

湿地温室气体排放机制及其环境驱动因素的研究进展

徐琳^{1,2}, 王媛³, 张晓东^{1,2}, 王庆贵³, 黄彬彬³, 张秀丽^{1,2}, 刘冠成^{3*}

¹济宁市南四湖自然保护区服务中心, 山东 济宁

²山东微山湖湿地生态系统定位观测研究站, 山东 济宁

³曲阜师范大学生命科学学院, 山东 济宁

收稿日期: 2026年5月7日; 录用日期: 2026年8月22日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

湿地生态系统在全球碳氮循环与气候调节中发挥着重要作用, 既是陆地生态系统中重要的碳汇, 也是二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的主要自然排放源之一。湿地温室气体排放过程受多种环境因子和生物过程的共同调控, 其机制复杂, 时空异质性显著, 在全球变化背景下呈现出较大的不确定性。系统梳理湿地温室气体排放机制及其关键驱动因素, 对于科学评估湿地生态系统的综合气候效应和优化湿地保护与恢复管理具有重要意义。本文在综合国内外相关研究的基础上, 系统综述了湿地CO₂、CH₄和N₂O的产生、转化与排放机制, 重点阐述了土壤有机碳、水分条件、温度、pH、氧化还原状态以及微生物过程等关键环境因子对湿地温室气体排放的调控作用。同时, 本文也讨论了湿地温室气体排放研究面临的主要挑战与不确定性, 并指出未来研究应加强多温室气体协同观测、微生物过程速率定量表征以及环境因子交互作用机制的解析, 以提升对湿地净气候效应的综合评估能力。本综述可为湿地生态系统在气候变化背景下的科学管理与功能提升提供理论参考。

关键词

湿地, 温室气体, 影响因素, 减排措施

Research Progress on the Mechanisms of Wetland Greenhouse Gas Emissions and Their Environmental Driving Factors

Lin Xu^{1,2}, Yuan Wang³, Xiaodong Zhang^{1,2}, Qinggui Wang³, Binbin Huang³, Xiuli Zhang^{1,2}, Guancheng Liu^{3*}

*通讯作者。

文章引用: 徐琳, 王媛, 张晓东, 王庆贵, 黄彬彬, 张秀丽, 刘冠成. 湿地温室气体排放机制及其环境驱动因素的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(9): 1509-1516. DOI: 10.12677/aep.2026.169152

¹Jining Nansihu Nature Reserve Service Center, Jining Shandong²Shandong Weishan Lake Wetland Ecosystem Observation Research Station, Jining Shandong³School of Life Sciences, Qufu Normal University, Jining Shandong

Received: May 7, 2026; accepted: August 22, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

Wetland ecosystems play a vital role in the global carbon and nitrogen cycles as well as climate regulation. They serve not only as important carbon sinks in terrestrial ecosystems but also as one of the major natural sources of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O). The processes of greenhouse gas emissions from wetlands are co-regulated by multiple environmental factors and biological processes, exhibiting complex mechanisms and significant spatial and temporal heterogeneity, which introduce considerable uncertainty in the context of global change. Systematically reviewing the mechanisms of wetland greenhouse gas emissions and their key driving factors is of great importance for scientifically assessing the comprehensive climate effects of wetland ecosystems and optimizing wetland conservation and restoration management. Based on a synthesis of relevant domestic and international research, this paper systematically reviews the mechanisms of production, transformation, and emission of CO₂, CH₄, and N₂O in wetlands, with a focus on the regulatory roles of key environmental factors such as soil organic carbon, water conditions, temperature, pH, redox status, and microbial processes. Additionally, this paper discusses the major challenges and uncertainties in the study of wetland greenhouse gas emissions, and suggests that future research should strengthen integrated multi-greenhouse gas observations, quantitative characterization of microbial process rates, and mechanistic analysis of interactions among environmental factors, in order to enhance the capacity for comprehensive assessment of the net climate effects of wetlands. This review provides a theoretical reference for the science-based management and functional enhancement of wetland ecosystems in the context of climate change.

Keywords

Wetlands, Greenhouse Gases, Influencing Factors, Emission Reduction Strategies

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

湿地生态系统是地球上最重要的碳汇之一，湿地约占全球陆地面积的 6%，却储存了超过 30% 的全球土壤有机碳，对全球碳循环和温室气体平衡起着关键调节作用[1]。然而，自 18 世纪以来，全球约 21% 的内陆湿地因排水和土地利用转化而丧失[2]。湿地退化引发的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放都是温室气体的重要来源，由此形成“碳汇 - 碳排放”的权衡效应[3]。按 100 年时间尺度计算，N₂O 的全球增温潜势约为 CO₂ 的 273 倍[4]，对全球气候变化产生深远影响。这种“高碳汇 - 高排放”的双重属性，使湿地在气候变化背景下既具有缓解潜力，也存在潜在风险。

近年来，全球变化背景下的气候变暖、氮沉降增强、水文格局改变以及人类土地利用活动的加剧，显著影响了湿地生态系统结构和功能，进而改变温室气体排放格局和碳固存能力[5][6]。尤其是在湿地恢复和再湿化被广泛视为重要自然气候解决方案的背景下，湿地固碳效应与温室气体排放之间的权衡关系

成为当前研究的核心科学问题之一[7]。因此,从过程机制角度系统总结湿地温室气体排放及其影响因素,并阐明湿地固碳的生物地球化学基础,对于科学评估湿地生态系统的综合气候效应和优化湿地管理策略具有重要意义。

2. 湿地 CO₂ 排放机制及其关键驱动因子

2.1. CO₂ 的产生与排放过程

湿地生态系统中 CO₂ 的排放主要来源于生态系统呼吸过程,包括植物自养呼吸和土壤异养呼吸两个方面[8]。植物在进行光合作用固定大气 CO₂ 的同时,其地上和地下组织通过呼吸作用不断向大气释放 CO₂ [9];而土壤异养呼吸则主要由微生物分解土壤有机质所驱动(见表 1)。与非湿地生态系统相比,湿地土壤长期处于高含水状态,氧气扩散受限,好氧微生物活性受到抑制,从而导致有机质分解速率显著降低,这是湿地能够长期积累有机碳的重要原因之一[10]。

然而,湿地并非 CO₂ 排放的弱源。大量研究表明,植物根系呼吸及其引发的根际效应在 CO₂ 排放中占据重要地位。湿地植物通过根系向土壤释放大量的可溶性有机物,为微生物提供易分解底物,从而刺激土壤有机碳矿化过程。即使在厌氧条件下,有机质仍可通过发酵、产乙酸等厌氧代谢途径被分解,并在过程中释放 CO₂ [11]。尤其是在水位发生波动的湿地,干湿交替显著改变土壤通气状况,使微生物群落结构和代谢途径迅速调整,往往引发土壤有机碳矿化增强,形成明显的 CO₂ 排放脉冲[12]。因此,湿地 CO₂ 排放是水文过程、植物生理活动与微生物代谢共同作用的结果,其时空变异性显著,受植被类型、水位变化幅度及土壤有机碳性质的综合调控[13]。

2.2. 关键驱动因子对 CO₂ 排放的调控

水分条件是影响湿地 CO₂ 排放的主导因子之一(见表 2)。长期水淹抑制好氧分解,降低 CO₂ 排放,而水位下降或干湿交替则增强土壤通气性,刺激好氧微生物活性,导致 CO₂ 排放显著增加[14]。温度升高普遍加快微生物代谢速率和植物根系呼吸,从而促进 CO₂ 排放[15]。土壤有机碳的含量与质量直接决定微生物可利用底物的供给水平:易分解有机碳的增加通常会显著刺激微生物代谢活性,加快土壤有机质矿化过程,从而增加 CO₂ 排放[16],而结构复杂的有机碳则更倾向于在土壤中长期积累。此外,pH 通过影响微生物群落结构和酶活性间接调控 CO₂ 产生,中性条件通常有利于好氧分解过程[17]。

3. 湿地 CH₄ 排放机制及其关键驱动因子

3.1. CH₄ 的产生、氧化与传输过程

甲烷排放是湿地生态系统区别于其他陆地生态系统的显著特征之一[18]。CH₄ 的产生完全依赖于严格厌氧条件下产甲烷古菌的代谢活动,其底物主要来源于有机质厌氧分解过程中形成的乙酸、氢气和 CO₂ [17][19]。在湿地土壤中,随着氧化还原电位的降低,微生物代谢逐步由硝酸盐还原、铁锰还原和硫酸盐还原等过程转向产甲烷过程,从而启动 CH₄ 的大量生成[20]。

需要指出的是,湿地土壤中产生的 CH₄ 并非全部释放至大气。在土壤表层或植物根际形成的微氧环境中,甲烷氧化菌可将部分 CH₄ 氧化为 CO₂,从而显著降低净排放通量[21]。已有研究表明,在某些湿地生态系统中,甲烷氧化过程可消耗超过一半的潜在甲烷产量。最终进入大气的 CH₄ 取决于产生、氧化和传输三者之间的动态平衡。在传输过程中,除分子扩散和气泡逸出外,植物通气组织介导的传输途径在许多湿地中占据主导地位。挺水植物发达的通气组织不仅为根际提供氧气,同时也为 CH₄ 提供了一条绕过氧化层的“快速通道”,从而增强甲烷排放[22][23]。由此可见,湿地 CH₄ 排放高度依赖于水文条件和植被结构,是多种生物地球化学过程耦合的结果(见表 1)。

Table 1. Production and consumption processes of three major greenhouse gases
表 1. 三种主要温室气体的产生与消耗过程

气体	主要产生过程	主要消耗过程	传输途径
CO ₂	植物自养呼吸、微生物好氧分解、 厌氧代谢(发酵、产乙酸)	植物光合作用固定	分子扩散
CH ₄	产甲烷古菌代谢 (乙酸发酵、H ₂ /CO ₂ 还原、甲基化合物转化)	甲烷氧化菌氧化 (好氧/厌氧甲烷氧化)	分子扩散、气泡逸出、 植物通气组织运输
N ₂ O	硝化作用(氨氧化微生物)、 反硝化作用(不完全还原)	完全反硝化(还原为 N ₂)、 ANAMMOX 过程	分子扩散、植物介导

3.2. 关键驱动因子对 CH₄ 排放的调控

水分条件是控制 CH₄ 排放的核心因子(见表 2)。长期水淹造成的强还原环境有利于产甲烷过程，同时抑制甲烷氧化，导致 CH₄ 净排放升高[14] [24]。温度对 CH₄ 排放的影响尤为敏感，因为产甲烷古菌对温度升高的响应强烈，且温度同时影响产甲烷和甲烷氧化过程的速率。尽管多数研究认为温度升高会促进 CH₄ 排放[15] [25]，但不同湿地类型之间的响应强度存在明显差异。值得注意的是，升温效应并非独立发生。有长期野外试验发现，升温本身可促进 CH₄ 排放，但升温与升高 CO₂ 共同作用时，植物介导的根际氧输入及植物-微生物反馈可降低净 CH₄ 通量[26]。因此，温度效应还受到大气 CO₂ 浓度、水位、植被性状和碳底物供给的共同调控。土壤有机碳为产甲烷过程提供底物，易分解有机碳含量高的湿地通常具有更高的 CH₄ 排放潜力[27]。pH 通过影响产甲烷古菌和甲烷氧化菌的活性发挥作用：中性 pH 条件最有利于产甲烷过程，而酸性条件则显著抑制产甲烷古菌活性，降低 CH₄ 排放[17] [28]。氧化还原电位(Eh)直接决定产甲烷过程是否启动，随着 Eh 持续降低，产甲烷过程逐渐增强；在许多湿地土壤中，较强还原条件(常见 Eh 低于约-150 mV)有利于产甲烷过程占据优势，但具体阈值受土壤类型、电子受体供应和底物条件影响[29]。

Table 2. Impact of main environmental driving factors on emissions of three greenhouse gases
表 2. 主要环境驱动因子对三种温室气体排放的影响

驱动因子	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	主要作用机制	文献
水分条件	干湿交替↑； 长期淹水↓	长期淹水↑； 水位波动复杂	干湿交替↑； 完全淹水↓	调控氧气扩散与 氧化还原状态	[14] [20]
温度	↑	↑↑	↑	影响微生物酶活性 与植物生理过程	[15] [24]
土壤有机碳	易分解碳↑↑	提供产甲烷底物↑	通过碳氮耦合间接影响	底物供应与 微生物可利用性	[16] [27]
pH	中性条件↑	中性↑；酸性↓	酸性→ N ₂ O 积累	影响微生物群落 结构与酶活性	[17] [28]
氧化还原电位	Eh 降低→厌氧分解 替代好氧分解	Eh < -150 mV 时 产甲烷启动	氧化还原梯度促进 硝化-反硝化耦合	决定微生物 代谢途径	[20] [29]
微生物过程	分解者群落结构与活性	产甲烷菌 vs. 甲烷氧化菌平衡	硝化菌、反硝化菌、 ANAMMOX 菌丰度	直接催化碳氮转化	[17] [30]
外源氮输入	间接(改变碳氮耦合)	间接(影响有机碳分解)	↑↑ (提供底物)	增加硝化/ 反硝化底物供应	[7] [31]

注：↑：促进排放；↑↑：高度敏感或显著促进排放；↓：抑制排放；→：导致或转向。表中方向表示多数研究报道的总体趋势，实际响应受湿地类型、水文状态、底物供应和研究尺度影响，可能存在差异。

4. 湿地 N₂O 排放机制及其关键驱动因子

4.1. N₂O 的产生与消耗过程

湿地 N₂O 排放主要与土壤氮循环过程密切相关, 其生成途径包括硝化作用、反硝化作用以及二者的耦合过程(见表 1)。在充氧或微氧条件下, 氨氧化微生物在硝化过程中可产生 N₂O; 而在厌氧环境中, 反硝化作用若反应不完全, 也会以 N₂O 作为中间产物释放[30]。

在天然湿地生态系统中, 由于长期水淹导致的强还原环境, 反硝化过程往往能够进行至完全阶段, N₂O 最终被还原为 N₂, 从而使湿地整体表现为 N₂O 的弱源甚至汇[31]。然而, 当湿地水位发生波动或外源氮输入增加时, 土壤中氧化还原条件的时空异质性显著增强, 硝化与反硝化过程在空间和时间尺度上发生耦合, 从而为 N₂O 的生成提供有利条件[32]。这也是农田湿地、受扰动湿地和恢复初期湿地中 N₂O 排放相对较高的重要原因。此外, 厌氧氨氧化(ANAMMOX)可在缺氧条件下以 NO₂⁻ 为电子受体, 将 NH₄⁺ 直接转化为 N₂, 从而形成区别于硝化 - 反硝化的氮去除途径, 并具有降低 N₂O 生成风险的潜力[33]。

4.2. 关键驱动因子对 N₂O 排放的调控

水分条件和氧化还原状态是调控 N₂O 排放的关键(见表 2)。完全厌氧条件下反硝化彻底, N₂O 排放低; 而干湿交替或水位波动造成的氧化还原梯度则促进硝化 - 反硝化耦合, 导致 N₂O 脉冲式排放[32] [34]。温度通过影响硝化和反硝化微生物的活性调控 N₂O 产生速率, 但不同功能微生物的温度敏感性存在差异[15]。土壤 pH 对 N₂O 排放具有显著影响: 偏中性条件有利于反硝化过程的完全进行, 从而降低 N₂O/N₂ 比值; 而酸性条件则可能抑制 N₂O 还原酶活性, 导致 N₂O 积累[28]。外源氮输入(如氮沉降或农业面源污染)显著增加了硝化和反硝化作用的底物供应, 是驱动湿地 N₂O 排放增强的重要人为因素[7]。

5. 湿地固碳机理与协同管理策略

5.1. 湿地固碳机理概述

湿地生态系统的固碳能力源于高碳输入和低分解速率的协同作用。湿地植物通常具有较高的初级生产力, 其凋落物和根系输入为土壤有机碳积累提供了持续来源[11]。同时, 长期或周期性厌氧环境显著抑制了微生物对有机质的分解, 使大量有机碳得以在土壤中保存。

在土壤中, 有机碳可通过多种途径实现长期稳定, 包括团聚体结构的物理保护、有机碳与矿物质结合形成的化学稳定性以及微生物残体对稳定碳库的重要贡献[35]。此外, 在河湖型湿地和滨海湿地中, 沉积作用和外源物质输入对碳埋藏过程同样具有重要影响。近年来的研究表明, 湿地恢复和再湿化措施通常可显著增强碳汇功能, 但同时也可能导致 CH₄ 排放增加, 使湿地的净气候效应具有较大不确定性[36] [37]。

5.2. 基于机理的协同管理策略

基于前文对三种温室气体排放机理及关键驱动因子的分析, 可在湿地保护与恢复实践中采取以下协同管理策略, 以最大化固碳功能并最小化温室气体净排放:

(1) 水文调控: 水位管理是调控湿地温室气体平衡最有效的杠杆。研究表明, 当地下水位接近地表时, CO₂、CH₄ 和 N₂O 的净排放量最低[24]。因此, 恢复自然水文节律、避免过度排水或长期深淹, 可在抑制土壤有机质好氧分解(减少 CO₂)的同时, 避免产甲烷过程过度增强(控制 CH₄)。对于已退化的湿地, 再湿化是恢复碳汇功能的核心措施, 但需关注初期可能出现的 CH₄ 脉冲排放, 并通过逐步水位抬升或季节性调控加以缓解。

(2) 植被恢复与管理: 植被选择与配置对温室气体平衡具有重要影响。优先恢复具有发达通气组织且

根系深度适中的挺水植物,可在一定程度上促进 CH_4 传输,但同时增强根际甲烷氧化能力,从而降低净 CH_4 排放。避免引入生物量极大且根系极深的植物种类,以防止根系呼吸和根际激发效应导致的 CO_2 排放大幅增加。在氮污染严重的区域,可配置对氮素吸收能力强的植物群落,减少硝化-反硝化作用的底物供应,从而降低 N_2O 排放。

(3) 养分管理:控制外源氮输入是减少湿地 N_2O 排放的关键。在恢复实践中,应优先选择远离农业面源污染或具有自然缓冲带的区域;对于受氮污染影响的湿地,可通过构建生态缓冲带、恢复湿地周边植被过滤带等方式削减氮输入。此外,避免在湿地恢复过程中施用有机肥或氮肥,以防止短期内 N_2O 爆发式排放。

(4) 权衡与协同:上述管理策略之间可能存在权衡关系。例如,再湿化在增加碳固存的同时可能短期内提高 CH_4 排放;植被恢复既增强碳输入又可能增加呼吸排放。因此,管理决策应基于综合气候效应评估(如百年尺度全球增温潜势),而非单一气体通量。总体而言,恢复接近自然状态的水文条件和植被结构,往往是实现固碳与减排协同的最优路径。

6. 研究挑战与展望

6.1. 方法学挑战:观测技术与模型不确定性

当前湿地温室气体研究面临重要的方法学挑战。静态箱法和涡度相关法是两种主流观测手段,但各有优劣。静态箱法成本较低、便于多点布设和区分不同气体,但可能因箱体效应(如温湿度变化、气压扰动)引入测量误差,且时间代表性有限[38]。涡度相关法可实现连续、非破坏性的生态系统尺度通量观测,但要求下垫面均匀、夜间湍流混合充分,且无法区分不同气体产生过程,设备成本高、数据后处理复杂。两种方法的系统差异可能导致对湿地温室气体通量估算的偏差,未来研究应加强方法间的交叉验证与数据融合。

在模型模拟方面,现有生物地球化学模型(如 DNDC、CLM-Microbe、wetland-DNDC)对湿地温室气体排放的预测仍存在较大不确定性。主要来源包括:对水位波动下产甲烷与甲烷氧化过程的动态响应刻画不足、缺乏对微生物功能群(如产甲烷古菌与甲烷氧化菌)丰度与活性的机理表达、对干湿交替引发的碳氮耦合过程简化处理过多。未来模型发展应加强过程尤其是微生物过程的显式表征,并利用长期观测数据进行严格校验。

6.2. 展望

湿地生态系统作为全球碳氮循环的关键节点,其 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放是多种生物地球化学过程在时空尺度上耦合的结果。未来研究需要从单一气体和短期观测转向多温室气体综合评估、微生物过程速率定量表征以及环境因子交互作用机制的深入解析,同时加强长期尺度研究与观测-模型融合,以提升对湿地净气候效应的综合评估能力,为湿地生态系统的科学管理与气候调节功能最大化提供理论支撑。

基金项目

山东省自然科学基金青年基金(ZR2025QC226);2025 年山东四湖省级自然保护区生态保护和高质量发展科研项目。

参考文献

- [1] Stewart, A.J., Halabisky, M., Babcock, C., Butman, D.E., D'Amore, D.V. and Moskal, L.M. (2024) Revealing the Hidden Carbon in Forested Wetland Soils. *Nature Communications*, **15**, Article No. 726. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44888-x>

- [2] Fluet-Chouinard, E., Stocker, B.D., Zhang, Z., Malhotra, A., Melton, J.R., Poulter, B., *et al.* (2023) Extensive Global Wetland Loss over the Past Three Centuries. *Nature*, **614**, 281-286. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05572-6>
- [3] Cao, M., Wang, F., Ma, S., Geng, H. and Sun, K. (2024) Recent Advances on Greenhouse Gas Emissions from Wetlands: Mechanism, Global Warming Potential, and Environmental Drivers. *Environmental Pollution*, **355**, Article ID: 124204. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124204>
- [4] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [5] 李美霖, 牟长城, 孙梓淇, 等. 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[J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2256-2269.
- [6] 黄逸晨, 尤育克, 姚可侃, 等. 西溪湿地典型植被和水体温室气体排放通量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2026, 45(6): 1956-1965.
- [7] Chen, M., Chang, L., Zhang, J., Guo, F., Vymazal, J., He, Q., *et al.* (2020) Global Nitrogen Input on Wetland Ecosystem: The Driving Mechanism of Soil Labile Carbon and Nitrogen on Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Science and Ecotechnology*, **4**, Article ID: 100063. <https://doi.org/10.1016/j.esc.2020.100063>
- [8] Yu, H., Zhang, X., Meng, X., Luo, D., Yue, Z., Li, Y., *et al.* (2023) Comparing the Variations and Influencing Factors of CH₄ Emissions from Paddies and Wetlands under CO₂ Enrichment: A Data Synthesis in the Last Three Decades. *Environmental Research*, **228**, Article ID: 115842. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115842>
- [9] 刘力, 张雅, 黄加劲, 等. 武汉沉湖湿地土壤 CO₂ 通量对环境因子的响应[J]. 湿地科学与管理, 2025, 21(4): 8-15.
- [10] 刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅. 辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO₂ 交换及其环境调控[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 920-928.
- [11] Lu, W., Xiao, J., Liu, F., Zhang, Y., Liu, C. and Lin, G. (2016) Contrasting Ecosystem CO₂ Fluxes of Inland and Coastal Wetlands: A Meta-Analysis of Eddy Covariance Data. *Global Change Biology*, **23**, 1180-1198. <https://doi.org/10.1111/gcb.13424>
- [12] Jiang, D., Chen, L., Xia, N., Norgbey, E., Koomson, D.A. and Darkwah, W.K. (2020) Elevated Atmospheric CO₂ Impact on Carbon and Nitrogen Transformations and Microbial Community in Replicated Wetland. *Ecological Processes*, **9**, Article No. 57. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00267-0>
- [13] Richardson, J.L., Desai, A.R., Thom, J., Lindgren, K., Laudon, H., Peichl, M., *et al.* (2024) Correction: On the Relationship between Aquatic CO₂ Concentration and Ecosystem Fluxes in Some of the World's Key Wetland Types. *Wetlands*, **44**, Article No. 76. <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01834-3>
- [14] Zhao, J., Malone, S.L., Oberbauer, S.F., Olivas, P.C., Schedlbauer, J.L., Staudhammer, C.L., *et al.* (2019) Intensified Inundation Shifts a Freshwater Wetland from a CO₂ Sink to a Source. *Global Change Biology*, **25**, 3319-3333. <https://doi.org/10.1111/gcb.14718>
- [15] Liu, Y., Liu, G., Xiong, Z. and Liu, W. (2017) Response of Greenhouse Gas Emissions from Three Types of Wetland Soils to Simulated Temperature Change on the Qinghai-Xizang Plateau. *Atmospheric Environment*, **171**, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.005>
- [16] Wang, S., Liu, T., Zhu, E., He, C., Shi, Q. and Feng, X. (2024) Potential Retention of Dissolved Organic Matter by Soil Minerals during Wetland Water-Table Fluctuations. *Water Research*, **254**, Article ID: 121412. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121412>
- [17] Serrano-Silva, N., Sarria-Guzmán, Y., Dendooven, L. and Luna-Guido, M. (2014) Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review. *Pedosphere*, **24**, 291-307. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(14\)60016-3](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(14)60016-3)
- [18] Liu, H., Pan, Z., Bai, Y., Xu, S., Wu, Z., Ma, J., *et al.* (2024) Methanogens Dominate Methanotrophs and Act as a Methane Source in Aquaculture Pond Sediments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **288**, Article ID: 117317. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117317>
- [19] Ma, Z., Lu, M., Jin, H., Sheng, X., Wei, H., Yang, Q., *et al.* (2023) Greenhouse Gas Emissions and Environmental Drivers in Different Natural Wetland Regions of China. *Environmental Pollution*, **330**, Article ID: 121754. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121754>
- [20] Zhang, T., Liu, X. and An, Y. (2020) Fluctuating Water Level Effects on Soil Greenhouse Gas Emissions of Returning Farmland to Wetland. *Journal of Soils and Sediments*, **20**, 3857-3866. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02730-z>
- [21] 黄颖彦, 梁永健, 叶梦茜, 等. 典型湿地大气 CO₂ 和 CH₄ 浓度变化特征分析[J]. 环境科技, 2025, 38(4): 66-70.
- [22] Carmichael, M.J., Bernhardt, E.S., Bräuer, S.L. and Smith, W.K. (2014) The Role of Vegetation in Methane Flux to the Atmosphere: Should Vegetation Be Included as a Distinct Category in the Global Methane Budget? *Biogeochemistry*, **119**, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9974-1>
- [23] Jeffrey, L.C., Maher, D.T., Johnston, S.G., Kelaher, B.P., Steven, A. and Tait, D.R. (2019) Wetland Methane Emissions

- Dominated by Plant-Mediated Fluxes: Contrasting Emissions Pathways and Seasons within a Shallow Freshwater Subtropical Wetland. *Limnology and Oceanography*, **64**, 1895-1912. <https://doi.org/10.1002/lno.11158>
- [24] Zou, J., Ziegler, A.D., Chen, D., McNicol, G., Ciais, P., Jiang, X., *et al.* (2022) Rewetting Global Wetlands Effectively Reduces Major Greenhouse Gas Emissions. *Nature Geoscience*, **15**, 627-632. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00989-0>
- [25] 王勇思, 孙丽, 王宪伟, 等. 温度升高对中国东北地区湿地温室气体通量的影响研究进展[J]. 湿地科学, 2024, 22(5): 808-821.
- [26] Noyce, G.L., Smith, A.J., Kirwan, M.L., Rich, R.L. and Megonigal, J.P. (2023) Oxygen Priming Induced by Elevated CO₂ Reduces Carbon Accumulation and Methane Emissions in Coastal Wetlands. *Nature Geoscience*, **16**, 63-68. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01070-6>
- [27] Hodgkins, S.B., Tfaily, M.M., McCalley, C.K., Logan, T.A., Crill, P.M., Saleska, S.R., *et al.* (2014) Changes in Peat Chemistry Associated with Permafrost Thaw Increase Greenhouse Gas Production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 5819-5824. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314641111>
- [28] Liu, B., Mørkved, P.T., Frostegård, Å. and Bakken, L.R. (2010) Denitrification Gene Pools, Transcription and Kinetics of NO, N₂O and N₂ Production as Affected by Soil pH. *FEMS Microbiology Ecology*, **72**, 407-417. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00856.x>
- [29] 李华超, 陈宗晶, 陈章和. 六种湿地植物根际氧化还原电位的日变化[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5766-5773.
- [30] 汤亚芳, 温馨, 翟兆庆, 等. 湿地 N₂O 排放及微生物驱动机制研究进展[J]. 化学与生物工程, 2024, 41(10): 17-24.
- [31] Gao, D., Hou, L., Liu, M., Li, X., Zheng, Y., Yin, G., *et al.* (2020) Mechanisms Responsible for N₂O Emissions from Intertidal Soils of the Yangtze Estuary. *Science of the Total Environment*, **716**, Article ID: 137073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137073>
- [32] 李燕, 江英辉, 谢正磊, 等. 鄱阳湖湿地河湖交错带沉积物 N₂O 产生途径及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2025, 45(10): 437-451.
- [33] Negi, D., Verma, S., Singh, S., Daverey, A. and Lin, J. (2022) Nitrogen Removal via Anammox Process in Constructed Wetland—A Comprehensive Review. *Chemical Engineering Journal*, **437**, Article ID: 135434. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135434>
- [34] 赵月琴, 马秀静, 赵婉婧, 张治军, 孙晓新. 三江平原垦殖湿地恢复对温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2142-2152.
- [35] Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Denef, K. and Paul, E. (2013) The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) Framework Integrates Plant Litter Decomposition with Soil Organic Matter Stabilization: Do Labile Plant Inputs Form Stable Soil Organic Matter? *Global Change Biology*, **19**, 988-995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- [36] Li, T., Canadell, J.G., Yang, X., Zhai, P., Chao, Q., Lu, Y., *et al.* (2022) Methane Emissions from Wetlands in China and Their Climate Feedbacks in the 21st Century. *Environmental Science & Technology*, **56**, 12024-12035. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01575>
- [37] Schuster, L., Taillardat, P., Macreadie, P.I. and Malerba, M.E. (2024) Freshwater Wetland Restoration and Conservation Are Long-Term Natural Climate Solutions. *Science of the Total Environment*, **922**, Article ID: 171218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171218>
- [38] Yu, L., Wang, H., Wang, G., Song, W., Huang, Y., Li, S., *et al.* (2013) A Comparison of Methane Emission Measurements Using Eddy Covariance and Manual and Automated Chamber-Based Techniques in Xizang Plateau Alpine Wetland. *Environmental Pollution*, **181**, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.018>