

滨海湿地CO₂通量排放研究综述：产生机制与影响因素

李博文^{1,2}, 梁爽^{1,2}, 周晓晴^{1,2}, 刘惠茹^{1,2}, 周志雄^{1,2}, 王晓宇^{1,2}, 梁健^{1,2}, 郭永军^{1,2*}, 陈春秀^{3*}

¹天津农学院水产学院天津市水产生态养殖重点实验室, 天津

²天津农学院农业农村部智慧养殖重点实验室(省部共建), 天津

³天津市水产研究所, 天津

收稿日期: 2025年11月9日; 录用日期: 2025年11月30日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

全球气候变暖背景下, CO₂作为占比76%的主要温室气体, 其排放与吸收对气候影响显著。滨海湿地作为海陆过渡带关键生态系统, 既是CO₂重要源汇, 又因生态系统呼吸可能成为净碳源, 其CO₂通量规律对全球碳循环及“双碳”目标意义重大。本文综述表明, 滨海湿地CO₂产生以生态系统呼吸为核心, 含土壤呼吸与植物地上呼吸, 且与碳循环耦合; 传输依赖植物通气组织、气泡上浮等路径, 排放通量为光合吸收与呼吸排放的净差值。温度、湿度、盐分、潮汐等非生物因子, 植物生理与群落特征等生物因子, 及围垦养殖等人类活动共同调控通量。未来需强化观测技术整合、多因子耦合研究、长期定位观测及区域碳收支模型构建, 为湿地管理提供支撑。

关键词

滨海湿地, 二氧化碳通量, 湿地围垦养殖

A Review of CO₂ Flux Emissions from Coastal Wetlands: Generating Mechanisms and Influencing Factors

Bowen Li^{1,2}, Shuang Liang^{1,2}, Xiaoqing Zhou^{1,2}, Huiru Liu^{1,2}, Zhixiong Zhou^{1,2}, Xiaoyu Wang^{1,2}, Jian Liang^{1,2}, Yongjun Guo^{1,2*}, Chunxiu Chen^{3*}

¹Tianjin Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture, College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin

²Key Laboratory of Smart Breeding (Co-Construction by Ministry and Province, Ministry of Agriculture and Rural Affairs), Tianjin Agricultural University, Tianjin

*通讯作者。

文章引用: 李博文, 梁爽, 周晓晴, 刘惠茹, 周志雄, 王晓宇, 梁健, 郭永军, 陈春秀. 滨海湿地 CO₂通量排放研究综述: 产生机制与影响因素[J]. 水产研究, 2025, 12(4): 220-227. DOI: 10.12677/ojfr.2025.124025

³Tianjin Fisheries Research Institute, Tianjin

Received: November 9, 2025; accepted: November 30, 2025; published: December 11, 2025

Abstract

Under the backdrop of global climate warming, CO₂, accounting for 76% of greenhouse gas emissions, significantly impacts the climate through its emission and absorption processes. As a key transitional ecosystem between land and sea, coastal wetlands serve as both a major source and sink for CO₂. Due to ecosystem respiration, they may also become net carbon sources. The patterns of CO₂ flux in these wetlands hold critical significance for the global carbon cycle and the “dual carbon” goals. This review indicates that CO₂ production in coastal wetlands is primarily driven by ecosystem respiration, encompassing soil respiration and aboveground plant respiration, and is coupled with the carbon cycle. Transmission relies on pathways such as plant aerenchyma and bubble rise, with net flux resulting from the difference between photosynthetic uptake and respiratory emissions. Nonbiotic factors like temperature, humidity, salinity, and tides, as well as biotic factors including plant physiology and community characteristics, along with human activities such as reclamation and aquaculture, collectively regulate flux. Future efforts should focus on integrating observational technologies, multi-factor coupling research, long-term monitoring, and the development of regional carbon budget models to support wetland management.

Keywords

Coastal Wetlands, Carbon Dioxide Flux, Wetland Reclamation and Aquaculture

Copyright © 2025 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

全球气候变暖,作为当今人类生存与发展所面临的关键环境挑战,其主要成因是二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)及氧化亚氮(N₂O)等温室气体浓度的持续上升[1]。IPCC 的评估报告进一步指出,自工业革命以来,主要温室气体在大气中的含量已显著增加,其中 CO₂ 的排放贡献率高达约 76%,是温室气体中最主要的组分[2]。尽管其单位时间尺度的全球变暖潜能值低于 CH₄ 和 N₂O,但由于其庞大的排放基数,对全球气候变暖的累积贡献居于首位[3],全球变暖的 90%以上可归因于包括 CO₂ 在内的温室气体浓度升高[4]。

滨海湿地是一种介于海洋与陆地之间的特殊生态系统[5]。该生态系统对全球气候变化的影响比较敏感,同时滨海湿地对气候变化造成的反馈作用也引起了广泛的关注[6]。大量研究表明,湿地虽仅占地球陆地表面积的 6%,却是 CO₂ 的关键源与汇[7]。滨海湿地作为海岸带重要的过渡区域,单位面积碳埋藏速率比陆地生态系统高出很多[8],但其生态系统呼吸作用又可能使其成为大气的净碳源。由于能够接纳大量由人类活动产生的含碳物质,滨海湿地拥有巨大的碳储量。当前研究正日益聚焦于该生态系统中 CO₂ 的源汇过程及其对大气环境变化的响应机制。研究滨海湿地 CO₂ 的排放规律与影响因素,其核心价值在于:一方面,它能够揭示湿地碳循环的关键生物地球化学机制;另一方面,该研究旨在评估其与气候系统的相互作用如何影响生态系统稳定,从而为“双碳”背景下的气候预测提供不可或缺的科学参考。

在过去的几十年里,国内外对滨海湿地 CO₂ 排放进行了许多相关研究。如 Hirota 等在日本沿海泻湖

对 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的通量进行了相关研究[9]。Chmura 证实沿海湿地能封存大量 CO_2 [10], Wilson 等则发现沿海湿地可能因较高的生态系统呼吸作用成为净碳源[11]。人类在沿海地区进行的水产养殖活动也会对 CO_2 的排放造成影响[12]。目前由于滨海湿地 CO_2 通量受潮汐波动、植被类型、土壤特性等生物和非生物因素时空差异性影响显著,且部分观测手段仍有局限,导致 CO_2 源汇估算存在不确定性。本文根据目前的研究现状,对滨海湿地 CO_2 通量时空特征以及影响因素等进行了综述,并对未来的研究方向进行了展望。

2. 滨海湿地 CO_2 产生过程与机制

2.1. 滨海湿地 CO_2 的产生

在湿地生态系统 CO_2 研究中,生态系统呼吸是描述其 CO_2 排放的常用概念,该过程主要包含土壤呼吸与植物地上部分呼吸两大类型。

其中,土壤呼吸指未受扰动的土壤中各类产生 CO_2 的代谢过程,具体涵盖土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸三个生物学过程,以及一个非生物学过程。作为生态系统中土壤与大气间 CO_2 交换的关键输出途径,土壤呼吸直接决定土壤碳素周转速率,且对未来大气 CO_2 浓度变化具有重要影响。

植物地上部分呼吸则是植物在不同供氧条件下的有机物分解过程:有氧环境中,植物会将有机化合物(以碳水化合物为例)氧化,反应式为 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 2821 \text{ kJ}$,此过程产生的能量可部分用于植物各项生命活动;而在供氧不足或无氧环境下,植物组织中的有机物会部分分解,仅产生少量 CO_2 并释放少量能量[13]。

此外,从碳循环视角看,滨海湿地中的植物、藻类等自养生物会通过光合作用将大气 CO_2 以有机物形式固定在体内,其掉落物及死亡后的根系残留于地下,逐渐形成沉积物有机质。在湿地土壤表层氧气充足的环境中,好氧微生物可分解这些有机质,再次将其以 CO_2 及其他气体形式释放到大气中[14]。

需注意的是,滨海湿地 CO_2 的产生强度并非固定,而是由植被类型及生长状态、土壤有机质含量及矿化速率、土壤微生物类群数量及活性、土壤动物呼吸作用等因素共同决定。

2.2. 滨海湿地 CO_2 传输及排放

湿地 CO_2 的传输与排放存在多条路径,主要包括植物叶片直接释放、土壤根系呼吸释放、植物体传输释放三类[15]。其中,土壤中产生的 CO_2 向大气排放的过程尤为关键,具体可通过三种方式实现:

- 1) 大部分 CO_2 会借助植物体的通气组织向上传输,最终排放到大气中;
- 2) 部分 CO_2 会在土壤中形成含 CO_2 的气泡,当气泡上升至水面并破裂后,便会释放到空气中;
- 3) 少量 CO_2 可依托水中的压力梯度,通过分子扩散作用排出。

从通量角度看,滨海湿地生态系统的 CO_2 排放通量并非单纯的产生量,而是植物光合吸收量与土壤排放量的差值,这一关系是衡量滨海湿地 CO_2 排放能力的重要依据。

3. 滨海湿地 CO_2 排放的影响因素

3.1. 非生物因素

3.1.1. 温度

在滨海湿地 CO_2 的产生、传输及排放过程中,温度是关键的环境驱动因子。已有研究明确,在非生物参数中,温度是 CO_2 外排率的最大贡献者[16],且滨海湿地 CO_2 排放通量与温度(气温、土温)的变化规律高度一致,其排放最高值与最低值基本对应于温度较高和较低的月份,充分体现温度对湿地碳气体排放的主导性影响。

温度主要通过调控呼吸作用与微生物分解过程,影响湿地 CO₂ 的产生量。在一定范围内,土壤呼吸随温度升高而增强,这直接反映了呼吸作用的温度依赖性动态[17][18],而较高温度会进一步增强系统呼吸作用,最终导致 CO₂ 通量交换增加[19][20]。从具体机制来看,温度升高可显著改善微生物活动[21],加快微生物对有机质的分解速率,同时增强植物根系呼吸;此外,温度还会通过增加植株密度、提升有机碳源供应量[22],为 CO₂ 产生提供更多物质基础。这种影响在季节动态中表现为,夏季高温环境下,微生物活动受温度驱动显著增强,土壤呼吸水平随之升高,因此 CO₂ 排放量通常在夏季达到较高水平,与温度的季节变化规律直接吻合。

温度不仅影响 CO₂ 产生,还会加快其向大气的传输速率,温度升高可显著提升土壤 CO₂ 向大气的传输速率,使土壤释放到大气中的 CO₂ 量增多,同时还能通过促进植物体通气组织的功能,进一步增加土壤 CO₂ 经植物传输至大气的排放量,形成“产生-传输”协同增强的效应。

3.1.2. 湿度

湿度[以土壤含水量为核心表征]是调控滨海湿地 CO₂ 排放通量的关键环境因子,其与湿地 CO₂ 通量平衡呈显著正相关关系[23],这一关联的本质在于土壤含水量对滨海湿地土壤呼吸季节性动态的主导性影响[24]。学界普遍认为,滨海湿地土壤湿度对 CO₂ 排放通量的调控存在明确阈值效应:当土壤含水量较低时,水分会成为限制土壤呼吸的核心因素——此时滨海湿地土壤微生物活性、植物根系呼吸均因水分不足受抑,直接导致 CO₂ 产生量减少,进而降低排放通量;而当含水量超过特定阈值后(尤其在滨海湿地潮汐淹没或围垦区积水场景下),过高水分会显著降低土壤通气孔隙占比、减缓气体扩散速率,甚至加剧厌氧环境[25],阻碍土壤中生成的 CO₂ 向大气释放,最终导致 CO₂ 排放通量下降。

滨海湿地湿度对 CO₂ 排放通量的影响还体现出显著的季节差异。春季与秋季滨海湿地表层土壤易处于水分饱和状态(受季节性降雨与潮汐叠加影响),此时高含水量引发的厌氧环境、气体扩散限制效应更为显著。

3.1.3. 盐分

有研究表明,较高的土壤盐分含量会导致滨海湿地 CO₂ 排放量的增加[26],其作用机制可从三方面解释:一是盐渍化会改变土壤不稳定有机碳的可利用性,进而影响微生物介导的土壤有机矿化过程[27];二是盐渍化可能破坏土壤团聚体结构,间接作用于碳循环过程;三是盐渍化会改变土壤微生物群落结构,导致养分模式与可利用性发生变化,最终对 CO₂ 排放产生影响[28]。

但是也有研究表明,盐度过高也会对湿地 CO₂ 吸收过程产生抑制。极高盐度可能通过渗透胁迫作用,对湿地植物的光合活动产生负面影响[29],进一步改变 CO₂ 排放通量平衡。同时当盐度过高时,微生物会受到盐分胁迫,为维持细胞内渗透压平衡,其氧气消耗速率与自身盐析作用会加快,进而导致微生物活性降低、新陈代谢延缓,对土壤有机质的利用效率下降,最终使湿地土壤 CO₂ 排放量减少[30];同时,盐水入侵会带入大量 SO₄²⁻、Cl⁻ 等电子受体,这些物质在还原过程中产生的 H₂S 会对微生物产生显著毒害作用[31],进一步削弱微生物介导的 CO₂ 产生过程。

3.1.4. 潮汐

天文潮汐通过其驱动的物理与生物地球化学过程,对滨海湿地 CO₂ 通量产生核心调控作用。其首要机制表现为“潮汐泵”效应:退潮致使沉积物物理暴露,沉积物由厌氧环境转为好氧状态,氧化还原电位升高,从而显著增强了好氧微生物的矿化作用,促使大量 CO₂ 排放[32],通量峰值通常出现在低潮时期;而涨潮时,水体覆盖则抑制了沉积物-大气界面的气体扩散。表层沉积物的 Eh 值是控制 CO₂ 通量月度动态的关键环境因子。

其次,潮汐是驱动滨海湿地与近海系统之间横向碳交换的关键物理动力。潮汐往复运动如同“水下河流”,在涨潮时向湿地输入包括溶解无机碳(DIC)和有机碳在内的外源碳,退潮时则将湿地内生成的碳产物输出至外海。这一过程意味着,若要准确评估滨海湿地的碳汇能力,必须同时考虑这种潮汐驱动的水平碳通量,而不能仅仅测量垂直方向上的气-界交换,否则会严重低估其真实的碳收支[33]。

3.2. 生物因素

3.2.1. 湿地植物

滨海湿地生态系统的二氧化碳通量显著受到植物特征的影响,包括植物的生理活动、叶片厚度、冠层发育阶段以及物种组成等[34]。研究表明,月均净生态系统交换量与月均地上生物量和叶面积指数呈显著正相关[35],这表明高等植物群落的地上特征能有效反映生态系统的初级生产力[36]。此外,植物物种组成被认为是影响二氧化碳通量的关键环境变量,其重要性甚至可能超过土壤温度、空气温度或地下水位[37]。在滨海湿地中,不同植被类型因其根系结构和生理特性的差异,对土壤呼吸的贡献也不同。例如,互花米草作为草本植物具有发达的根系,能深入沉积物,其根系活动可引入氧气,刺激微生物活动,从而影响 CO_2 排放[38]。

生态系统的碳循环过程还涉及多个组分间的相互作用。在湿地,生态系统呼吸与总初级生产力之间存在显著相关性,凸显了植物地下部分活动和土壤微生物在碳固定过程中的重要性[39]。此外,碳、氮等营养物质的可用性也会通过影响植物生长和微生物活性,进一步调节 CO_2 的通量[40]。冬季冻融过程同样会影响 CO_2 的排放,冻融作用可以释放植物可利用的营养物质,促进植物在融冻期的生长,并伴随 CO_2 排放通量的增大[41]。

3.2.2. 人类活动

人类活动,特别是滨海湿地围垦和水产养殖,已显著改变了滨海湿地的碳循环过程,对 CO_2 通量排放产生了深远影响。这些活动通过直接改变土地利用方式、干扰土壤生物化学过程,进而影响湿地的“蓝碳”功能。

滨海湿地围垦为水产养殖塘,直接导致湿地从重要的碳汇转向为碳排放源。研究表明,自然滨海湿地原本具有强大的碳捕获与埋藏能力,是高效的“蓝色碳汇”系统[42]。然而,当自然湿地被围垦成养殖塘后,这种碳汇功能会严重受损。例如,对江苏盐城滨海湿地的研究发现,自然湿地转变为海水养殖塘后,其温室气体排放总量高达 $20.3 \text{ Mg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$,其中因土地利用方式转变导致的预期碳汇损失量就占了总排放量的67.8% (约 $13.8 \text{ Mg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) [43] [44]。闽江河口的研究同样证实,湿地转化为养虾塘后,沉积物有机碳的厌氧矿化速率显著提升[45]。

在水产养殖塘运营过程中,其自身的代谢活动及管理措施进一步加剧了 CO_2 的排放。养殖过程中投入的残饵和肥料富含有机质和氮、磷等营养物质,它们进入水体或沉积于底泥,为微生物的呼吸活动提供了充足的底物,从而增强了 CO_2 的产生。此外,养殖塘的排水、清淤等常规管理活动也不容忽视。排水行为会将前一养殖周期内积累的未消耗饵料和生物残留物直接暴露于大气中,刺激微生物的分解作用,并伴随大量的 CO_2 释放[46] [47]。

4. 结论与展望

滨海湿地 CO_2 通量的净平衡深刻影响着全球蓝碳收支,然而其源汇功能受生物地球化学过程与人类活动的复杂调控,当前认知仍存在关键空白。为支撑可预测的湿地管理与气候适应,未来研究亟需聚焦几个可操作的科学问题:首先,需阐明温度、盐分与潮汐等多环境因子对 CO_2 通量的非线性耦合机制,通过多因子控制实验与模型量化其交互效应,以预测气候变化下的湿地碳循环响应。其次,须厘清围垦

养殖导致湿地由碳汇转向碳源的关键生态阈值与主导过程,借助长期定位观测识别碳汇功能损失的临界条件与可逆性,为退塘还湿的生态修复提供依据。再者,必须精准评估潮汐驱动下的横向碳通量(如 DIC)对区域碳收支的贡献,整合水动力模型与高频原位监测,构建包含水平交换的全碳预算框架,避免碳汇能力被系统性低估。这些研究的突破将直接推动基于生态过程的蓝碳增汇技术研发,并为增强滨海湿地在气候变化背景下的韧性提供理论支撑与实践路径。

基金项目

国家重点研发计划(项目编号:2023YFD2400800)、天津市种业创新重大专项(项目编号:24ZXZYSN00010)、天津市科技计划项目(项目编号:23YDTPJC00560、24YDTPJC00820、24ZYCGSN01210)、天津市渔业绿色发展项目(项目编号:YYLSFZ202501)、现代农业产业技术体系专项资金资助(项目编号:CARS-49)、甘肃省科技计划项目(项目编号:24CXNA086)、海水养殖生物育种国家重点实验室开放课题资助课题(项目编号:2024KF00)。

参考文献

- [1] Nguyen, H., Youn, Y., Bui, D.T., Nguyen, T.H.Y., Dinh, D.T. and Ho, Q.T. (2023) Optimal Forest Management for Carbon Sequestration, Timber, and Bioenergy Production in Vietnam Using an Extended Full-Cycle Carbon Accounting Method. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 101192-101207. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29439-z>
- [2] (2025) IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch>
- [3] 周艳莲, 居为民, 柳艺博. 1981-2019 年全球陆地生态系统碳通量变化特征及其驱动因子[J]. 大气科学学报, 2022, 45(3): 332-344.
- [4] He, Y., Zhou, X., Jiang, L., Li, M., Du, Z., Zhou, G., *et al.* (2016) Effects of Biochar Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes: A Meta-Analysis. *GCB Bioenergy*, **9**, 743-755. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12376>
- [5] Sun, Z., Sun, W., Tong, C., Zeng, C., Yu, X. and Mou, X. (2015) China's Coastal Wetlands: Conservation History, Implementation Efforts, Existing Issues and Strategies for Future Improvement. *Environment International*, **79**, 25-41. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.02.017>
- [6] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量特征初步研究[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 51-61.
- [7] Olefeldt, D., Euskirchen, E.S., Harden, J., Kane, E., McGuire, A.D., Waldrop, M.P., *et al.* (2017) A Decade of Boreal Rich Fen Greenhouse Gas Fluxes in Response to Natural and Experimental Water Table Variability. *Global Change Biology*, **23**, 2428-2440. <https://doi.org/10.1111/gcb.13612>
- [8] Ouyang, X. and Lee, S.Y. (2014) Updated Estimates of Carbon Accumulation Rates in Coastal Marsh Sediments. *Biogeosciences*, **11**, 5057-5071. <https://doi.org/10.5194/bg-11-5057-2014>
- [9] Hirota, M., Senga, Y., Seike, Y., Nohara, S. and Kunii, H. (2007) Fluxes of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide in Two Contrastive Fringing Zones of Coastal Lagoon, Lake Nakaumi, Japan. *Chemosphere*, **68**, 597-603. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.002>
- [10] Chmura, G.L. (2013) What Do We Need to Assess the Sustainability of the Tidal Salt Marsh Carbon Sink? *Ocean & Coastal Management*, **83**, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.09.006>
- [11] Wilson, B.J., Mortazavi, B. and Kiene, R.P. (2015) Spatial and Temporal Variability in Carbon Dioxide and Methane Exchange at Three Coastal Marshes along a Salinity Gradient in a Northern Gulf of Mexico Estuary. *Biogeochemistry*, **123**, 329-347. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0085-4>
- [12] 杨平, 全川, 何清华, 等. 闽江口鱼虾混养塘水-气界面温室气体通量及主要影响因子[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1493-1503.
- [13] 张清磊. 胶州湾典型滨海湿地 CO₂ 排放通量研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [14] Friberg, T., Soegaard, H., Christensen, T.R., Lloyd, C.R. and Panikov, N.S. (2003) Siberian Wetlands: Where a Sink Is a Source. *Geophysical Research Letters*, **30**, 1-4. <https://doi.org/10.1029/2003gl017797>
- [15] 王蒙. 杭州湾滨海湿地 CH₄、N₂O、CO₂ 排放通量及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.

- [16] Subke, J., Reichstein, M. and Tenhunen, J.D. (2003) Explaining Temporal Variation in Soil CO₂ Efflux in a Mature Spruce Forest in Southern Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, **35**, 1467-1483. [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(03\)00241-4](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(03)00241-4)
- [17] Li, J., Nie, M. and Pendall, E. (2019) An Incubation Study of Temperature Sensitivity of Greenhouse Gas Fluxes in Three Land-Cover Types Near Sydney, Australia. *Science of The Total Environment*, **688**, 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.206>
- [18] Schaufler, G., Kitzler, B., Schindlbacher, A., Skiba, U., Sutton, M.A. and Zechmeister-Boltenstern, S. (2010) Greenhouse Gas Emissions from European Soils under Different Land Use: Effects of Soil Moisture and Temperature. *European Journal of Soil Science*, **61**, 683-696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>
- [19] Tang, L., Zhang, L., Yang, P., Tong, C., Yang, H., Tan, L., *et al.* (2023) Seasonal Variations in Source-Sink Balance of CO₂ in Subtropical Earthen Aquaculture Ponds: Implications for Carbon Emission Management. *Journal of Hydrology*, **626**, Article 130330. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130330>
- [20] Xiao, Q., Xu, X., Duan, H., Qi, T., Qin, B., Lee, X., *et al.* (2020) Eutrophic Lake Taihu as a Significant CO₂ Source during 2000-2015. *Water Research*, **170**, Article 115331. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115331>
- [21] Jenkinson, D.S., Adams, D.E. and Wild, A. (1991) Model Estimates of CO₂ Emissions from Soil in Response to Global Warming. *Nature*, **351**, 304-306. <https://doi.org/10.1038/351304a0>
- [22] 全川, 鄂焱, 廖稷, 等. 闽江河口潮汐沼泽湿地 CO₂ 排放通量特征[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2830-2840.
- [23] Xie, J., Yuan, Y., Wang, X., Zhang, R., Zhong, R., Zhai, J., *et al.* (2025) Impact of Coastal Beach Reclamation on Seasonal Greenhouse Gas Emissions: A Study of Diversified Saline-Alkaline Land Use Patterns. *Agriculture*, **15**, Article 1403. <https://doi.org/10.3390/agriculture15131403>
- [24] Wang, Y., Li, Q., Wang, H., Wen, X., Yang, F., Ma, Z., *et al.* (2011) Precipitation Frequency Controls Interannual Variation of Soil Respiration by Affecting Soil Moisture in a Subtropical Forest Plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, **41**, 1897-1906. <https://doi.org/10.1139/x11-105>
- [25] Ball, B.C. (2013) Soil Structure and Greenhouse Gas Emissions: A Synthesis of 20 Years of Experimentation. *European Journal of Soil Science*, **64**, 357-373. <https://doi.org/10.1111/ejss.12013>
- [26] Tan, L., Zhang, L., Yang, P., Tong, C., Lai, D.Y.F., Yang, H., *et al.* (2023) Effects of Conversion of Coastal Marshes to Aquaculture Ponds on Sediment Anaerobic CO₂ Production and Emission in a Subtropical Estuary of China. *Journal of Environmental Management*, **338**, Article 117813. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117813>
- [27] Chen, X., Luo, M., Tan, J., Zhang, C., Liu, Y., Huang, J., *et al.* (2022) Salt-Tolerant Plant Moderates the Effect of Salinity on Soil Organic Carbon Mineralization in a Subtropical Tidal Wetland. *Science of The Total Environment*, **837**, Article 155855. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155855>
- [28] Li, Y., Ge, Z., Xie, L., Li, S. and Tan, L. (2022) Effects of Waterlogging and Salinity Increase on CO₂ Efflux in Soil from Coastal Marshes. *Applied Soil Ecology*, **170**, Article 104268. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104268>
- [29] Teal, J.M. and Weishar, L. (2005) Ecological Engineering, Adaptive Management, and Restoration Management in Delaware Bay Salt Marsh Restoration. *Ecological Engineering*, **25**, 304-314. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.04.009>
- [30] Parmentier, F.J.W., van der Molen, M.K., de Jeu, R.A.M., Hendriks, D.M.D. and Dolman, A.J. (2009) CO₂ Fluxes and Evaporation on a Peatland in the Netherlands Appear Not Affected by Water Table Fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**, 1201-1208. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.11.007>
- [31] 聂明华, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口滩涂土壤呼吸季节变化及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 824-831.
- [32] 杨朋金. 裸露潮间带表观 CO₂ 通量的变化规律[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [33] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5141-5152.
- [34] Moreno-Sotomayor, A., Weiss, A., Paparozzi, E.T. and Arkebauer, T.J. (2002) Stability of Leaf Anatomy and Light Response Curves of Field Grown Maize as a Function of Age and Nitrogen Status. *Journal of Plant Physiology*, **159**, 819-826. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00809>
- [35] Verville, J.H., Hobbie, S.E., Chapin, F.S. and Hooper, D.U. (1998) Response of Tundra CH₄ and CO₂ Flux to Manipulation of Temperature and Vegetation. *Biogeochemistry*, **41**, 215-235. <https://doi.org/10.1023/a:1005984701775>
- [36] Flanagan, L.B. and Johnson, B.G. (2005) Interacting Effects of Temperature, Soil Moisture and Plant Biomass Production on Ecosystem Respiration in a Northern Temperate Grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **130**, 237-253. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.04.002>
- [37] 李姝臻, 刘强, 甘罗扬, 等. 东北典型盐碱湿地碳排放的水深临界阈值及其温度依赖性[J]. 湖泊科学, 2025, 37(1): 159-173.
- [38] Huang, Y., Wang, J., Wu, P., Duan, Z., Li, X. and Tang, J. (2025) Impacts of *Spartina Alterniflora* Invasion on Coastal

- Carbon Cycling within a Native *Phragmites Australis*-Dominated Wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **363**, Article 110405. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110405>
- [39] 程寅瑞, 查勇, 陈丽娟, 等. 盐城滨海湿地不同植被类型土壤呼吸[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4090-4097.
- [40] 项琦. 互花米草入侵对杭州湾潮滩湿地土壤及植物碳、氮、磷生态化学计量特征的影响[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2021.
- [41] 姜铭. 黄河三角洲滨海湿地生态系统碳交换过程对冬春增温与夏秋减雨的影响[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- [42] 林家洋, 宋哲岳, 李自民, 等. 滨海湿地碳汇和碳负排放技术研究进展[J]. 湿地科学, 2023, 21(2): 302-311.
- [43] Yuan, J., Dong, Y., Li, J., *et al.* (2025) Foregone Carbon Sequestration Dominates Greenhouse Gas Footprint in Aquaculture Associated with Coastal Wetland Conversion. *Nature Food*, **6**, 587-596.
- [44] (2025) Low Greenhouse Gas Emissions of Land-Based Mariculture Still Warrant Mitigation. *Nat Food*, **6**, 537-538. <https://doi.org/10.1038/s43016-025-01180-5>
- [45] 胡芳, 曹琼, 黄佳芳, 等. 河口沼泽湿地转化为养虾塘对土壤胞外酶活性及 CO₂ 和 CH₄ 产生潜力的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 460-470.
- [46] 杨平. 闽江河口湿地水产养殖塘水-气界面温室气体通量研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [47] 宋红丽. 围填海活动对黄河三角洲滨海湿地生态系统类型变化和碳汇功能的影响[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.