

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.006

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.006

安娜,马维伟,杜佳团,等.基于DNDC模型分析气候变化和尕斯库勒沼泽草甸退化对CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):187-197.

AN Na, MA Weiwei, DU Jianan, et al. Analysis of effects of climate change and Gahai marsh meadows degradation on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions based on DNDC model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):187-197.

## 基于DNDC模型分析气候变化和尕斯库勒 草甸退化对CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放的影响

安娜,马维伟,杜佳团,姚瑶,常佳晨,李淑卓

(甘肃农业大学林学院,兰州730070)

**摘要:** [目的] 为探讨气候变化和沼泽草甸退化对CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放的长期影响。 [方法] 利用青藏高原东北源尕斯库勒湿地未退化、轻度退化、中度退化和重度退化的土壤CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>通量实测数据,对DNDC模型进行验证,并预测在2种未来气候情景模式(SSP2~4.5和SSP5~8.5)下,2025—2055年退化湿地碳排放的变化。 [结果] 1) DNDC模型可较好地模拟尕斯库勒4种退化梯度土壤CH<sub>4</sub>( $R^2 > 0.67$ , NRMSE < 0.34)和CO<sub>2</sub>( $R^2 > 0.70$ , NRMSE < 0.21)通量的动态变化。 2) 敏感性指数(sensitivity index, SI)是用于量化模型输出结果对输入参数变化敏感程度的指标。气象因子敏感性分析表明,温度是影响土壤CH<sub>4</sub>(SI=1.19)和CO<sub>2</sub>(SI=0.78)通量变化最敏感的参数。降水和大气CO<sub>2</sub>浓度变化下CH<sub>4</sub>的SI分别为0.07、0.15,CO<sub>2</sub>的SI分别为0.12、0.10。 3) 未来气候情景对4种退化程度湿地碳排放存在差异,SSP2~4.5情景下CH<sub>4</sub>通量年增长速率为0.4%~2.2%,CO<sub>2</sub>通量年增长速率为0.3%~1.1%;SSP5~8.5情景下,CH<sub>4</sub>通量年增长速率为0.6%~2.4%,CO<sub>2</sub>通量年增长速率为0.2%~1.9%。 [结论] 在未来极端气候背景下,未退化湿地能够有效减少土壤碳流失;重度退化湿地水文调节能力基本丧失,研究结果为尕斯库勒湿地保护和气候治理提供理论参考。

**关键词:** 气候变化; 湿地退化; 敏感性分析; 温室气体; DNDC模型

中图分类号: S812

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0187-11

## Analysis of Effects of Climate Change and Gahai Marsh Meadows Degradation on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Emissions Based on DNDC Model

AN Na, MA Weiwei, DU Jianan, YAO Yao, CHANG Jiachen, LI Shuzhuo

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the long-term effects of climate change and marsh meadow degradation on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions. [Methods] Measured CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes from undegraded, mildly degraded, moderately degraded, and severely degraded soils in the Gahai Wetland on the northeastern source region of the Tibetan Plateau were used to validate the DNDC model. Carbon emissions from degraded wetlands from 2025 to 2055 were then predicted under two future climate scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). [Results] 1) The DNDC model accurately simulated the dynamic variations in soil CH<sub>4</sub> ( $R^2 > 0.67$ , NRMSE < 0.34) and CO<sub>2</sub> ( $R^2 > 0.70$ , NRMSE < 0.21) fluxes across four degradation gradients in Gahai. 2) The sensitivity index (SI) was an indicator used to quantify the sensitivity of model outputs to variations in input parameters. Sensitivity analysis of meteorological factors showed that temperature was the most sensitive factor influencing soil CH<sub>4</sub> (SI=1.19) and CO<sub>2</sub> (SI=0.78) fluxes. Under variations in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, the SI values for CH<sub>4</sub> were 0.07 and 0.15, respectively, while those for CO<sub>2</sub> were 0.12 and 0.10, respectively. 3) Future climate scenarios showed differences in carbon emissions across wetlands with four degradation levels. Under

收稿日期: 2025-05-20

修回日期: 2025-06-20

录用日期: 2025-06-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-11

资助项目: 甘肃省2024年度重点人才项目(2024RCXM82); 甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09); 甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909)

第一作者: 安娜(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事湿地碳氮循环过程研究。E-mail: 2316206117@qq.com

通信作者: 马维伟(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事湿地碳氮循环过程研究。E-mail: mww-007@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

the SSP2-4.5 scenario, CH<sub>4</sub> fluxes were projected to increase annually by 0.4% to 2.2%, and CO<sub>2</sub> fluxes by 0.3% to 1.1%. Under the SSP5-8.5 scenario, CH<sub>4</sub> fluxes were projected to increase annually by 0.6% to 2.4%, and CO<sub>2</sub> fluxes by 0.2% to 1.9%. [Conclusions] Under future extreme climate conditions, undegraded wetlands can effectively reduce soil carbon loss, while severely degraded wetlands have largely lost their hydrological regulation capacity. The findings provide a theoretical reference for the protection of Gahai Wetland and climate governance.

**Keywords:** climate change; wetland degradation; sensitivity analysis; greenhouse gases; DNDC model

**Received:** 2025-05-20

**Revised:** 2025-06-20

**Accepted:** 2025-06-30

**Online**(www.cnki.net): 2025-08-11

CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>导致全球气候持续变暖已成为国际重大问题<sup>[1]</sup>。过去100 a, CH<sub>4</sub>全球增温潜势(global warming potential, GWP)是CO<sub>2</sub>的28倍<sup>[2]</sup>。湿地是温室气体(greenhouse gas, GHG)重要的源和汇, 湿地CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放量分别占全球排放总量的33%和6%<sup>[3]</sup>。湿地是重要的碳库, 约占全球土壤碳储量的10%~20%, 其碳汇功能为延缓气候变化提供关键缓冲作用<sup>[3]</sup>。然而, 近几十年来, 天然湿地受疏水排干和过度放牧等人类活动的影响退化严重, 湿地功能急速衰退, 导致湿地生态系统碳同化与CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>排放之间的平衡被打破<sup>[4]</sup>。已有研究<sup>[2]</sup>表明, 2100年退化湿地向大气释放的碳通量可达天然湿地的3~8倍, 而多年冻土消融可能释放1 300~1 600 Pg的封存碳, 相当于工业革命以来人类活动总排放量的2倍。因此, 在全球气候变化与生态退化胁迫下, 湿地碳汇稳定性及其GHG排放调控已成为当前核心议题之一。

湿地GHG排放的动态变化通常采用直接测量和过程性模型等方法, 直接测量受人力、物力、测量区域及时间等的限制, 而利用过程性模型的研究方式可弥补试验观测的不足。目前已经开发多种生物地球化学模型包括DNDC、CENTURY、CASA、EPIC、Biome-BGC、Roth C等模拟和预测GHG动态变化。其中, DNDC(denitrification-decomposition, 反硝化-分解模型)模型最初用来模拟农田生态系统中的碳氮循环, 该模型能够综合考虑气候、土壤、植被等多种因素对碳循环影响, 现在可用于模拟预测几乎所有陆地生态系统中的植被生长、碳动态及土壤携带的微量气体排放<sup>[5]</sup>。在模拟和预测土壤碳动态方面具有较高的精度。如YUAN等<sup>[6]</sup>研究发现, DNDC模型能够合理地捕捉白洋淀浅湖湿地CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的排放动态; JIA等<sup>[7]</sup>通过Wetland-DNDC模型模拟发现, 碳通量模拟结果与实测值呈显著线性相关, 并指出近30 a滨海湿地平均年固碳能力为1 502.24 g/m<sup>2</sup>; 在模拟青藏高原高寒湿地研究<sup>[8]</sup>发现, 温度和降水调控着碳收支, 当土壤温度和月降水量分

别超过7℃和18 mm时, 生态系统从碳源转为碳汇。在西西伯利亚泥炭地研究<sup>[9]</sup>中, 利用DNDC模型设置不同降水、温度、地下水位情景表明, 空气温度和地下水位是控制GHG变化的主要驱动因素。然而, 现有的研究多集中在天然湿地的静态模拟的模型验证, 而对高寒湿地, 尤其是退化的高寒湿地GHG排放的研究不足, 并缺乏对长期气候变化影响的预测。

青藏高原是全球重要的生态屏障, 也是气候变化的敏感区和生物多样性保护的关键区<sup>[10]</sup>, 为探究陆地生态系统在气候变化下的动态响应提供理想的研究平台。IPCC第六次评估报告<sup>[2]</sup>预测, 2100年青藏高原地区将升温2.5~4.5℃, 降水增幅将达15%~30%。研究<sup>[11]</sup>表明, 暖湿化气候延长植物生长季, 促进光合作用, 可能增加碳吸收速率; 也有研究<sup>[12]</sup>表明, 增温加速多年冻土层消融, 导致沼泽草甸排水能力增强, 地表积水减少, 加速沼泽草甸退化速度, 碳排放强度显著增加, 可能抵消部分碳汇效益。短期观测难以全面反映暖湿化气候对沼泽草甸碳排放的长期影响, 无法准确预测未来趋势。青藏高原东缘的尕海湿地内沼泽草甸分布面积占80%以上, 区域内沼泽草甸退化严重<sup>[13]</sup>, 以往对退化湿地GHG排放的研究多集中于短期增温降雨试验, 而对长期气候变化对退化湿地GHG排放变化的研究尚未见。基于此, 本研究以尕海沼泽草甸4种不同植被退化程度野外观测CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>通量数据, 对DNDC模型在高寒湿地生态系统中的CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放应用进行精度验证, 同时结合未来气候变化情景分析CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放的动态变化, 为DNDC模型在高寒湿地区的应用与改进提供参考, 以期为准确预测高寒湿地温室气体排放在未来气候变化情景下发展趋势提供参考数据, 对于该地区沼泽草甸资源保护和可持续发展等方面有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

尕海湿地(33°58'12"~34°32'16" N, 102°05'00"~

102°47'39" E)地处青藏高原东缘区,区域内以沼泽草甸湿地为主要类型<sup>[13]</sup>。平均海拔 3 430~4 300 m,区域总面积为 57 846 hm<sup>2</sup>,该区具有青藏高原气候带高寒湿润气候特点,年平均气温 1.2 °C,无绝对无霜期,年平均降水量 782 mm,蒸发量 1 150 mm<sup>[14]</sup>。优势种有藏嵩草(*Kobresia xizangica*)、蕨麻(*Potentilla anserina*)、早熟禾(*Poa annua*)、棘豆(*Oxytropis falcata*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、兰石草(*Xizang lancea*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等<sup>[14]</sup>。土壤类型以高山草甸土、暗色沼泽土、泥炭土等为主。

表 1 样地基本情况<sup>[14]</sup>Table 1 Basic information of sampling sites<sup>[14]</sup>

样地	优势种组成	盖度/%	基本情况
ND	藏嵩草( <i>K. xizangica</i> )、蕨麻( <i>P. anserina</i> )、早熟禾( <i>P. annua</i> )	96	湿地植物为主;凋落物和根系较多;较浅季节性积水;地下水位较低
LD	青藏苔草( <i>C. moorcroftii</i> )、棘豆( <i>O. falcata</i> )、蕨麻( <i>P. anserina</i> )	84	湿地植物是主要的伴生物种;无积水;地下水位为 40~70 cm
MD	问荆( <i>E. arvense</i> )、兰石草( <i>T. lancea</i> )、冷蒿( <i>A. frigida</i> )	45	湿地植物是常见的伴生物种和偶发物种,同时出现一些有毒杂草;无积水;地下水位低于 70 cm
HD	—	<10	地下水位降低、过度放牧和鼠害使地表裸露严重

### 1.3 样品采集与分析

1.3.1 气体样品采集 在 2013 年、2014 年的 5—10 月,采用静态箱-气相色谱法测定 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量。静态箱是由无底正方体不锈钢暗室(50 cm×50 cm×50 cm)和不锈钢底座(50 cm×50 cm×20 cm)组成。箱体四周和顶部密闭,外围覆盖保温材料,防止温度对气体的影响。在开始测量前 2 周,将 3 个不锈钢底座永久安装在每个地点的土壤中,每个不锈钢底座间至少有 5 m 缓冲区。每个底座的上部都有 3 cm 的颈圈来支撑采样室。每个箱体顶部有 2 个由 12 V 电池供电的风扇,用于在 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量测量期间混合室内的空气。采集气体样品时,将静态箱体嵌入底座预设的环形流道,流道注满水,保证其密封性。所有样本均在土壤温度接近日平均土壤温度的每周同一天上午 09:00~11:00 采集。采样前保留采样箱覆盖区域内的自然植被(包括地上活体植物和凋落物)。静态箱密闭后,以 10 min 间隔采用三通阀注射器(气密性聚丙烯材质)进行周期性气体采样,总采样时长 40 min。每次通过顶部预设取样口抽取 100 mL 气体样本,随即转移至 200 mL 铝塑复合气袋密封保存,并于 24 h 内转运至实验室。所有样品在采集后 72 h 内使用气相色谱仪(HP8 890 II, 美国)完成 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度测定。测量前使用标气对气相色谱仪曲线进行校正,利用电子捕获检测器(ECD)测定 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放通量。气体通量计算式为:

### 1.2 样地设置

以尕海湿地退化沼泽草甸为研究对象,采用空间序列代替时间序列方法,以尕海湖原生湿地为中心向外延伸,选择地势平缓的地段,根据植被优势种组成、覆盖度、生物量等特征,将研究区划分为未退化(ND)、轻度退化(LD)、中度退化(MD)和重度退化(HD)4 种退化梯度,每个退化梯度研究样地布设为 10 m×10 m,重复 3 次<sup>[15]</sup>。同一退化样地间至少保留 5 m 间隔,共 12 块样地,用来定期采集样地内 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 气体。样地处理划分详细情况见表 1。

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H \quad (1)$$

式中: $F$  为 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量, kg/(hm<sup>2</sup>·d);  $dc/dt$  为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率;  $M$  为 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的摩尔质量, kg/mol;  $P$  为采样点大气压, kPa;  $T$  为采样时静态采样箱内的平均温度, °C;  $V_0$  为标准状态下的气体摩尔体积, m<sup>3</sup>/mol;  $P_0$  为标准状态下的空气气压, kPa;  $T_0$  为标准状态下的绝对温度, K;  $H$  为地面以上采样箱的高度, m。

1.3.2 土壤样品采集 2013 年 5—9 月的每月中旬,在研究样地内采用“蛇”形 7 点法采集 0~10、10~20、20~40 cm 土层土样。对于同一退化梯度、相同土层的 3 个重复样本,将其置于同一自封袋内进行混匀,并去除其中的土壤颗粒物与植物根系。同时,使用环刀采集土壤,用于测定土壤体积质量和孔隙度。土样及时带回实验室。过 2 mm 筛后,采用四分法分为两部分:一部分鲜土在 4 °C 样品储存室保存,测定土壤水分体积分数、土壤 pH、硝态氮、铵态氮等鲜样指标;另一部分置于室内自然风干,用于测定土壤有机碳和碳、氮组分等干样指标。

1.3.3 植被特征测定 为减少对样地干扰,于 2013 年和 2014 年 9 月在各退化梯度样地内随机设置 2 块 0.5 m×0.5 m 的样方(每个退化程度设置 6 个样方),进行植被盖度、高度、生物量和优势种等调查<sup>[13]</sup>。采用剪刀进行地上部分原位收割并密封冷藏,同时使

用直径8 cm 不锈钢钻头取0~20 cm 土层深度的根系土样,带回实验室,用清水洗干净,将籽粒、茎叶和根系各植物组织分离后在75 °C下烘干至恒重,称重测定各部分生物量及碳、氮组分。土壤理化性质和植被生理特征等指标参数见表2。

表2 尕斯海湿地不同植被退化梯度DNDC模型土壤理化性质和植被生理特征参数

Table 2 Parameters of soil physicochemical properties and vegetation physiological characteristics in DNDC model of different vegetation degradation gradients in Gahai wetland

数据类型	基准值				数据来源
	ND	LD	MD	HD	
土壤体积质量/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.36	0.39	0.61	0.56	M
土壤pH	7.90	7.79	7.77	7.76	M
田间持水量(0~1)	0.96	0.49	0.32	0.21	M
萎蔫点(0~1)	0.26	0.26	0.26	0.26	D
土壤孔隙度(0~1)	0.29	0.24	0.28	0.23	M
土壤有机碳/(kg·kg <sup>-1</sup> )	0.053	0.042	0.036	0.033	M
铵态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	6.66	6.15	4.67	3.67	M
硝态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	4.59	5.30	6.41	8.23	M
最大生物量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	3 559	2 930	1 857	764	M
年需氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	179.25	158.93	128.27	96.5	D
籽粒生物量C/N	10.43	8.52	8.31	6.23	M
叶与茎生物量C/N	53.6	38.8	32.4	28.6	M
根生物量C/N	48	40	35	32	M
需水量/(g·w·g <sup>-1</sup> DM)	200	200	200	200	D
生长最适温度/°C	20	20	20	20	D

注:M、D分别为实际测量值和模型默认值。

#### 1.4 DNDC模型

DNDC模型是基于过程的生物地球化学模型,最初是以分解作用和反硝化作用为主要过程,应用于农业生态系统土壤碳、氮生物地球化学循环<sup>[5]</sup>,后逐步扩展至湿地、草地、森林等陆地生态系统。其在湿地研究中的应用尤为广泛,涵盖温室气体排放预测、碳氮循环模拟、水文变化响应评估等多个领域。DNDC由两大部分组成:第一部分包括土壤气候、植被生长和土壤有机质分解3个子模型,利用生态驱动因子(即气候、土壤、植被及人类活动)来模拟土壤环境条件(即土壤温度、水分、酸碱度、氧化还原电位及相关化学底物浓度梯度);第二部分包括硝化作用、反硝化作用及发酵作用3个子模型,模拟土壤环境条件对微生物活动的影响,计算植物-土壤系统中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氨(NH<sub>3</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、一氧化氮(NO)及氮气(N<sub>2</sub>)的排放<sup>[5]</sup>。通过6个子模型相互之间的作用,实现对试验地实际情况下植被-

土壤间化学反应的预测,对湿地生态系统可持续发展具有积极指导作用。

本文使用DNDC模型9.5版本,输入地理、气候数据、土壤理化性质和植被生理特征的相关参数。DNDC模型使用前需要将参数本地化,因此,根据试验区实地情况使用2013年实测数据将10余个参数进行校正,并严格使用独立的2014年数据验证模型性能。校正后参数见表2。

#### 1.5 气象情景设置

本文利用国际耦合模式比较计划第6阶段(coupled model intercomparison project, CMIP6)基于FGOALS-g3模型预测得到的未来情景试验数据,空间分辨率为250 km<sup>[16]</sup>。CMIP6模式提供多种气候情景来模拟未来气候变化。SSP1~2.6代表低排放路径,反映全球可持续发展和积极减排政策下的未来气候响应,SSP2~4.5是中等未来强迫路径SSP2和RCP4.5的组合,代表一种“中间道路”发展路径,也称为“可持续但不极端的情景”;SSP5~8.5是高未来强迫路径SSP5和RCP5.8的组合,反映一种经济优先的高排放路径,到2100年人为辐射强迫分别达2.6、4.5、8.5 W/m。SSP1~2.6的低排放情景过于乐观和理想化,而SSP2~4.5和SSP5~8.5涵盖中度和极端干湿交替的气候变化情景,捕获中度和重度气候变化影响<sup>[17]</sup>。因此,本研究选用SSP2~4.5和SSP5~8.5气候情景,来反映未来变化更广泛的可能性。选用1995—2024年时间段,试验地附近的碌曲县气象站点数据采集自中国气象数据网(<https://data.cma.cn>)包括日最高气温、日最低气温、日降水量、年总降雨量、年平均气温等。选用2025—2055年CMIP6多情景气候数据(SSP2~4.5/SSP5~8.5)数据集,采集自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)。未来气候原始数据为日值序列的NetCDF多维网格数据(0.25°×0.25°)。采用双线性插值方法在ArcGIS Pro中将各气象因子数据降尺度转换至1 km×1 km的栅格尺度,并进一步将其转换为DNDC模型要求的气象数据集。由图1可知,1995—2055年平均气温和年平均总降水的变化趋势。与温度和降水的复杂波动相比,未来CO<sub>2</sub>浓度的变化呈增加趋势。CO<sub>2</sub>浓度在2000年为724.3 mg/m<sup>3</sup>,预计在2055年将达到950.6、1 051.5 mg/m<sup>3</sup>。

#### 1.6 数据分析

本文将试验区实测值与模拟值进行对比分析,以验证DNDC模型的适用性。在模型模拟结果评价中,本研究采用决定系数(R<sup>2</sup>)和归一化均方根误差2个指标,以验证模型的适用性。计算公式为:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n}} \frac{1}{O_{\max} - O_{\min}} \quad (3)$$

式中: $P_i$ 为第*i*个模拟值; $O_i$ 为第*i*个实测值; $\bar{P}$ 为模拟值的平均值; $\bar{O}$ 为实测值的平均值; $n$ 为样本容量; $O_{\max}$ 为实测值的最大值; $O_{\min}$ 为实测值的最小值。通常情况下, $R^2 > 0.8$ 被认为拟合优度较高,NRMSE的数值越小,则表示模拟结果与实际情况越接近。

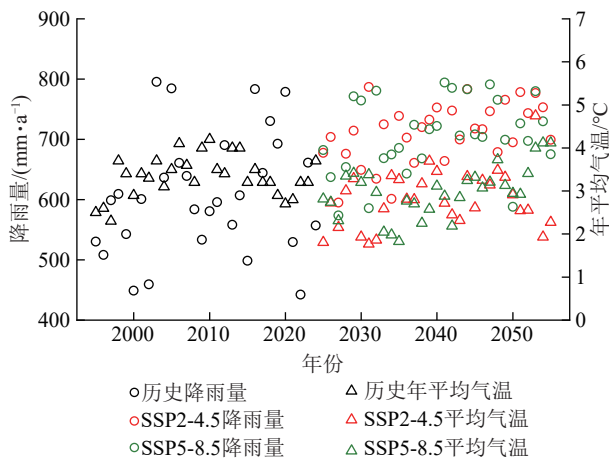


图 1 历史气象数据与未来气象数据变化趋势

Fig.1 Variation trends between historical and future meteorological data

以 2013 年的模拟结果作为基础情景,利用敏感性指数(SI)来评估某个气象数据对CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放的影响。DNDC是保持所有其他参数不变,通过在预定义的范围內改变单个参数而执行的。计算公式为:

$$SI = \frac{\frac{(O_{\max} - O_{\min})}{\bar{O}}}{\frac{(F_{\max} - F_{\min})}{\bar{F}}} \quad (4)$$

式中: $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别为输入参数的最大值和最小值; $\bar{F}$ 为 $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 的平均值; $O_{\max}$ 、 $O_{\min}$ 分别对应于 $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 模型输出值的最大值和最小值; $\bar{O}$ 为 $O_{\max}$ 、 $O_{\min}$ 的平均值。SI绝对值越大,表示参数变化对模型输出的影响越显著;当SI>0时,模拟结果与选定参数呈正相关,当SI<0时,表明存在负向关联,即参数增加导致模型输出减少;当SI=1时,模拟结果与输入参数的变化比例一致。

使用Excel 2021软件对数据进行计算整理,使用SPSS 26软件对CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>进行不同植被退化梯度和不同年份间的单因素(One-way ANOVA)方差分析,采用Origin 2021软件进行绘图,本研究数据为平均值±标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

2.1.1 不同植被退化梯度下湿地CH<sub>4</sub>通量实测值与模拟值 尕海湿地不同植被退化梯度下CH<sub>4</sub>排放通量的动态变化情况见图2。ND、LD、MD、HD的CH<sub>4</sub>排放通量实测值分别为0.007~0.727、0.001~0.276、-0.007~-0.040、-0.0017~-0.0497 kg/(hm<sup>2</sup>·d),模拟值分别为0~0.51、0~0.22、-0.002~-0.050、0~-0.001 kg/(hm<sup>2</sup>·d)。一般判断标准认为, $R^2$ 越接近1,NRMSE值越小,说明模型性能越好。其中0<NRMSE<0.1、0.1≤NRMSE<0.2、0.2≤NRMSE<0.5分别为模拟结果优秀、良好、一般。由表3可知,CH<sub>4</sub>实测值与模拟值年平均排放量相差不大,CH<sub>4</sub>模拟值与实测值各退化梯度下相关系数( $R^2$ )为0.67~0.93,NRMSE为0.10~0.34,说明DNDC模型能较好地模拟CH<sub>4</sub>通量的动态变化。

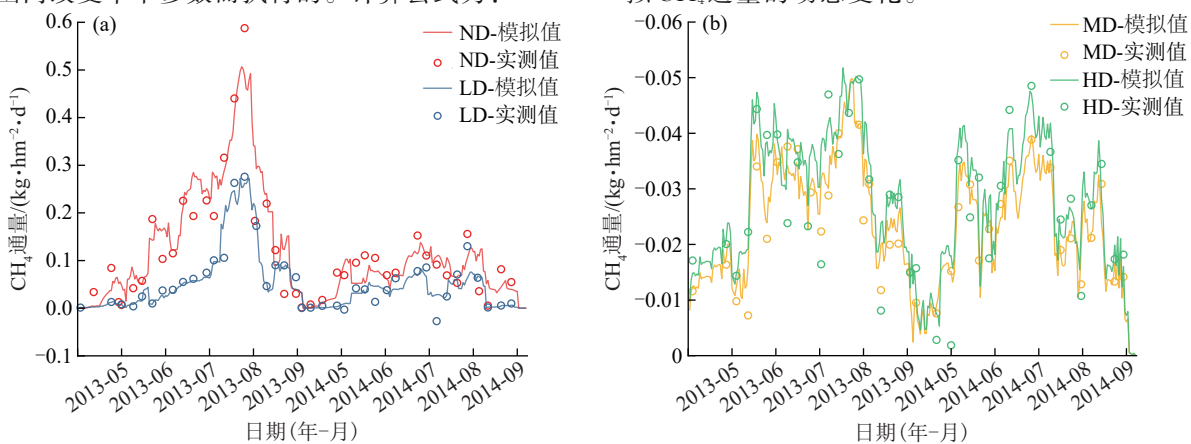


图 2 2013—2014 生长季不同植被退化梯度 CH<sub>4</sub>通量模拟值与实测值动态变化特征

Fig.2 Dynamic variation characteristics of simulated and measured CH<sub>4</sub> fluxes under different vegetation degradation gradients during growing seasons from 2013 to 2014

表 3 2013 年生长季沼海湿地 CH<sub>4</sub>和 CO<sub>2</sub> 通量模拟值与实测值模型验证

Table 3 Model validation of simulated and measured CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes in Gahai Wetland during growing season in 2013

类型	样地年平均 实测值/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	模型年平均 均模拟值/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup>	NRMSE	
CH <sub>4</sub>	ND	0.06	0.07	0.75	0.16
	LD	0.03	0.03	0.67	0.34
	MD	-0.02	-0.02	0.93	0.10
	HD	-0.03	-0.02	0.88	0.12
CO <sub>2</sub>	ND	188.36	132.70	0.74	0.19
	LD	126.96	138.76	0.70	0.21
	MD	118.36	145.66	0.71	0.21
	HD	96.57	94.97	0.87	0.11

2.1.2 不同植被退化梯度下湿地 CO<sub>2</sub> 通量实测值与模拟值比较 沼海湿地不同植被退化梯度下的 CO<sub>2</sub> 排放通量的动态变化情况见图 3。ND、LD、MD、HD 的 CO<sub>2</sub> 排放通量实测值分别为 25.59~193.77、49.88~306.63、44.10~342.80、20.60~193.77 kg/(hm<sup>2</sup>·d)，模拟值分别为 11.48~266.68、17.78~296.13、21.42~357.01、13.92~213.77 kg/(hm<sup>2</sup>·d)。由表 2 可知，CO<sub>2</sub> 的实测值与模拟值年平均排放量相差不大。CO<sub>2</sub> 模拟值与实测值各退化梯度下的相关系数(R<sup>2</sup>)为 0.70~0.87，NRMSE 为 0.11~0.21，说明 DNDC 模型能较好地模拟 CO<sub>2</sub> 通量的动态变化。

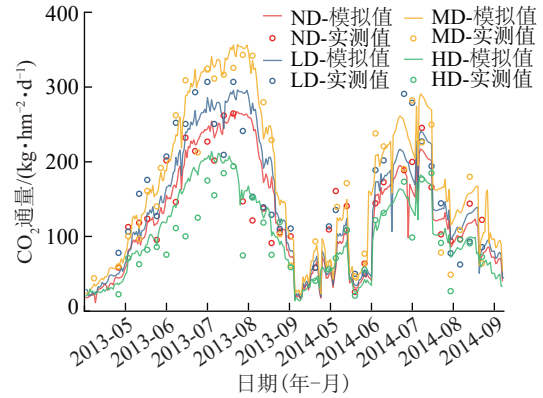
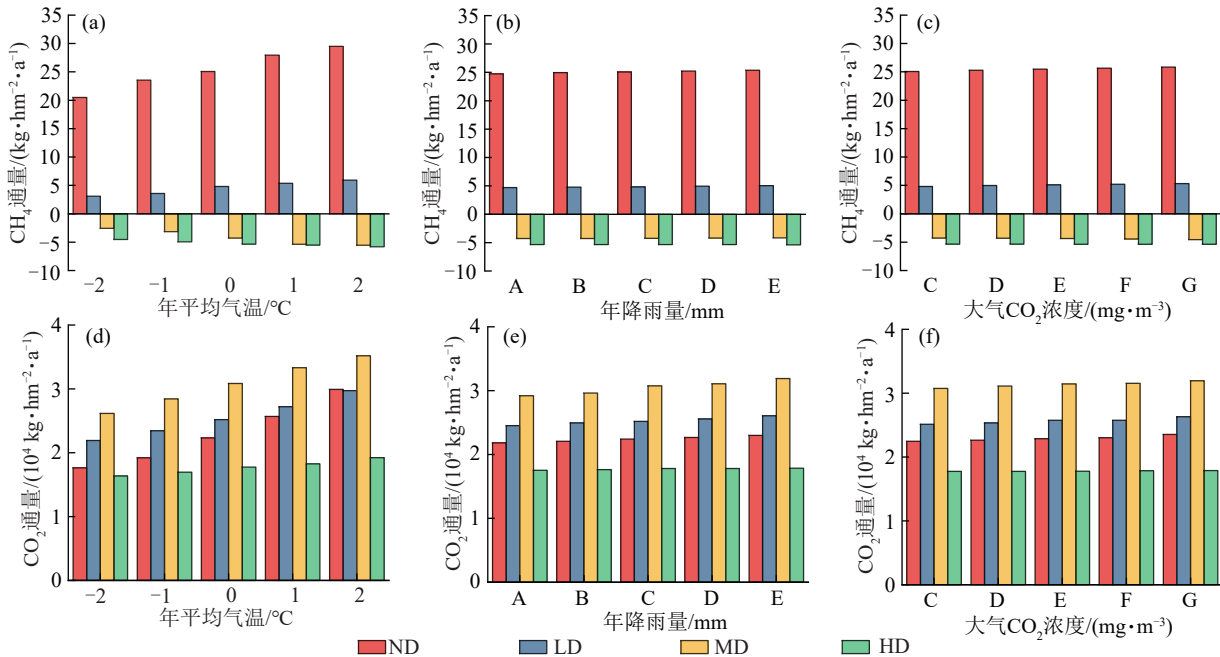


图 3 2013—2014 生长季不同植被退化梯度 CO<sub>2</sub> 通量模拟值与实测值动态变化特征

Fig.3 Dynamic variation characteristics of simulated and measured CO<sub>2</sub> fluxes under different vegetation degradation gradients during growing seasons from 2013 to 2014

2.2 敏感性分析

由图 4 可知，DNDC 模型气象因子敏感性。由于目前大气 CO<sub>2</sub> 浓度持续增加的趋势，排除低 CO<sub>2</sub> 浓度情景的设置。CH<sub>4</sub> 对温度、降水和大气 CO<sub>2</sub> 浓度的 SI 平均分别为 1.19、0.07、0.15；而 CO<sub>2</sub> 对温度、降水和 CO<sub>2</sub> 浓度的 SI 分别为 0.78、0.12、0.10，表明温度对 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放影响显著，而降水和大气 CO<sub>2</sub> 浓度影响不大。CH<sub>4</sub> 排放量和吸收量与温度呈正相关，较高的降雨量和 CO<sub>2</sub> 浓度也增加 CH<sub>4</sub> 排放，变化并不明显。温度每升高 1℃，ND 和 LD 处理下 CH<sub>4</sub> 排放量增加约 10%，MD 处理中 CH<sub>4</sub> 吸收量增加 15%，而 HD 处理下 CH<sub>4</sub> 吸收量仅增加 3%。CO<sub>2</sub> 排放率波动受到温度影响最大，温度每升高 1℃，CO<sub>2</sub> 排放量增加约 7%，其中 HD 处理下 CO<sub>2</sub> 排放量仅增加 4%。



注：C 为年降雨量、大气 CO<sub>2</sub> 浓度基础输入参数；A、B 表示基于 C 分别减少 20% 和 10%；D、E、F、G 表示基于 C 分别增加 10%、20%、30%、40%。

图 4 不同植被退化程度的 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放的敏感性

Fig.4 Sensitivity analysis of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions under different vegetation degradation levels

### 2.3 不同气候情景下CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放的模拟结果

由图5可知,SSP5~8.5情景下的CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>通量高于SSP2~4.5情景,除SSP5~8.5情景中MD、HD处理下的CO<sub>2</sub>排放量,其他处理CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>通量随时间

呈明显的线性增加。在不同情景不同时间段,ND与LD的CH<sub>4</sub>通量均差异显著( $p < 0.05$ ),但HD与MD的变化不显著。不同时间段4种退化梯度的CO<sub>2</sub>均呈先增后减趋势,其中,MD的CO<sub>2</sub>排放量最高,LD最少。

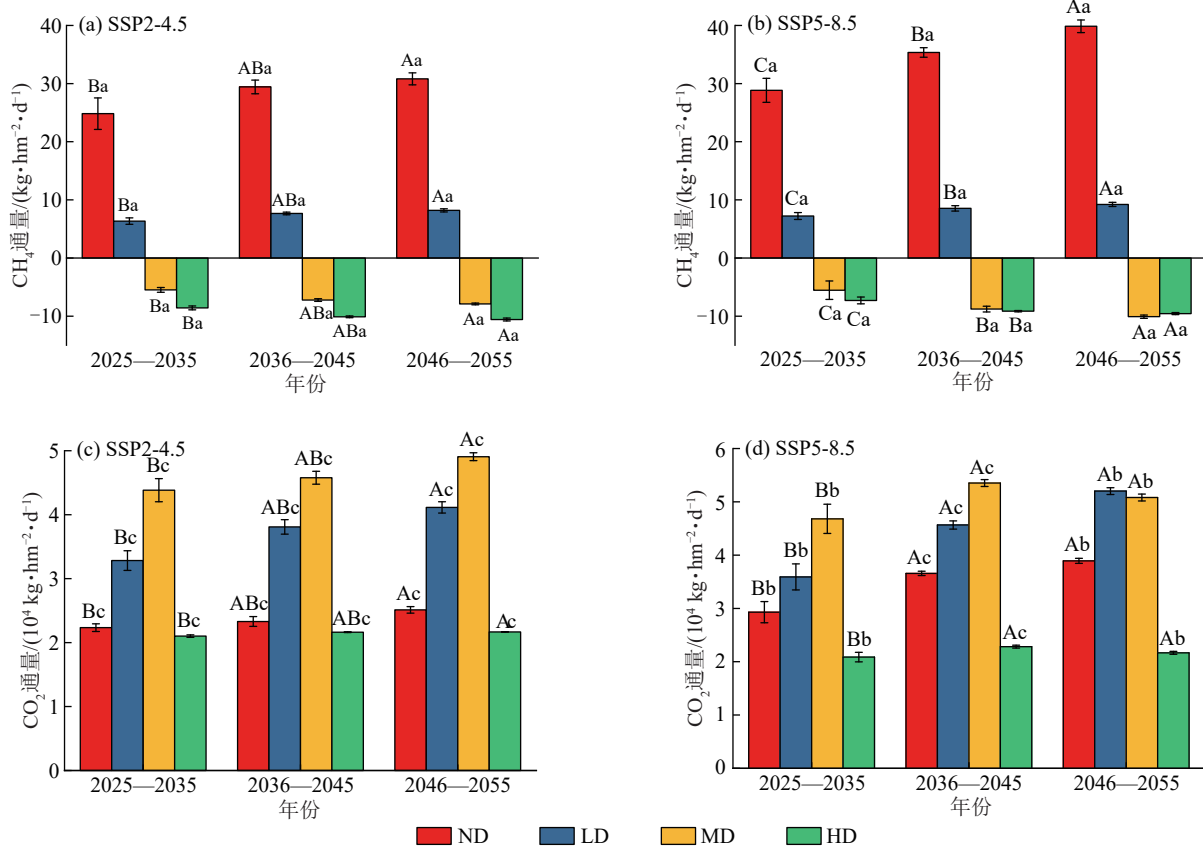


图5 DNDC模型预测SSP2~4.5和SSP5~8.5情景下2025—2055年4种退化程度下土壤CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>年平均排放量

Fig.5 Differences in annual average soil CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions under four degradation levels predicted by DNDC model under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios from 2025 to 2055

2种SSP情景下不同退化程度CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>排放量见图6。在SSP2~4.5和SSP5~8.5情景下,4种退化程度的CH<sub>4</sub>排放和吸收量均呈波动式增长趋势。其中,在SSP2~4.5情景下,年增长速率约分别为0.7%、1.4%、2.2%、0.4%;在SSP5~8.5情景下,年增长速率分别为1.3%、2.0%、2.4%、0.6%。在SSP2~4.5和SSP5~8.5情景下,4种退化程度的CO<sub>2</sub>排放量均呈波动式增长趋势,其中SSP2~4.5情景下年增长速率分别为0.3%、1.5%、1.1%、0.3%;在SSP5~8.5情景下,年增长速率分别为1.3%、1.9%、1.2%、0.2%。气候变化正向刺激CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的排放,而未退化湿地一定程度能缓冲未来极端气候所带来的影响。

## 3 讨论

### 3.1 DNDC模型的拟合效果

DNDC模型是生态系统过程模型,模型的运行需要输入大量的精准参数,过程复杂,模型的准确性很大程度上取决于模型参数输入的精确度<sup>[18]</sup>。本研究利用高寒沼泽草甸不同退化程度的土壤CH<sub>4</sub>和

CO<sub>2</sub>通量来验证DNDC模型的适用性, DNDC模型很好地模拟CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的排放动态。同时,随着退化程度的加剧,CH<sub>4</sub>排放量显著减少,并在中度退化下由排放源转化为汇(图2)。湿地退化导致CO<sub>2</sub>排放增加,而CH<sub>4</sub>排放减少,与LEE等<sup>[19]</sup>在加拿大伯恩斯沼泽湿地和LESTARI等<sup>[20]</sup>在印度尼西亚热带泥炭地的研究结果一致。一方面,湿地植被退化后,土壤水分和植被生物量减少,土壤透气性改善,导致根系呼吸和微生物活性增强,CH<sub>4</sub>氧化菌加快分解土壤有机质吸收大量CH<sub>4</sub>并释放CO<sub>2</sub><sup>[21]</sup>;另一方面,植被退化后期的湿地,因长期的营养流失,导致土壤中易分解的有机质储量已大量消耗,剩余多为难分解的腐殖质,微生物分解速率受底物限制<sup>[22]</sup>,从而降低CO<sub>2</sub>排放。同时,原生湿地CH<sub>4</sub>主要通过维管植物通气组织排放,退化导致植被覆盖率显著下降,致使气体排放路径延长,使得更多的CH<sub>4</sub>被氧化<sup>[23]</sup>。DNDC模型估算的年平均排放量和样地实测值结果较为吻合,R<sup>2</sup>和NRMSE拟合优度较高(表2),更进

一步说明, DNDC 模型在退化的高寒沼泽草甸  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  通量估算的适用性。但是由于环境变化条件较大, 影响湿地碳动态的因素非常复杂, 如人类活

动、植被演替等, 本研究不能尽数考虑, 使得 DNDC 模型对于单个时间节点的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  通量的模拟存在误差。

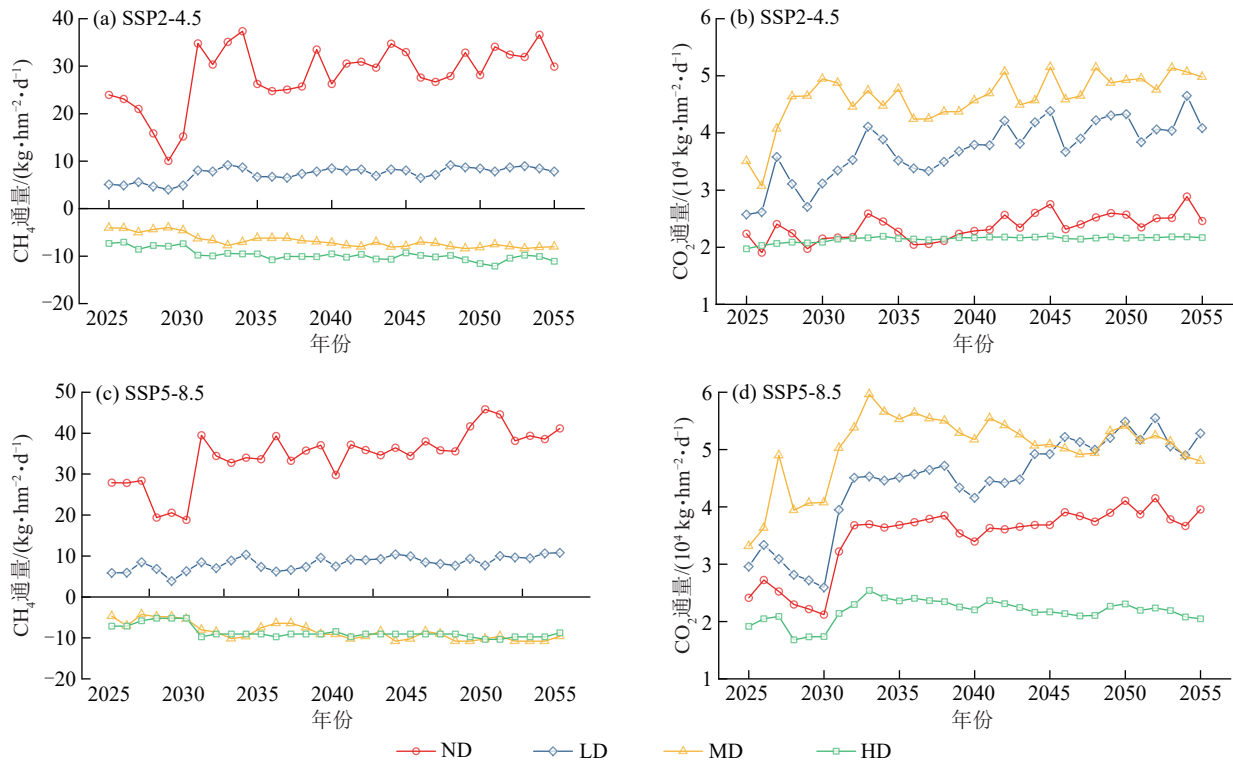


图 6 DNDC 模型预测 SSP2~4.5 和 SSP5~8.5 情景下 2025—2055 年 4 种退化程度下土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放的动态

Fig.6 Dynamic variations in soil  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  emissions under four degradation levels predicted by DNDC model under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios from 2025 to 2055

### 3.2 敏感性分析

敏感性分析表明, 温度是影响  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放最主要的气候因子, 以往研究<sup>[24]</sup>表明, 温度对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  通量变化呈显著正相关, 与本研究敏感性分析结果一致。适当增温 ( $<2\text{ }^\circ\text{C}$ ) 加快酶促反应速率, 从而增强土壤微生物的丰度和代谢活性, 直接调控有机质分解过程<sup>[25]</sup>。同时, 温度升高增强湿地维管植物的呼吸速率, 促进  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的运输和扩散<sup>[26]</sup>。相关研究<sup>[27]</sup>表明, 降水增加提高土壤湿度, 形成更多的厌氧环境, 有利于产甲烷菌的活动, 抑制  $\text{CH}_4$  氧化菌的活性。同时, 湿地植物在湿润条件下通气组织发达, 导致  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放量增加<sup>[28]</sup>, 与本研究结果一致。除温度和降水外, 未来气候情景中大气  $\text{CO}_2$  浓度也在不断增加, 影响土壤 C、N 循环。较高的  $\text{CO}_2$  浓度不仅提高土壤碳有效性, 还增加植被根系生物量, 为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的产生提供丰富的基质<sup>[29]</sup>。本研究发现, 与温度相比, 降水和大气  $\text{CO}_2$  浓度对碳排放的年际变化波动较缓慢, 可能是因为当降水的输入使土壤孔隙水饱和度超过临界值时, 模型才触发厌氧代谢模块的激活, 显著增加  $\text{CH}_4$  排放量。本研究设置的降水波动在年际尺度上并未持续突破其阈值, 对碳排放

的驱动效应被“缓冲”。大气  $\text{CO}_2$  浓度增加, 一方面, 新增生物量需经 1~3 a 的根系周转才能转化为土壤易分解碳库<sup>[30]</sup>; 另一方面, 模型中碳的分解速率受氮素有效性限制, 而高寒沼泽草甸普遍缺氮,  $\text{CO}_2$  浓度升高可能加剧氮竞争, 最终抑制碳分解速率, 抵消部分碳输入的正效应<sup>[31]</sup>。敏感性分析结果表明, 重度退化湿地的碳排放对温度、降水和大气  $\text{CO}_2$  浓度的响应均不明显, 说明重度退化湿地的碳释放更多受遗留的有机质存量缓慢分解驱动, 而不是气候因子的短期波动。

### 3.3 气候变化对不同退化程度的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 排放的影响

DNDC 模型模拟 2 种气候路径 SSP2~4.5 和 SSP5~8.5 情景下  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  排放结果表明, SSP2~4.5 和 SSP5~8.5 情景对退化湿地的短期影响相似, 但中长期影响存在差异。可能是因为 2 种情景下气候变化速率和幅度在短期内没有显著差异变化, SSP5~8.5 情景的极端气候随时间推移出现更高的温度和更大的降水变幅<sup>[32]</sup>。此差异表明, 更极端的气候策略在未来增强高寒湿地碳排放功能方面发挥关键作用。

不同退化程度的湿地对气候变化的响应存在显著差异。未退化湿地在2种情景下均表现出较高的CH<sub>4</sub>排放潜力和较低的CO<sub>2</sub>排放潜力,是因为较高的土壤水分和植被覆盖度有助于维持稳定的碳汇功能,而土壤温度和湿度为产甲烷菌提供适宜的厌氧环境,促进CH<sub>4</sub>的产生,同时抑制CH<sub>4</sub>氧化菌的活性<sup>[27]</sup>。与未退化湿地相比,轻度和中度退化湿地在SSP2~4.5情景下短期内CO<sub>2</sub>排放量有所增加,但中长期趋于稳定,而在SSP5~8.5情景下持续激增,轻度退化湿地在2052年CO<sub>2</sub>排放量达到峰值,中度退化于2032年达到峰值后微生物分解速率受底物限制而逐渐降低。表明温和的气候变化促进植被的恢复和土壤有机碳的积累,而极端气候条件可能加速有机质的分解<sup>[33]</sup>。2种气候情景中,轻度退化下的CH<sub>4</sub>排放量和中度退化下的CH<sub>4</sub>吸收量均呈上升趋势,且在SSP5~8.5情景中增幅更大。其原因可能是极端高温和干湿交替加快底物释放速率和氧化速率<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,2种气候情景下碳排放动态无明显波动,可能是重度退化湿地中碳库枯竭和微生物功能丧失,导致生态系统恢复力阈值突破,丧失应对外界气候波动的调节能力。因此,在全球气候变化背景下,优先保护和恢复未退化湿地,以维持自然水文节律,对于中度和重度退化湿地应采用重新湿地化和植被恢复措施。

## 4 结论

DNDC模型较好地模拟沼泽草甸CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的排放动态变化,模型验证结果表明,DNDC模型适用于退化高寒湿地的温室气体通量估算,模拟值与实测值较为接近。DNDC敏感性分析得出,温度是控制CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>通量变化的最主要气象因子,降水和大气CO<sub>2</sub>浓度对碳排放起正反馈作用。SSP2~4.5和SSP5~8.5情景下,未退化和轻度退化土壤CH<sub>4</sub>排放量增加,中度和重度退化土壤CH<sub>4</sub>吸收量有所增加,其中未退化土壤CH<sub>4</sub>排放量最高。4种退化程度的土壤CO<sub>2</sub>排放量均有所增加,中度退化土壤CO<sub>2</sub>排放量最高,且SSP5~8.5情景下的排放量和吸收量均高于SSP2~4.5情景。模型预测表明,未退化湿地能有效减缓未来极端气候变化带来的影响。重度退化湿地的碳释放更多,受遗留的有机质存量缓慢分解和人为干扰驱动,而非外界气候变化的影响。本研究目前基于点位测量预测,对于未来气候变化对青藏高原区域湿地退化碳通量的影响有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] WANG C, JIN Y G, JI C, et al. An additive effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and rising temperature on methane emissions related to methanogenic community in rice paddies [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 257: 165-174.
- [2] 牟翠翠, 张国飞, 效存德, 等. IPCC第六次评估报告解读: 多年冻土变化及其影响 [J]. *冰川冻土*, 2023, 45(2): 306-317.  
MU C C, ZHANG G F, XIAO C D, et al. Interpretation of the IPCC sixth assessment report: Permafrost changes and their impacts [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 306-317.
- [3] 马洪运, 周磊, 张雪琦, 等. 人工湿地温室气体排放研究进展与减污降碳优化 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2043-2052.  
MA H Y, ZHOU L, ZHANG X Q, et al. Research progress of greenhouse gas emissions and optimization of pollution removal and carbon reduction in constructed wetland [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2043-2052.
- [4] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 等. 排水对若尔盖高寒沼泽CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放通量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 3040-3047.  
ZHOU W C, CUI L J, WANG Y F, et al. Effects of drainage on the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission fluxes in the Zoigé plateau marsh [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 3040-3047.
- [5] GILHESPY S L, ANTHONY S, CARDENAS L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution [J]. *Ecological Modelling*, 2014, 292: 51-62.
- [6] YUAN X M, LIU Q, CUI B S, et al. Effect of water-level fluctuations on methane and carbon dioxide dynamics in a shallow lake of northern China: Implications for wetland restoration [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: e126169.
- [7] JIA Q, YU W Y, WEN R, et al. Monitoring and simulation of CO<sub>2</sub> exchange of coastal wetland ecosystem in the Liaohe Delta wetland, China [J]. 2020, 495(1): e012038.
- [8] KANG X M, LI Y, WANG J Z, et al. Precipitation and temperature regulate the carbon allocation process in alpine wetlands: Quantitative simulation [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(9): 3300-3315.
- [9] MIKHALCHUK A, BORILO L, BURNASHOVA E, et al. Assessment of greenhouse gas emissions into the atmosphere from the northern peatlands using the wetland-DNDC simulation model: A case study of the great Vasyugan mire, western Siberia [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(12): e2053.

- [10] NIU Q C, JIN G F, YIN S X, et al. Transcriptional changes underlying the degradation of plant community in alpine meadow under seasonal warming impact[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2025, 48(1): 526-536.
- [11] 历正豪, 王慧, 杨访问, 等. 青海高原生长归一化差值植被指数对气候暖湿化响应的年代际变化[J]. *大气科学*, 2024, 48(5): 2045-2058.
- LI Z H, WANG H, YANG F W, et al. Interdecadal variation of normalized differential vegetation index response to climate warming and humidification in the Qinghai Plateau during the growing season [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(5): 2045-2058.
- [12] 杨文丹, 赵秋梅, 翟泰雅, 等. 水热互作对多年冻土区高寒沼泽草甸土壤温室气体排放的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(11): 3423-3435.
- YANG W D, ZHAO Q M, ZHAI T Y, et al. Effects of hydrothermal changes on soil greenhouse gas emissions from alpine swamp meadow in the permafrost region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(11): 3423-3435.
- [13] MA W W, ALHASSAN A M, WANG Y S, et al. Greenhouse gas emissions as influenced by wetland vegetation degradation along a moisture gradient on the eastern Qinghai-Tibet Plateau of north-west China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112(3): 335-354.
- [14] 徐国荣, 马维伟, 宋良翠, 等. 植被不同退化状态下尕斯湖湿地土壤氮含量及酶活性特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 8917-8927.
- XU G R, MA W W, SONG L C, et al. Characteristics of soil nitrogen content and enzyme activity in Gahai wetland under different vegetation degradation conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 8917-8927.
- [15] 陈好, 马维伟, 龙永春, 等. 尕斯湖湿地草甸土退化过程土壤氮矿化演变特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(10): 3906-3919.
- CHEN H, MA W W, LONG Y C, et al. Evolution characteristics of soil nitrogen mineralization during meadow soil degradation of Gahai wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(10): 3906-3919.
- [16] 周嘉月, 卢麾, 阳坤, 等. 基于CMIP6的中高温升情景对中国未来径流的预估[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(3): 505-524.
- ZHOU J, LU H, YANG K, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(3): 505-524.
- [17] 李慧慧, 栾承梅, 夏栩, 等. 基于CMIP6气候模式的中国大陆未来极端降水情景预估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 16-29.
- LI H H, LUAN C M, XIA X, et al. Prediction of future extreme precipitation scenarios in china based on CMIP6 climate model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(8): 16-29.
- [18] 钱海燕, 于婷婷, 周杨明, 等. 基于DNDC模型的稻田生态系统碳动态模拟研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(6): 59-70.
- QIAN H Y, YU T T, ZHOU Y M, et al. Progress on carbon dynamics simulation of paddy ecosystem based on DNDC model [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(6): 59-70.
- [19] LEE S C, CHRISTEN A, BLACK A T, et al. Annual greenhouse gas budget for a bog ecosystem undergoing restoration by rewetting [J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(11): 2799-2814.
- [20] LESTARI I, MURDIYARSO D, TAUFIK M. Rewetting tropical peatlands reduced net greenhouse gas emissions in Riau Province, Indonesia [J]. *Forests*, 2022, 13(4): e505.
- [21] 王婷, 张永超, 赵之重. 青藏高原退化高寒湿地植被群落结构和土壤养分变化特征[J]. *草业学报*, 2020, 29(4): 9-18.
- WANG T, ZHANG Y C, ZHAO Z Z. Characteristics of the vegetation community and soil nutrient status in a degraded alpine wetland of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 9-18.
- [22] 林春英, 李希来, 张玉欣, 等. 黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3971-3984.
- LIN C Y, LI X L, ZHANG Y X, et al. Responses of different degradation stages of alpine wetland on soil microbial community in the Yellow River source zone [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3971-3984.
- [23] 顾航, 肖凡书, 贺志理, 等. 湿地微生物介导的甲烷排放机制[J]. *微生物学报*, 2018, 58(4): 618-632.
- GU H, XIAO F S, HE Z L, et al. Microbial driven methane emission mechanisms in wetland ecosystems [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2018, 58(4): 618-632.
- [24] 王莉莉, 李艳红, 吴浠. 艾比湖湿地土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量及其影响因素研究[J]. *江西农业*, 2019(24): 126-129.
- WANG L L, LI Y H, WU X. Study on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission fluxes from Ebinur Lake wetland soil and their influencing factors [J]. *Jiangxi Agriculture*, 2019(24): 126-129.
- [25] 卢孟雅, 丁雪丽. 基于Meta分析的增温对土壤微生物残体积影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1444-1454.
- LU M Y, DING X L. A meta-analysis of soil microbial necromass accumulation in response to climate warming [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5): 1444-1454.
- [26] LU B Q, SONG L Q, ZANG S Y, et al. Warming promotes soil CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions but decreasing moisture inhibits CH<sub>4</sub> emissions in the permafrost peatland of the Great Xing'an Mountains [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: e154725.
- [27] 张前前, 胡启武, 冯哲, 等. 鄱阳湖沉水植物区不同深度土壤甲烷排放对温度水分变化的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7659-7667.

- ZHANG Q Q, HU Q W, FENG Z, et al. Response of methane emissions to temperature and moisture changes at different soil depths in the submerged plant zones of Poyang Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7659-7667.
- [28] 王秋颖,王娜,刘颖,等.松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构[J]. *环境科学*, 2021, 42(10):4968-4976.
- WANG Q Y, WANG N, LIU Y, et al. Microbial community structure of soil methanogens and methanotrophs during degradation and restoration of reed wetlands in the Songnen Plain[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(10):4968-4976.
- [29] ABDELDAYM E A, HASSAN H A, EL-MOGY M M, et al. Elevated concentrations of soil carbon dioxide with partial root-zone drying enhance drought tolerance and agro-physiological characteristics by regulating the expression of genes related to aquaporin and stress response in cucumber plants [J]. *Bmc Plant Biology*, 2024, 24(1):e917.
- [30] 李清鑫,张珊,张复茂,等.基于文献计量学的植物地下碳输入对土壤有机碳贡献的研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55(6):1777-1788.
- LI Q X, ZHANG S, ZHANG F M, et al. Research progress on the contribution of plant belowground carbon input to soil organic carbon based on bibliometrics [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(6):1777-1788.
- [31] XU X L, OUYANG H, CAO G M, et al. Nitrogen deposition and carbon sequestration in alpine meadows [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 71(3):353-369.
- [32] PATHAK R, DASARI H P, ASHOK K, et al. Dynamics of intensification of extreme precipitation events over the Arabian Peninsula derived from CMIP6 simulations [J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, 8:e126.
- [33] ONTL T A, JANOWIAK M K, SWANSTON C W, et al. Forest management for carbon sequestration and climate adaptation[J]. *Journal of Forestry*, 2020, 118(1): 86-101.
- [34] FANG P, WANG T H, YANG D W, et al. Substantial increases in compound climate extremes and associated socio-economic exposure across China under future climate change[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, 8:e17.
- (上接第 186 页)
- [21] TÜRKYILMAZ B, AKTAŞL Y, GÜVEN A. Salinity induced differences in growth and nutrient accumulation in five barley cultivars[J]. *Turkish Journal of Field Crops*, 2011, 16(1):84-92.
- [22] 张智猛,戴良香,胡昌浩,等.灌浆期不同水分处理对玉米籽粒蛋白质及其组分和相关酶活性的影响[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(4):720-728.
- ZHANG Z M, DAI L X, HU C H, et al. Effect of water on protein, protein composition and related enzyme activity in different types of maize [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(4):720-728.
- [23] 高英,同延安,赵营,等.盐胁迫对玉米发芽和苗期生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(2):30-34.
- GAO Y, TONG Y A, ZHAO Y, et al. Effect of salt stress on seed germination and seedlings growth of corn [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(2):30-34.
- [24] ARIENZO M, CHRISTEN E W, JAYAWARDANE N S, et al. The relative effects of sodium and potassium on soil hydraulic conductivity and implications for winery wastewater management [J]. *Geoderma*, 2012, 173: 303-310.
- [25] NIU X, BRESSAN R A, HASEGAWA P M, et al. Ion homeostasis in NaCl stress environments [J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(3):735-742.
- [26] 王旭,刘敬坤,罗水星,等.海南岛滨海沙生植物叶片功能性状分异及其与土壤因子的关系[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(5):708-717.
- WANG X, LIU J K, LUO S X, et al. Difference of leaf functional traits of coastal psammophytes in Hainan Island and its relationship with soil chemical properties [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2022, 30(5):708-717.
- [27] 张通港,胡行路,罗敏,等.微咸水离子组成对膜下滴灌土壤水盐分布和作物生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(8):16-25.
- ZHANG T G, HU X L, LUO M, et al. The impact of ion composition in saline water on soil salinity, salt distribution, and crop growth under mulched drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(8):16-25.