.

[29] 刘焰. 未来百年全球气候变化分析. 中国地质调查, 2021, 8(3): 1-11.

[30] Pullens J W M, Sottocornola M, Kiely G, Toscano P, Gianelle D. Carbon fluxes of an alpine peatland in northern Italy. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 220: 69-82.

[31] 王俊峰, 王根绪, 吴青柏. 青藏高原腹地不同退化程度高寒沼泽草甸生长季节 CO_2排放通量及其主要环境控制因子研究. 冰川冻土, 2008, 30(3): 408-414.

[32] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 蔡祖聪, 高景福, 杨福明. 若尔盖高原沼泽湿地 CH_4排放研究. 地球科学进展, 2002, 17(6): 877-880.

[33] Wei D, Xu-Ri, Tarchen T, Dai D X, Wang Y S, Wang Y H. Revisiting the role of CH_4 emissions from alpine wetlands on the Tibetan Plateau: evidence from two *in situ* measurements at 4758 and 4320 m above sea level. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2015, 120(9): 1741-1750.

[34] Zhu J B, Li H Q, He H D, Zhang F W, Yang Y S, Li Y N. Interannual characteristics and driving mechanism of CO_2 fluxes during the growing season in an alpine wetland ecosystem at the southern foot of the Qilian Mountains. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1013812.

[35] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟, 康晓明. 若尔盖高原沼泽湿地 CO_2排放时空变化特征. 生态学报, 2021, 41(7): 2652-2662.

[36] 牟长城, 刘霞, 孙晓新, 石兰英, 冯登军, 程伟, 吴云霞. 小兴安岭阔叶林沼泽土壤 CO_2、CH_4和 N_2O 排放规律及其影响因子. 生态学报, 2010, 30(17): 4598-4608.

[37] 常怡慧, 牟长城, 彭文宏, 郝利, 韩丽冬. 大兴安岭永久冻土区 7 种沼泽类型土壤温室气体排放特征. 生态学报, 2020, 40(7): 2333-2346.

[38] Yang A, Kang X M, Li Y, Zhang X D, Zhang K R, Kang E Z, Yan Z Q, Li M, Wang X D, Niu Y C, Yan L A. Alpine wetland degradation reduces carbon sequestration in the Zoige Plateau, China. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 980441.

[39] Yasin A, Niu B, Chen Z G, Hu Y L, Yang X Q, Li Y E, Zhang G X, Li F J, Hou W G. Effect of warming on the carbon flux of the alpine wetland on the Qinghai - Tibet Plateau. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 935641.

[40] Cao S K, Cao G C, Feng Q, Han G Z, Lin Y Y, Yuan J, Wu F T, Cheng S Y. Alpine wetland ecosystem carbon sink and its controls at the Qinghai Lake. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(5): 210.

[41] Wang B, Mu C C, Lu H C, Li N, Zhang Y, Ma L. Ecosystem carbon storage and sink/source of temperate forested wetlands in Xiaoxing'anling, northeast China. Journal of Forestry Research, 2022, 33(3): 839-849.

[42] Han L D, Mu C C, Jiang N, Shen Z Q, Chang Y H, Hao L, Peng W H. Responses of seven wetlands carbon sources and sinks to permafrost degradation in Northeast China. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(1): 15-31.

[43] Song C G, Luo F L, Zhang L L, Yi L B, Wang C Y, Yang Y S, Li J X, Chen K L, Wang W Y, Li Y N, Zhang F W. Nongrowing season CO_2 emissions determine the distinct carbon budgets of two alpine wetlands on the northeastern qinghai—tibet plateau. Atmosphere, 2021, 12(12): 1695.

[44] Mu C C, Han S J, Luo J C, Wang X P. Biomass distribution patterns of ecotones between forest and swamp in Changbai Mountain. Journal of Forestry Research, 2000, 11(3): 198-202.

[45] 王伯炜, 牟长城, 王彪. 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量. 生态学报, 2019, 39(09): 3344-3354.

[46] 姜宁, 牟长城, 韩丽冬, 申忠奇. 采伐对大兴安岭非连续冻土区毛赤杨沼泽碳源/汇的影响. 北京林业大学学报. 2020, 42(03): 1-13.

[47] 王伯炜. 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量[D]: 东北林业大学. 2018.

[48] 李娜. 东北温带小兴安岭天然森林湿地碳源/汇研究[D]: 东北林业大学. 2016.

[49] Lu B Q, Song L Q, Zang S Y, Wang H X. Warming promotes soil CO_2 and CH_4 emissions but decreasing moisture inhibits CH_4 emissions in the permafrost peatland of the Great Xing'an Mountains. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154725.

[50] 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.

[51] 胡保安, 贾宏涛, 朱新萍, 杨磊, 胡毅, 王宁宁, 李典鹏. 巴音布鲁克高寒湿地夏季 CO_2 和 CH_4 通量日变化研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 167-172.

[52] Koch O, Tscherko D, Kandeler E. Seasonal and diurnal net methane emissions from organic soils of the eastern Alps, Austria: effects of soil temperature, water balance, and plant biomass. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2007, 39(3): 438-448.

[53] Heyer J, Berger U, Kuzin I L, Yakovlev O N. Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western *Siberia* during midsummer and during the thawing period. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2002, 54(3): 231.

[54] Zhu D, Wu N, Bhattarai N, Oli K P, Chen H A, Rawat G S, Rashid I, Dhakal M, Joshi S, Tian J Q, Zhu Q A, Chaudhary S, Tshering K. Methane emissions respond to soil temperature in convergent patterns but divergent sensitivities across wetlands along altitude. Global Change Biology, 2021, 27(4): 941-955.

[55] Dunfield P, Knowles R, Dumont R, Moore T R. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(3): 321-326.

[56] 崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 唐娜, 谭学界. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应. 生态学报, 2006, 26(5): 1533-1541.

[57] 张丽丽, 殷峻暹, 蒋云钟, 王浩. 鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系. 水科学进展, 2012, 23(6): 768-775.

[58] Aguilos M, Mitra B, Noormets A, Minick K, Prajapati P, Gavazzi M, Sun G, McNulty S, Li X F, Domec J C, Miao G F, King J. Long-term carbon flux and balance in managed and natural coastal forested wetlands of the Southeastern USA. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 288/289: 108022.

[59] Grant R F, Desai A R, Sulman B N. Modelling contrasting responses of wetland productivity to changes in water table depth. Biogeosciences, 2012, 9(11): 4215-4231.

[60] Davidson S J, Dazé E, Byun E, Hiler D, Kangur M, Talbot J, Finkelstein S A, Strack M. The unrecognized importance of carbon stocks and fluxes from swamps in Canada and the USA. Environmental Research Letters, 2022, 18(5): 053003.

[61] Yu L F, Wang H, Wang Y H, Zhang Z H, Chen L T, Liang N S, He J S. Temporal variation in soil respiration and its sensitivity to temperature along a hydrological gradient in an alpine wetland of the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 282/283: 107854.

[62] Gallego-Sala A V, Charman D J, Brewer S, Page S E, Prentice I C, Friedlingstein P, Moreton S, Amesbury M J, Beilman D W, Björck S, Blyakharchuk T, Bochicchio C, Booth R K, Bunbury J, Camill P, Carless D, Chimner R A, Clifford M, Cressey E, Courtney-Mustaphi C, De Vleeschouwer F, de Jong R, Fialkiewicz-Koziel B, Finkelstein S A, Garneau M, Githumbi E, Hribjlan J, Holmquist J, Hughes P D M, Jones C, Jones M C, Karofeld E, Klein E S, Kokfelt U, Korhola A, Lacourse T, Le Roux G, Lamentowicz M, Large D, Lavoie M, Loisel J, MacKay H, MacDonald G M, Makila M, Magnan G, Marchant R, Marcisz K, Martínez Cortizas A, Massa C, Mathijssen P, Mauquoy D, Mighall T, Mitchell F J G, Moss P, Nichols J, Oksanen P O, Orme L, Packalen M S, Robinson S, Roland T P, Sanderson N K, Sannel A B K, Silva-Sánchez N, Steinberg N, Swindles G T, Turner T E, Uglow J, Väliranta M, van Bellen S, van der Linden M, van Geel B, Wang G P, Yu Z C, Zaragoza-Castells J, Zhao Y. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming. Nature Climate Change, 2018, 8(10): 907-913.

[63] Zhang W T, Wang J Z, Hu Z Y, Li Y, Yan Z Q, Zhang X D, Wu H D, Yan L, Zhang K R, Kang X M. The primary drivers of greenhouse gas emissions along the water table gradient in the zoige alpine peatland. Water, Air, & Soil Pollution, 2020, 231(5): 224.

[64] 王江山, 孙凤华, 赵春雨, 王颖, 曹焉艳. 气候变暖对东北地区农业生产的影响. 安徽农业科学, 2009. 37(19): 9053-9056.

[65] Niu B, He Y T, Zhang X Z, Du M Y, Shi P L, Sun W, Zhang L M. CO_2 exchange in an alpine swamp meadow on the central Tibetan Plateau. Wetlands, 2017, 37(3): 525-543.

[66] Turetsky M R, Wieder R K, Vitt D H, Evans R J, Scott K D. The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1922-1934.