

DOI: 10.11766/trxb202601270063

CSTR: 32215.14.trxb202601270063

余旭辰, 彭思利, 刘德燕, 韩广轩, 丁维新, 袁俊吉. 多重气候变化因子对滨海湿地 CH₄ 排放的影响与机制[J]. 土壤学报, 2026, YU Xuchen, PENG Sili, LIU Deyan, HAN Guangxuan, DING Weixin, YUAN Junji. Impacts and Underlying Mechanisms of Multiple Climate Change Factors on CH₄ Emissions from Coastal Wetlands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

多重气候变化因子对滨海湿地 CH₄ 排放的影响与机制 *

余旭辰¹, 彭思利¹, 刘德燕¹, 韩广轩², 丁维新³, 袁俊吉^{3†}

(1. 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学生态与环境学院, 南京 210037; 2. 中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 山东东营 257500; 3. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘要: 滨海湿地是缓解气候变化的重要“蓝色碳汇”, 同时也是海洋甲烷(CH₄)排放的重要来源, 然而滨海湿地 CH₄ 排放对多重气候变化因子的响应缺乏系统性评估。整合 1995—2025 年间发表的 41 篇中英文文献, 获得 241 组观测数据, 综合分析大气 CO₂ 浓度升高(eCO₂)、增温和海平面上升(SLR)对滨海湿地 CH₄ 排放的影响。结果表明, eCO₂ 使 CH₄ 排放量增加 33.26%, 但对以 C₄ 植物为主的湿地无显著影响, 长期 eCO₂ 会减弱其对 CH₄ 排放的刺激效应。增温使 CH₄ 排放量增加 58.15%, 增温幅度越大, 促进作用越强, 主动增温作用较被动增温作用更明显, 氮添加则显著削弱了增温对 CH₄ 排放的促进作用。SLR 对 CH₄ 排放的刺激效应最为强烈, 增幅达 112.85%, 且与盐度显著负相关。此外, 增温与 SLR 的交互作用显著增强了 CH₄ 排放, 其促进作用明显高于单一增温处理。综上, eCO₂、增温与 SLR 三种气候变化因子均可显著增加滨海湿地 CH₄ 排放, 但其效应受多个生物与非生物因子调控。研究可为评估和预测未来气候变化情景下滨海湿地 CH₄ 排放的演变提供科学依据。

关键词: 甲烷; 滨海湿地; 大气 CO₂ 浓度升高; 增温; 海平面上升; Meta 分析

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

Impacts and Underlying Mechanisms of Multiple Climate Change Factors on CH₄ Emissions from Coastal Wetlands

YU Xuchen¹, PENG Sili¹, LIU Deyan¹, HAN Guangxuan², DING Weixin³, YUAN Junji^{3†}

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Yellow River Delta Field Observation and Research Station of Coastal Marsh Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Dongying, Shandong 257500, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】 Coastal wetlands are crucial "blue carbon" sinks for mitigating climate change, while they also

* 国家自然科学基金项目(42322709, U24A20628)、江苏省自然科学基金项目(BK20230050)和江苏省碳达峰碳中和科技创新专项项目(BT2024012)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42322709, U24A20628), the Natural Sciences Foundation of Jiangsu Province (No. BK20230050), and the Jiangsu Provincial Innovation Research Program on Carbon Peaking and Carbon Neutrality (No. BT2024012)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jjyuan@issas.ac.cn

作者简介: 余旭辰(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事湿地生态学研究。E-mail: yuxuchen1412@163.com

收稿日期: 2026-01-27; 收到修改稿日期: 2026-05-06; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026- -

represent significant sources of marine methane (CH₄) emissions. However, the impacts of multiple climate change factors on CH₄ emissions from coastal wetlands has not been systematically evaluated. 【Method】This study integrated 241 observational datasets from 41 peer-reviewed papers published between 1995 and 2025, and comprehensively analyzed the effects of elevated atmospheric CO₂ concentration (eCO₂), warming and sea level rise (SLR) on CH₄ emissions from coastal wetlands. 【Result】Our results indicated that eCO₂ increased CH₄ emissions by an average of 33.26%, but had no significant effect on wetlands dominated by C₄ plants. Prolonged eCO₂ exposure was found to attenuate its stimulatory effect on CH₄ emissions. Warming increased CH₄ emissions by 58.15% on average. The promoting effect was stronger with greater warming magnitudes, and active warming had a more pronounced effect than passive warming. Nitrogen addition significantly weakened the stimulatory effect of warming on CH₄ emissions. SLR exerted the most pronounced stimulatory effect on CH₄ emissions, with an increase of 112.85%, which was significantly negatively correlated with salinity. Additionally, the interactive effect of warming and SLR significantly enhanced CH₄ emissions, with a response magnitude markedly higher than that under warming alone. 【Conclusion】Overall, eCO₂, warming, and SLR as individual drivers significantly enhanced CH₄ emissions from coastal wetlands, but the magnitude of their effects was regulated by both biotic and abiotic factors, and interactions among climate drivers were highly complex. This study provides a basis for predicting future CH₄ dynamics under climate change.

Key words: Methane; Coastal wetlands; Elevated CO₂; Warming; Sea level rise; Meta-analysis

工业革命以来, 人类活动导致二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 等温室气体大量排放, 大气 CO₂ 浓度从 1750 年的 278 μmol·mol⁻¹ 增至 427 μmol·mol⁻¹, 大气 CH₄ 浓度也从 1750 年的 0.715 μmol·mol⁻¹ 增到 1.803 μmol·mol⁻¹ [1-2], 由此引发全球高度关注的气候变暖和海平面上升 (SLR) 等问题。目前, 全球近地表平均温度较 1850—1900 年平均温度高出 1.55 °C, 海平面也以每年 4.77 mm 的速度抬升, 预计到 2100 年最高上升幅度可达 0.52~0.98 m [3]。

滨海湿地位于海陆过渡地带, 具有较高的初级生产力和有机碳埋藏效率, 因而被视为缓解气候变化的关键“蓝色碳汇” [4]。然而, 大量有机物质的输入也为 CH₄ 的产生提供了丰富底物, 使得滨海湿地具有较高的 CH₄ 产生和排放速率 [5]。据 Al-Haj 和 Fulweiler [6] 估算, 全球滨海湿地每年排放 5.28~6.24 Tg CH₄, 约占海洋 CH₄ 总排放量的 50%~90%。CH₄ 是仅次于 CO₂ 的重要温室气体, 其全球增温潜势是同等质量 CO₂ 的 28 倍~34 倍 [1, 7], 因此, 即便较低的 CH₄ 排放也能够很大程度削减滨海湿地的碳汇功能。例如, Rosentreter 等 [8] 基于整合分析发现, 在 20 年尺度, CH₄ 排放可抵消滨海湿地约 16.4% 的固碳收益。由此可见, 在全球变化背景下, 滨海湿地 CH₄ 排放量的变化将显著影响其减缓气候变暖的功能。

作为影响生态系统碳循环的关键气候变化因子, 大气 CO₂ 浓度升高 (eCO₂) 可通过促进植物光合作用提升生态系统净初级生产力; 同时, eCO₂ 引发的“施肥效应”也会改变土壤生物与非生物环境, 引发 CH₄ 等温室气体排放的变化, 形成对气候变化的反馈作用 [9]。在湿地生态系统中, CH₄ 的净排放量主要由产甲烷菌和甲烷氧化菌的相对活性决定 [10]。尽管增温可同时增强两类微生物的活性, 但是与甲烷氧化菌相比, 产甲烷菌对温度升高更加敏感, 因此升温往往更有利于 CH₄ 排放 [11]。SLR 是短期内影响湿地生态系统功能最为显著的全球变化因子 [12-13]。SLR 可通过抬升水位和增加淹水频率促进 CH₄ 排放 [14], 但其影响是多过程、多要素综合作用的结果。淹水频率的增加会改变滨海湿地中 CH₄ 产生的两大限制因子——氧气和硫酸盐 (SO₄²⁻) 的相对含量, 进而导致不同类型滨海湿地 CH₄ 排放对 SLR 呈现出截然不同的响应模式。以往试验研究深化了对气候变化影响滨海湿地 CH₄ 通量的认识, 但现有研究多集中于单一气候因子, 且结果尚不一致; 同时, 对 eCO₂、增温和 SLR 等多因子交互效应的认识仍较有限, 缺乏全球尺度的系统整合分析。

为综合评估多重气候因子 (eCO₂、增温和 SLR) 及其交互作用对滨海湿地 CH₄ 排放的影响, 本研究收集 1995—2025 年间发表的 41 篇中英文文献, 构建多重气候变化因子对滨海湿地 CH₄ 排放影响的全球数据集, 同步收集植物和土壤相关参数。通过系统性整合分析, 旨在阐明 eCO₂、增温和 SLR

对滨海湿地 CH₄ 排放的影响效应、识别气候变化驱动 CH₄ 排放演变的关键因素，并解析 CH₄ 排放对不同气候变化因子的响应机制，以揭示多重气候因子交互作用对滨海湿地 CH₄ 排放的影响机理。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究以“‘coastal wetland’ OR ‘saltmarsh’ OR ‘mangrove’ OR ‘seagrass’ OR ‘mudflat’” AND “‘methane’ OR ‘CH₄’” AND “‘warm’ OR ‘climate warming’ OR ‘elevated carbon dioxide’ OR ‘eCO₂’ OR ‘water table level rising’ OR ‘sea level rise’” 以及“‘滨海湿地’或‘盐沼’或‘红树林’或‘海草’或‘光滩’”和“‘甲烷’或‘CH₄’”和“‘变暖’或‘增温’或‘二氧化碳浓度升高’或‘CO₂ 升高’或‘eCO₂’或‘地下水位上升’或‘海平面上升’”为关键词，分别在 Web of Science 和中国知网 (CNKI) 数据库中进行文献检索和收集，时间设置为 1995—2025 年。

文献筛选遵循 6 项标准：(1) 仅纳入大气 CO₂ 浓度升高、增温或海平面上升或同时控制两个及以上气候因子对滨海湿地 CH₄ 排放影响的研究；(2) 数据源自野外或中宇宙控制试验，排除模型模拟或遥感反演数据；(3) 文献包含对照组与处理组的 CH₄ 通量数据，且重复数 ≥ 3；(4) 可直接获取或通过 GetData Graph Digitizer 2.22 (<https://getdata-graph-digitizer.com>) 等方式提取均值、标准差及样本量；(5) 同一研究不同年份的观测视为独立数据；(6) 排除通过地理位移模拟气候变化的研究。最终获得 41 篇文献的 241 组成对观测值 (其中 eCO₂ 处理 47 组、增温 75 组、SLR 处理 97 组、eCO₂ × 增温 10 组、增温 × SLR 处理 6 组、eCO₂ × SLR 处理 6 组)。数据来源于中国东部、欧洲西部、北美洲东部以及大洋洲东南部沿海地区的实验，涵盖全球大部分区域 (图 1)。提取的参数涵盖地理坐标、湿地类型、试验设施类型等。

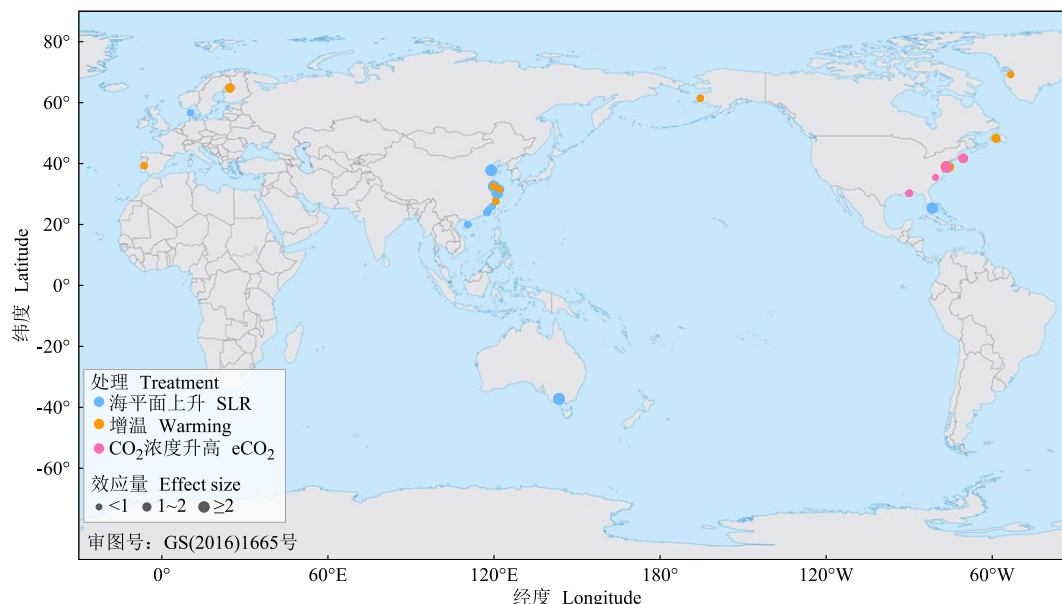


图 1 多重气候变化因子对滨海湿地 CH₄ 排放的影响研究的全球分布

Fig. 1 Global distribution of studies on the effects of multiple climate change factors on CH₄ emissions in coastal wetlands

eCO₂ 设施类型主要有开顶室 (OTC) 和温室/生长室 (GC)，尚缺乏开放式 CO₂ 浓度增高 (FACE) 等原位控制装置；增温采用主动 (一般为生长室温度控制系统) 或被动加热 (开顶室被动升温)；SLR 则依赖野外试验系统 (ISE) 以及实验室控制系统 (GC) 通过添加低盐水 (<15‰) 或高盐水 (>15‰) 进行水位控制。

为解析多重气候变化因子影响滨海湿地 CH₄ 排放的机制, 同步收集植物参数和土壤性质指标。植物参数包括地上生物量(AGB)、地下生物量(BGB)、株密度和株高。土壤性质指标包括全碳(TC)、可溶性有机碳(DOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、全氮(TN)、酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)、含水量(SM)、硫酸盐含量(SO₄²⁻)和盐度。记录数据均值、标准差及样本量, 对于无法从单一文献中直接获取的数据, 通过检索同一试验地点、相同试验设施发表的文献数据进行补充。在数据提取时, 确保属于同一年份或相同试验阶段, 以保证数据的一致性。所有 CH₄ 通量统一转换为 g·m⁻²·a⁻¹, CO₂ 浓度单位标准化为 μmol·mol⁻¹。

1.2 数据处理

采用自然对数响应比(lnRR)量化不同气候变化因子对 CH₄ 排放、植物及土壤参数的影响以及多因子交互作用对 CH₄ 排放的影响^[15], 计算公式如下:

$$\ln RR = \ln(X_t/X_c) \quad (1)$$

式中, X_t 和 X_c 为处理组和对照组的平均值。

响应比 RR 的抽样变异(v)估计如下^[15]:

$$v = \frac{S_t^2}{X_t^2 N_t} + \frac{S_c^2}{X_c^2 N_c} \quad (2)$$

式中, S_t^2 和 S_c^2 为处理组和对照组的标准差; N_t 和 N_c 为处理组和对照组的样本量。当湿地生态系统在气候变化条件下出现源汇功能转换, 导致传统公式失效时, 则采用修正算法^[16]。

如果研究仅给出标准误、95%置信区间(CIs)以及以月或生长季为时间单位的通量的标准误或标准差, 使用相应的转换公式计算出标准差^[15]; 如果标准差、标准误以及 95%置信区间均未给出, 则使用 X_t 和 X_c 的 1/10 为标准差^[17]。

使用 R 软件包“metafor”中基于限制最大似然(REML)法的“rma.mv”函数, 获得加权响应比(lnRR₊₊)和 95%置信区间。为进行比较和分析, 通过以下公式将 lnRR₊₊的结果转换为百分比变化(%):

$$\text{百分比变化(\%)} = (e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100 \quad (3)$$

采用分层元分析模型(hierarchical meta-analysis)估计研究间方差与组内案例间方差, 消除传统 meta 分析中因共用对照组产生的数据嵌套问题^[18]。使用“glmulti”软件包进行模型选择, 并依据校正后的 Akaike 信息准则值对候选模型排序^[19]; 对分类变量建立单因素混合效应模型, 通过 Q_m 检验解析响应比异质性(Q_t); 采用线性回归分析 CH₄ 排放响应比与植物、土壤参数的关系; 最后, 对研究结果进行发表偏倚检验(表 1)。Egger 检验结果显示, eCO₂ 和 SLR 对 CH₄ 排放影响效应的 P 值均大于 0.05 (分别为 0.41 和 0.53), 且失安全系数(Fail-safe number)分别为 2 644 和 502 784, 远超 5 k +10 的临界值(k 为数据量), 表明该结果基本不受发表偏倚影响^[20-21]。此外, 尽管增温下 Egger 检验结果显著($P=0.03$), 但失安全系数分析显示需引入 21 590 项负效应研究才能使当前结果的统计学显著性消失($P>0.05$), 该数值远超保守临界值^[21], 证明增温对 CH₄ 排放的影响结论虽不能完全排除发表偏倚或小样本研究效应对原始响应比估计值的影响, 但“增温具有显著效应”的核心结论依然成立。因此, 本研究的主要发现是稳健的, 不受潜在发表偏倚的实质性影响。

表 1 Egger 检验及失安全系数结果

Table 1 Results of Egger's test and Fail-safe number

气候变化因子 Climate change factors	Egger 检验 Egger's test		失安全系数 Fail-safe number
	Z 值 Z-value	P 值 P-value	
大气 CO ₂ 浓度升高 eCO ₂	0.816 4	>0.05	2 644
增温 Warming	2.065 9	=0.03	21 590
海平面上升 SLR	0.626 9	>0.05	502 784

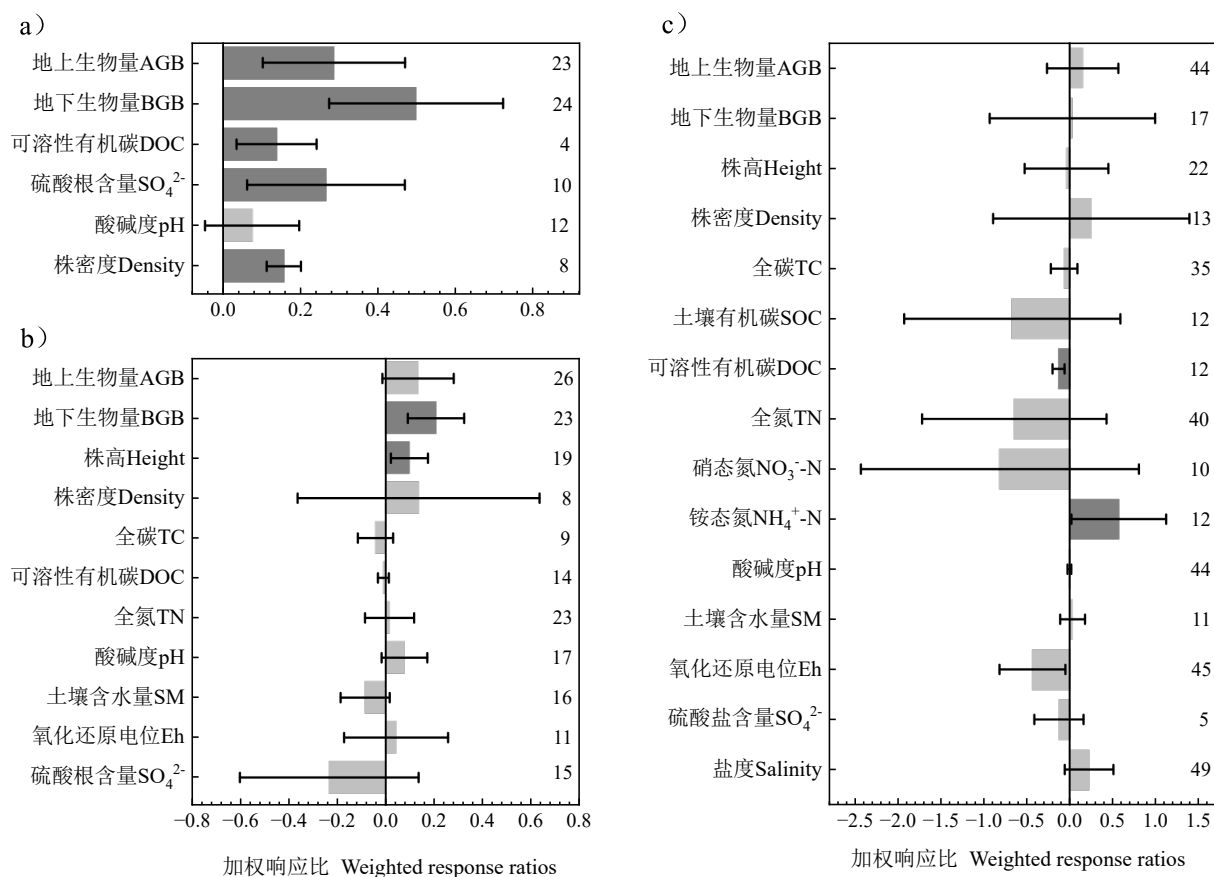
2 结果

2.1 不同气候变化因子对滨海湿地植被和土壤性质的影响

根据建立的数据集发现, $e\text{CO}_2$ 使滨海湿地植被 AGB、BGB 以及植株密度分别增加 33.16%、64.59% 和 17.03% ($P<0.05$), 孔隙水 DOC 和 SO_4^{2-} 含量分别上升 14.88% 和 30.47% ($P<0.05$; 图 2a)。 $e\text{CO}_2$ 对不同光合途径植物(C_3 和 C_4)的影响存在显著差异, 显著提升了以 C_3 植物为主滨海湿地中的 AGB、BGB 和 DOC 浓度, 提升幅度分别为 42.26%、82.50% 和 23.78% ($P<0.05$), 而以 C_4 植物为主的滨海湿地中, 这些指标均无显著变化 ($P>0.05$; 图 3a)。此外, 氮添加显著提升了 AGB 和 BGB 对 $e\text{CO}_2$ 的响应幅度, 增加幅度分别为 65.19% 和 89.17% ($P<0.05$; 图 3a)。

增温使植物 BGB 和株高显著增加 23.24% 和 10.45% ($P<0.05$; 图 2b)。尽管增温对 AGB 的促进作用未达到统计显著水平, 但不同光合途径植物的生物量具有显著差异。 C_3 植物 AGB 与 BGB 均对增温表现出显著的正响应, 增幅分别为 28.85% 和 38.97% ($P<0.05$); 而 C_4 植物生物量的响应不显著 ($P>0.05$; 图 3b)。氮添加状况会一定程度影响植物生长特征对增温的响应。与施氮处理相比, 增温对不施氮处理植物的 BGB 及株高影响更显著, 增幅分别为 22.97% 和 10.9% ($P<0.05$; 图 3b)。此外, 在 $>3\text{ }^\circ\text{C}$ 的增温幅度下, SO_4^{2-} 含量显著下降 (-28.97% , $P<0.05$)。

SLR 显著提高了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 ($+76.21\%$, $P<0.05$), 但降低了 DOC 含量 (-12.51% , $P<0.05$) 和氧化还原电位 (-35.4% , $P<0.05$; 图 2c)。不同水位升高幅度下, 株高及植物密度的变化均有着显著的组间差异 (图 3c)。水位升高 $>40\text{ cm}$ 时 DOC 浓度的降幅最大 (-21.71% , $P<0.05$; 图 3c)。



注: 条形图和误差棒分别表示加权响应比大小和 95% 置信区间(CIs)。如果 95% 置信区间(CIs)不与 $x=0$ 轴线相交, 说明气候变化对该因子有显著影响($P<0.05$; 表示为深灰色)。图右侧数字为样本量。Note: Bars and error bars represent the mean effect size and

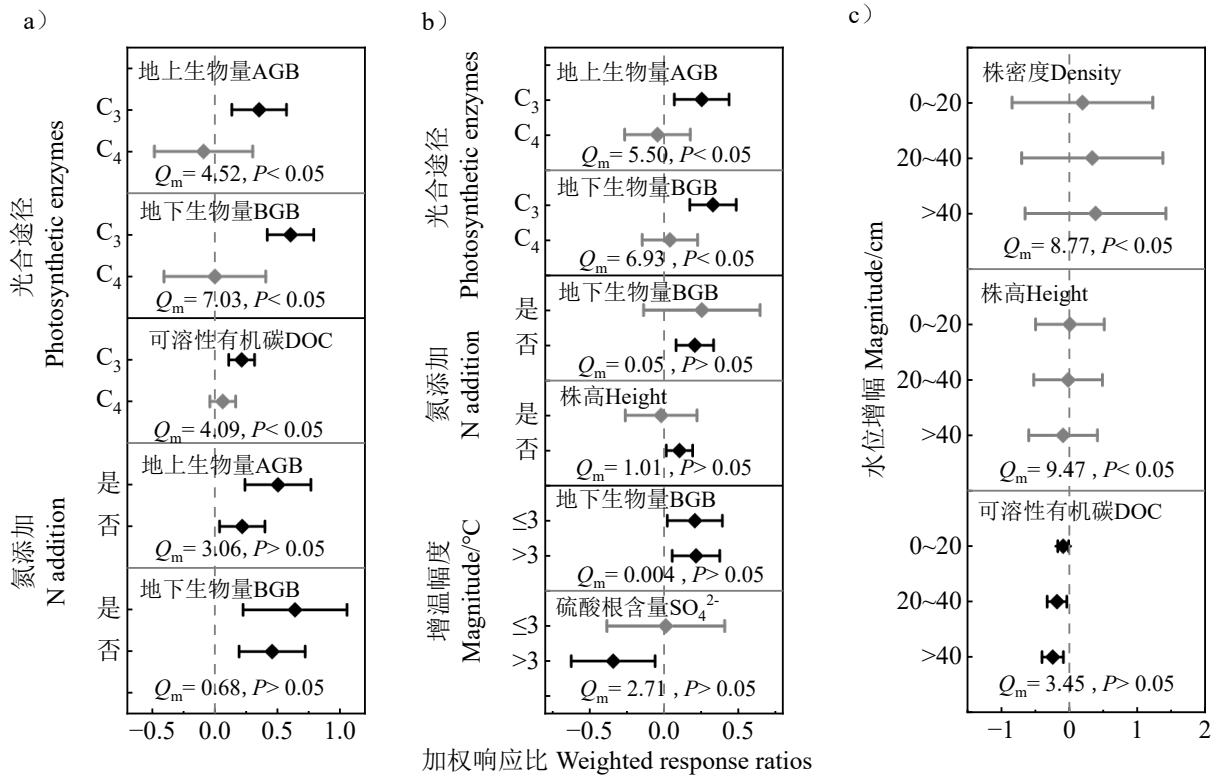
95% confidence intervals (CIs), respectively. If the 95% CIs do not overlap with zero, a significant effect of climate changes ($P < 0.05$; represented as dark gray) is considered. The numbers on the right side of the figure represent the sample size.

图2 滨海湿地植物和土壤性质对大气 CO_2 浓度升高 (a)、增温 (b) 和海平面上升 (c) 的加权响应比

Fig. 2 Weighted response ratios of plant and soil characteristics in coastal wetlands to eCO_2 (a), warming (b), and SLR (c)

2.2 不同气候变化因子对滨海湿地 CH_4 排放的影响

eCO_2 使得滨海湿地 CH_4 排放量增加 33.26% ($Q_t = 971.13$, 95% CIs: 9.86%~61.64%, $P < 0.05$; 图4)。尽管基于 Akaike 权重的模型选择分析中, 没有单一因素对 CH_4 排放量产生的影响达到 0.8 这一临界值 (图 5a), 但 Q_m 综合分析发现, eCO_2 试验时间、光合途径与氮添加与否均存在一定影响 (图 6a)。具体而言, 在 eCO_2 短期试验 (≤ 5 年) 下, eCO_2 的促进效应显著 (41.56%, $P < 0.05$), 而在长期试验 (> 5 年) 下促进效应则衰减至不显著水平 (3.40%, $P > 0.05$)。 eCO_2 促使以 C_3 植物为主的滨海湿地 CH_4 排放量增加 39.63% ($P < 0.05$), 却以 C_4 植物为主的湿地无显著影响 ($P > 0.05$)。 eCO_2 的促进效应在未添加氮的试验中更明显, 可使 CH_4 排放量显著提升 (48.54%, $P < 0.05$)。



注: 点和误差棒分别表示加权响应比大小和 95%置信区间(CIs)。如果 95%置信区间不与 $x=0$ 轴线相交, 说明有显著影响($P < 0.05$; 表示为黑色)。当 Q_m 的 P 值达显著水平 ($P < 0.05$) 时, 表明该分类可显著解释响应比的变异。下同。Note: Circles and error bars represent the mean effect size and 95% confidence intervals (CIs), respectively. If the 95% CIs do not overlap with zero, a significant effect of climate changes ($P < 0.05$, represented as black) is considered. The same below.

图3 不同变量分类下滨海湿地植物和土壤性质对大气 CO_2 浓度升高 (a)、增温 (b) 和海平面上升 (c) 的响应

Fig. 3 Responses of plants and soil properties in coastal wetlands to eCO_2 (a), warming (b), and SLR (c) under different variable classifications

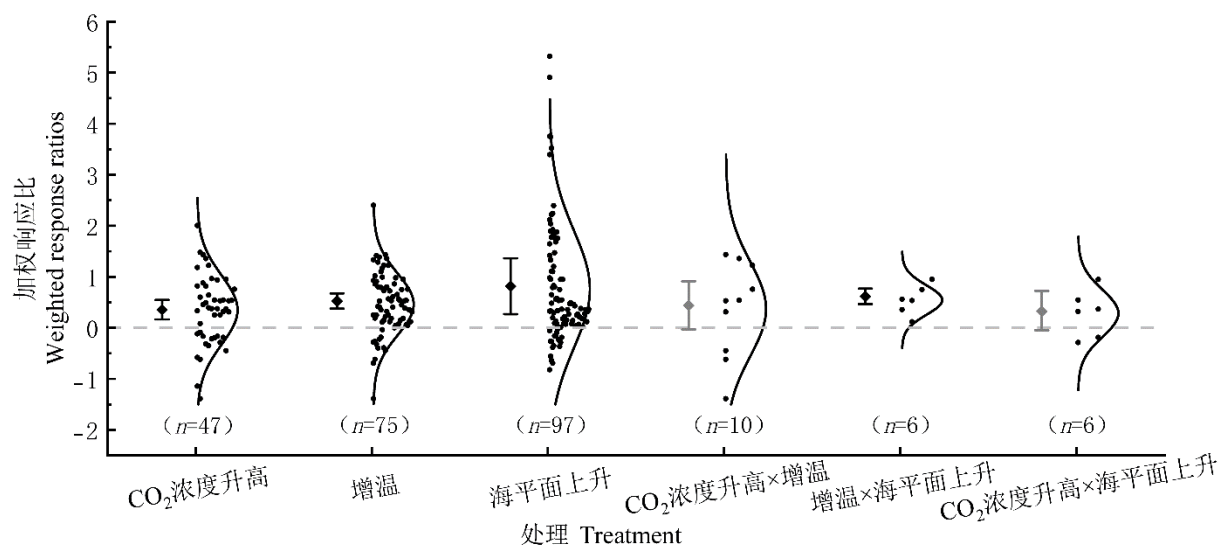
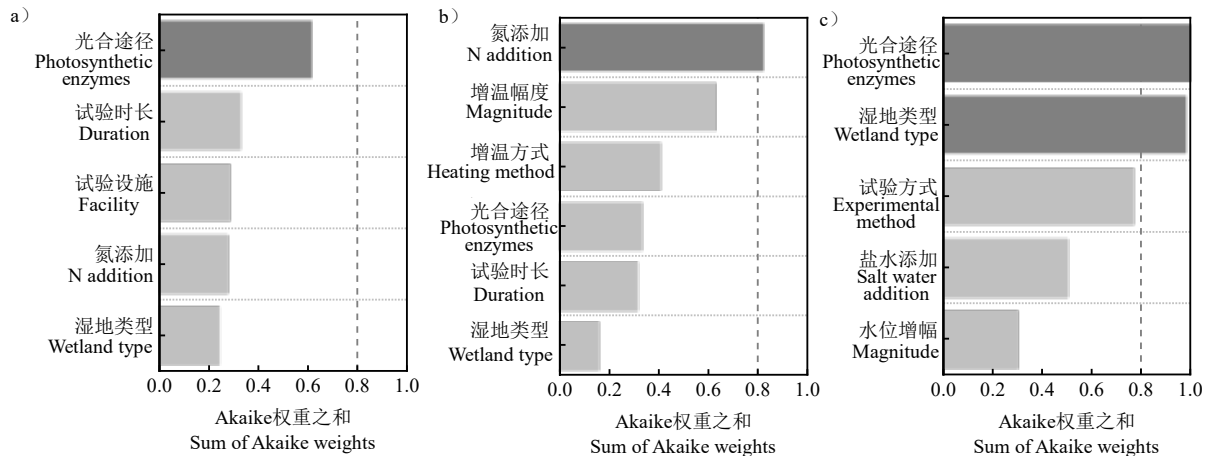


图4 滨海湿地 CH₄ 排放对大气 CO₂ 浓度升高 (a)、增温 (b)、海平面上升 (c) 及其交互作用的响应

Fig. 4 Responses of CH₄ emissions of coastal wetlands to eCO₂ (a), warming (b), SLR (c) and their interactions

与不增温相比, 增温使滨海湿地 CH₄ 排放量显著提升了 58.15% ($Q_t=2\ 428.82$, 95%CI: 35.87%~84.08%, $P<0.05$; 图 4)。基于 Akaike 权重模型的变量重要性分析进一步揭示, 氮添加是调控 CH₄ 排放对增温响应的核心因子 (图 5b)。增温幅度、增温方式及氮添加处理均存在显著的组间差异 (图 6b)。具体而言, 所有增温幅度均显著促进了 CH₄ 排放, 且 CH₄ 排放响应比与增温幅度呈显著正相关 (图 7a)。氮添加改变了增温效应, 使增温对 CH₄ 排放的促进效应由显著 (64.79%, $P<0.05$) 变为不显著 (2.27%, $P>0.05$)。在增温方式上, 无论是主动增温还是被动增温均对 CH₄ 排放量产生显著正效应, 而主动增温的促进作用更强烈, 增幅达 87.61% (图 6b)。长期增温导致的 CH₄ 排放增幅 (67.58%, $P<0.05$) 高于短期处理 (51.03%, $P<0.05$) (图 6b)。此外, 回归分析表明增温条件下 CH₄ 排放响应比与 SO₄²⁻ 和含水量显著负相关 (图 7)。

SLR 导致滨海湿地 CH₄ 排放量增长 112.85% ($Q_t=26\ 876.49$, 95%CI: 22.34%~270.32%, $P<0.05$; 图 4)。基于 Akaike 权重的模型分析显示, 光合途径及湿地类型为核心调控因子 (图 5c)。就光合途径而言, 以 C₄ 植物为主的湿地 (117.08%, $P<0.05$) 对 SLR 的响应大于 C₃ 植物湿地 (65.63%, $P<0.05$; 图 6c)。在不同湿地类型中, 盐沼的响应比最大 (126.76%, $P<0.05$; 图 6c)。值得注意的是, 即使水位增幅不同 (0~20 cm、20~40 cm 以及 >40 cm), SLR 均对 CH₄ 排放均产生显著的正效应 ($P<0.05$; 图 6c)。此外, 盐度也是一个重要影响因素, 与高盐度相比, 低盐度下 CH₄ 排放对水位升高的响应更为明显 (106.76%, $P<0.05$; 图 6c), 这一发现与回归分析结果相互印证, 即 CH₄ 排放的响应比与盐度呈显著负相关 (图 7d)。此外, CH₄ 排放响应比与植物密度呈显著正相关, 与 DOC、土壤盐度、添加水盐度及 SO₄²⁻ 含量呈显著负相关 (图 7)。



注：当变量累积 Akaike 权重大于 0.8 时，判定为关键影响因子（表现为深灰色）。Note: When the sum of Akaike weights is over 0.8, it means this predictor is the most important (represented as dark gray).

图 5 大气 CO₂ 浓度升高(a)、增温(b)和海平面上升(c)下生态预测因子的模型平均重要性

Fig. 5 Model-averaged importances of ecological predictors under eCO₂ (a), warming (b), and SLR (c)

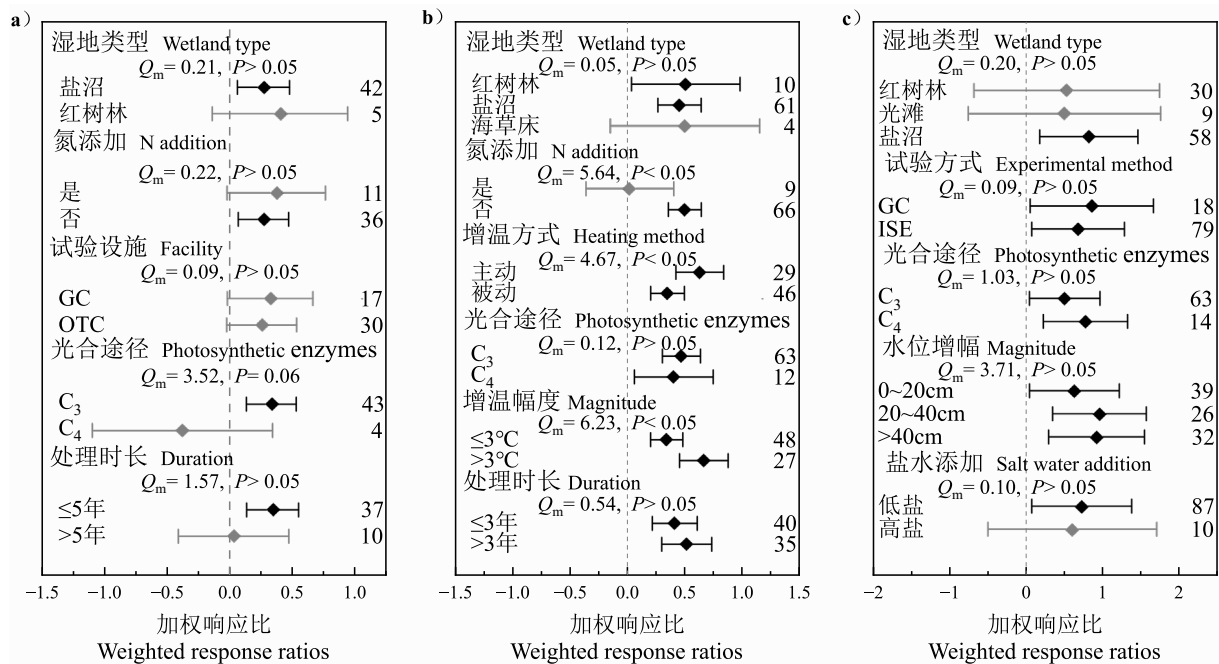


图 6 不同变量分类下 CH₄ 排放对大气 CO₂ 浓度升高(a)、增温(b)和海平面上升(c)的加权响应比

Fig. 6 Weighted response ratios of CH₄ emissions to eCO₂ (a), warming (b), and SLR (c) under different variable classifications

2.3 多重气候变化因子交互作用对滨海湿地 CH₄ 排放的影响

增温与 SLR 交互作用下，滨海湿地 CH₄ 排放的响应显著高于单一增温处理 ($P<0.05$; 图 4)。eCO₂×增温下 CH₄ 排放的响应比强于任一单因子处理，尽管其效应在统计学上未达显著水平 ($P>0.05$; 图 4)。然而，eCO₂ 与 SLR 交互作用对 CH₄ 排放的促进作用弱于单一因子的影响 ($P>0.05$; 图 4)。

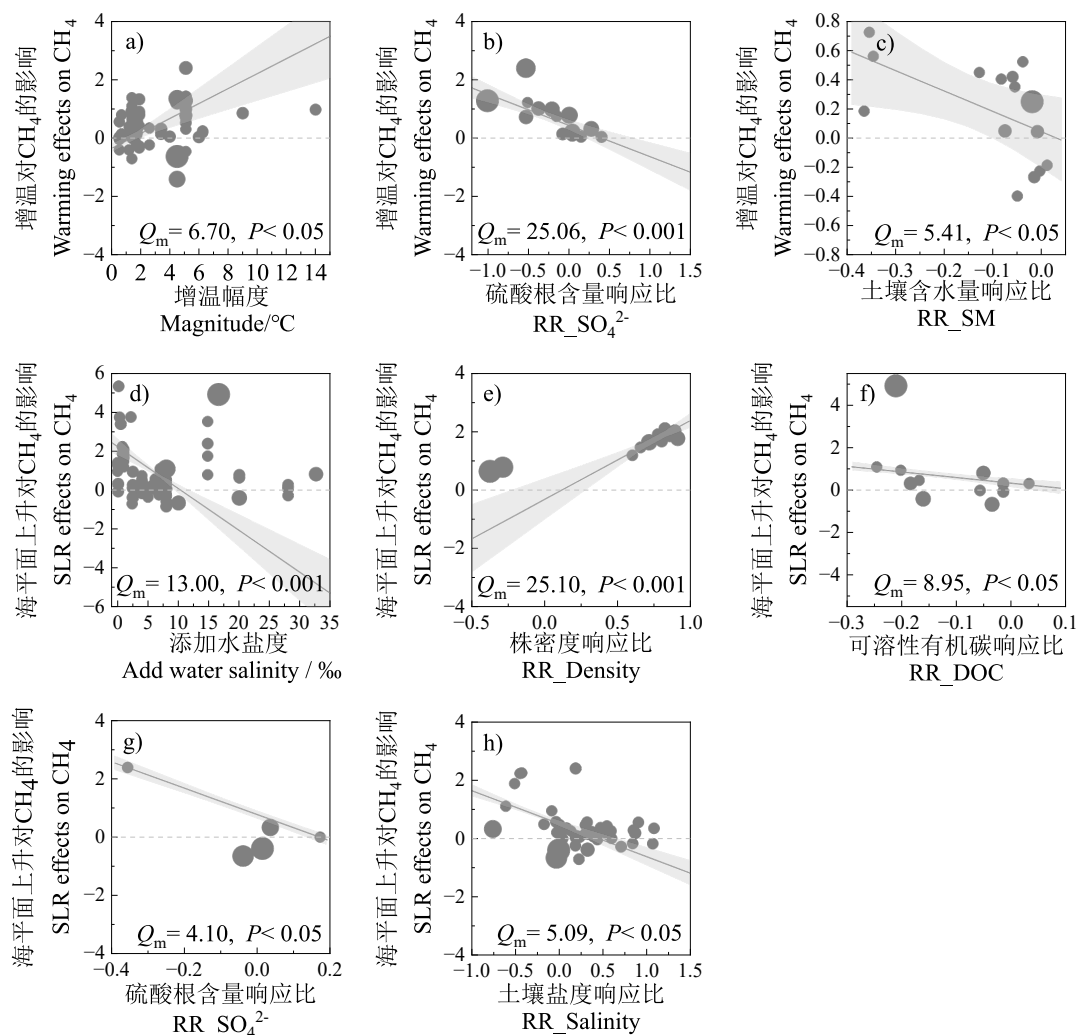


图7 增温(a-c)和海平面上升(d-h)条件下CH₄排放响应比与各生态因子间的回归分析

Fig. 7 Regression analysis between methane emission response ratio and various ecological factors under warming (a-c) and SLR (d-h) conditions

3 讨论

3.1 eCO₂对滨海湿地CH₄排放的影响机制

eCO₂显著促进了滨海湿地CH₄排放(图4)。一般而言,在eCO₂条件下,植物光合效率显著提升,尤其是C₃植物Rubisco酶对CO₂浓度升高响应敏感,增加了生物量(图3a)^[22]。生物量的增长促进了凋落物与根系分泌物等易分解有机碳的输入,为产甲烷菌提供丰富的底物^[23],从而促进了CH₄的产生与排放。然而,这种促进效应难以长期维持。一方面,长期暴露于eCO₂环境可能引发植物的光合适应现象,导致光合能力下调^[24],削弱碳输入的刺激效应。同时,土壤微生物(包括产甲烷菌和甲烷氧化菌)也逐渐适应新的环境,对额外碳输入的响应减弱^[25]。此外,eCO₂刺激植物生长的同时,也通过增加根系氧气运输和释放,增强了根际的CH₄氧化过程;eCO₂还会促进SO₄²⁻的再生增加SO₄²⁻浓度(图2a)^[26],驱动SO₄²⁻还原减少CH₄的排放^[27]。因此,在长期(>5年)eCO₂环境,由碳输入增加所导致的正效应,被植物生理下调、微生物适应、CH₄氧化增强以及SO₄²⁻还原竞争等多重抑制机制所抵消,导致滨海湿地CH₄排放对eCO₂的响应变得不再显著。

此外, $e\text{CO}_2$ 的促进效应在氮添加的试验中并不显著 (图 6a), 这可能是因为 $e\text{CO}_2$ 与氮添加共同促进植物生长, 氮添加后植物摄取 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的能量成本降低, 部分湿地植物相对更倾向于吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ [28], 使湿地中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低可从两方面促进 CH_4 氧化: 一是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对甲烷单加氧酶结合位点的竞争减弱, 缓解对 CH_4 氧化的抑制 [29]; 二是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化过程中的中间产物与终产物 (尤其是亚硝酸根离子) 减少, 从而减轻对甲烷氧化菌活性的抑制 [30]。其次, 氮添加导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的积累, 会直接抑制产甲烷菌活性 [31]。此外, 尽管 $e\text{CO}_2$ 和氮添加促进生物量增长 (图 3a), 但养分可利用性提高会导致植物根系趋向浅层分布, 因此, 在 CH_4 主要产生的深层土壤中, 可用于 CH_4 生成的根系分泌物等底物可能未显著增加 [32]。

3.2 增温对滨海湿地 CH_4 排放的影响机制

增温条件下, 滨海湿地 CH_4 排放量显著增加 (图 4), 其响应比与增温幅度呈显著正相关 (图 7a), 这与已有研究在 0~30 °C 范围内 CH_4 通量随温度线性上升的结论一致 [11]。在达到植物生长最适温度前, 温度升高可促进植物光合作用, 刺激 BGB 增长和根系分泌物输入 [24]。值得注意的是, 尽管一般认为 C_4 植物适应温度能力更强 [33], 但本研究显示其生物量对变暖的响应较弱 (图 6b), 这可能是由于相较于 C_3 植物, C_4 植物根系更浅且多分布于地势较高、较干燥的沼泽区域, 升温导致的水分胁迫抑制了它的响应 [34]。此外, 温度升高可直接促进土壤有机质矿化, 增强产甲烷菌活性, 刺激 CH_4 生成 [35]。同时, 增温也会加速 SO_4^{2-} 还原, 降低 SO_4^{2-} 浓度 [26], 进而削弱硫酸盐还原菌对 CH_4 氧化的竞争抑制作用 [27], SO_4^{2-} 与滨海湿地 CH_4 排放响应比的回归分析也能证明这一点 (图 7b)。然而, 滨海湿地 CH_4 排放响应比与 SM 呈显著负相关 (图 7c), 表明虽然随温度升高 SM 下降有利于 CH_4 氧化, 但增温对底物供应和产甲烷菌活性的提升作用更强, 所以 CH_4 净排放量仍随温度上升而增加, 最终表现为排放响应比随 SM 降低而升高。

氮添加能够显著降低增温对 CH_4 通量的刺激效应 (图 6b)。与上述氮添加对 $e\text{CO}_2$ 促进效应的抑制作用相似, 氮添加和增温都可通过促进植物生长, 改变施氮后土壤中氮的含量, 间接影响 CH_4 产生与氧化, 抑制增温对滨海湿地 CH_4 排放的促进作用。此外, 增温与氮添加均能促进植物呼吸消耗养分, 可能导致净初级生产量降低, 根系分泌物输入减少, 从而限制 CH_4 的产生 [36]。

增温处理时长与增温方式也是调控 CH_4 排放的重要因素 (图 5b)。短期增温 (≤ 3 年) 对 CH_4 排放具有促进效应 [37-38], 但长期处理则可能导致更深刻的生态变化, 进一步影响 CH_4 动态: 长期增温可以通过改变土壤微生物的组成、土壤有机碳含量和维管植物覆盖率等共同调控 CH_4 的产生、氧化与传输过程 [39]。此外, 增温方式也能够影响效应强度 (图 4b)。由于采用红外加热器的主动增温通常可使浅层土壤获得较室内被动增温更大的增温幅度 [34], 因而对 CH_4 排放的促进作用更为明显。

3.3 SLR 对滨海湿地 CH_4 排放的影响机制

SLR 显著提升了滨海湿地 CH_4 排放量 (图 4)。由于 CH_4 产生于厌氧环境中, 地下水位确定的厌氧区域垂直深度能够直接影响 CH_4 的产生 [10]。SLR 会扩大土壤厌氧区域并降低 Eh, 为产甲烷菌创造有利生境, 增强其活性, 同时抑制甲烷氧化菌对 CH_4 的消耗, 最终导致 CH_4 净排放量增加 [40]。水位变动还影响着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。在厌氧 (高水位) 和好氧 (低水位) 条件下, 有机氮矿化均可生成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (图 2c), 然而, 水位调控着后续转化路径: 低水位促使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$; 而高水位抑制硝化作用, 导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 积累 [41], 积累的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进一步通过对甲烷氧化菌的抑制促进 CH_4 排放 [29-30], 从而强化 SLR 对 CH_4 产生的正向效应。

湿地类型是调控 SLR 对 CH_4 排放影响的核心因子之一 (图 5c), 这是因为不同湿地类型对应的优势植物存在差异。以盐沼为例, 其典型植被为耐盐禾草, 生物量较大, 可为产甲烷菌提供丰富的有机底物。在淹水条件下, 这类耐淹植物 BGB 增加, 促进根系分泌物输入, 进而刺激 CH_4 产生 [23]。另一方面, 盐沼禾草具有发达的通气组织, 有助于气体传输 [10], 从而减少 CH_4 在排放过程中的氧化, 其茎密度、根长和根直径等性状也直接影响着 CH_4 的传输和氧化。本研究中, 光合途径也被识别为核心因子之一 (图 5c), 可能是因为 SLR 数据集中涉及 C_4 植物的研究虽然较少, 但数据显著性强,

导致其在分析中的权重偏高。

此外, CH_4 排放响应比与盐度、 SO_4^{2-} 含量呈显著负相关(图 7)。与产甲烷菌相比, 硫酸盐还原菌更具底物竞争优势^[27]。此外, SO_4^{2-} 还原产生的硫化物可抑制包括碳矿化过程在内的多种微生物过程, 降低碳的可利用性^[42]。高盐环境还会对湿地植物造成生理胁迫, 导致根系分泌物减少^[43], 进一步加剧 CH_4 产生的碳底物限制。

综合来看, SLR 通过改变水位、植物生长和土壤性质等多种途径影响滨海湿地 CH_4 排放, 虽然促进与抑制作用并存, 但总体效应仍表现为促进作用。这是由于水位的上升显著扩大了厌氧区域, 强烈激活了产甲烷菌的活性。这些促进作用在强度上超过盐度升高、硫化物抑制及碳底物减少等的抑制效应, 最终导致 CH_4 排放量增加。这一结果也得到了回归分析的支持, 水位上升对 CH_4 排放的强烈促进作用, 超过了碳可用性降低引发的抑制效应, 使得 DOC 与 CH_4 排放响应比呈负相关(图 7f)。

3.4 复合气候因子对滨海湿地 CH_4 排放的影响机制

增温与 SLR 交互作用的影响强于单一增温(图 4), 这是因为增温与水位上升共同促进了植物生物量增加, 为 CH_4 产生提供了更多底物。同时, 淹水有利于形成厌氧环境, 增加 CH_4 产生量。虽然 SLR 增幅过高会抑制植物生长, 但增温对生物量的促进作用可在一定程度上缓解该抑制效应^[44]。 eCO_2 与增温交互作用的影响未达到显著水平(图 4), 这可能源于某些湿地植物可通过 eCO_2 增强根际氧化能力, 从而抵消增温对 CH_4 排放的刺激效应。同时, 长期 eCO_2 与增温复合作用下, BGB 的响应逐渐减弱, 从而降低对 CH_4 产生的刺激效应^[45]。 eCO_2 与 SLR 交互作用弱于各自单一因子的影响(图 4), 原因在于 eCO_2 促进植物生长, 增强气体输送能力, 进而促进根系泌氧, 利于 SO_4^{2-} 的积累^[26]; 而 SLR 则通过咸水入侵或水位抬升进一步输入并富集 SO_4^{2-} , 二者共同限制了 CH_4 产生。

目前, 针对复合气候因子如何影响滨海湿地 CH_4 排放的研究较少, 在交互效应的相对重要性、亚组间的响应差异及其内在驱动机制等方面仍缺乏深入分析, 导致现有研究结论的稳健性有待进一步验证。因此, 未来有必要开展长期野外观测, 重点关注不同气候变化因子如何通过改变环境条件和微生物过程协同影响 CH_4 排放, 尤其应加强多重气候变化因子间交互效应的解析, 为深入揭示气候变化下滨海湿地 CH_4 排放的演变提供理论依据。

4 结 论

大气 CO_2 浓度升高通过促进植物生长增加碳输入, 增强了滨海湿地 CH_4 排放。增温通过促进底物供应和增强产甲烷菌活性, 也显著提升了 CH_4 排放量。海平面上升通过增强滨海湿地土壤厌氧环境, 对 CH_4 排放的刺激效应最为强烈。不同气候变化因子对 CH_4 排放的影响存在交互作用。增温与海平面上升具有协同增强效应, 二者交互作用对 CH_4 排放的促进作用显著高于单一增温的影响; 相反, 大气 CO_2 浓度升高与海平面上升的交互作用弱于各自单一因子的影响。本研究在全球尺度上系统量化了多个关键气候因子及其交互作用对滨海湿地 CH_4 排放的影响, 揭示了各因子效应的差异、调控因素及其潜在机制, 可为预测未来滨海湿地碳汇演变和优化滨海湿地管理提供理论依据。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate change 2021 – The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Lan X, Tans P, K.W.T. Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements[EB/OL]. [2025-08-12]. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>.
- [3] WMO. State of the global climate 2024: WMO-No. 1368[R]. Geneva, 2025.

- [4] Kirwan M L, Mudd S M. Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change[J]. *Nature*, 2012, 489(7417): 550-553.
- [5] Tong C, Wang W Q, Huang J F, et al. Invasive alien plants increase CH₄ emissions from a subtropical tidal estuarine wetland[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1-3): 677-693.
- [6] Al-Haj A N, Fulweiler R W. Response to concerns and uncertainties relating to methane emissions synthesis for vegetated coastal ecosystems. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): e10-e11.
- [7] Bergamaschi P, Houweling S, Segers A, et al. Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: Inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(13): 7350-7369.
- [8] Rosentreter J A, Laruelle G G, Bange H W, et al. Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(6): 579-587.
- [9] van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage[J]. *Science*, 2014, 344(6183): 508-509.
- [10] Lin Y X, Yuan J J, Liu D Y, et al. Divergent responses of wetland methane emissions to elevated atmospheric CO₂ dependent on water table[J]. *Water Research*, 2021, 205: 117682.
- [11] Yvon-Durocher G, Allen A P, Bastviken D, et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales[J]. *Nature*, 2014, 507(7493): 488-491.
- [12] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 53-60.
- [13] Spivak A C, Sanderman J, Bowen J L, et al. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 685-692.
- [14] Mueller P, Mozdzer T J, Langley J A, et al. Plant species determine tidal wetland methane response to sea level rise[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5154.
- [15] Chen S Y, Peng J J, Zhu C W, et al. Global response and mechanism of methane cycling in wetlands under elevated atmospheric CO₂ and warming[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(7): e70325.
- [16] Guo J H, Feng H L, Peng C H, et al. Global climate change increases terrestrial soil CH₄ emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2023, 37(1): e2021GB007255.
- [17] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis[J]. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [18] Midolo G, Alkemade R, Schipper A M, et al. Impacts of nitrogen addition on plant species richness and abundance: A global meta-analysis[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, 28(3): 398-413.
- [19] Calcagno V, de Mazancourt C. glmulti: An R package for easy automated model selection with (generalized) linear models[J]. *Journal of Statistical Software*, 2010, 34(12). <https://doi.org/10.18637/jss.v034.i12>.
- [20] Egger M, Smith G D, Schneider M, et al. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test[J]. *British Medical Journal*, 1997, 315(7109): 629-634.
- [21] Rosenberg M S. The file-drawer problem revisited: A general weighted method for calculating fail-safe numbers in meta-analysis[J]. *Evolution*, 2005, 59(2): 464-468.
- [22] Sage R F, Sharkey T D, Seemann J R. Acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ in five C₃ species[J]. *Plant Physiology*, 1989, 89(2): 590-596.
- [23] Langley J A, Mozdzer T J, Shepard K A, et al. Tidal marsh plant responses to elevated CO₂, nitrogen fertilization, and sea level rise[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1495-1503.
- [24] Drake B G. Rising sea level, temperature, and precipitation impact plant and ecosystem responses to elevated CO₂ on a Chesapeake Bay wetland: Review of a 28-year study[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3329-3343.
- [25] Yu H Y, Zhang X C, Meng X T, et al. Comparing the variations and influencing factors of CH₄ emissions from paddies and wetlands under CO₂ enrichment: A data synthesis in the last three decades[J]. *Environmental Research*, 2023, 228: 115842.

- [26] Lee J, Yang Y R, Kang H, et al. Climate-induced shifts in sulfate dynamics regulate anaerobic methane oxidation in a coastal wetland[J]. Science Advances, 2025, 11(17): eads6093.
- [27] Zhou C Q, Zhou M C, Peng Y, et al. Unexpected increase of sulfate concentrations and potential impact on CH₄ budgets in freshwater lakes[J]. Water Research, 2024, 261: 122018.
- [28] Tho B T, Lambertini C, Eller F, et al. Ammonium and nitrate are both suitable inorganic nitrogen forms for the highly productive wetland grass *Arundo donax*, a candidate species for wetland paludiculture[J]. Ecological Engineering, 2017, 105: 379-386.
- [29] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 47(3): 265-277.
- [30] Dunfield P, Knowles R. Kinetics of inhibition of methane oxidation by nitrate, nitrite, and ammonium in a humisol[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(8): 3129-3135.
- [31] Chowdhury T R, Dick R P. Ecology of aerobic methanotrophs in controlling methane fluxes from wetlands[J]. Applied Soil Ecology, 2013, 65: 8-22.
- [32] Kohzu A, Matsui K, Yamada T, et al. Significance of rooting depth in mire plants: Evidence from natural ¹⁵N abundance[J]. Ecological Research, 2003, 18(3): 257-266.
- [33] Watcharamongkol T, Christin P A, Osborne C P. C₄ photosynthesis evolved in warm climates but promoted migration to cooler ones[J]. Ecology Letters, 2018, 21(3): 376-383.
- [34] Noyce G L, Kirwan M L, Rich R L, et al. Asynchronous nitrogen supply and demand produce nonlinear plant allocation responses to warming and elevated CO₂[J]. PNAS, 2019, 116(43): 21623-21628.
- [35] Yuan F H, Wang Y H, Ricciuto D M, et al. An integrative model for soil biogeochemistry and methane processes. II: Warming and elevated CO₂ effects on peatland CH₄ emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(8): e2020JG005963.
- [36] Shaver G R, Jonasson S. Response of Arctic ecosystems to climate change: Results of long-term field experiments in Sweden and Alaska[J]. Polar Research, 1999, 18(2): 245-252.
- [37] Laine A M, Mehtätalo L, Tolvanen A, et al. Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 169-181.
- [38] Nielsen C S, Michelsen A, Strobel B W, et al. Correlations between substrate availability, dissolved CH₄, and CH₄ emissions in an arctic wetland subject to warming and plant removal[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(3): 645-660.
- [39] Sun R F, Sun B Y, Li X G, et al. Seven-year experimental warming decreases labile but not recalcitrant soil organic carbon fractions in a coastal wetland[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(8): 3071-3081.
- [40] Dinsmore K J, Skiba U M, Billett M F, et al. Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1): 229-242.
- [41] Xu C, Wong V N L, Reef R E. Effect of inundation on greenhouse gas emissions from temperate coastal wetland soils with different vegetation types in southern Australia[J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 142949.
- [42] Su R, Li K X, Wang N N, et al. Reviews and syntheses: Contribution of sulfate to aerobic methane oxidation in upland soils—A mini-review[J]. Biogeosciences, 2025, 22(20): 5625-5634.
- [43] Hester M W, Mendelssohn I A, McKee K L. Species and population variation to salinity stress in *Panicum hemitomon*, *Spartina patens*, and *Spartina alterniflora*: Morphological and physiological constraints[J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 46(3): 277-297.
- [44] Qiao P Y, Dong Y, Gu X X, et al. Warming stimulates mangrove carbon sequestration in rising sea level at their northern limit: An in situ simulation[J]. Limnology and Oceanography, 2024, 69(9): 2138-2151.
- [45] Noyce G L, Smith A J, Kirwan M L, et al. Oxygen priming induced by elevated CO₂ reduces carbon accumulation and methane emissions in coastal wetlands[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(1): 63-68.

(责任编辑: 卢 萍)