

亚热带滨海湿地甲烷通量特征及环境调控机制

赵君惠

温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州

收稿日期: 2025年11月28日; 录用日期: 2025年12月27日; 发布日期: 2026年1月6日

摘要

亚热带滨海湿地的甲烷(CH_4)排放受湿地类型、季节和地区的显著影响。本研究通过对福建、浙江、上海和江苏等省(直辖市)典型亚热带滨海湿地的 CH_4 通量比较分析, 揭示了不同环境因素包括土壤有机碳含量、总氮、月均温、纬度等对 CH_4 排放的调控机制。本地盐沼、入侵盐沼和光滩的排放通量存在显著差异, 其中入侵盐沼的排放量最高。季节变化呈现出夏秋季节排放量较高的特征, 主要受温度和植物生长的调节作用。研究结果为湿地 CH_4 排放机制的理解提供了重要实验数据和理论依据, 对生态学和气候变化研究具有重要意义。

关键词

甲烷, 排放通量, 滨海湿地, 互花米草

Characteristics of Methane Fluxes in Subtropical Coastal Wetlands and Their Environmental Regulatory Mechanisms

Junhui Zhao

College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: November 28, 2025; accepted: December 27, 2025; published: January 6, 2026

Abstract

Methane (CH_4) emissions from subtropical coastal wetlands are significantly influenced by wetland type, region, and season. This study, through a comparative analysis of CH_4 fluxes in typical wetlands of Fujian, Zhejiang, Shanghai, and Jiangsu provinces (municipalities), reveals the regulatory mechanisms of different environmental factors—such as soil organic carbon content, total nitrogen, and temperature—on CH_4 emissions. Significant differences in emission fluxes were observed

among native salt marshes, *Spartina alterniflora* wetlands, and bare mudflats, with the highest emissions recorded in wetlands invaded by *Spartina alterniflora*. Seasonal variations showed higher emissions in summer and autumn, primarily regulated by temperature and plant growth. The findings provide important experimental data and a theoretical basis for understanding CH₄ emission mechanisms in wetlands, which holds significant implications for ecological and climate change research.

Keywords

Methane, Flux, Coastal Wetlands, *Spartina alterniflora*

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球甲烷(CH₄)年均排放量为 248 Tg (1 Tg = 1 × 10¹² g) [1], 尽管其排放量远低于二氧化碳(CO₂)的 406 Gt (1 Gt = 1 × 10²¹ g) [2], 但 CH₄ 的百年增温潜力是 CO₂ 的 32~45 倍[3]。湿地作为重要的 CH₄ 自然排放源, 年排放量高达 164 Tg [4], 约占自然和人为总排放量的 25% [5]。滨海湿地作为其中重要组成部分, CH₄ 年排放量达 5~28 Tg, 在全球 CH₄ 循环中具有关键作用[6]。由于地处陆海生态交错带, 滨海湿地生态系统结构脆弱, 极易受环境变化与植物入侵等压力的影响[7]。自 1979 年, 互花米草(*Spartina alterniflora*) 为促淤造陆而引入后, 该植物凭借其快速生长、高繁殖力以及对高盐度与潮汐淹没等逆境的强耐受性, 迅速在滨海湿地失控扩散。截至 2020 年, 其入侵面积已超过 5.5 × 10⁴ ha [8], 覆盖范围自辽宁至海南的多个沿海省份, 其中江苏、上海、浙江、福建等亚热带滨海湿地入侵程度最为严重, 占入侵总面积的 91.64% [9]。互花米草的广泛入侵已引发严重的生态后果, 不仅排挤本地优势群落, 还通过改变土壤理化性质进而影响土壤微生物活动, 进而调控滨海湿地 CH₄ 产生与排放。氮(N)和磷(P)等营养物质的输入可能刺激甲烷氧化菌的活性, 增加 CH₄ 氧化速率[10]。此外, 入侵植物的根系分泌物作为产甲烷菌的底物可以增加 CH₄ 排放, 或通过增加土壤通气性来增强 CH₄ 氧化[11]。然而, 关于亚热带滨海湿地 CH₄ 排放特征的系统研究仍有待进一步研究, 尤其是不同湿地类型间 CH₄ 排放差异及其驱动机制的深入探讨尚待进一步明确。

本文以福建、浙江、上海和江苏等省(直辖市)的典型亚热带滨海湿地作为研究对象, 全面收集了湿地的 CH₄ 排放通量, 比较分析了不同植被类型、季节和地区湿地的 CH₄ 排放通量的差异特征及原因。通过分析湿地土壤的有机碳含量、总氮、月均温、纬度等多种环境因子的变化, 揭示影响滨海湿地 CH₄ 排放的关键因素, 进一步阐明其生态功能与 CH₄ 排放之间的关系。

2. 材料与方法

本研究采用系统性的文献检索与分析方法, 以综合评估中国亚热带滨海湿地的 CH₄ 排放研究现状。在“中国知网”与“Web of Science”两个数据库中进行检索, 中文以“滨海/湿地/甲烷/排放”为检索词, 英文以“Methane/flux/emission/coastal/wetland”为核心检索词, 分别匹配标题、关键词和摘要, 未设时间起止限制, 共获得初步文献 478 篇。依据严格的纳入标准对文献进行筛选, 纳入文献必须满足以下条件: 1) 研究样地位于中国亚热带滨海湿地; 2) 研究方法为野外原位观测(排除实验室模拟数据); 3) 且文献中

提供了明确的甲烷通量观测值及具体采样日期。经筛选,最终 32 篇文献符合要求。从已发表文献中获得的数据包含中国亚热带滨海湿地 32 个站点的 497 个观测值(见图 1)。其中本地盐沼 260 个观测值,入侵盐沼 154 个观测值,光滩生境 83 个观测值。

采样点坐标(经度、纬度)、土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)以及月均温,直接从表格中获取,或使用 GetData Graph Digitizer 软件(版本 2.25)(<http://getdata-graph-digitizer.com/>)通过数字化图表提取,因为该软件在各种荟萃分析或综合研究中具有高精度(>99%) [12]-[14]。对于缺乏月均温数据的站点,使用了世界气候网站(<https://www.worldclim.org/>),分辨率为 30 弧秒(约 1 平方公里)。对于缺乏土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)土壤指标的站点,使用了世界土壤数据库(HWSD, <https://www.fao.org/soils-portal/>),空间分辨率为 1 km。

用 Microsoft Excel 2020、Origin 2019、Visio 2021、R 4.5.1 和 SPSS 20.0 统计分析软件进行数据处理和绘图。其中,通过 Microsoft Excel 2020 计算原始数据的平均值和标准误差,基于 SPSS 20.0 的单因素方差分析(One-Way ANOVA),分析不同湿地类型、不同地区排放通量之间的差异性。以随机森林模型(Random forest)分析甲烷排放通量 and 环境影响因子间的关系,通过 R 语言中的 random forest 包进行。折线图采用 Origin2019 绘制。流程图采用 Visio2021 绘制。

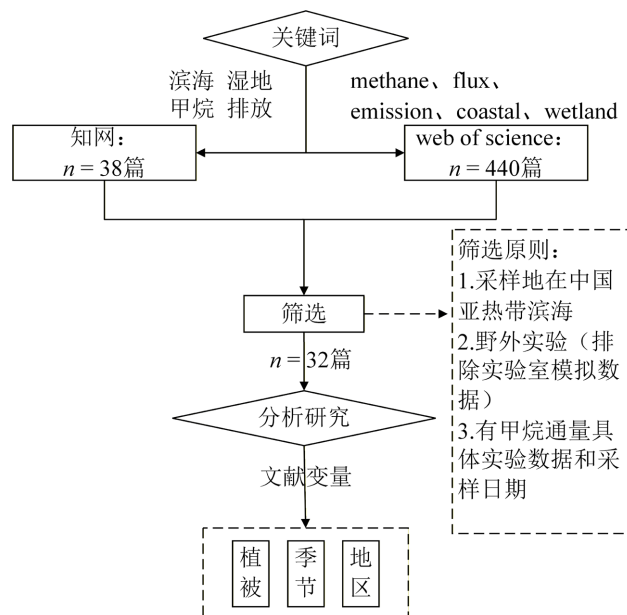


Figure 1. Literature screening and research flowchart
图 1. 文献筛选与研究流程图

3. 不同湿地类型 CH₄ 排放的差异特征

不同植被覆盖的滨海湿地 CH₄ 排放通量具有显著差异。入侵盐沼生境的 CH₄ 排放通量($1.74 \pm 0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)显著高于本地盐沼($0.73 \pm 0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)和光滩生境($0.27 \pm 0.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) ($p < 0.001$, 见表 1), 表现为入侵盐沼 > 本地盐沼 > 光滩。然而, 本地盐沼和光滩之间的 CH₄ 排放通量无显著差异。

入侵盐沼的 CH₄ 排放通量高于本地盐沼和光滩, 这一结果与以往的研究相符[15][16]。这种差异可能主要源于湿地土壤底物的改变, 从而显著提升了 CH₄ 的产生和排放。在中国北部湾滨海湿地的研究表明, 互花米草湿地的土壤有机碳含量高于泥滩湿地, 为 CH₄ 的生成提供了更多可利用底物[17]。此外, 本研究发现入侵盐沼的 SOC 含量($9.65 \pm 0.55 \text{ g/kg}$)显著高于本地盐沼和光滩, 并且通过随机森林模型发现, SOC

对入侵盐沼中的 CH_4 排放有显著影响($p < 0.01$, 见表 2), 这一变化主要由于互花米草入侵导致其凋落物的分解以及根系分泌物向土壤输入大量有机物质[18][19], 尤其是甲基化合物(如三甲胺)。这些“非竞争性”底物不容易被其他微生物(如硫酸盐还原菌)消耗, 几乎专性地被产甲烷菌利用, 从而通过甲基营养型途径产 CH_4 。研究表明, 在互花米草入侵 12 年的湿地中, 三甲胺产生的 CH_4 速率比未入侵的光滩高出两个数量级, 促使甲基营养型途径取代传统的氢营养型(H_2/CO_2)途径[20]。此外, 互花米草的入侵会重塑沉积物中的微生物群落, 特别是细菌群落[21], 这些变化可能包括产甲烷菌的丰度增加或活性的提高, 从而促进 CH_4 的生成[19]。九段沙湿地的土壤细菌群落研究亦证实了以上观点, 互花米草入侵改变了土壤功能微生物, 导致温室气体排放的增加[16]。另一方面, 互花米草的根、茎、叶鞘及叶片都具备发达的通气组织[22], 促进 CH_4 的排放。

Table 1. One-way analysis of variance (ANOVA) of three types of wetlands

表 1. 三种类型湿地的单因素方差分析

湿地类型	排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	F	<i>p</i>	R^2
本地盐沼	$0.73 \pm 0.07\text{b}$	25.40	<0.001	0.09
入侵盐沼	$1.74 \pm 0.22\text{a}$			
光滩	$0.27 \pm 0.04\text{b}$			

注: 数据以平均值 $\pm$ 标准误表示, 本地盐沼 $n = 260$, 入侵盐沼 $n = 154$, 光滩 $n = 83$ 。

Table 2. Analysis of environmental factor contribution based on random forest

表 2. 基于随机森林的环境因子贡献度分析

差异来源	本地盐沼		入侵盐沼		光滩	
	%IncMSE	<i>p</i>	%IncMSE	<i>p</i>	%IncMSE	<i>p</i>
SOC	32.1388	0.0099	23.5115	0.0099	24.4553	0.0099
TN	26.0463	0.0099	9.8948	0.0495	14.8609	0.0099
月均温	22.0735	0.0099	15.2209	0.0297	25.5390	0.0099
纬度	26.1070	0.0099	13.4646	0.0198	11.8570	0.0396

光滩的 CH_4 排放通量较低, 这可能与土壤氮含量有关。光滩生境的土壤总氮(TN)含量($0.49 \pm 0.03 \text{ g/kg}$)显著低于入侵盐沼($0.76 \pm 0.05 \text{ g/kg}$)和本地盐沼($0.67 \pm 0.05 \text{ g/kg}$)。值得注意的是, 本研究通过随机森林模型计算发现, TN 对光滩的 CH_4 排放有显著影响($p < 0.01$, 见表 2), 这与以往一些研究的侧重点有所不同。许多点位研究主要关注 SOC 或溶解有机碳(DOC)对 CH_4 排放的影响[23]。例如, 有研究表明, 土壤(C/N)的变化会影响微生物活性和有机质分解, 从而间接影响 CH_4 的产生[24]。但在本研究中, 强调了 TN 的强贡献度, 这可能意味着在光滩生境这种特定生态系统中, 氮循环的某些环节对产甲烷菌的活性或甲烷氧化菌的抑制作用更为显著[25]。这可能是由于光滩生境极易受潮汐和季节性干湿交替的影响, 导致土壤氧化还原条件频繁变化。此外, 氮素的形态(如硝态氮和铵态氮)及其转化过程(如硝化和反硝化)与氧化还原条件密切相关。在有氧条件下, 氮的氧化过程(如硝化作用)会消耗氧气, 但总体上, 高溶解氧环境有利于 CH_4 氧化[26]。在干湿交替的环境下, 氮的输入可能改变甲烷循环微生物的组成和功能, 从而影响 CH_4 的产生和消耗平衡。光滩生境低 CH_4 排放的原因也可能与其缺乏植被覆盖有关。一方面, 光滩生境缺乏植被, 在与潮水的交互过程中截取氮等营养盐能力较低, 从而降低了为 CH_4 生成提供的底物, 减少了 CH_4 排放[27]。另一方面, 缺乏植被覆盖使地下 CH_4 无法通过通气组织有效输送到大气中[26]。此外, 土壤水

分含量是影响 CH_4 产生和氧化的关键因素[28]。光滩生境由于其暴露特性,可能更易受到水分变化的影响,并且其土壤通常不像植被茂盛的湿地那样长期处于厌氧状态,这不利于产甲烷菌的活性,从而导致较低的 CH_4 产生[29]。此外,溶解氧(DOC)浓度与 CH_4 通量呈负相关,DOC 浓度越高, CH_4 通量越低[30]。光滩生境中 DOC 含量较高,从而促进甲烷氧化菌的活性,降低 CH_4 的排放。这些因素共同作用,使得光滩在亚热带滨海湿地的 CH_4 排放格局中贡献度较低。

4. 不同季节 CH_4 排放的差异特征

三种类型湿地的 CH_4 排放特征表现出明显的季节差异。本地盐沼的 CH_4 排放呈单峰型变化特征,1月排放量最低($0.10 \pm 0.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),随后排放通量开始上升,4月升速加快,至7月达到最高值($1.24 \pm 0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),此后排放逐渐减少(见图2)。相比之下,入侵盐沼的 CH_4 排放特征显著不同。自1月开始,排放量波动上升,9月达到最高值($4.73 \pm 0.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),随即在10月迅速下降至($0.48 \pm 0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),之后继续下降(见图2)。光滩生境的 CH_4 排放变化趋势与本地盐沼具有相似性。排放通量从1月起上升,5月加速上升,8月达到峰值($0.77 \pm 0.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),9月急剧下降至($0.23 \pm 0.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),此后进入波动下降状态(见图2)。

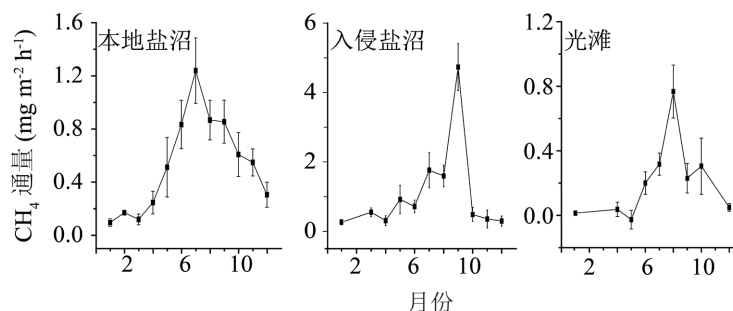


Figure 2. Monthly variation characteristics of CH_4 emission fluxes in three types of wetlands (error bars represent $\pm \text{SE}$)

图2. 三种类型湿地 CH_4 排放通量月份变化特征(误差棒表示 $\pm \text{SE}$)

三种湿地类型的 CH_4 排放量最高值主要出现在7~9月,季节性变化呈现出夏秋高、春冬低的规律,这一结果与已有的研究结论基本一致[31][32]。 CH_4 排放通量的显著季节性波动可能主要受以下因素影响:温度在 CH_4 的生成、氧化及排放过程中起着重要作用,是控制 CH_4 排放季节性变化的关键因素之一。本研究通过随机森林模型,发现月均温对本地盐沼和光滩生境的 CH_4 排放有强显著影响($p < 0.01$, 见表2),对入侵盐沼有弱显著影响($p < 0.05$, 见表2)。湿地的 CH_4 排放速率通常会随着温度升高呈指数增长。在夏季高温下,产甲烷菌的代谢活动显著增强,导致 CH_4 生成量达到峰值;而在冬季低温时,微生物活性受到抑制, CH_4 排放量降至最低[33]。另一方面, CH_4 排放与植物生物量也呈显著正相关。植物生物量通常在生长季达到峰值,植物的根系通过分泌有机物和分解凋落物为土壤中的产甲烷菌提供充足的碳源和能量。较高的地上生物量可能极大地提高了土壤中植物凋落物和根系分泌物的输入,导致其单优群落样地 SOC 升高,为 CH_4 产生提供更多可利用底物,促进 CH_4 排放[34]。

值得注意的是,入侵盐沼的 CH_4 排在9月达到最高值,并在10月迅速下降,表现出明显的波动性。这与一些区域性研究的持续增长或平稳变化的季节性模式不同。这可能由于在大范围地理尺度的研究下,纬度与气温变化的影响更加显著,本研究通过随机森林模型发现月均温、纬度对入侵盐沼的 CH_4 排放通量均有显著影响($p < 0.05$, 见表2)。这种差异主要是秋季气温和土壤温度的快速下降、土壤湿度或水位的下降,入侵植物特有的生理周期以及微生物群落对这些环境变化的复杂响应共同作用的结果。

5. 不同地区 CH₄ 排放的差异特征

基于文献数据,本研究计算了不同区域 CH₄ 排放通量的均值。具体而言,福建鱔鱼滩湿地的 CH₄ 排放通量均值为 $1.12 \pm 0.12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 浙江温州瓯江口排放通量均值为 $0.15 \pm 0.06 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 杭州湾的均值为 $1.05 \pm 0.18 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 上海崇明东滩均值为 $0.80 \pm 0.13 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 江苏淮河入海口为 $0.48 \pm 0.05 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。结果表明,不同地区的 CH₄ 排放量差异较大,但并未呈现出明显的规律。

上述地域差异表明 CH₄ 排放受到微生物群落结构、水文条件及氮素形态等关键环境因子共同作用的结果。首先,微生物群落结构在调控 CH₄ 排放中起调控作用。湿地生态系统中的 CH₄ 通量由产甲烷菌的生成和甲烷氧化菌的消耗共同决定[10]。产甲烷菌在严格厌氧条件下分解有机物质产生 CH₄, 而甲烷氧化菌则将 CH₄ 氧化为 CO₂, 从而减少 CH₄ 向大气的净排放。不同湿地由于地理位置、植被类型和水文状况的差异,可能孕育出不同的产甲烷菌和甲烷氧化菌群落[35]。如果某个湿地具备高活性的产甲烷菌群落和相对较低的甲烷氧化菌活性,其 CH₄ 排放通量自然会偏高。此外,产甲烷菌与甲烷氧化菌之间的竞争与协同,也直接影响 CH₄ 的净通量[10]。

其次,水文条件是影响 CH₄ 排放的关键环境因子。水深、淹水时间、土壤湿度等因素直接决定了湿地土壤的厌氧程度,进而调控 CH₄ 的生成和氧化过程[36]。持续淹水会创造有利于产甲烷菌的厌氧环境,增加 CH₄ 排放[37]。第三,土壤底物数量和质量对 CH₄ 的生成至关重要。湿地土壤中 CH₄ 的产生受溶解有机碳与土壤有机碳的比例(DOC:SOC)以及底物类型(如乙酸、H₂ 和甲基化合物)的调控[38]。例如,较低的碳氮比(C:N)和较高的 DOC:SOC 比值通常预示着土壤有机质更容易被微生物分解利用,从而为产甲烷菌提供更多可利用底物,促进 CH₄ 排放增加[39]。此外,土壤中的可提取有机碳(EOC)与 CH₄ 排放率呈正相关[40]。

最后,氮素形态通过不同机制影响 CH₄ 排放。研究表明,硝态氮(NO₃⁻)的输入会抑制 CH₄ 产生,此过程主要通过电子受体竞争机制实现[41]。在富营养化沿海湿地中,通过 CH₄ 排放减少可以实现脱氮,因为 CH₄ 是反硝化过程潜在的碳源[42]。硝态氮作为一种氧化剂,在厌氧环境中与产甲烷菌竞争电子受体和有机碳底物,从而抑制产甲烷过程。有研究表明,氮磷添加会对青藏高原湿地草甸 CH₄ 通量产生影响[41]。

6. 总结与展望

本研究深入探讨了亚热带滨海湿地的 CH₄ 排放特征及其环境调控因素,通过分析福建、浙江、上海和江苏等地的 CH₄ 排放通量数据,发现互花米草通过改变土壤的理化性质,显著提高了 CH₄ 的生成和排放。特别是入侵盐沼的 SOC 含量显著高于其他湿地类型,这为 CH₄ 的生成提供了更多可利用的底物。此外,研究发现光滩生境中低氮含量与低 CH₄ 排放密切相关,提示氮素输入管理对 CH₄ 减排有着重要作用。湿地 CH₄ 排放的季节性变化与温度、湿度等因素密切相关,季节性波动对湿地管理提出了更高要求,季节变化应纳入排放监测和管理策略中。总体而言,湿地的 CH₄ 排放差异性受到多种因素的综合影响,特别是入侵植物和土壤氮素的变化,显示了生态恢复和管理策略的重要性。未来的湿地管理应结合区域特点,针对不同湿地类型采取差异化管理措施,特别是在入侵植物控制、氮素管理和生态恢复方面进行有针对性的干预,以减缓 CH₄ 排放并增强湿地碳汇功能,为应对气候变化贡献力量。

参考文献

- [1] Saunio, M., Martinez, A., Poulter, B., *et al.* (2024) Global Methane Budget 2000-2020. *Earth System Science Data*, 2024, 1-147.
- [2] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., *et al.* (2024) Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*,

- 2024, 1-133.
- [3] Arias-Ortiz, A., Wolfe, J., Bridgham, S.D., Knox, S., McNicol, G., Needelman, B.A., *et al.* (2024) Methane Fluxes in Tidal Marshes of the Conterminous United States. *Global Change Biology*, **30**, e17462. <https://doi.org/10.1111/gcb.17462>
 - [4] Al-Haj, A.N. and Fulweiler, R.W. (2020) A Synthesis of Methane Emissions from Shallow Vegetated Coastal Ecosystems. *Global Change Biology*, **26**, 2988-3005. <https://doi.org/10.1111/gcb.15046>
 - [5] Bastviken, D., Tranvik, L.J., Downing, J.A., Crill, P.M. and Enrich-Prast, A. (2011) Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science*, **331**, 50. <https://doi.org/10.1126/science.1196808>
 - [6] Rosentreter, J.A., Borges, A.V., Deemer, B.R., Holgerson, M.A., Liu, S., Song, C., *et al.* (2021) Half of Global Methane Emissions Come from Highly Variable Aquatic Ecosystem Sources. *Nature Geoscience*, **14**, 225-230. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>
 - [7] Chapman, D., Purse, B.V., Roy, H.E. and Bullock, J.M. (2017) Global Trade Networks Determine the Distribution of Invasive Non-Native Species. *Global Ecology and Biogeography*, **26**, 907-917. <https://doi.org/10.1111/geb.12599>
 - [8] Liu, J.Q., Wang, W.Q., Shen, L.D., *et al.* (2022) Response of Methanotrophic Activity and Community Structure to Plant Invasion in China's Coastal Wetlands. *Geoderma*, **407**, Article 115569. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115569>
 - [9] Zheng, X., Javed, Z., Liu, B., Zhong, S., Cheng, Z., Rehman, A., *et al.* (2023) Impact of *Spartina Alterniflora* Invasion in Coastal Wetlands of China: Boon or Bane? *Biology*, **12**, Article 1057. <https://doi.org/10.3390/biology12081057>
 - [10] Song, H., Peng, C., Zhu, Q., Chen, Z., Blanchet, J., Liu, Q., *et al.* (2024) Quantification and Uncertainty of Global Upland Soil Methane Sinks: Processes, Controls, Model Limitations, and Improvements. *Earth-Science Reviews*, **252**, Article 104758. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104758>
 - [11] Yanuka-Golub, K., Korenblum, E., Aronson, E.L. and Matzrafi, M. (2025) Linking Microbial-Mediated Methane Production in Wetlands to Invasive Plants. *Soil Biology and Biochemistry*, **210**, Article 109944. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109944>
 - [12] Deng, L., Liu, G.B. and Shangguan, Z.P. (2014) Land-Use Conversion and Changing Soil Carbon Stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A Synthesis. *Global Change Biology*, **20**, 3544-3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
 - [13] Yang, Y., Luo, Y. and Finzi, A.C. (2011) Carbon and Nitrogen Dynamics during Forest Stand Development: A Global Synthesis. *New Phytologist*, **190**, 977-989. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>
 - [14] Xiao, D., Deng, L., Kim, D., Huang, C. and Tian, K. (2019) Carbon Budgets of Wetland Ecosystems in China. *Global Change Biology*, **25**, 2061-2076. <https://doi.org/10.1111/gcb.14621>
 - [15] Liang, W., Chen, X., Chen, Z.L., Zhu, P., Huang, Z., Li, J., *et al.* (2024) Unraveling the Impact of *Spartina Alterniflora* Invasion on Greenhouse Gas Production and Emissions in Coastal Saltmarshes: New Insights from Dissolved Organic Matter Characteristics and Surface-Porewater Interactions. *Water Research*, **262**, Article 122120. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122120>
 - [16] He, C., Wang, X., Wang, D., Zhao, Z., Wang, F., Cheng, L., *et al.* (2021) Impact of *Spartina Alterniflora* Invasion on Soil Bacterial Community and Associated Greenhouse Gas Emission in the Jiuduansha Wetland of China. *Applied Soil Ecology*, **168**, Article 104168. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104168>
 - [17] Huang, X., Duan, Y., Tao, Y., Wang, X., Long, H., Luo, C., *et al.* (2022) Effects of *Spartina Alterniflora* Invasion on Soil Organic Carbon Storage in the Beihai Coastal Wetlands of China. *Frontiers in Marine Science*, **9**, Article 890811. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.890811>
 - [18] Liao, Q., Yuan, F., Fan, Q., Chen, H., Wang, Y., Zhang, C., *et al.* (2024) Plant- and Microbial-Mediated Soil Organic Carbon Accumulation in *Spartina Alterniflora* Salt Marshes. *Catena*, **237**, Article 107777. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107777>
 - [19] Jiang, Y., Shao, Y., Huang, J., Du, Y., Wen, Y., Tang, H., *et al.* (2024) Changes in Sediment Greenhouse Gases Production Dynamics in an Estuarine Wetland Following Invasion by *Spartina Alterniflora*. *Frontiers in Microbiology*, **15**, Article 1420924. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1420924>
 - [20] Yuan, J., Liu, D., Ji, Y., Xiang, J., Lin, Y., Wu, M., *et al.* (2019) *Spartina alterniflora* Invasion Drastically Increases Methane Production Potential by Shifting Methanogenesis from Hydrogenotrophic to Methylotrophic Pathway in a Coastal Marsh. *Journal of Ecology*, **107**, 2436-2450. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13164>
 - [21] Cao, M., Cui, L., Sun, H., Zhang, X., Zheng, X. and Jiang, J. (2021) Effects of *Spartina Alterniflora* Invasion on Soil Microbial Community Structure and Ecological Functions. *Microorganisms*, **9**, Article 138. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010138>
 - [22] Maricle, B.R. and Lee, R.W. (2002) Aerenchyma Development and Oxygen Transport in the Estuarine Cordgrasses *Spartina Alterniflora* and *S. Anglica*. *Aquatic Botany*, **74**, 109-120. [https://doi.org/10.1016/s0304-3770\(02\)00051-7](https://doi.org/10.1016/s0304-3770(02)00051-7)
 - [23] Zhao, M., Han, G., Li, J., Song, W., Qu, W., Eller, F., *et al.* (2020) Responses of Soil CO₂ and CH₄ Emissions to Changing

- Water Table Level in a Coastal Wetland. *Journal of Cleaner Production*, **269**, Article 122316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122316>
- [24] Zhu, Z., Minasny, B., Field, D.J. and An, S. (2023) Using Mid-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy to Investigate the Dynamics of Soil Aggregate Formation in a Clay Soil. *Catena*, **231**, Article 107366. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107366>
- [25] Wu, J., Cheng, X., Xing, W. and Liu, G. (2022) Soil-Atmosphere Exchange of CH₄ in Response to Nitrogen Addition in Diverse Upland and Wetland Ecosystems: A Meta-Analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, **164**, Article 108467. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108467>
- [26] Määttä, T. and Malhotra, A. (2024) The Hidden Roots of Wetland Methane Emissions. *Global Change Biology*, **30**, e17127. <https://doi.org/10.1111/gcb.17127>
- [27] Song, H. and Liu, X. (2016) Anthropogenic Effects on Fluxes of Ecosystem Respiration and Methane in the Yellow River Estuary, China. *Wetlands*, **36**, 113-123. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0587-1>
- [28] Morris, K.A., Smith, M., Bailey, V.L., Bittencourt-Peixoto, R., Day, D.J., Hamovit, N., *et al.* (2024) Methane Flux from Transplanted Soil Monoliths Depends on Moisture, but Not Origin. *Soil Biology and Biochemistry*, **193**, Article 109296. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109296>
- [29] Das, T., Pal, S. and Debanshi, S. (2024) Effect of Water Presence Consistency on Balance between CH₄ Emission and CO₂ Sequestration in Floodplain Wetland. *Acta Geophysica*, **73**, 1847-1864. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01452-x>
- [30] Xue, J., Chen, X., Wang, X. and Sun, X. (2023) Fine-Scale Assessment of Greenhouse Gases Fluxes from a Boreal Peatland Pond. *Water*, **15**, Article 307. <https://doi.org/10.3390/w15020307>
- [31] Duan, X., Wang, X., Mu, Y. and Ouyang, Z. (2005) Seasonal and Diurnal Variations in Methane Emissions from Wuliangsu Lake in Arid Regions of China. *Atmospheric Environment*, **39**, 4479-4487. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.045>
- [32] 黄璞玮, 于洪贤, 柴龙会, 等. 扎龙芦苇湿地生长季的甲烷排放通量[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1219-1224.
- [33] Zhang, Y., Naafs, B.D.A., Huang, X., Song, Q., Xue, J., Wang, R., *et al.* (2022) Variations in Wetland Hydrology Drive Rapid Changes in the Microbial Community, Carbon Metabolic Activity, and Greenhouse Gas Fluxes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **317**, 269-285. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.11.014>
- [34] 潘小翠, 管铭, 张崇邦. 互花米草入侵对滩涂湿地甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1145-1152.
- [35] Lin, Y., Yi, X., Ning, C., Li, Y., Peng, Y., Liu, S., *et al.* (2026) Microbial Mechanisms Underlying Differences of Methane Emissions between Urban and Rural Wetlands. *Soil Biology and Biochemistry*, **212**, Article 109993. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109993>
- [36] Shen, W., Ji, Y., Jia, Z., Huang, Q., Zhu, X., Ma, J., *et al.* (2024) Historical Water Regime Determines the Methanogenic Pathway Response to the Current Soil: Water Ratio. *Soil and Tillage Research*, **239**, Article 106032. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106032>
- [37] Perry, H., Carrijo, D.R., Duncan, A.H., Fendorf, S. and Linquist, B.A. (2024) Mid-Season Drain Severity Impacts on Rice Yields, Greenhouse Gas Emissions and Heavy Metal Uptake in Grain: Evidence from On-Farm Studies. *Field Crops Research*, **307**, Article 109248. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109248>
- [38] Wang, N., Li, K., Yuan, F., Zuo, Y., Liu, J., Zhu, X., *et al.* (2024) Faster Cycling but Lower Efficiency: A Microbial Metabolic Perspective on Carbon Loss after Wetland Conversion to Cropland. *Soil Biology and Biochemistry*, **189**, Article 109260. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109260>
- [39] Chen, Y., Xu, J., Liu, B., Zhang, Z. and Xu, M. (2024) The Biological Mechanism of a Lower Carbon/Nitrogen Ratio Increases Methane Emissions during Vegetable Waste Composting. *Science of the Total Environment*, **955**, Article 177297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177297>
- [40] Shen, Y., Feng, J., Zhou, D., He, K. and Zhu, B. (2023) Impacts of Aboveground Litter and Belowground Roots on Soil Greenhouse Gas Emissions: Evidence from a DIRT Experiment in a Pine Plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **343**, Article 109792. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109792>
- [41] Wu, J., Lu, Y., Wang, H. and Li, G. (2023) Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on CH₄ Flux in Wet Meadow of Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, **887**, Article 163448. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163448>
- [42] Yang, H., Chen, X., Zhang, C., Zhao, M., Zhao, X., Perry, D.C., *et al.* (2022) Nitrogen Removal by Eutrophic Coastal Wetlands Accomplished with CH₄ Emission Reduction. *Journal of Cleaner Production*, **332**, Article 130082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130082>