

未来气候变化情景下中国自然湿地 CH₄ 排放的时空变化*

刘建功¹ 朱求安¹ 沈 燕² 杨延征¹ 罗云鹏¹ 彭长辉^{1*}

(¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ²中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004)

摘要 应用 TRIPLEX-GHG 模型, 模拟未来气候变化背景下 2006—2100 年中国自然湿地生态系统 CH₄ 排放的时空变化。结果表明: 保持中国现有自然湿地分布不变, 在 3 种相对浓度路径 (RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5) 情境下, 21 世纪末, 中国自然湿地 CH₄ 排放量与当前水平相比将分别增长 32.0%、55.3% 和 90.8%。中国大陆南方自然湿地 CH₄ 排放高于中部和北方, 且自西向东呈现上升趋势。CH₄ 高通量排放区域主要集中在长江中下游湿地、东北湿地和珠江沿岸湿地。RCP4.5 和 RCP8.5 情境下全国大部分自然湿地 CH₄ 排放通量增加, 而 RCP2.6 情境下 21 世纪中后期 CH₄ 排放上升趋势得到控制并开始下降, 到世纪末部分地区 (尤其是青藏高原地区) CH₄ 排放通量与当前水平相比有所降低。

关键词 自然湿地生态系统; CH₄; 气候变化; TRIPLEX-GHG

文章编号 1001-9332(2015)11-3467-08 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Spatiotemporal variations of natural wetland CH₄ emissions over China under future climate change. LIU Jian-gong¹, ZHU Qiu-an¹, SHEN Yan², YANG Yan-zheng¹, LUO Yun-peng¹, PENG Chang-hui¹ (¹College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(11): 3467–3474.

Abstract: Based on a new process-based model, TRIPLEX-GHG, this paper analyzed the spatio-temporal variations of natural wetland CH₄ emissions over China under different future climate change scenarios. When natural wetland distributions were fixed, the amount of CH₄ emissions from natural wetland ecosystem over China would increase by 32.0%, 55.3% and 90.8% by the end of 21st century under three representative concentration pathways (RCPs) scenarios, RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5, respectively, compared with the current level. Southern China would have higher CH₄ emissions compared to that from central and northern China. Besides, there would be relatively low emission fluxes in western China while relatively high emission fluxes in eastern China. Spatially, the areas with relatively high CH₄ emission fluxes would be concentrated in the middle-lower reaches of the Yangtze River, the Northeast and the coasts of the Pearl River. In the future, most natural wetlands would emit more CH₄ for RCP4.5 and RCP8.5 than that of 2005. However, under RCP2.6 scenario, the increasing trend would be curbed and CH₄ emissions (especially from the Qinghai-Tibet Plateau) begin to decrease in the late 21st century.

Key words: natural wetland ecosystem; CH₄; climate change; TRIPLEX-GHG.

CH₄ 是一种重要的温室气体, 自 1750 年以来, CH₄ 排放产生了 0.97 (0.74~1.2) W·m⁻² 的辐射强迫, 约占由长寿命温室气体引发地球增温的

20%^[1-2]。2012 年 CH₄ 大气浓度达到了 1803 μg·L⁻¹, 约为工业革命前的 3 倍^[1]。20 世纪 80 年代, 大气中的 CH₄ 浓度以每年 1% 的速度剧增, 90 年代年增长率下降到 0.7%^[3]。20 世纪 90 年代末大气 CH₄ 浓度增长速率降低到 0, 1999—2006 年大气 CH₄ 浓度几乎保持不变, 然而 2007 年又开始恢复了增长^[4-5]。大气 CH₄ 浓度的异常变化引起了全世界科学

* 国家林业局“948”项目(2013-4-57)、国家自然科学基金青年基金项目(41201079)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120204120007)资助。

* * 通讯作者。E-mail: peng.changhui@uqam.ca

2015-01-29 收稿, 2015-07-28 接受。

家的广泛关注。现阶段人们对于 CH_4 排放源的认识还有很大的局限性,因此对 CH_4 排放源不确定性的研究具有重要的理论和现实意义。

湿地是 CH_4 最大的自然排放源,基于模型的模拟结果表明,全球自然湿地每年排放 $175 \sim 217 \text{ Tg}$ CH_4 进入大气^[1],说明湿地 CH_4 排放具有很大的不确定性。湿地 CH_4 排放主要受 3 个过程控制: CH_4 的产生、氧化和运输,其中, CH_4 运输过程又包含 3 种途径(植物根系吸收 CH_4 ,再通过通气组织释放;分子扩散;含 CH_4 气泡在水面破裂而将 CH_4 释放到大气中)^[6]。湿地 CH_4 主要是通过生物合成途径产生(即产 CH_4 微生物的厌氧呼吸),其必须在严格厌氧条件下才能发生。 CH_4 产生速率由土壤温度、可分解底物的数量和质量以及土壤 pH 共同决定^[7]。大量野外观测试验表明,湿地 CH_4 排放的控制因素为水位、土壤温度和含碳底物的可利用性^[3,7],然而 CH_4 对这些因素的敏感度仍有很大的不确定性。气候和大气 CO_2 浓度是湿地 CH_4 排放的重要控制因子^[2,7]。最近有研究指出,2007 年后,分别由气温和降水异常引起的北方和热带湿地 CH_4 排放量增加显著影响了全球大气 CH_4 浓度^[8]。由于 2003—2007 年中高纬度地区温度升高,湿地 CH_4 排放增长了 7%^[9]。上升的大气 CO_2 浓度与湿地 CH_4 排放量存在正反馈关系,当大气 CO_2 浓度从 $463 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $780 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,湿地将多排放 13.2% 的 CH_4 ^[10]。

估算湿地 CH_4 排放主要通过 3 种方法:1)由野外观测试验得到的通量数据直接推算;2)应用过程模型模拟;3)应用反演模型和卫星观测数据模拟^[2,11]。过程模型模拟湿地 CH_4 动态开始于近 30 年前^[12],是估算区域及全球尺度湿地 CH_4 排放的重要手段,在近 20 年来取得了巨大的发展^[11,13-17]。使用过程模型模拟历史和近些年湿地 CH_4 排放已进入较为成熟的阶段^[18],然而未来湿地 CH_4 排放对于气候变化的响应还缺乏深入探讨。自从政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第 4 次评估报告发布以来,在全球尺度几个研究小组利用不同的湿地 CH_4 模型,以不同情境下的气候变化数据和 CO_2 升高数据作为模型驱动因子,模拟了 21 世纪全球湿地 CH_4 排放的时空格局变化。结果显示,到 21 世纪末,模拟的全球自然湿地 CH_4 排放量范围在 $50 \sim 340 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,存在着巨大的不确定性^[2]。

20 世纪 50 年代以来,中国自然湿地 CH_4 年排

放量约为 $1.73 \sim 2.69 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[19-21]。青藏高原和三江平原被认为是中国自然湿地 CH_4 排放量最大的两个区域^[19]。基于灌溉稻田 CH_4 排放模型 CH4MOD 的基本原理,Li 等^[22-23]开发的 CH4MOD_{wetland} 能够有效捕捉中国青藏高原泥炭地和三江平原沼泽地 CH_4 排放的季节性和年际动态,但模型中并未加入 CH_4 分子扩散排放途径。湿地动态是自然湿地 CH_4 排放的重要控制因子,例如湿地退化会使水位下降,增加土壤的通气度,进而导致 CH_4 排放量降低^[24]。20 世纪下半叶至今,由于受到人类经济活动和气候变化等因素的影响,中国自然湿地面积大幅度减少^[20,25],以三江平原为例,CH4MOD 和 CH4MOD_{wetland} 模拟结果显示,1960—2009 年间,湿地 CH_4 排放累计减少约 36 Tg,其中 86% 由湿地围垦造成^[26]。Xu 等^[20]考虑多种因素对于沼泽 CH_4 排放的影响,利用过程模型 DLEM 模拟了 1949—2008 年中国沼泽 CH_4 排放的时空格局,结果显示,中国沼泽湿地 CH_4 排放持续下降,沼泽面积锐减和 O_3 污染是 CH_4 排放降低的主要原因,但模型中植物通气组织排放 CH_4 过程相对单一。全球变暖背景下,考虑到湿地生态系统 CH_4 排放对大气 CH_4 循环极为重要的贡献,揭示过去、现在和未来自然湿地 CH_4 排放在中国尺度上的空间格局和发展趋势具有重要的研究意义。然而,目前关于中国尺度未来自然湿地 CH_4 排放对气候变化的反馈还处于空白阶段。本研究拟采用 TRIPLEX-GHG 模型,以 3 种代表性浓度路径情景(representative concentration pathways,RCPs)下,第 5 阶段耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5,CMIP5)中的 4 种全球气候模式的未来气候变化数据结果,以及 RCPs 对应的未来 CO_2 变化数据作为模型的输入数据,在保持中国现有自然湿地分布不变情况下,模拟未来气候变化背景下 2006—2100 年中国自然湿地生态系统 CH_4 排放的时空变化,以期为我国温室气体排放清单的制定提供参考依据,同时也可对科学地管理湿地起到一定的辅助作用。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

自然湿地指水体到陆地的过渡地带。中国自然湿地资源丰富,分布面积广,总面积约为 $3.62 \times 10^5 \text{ km}^2$,占中国陆地面积的 3.8%,从西部内陆到东部沿海、从平原到高原都有分布,且一个地区内经常出现多种湿地类型。中国沼泽面积约 $1.37 \times 10^5 \text{ km}^2$,滨海湿地面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,河流湿地面积约

表 1 中国区域 TRIPLEX-GHG 模型验证和参数校正
Table 1 TRIPLEX-GHG model calibration and calibrated values for the release ratio of CH₄ to CO₂, and Q₁₀ parameters over China

站点 Site	湿地类型 Wetland type	时间段 Time	r (CH ₄ /CO ₂)	Q ₁₀
青藏高原 Qinghai-Tibet	泥炭地	1995—2005	0.21	3.0
三江平原 Sanjiang Plain	沼泽地	2001—2006	0.45	3.5

$8.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 湖泊湿地面积约 $8.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[25]. 淡水沼泽为分布面积最广的湿地类型, 主要分布在中国东北部 ($6.8 \times 10^4 \text{ km}^2$) 和青藏高原地区 ($5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$), 湖泊湿地主要分布在长江中下游和青藏高原, 其中, 五大淡水湖 ($1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$) 全部分布在长江中下游支流, 潮汐湿地 ($2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$) 主要分布在大河入海口处^[27].

1.2 TRIPLEX-GHG 模型

TRIPLEX-GHG 模型是新一代用于量化陆地生态系统温室气体动态的过程模型, 由全球植被动力学模型—IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 模型发展而来, 通过将 CH₄ 生物地理化学模块和水位模块整合到 IBIS 模型中, 可以有效反映水文、植被、土壤和 CH₄ 相关过程的相互作用^[11]. 输入数据包括气候数据、大气 CO₂ 浓度、土壤特征等。

在全球尺度上, TRIPLEX-GHG 模型的模拟结果在 19 个点进行了验证, 在估算全球自然湿地 CH₄ 排放量级和采集时间序列上 CH₄ 排放动态方面表现优异, 能够有效地模拟全球自然湿地 CH₄ 排放过程, 大幅减少空间和时间尺度上 CH₄ 排放的不确定性, 可以作为可靠的过程模型用于模拟不同类型自然湿地在不同条件下 CH₄ 排放的时空格局^[11]. 中国自然湿地主要集中在三江平原和青藏高原, 中国区域内这两个点参与了模型验证, 验证数据来源于 11 篇参考文献、1995—2006 年的自然湿地 CH₄ 排放观测数据 (表 1). 经过敏感性分析, r(CH₄ 与 CO₂) 的释放比

率) 与 Q₁₀ (温度系数) 为最敏感的两个参数^[11]. TRIPLEX-GHG 模型结构、结果验证、灵敏度分析和参数设置可参考文献[11].

1.3 RCPs 情景和输入数据

IPCC 为第五次报告研发了新的辐射活性气体和颗粒物排放情景——RCPs, 涵盖广泛的人为气候强迫. 相比之前的单行过程情景, RCPs 采用并行的方法, 能够把社会经济预估和气候科学部分分离, 更具有综合性和一致性, 可极大地缩短不同研究团体间的时滞, 方便信息整合^[28]. 目前 IPCC 共发布了 4 类 RCPs 情景: RCP3-PD、RCP4.5、RCP6 和 RCP8.5, 本研究选取 3 类情景 (RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5) (表 2), 其中 RCP2.6 作为一种低端排放情景, 为 RCP3-PD 中更为普遍的一种选择, 考虑了政府间应对气候变化政策, 努力在 21 世纪结束前将全球升温控制在 2 ℃ 以内; RCP4.5 为中端稳定路径, 其优先度高于 RCP6^[28]; RCP8.5 为高端排放情景, 该情景下 21 世纪辐射强迫一直在上升, 在世纪末达到 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

本研究选用参与 CMIP5 的 4 种全球气候模式: MPI-ESM-MR、BCC-CSM1-1、CanESM2 和 BNU-ESM (表 3) 分别在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情境下的未来 (2006—2100 年) 预估气候变化数据作为模型的输入数据 (<http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/live>), 气候变量分别为月降水量 (mm)、月平均温度 (℃)、月气温变化范围 (℃)、月平均云覆盖度 (%)、月平均相对湿度 (%) 和月平均地表风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 其中, 月气温变化范围由月最高温度减去月最低温度获得. 运用插值软件 ANUSPLIN 4.36^[29], 将气候变化数据分辨率统一为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. 为了校正气候模式误差, 使用 4 种气候模式 2006—2100 年气候变化数据减去对应气候模式模拟的 1960—2005 年历史平均数据, 将得到的差值序列叠加到 1960—2005 年平均观测数据作为模型最终的驱动数据, 其中, 历史

表 2 RCPs 简介

Table 2 Introduction of RCPs

名称 Name	辐射强迫 Radiative forcing	浓度 Concentration	路径形状 Pathway trend	模型和研发团队 Development team	2100 年预计升温 Projected temperature increase (℃)
RCP2.6	2100 年之前达到 $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的峰值后下降	2100 年之前达到 $490 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$ 当量峰值后下降	达到峰值后下降	IMAGE (NMP)	2.4
RCP4.5	2100 年之后稳定在 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	2100 年之后稳定在 $650 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$ 当量	不超过目标水平达到稳定	MiniCAM (PNL)	3.6
RCP8.5	2100 年大于 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 当量	2100 年大于 $1370 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$ 当量	上升	MESSAGE (IIASA)	6.9

表 3 本研究采用的 CMIP5 气候模式概况

Table 3 Basic information of CMIP5 climate models used in this study

模式 Model	单位及所属国家 Institution and country	分辨率 Atmosphere resolution (°)
BCC-CSM1-1	中国气候中心,中国	2.8×2.8
BNU-ESM	北京师范大学,中国	2.8×2.8
CanESM2	加拿大气候模式与分析 中心,加拿大	2.8×2.8
MPI-ESM-MR	马克斯-普朗克气象研究 所,德国	1.875×1.85

观测数据下载于 CRU-TS 3.1 气候数据库 (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru>). 这一校正方法被广泛用于模型未来预测研究中^[30-31], 其不仅保留了 CMIP5 未来气候数据结果的年际变化, 同时也与当前观测数据保持一致性和连贯性. 自 1900 年开始, 利用 1960—2005 年历史平均观测气候数据驱动模型 (spin-up), 调整土壤碳库达到相对稳定状态.

大气 CO₂ 浓度数据由两部分组成, 2006 年之前使用的是 IS92a 全球 CO₂ 数据^[32], 2006 年之后使用的是 3 种 RCPs 情境下的未来预估 CO₂ 数据 (<http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb>). 自然湿地数据下载于全球湖泊湿地数据库 (Global Lakes and Wetlands Database, GLWD, <http://www.wwfus.org/science/data.cfm>). 土壤分类图根据世界数字化土壤地图 (Digital Soil Map of the World, DSMW), 由 FAO-UNESCO DSMW 生成 (<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show? id=14116>). 中国自然湿地面积占湿地总面积百分比沿经纬度分布见图 1.

2 结果与分析

2.1 中国自然湿地 CH₄ 排放量的年际变化

模型模拟结果显示, 在 RCP2.6 情境下, 中国自然湿地 CH₄ 排放量在 21 世纪中期之前呈缓慢上升趋势, 中后期平稳地降低, 年平均最大值出现在 2075 年, 达到 2.78 Tg·a⁻¹, 在 2100 年中国自然湿地生态系统平均 CH₄ 排放量达到 2.72 Tg·a⁻¹, 与目前自然湿地 CH₄ 排放水平相比上升 32.0%. 在 RCP4.5 情境下, 21 世纪前中期上升速度较快, 后期逐渐趋于平稳, 在 2100 年达到排放量最大值 3.2 Tg·a⁻¹, 与目前水平相比上升 55.3%. 在 RCP8.5 情境下, 自然湿地 CH₄ 排放量几乎呈直线上升趋势, 平均年通量增长率为 0.019 Tg·a⁻¹ ($P < 0.001$), 在 2100 年平均达到 3.93 Tg·a⁻¹, 与目前水平相比上升 90.8% (图 2).

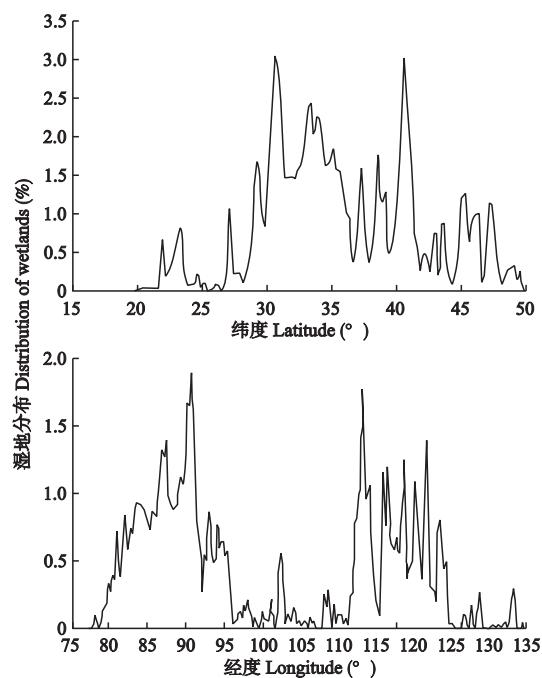


图 1 中国自然湿地沿经纬度分布

Fig.1 Latitudinal and longitudinal distribution of natural wetlands over China.

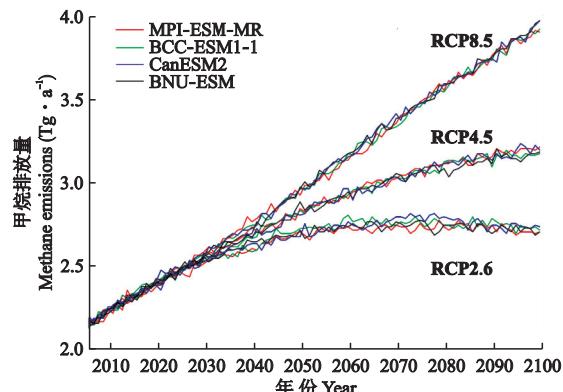
图 2 2006—2100 年中国自然湿地 CH₄ 排放量的年际变化

Fig.2 Variations of annual CH₄ emissions from China's natural wetlands in the period of 2006–2100.

2.2 中国自然湿地 CH₄ 排放通量的空间分布

在 3 种情景下, 中国 2006、2050、2100 年和 2090—2100 多年平均自然湿地 CH₄ 排放通量分布格局显示 (图 3), 总体而言, 西部大部分自然湿地单点 CH₄ 排放通量小于东部, 其中, 青藏高原和新疆高原湿地单点排放通量较低, 由于青藏高原自然湿地分布面积宽广, 其对全国范围的自然湿地 CH₄ 排放贡献依然不容忽视. 单点 CH₄ 通量较高的区域为长江中下游湿地、东北湿地和珠江沿岸及滨海湿地等. 在高端排放情景 (RCP8.5) 下, 全国大部分自然湿地分布区域 CH₄ 排放通量与中端 (RCP4.5) 和低

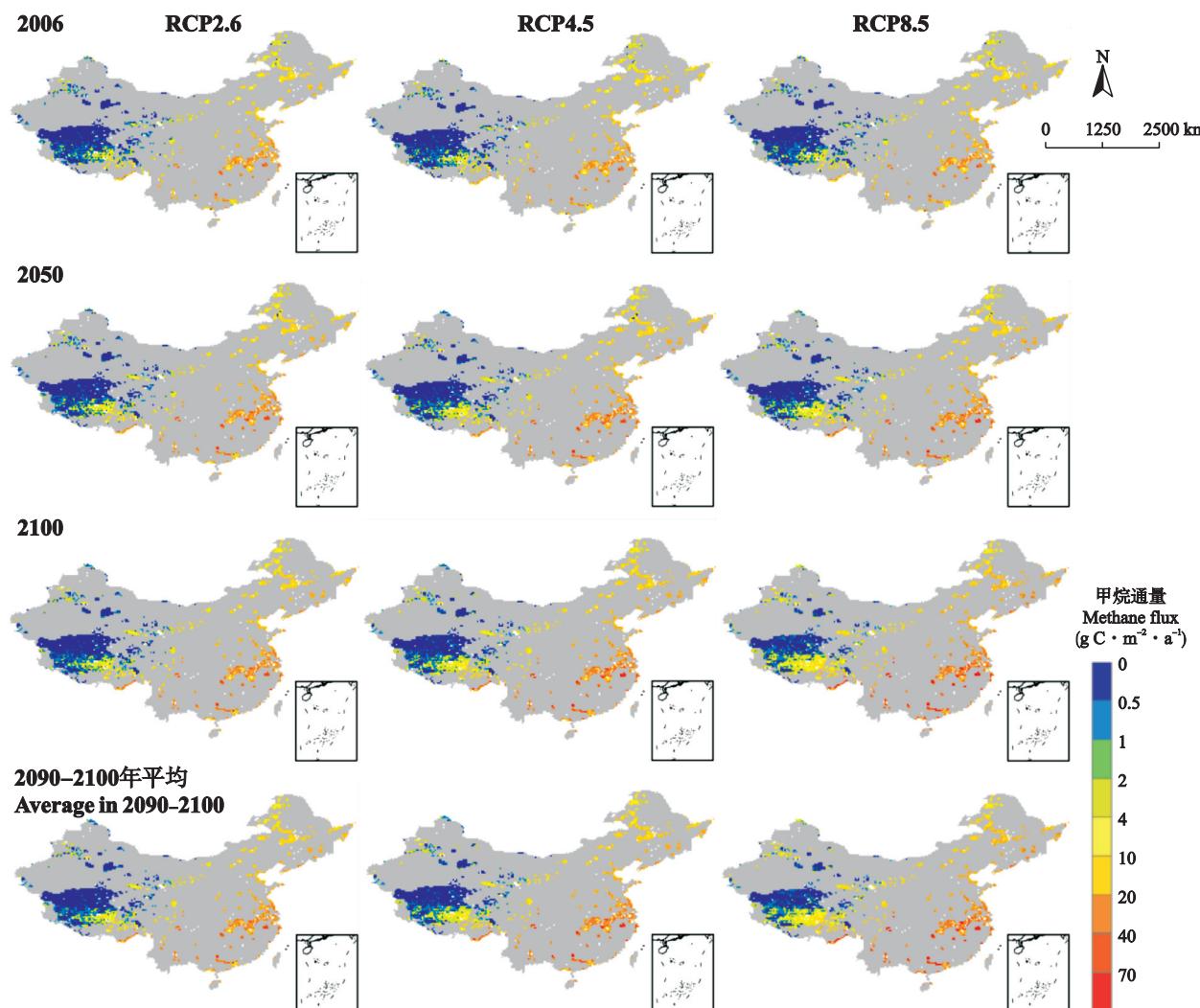


图3 中国自然湿地CH₄通量的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of CH₄ fluxes from natural wetlands over China.

端(RCP2.6)排放情景相比有所增加,CH₄排放通量最高点出现在珠江沿岸湿地,在RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情境下2090—2100年平均分别达到了78、106和140 g C · m⁻² · a⁻¹。

2.3 中国自然湿地CH₄排放通量沿经纬度分布

由图4可以看出,3种情境下中国2090—2100年多年平均自然湿地CH₄排放通量,沿着纬度方向,在29° N自然湿地CH₄排放通量达到最大值,在21°—25° N和32°—35° N之间有较高排放,尽管在中国一些高纬度地区(如40° N附近)湿地分布面积较大(图1),但其相应的CH₄排放并不高,总体而言中国南方自然湿地CH₄排放通量高于中部和北方;随着经度增加,自西向东CH₄排放呈现升高趋势,尽管80°—95° W湿地资源丰富(图1),但除92°—96° W外,80°—110° W之间CH₄排放通量较

低,在113° W达到最大值,110°—125° W间有较高的排放。

2.4 中国自然湿地CH₄排放通量的空间动态变化

2090—2100年多年平均中国自然湿地CH₄排放通量空间分布情况与2005年相减进行比较(图5),整体而言,除青藏高原湿地外全国大部分自然湿地CH₄排放通量有所增加,且东部上升趋势高于西部,增幅明显的自然湿地主要分布在东北、西南、长江中下游和珠江沿岸。在RCP2.6情境下,青藏高原湿地区约40%的湿地CH₄排放通量下降,而在RCP8.5情境下,青藏高原湿地CH₄排放量下降的地区仅为东北和西南部分地区,最大变化地区为珠江沿岸湿地,在RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情境下分别增长了约35、60和100 g C · m⁻² · a⁻¹。

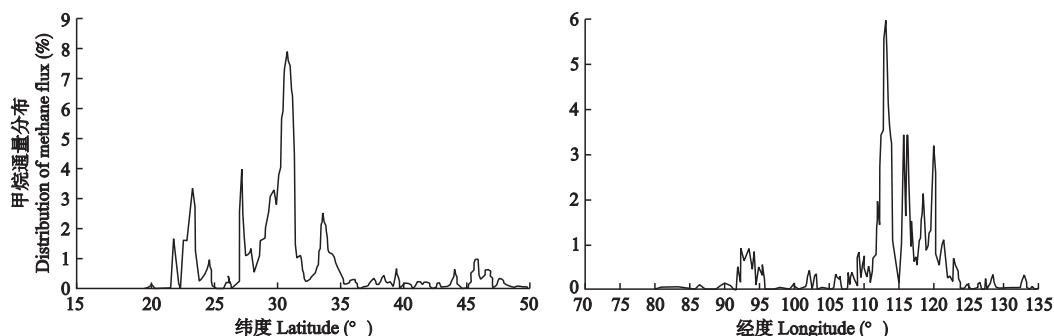


图 4 3 种情境下 2090—2100 年平均中国自然湿地 CH_4 通量沿经纬度变化

Fig.4 Latitudinal and longitudinal variations of mean CH_4 fluxes of 2090–2100 from natural wetlands over China.

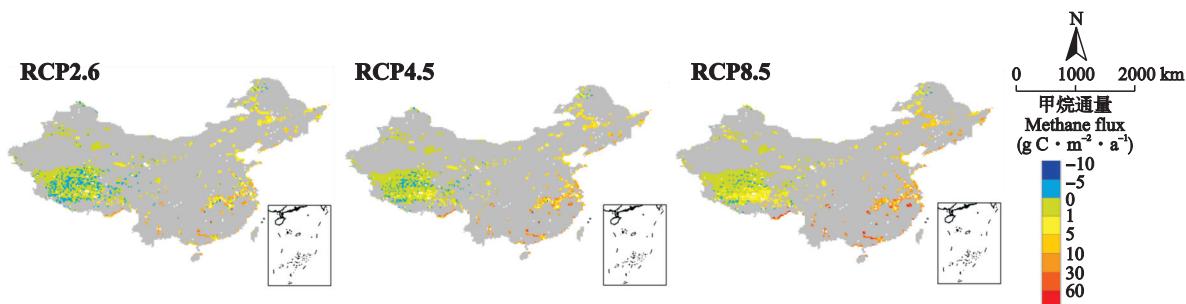


图 5 中国自然湿地(2090—2100 年) CH_4 通量变化的空间分布(相对 2005 年)

Fig.5 Spatial distribution of variations of mean CH_4 fluxes (2090–2100) from China's natural wetlands relative to 2005.

3 讨 论

湿地分布面积对自然湿地 CH_4 排放有很大影响^[20]。湿地分布面积受地形和土壤湿度控制,其中,土壤湿度由降水、蒸散作用、土壤排水和地表径流共同决定,所有这些因子在未来都会发生变化^[2]。温度上升将会增加土壤蒸散速率并降低土壤湿度,进而对湿地分布面积产生影响。未来地域性湿地分布面积既可能因为永冻土融化和蒸散发作用降低而增加,也可能因为降水减少和蒸发作用增强而降低^[10]。尽管湿地数据集有很多,但是对于目前全球湿地地理分布的认识还有很大的不确定性。湿地和湿地 CH_4 排放模型比较计划(Wetland and Wetland CH_4 Inter-comparison of Models Project, WETCH-IMP)^[18]探索了目前模拟大尺度湿地分布和对应的湿地 CH_4 排放特征的能力,结果显示,在时间和空间尺度上参与 WETCHIMP 的 10 个模型对于湿地分布范围和 CH_4 排放的模拟差异显著。具体而言,使用水淹数据集模拟和独立模拟湿地面积的模型结果间差异很大,不同模型模拟的全球年平均 CH_4 排放量差异达 40%。Prigent 等^[33]利用多卫星方法确定地表水淹区域,这种方法可能会低估小面积的水淹区域

(尤其是植被覆盖密集区域)并且无法辨认水位在地表之下的湿地。考虑到目前对于湿地空间分布和面积模拟的不确定性,许多以未来湿地 CH_4 排放为研究对象的模拟倾向于使用当前固定的湿地分布代表未来湿地动态^[2,34–36]。所以考虑到预估中国尺度未来湿地分布面积的技术限制和由此带来的不确定性,并结合前人的研究经验,本研究也使用了现阶段固定的自然湿地分布来代表未来中国自然湿地动态。

研究表明,未来湿地 CH_4 排放动态对气候因子的响应主要取决于温度和降水的综合影响^[7]。未来温度升高导致 NPP 增加会为 CH_4 的微生物产生途径提供更多的发生底物,温度的增加也会使产 CH_4 菌活性增强;温度通过对植物生长和有机物分解的影响,从而影响产 CH_4 所需底物的量。未来降水的变化会影响土壤水位,进而对 CH_4 氧化产生影响。模型结果显示,全球增温 3.4 °C 预计会使湿地 CH_4 排放量增大 78%^[37]。Gedney 等^[38]研究结果表明,在 IS92A 情景下,21 世纪全球湿地 CH_4 排放量将会增加 75%~100%,且温度上升为主导因素。在本研究所使用的 3 种情景下,到 2100 年均有不同程度的增温,中国湿地 CH_4 排放量与目前水平相比有不同程度的增加,与之前的研究结果相吻合。

通过施肥效应,升高的大气 CO₂浓度会促进NPP升高,进而增加湿地 CH₄排放。在大多数模型模拟结果中,升高的大气 CO₂浓度比气候变化对湿地 CH₄排放具有更大的增强效应^[2]。WETCHIMP 的结果显示,模拟的湿地分布范围和 CH₄排放对于大气 CO₂浓度升高具有极强的正反馈效应,当 CO₂浓度升高到 857 μg · L⁻¹时,对 CO₂最敏感的模型模拟的湿地 CH₄排放量将增加 160%,其他模型平均增加 55.4%~73.2%,并且热带地区比非热带地区具有更强的增强效应^[18]。若未来大气 CO₂浓度加倍,全球湿地 CH₄排放量将升高到 156~277 Tg · a⁻¹^[37]。目前模拟未来自然湿地生态系统 CH₄排放的模型结果具有较为统一的结论,即在未来气候变化和 CO₂浓度升高背景下,自然湿地 CH₄排放量与当前水平相比将会不同程度地升高^[2]。本研究与前人的研究结果一致,即以气候变化和 CO₂浓度变化作为模型的输入数据,中国尺度自然湿地 CH₄年排放量与目前水平相比有所增加,在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情境下分别增长 32.0%、55.3% 和 90.8%。

综上所述,在未来气候变化情景下,保持中国现有自然湿地分布不变,21 世纪末中国自然湿地 CH₄排放量将增长 32%~90%,其中,中国大陆自然湿地 CH₄排放南方高于北方,东部高于西部,长江中下游和珠江等沿岸湿地 CH₄排放通量增幅明显。

参考文献

- [1] Kirschke S, Bousquet P, Ciais P, et al. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 2013, **6**: 813~823
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [3] Yao S-P (姚守平), Luo P (罗 鹏), Wang Y-F (王艳芬), et al. Advances in the research on methane emissions from wetlands. *World Science-technology Research & Development* (世界科技研究与发展), 2007, **29**(2): 58~63 (in Chinese)
- [4] Heimann M. Atmospheric science: Enigma of the recent methane budget. *Nature*, 2011, **476**: 157~158
- [5] Nisbet EG, Dlugokencky EJ, Bousquet P. Methane on the rise-again. *Science*, 2014, **343**: 493~495
- [6] Bridgham SD, Cadillo-Quiroz H, Keller JK, et al. Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 2013, **19**: 1325~1346
- [7] O'Connor FM, Boucher O, Gedney N, et al. Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review. *Reviews of Geophysics*, 2010, **48**: Doi: 10.1029/2010RG000326
- [8] Dlugokencky EJ, Bruhwiler L, White JWC, et al. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**: Doi: 10.1029/2009GL039780
- [9] Bloom AA, Palmer PI, Fraser A, et al. Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data. *Science*, 2010, **327**: 322~325
- [10] van Groenigen KJ, Osenberg CW, Hungate BA. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2011, **475**: 214~216
- [11] Zhu QA, Liu JX, Peng CH, et al. Modelling methane emissions from natural wetlands by development and application of the TRIPLEX-GHG model. *Geoscientific Model Development*, 2014, **7**: 981~999
- [12] Matthews E, Fung IY. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, **1**: 61~86
- [13] Cao MK, Marshall S, Gregson K. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**: 14399~14414
- [14] Walter BP, 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. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**: 745~765
- [15] Zhang Y, Li CS, Trettin CC, et al. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**: 1~17
- [16] Zhuang Q, Melillo JM, Kicklighter DW, et al. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**: Doi: 10.1029/2004GB002239
- [17] Riley WJ, Subin ZM, Lawrence DM, et al. Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: Analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences*, 2011, **8**: 1925~1953
- [18] Melton JR, Wania R, Hodson EL, et al. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: Conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Biogeosciences*, 2013, **10**: 753~788
- [19] Chen H, Zhu QA, Peng CH, et al. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: Synthesis new estimate. *Global Change Biology*, 2013, **19**: 19~32
- [20] Xu XF, Tian HQ. Methane exchange between marshland and the atmosphere over China during 1949~2008. *Glo-*

- bal Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**: Doi: 10.1029/2010GB003946
- [21] Ding WX, Cai ZC. Methane emission from natural wetlands in China: Summary of years 1995–2004 studies. *Pedosphere*, 2007, **17**: 475–486
- [22] Li TT, Huang Y, Zhang W, et al. CH4MOD (wetland): A biogeophysical model for simulating methane emissions from natural wetlands. *Ecological Modelling*, 2010, **221**: 666–680
- [23] Li T-T (李婷婷), Huang Y (黄耀), Zhang W (张稳), et al. Modeling CH₄ emissions from natural wetlands: Model modification and validation. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 2010, **15**(3): 246–256 (in Chinese)
- [24] Ding WX, Cai ZC, Tsuruta H, et al. Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in northeast China. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 5149–5157
- [25] Wang ZM, Wu JG, Madden M, et al. China's wetlands: Conservation plans and policy impacts. *Ambio*, 2012, **41**: 782–786
- [26] Li TT, Huang Y, Zhang W, et al. Methane emissions associated with the conversion of marshland to cropland and climate change on the Sanjiang Plain of Northeast China from 1950 to 2100. *Biogeosciences*, 2012, **9**: 5199–5215
- [27] An SQ, Li HB, Guan BH, et al. China's natural wetlands: Past problems, current status, and future challenges. *Ambio*, 2007, **36**: 335–342
- [28] Chen M-P (陈敏鹏), Lin E-D (林而达). Global greenhouse gas emission mitigation under representative concentration pathways scenarios and challenges to China. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2010, **6**(6): 436–442 (in Chinese)
- [29] Hutchinson MF, Gessler PE. Splines: More than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 1994, **62**: 45–67
- [30] Zhu QA, Jiang H, Peng CH, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China. *Ecological Modelling*, 2011, **222**: 2414–2429
- [31] Ju WM, Chen JM, Harvey D, et al. Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO₂. *Journal of Environmental Management*, 2007, **85**: 538–562
- [32] Enting I, Heimann M, Wigley T. Future Emissions and Concentrations of Carbon Dioxide: Key Ocean/Atmosphere/Land Analyses, CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper No. 31. Canberra, Australia: CSIRO, 1994
- [33] Prigent C, Papa F, Aires F, et al. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: Doi: 10.1029/2006JD007847
- [34] Stocker BD, Roth R, Joos F, et al. Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios. *Nature Climate Change*, 2013, **3**: 666–672
- [35] Volodin EM. Methane cycle in the INM RAS climate model. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008, **44**: 153–159
- [36] Eliseev AV, Mokhov II, Arzhanov MM, et al. Interaction of the methane cycle and processes in wetland ecosystems in a climate model of intermediate complexity. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008, **44**: 139–152
- [37] Shindell DT, Walter BP, Faluvegi G. Impacts of climate change on methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: Doi: 10.1029/2004GL021009
- [38] Gedney N, Cox PM, Huntingford C. Climate feedback from wetland methane emissions. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: Doi: 10.1029/2004GL020919

作者简介 刘建功,男,1988年生,硕士研究生。主要从事甲烷排放源不确定性研究。E-mail: brucelyl@163.com

责任编辑 杨弘