DOI: 10.5846/stxb201904240838

张贤,朱求安,杨斌,王洁仪,陈槐,彭长辉.基于过程模型的青藏高原湿地甲烷排放格局评估.生态学报,2020,40(9):3060-3071. Zhang X, Zhu Q A, Yang B, Wang J Y, Chen H, Peng C H.Evaluating patterns of wetland methane emissions in Qinghai-Tibet plateau based on process model.Acta Ecologica Sinica,2020,40(9):3060-3071.

基于过程模型的青藏高原湿地甲烷排放格局评估

张 贤1,朱求安1,2,*,杨 斌1,王洁仪1,陈 槐3,彭长辉1,4

1 西北农林科技大学林学院生态预测与全球变化研究中心,杨凌 712100

2 河海大学水文水资源学院,南京 210098

3 中国科学院成都生物研究所,成都 610041

4 魁北克大学蒙特利尔分校环境科学研究所,蒙特利尔加拿大 C3H3P8

摘要:甲烷(CH₄)是大气中最丰富的碳氢化合物,是仅次于二氧化碳(CO₂)的温室气体。湿地是甲烷的重要来源,在全球碳循 环中发挥着重要作用,其排放的甲烷占所有天然甲烷排放源的 70%,占全球甲烷排放总量的 24.8%。青藏高原平均海拔 4000 m 以上,占有中国约三分之一的湿地。近几十年来,由于全球气候变暖和降水增加,该地区甲烷排放率和湿地面积都发生着巨大 变化,因此,青藏高原湿地 CH₄排放的长期变化在很大程度上仍存在较大的不确定性。利用 TRIPLEX-GHG 模型模拟了青藏高 原湿地 1978—2008 年 CH₄排放的动态特征,研究结果表明:(1)1978—2008 年青藏高原湿地 CH₄排放速率呈逐渐增加趋势。 (2)青藏高原大多数湿地区域 CH₄排放速率为 0—6.13 g CH₄ m⁻²a⁻¹;东北部分湿地区域 CH₄排放速率为 6.14—20.19 g CH₄ m⁻² a^{-1} ;较高的 CH₄排放速率分布于青藏高原南部湿地区域,为 56.14—74.97 g CH₄ m⁻²a⁻¹。(3)青藏高原湿地 CH₄排放量在 1978、 1990、2000 年和 2008 年分别为 0.21、0.23、0.27 和 0.32 Tg CH₄ a⁻¹。在 1978—1990 年,尽管 CH₄排放速率增加,但湿地面积减少, 因此这一时期青藏高原湿地 CH₄排放量并未发生明显变化。随后由于降水增加和冰川融化,使得湿地面积逐渐增加,青藏高原 湿地 CH₄排放量也呈现增加趋势。

关键词:青藏高原;甲烷; TRIPLEX-GHG 模型; 气候变化; 湿地变化

Evaluating patterns of wetland methane emissions in Qinghai-Tibet plateau based on process model

ZHANG Xian¹, ZHU Qiu'an^{1,2,*}, YANG Bin¹, WANG Jieyi¹, CHEN Huai³, PENG Changhui^{1,4}

1 College of Forestry, Center for Ecological Forecasting and Global Change Research, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

 $\label{eq:college} 2 \ {\it College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China}$

3 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

4 Institute of Environment Sciences, University of Quebec at Montreal, Montreal C3H3P8, Canada

Abstract: Methane (CH_4) is the most abundant hydrocarbon in the atmosphere, only second to carbon dioxide (CO_2) as a greenhouse gas. Wetlands are an important source of methane and play an important role in the global carbon cycle. They account for 70% of all natural methane emissions and 24.8% of global methane emissions. The Qinghai-Tibet Plateau (QTP) has an average elevation of more than 4000 m and contains one-third of China's wetlands. In recent decades, due to global warming and increased precipitation, methane emission rate and wetland area in the region have undergone great changes, so the long-term change of CH_4 emissions is still largely uncertainty. In this study, the TRIPLEX-GHG model was

收稿日期:2019-04-24; 网络出版日期:2020-03-16

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qiuan.zhu@gmail.com

http://www.ecologica.cn

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501804);国家自然科学基金面上项目(41571081);中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2019B04714)

used to simulate the dynamic characteristics of CH_4 emissions from wetlands on the QTP from 1978 to 2008. The results showed that: (1) CH_4 emission rate in QTP wetlands were gradually increasing from 1978 to 2008. (2) CH_4 emission rate in most wetland areas of the QTP was 0—6.13 g CH_4 m⁻²a⁻¹ and in some wetland areas of northeast QTP was 6.14—20.19 g CH_4 m⁻²a⁻¹. The higher CH_4 emission rate distributed in the wetland areas of the southern QTP was 56.14—74.97 g CH_4 m⁻²a⁻¹. (3) Total CH_4 emissions in 1978, 1990, 2000, and 2008 were 0.21, 0.23, 0.27, and 0.32 Tg CH_4 a⁻¹, respectively. The analyses indicated that although the CH_4 emission rate increased, the wetland area decreased from 1978 to 1990, therefore, CH_4 emissions did not change significantly in this period. Due to the continuous increase of precipitation and glacier melting, the wetland area gradually increased after 2000. With the combination of increasing wetland area and wetland CH_4 emission rate, the total CH_4 emissions of the QTP wetlands had a continuously creasing trend.

Key Words: Qinghai-Tibet Plateau; methane; TRIPLEX-GHG model; climate change; wetland change

甲烷(CH₄)是大气中最丰富的碳氢化合物,被认为是仅次于二氧化碳(CO₂)的温室气体。自工业革命以来,大气 CH₄浓度增长了一倍多,其年均增幅为 0.5%—0.8%^[1]。近期的一项研究指出,在 21 世纪初,大气中 甲烷浓度增长微乎其微,而在 2014 年和 2015 年开始急剧增长,甲烷浓度的增长速度分别达到 12.5×10⁻⁹(体积分数)和 9.9×10⁻⁹(体积分数),2015 年的平均浓度达到 1834×10⁻⁹(体积分数)^[2]。甲烷分子具有很强的红 外线吸收能力,以单位分子数而言其增温潜势是 CO₂的 28 倍^[3],其浓度升高对全球气候变暖的贡献大约在 25%左右^[4]。

湿地是陆地生态系统的重要组成部分,在包括 CH₄在内的全球碳循环中发挥着重要作用^[5]。长期水淹的 湿地生态系统为甲烷产生提供了先决条件,是甲烷的重要排放源,其甲烷排放占所有天然甲烷排放源的 70%,占全球甲烷排放总量的 24.8%^[6]。中国自然湿地面积 304849 km²,约占世界湿地面积的 10%,对全球湿 地 CH₄排放的贡献是 1.2%—3.2%^[7]。中国超过三分之一的湿地位于青藏高原^[8]。在过去数千年里,由于青 藏高原独特的地理位置和气候条件,土壤有机碳分解较慢,光照条件相对较好,因此这个世界上海拔最高的高 原一直是一个巨大的土壤碳库^[9]。由于全球气候变暖和降水增加,近几十年来该地区湿地面积发生了巨大 变化^[5,10-12]。因此,青藏高原甲烷排放的估算存在很大的不确定性。近年的研究大多使用站点外推法,对青 藏高原湿地甲烷排放量的估计为 0.22^[8]—1.25 Tg CH₄ a^{-1[7]}。

多数研究在估计 CH₄排放时只考虑了温度、降水和 CO₂浓度的变化,而湿地范围则使用了固定数值^[13-15]。 根据模拟湿地面积的研究表明,湿地面积的变化会影响全球和区域范围甲烷的估算^[16-17]。近年的一些研究 也使用了基于遥感分类的动态湿地面积,但研究的时间相对较短,如 1993—2004 年湿地数据用于估计全 球^[18]或北部高纬度地区^[19] CH₄通量的变化;2003—2011 年湿地数据用于估计北部泥炭地和冻土带 CH₄通量 的变化^[20],这些研究强调在季节和年际尺度上,湿地范围变化对 CH₄排放估算的重要性。Paudel 等试图用湿 地范围的差异来解释全球从工业化前(1850 年)到现在(2005 年)期间的湿地 CH₄排放量的变化,结果发现 CH₄排放量变化幅度的三分之一都由面积变化所引起,但由于缺乏完整连续的湿地分布图使得该结果仍然存 在较大的不确定性。因此在进行长时间序列的研究时,要充分考虑湿地面积变化对 CH₄排放量的贡献,并将 其与温度、降水、CO,浓度等气候变化因子的贡献区分开来^[21]。

过去几十年来,估计湿地 CH₄排放量时普遍采用以下 3 种方法:(1)站点通量数据的外推法,使用实际测量的 CH₄通量和固定湿地面积计算湿地甲烷排放量;(2)自下而上的方法,基于 CH₄排放及其环境控制因子,使用过程模型估算湿地 CH₄通量;(3)自上而下的方法,使用反演模型(大气反演模型、大气传输模型)估计 CH₄源和汇的分布^[22-23]。自上而下的方法在进行大尺度区域模拟时,由于逆向性建模过程中可能会包含不完整的观测结果从而造成此方法存在较大的误差^[24]。由于区域内较大的空间异质性,第一种方法从点位数据到区域或全球的尺度转换存在较大的不确定性,如青藏高原气候、土壤、地形和植被存在显著的空间差异,湿

地 CH₄排放也将表现出极大的空间异质性,在估计区域湿地 CH₄排放量时,由于尺度匹配的原因,站点外推法 存在一定的局限性。基于过程的模型可适用于不同气候条件下的甲烷排放估算,同时可以反映在 CH₄生产和 消耗过程中土壤、植被和水文之间发生的复杂相互作用^[25]。

本研究基于 TRIPLEX-GHG 模型,综合考虑气候变化和湿地面积变化的影响,对青藏高原湿地甲烷年排放量进行定量模拟,以此反映近 40 年来青藏高原湿地甲烷排放量的变化趋势。

1 方法和材料

1.1 模型介绍

TRIPLEX-GHG 模型是新一代用于量化陆地生态系统温室气体排放的过程模型,由全球植被动态模型(IBIS)发展而来。IBIS 模型整合了多种陆地生态系统过程,包括陆面过程、冠层生理、植被物候、长期植被动态和土壤地球生物化学 5 大模块^[26-27]。Zhu 等^[28]通过将湿地水位动态过程模块整合到 IBIS 模型中,在添加新的湿地植物功能型的基础上,综合考虑土壤温度、土壤湿度、土壤氧化还原电位(Eh)、土壤 PH 等因素对湿地 CH₄排放的影响,实现了以生物地球化学过程为基础的湿地甲烷产生、消耗及传输过程的模拟(图1)^[29]。经验证,模型能够在不同时空尺度下对全球湿地 CH₄排放进行定量模拟^[15]。





1.2 研究区域

青藏高原平均海拔 4000 m 以上,地势高、地形特殊,形成了独特的高原气候。该地区气候总体特点:辐射 强烈,日照多,气温低,积温少,气温日较差大,大部分地区最暖月均温在 15℃以下;降水少,地域差异大,年降 水量 400 mm 左右。近年来,由于气候因素和实验条件的限制,现有对该地区湿地甲烷排放的研究存在时间 和空间的局限。因此,要准确估计该地区湿地甲烷排放格局,不同湿地区域甲烷排放速率和湿地分布面积的 长期变化尤为重要。

本研究通过收集青藏高原湿地 CH₄排放观测数据,对模型敏感参数进行率定和校正。相关观测数据站点 分布如图 2 所示:包括海北湿地(37°35′N,101°20′E)地处青藏高原东北隅;若尔盖高原(33°35′N,102°58′E) 位于四川省的西北部,是中国最大的泥炭地分布区;纳 木错(30°33'N,90°40'E)和当雄(30°29'N,91°06'E)地 处西藏中部,昼夜温差大,多大风;风火山(34°43'N,92° 53'E)气候酷寒,生境潮湿,山麓周围全是多年不化的 永冻层;花石峡(35°39'N,98°48'E)位于青海省玛多县 东北部。站点的具体信息包括经纬度、海拔、年平均气 温、年平均降水、甲烷通量的测量时间、测量方法及平均 甲烷通量见表1。

1.3 模型驱动数据

模型所需的驱动数据主要有气象数据和湿地分布 数据。气象数据包括 1951—2017 年青藏高原逐日的气 温、降水、风速、相对湿度等,分辨率为 10 km×10 km。 根据中国标准气象站点日气象数据(共 756 个站点), 利用 ANUSPLIN 方法进行插值得到全国分辨率 10 km× 10 km 的空间分布日气象数据,在此基础上将青藏高原





Fig.2 Distribution of wetland CH₄ flux observation sites on the Qinghai-Tibet Plateau

湿地分布底图为 2008 年中国湿地地图[11]

部分提取出来,以此数据驱动模型模拟青藏高原湿地 CH₄通量。湿地数据有两套,其中一套由 Niu 等^[11]以全国陆地卫星(Landsat)遥感数据为数据源完成的 1978、1990、2000 和 2008 年 4 期动态湿地地图,代表了中国湿地动态的最新研究进展,分辨率为 1 km×1 km;另一套是由欧洲航天局(ESA)制作的 1992—2015 年全球土地覆盖数据库,分辨率为 300 m×300 m。将两套湿地分布数据分辨率统一到模型模拟的分辨率(10 km×10 km),并计算该分辨率下每个栅格的湿地面积占比和每个栅格的湿地面积。根据上述数据估算青藏高原湿地CH₄通量及年排放总量。

站点 Stations	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	海拔 Altitude/m	年平均气温 Mean annual temperature/℃	年平均降水 Mean annual precipitation/mm	测量方法 Measuring method	测量时间 Measurement period	通量 CH ₄ flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	参考文献 References
海北	37°35′	101°20'	3250	-1.1	490	涡度相关法	2012年5月到9月	3.82	[30]
			3250	-1.1	490	涡度相关法	2013年5月到9月	4.58	[30]
			3250	-1.1	490	涡度相关法	2011年7月到2013年12月	5.19	[31]
若尔盖	33°35′	102°58′	3500	1	650	静态箱法	4月到10月2003—2005	0.70	[32]
			3430	1	650	静态箱法	5月到9月2001—2002	2.96	[33]
			3430	0.9	710	静态箱法	2005年5月到9月	6.34	[34]
			3430	1	645	静态箱法	7月到9月2005—2007	4.33	[7]
			3430	1	650	静态箱法	2001年5月到9月	2.33	[35]
			3500	0.7	657	静态箱法	6月到9月2009—2010	3.29	[36]
			3400	1	650	静态箱法	2006年6月到8月	4.69	[37]
纳木错	30°33′	90°40′	4758	-0.6	415	静态箱法	5月到9月2012—2014	0.76	[8]
当雄	30°29′	91°06′	4320	1.5	477	静态箱法	2014年6月到8月	1.44	[8]
风火山	34°43′	92°53′	4778	-5.3	270	静态箱法	2008年1月到10月	0.13	[32]
花石峡	35°39′	98°48′	4400	-5.4	520	静态箱法	1996年6月到8月	1.17	[38]
			4400	-5.4	520	静态箱法	1997年6月到8月	1.04	[39]
			4400	-5.4	520	静态箱法	1997年4月到9月	0.54	[40]

表 1 青藏高原 CH₄通量观测站点信息表 Table 1 Information table of CH₄ flux observation sites on Qinghai-Tibet Plateau

2 结果

2.1 模型参数校正

根据 Zhu 等的研究表明,模型在模拟湿地甲烷排放时有两个敏感参数,包括土壤异养呼吸中 CH₄与 CO₂

释放比例(r)和甲烷产生的温度控制参数(*Q*₁₀*P*)^[29]。因此,基于6个观测站点收集的实测数据,我们对这两个敏感参数进行校正,并计算包括均方根误差(RMSE),决定系数(*R*²),符合指数(*D*)在内的指标来进行评估。其中D值范围在0到1之间,当D值越接近于1说明模拟值与测量值吻合程度越高,越接近于0说明模拟值与测量值吻合程度越低。

图 3 表示各站点 CH₄通量实测值和模拟值的对比情况,结果显示各站点不同阶段模拟值与实测值之间达 到较好吻合。海北湿地,计算得知模拟值与 Jin 等^[31]的实测值吻合更好(RMSE=0.06, *R*²=0.72, *D*=0.74)。 若尔盖高原站点,计算得知模拟值与 Ding 等^[33]的实测值吻合程度更好(RMSE=0.04, *R*²=0.38, *D*=0.76)。纳 木错站点的模型模拟值与实测值达到很好的吻合(RMSE=0.01, *R*²=0.50, *D*=0.78),其中 2012 年和 2014 年 模拟值与实测值吻合更好,2013 年实测值整体较小。当雄站点的模拟值与实测值吻合较好(RMSE=0.07, *R*²=0.90, *D*=0.90),但由于实测数据较少吻合程度计算可能会有所偏差。图 3 柱状图表示青藏高原所有站点 测量时间内的平均实测值与模型同一时期平均模拟值的比较,也显示模拟值与实测值之间达到较好吻合 (RMSE=0.47, *R*²=0.92, *D*=0.96)。由于风火山和花石峡两个站点缺乏连续的 CH₄通量实测值,因此在确定 两站点参数时以测量时间内的平均 CH₄通量为准。

表 2 表示各站点模型敏感参数 r 和 Q₁₀P 校正后的标定值及模拟结果与实测值的比较。r 取值在 0.10—0.35之间,平均值为 0.21;Q₁₀P 取值在 2.00—3.00 之间,平均值为 2.80。与 Zhu 等校正的青藏高原的两个敏感参数(r=0.21,Q₁₀P=3.00)接近^[29]。从总体上来看,模型对各个站点的湿地甲烷通量的模拟取得了合理的效果。

	Table 2 Calib	ration values of pa	rameters r and Q	2 ₁₀ P and evaluatio	n of model perfo	ormance	
站点 Stations	海拔/m Altitude	年平均气温/℃ Mean annual precipitation	异养呼吸中 CH ₄ 与CO ₂ 释放比例 r(CH ₄ /CO ₂)	温度控制参数 Q ₁₀ P	均方根误差 RMSE	决定系数 R ²	符合指数 D
海北 Haibei	3250	-2	0.35	2.00	0.06	0.72	0.74
若尔盖 Zoige	3430	1	0.28	2.50	0.04	0.38	0.76
纳木错 Nam co	4758	-0.6	0.10	3.50	0.01	0.50	0.78
当雄 Dangxiong	4320	1.5	0.18	2.80	0.07	0.90	0.90
花石峡 Huashixia	4400	-5.4	0.15	3.00	_	—	—
风火山 Fenghuoshan	4778	-5.3	0.20	3.00	—	_	_
总体 All stations	_	_	_	—	0.47	0.92	0.96

表 2	参数 r 和 $Q_{10}P$ 标定值及模型性能的评估

为了对整个青藏高原湿地区的甲烷通量进行模拟,基于站点校正结果,对校正之后的站点参数与站点温度、降水和海拔等因子间关系进行分析,得出整个青藏高原湿地区这两个参数经验性分布(图4)。参数 r 按照海拔梯度分为 3 个区间,每个区间取对应站点参数的平均值(表 2):3500 m 以下,r=0.315;3500—4500 m,r=0.165;4500 m 以上,r=0.150。参数 $Q_{10}P$ 按照年均温分为 2 个区间(表 2):0℃以上, $Q_{10}P=2.65$;0℃以下, $Q_{10}P=2.75$ 。

2.2 青藏高原甲烷排放的模拟

基于站点参数校正过程得到的青藏高原湿地甲烷排放敏感参数分布和湿地分布数据,利用 TRIPLEX-GHG 模型对青藏高原湿地甲烷排放进行了模拟。模拟结果表明由不同的湿地数据所估算的 CH₄排放之间存 在较大差异。

根据 Niu 等^[11]的湿地数据模拟出 CH₄排放量范围为 0.21—0.32 Tg CH₄ a⁻¹, 根据 ESA 湿地数据模拟出 1992—2015 年 CH₄排放量范围为 0.08—0.14 Tg CH₄ a⁻¹(表 3)。根据之前的研究(表 3)发现青藏高原 CH₄排放量为 0.06—2.47 Tg CH₄ a⁻¹,我们的研究结果也处于这一范围内。Jin 等^[38]对青藏高原 CH₄排放量的估计



Comparison of measured and simulated CH₄ flux from different sites on the Qinghai-Tibet Plateau^[8,30-31,33-41] Fig.3

研究最早,范围是 0.7—0.9 Tg CH₄a⁻¹; Xu 等^[43]用 TEM 模型对青藏高原 1995—2005 年 CH₄排放量估计为2.47 Tg CH₄ a⁻¹, 是研究中最大的估计值; Xu 和 Tian^[44] 对青藏高原 CH₄ 排放量的估计为 0.06 Tg CH₄ a⁻¹, 相对于其 他人的研究较小;Ding 等^[33]和 Chen 等^[7]对青藏高原 CH₄排放量的估计都是基于对若尔盖站点通量的测量, 但两人的结果存在较大差异,分别为0.56 Tg CH₄ a⁻¹和1.49 Tg CH₄ a⁻¹; Wei 等^[8]通过对纳木错和当雄两个站 点 CH₄通量的测量计算出整个青藏高原湿地 CH₄排放量为 0.22—0.41 Tg CH₄ a⁻¹, 而通过 LPJ 模型模拟出青 藏高原 CH₄排放量为 0.96 Tg CH₄ a^{-1[45]}; Jin 等^[31]通过 TEM 模型模拟出青藏高原 2001—2011 年 CH₄排放量 为 0.95 Tg CH₄ a⁻¹, 而 Li 等^[41] 通过 TEM 模型对同一时期青藏高原 CH₄ 排放量的估计值为 0.22 Tg CH₄ a⁻¹, 表 现出较大差别,这主要是由于 Li 研究中的湿地面积为 3.33×104 km2, 而 Jin 研究中的湿地面积为 13.4× 10^4 km^2

9期



图4 青藏高原模型敏感参数的分布

Fig.4 Distribution of model sensitive parameters of the Qinghai-Tibet Plateau

底图为 2008 年湿地分布地图[11]

表 3	TRIPLEX-GHG	模型模拟	青藏高原湿地	CH₄	排放量(范围)	及与	可其他研究结	课的比较
-----	-------------	------	--------	-----	------	-----	----	--------	------

Table 3 C	Comparison of (CH ₄ emissions	(range)	of simulated Q	inghai-Tibet Plateau	wetland by	TRIPLEX-G	HG model a	nd other	research result
-----------	-----------------	---------------------------	---------	----------------	----------------------	------------	-----------	------------	----------	-----------------

方法 Method	时间 Measurement period	年排放量 Emission/ (Tg CH ₄ a ⁻¹)	湿地面积 Wetland area/ (×10 ⁴ km ²)	通量 CH ₄ flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	参考文献 References
站点外推法 Site extrapolation	1996—1997	0.7—0.9	18.80	0.48	[38]
站点外推法 Site extrapolation	2001—2002	0.56	4.80	2.96	[33]
站点外推法 Site extrapolation	2012—2014	0.22—0.41	6.32	_	[8]
整合分析 Meta-Analysis	2000	1.49	—	—	[7]
整合分析 Meta-Analysis	1990—2010	1.04	3.76	3.15	[42]
TEM 模型 TEM model	1995—2005	2.47	11.50	2.45	[43]
TEM 模型 TEM model	2001-2011	0.95	13.40	0.81	[31]
DLEM 模型 DLEM model	2008	0.06	3.20	—	[44]
TEM 模型 TEM model	2000—2010	0.22	3.33	0.77	[41]
LPJ-WHyMe 模型 LPJ-WHyMe model	1979—2012	0.96	3.07—3.57	2.85±0.16	[45]
TRIPLEX-GHG 模型 TRIPLEX-GHG model	1978—2008	0.21-0.32	9.54—10.28	0.24—0.36	本研究 (Niu)
TRIPLEX-GHG 模型 TRIPLEX-GHG model	1992—2015	0.08—0.14	4.64—5.12	0.19—0.32	本研究 (ESA)

图 5 显示了 2008 年青藏高原 CH₄通量和排放量分布情况,分辨率为 10 km×10 km。由于湿地分布的不同导致 CH₄排放速率的分布也存在较小差异,青藏高原西部大多数湿地区域 CH₄排放速率小于东部,且大多数湿地区域 CH₄排放速率为 0—6.13 g CH₄ m⁻²a⁻¹;东北部分湿地区域 CH₄排放速率为 6.14—20.19 g CH₄ m⁻² a⁻¹;较高的 CH₄排放速率分布于青藏高原南部湿地区域,为 56.14—74.97 g CH₄ m⁻²a⁻¹。CH₄排放量分布格局显示,整体来看,由牛振国湿地分布数据估算的青藏高原 CH₄排放量分布区域较欧洲航天局的分布区域广。 2.3 青藏高原湿地甲烷排放的动态

气温和降水是影响湿地分布的主要因素^[11]。研究结果表明无论是年平均气温还是年平均降水量,自 1978年至今,青藏高原区域都呈现出增加趋势(图6)。Niu等^[11]的湿地数据表明湿地面积从1978年到1990 年表现为减少趋势,由10.04×10⁴km²减少为9.54×10⁴km²,2000年到2008年湿地面积由10.05×10⁴km²增加 至10.28×10⁴km²,ESA的湿地数据表明1990年后湿地面积也呈现增加趋势。青藏高原湿地CH₄通量也表现 出增加趋势,且两套湿地数据估算的通量结果较为接近,处于同一范围内(图7)。根据牛振国湿地数据估算



图 5 2008 年青藏高原湿地 CH₄通量与排放量分布

Fig.5 CH₄ flux and emissions distribution of wetland on Qinghai-Tibet Plateau in 2008

出 1978、1990、2000 年和 2008 年 CH₄排放量分别为 0.21、0.23、0.27 和 0.32 Tg CH₄ a⁻¹;欧洲航天局湿地数据 估算 CH₄排放量从 1990 年至 2015 年逐渐增加(图 7)。结合两套排放量数据可以看出 1978—1990 年 CH₄排 放量增加缓慢,并未发生明显变化;从 1990 年至今,CH₄排放量呈增加趋势(图 7)。

3 讨论

湿地甲烷排放总量的估算差异可归因于甲烷排放速率和湿地分布两方面,两者的差异均会影响湿地甲烷 年排放总量的估算。在站点外推的方法中,由于研究者测量 CH₄通量时大都选取生长季节进行测量,对全年 CH₄通量存在高估,且测量的时空覆盖范围有限,因此从点测量到区域尺度转换方面可能并不可靠。在模型 模拟方法中,TEM 模型,LPJ-WHyMe 模型,DLEM 模型和 TRIPLEX-GHG 均耦合了水文模块和甲烷动态模块 (甲烷产生、氧化、传输),可定量模拟湿地甲烷的排放。但各个模型在模型结构不同,对湿地甲烷排放的影响 因子的模拟或假设也有所区别,所使用的 CH₄产生、氧化、传输和排放等过程之间存在一定的差异,模型复杂 程度和所强调的功能有一定差异,从而会使得 CH₄排放的速率的计算产生一定差别,从而影响 CH₄排放总量 的估算。其中,LPJ-WHyMe 模型明确描述了湿地水文过程,包括积雪堆积、融化、冻土活动层深度动态等,比 TEM 模型更能准确反映甲烷过程;DLEM 模型由生物物理模块、植物生理模块、土壤生物地球化学、植被动态 模块、土地利用与人类管理 5 大模块组成,可更好适应于发生较大人为干扰的区域;TRIPLEX-GHG 模型充分 考虑了水位变化和土壤异养呼吸速率、土壤温度、pH、土壤氧化还原电势等对甲烷排放的影响,能够更加准确 的模拟湿地甲烷排放。同时,同一模型参数校正时,由于选取实测站点、测量时间和实测 CH₄通量的不同都会 使校正后参数集存在差异(如 Jin^[31]等的研究中选取了 2011—2013 年海北站的实测数据进行 TEM 模型参数的校正,而 Li 等^[41]的研究选取了 2001 年 5—9 月若尔盖站点和 2011 年海北站点的实测数据进行 TEM 模型 参数的校正)。上述因素都会造成模型甲烷排放速率的不同。

湿地面积对 CH_4 排放量的估计至关重要,根据已有湿地数据表示,青藏高原湿地面积的估算存在很大的不确定性,估算值处于 $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 到 $18.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 之间(表 3)。Xu 等^[43]和 Chen 等^[7]使用了全球湖泊和湿









Fig.7 CH₄ flux and CH₄ emissions in Qinghai-Tibet Plateau

地数据集(GLWD),这套数据对湿地范围存在高估,这可能是其结果过高的原因;一些研究中所使用的湿地面积为调查得到的固定湿地面积,这种方式存在较大人为因素的影响^[33,38,42];Jin 等^[31]的研究中利用土壤湿润

程度对青藏高原的湿地面积进行了估算。本研究中的湿地数据是基于遥感制图的两套数据,比较发现牛振国的湿地面积明显较大,造成湿地面积不同的原因主要是欧洲航天局的湿地数据中未包含苔藓沼泽,这也正是基于这两套湿地数据估算 CH₄排放差异产生的原因。同样使用遥感数据的还有 Wei 等^[45]及 Xu 等^[44],由于所使用的遥感数据对湿地定义的不同,造成这一数据间也存在较大差异。例如 Xu 和 Tian 使用的湿地数据不包括盐化沼泽,因此其研究中湿地面积较小。

在本研究中,我们选取了对青藏高原湿地甲烷排放观测较为集中的站点,这些站点的海拔、地理位置、实 测 CH₄通量、测量时间等因素都有较大差异,反映了不同地区湿地特征,以保证模型参数校正的合理性,并在 此基础上形成整个青藏高原的敏感参数分布集,使得模型模拟的参数集更具代表性。与其他模型研究相比, 本文研究结果虽处于一个合理范围内,但相对较低,这可能是由于:(1)模型自身结构差异的影响。TRIPLEX-GHG 模型中通过土壤温度和土壤水相态的改变来体现冻融过程,对湿地甲烷排放过程有一定影响,但由于冻 融过程对湿地甲烷排放影响的机理较为复杂,模型不能完全反映青藏高原春夏之交冻融阶段湿地甲烷排放格 局^[15],使得结果存在一定不确定性;(2)其他基于过程模型的研究在进行模型参数校正时,大都选用海北和若 尔盖站点的实测值^[31,41],然而这两个站点的实测值较青藏高原其他站点高,校正后的参数集对于整个青藏高 原并不一定完全合适;(3)不同研究所选用的湿地数据集不同,造成模型结果对比的不确定性。

一些研究估计了 1949—2008 年青藏高原的 CH₄通量并认为气候变化是影响 CH₄通量的主要因素^[44]。 Zhu 等^[46]的研究表明土壤温度和水位深度对 CH₄排放有着显著正相关,而土壤温度受气温控制,水位深度受 降水控制。综上所述,气候变化会直接或间接影响湿地面积和 CH₄通量。首先气温升高促使甲烷排放速率增 加,降水增加则促使湿地扩张,但气温的升高同样会引起湿地水分蒸发加快,使湿地收缩;对于有冰川和积雪 覆盖的区域,气温升高引起融水增加,湿地面积扩大。因此气温变化对不同区域的湿地具有不同的影响结果。 在 1978—1990 年 CH₄通量随气温和降水增加而逐渐升高,但同期湿地面积却呈现收缩趋势,通量的增加几乎 弥补了湿地面积减小所带来的影响,因此 CH₄排放量没有明显变化;1990—2015 年 CH₄通量和湿地面积都逐 渐增加,因此 CH₄排放量也呈增加趋势。根据相关研究分析认为,1990 年前的湿地萎缩大都发生在未有冰川 覆盖的湿地上,随着气温增加蒸发加快,降水无法弥补蒸发量引起湿地面积减少;在此之后随着温度持续升 高,冰川覆盖湿地的冰川融化,降水增多使得湿地面积增加^[11]。

4 结论

本研究基于 TRIPLEX-GHG 模型结合最新观测资料、高分辨率气象数据和最新进展的动态湿地图,探讨 了青藏高原湿地 CH₄排放的时间和空间格局。研究结果表明该模型对青藏高原湿地 CH₄排放的模拟取得了 合理效果。气候变化会直接或间接影响 CH₄通量,在气温逐渐升高的影响下,近40 年来湿地 CH₄通量呈增加 趋势。青藏高原大多数湿地区域 CH₄排放速率为 0—6.13 g CH₄ m⁻²a⁻¹;东北部分湿地区域 CH₄排放速率为 6.14—20.19 g CH₄ m⁻²a⁻¹;较高的 CH₄排放速率分布于青藏高原南部湿地区域,最高可达 74.97 g CH₄ m⁻²a⁻¹。 1978—1990 年湿地面积呈收缩趋势,因此这一阶段 CH₄排放量为 0.21—0.23 Tg CH₄ a⁻¹并未发生明显变化; 2000—2008 年由于持续的降水增加和冰川融化,湿地面积呈扩张趋势,使青藏高原 CH₄排放量呈逐渐增加趋 势,为 0.27—0.32 Tg CH₄ a⁻¹。这项研究表明气候变化和湿地变化均会引起湿地甲烷排放量的变化,但目前对 湿地类型缺乏明确定义,现有的湿地地图存在一定缺陷,因此今后在估计湿地 CH₄排放的年际变化时,准确的 湿地制图是非常重要的。

参考文献(References):

[2] Saunois M. Jackson R B, Bousquet P, Poulter B, Canadell J G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. Environmental Research Letters, 2016, 11(12): 120207.

^[1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

- [3] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, Collins W, Fuglestvedt J, Huang J P, Koch D, Lamarque J F, Lee D, Mendoza B, Nakajima T, Robock A, Stephens G, Takemura T, Zhang H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 731-738.
- [4] Thompson A M, Hogan K B, Hoffman J S. Methane reductions: implications for global warming and atmospheric chemical change. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, 26(14): 2665-2668.
- [5] Zhang Y, Li C S, Trettin C C, Li H, Sun G. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(4): 1061.
- [6] 陈槐, 高永恒, 姚守平, 吴宁, 王艳芬, 罗鹏, 田建卿. 若尔盖高原湿地甲烷排放的时空异质性. 生态学报, 2008, 28(7): 3425-3437.
- [7] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Jiang H, Xiang W H, Chang J, Deng X W, Yu G R. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: synthesis new estimate. Global Change Biology, 2013, 19(1): 19-32.
- [8] Wei D, Xu-Ri, Tarchen T, Dai D X, Wang Y S, Wang Y H. Revisiting the role of CH₄ emissions from alpine wetlands on the Tibetan Plateau: evidence from two in situ measurements at 4758 and 4320 m above sea level. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(9): 1741-1750.
- [9] Kato T, Yamada K, Tang Y H, Yoshida N, Wada E. Stable carbon isotopic evidence of methane consumption and production in three alpine ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. Atmospheric Environment, 2013, 77: 338-347.
- [10] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. International Journal of Climatology, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [11] Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, Yao W B, Zhou D M, Zhao K Y, Zhao H, Li N N, Huang H B, Li C C, Yang J, Liu C X, Liu S, Wang L, Li Z, Yang Z Z, Qiao F, Zheng Y M, Chen Y L, Sheng Y W, Gao X H, Zhu W H, Wang W Q, Wang H, Weng Y L, Zhuang D F, Liu J Y, Luo Z C, Cheng X, Guo Z Q, Gong P. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [12] Xue Z S, Zhang Z S, Lu X G, Zou Y C, Lu Y L, Jiang M, Tong S Z, Zhang K. Predicted areas of potential distributions of alpine wetlands under different scenarios in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Global and Planetary Change, 2014, 123: 77-85.
- [13] Walter B P, Heimann M, Shannon R D, White J R. A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands. Geophysical Research Letters, 1996, 23(25): 3731-3734.
- [14] Zhuang Q, Melillo J M, Kicklighter D W, Prinn R G, McGuire A D, Steudler P A, Felzer B S, Hu S. 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(3): GB3010.
- [15] Zhu Q A, Peng C H, Chen H, Fang X Q, Liu J X, Jiang H, Yang Y Z, Yang G. Estimating global natural wetland methane emissions using process modelling: spatio-temporal patterns and contributions to atmospheric methane fluctuations. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24 (8): 959-972.
- [16] Kaplan J O. Wetlands at the last glacial maximum: distribution and methane emissions. Geophysical Research Letters, 2002, 29(6): 1079.
- [17] Hodson E L, Poulter B, Zimmermann N E, Prigent C, Kaplan J O. The El Niño-southern Oscillation and wetland methane interannual variability. Geophysical Research Letters, 2011, 38(8): L08810.
- [18] Riley W J, Subin Z M, Lawrence D M, Swenson S C, Torn M S, Meng L, Mahowald N M, Hess P. Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. Biogeosciences, 2011, 8 (7): 1925-1953.
- [19] Zhuang Q L, Zhu X D, He Y J, Prigent C, Melillo J M, McGuire A D, Prinn R G, Kicklighter D W. Influence of changes in wetland inundation extent on net fluxes of carbon dioxide and methane in northern high latitudes from 1993 to 2004. Environmental Research Letters, 2015, 10 (9): 095009.
- [20] Watts J D, Kimball J S, Parmentier F J W, Sachs T, Rinne J, Zona D, Oechel W, Tagesson T, Jackowicz-Korczyński M, Aurela M. A satellite data driven biophysical modeling approach for estimating northern peatland and tundra CO₂ and CH₄ fluxes. Biogeosciences, 2014, 11(7): 1961-1980.
- [21] Paudel R, Mahowald N M, Hess P G M, Meng L, Riley W J. Attribution of changes in global wetland methane emissions from pre-industrial to present using CLM4.5-BGC. Environmental Research Letters, 2016, 11(3): 034020.
- [22] Kirschke S, Bousquet P, Ciais P, Saunois M, Canadell J G, Dlugokencky E J, Bergamaschi P, Bergmann D, Blake D R, Bruhwiler L, Cameron-Smith P, Castaldi S, Chevallier F, Feng L, Fraser A, Heimann M, Hodson E L, Houweling S, Josse B, Fraser P J, Krummel P B, Lamarque J F, Langenfelds R L, Le Quéré C, Naik V, O'Doherty S, Palmer P I, Pison I, Plummer D, Poulter B, Prinn R G, Rigby M, Ringeval B, Santini M, Schmidt M, Shindell D T, Simpson I J, Spahni R, Steele L P, Strode S A, Sudo K, Szopa S, Van Der Werf G R, Voulgarakis A, Van Weele M, Weiss R F, Williams J E, Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks. Nature Geoscience, 2013, 6(10): 813-823.

- [23] Arneth A, Sitch S, Bondeau A, Butterbach-Bahl K, Foster P, Gedney N, De Noblet-Ducoudre N, Prentice I C, Sanderson M, Thonicke K, Wania R, Zaehle S. From biota to chemistry and climate: towards a comprehensive description of trace gas exchange between the biosphere and atmosphere. Biogeosciences, 2010, 7(1): 121-149.
- [24] Chen Y H, Prinn R G. Atmospheric modeling of high- and low-frequency methane observations: importance of interannually varying transport. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D10): D10303.
- [25] Cao M K, 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(D9): 14399-14414.
- [26] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603-628.
- [27] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 795-825.
- [28] Zhu Q, Liu J, Peng C, Chen H, Fang X, Jiang H, Yang G, Zhu D, Wang W, Zhou X. Modelling methane emissions from natural wetlands by development and application of the TRIPLEX-GHG model. Geoscientific Model Development, 2014, 7(3): 981-999.
- [29] Granberg G, Grip H, Löfvenius M O, Sundh I, Svensson B H, Nilsson M. A simple model for simulation of water content, soil frost, and soil temperatures in boreal mixed mires. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3771-3782.
- [30] Song W M, Wang H, Wang G S, Chen L T, Jin Z N, Zhuang Q L, He J S. Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: neglected but vital contribution of the nongrowing season. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(8): 1475-1490.
- [31] Jin Z N, Zhuang Q L, He J S, Zhu X D, Song W M. Net exchanges of methane and carbon dioxide on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2100. Environmental Research Letters, 2015, 10(8): 085007.
- [32] Wang J F, Wang G X, Hu H C, Wu Q B. The influence of degradation of the swamp and alpine meadows on CH₄ and CO₂ fluxes on the Qinghai-Tibetan Plateau. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(3): 537-548.
- [33] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China. Atmospheric Environment, 2004, 38 (5): 751-759.
- [34] Chen H, Wu N, Yao S P, Gao Y H, Wang Y F, Tian J Q, Yuan X Z. Diurnal variation of methane emissions from an alpine wetland on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 164(1/4): 21-28.
- [35] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 842-844.
- [36] 李丽, 雷光春, 高俊琴, 吕偲, 周延, 贾亦飞, 杨萌, 索郎夺尔基. 地下水位和土壤含水量对若尔盖木里苔草沼泽甲烷排放通量的影响. 湿地科学, 2011, 9(2): 173-178.
- [37] Ding W X, Cai Z C. Methane emission from natural wetlands in China: Summary of years 1995—2004 studies. Pedosphere, 2007, 17(4): 475-486.
- [38] Jin H J, Wu J, Cheng G D, Tomoko N, Sun G Y. Methane emissions from wetlands on the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(24): 2282-2286.
- [39] 金会军, 程国栋, 徐柏青, 中野智子. 青藏高原花石峡冻土站高寒湿地 CH₄排放研究. 冰川冻土, 1998, 20(2): 172-174.
- [40] 金会军,吴杰,程国栋,孙广友.青藏高原冷湿地生态系统 CH₄排放量估算(英文).冰川冻土,1999,21(4):339-350.
- [41] Li T T, Zhang Q, Cheng Z G, Ma Z F, Liu J, Luo Y, Xu J J, Wang G C, Zhang W. Modeling CH₄ emissions from natural wetlands on the Tibetan Plateau over the past 60 years: influence of climate change and wetland loss. Atmosphere, 2016, 7(7): 90.
- [42] Zhang X, Jiang H. Spatial variations in methane emissions from natural wetlands in China. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(1): 77-86.
- [43] Xu K, Kong C F, Liu J Q, Wu Y. Using Methane Dynamic Model to Estimate Methane Emission from Natural Wetlands in China//Proceedings of 2010 18th International Conference on Geoinformatics. Beijing: IEEE, 2010: 1-4.
- [44] Xu X F, Tian H Q. Methane exchange between marshland and the atmosphere over China during 1949-2008. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(2): GB2006.
- [45] Wei D, Wang X D. Recent climatic changes and wetland expansion turned Tibet into a net CH₄ source. Climatic Change, 2017, 144(4): 657-670.
- [46] Zhu X D, Zhuang Q L, Chen M, Sirin A, Melillo J, Kicklighter D, Sokolov A, Song L L. Rising methane emissions in response to climate change in Northern Eurasia during the 21st century. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): 045211.