

王雪然, 万荣荣, 赵晓松, 等. 洪泛湿地甲烷排放机制与量化评估: 进展与挑战 [J]. 地理科学, 2025, 45(1): 23-35. [Wang Xueran, Wan Rongrong, Zhao Xiaosong et al. Mechanisms and quantitative assessment of methane emissions in floodplain wetlands: Progress and challenges. Geographical Science, 2025, 45(1): 23-35.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20230976; cstr: 32176.14.geoscien.20230976

洪泛湿地甲烷排放机制与量化评估: 进展与挑战

王雪然^{1,2}, 万荣荣^{1,2,3}, 赵晓松^{1,2}, 李婷婷⁴, 李冰^{1,2}, 杨素^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所/中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 211135;

2. 中国科学院大学南京学院, 江苏 南京 211135; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 洪泛湿地甲烷排放是全球甲烷收支的重要组成部分, 深入理解洪泛湿地甲烷排放, 对准量化区域甲烷收支具有重要意义。本文综述了洪泛湿地甲烷产生、氧化和传输的关键过程, 系统梳理了水文过程、植被、土壤特性、温度, 以及气候变化和人类活动对洪泛湿地甲烷排放的影响, 总结了加入全球碳计划的湿地甲烷过程模型及其发展历程, 并指出了洪泛湿地甲烷排放模拟面临的挑战, 包括水文过程动态变化、土壤特性梯度差异及湿地植被发育等。最后提出, 应加强复杂水文过程对洪泛湿地甲烷排放影响机制的研究, 将周期性水文变化、干湿交替的土壤特性及湿地植被变化纳入甲烷排放模拟中, 以改进洪泛湿地甲烷过程模型, 为实现碳中和目标提供科学支撑。

关键词: 洪泛湿地; 甲烷排放; 过程模型

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2025)01-0023-13

大气中温室气体质量浓度的上升是全球变暖的重要原因^[1-2], 其中二氧化碳和甲烷是最主要的 2 种温室气体。与二氧化碳相比, 甲烷的寿命更短, 全球变暖潜能更高^[3-4]。湿地是生物甲烷的最大单一排放源, 也是甲烷排放的主要区域之一^[5]。2020 年由于全球防疫措施的实施, 人为源甲烷排放量相比 2019 年有所减少, 但 2020 年大气甲烷质量浓度仍高于 2019 年, 湿地甲烷排放的增加是造成该现象的主要原因之一^[6]。

洪泛湿地(floodplain wetlands), 主要为河湖水情变化下的周边自然湿地, 包括季节性洪泛湿地和永久性洪泛湿地, 是重要的湿地生态系统, 全球分布广泛, 约占总湿地面积的 15%^[5,7-9]。水文过程对洪泛湿地水分传输起着关键调节或改变作用^[7], 直接参与了一系列物理、化学和生物过程, 造就了洪泛湿地土壤干湿交替以及湿地植被沿梯度分布并随季节演替的特征, 成为影响甲烷排放的主导控制因素^[10]。与其他类型的湿地相比, 学术界当前对洪泛湿地的甲烷收支仍缺乏系统性认识。一方面有学者认为, 洪泛湿地排放大量的甲烷, 是重要的甲烷源^[5], 另一方面, 相关研究也表明洪泛湿地在低水位时干燥的土壤会氧化甲烷, 成为甲烷汇^[11]。然而, 甲烷汇占甲烷源的比重较小^[12], 不同纬度的洪泛湿地即使在土壤干燥的情况下依然会排放大量甲烷^[13-14]。

收稿日期: 2023-10-01; **修订日期:** 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240219, 42071146)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (U2240219, 42071146).]

作者简介: 王雪然(1994—), 女, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要从事湿地碳循环研究。E-mail: wangxueran21@mailsucas.ac.cn

通信作者: 万荣荣。E-mail: rrwan@niglas.ac.cn

近年来国内外学者逐渐关注到洪泛湿地的高甲烷排放及其在区域甲烷收支中的重要作用^[15-19]。在全球甲烷评估中,湿地的甲烷排放量为 149 Tg/a^[5],而洪泛湿地广泛分布的亚马逊地区甲烷排放量高达 42.7±5.6 Tg/a^[20]。通常认为热带洪泛湿地甲烷排放较高^[15],但最新研究在亚热带、温带和寒带等洪泛湿地也观测到了大量的甲烷排放^[16-19]。如何实现对洪泛湿地甲烷收支的精准量化,是学术界面临的重要科学问题。当前评估湿地甲烷排放的方法包括多元回归统计、湿地甲烷过程模型、遥感卫星大气反演等^[21-22]。回归统计忽视了复杂的机理和过程,评估结果存在较大误差;卫星观测覆盖范围大,难以准确辨别不同来源的甲烷排放。基于生态机理的湿地甲烷过程模型已被广泛应用于甲烷收支模拟^[23],然而其在洪泛湿地生态系统甲烷模拟中的应用仍面临重大挑战,主要原因在于洪泛湿地具有季节性的水位波动、水文过程主导的土壤水分梯度特征以及不同植被覆盖和植被动态演替的复杂性,而通用的湿地甲烷过程模型无法定量刻画洪泛湿地甲烷排放的复杂过程^[24-25],因此洪泛湿地甲烷过程模型的开发与整合是湿地碳循环领域亟待解决的重要难题。

综上所述,本文以洪泛湿地甲烷排放过程为切入点,梳理其环境影响因素,总结全球碳计划中湿地甲烷过程模型的特点,探讨模型应用在洪泛湿地面临的挑战,指出未来改进方向,提高对洪泛湿地在碳循环中重要性的认识,服务于各国碳减排背景下对洪泛湿地生态系统的科学管理。

1 洪泛湿地甲烷排放过程

甲烷排放是产甲烷菌产生甲烷与氧化菌氧化甲烷之间的动态平衡^[26]。不同于水位常年稳定的其他类型湿地,洪泛湿地的干湿交替特征使甲烷排放过程在不同生境之间转化(图 1)。枯水期低水位时洪泛湿地为陆相,丰水期高水位时洪泛湿地为水相,甲烷排放界面也因水-陆相的转变而发生变化。

1) 甲烷产生过程。传统研究认为甲烷是由产甲烷菌在严格厌氧环境中产生的,是有机质分解的最终产物,主要归因于产甲烷菌的活性,产生途径有乙酸发酵型、氢营养型和甲基营养型^[27]。随着近年来甲烷产生机制研究逐渐深入,在湿地土壤有氧化层以及近表层水体中均发现了甲烷产生^[28-29],该现象被学术界称为“甲烷悖论”,有关湿地好氧产甲烷过程的相关研究也在逐步开展。

2) 甲烷氧化过程。湿地甲烷氧化是重要的甲烷汇,广泛发生在湿地土壤和沉积物中,主要由甲烷氧化菌来完成,方式有好氧氧化和厌氧氧化^[27]。甲烷好氧氧化以氧气为电子受体,发生在湿地有氧处,是甲烷氧化的主要方式^[30]。厌氧氧化发生在深层土壤或者厌氧沉积物中,有硫酸盐还原型、反硝化型以及铁锰氧化物作为电子受体的甲烷氧化方式^[31]。

3) 甲烷传输过程。湿地甲烷通过 3 种方式传输,扩散释放、冒泡释放和植物介导(图 1)。扩散释放是甲烷分子在质量浓度梯度下从高质量浓度向低质量浓度的一种传输过程,在

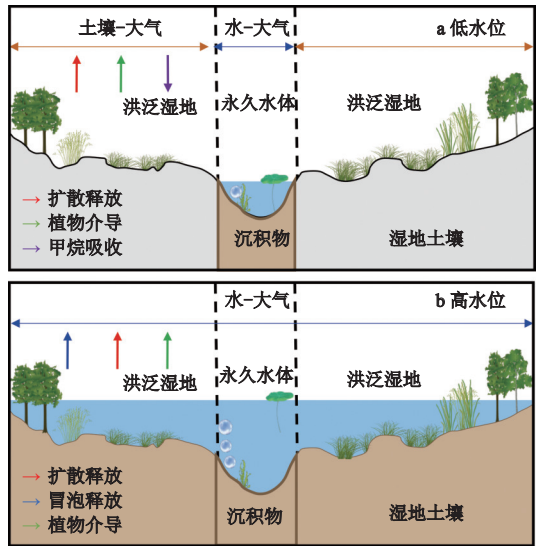


图 1 洪泛湿地在不同水位下的甲烷排放过程
Fig.1 Methane emission processes in floodplain wetlands at high and low water levels

土壤或水体表面均可发生^[32-33], 冒泡释放发生在水-气界面, 具有偶发性、传输效率高的特点^[33-34]。洪泛湿地甲烷排放过程的特殊性在于排放界面的转化, 低水位时, 湿地土壤大面积裸露, 甲烷排放在水-气界面进行, 传输方式为土壤扩散和植物介导; 高水位时, 湿地土壤被洪水淹没, 甲烷排放发生在水-气界面, 3 种传输方式同时进行。

2 洪泛湿地甲烷排放的主要环境影响因素

2.1 水文过程对甲烷排放的影响

水文过程是水文要素在时间上持续变化或周期变化的动态过程^[35], 主导洪泛湿地的基本生态格局, 作用于洪泛湿地甲烷产生、氧化和传输各个过程, 是影响甲烷通量的关键因素^[36], 短期水文过程也可以推动甲烷通量的快速改变^[37]。干湿交替会改变土壤的通透性、孔隙度、团聚体结构和可溶性有机碳等理化性质^[38]。地下水位波动影响湿地土壤有氧-缺氧的边界位置^[39], 产生有氧区和缺氧区, 决定甲烷产生和氧化的空间范围^[40]。由于水位对湿地甲烷通量的决定性作用, 国内外学者试图量化改变甲烷通量的临界水位。在不考虑植被介导传输下, Hondula 等根据拟合模型推算当水位埋深小于 25 cm 时土壤更有可能排放甲烷^[41], Otter 等对南非亚热带洪泛湿地研究中发现当水位在地表以下 10 cm 至地表以上 40 cm 时, 土壤会排放更多的甲烷^[11]。淹没深度的动态变化是洪泛湿地的另一个水文特征, 淹没深度控制甲烷的传输路径、传输方式以及氧气可用性等^[42]。较浅的淹没深度下甲烷更易排出^[43], 低静水压力下甲烷也更易通过冒泡释放^[34]。淹没深度增加, 甲烷从土壤到大气的传输路径增加, 甲烷在传输过程中更易被含氧水体氧化^[43], 水深高到淹没水生植物的通风结构时, 植物介导的甲烷排放也会减少^[44]。

淹水时间作为重要的水文特征变量, 对甲烷排放有显著影响。土壤经历较长时间的淹水易于形成缺氧环境^[45], 甲烷不易氧化, 而且缺氧土壤中的有机质含量通常高于有氧土壤^[46], 可提供更多底物供产甲烷菌分解, 增加甲烷产生量。持续淹水也可以提高产甲烷菌丰度和甲烷排放速率^[45,47]。

2.2 植被对甲烷排放的影响

洪泛湿地分布着广泛的湿地植物, 受水文过程影响表现出强烈异质性, 沿水文梯度分布着树木、挺水植物、湿生植物、漂浮植物和沉水植物等^[48]。由于植物可以为甲烷传输提供通道减少甲烷氧化, 洪泛湿地植物分布区的甲烷排放高于无植物分布区^[49]。植被对洪泛湿地甲烷通量的调节主要体现在植被覆盖和植被类型上, 不同植被类型的甲烷传输能力不同^[48]。就树木而言, 目前已知甲烷可以通过茎、叶以及根系等部位传输甲烷^[20], 挺水和湿生草本植物具有发达的通气组织, 其气体输导作用可以高效传输甲烷, 对洪泛湿地甲烷排放有很大促进作用^[50-51]。漂浮植物是影响湿地甲烷排放的植物类型之一, 最新研究表明漂浮植物可以通过创造有利于甲烷氧化的空间来减少湿地的甲烷通量, 抑制甲烷排放^[52]。此外, 植物还可以通过影响微生物代谢活性^[53]、作为有机物为产甲烷菌提供基质^[54]、通气组织向根系输送氧气促进甲烷氧化等机制对甲烷排放产生影响^[55]。

水文的季节变化影响湿地植被物候期, 最新研究揭示了物候对洪泛湿地甲烷通量的重要影响: 研究人员在非洲博茨瓦那的奥卡万戈三角洲甲烷通量研究中发现植物生长过程从日间到年际尺度调节甲烷通量, 原因之一是植物气孔输送甲烷的能力随生长过程有所差异^[26]。

2.3 土壤特性对甲烷排放的影响

湿地土壤是甲烷产生和氧化发生的重要场所。厌氧环境中, 土壤有机物的微生物降解主要通过无机电子受体和二氧化碳的还原作用来完成^[56]。硫酸盐还原菌、硝酸盐还原菌和铁锰还原菌等可与产甲烷菌竞争乙酸和电子受体, 减少甲烷排放^[27]。在硫酸盐质量浓度较

高的土壤中, 甲烷产生量会明显降低^[57]。

土壤有机质和微生物决定甲烷的产生或消耗, 土壤质地、pH 值、氧化还原电位(Eh)、含水量等理化性质影响有机质的分解、微生物活性, 进而影响甲烷通量^[32,58]。土壤质地会改变产甲烷的厌氧环境, 一般来说, 不同质地的土壤产生甲烷速率为沙土<砾土<黏土状粉沙<黏土^[32]。pH 反映土壤的酸碱程度, 产甲烷菌对 pH 反应较为敏感, 其活性通常在中性或者微碱性条件下最佳, 酸碱度过高或者过低可能使产甲烷菌丧失产甲烷能力^[58], 而甲烷氧化菌对土壤酸碱度没有产甲烷菌敏感^[32,59]。土壤 Eh 是厌氧程度的表征指标, 先前研究认为甲烷是在严格的厌氧环境中产生, 因此较低的氧化还原水平有助于甲烷产生, 但随着“甲烷悖论”的提出, 湿地土壤和表层水体的微有氧环境也可以产生甲烷^[28-29]。土壤含水量是控制洪泛湿地甲烷通量的主要环境因素之一, 较高的土壤含水量可以促进产甲烷菌的活性, 减少氧化区域来降低甲烷氧化^[58]。Smith 等在奥里诺科河洪泛湿地的洪水消退期研究中发现, 当土壤含水量超过 25% 时才会排放甲烷^[60]。Gondwe 等在热带洪泛湿地不同土壤含水量梯度甲烷通量的研究中表明, 距离河道越近, 土壤含水量和有机质含量越丰富, 甲烷排放通量也越高^[12]。

2.4 温度对甲烷排放的影响

温度在甲烷产生、氧化和传输环节都起着非常重要的作用, 也是湿地甲烷过程模型中的关键参数。产甲烷菌对温度变化比较敏感, 较高的土壤温度增加了产甲烷菌的活性^[27]。甲烷氧化菌不易受土壤温度变化影响, 因此甲烷氧化的温度依赖性小于甲烷产生的温度依赖性^[56,61]。在甲烷传输过程中, 较高的气温能促进植物自身的对流传输机制, 植物体内由气温差诱导的压力差也能促进甲烷从低温处向高温处进行扩散传输, 提高植物传输甲烷的速率^[62]。较高的水温也能促进甲烷更多通过冒泡的方式排放^[63]。

Q_{10} 被用来量化甲烷通量对温度的敏感性, 表示甲烷产生和甲烷氧化随温度每升高 10℃ 而增加的甲烷排放水平^[61], Q_{10} 高则反映甲烷对温度的敏感性较高, 反之则较低。现有湿地甲烷过程模型中的温度依赖性多为定值^[64], 但最新研究表明, Q_{10} 随环境动态变化而有所不同, Chen 等综合全球数据库的研究结果发现受湿地表层土壤通气状态影响, 湿地甲烷排放的温度敏感性随水位深度而变化, 并且温度敏感性存在季节差异^[65]。

2.5 气候变化与人类活动的影响

气候变暖影响下湿地生态系统的微生物新陈代谢增强, 会产生更多甲烷^[66], 甲烷冒泡排放也会增加^[67]。气候变化还通过影响植物物候^[68], 进而影响甲烷排放。还有研究表明在全球二氧化碳升高的背景下, 具有高氧气分泌能力的植物可以抑制甲烷排放, 而具有低氧分泌的植物刺激甲烷排放^[69]。除气候变化外, 人类活动在全球碳循环中扮演着越来越重要的角色。洪泛湿地生态系统易受人类活动影响^[9], 筑坝、拦截水体可能会增加有机物的降解^[70], 湿地开发、工农业废水和生活污水的排入增加了水体有机碳和营养负荷, 促进矿化进而增强甲烷排放^[71-72]。

3 洪泛湿地甲烷过程模型发展面临的挑战

3.1 湿地甲烷过程模型及其发展

湿地甲烷过程模型可分为独立的湿地甲烷过程模型和基于陆面模式的甲烷排放过程模块。独立过程模型一般需要陆面模式输出的土壤温度、湿度以及水文模型输出的水位等驱动数据, 使用相对简单, 但前期驱动数据的获取需要依靠陆面模式的输出。基于陆面模式的甲烷排放过程模块一般是在成熟的陆面模式中增加了湿地甲烷产生、氧化和排放的模块, 陆面模式需要气象数据等输入, 可以自行模拟出驱动甲烷排放的土壤温湿度等数据。

在模拟湿地甲烷排放时, 2 种模型各有优缺点, 独立过程模型更侧重于深入理解湿地内部的甲烷产生和排放机制, 而基于陆面过程的甲烷排放模块更注重考虑多种因素对甲烷排放的影响。表 1 总结了加入全球碳计划的 16 个湿地甲烷过程模型及其主要特点^[73-90]。

表 1 加入全球碳计划的湿地甲烷过程模型

Table 1 Methane process models of wetlands participating in the Global Carbon Project

模型类型	模型名称	模型概述及优缺点	文献
独立甲烷过程模型	CH4MOD _{wetland}	模型基于生物地球物理过程, 假设甲烷产生底物来源于植物根系分泌物和有机物的分解, 对沼泽、泥炭地和沿海湿地的预测精度较高, 但在南美和非洲湿地的模拟结果略差	[73]
	Vegetation Integrative Simulator for Trace gases (VISIT)	模型是过程驱动的生态系统模型, 用于模拟碳、氮、水循环。虽然是最早考虑土壤侵蚀对碳收支影响的模型之一, 但其准确性依赖于参数化和验证数据的数量和质量	[74]
基于陆面模式的甲烷排放过程模块	Canadian Land Surface Scheme Including Biogeochemical Cycles (CLASSIC)	模型中的Canadian Terrestrial Ecosystem Model模块可模拟湿地甲烷排放。作为开源模型, 在大尺度模拟中简化了甲烷排放的过程	[75]
	E3SM Land Model Equilibrium Chemistry Approximation (ELM-ECA)	ECA是集成在Community Land Model中的理论, 表示微生物、植物和非生物过程之间的竞争; 模型的集成性比较高, 包括甲烷排放的多个过程, 但模型的一些关键参数存在不确定性, 简化了季节性淹水对甲烷排放的影响	[76]
	Terrestrial Ecosystem Model Methane Dynamics Model (TEM-MDM)	模型是基于机理的生物地球化学模型, 考虑了不同类型湿地的植物功能和土壤中甲烷质量浓度的累积效应, 但模型假设土壤温度低于0℃时甲烷停止产生, 因此冬季可能会低估甲烷排放	[77]
	Dynamic Land Ecosystem Model (DLEM)	模型是基于机理的生物地球化学模型, 耦合了生物地球化学循环、水文循环和植被动态等多过程, 对甲烷排放的生物地球化学过程考虑较为全面, 但计算过程复杂	[78-79]
	Integrated Science Assessment Model (ISAM)	模型考虑了土壤的垂直分布, 将土壤水文和生物地球化学模块与甲烷模块耦合, 兼顾了土壤中甲烷的吸收过程, 但需要大量特定地点的数据校准, 适用性较差	[80]
	Jena Scheme for Biosphere-Atmosphere Coupling in Hamburg (JSBACH)	模型是全球地表模型, 通常与大气模型或全球气候模型耦合使用; 包括甲烷产生、氧化和传输过程, 但简化了水文过程且无法模拟水位高于地表的甲烷排放过程	[81]
	Lund-Potsdam-Jena General Ecosystem Simulator (LPJ-GUESS)	模型是基于过程的动态植被-陆地生态系统模型, 专注冻土生态系统研究; 在北极苔原甲烷模拟中表现良好, 但缺少微生物池, 模拟结果可能存在较大不确定性	[82]
	Lund-Potsdam-Jena Managed Land model (LPJ-MPI)	在全球动态植被LPJ模型基础上, 模型由湿地模块和描述泥炭积累的模块组成, 属于大规模的陆地表面模型, 可模拟全球尺度的甲烷排放, 但模型结构中缺乏水-冰相变, 可能会低估甲烷排放	[83-84]
	Lund-Potsdam-Jena Wald Schnee and Landschaft (LPJ-wsl)	模型是基于过程的全球动态植被模型, 考虑控制湿地甲烷排放的主要过程; 可开源获取, 但模拟甲烷排放的不确定性受地形因素影响	[85]
	Land surface Processes and eXchanges (LPX-Bern)	模型描述了动态植被和陆地生物地球化学过程, 不同土壤类型可采用不同的甲烷生成、氧化和排放参数, 考虑了植物功能类型在每个单元格网上的竞争, 但对温度的变化比较敏感	[15,86]
	Sheffield Dynamic Global Vegetation Model (SDGVM)	模型是全球动态植被模型, 可与气候模式耦合或使用气候数据驱动; 使用内部水文模型独立确定湿地位置, 可开展全球尺度的模拟, 但甲烷模块相对简单, 难以精确模拟湿地甲烷排放的复杂过程	[87]
	Terrestrial Ecosystem Integrated Model for Greenhouse Gases (TRIPLEX-GHG)	模型在基于综合生物圈模拟器的基础上, 加入了甲烷过程模块和水位模块; 适用于多尺度, 在捕捉甲烷排放的时间模式上表现良好, 但对甲烷生成过程中的 Q_{10} 等参数较敏感	[88]
	Joint UK Land Environment Simulator (JULES)	模型包括碳循环、湿地甲烷排放、光合作用、植被动态等多过程, 可独立使用, 也可作为耦合地球系统模型的陆地组成部分; 采用多层次方法精确表示植物生理过程, 但模拟准确性受到输入数据质量和模型参数化的限制	[89]
	Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE)	模型是地表模型, 可与全球模型耦合, 也可独立运行; 可区分湿地面积变化对甲烷排放的贡献, 但对不同湿地类型的适用性有限	[90]

独立湿地甲烷过程模型通常关注湿地内部甲烷产生、氧化和传输的生物地球化学过程,试图捕捉各种生物化学过程对甲烷排放的影响,不受陆面模式约束。早期的独立湿地甲烷过程模型主要为一维模型,纳入甲烷排放的 1~2 个生态过程,湿地甲烷的产生多是作为土壤有机物的函数,不同的传输方式也在模型中得到体现^[91]。例如针对稻田甲烷排放的 CH4MOD 模型中甲烷基质来自于水稻植株的根系分泌物以及土壤中的有机物^[92]; Walter 建立的基于一维过程的湿地甲烷排放模型用于模拟天然湿地的甲烷收支,并且明确模拟了 3 种不同传输途径^[93]。而随后发展的 Wetland-DNDC 模型注重于厌氧环境下水位动态、土壤热量动态、植物生长以及土壤生物地球化学过程的量化,通过输入水文、气候、植被、土壤和管理信息来模拟湿地甲烷排放^[94]。CH4MOD_{wetland} 中甲烷产生的基质来源为地上、地下植物凋落物和土壤有机质的分解,与 Wetland-DNDC 相比输入少量的土壤参数以降低模型估计的不确定性^[73]。Ito 建立的 VISIT 模型是一种基于过程的陆地生态系统模型,由生物物理和生物地球化学模块组成,具有计算效率高的结构,在模拟湿地甲烷排放中,模型考虑了植物的叶、茎、根和土壤腐殖质等多个碳库,注重土壤特性对碳收支的影响^[95]。

相较于独立的湿地甲烷过程模型,陆面模式具有综合性、多过程以及大尺度应用等特点,是综合性的大气-陆地相互作用的地球系统模型,通常包括多个陆地生态系统、气象、水文、植被等多过程综合作用模块,适用于大范围的地理区域模拟。早期的陆面模式受限于数据可用性和计算能力,通常使用相对简单的参数化方法,湿地甲烷排放建模为土壤温度和湿度的线性关系。随着对湿地甲烷过程的理解,陆面模式中的甲烷模块逐渐引入了更多的生物化学过程来描述甲烷排放,进一步考虑湿地植被和土壤等生态过程的影响,例如 TEM 模型作为基于过程的生态系统模型,描述了全球陆地生态系统中植物、土壤碳、氮和水的动态过程^[77];陆地生态系统模型 DLEM 可描述植物生理学、土壤地球化学、土地利用变化以及氮沉降等驱动的陆地碳-氮-水循环^[78]。陆面模式的发展趋势是与地球系统模型的耦合,将湿地甲烷模块集成到更大范围的气候系统模拟中,同时也能更全面模拟湿地甲烷与气候之间的响应关系。

3.2 湿地甲烷过程模型应用至洪泛湿地面临的挑战

尽管已有学者提出了针对洪泛湿地甲烷排放的概念模型^[25],但目前还没有应用在专门评估洪泛湿地甲烷排放的过程模型^[24],具体来说,主要面临以下挑战。

首先,过程模型要将洪泛湿地动态水文情势纳入模型中并进行准确表达。洪泛湿地水位在不同时间尺度上表现出周期性和瞬时性的变化,这种改变决定湿地的淹没动态以及甲烷传输界面的转化,淹水时间越长氧气含量越低,淹没深度影响水柱上下层的混合和水-陆相之间养分的横向交换^[79]。此外,不同水位下甲烷排放的温度敏感性存在差异^[65],模型需要准确捕捉水文过程及其生物地球化学等关联要素对甲烷产生、氧化和传输的影响,才能降低模拟的不确定性。其次,过程模型要考虑季节性干湿交替引发的土壤含水量梯度特征。甲烷产生和甲烷氧化的最佳含水量不同,土壤含水量差异甚至影响洪泛湿地甲烷的源汇格局,因此改进洪泛湿地甲烷过程模型必须考虑区域尺度土壤含水量的梯度差异。再者,过程模型要深入考虑洪泛湿地植被的动态演替对甲烷排放的关键影响。有无植被覆盖、植被类型以及植被物候是影响甲烷通量的重要因素,忽视植被对甲烷排放的影响将会在很大程度上高估或低估洪泛湿地的甲烷收支,不同植物种群和生长过程的参数化也是模型必须要考虑的关键问题。最后,由于当前的甲烷观测多集中于内陆沼泽、泥炭湿地和滨海湿地等湿地类型,缺少长期、连续且多点位的洪泛湿地甲烷观测数据,极大地限制了湿地甲烷过程模型(表 1)在洪泛湿地的参数化和验证,导致难以对区域尺度洪泛湿地甲烷排放进行准确估算。因此,改进湿地甲烷过程模型以应用在洪泛湿地生态系统需要综合考虑上述多重要素,在机制过程表征和模型参数化上无疑是很大的挑战。

4 洪泛湿地甲烷排放评估的研究展望

4.1 复杂水文情势对洪泛湿地甲烷排放过程的影响机制

1) 季节性水位波动对洪泛湿地甲烷通量的影响机制研究。洪泛湿地水文过程变化伴随着甲烷传输途径和界面的改变, 明确不同水文时期甲烷传输途径和主导传输方式, 对改进湿地甲烷过程模型至关重要。丰水期洪泛湿地为水相, 向大气排放甲烷的同时也排放大量二氧化碳^[96], 不同淹水时间和淹没深度下洪泛湿地释放二氧化碳和甲烷是否存在权衡协同关系, 目前还尚缺乏相关研究, 明确洪泛湿地在低水位时期甲烷汇的功能在年收支中的比例也是亟待解决的问题。水位控制湿地甲烷排放的温度敏感性^[65], 明确“涨-丰-退-枯”水文过程中的温度敏感性差异有助于进一步理解洪泛湿地甲烷排放机制。此外, 水位对甲烷通量有决定性影响, 促进甲烷大量排放的最佳水位阈值受温度影响^[97], 不同气候带下, 温度是否能改变甲烷大量产生的最佳水位阈值还有待进一步研究。在季节性河湖水情干扰下, 洪泛湿地的水文水动力过程会具有更加快速和更为敏感响应变化^[7], 多重因素对甲烷通量的交互影响、以及不同因素的贡献程度研究还有待于进一步探讨。

2) 植被对洪泛湿地甲烷排放重要性的拓展深化研究。植被对甲烷排放的调节贯穿甲烷生成、氧化和传输全过程。由于全球洪泛湿地植被的多样性和复杂性, 不同植物类型传输甲烷的能力不同, 目前还尚未明确全球不同纬度、不同洪泛湿地类型的植物种群对甲烷传输的作用程度和规模。此外, 植被物候对甲烷排放影响的量化研究还未系统开展, 日尺度植物的光合作用和呼吸作用、季节尺度的植物物候等对甲烷通量的影响机制, 是未来重点研究方向之一。

3) 气候变化与人类活动对洪泛湿地甲烷通量影响机制的定量解析。洪泛湿地生态系统对干旱和洪水等极端水文事件极其敏感, 极端气候与甲烷之间的反馈可能存在滞后效应^[4], 但目前还不清楚这种滞后效应对洪泛湿地甲烷排放和区域甲烷收支产生多大影响。在气候变化和人类活动双重影响下, 未来应通过长期跟踪观测, 定量区分其对洪泛湿地甲烷排放过程的影响, 为洪泛湿地生态系统管理提供重要支撑。

4.2 洪泛湿地甲烷过程模型的未来改进方向

无论是独立的湿地甲烷过程模型, 还是基于陆面模式的甲烷排放过程模块, 将其应用于洪泛湿地生态系统时, 需考虑动态水文过程、土壤干湿交替的特性、湿地植被的动态演替等因素(图2)。

1) 洪泛湿地水文过程动态变化的准确识别。过程模型在针对水文过程这一因素进行改进时, 首先需要考虑洪泛湿地淹没动态, 区分淹没区和非淹没区, 可借助最新遥感技术, 如合成孔径雷达和更高分辨率的影像(如 Sentinel 等)来监测洪泛湿地的淹没范围。借助遥感手段或水文模型、逐日水文数据等确定洪泛湿地像元的淹水时间和淹没深度, 增强洪泛湿地动态地表水信息的空间和时间细节^[98-99]。此外, 气象数据的输入对基于陆面模式的过程模型至关重要, 因此需要更精确的气象数据来驱动陆面模型。模型还需要考虑淹没区和非淹没区甲烷传输途径的差异, 当前过程模型大多使用通过土壤层的气体扩散传输, 不适合淹没条件下经过含水层的气体传输^[24], 因此未来过程模型可以建立耦合的土-气和水-气模块, 分别描述不同界面的甲烷扩散速率和通量。

2) 土壤水分梯度及其相关特性的合理表征。陆地和水生生境之间的交错带是土壤从有氧到缺氧的过渡区, 针对干湿交替的土壤特性, 模型需改进之处包括捕获土壤湿度的高分辨率时空变化、合理表征不同类型土壤特征等。土壤湿度的遥感卫星观测数据空间分辨率较低, 地面观测站数据难以大范围覆盖, 因此可借助基于土壤水文学原理的土壤湿度参数化模型, 将土壤湿度与水位之间的相关关系纳入模型, 从而更准确地模拟干湿交替条件

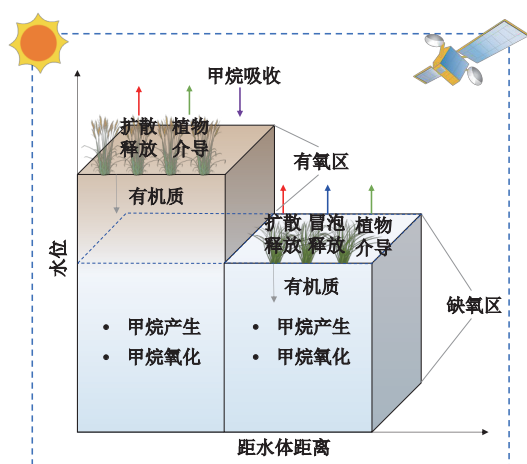


图2 基于洪泛湿地特点的甲烷排放过程模型改进之处

Fig.2 Improvements in modeling methane emission processes based on floodplain wetland characteristics

下的甲烷排放过程。此外,模型还需将不同土壤类型及其特性进行合理化表征,通过将土壤类型的特性与模型中生物地球化学过程相结合,以实现土壤类型及其特征空间分布参数化。

3)洪泛湿地植被动态演替过程的精准量化。未来过程模型的发展需要结合遥感,区分植被覆盖区和无植被区,并结合相关算法来估算植被生产力。考虑到植被类型差异,模型应结合采样观测数据,区分表达植物的生理特性和传输甲烷的能力。除此之外,还需考虑植被物候对甲烷排放的影响,植物生长期和衰老期甲烷排放能力不同,但物候周期又受到水文过程的影响,因此未来可借助遥感手段获取高时空分辨率的水文和植被信息,建立水文过程和植被物候之间的函数关系,帮助模型更准确地捕捉季节性水位变化以及植被物候的转变,

更精细地模拟洪泛湿地甲烷排放的季节模式。

4)模型的参数化验证与未来改进整合。未来需加强在全球及国家尺度洪泛湿地甲烷排放观测站的布点,进行长期连续观测,为模型的参数校正和验证提供数据支持。尽管当前的湿地甲烷过程模型均可描述湿地甲烷产生、氧化和排放过程,但对机理的描述却不尽相同,导致对湿地甲烷排放的模拟精度存在较大差异^[84]。整合当前甲烷排放模型中对甲烷产生、氧化和排放过程机理及其对环境因子响应机制的数学描述,并进行分析评估,选取最优的数学描述,针对洪泛湿地的独特环境对模型进行改进,有望建立适用于洪泛湿地甲烷排放的过程模型。未来也可将洪泛湿地甲烷排放模型与当前地球系统模式相耦合,弥补当前地球系统模式中对于洪泛湿地甲烷排放过程模拟的缺失,以提升地球系统碳循环过程模型的精度。

5 结论

作为全球甲烷收支的重要组成部分,洪泛湿地甲烷排放机制及精准量化是当前学术界面临的重要科学问题。尽管湿地甲烷排放的生物地球化学过程不断被揭示,过程模型也取得了显著发展,模型中纳入的关键过程和环境变量也逐渐增加,但水文过程的动态变化、土壤特性的梯度差异,以及湿地植被的动态演替等多要素相互作用增加了洪泛湿地甲烷排放估算的不确定性。因此,未来研究仍需深入探讨复杂水文情势对洪泛湿地甲烷排放过程的影响机制,在使用过程模型进行定量评估甲烷排放时,需准确识别洪泛湿地水文过程的动态变化,合理表征土壤水分的梯度差异及其相关特性,精准量化湿地植被的动态演替过程。同时,应加强洪泛湿地甲烷通量观测站点的布设,为过程模型参数校正提供长期连续的数据支持,从而提高甲烷排放评估的精度。

参考文献(References):

- [1] Delworth T L, Knutson T R. Simulation of early 20th century global warming[J]. *Science*, 2000, 287(5461): 2246-2250.
- [2] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. *Nature*, 1990,

- 344(6266): 529-531.
- [3] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R et al. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Cheng C H, Redfern S A T. Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-11.
- [5] Saunio M, Stavert A R, Poulter B et al. The global methane budget 2000—2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561-1623.
- [6] Peng S S, Lin X, Thompson R L et al. Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020[J]. *Nature*, 2022, 612(7940): 477-482.
- [7] 李云良, 张奇, 谭志强, 等. 鄱阳湖洪泛系统地表-地下水文水动力过程与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2022. [Li Yunliang, Zhang Qi, Tan Zhiqiang et al. Surface-groundwater hydrodynamic process and simulation of flood system of Poyang Lake. Beijing: Science Press, 2022.]
- [8] Bayley P B. Understanding large river: Floodplain ecosystems[J]. *BioScience*, 1995, 45(3): 153-158.
- [9] 翟金良, 邓伟, 何岩. 洪泛区湿地生态环境功能及管理对策 [J]. *水科学进展*, 2003(2): 203-208. [Zhai Jinliang, Deng Wei, He Yan. Flood-plain wetland and ecoenvironmental functions and its management countermeasures. *Advances in Water Science*, 2003(2): 203-208.]
- [10] Wood S H, Ziegler A D. Floodplain sediment from a 100-year-recurrence flood in 2005 of the Ping River in Northern Thailand[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(4): 959-973.
- [11] Otter L B, Scholes M C. Methane sources and sinks in a periodically flooded South African Savanna[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1): 97-111.
- [12] Gondwe M J, Helfter C, Murray-Hudson M et al. Methane flux measurements along a floodplain soil moisture gradient in the Okavango Delta, Botswana[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, 379(2210): 20200448.
- [13] Dalmagro H J, de Arruda P H, Vourlitis G L et al. Radiative forcing of methane fluxes offsets net carbon dioxide uptake for a tropical flooded forest[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1967-1981.
- [14] Kwon M J, Beulig F, Ilie I et al. Plants, microorganisms, and soil temperatures contribute to a decrease in methane fluxes on a drained Arctic floodplain[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2396-2412.
- [15] Ringeval B, Houweling S, Van Bodegom P M et al. Methane emissions from floodplains in the Amazon Basin: Challenges in developing a process-based model for global applications[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(6): 1519-1558.
- [16] Sieczko A K, Demeter K, Singer G A et al. Aquatic methane dynamics in a human-impacted river-floodplain of the Danube[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(S1): 175-187.
- [17] Van Huissteden J, Maximov T C, Dolman A J. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia)[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2005, 110(G2): 1-8.
- [18] Terentieva I E, Sabrekov A F, Ilyasov D et al. Highly dynamic methane emission from the West Siberian boreal floodplains[J]. *Wetlands*, 2019, 39(2): 217-226.
- [19] 任艺洁, 邓正苗, 谢永宏, 等. 洞庭湖湿地洪水期甲烷扩散和气泡排放通量估算及水环境影响分析 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(4): 1075-1087. [Ren Yijie, Deng Zhengmiao, Xie Yonghong et al. Estimation of methane diffusion and ebullition flux and water environmental controls during flooding period in Lake Dongting wetlands. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 1075-1087.]
- [20] Pangala S R, Enrich-Prast A, Basso L S et al. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget[J]. *Nature*, 2017, 552(7684): 230-234.
- [21] Yazbeck T, Bohrer G. Uncertainties in wetland methane-flux estimates[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(15): 4175-4177.
- [22] Cusworth D H, Bloom A A, Ma S et al. A Bayesian framework for deriving sector-based methane emissions from top-down fluxes[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 242.
- [23] Zhang Q, Li T T, Zhang Q et al. Accuracy analysis in CH4MOD_{wetland} in the simulation of CH₄ emissions from Chinese wetlands[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(1): 52-59.
- [24] Melack J M, Basso L S, Fleischmann A S et al. Challenges regionalizing methane emissions using aquatic environments in the Amazon Basin as examples[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 866082.
- [25] Potter C, Melack J, Engle D. Modeling methane emissions from Amazon floodplain ecosystems[J]. *Wetlands*, 2014, 34: 501-511.
- [26] Helfter C, Gondwe M, Murray-Hudson M et al. Phenology is the dominant control of methane emissions in a tropical non-forested wetland[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 133.
- [27] 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 Hang, Xiao

- Fanshu, He Zhili et al. Microbial driven methane emission mechanisms in wetland ecosystems. *Acta Microbiologica Sinica*, 2018, 58(4): 618-632.]
- [28] Angle J C, Morin T H, Solden L M et al. Methanogenesis in oxygenated soils is a substantial fraction of wetland methane emissions[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1567.
- [29] Günthel M, Donis D, Kirillin G et al. Contribution of oxic methane production to surface methane emission in lakes and its global importance[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5497.
- [30] 秦宇, 黄璜, 李哲, 等. 内陆水体好氧甲烷氧化过程研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 1004-1017. [Qin Yu, Huang Huang, Li Zhe et al. Research progress of aerobic methane oxidation process in inland waters. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4): 1004-1017.]
- [31] 翟俊, 马宏璞, 陈忠礼, 等. 湿地甲烷厌氧氧化的重要性和机制综述 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(9): 3506-3514. [Zhai Jun, Ma Hongpu, Chen Zhongli et al. Review on the importance and mechanisms of anaerobic oxidation of methane in wetlands. *China Environmental Science*, 2017, 37(9): 3506-3514.]
- [32] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2006(5): 726-733. [Chen Huai, Zhou Shun, Wu Ning et al. Advance in studies on production oxidation and emission flux of methane from wetlands. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006(5): 726-733.]
- [33] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展 [J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6868-6880. [Yang Ping, Tong Chuan. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6868-6880.]
- [34] 牛雪琦, 时巍巍, 吴文欣, 等. 内陆水体 CH₄ 冒泡排放研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2023, 38(8): 802-814. [Niu Xueqi, Shi Weiwei, Wu Wenxin et al. Research advances of CH₄ ebullitive emissions from inland waters. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(8): 802-814.]
- [35] 谭志强, 李云良, 张奇, 等. 湖泊湿地水文过程研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 18-37. [Tan Zhiqiang, Li Yunliang, Zhang Qi et al. Progress of hydrological process researches in lake wetland: A review. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 18-37.]
- [36] Bartlett K B, Harriss R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands[J]. *Chemosphere*, 1993, 26(1): 261-320.
- [37] Zhang Y M, Naafs B D A, Huang X Y et al. Variations in wetland hydrology drive rapid changes in the microbial community, carbon metabolic activity, and greenhouse gas fluxes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 317: 269-285.
- [38] 贺文君, 韩广轩, 许延宁, 等. 潮汐作用下干湿交替对黄河三角洲盐沼湿地净生态系统 CO₂ 交换的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 269-277. [He Wenjun, Han Guangxuan, Xu Yanning et al. Effects of drying and wetting cycles induced by tides on net ecosystem exchange of CO₂ over a salt marsh in the Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 269-277.]
- [39] Fiedler S, Sommer M. Methane emissions, groundwater levels and redox potentials of common wetland soils in a temperate-humid climate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(4): 1081-1093.
- [40] Olefeldt D, Euskirchen E S, Harden J et al. A decade of boreal rich fen greenhouse gas fluxes in response to natural and experimental water table variability[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2428-2440.
- [41] Hondula K L, Jones C N, Palmer M A. Effects of seasonal inundation on methane fluxes from forested freshwater wetlands[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(8): 084016.
- [42] Mitsch W J, Nahlik A, Wolski P et al. Tropical wetlands: Seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(5): 573-586.
- [43] Li M X, Peng C H, Zhu Q A et al. The significant contribution of lake depth in regulating global lake diffusive methane emissions[J]. *Water Research*, 2020, 172: 115465.
- [44] Juutinen S, Alm J, Larmola T et al. Methane (CH₄) release from littoral wetlands of boreal lakes during an extended flooding period[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 413-424.
- [45] Rulík M, Weber L, Min S et al. CO₂ and CH₄ fluxes from inundated floodplain ponds: Role of diel variability and duration of inundation[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1006988.
- [46] Marschner P. Processes in submerged soils—Linking redox potential, soil organic matter turnover and plants to nutrient cycling[J]. *Plant and Soil*, 2021, 464(1-2): 1-12.
- [47] Maietta C E, Hondula K L, Jones C N et al. Hydrological conditions influence soil and methane-cycling microbial populations in seasonally saturated wetlands[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 593942.
- [48] 段晓男. 水生植物对湖泊湿地甲烷排放的影响机制研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2006. [Duan Xiaonan. Effects of aquatic vegetations on methane emissions of lake ecosystems. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006.]
- [49] Bass A M, O'Grady D, Leblanc M et al. Carbon dioxide and methane emissions from a wet-dry tropical floodplain in Northern Australia[J]. *Wetlands*, 2014, 34(3): 619-627.

- [50] Vroom R J E, van den Berg M, Pangala S R et al. Physiological processes affecting methane transport by wetland vegetation—A review[J]. *Aquatic Botany*, 2022, 182: 103547.
- [51] Boon P I, Sorrell B K. Methane fluxes from an Australian floodplain wetland: The importance of emergent macrophytes[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1995, 14(4): 582-598.
- [52] Wang F W, Zhang S H, Hu X R et al. Floating plants reduced methane fluxes from wetlands by creating a habitat conducive to methane oxidation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 135: 149-160.
- [53] Gar'kusha D N, Fedorov Y A. Effect of plants on processes of methane cycle in bottom deposits and soil rhizosphere[J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, 9(6): 771-782.
- [54] Carmichael M J, Bernhardt E S, Bräuer S L et al. The role of vegetation in methane flux to the atmosphere: Should vegetation be included as a distinct category in the global methane budget?[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 119(1): 1-24.
- [55] 窦渤凯, 王义东, 薛冬梅, 等. 挺水和湿生草本植物传输甲烷的过程与机制研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2017, 41(11): 1208-1218. [Dou Bokai, Wang Yidong, Xue Dongmei et al. Research advancement in the processes and mechanisms of transporting methane by emerged herbaceous plants and hygrophytes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(11): 1208-1218.]
- [56] 刘意立, 李竺霖, 何云峰. 影响湿地甲烷产生、传输与氧化因素的研究进展 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42(9): 157-162. [Liu Yili, Li Zhulin, He Yunfeng. The factors influencing generation, transmission and oxidation of methane in wetlands: A review. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(9): 157-162.]
- [57] 郝庆菊, 王跃思, 江长胜, 等. 湿地甲烷排放研究若干问题的探讨 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 170-175. [Hao Qingju, Wang Yuesi, Jiang Changsheng et al. A review on methane emission from wetlands. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 170-175.]
- [58] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [59] 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对土壤氧化甲烷的影响研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2003(2): 56-59. [Ding Weixin, Cai Zucong. Effect of nitrogen fertilizers on methane oxidation in soils by methanotrophs. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003(2): 56-59.]
- [60] Smith L K, Lewis W M, Chanton J P et al. Methane emissions from the Orinoco River floodplain, Venezuela[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51(2): 113-140.
- [61] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003(4): 604-608. [Ding Weixin, Cai Zucong. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003(4): 604-608.]
- [62] Whiting G J, Chanton J P. Control of the diurnal pattern of methane emission from emergent aquatic macrophytes by gas transport mechanisms[J]. *Aquatic Botany*, 1996, 54(2-3): 237-253.
- [63] Palma-Silva C, Marinho C C, Albertoni E F et al. Methane emissions in two small shallow neotropical lakes: The role of temperature and trophic level[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 373-379.
- [64] Xu X F, Yuan F M, Hanson P J et al. Reviews and syntheses: Four decades of modeling methane cycling in terrestrial ecosystems[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(12): 3735-3755.
- [65] Chen H Y, Xu X, Fang C M et al. Differences in the temperature dependence of wetland CO₂ and CH₄ emissions vary with water table depth[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(9): 766-771.
- [66] Bansal S, van der Burg M P, Fern R R et al. Large increases in methane emissions expected from North America's largest wetland complex[J]. *Science Advances*, 2023, 9(9): eade1112.
- [67] Aben R C H, Barros N, Van Donk E et al. Cross continental increase in methane ebullition under climate change[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1682.
- [68] Piao S L, Liu Q, Chen A P et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [69] 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.
- [70] Maavara T, Chen Q W, Van Meter K et al. River dam impacts on biogeochemical cycling[J]. *Natures Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(2): 103-116.
- [71] Lin Q W, Wang S S, Li Y C et al. Effects and mechanisms of land-types conversion on greenhouse gas emissions in the Yellow River floodplain wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152406.
- [72] Zeng L H, McGowan S, Swann G E A et al. Eutrophication has a greater influence on floodplain lake carbon cycling than dam installation across the middle Yangtze region[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 614: 128510.
- [73] Li T T, Lu Y Y, Yu L F et al. Evaluation of CH4MOD_{wetland} and Terrestrial Ecosystem Model (TEM) used to estimate

- global CH₄ emissions from natural wetlands[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(8): 3769-3788.
- [74] Ito A, Inatomi M. Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 759-773.
- [75] Arora V K, Melton J R, Plummer D. An assessment of natural methane fluxes simulated by the CLASS-CTEM model[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(15): 4683-4709.
- [76] Riley W J, Subin Z M, Lawrence D M et al. Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: Analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(7): 1925-1953.
- [77] Liu L C, Zhuang Q L, Oh Y M et al. Uncertainty quantification of global net methane emissions from terrestrial ecosystems using a mechanistically based biogeochemistry model[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(6): e2019JG005428.
- [78] Tian H, Xu X, Liu M et al. Spatial and temporal patterns of CH₄ and N₂O fluxes in terrestrial ecosystems of North America during 1979—2008: Application of a global biogeochemistry model[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2673-2694.
- [79] Yao Y Z, Tian H Q, Xu X F et al. Dynamics and controls of inland water CH₄ emissions across the Conterminous United States: 1860—2019[J]. *Water Research*, 2022, 224: 119043.
- [80] Shu S J, Jain A K, Khesghi H S. Investigating wetland and nonwetland soil methane emissions and sinks across the contiguous United States using a land surface model[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(7): e2019GB006251.
- [81] Kaiser S, Göckede M, Castro-Morales K et al. Process-based modelling of the methane balance in periglacial landscapes (JSBACH-methane)[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(1): 333-358.
- [82] McGuire A D, Christensen T R, Hayes D et al. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: Comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(8): 3185-3204.
- [83] Qiu C J, Ciais P, Zhu D et al. A strong mitigation scenario maintains climate neutrality of northern peatlands[J]. *One Earth*, 2022, 5(1): 86-97.
- [84] Ito A, Li T, Qin Z et al. Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH₄ Models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): e2023GL103037.
- [85] Zhang Z, Zimmermann N E, Kaplan J O et al. Modeling spatiotemporal dynamics of global wetlands: Comprehensive evaluation of a new sub-grid TOPMODEL parameterization and uncertainties[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(5): 1387-1408.
- [86] Spahni R, Wania R, Neef L et al. Constraining global methane emissions and uptake by ecosystems[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(6): 1643-1665.
- [87] Singarayer J S, Valdes P J, Friedlingstein P et al. Late Holocene methane rise caused by orbitally controlled increase in tropical sources[J]. *Nature*, 2011, 470(7332): 82-85.
- [88] Zhu Q, Liu J, Peng C et al. Modelling methane emissions from natural wetlands by development and application of the TRIPLEX-GHG model[J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(3): 981-999.
- [89] Clark D B, Mercado L M, Sitch S et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description—Part 2: carbon fluxes and vegetation dynamics[J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(3): 701-722.
- [90] Ringeval B, de Noblet-Ducoudré N, Ciais P et al. An attempt to quantify the impact of changes in wetland extent on methane emissions on the seasonal and interannual time scales[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(2): 1-12.
- [91] 李婷婷. 自然湿地甲烷排放模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2009. [Li Tingting. Simulation research of CH₄ emission from natural wetlands. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009.]
- [92] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究——模型及其修正 [J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2347-2352. [Zhang Wen, Huang Yao, Zheng Xunhua et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model and modification. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2347-2352.]
- [93] Walter B P, Heimann M. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 745-765.
- [94] 陈强, 潘英姿, 蒋卫国, 等. 湿地甲烷排放估算模型的研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(1): 67-75. [Chen Qiang, Pan Yingzi, Jiang Weiguo et al. Advances in the research on estimation models of wetlands methane emission. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(1): 67-75.]
- [95] Ito A. Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9): 1-5.
- [96] Zhao X S, Fan X W, Griffis T J et al. Three Gorges Dam operations affect the carbon dioxide budget of a large downstream connected lake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(12): e2022GL102697.
- [97] Calabrese S, Garcia A, Wilmoth J L et al. Critical inundation level for methane emissions from wetlands[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(4): 044038.

- [98] Olthof I, Rainville T. Dynamic surface water maps of Canada from 1984 to 2019 Landsat satellite imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 279: 113121.
- [99] Liang D, Lu J Z, Chen X L et al. An investigation of the hydrological influence on the distribution and transition of wetland cover in a complex lake-floodplain system using time-series remote sensing and hydrodynamic simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 125038.

Mechanisms and quantitative assessment of methane emissions in floodplain wetlands: Progress and challenges

Wang Xueran^{1,2}, Wan Rongrong^{1,2,3}, Zhao Xiaosong^{1,2}, Li Tingting⁴, Li Bing^{1,2}, Yang Su^{1,2}

(1. Key Laboratory of Watershed Georaphic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, Jiangsu, China; 2. College of Nanjing, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, Jiangsu, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Methane emissions from floodplain wetlands are an essential component of the global methane budget. A comprehensive understanding of these emissions is crucial for accurately quantifying regional methane budgets. This study reviews the primary processes involved in methane production, oxidation, and transport within floodplain wetlands. It systematically examines the impacts of hydrological dynamics, vegetation, soil characteristics, temperature, human activities, and climate change on methane emissions from these ecosystems. Additionally, the study summarizes the wetland methane process models utilized in global carbon projects and traces their historical development. This study identifies the challenges associated with simulating methane emissions from floodplain wetlands, including dynamic hydrological processes, variations in soil properties, and the development of vegetation. Furthermore, the study suggests that future research should enhance the understanding of the mechanisms by which complex hydrological processes influence methane emissions in floodplain wetlands. This involves integrating periodic hydrological fluctuations, alternating wet and dry soil conditions, and dynamic changes in vegetation into wetland methane process models. Furthermore, it is necessary to strengthen the establishment of methane flux observation stations in floodplain wetlands to provide long-term, continuous data support for calibrating methane process model parameters, thereby improving the accuracy of regional methane emission assessments. By integrating these factors, methane process models for floodplain wetlands can be enhanced, providing robust scientific support for achieving global carbon neutrality goals.

Key words: floodplain wetlands; methane emission; processes model