

DOI: 10.20103/j.stxb.202311292606

夏唯一, 樊畅, 张戈丽. 基于优化 IPCC 方法的中国稻田甲烷排放量估算. 生态学报, 2024, 44(21): 9826-9835.

Xia W Y, Fan C, Zhang G L. Estimation of methane emission from typical rice areas in China based on optimized IPCC method. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9826-9835.

基于优化 IPCC 方法的中国稻田甲烷排放量估算[#]

夏唯一¹, 樊畅², 张戈丽^{2,*}

1 中国人民大学公共管理学院, 北京 100872

2 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083

摘要: 稻田是重要的农业甲烷排放源, 估算其排放量的大小及变化趋势对于气候变化问题具有重要意义。但当前区域或国家尺度上的稻田甲烷排放估算研究中, 高精度水稻时空分布数据的应用较为缺乏, 估算结果仍存在较大不确定性。因此, 基于 2019 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 更新的《国家温室气体清单指南》中提出的稻田甲烷排放估算方法, 更新了我国水稻种植分布与日排放因子 EF , 在此基础上估算 2015 年我国稻田甲烷排放总量并探讨我国稻田甲烷排放的区域特征。研究表明: ① 2015 年我国稻田甲烷排放总量为 7.541 (6.866—8.216) Tg CH_4/a 。其中, 华中、华南和华东地区作为最大水稻分布区, 其稻田甲烷排放量整体较高。全国日排放因子基准值 (EF_c) 的平均值为 1.231 (1.121—1.341) kg $CH_4\text{ hm}^{-2}\text{ d}^{-1}$, 全国日排放因子调整值 (EF_i) 的平均值为 1.764 (1.606—1.922) kg $CH_4\text{ hm}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 。② 日排放因子基准值 (EF_c) 较高的区域主要分布在西南和华南地区, 而日排放因子调整值 EF_i 较高的区域主要分布在华东和华南地区。③ 受人为主观影响, 华南、华东以及华中等地区的 EF_i 显著提升, 而西北、港澳台地区等的 EF_i 显著下降, 表明人类活动在影响稻田甲烷排放的因素中起主导作用。本研究通过进一步明晰不同区域的稻田甲烷日排放因子, 优化了我国的稻田甲烷排放估算结果, 为气候变化背景下估算稻田产生的甲烷排放量提供了思路, 同时也为双碳目标背景下农业部门制定稻田减排措施和重塑作物格局提供了定量数据支撑。

关键词: 水稻; 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 清单; 温室气体; 甲烷排放量

Estimation of methane emission from typical rice areas in China based on optimized IPCC method

XIA Weiyi¹, FAN Chang², ZHANG Geli^{2,*}

1 School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2 College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Paddy fields are a significant source of agricultural methane emissions, making the estimation of their emission levels and trends crucial for addressing climate change. However, current research on methane emissions from paddy fields at regional or national scales often lacks the application of high-resolution spatiotemporal data on rice distribution, leading to considerable uncertainties in the estimates. To address this gap, we have utilized the updated methodology for estimating methane emissions from paddy fields as outlined in the 2019 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. This involved updating the distribution of rice cultivation across China and refining the daily emission factors (EF). Building on this foundation, we estimated the total methane emissions from China's paddy fields in 2015 and analyzed the regional characteristics of these emissions. The study reveals the following key findings: ① In 2015, the total methane emissions from China's paddy fields amounted to 7.541 (6.866—8.216) Tg CH_4 per year. The central, southern, and eastern regions

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171115); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2024RC019)

收稿日期: 2023-11-29; **网络出版日期:** 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geli.zhang@cau.edu.cn

[#]IPCC 即政府间气候变化专门委员会

of China, which are the primary rice-growing areas, exhibited significantly higher methane emissions from paddy fields compared to other regions. The national average baseline daily emission factor (EF_c) was determined to be 1.231 (1.121—1.341) kg CH₄ per hectare per day, whereas the adjusted daily emission factor (EF_i) averaged 1.764 (1.606—1.922) kg CH₄ per hectare per day. ② The study also identified regions with higher baseline daily emission factors (EF_c), which were predominantly found in the southwest and southern parts of China. In contrast, areas with higher adjusted daily emission factors (EF_i) were primarily located in the eastern and southern regions, indicating spatial variability in emission intensities. ③ The influence of human activities on methane emissions was evident, with significant increases in the adjusted daily emission factors (EF_i) in the southern, eastern, and central regions of China. Conversely, regions such as the northwest and the Hong Kong-Macao-Taiwan areas experienced a notable decrease in these factors, underscoring the dominant role of anthropogenic factors in modulating methane emissions from paddy fields. This research enhances the understanding of daily emission factors for paddy fields across different regions, thereby refining the estimation of methane emissions from China's paddy fields. The findings provide valuable insights into methane emission dynamics in the context of climate change. Moreover, this study offers crucial quantitative data to support the agricultural sector in formulating effective methane emission reduction strategies and restructuring crop patterns in line with the dual carbon goals. In addition, the research highlights the importance of incorporating high-precision satellite data and ground-based observations to improve the accuracy of methane emission estimates. By integrating these advanced technologies, the study contributes to more effective climate mitigation strategies. Collaboration between policymakers, researchers, and farmers is essential to implement these measures and achieve significant reductions in greenhouse gas emissions from paddy fields, ensuring sustainable rice production while mitigating climate change impacts.

Key Words: rice; IPCC; greenhouse gases; methane emissions

甲烷(CH₄)是仅次于CO₂的全球第二大温室气体,在20年尺度范围内,甲烷的增温潜势是二氧化碳的84倍^[1-2]。近30年来,全球大气甲烷浓度在经历先增长后平稳的趋势后,2007年以来又再次呈现快速增长趋势^[3-4]。已有研究表明,现阶段的甲烷浓度增长与其生物源排放密切相关^[5-6]。其中,水稻是甲烷农业生物排放源的重要组成部分之一,约占全球CH₄排放的9%^[7]。我国是世界上最大的水稻生产国和消费国,稻田甲烷排放量约占全球稻田总排放量的24%^[8-10]。随着经济中心转移以及水土资源错配问题的出现,我国水稻种植面积和结构显著改变,空间上呈现出明显的“北增南减”格局^[11];此外,水稻种植品种进行了改良优化,进一步使我国稻田甲烷排放的时空格局发生显著变化。因此,在更新数据和方法基础上估算我国稻田甲烷排放为国内核算甲烷总排放量,为落实“双碳目标”提供了基础数据与理论支撑。

在区域尺度上的稻田甲烷排放估算主要包括数值模型和排放清单两类。其中,数值模型方法主要利用机理模型来追踪生态环境因子驱动下的碳循环和甲烷转换过程,以量化稻田甲烷的产生、氧化和排放过程,如目前广泛应用的生物地球化学模型(Denitrification and Decomposition Model, DNDC)^[11]、The Dynamic Land Ecosystem Model(DLEM)模型^[12-13]、生态系统模型(例如DAYCENT模型^[14]等)。然而,数值模型方法对于参数的要求精细,更适用于较小区域尺度的稻田甲烷排放估算^[15-18]。而排放清单方法是全面汇总政府、企业等单位在社会和生产活动中各环节直接或间接排放的温室气体排放量,形成数值清单以量化不同年份分区域、分部门、分行业的温室气体排放现状。如当前最高空间分辨率的全球排放清单数据—全球大气研究排放数据库(Emission Database for Global Atmospheric Center, EDGAR)、《美国温室气体排放和汇清单》(US Environmental Protection Agency, EPA)以及《IPCC国家温室气体清单指南》等。尽管排放清单方法参数相对较少,在量化甲烷排放过程和空间格局变化方面有待完善,但该方法为研究大区域尺度的稻田甲烷排放提供了机遇^[19-23]。

在排放清单方法中,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)排放清单方法是利用稻田甲烷排放

因子和国家经济活动数据量化水稻生长过程中的甲烷排放量。目前,已有研究使用的稻田甲烷排放因子(Emission Factors, EFs)主要来自 IPCC 公布的《国家温室气体清单指南》、国家发展改革委应对气候变化司编著的《2005 中国温室气体清单研究》和 2011 年《省级温室气体清单编制指南》^[24-25],以及 Yan 等于 2003 年提出的排放因子参数^[26]等。除此之外,关于稻田分布数据主要采用基于统计数据,难以刻画稻田甲烷排放空间分布细节。但实际上,稻田甲烷排放因子会受到水稻品种、水分灌溉条件和有机质含量等水稻生长过程中各种环境的影响^[22-27]。近几十年来,在气候变暖和农业生产条件变化等多因素的影响下,我国的水稻品种、种植制度及分布发生了显著变化,重塑了我国的土地利用格局,影响了稻田甲烷排放因子的数值,使得已有研究基于传统稻田甲烷排放因子所估算的稻田甲烷排放结果不确定性显著增加^[28-32]。因此,重新估计我国稻田甲烷排放因子对量化我国稻田 CH₄ 排放,明晰稻田在农业温室气体排放中的重要角色非常重要。

综上所述,近年来我国水稻种类、灌溉方式以及肥料施用等因素发生了显著变化,但其对稻田甲烷日排放因子的影响尚未明确。因此,本研究基于 2019 年 IPCC 指南更新的稻田甲烷估算方法,利用 500m 分辨率的 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)遥感水稻分布数据,将我国稻田甲烷日排放因子数值更新至高分辨率的空间网格中,进一步估算 2015 年我国水稻甲烷排放量,并探讨各区域稻田减排措施的途径及管理模式。通过在高分辨率尺度上量化我国稻田甲烷排放的日排放因子,为优化大尺度稻田甲烷排放量估算提供数据基础与理论借鉴,同时也为我国各区域制定农业减排政策提供了数据支撑,有助于各地区调整农业结构进一步服务于我国双碳目标的落实。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

IPCC 清单方法估算稻田甲烷排放的因子主要受以下因素影响,包括区域因素、水稻种类、水分管理、稻田生态系统类型、灌溉模式、有机输入量等。根据 IPCC 清单方法的数据要求,本研究收集了 2015 年我国的各类社会经济活动数据,主要包括不同类型水稻的种植面积(单季稻、双季稻早稻、双季稻晚稻)、水稻种植期间的水分管理方式(连续淹灌、间歇淹灌)、有机物输入的种类与数量(秸秆还田、混合肥、农家肥、绿肥)以及水稻生长期的长度。各数据的具体内容及来源如表 1 所示。

1.2 研究方法

IPCC 指南根据不同国家的水稻作物温室气体排放占比、自然环境条件、管理需求、以及数据可获得性等,设计了方法一(Tier 1)、方法二(Tier 2)和方法三(Tier 3)三种级别的稻田甲烷排放估算方法。其中,Tier 2 中在估算过程中要求使用特定的排放因子和标定因子,因此该方法更适用于能够计算区域特定排放因子和修正因子的国家。本研究采用 IPCC 指南中方法二(Tier 2)估算我国 2015 年稻田甲烷排放总量。计算公式如下:

$$CH_{4rice} = \sum_{i,j,k} EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中,CH_{4rice} 表示稻田甲烷排放总量,单位为 Tg CH₄/a; *i, j, k* 代表不同的稻田生态系统、水分状况、有机物输入的类型和数量等影响稻田甲烷排放量的因素; *EF_{i,j,k}* 表示在 *i, j* 和 *k* 条件下的稻田甲烷日排放因子调整值,单位为 kg CH₄ hm⁻² d⁻¹; *t_{i,j,k}* 表示在 *i, j, k* 不同条件下的水稻生长期,单位为 d; *A_{i,j,k}* 表示在 *i, j, k* 条件下的水稻年收获面积,单位为 hm/a。

本研究基于 2019 年 IPCC 指南提供的稻田甲烷排放核算方法更新我国稻田甲烷日排放因子的基准值,该方法主要依据 Yan 等学者提出的稻田甲烷排放的对数正态分布特征^[27]。由于稻田 CH₄ 排放量受土壤有机碳含量、pH 值、生长季前水分状况、生长季期间水分状况、有机物输入以及气候等因素影响,通过构建基准情景下稻田甲烷排放影响因子的线性混合模型并进行回归,形成稻田甲烷排放日排放因子基准值与各因素之间的数量关系。Yan 等学者研究结果发现稻田 CH₄ 排放量符合对数正态分布的特征,并基于此构建回归模型,通过对中国范围内的数据集进行回归,得到在假设情况下适用于中国范围内使用的日排放因子基准值与各影响因素之间的数量关系(公式 2):

表 1 2015 年中国稻田甲烷排放量估算数据属性及其来源

Table 1 Data attributes and sources for estimating methane emissions from rice paddies in China, 2015

数据内容 Data content	参数 Parameter	数据来源 Data sources	空间分辨率 Spatial resolution
双季稻早稻分布面积 Area of distribution of early double-cropped rice	A_{d_e}	国家生态科学数据中心	10m
双季稻晚稻分布面积 Area of distribution of late double-cropped rice	A_{d_l}	国家生态科学数据中心	10m
水稻分布总面积 Total area of rice distribution	A_s	Zhang 等学者已有研究数据 ^[33]	500m
连续淹灌的稻田分布面积 Distribution area of continuously flooded rice fields	A_{cf}	2016 年《中国农业年鉴》	—
间歇淹灌(单一排水)的稻田分布面积 (single drainage) Distribution area of paddy fields under intermittent flood irrigation (single drainage)	A_{sd}	2016 年《中国农业年鉴》	—
间歇淹灌(多次排水)的稻田分布面积 (multiple drainage) Distribution area of paddy fields under intermittent flood irrigation (multiple drainage)	A_{md}	2016 年《中国农业年鉴》	—
生长季前超过 30d 秸秆还田施用比率 Rate of straw application more than 30 days before the growing season	ROA_{o_s}	2016 年《中国农业年鉴》	—
施用混合肥稻田的施用比率 Application rate in rice fields with mixed fertilizers	ROA_{o_c}	2016 年《中国农业年鉴》	—
施用农家肥稻田的施用比率 Application rate of farmyard manure applied to rice paddies	ROA_{o_f}	2016 年《中国农业年鉴》	—
施用绿肥稻田的施用比率 Application rate of green manure applied to rice fields	ROA_{o_g}	2016 年《中国农业年鉴》	—
生长季不同水分状况下的调整参数 Adjustment parameters for different moisture conditions during the growing season	SF_w	2019 年 IPCC 指南	—
生长季前不同水分状况下的调整参数 Adjustment parameters for different moisture conditions during the pre-growing season	SF_p	2019 年 IPCC 指南	—
有机添加物的转换系数 Conversion factors for organic additives	$CFOA_i$	2019 年 IPCC 指南	—
一定区域内的土壤有机质含量 Soil organic matter content in a given area	soc_i	世界土壤数据库	—
一定区域内的土壤酸碱度影响系数 Coefficient of influence of soil acidity and alkalinity in a given area	pH_i	世界土壤数据库 Yan 等学者已有研究结果 ^[27]	—
一定区域内的气候条件影响系数 Coefficient of influence of climatic conditions in a given region	CL_i	IRRI 所划分的亚洲农业生态区 Yan 等学者已有研究结果 ^[27]	—

ROA:有机添加物的施用比率 Application rate of organic amendment; SF:换算系数 Scaling factor; CFOA:有机添加物的转换系数 Conversion factor for organic amendment; soc:土壤有机质 Soil organic carbon; pH:酸碱度 Potential of hydrogen; CL:气候 Climate; IRRI:国际水稻研究所 International Rice Research Institute

$$EF_c = e^{0.363} \times \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n soc_i^{0.337} \times e^{pH_i} \times e^{CL_i} \right) \times e^{1.17} \times e^{-0.308} \quad (2)$$

式中, i 表示某一特定地区, n 表示地区总数; e 为自然对数, 无量纲; pH_i 表示 i 区域范围内土壤酸碱度的影响系数; soc_i 表示 i 区域范围内土壤有机质含量的影响系数; CL_i 表示 i 区域所处的农业生态区的影响系数。不同土壤 pH 以及所处农业生态区的影响系数参考 Yan 等人的研究结果^[27]。

为更新和提升我国稻田甲烷排放估算结果及其精度, 本研究根据我国区域自然资源禀赋特征以及 2019 年 IPCC 指南中更新的系数修正因子, 重新计算 2015 年我国稻田甲烷日排放因子调整值。其中, 稻田甲烷日排放因子调整值的计算公式如下:

$$EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \quad (3)$$

式中, EF_i 表示一定区域范围内的稻田甲烷日排放因子调整值; EF_c 为生长季期间水分状况为持续淹灌且无有机物输入的稻田甲烷日排放因子基准值; SF_w 、 SF_p 、 SF_o 分别为水稻生长季期间水分状况、生长季前水分状况以及有机物输入影响的调整参数范围。其中, SF_w 和 SF_p 使用 IPCC 指南中提供的参数范围; SF_o 是根据 IPCC 指南中有机物输入的换算系数 ($CFOA_i$) 进行计算, 公式如下:

$$SF_o = (1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (4)$$

式中: SF_o 表示有机物输入影响的调整参数范围; ROA_i 为有机物输入量, 其中秸秆以干重计算, 其他有机输入以鲜重计算, 单位为 t/hm^2 ; $CFOA_i$ 是有机物输入的换算系数。

此外, 本研究使用 Microsoft Excel 7.0 版 Palisade Corporation 风险分析插件包中的蒙特卡罗分析工具来评估本研究稻田甲烷排放估算结果的不确定性。该工具需要输入的参数包括稻田甲烷日排放因子基准值、有机物输入、连续淹灌和间歇淹灌的稻田面积的不确定性范围以及各参数的概率密度函数类型。本研究参考 Yan 等人研究结果确定了各参数的概率密度函数类型^[27]: 日排放因子基准值以及修正因子呈现对数正态分布的特征, 其平均值和波动范围来自 2019 年 IPCC 指南; 有机物输入呈现出正态分布的特征, 其平均值来自 2016 年《中国农业年鉴》, 变异系数 CV 为 30%; 连续淹灌的稻田面积呈现出正态分布的特征, 而间歇淹灌 (包括单一排水和多次排水) 的稻田面积呈现出指数分布的特征, 其平均值和波动范围来自 Zhang 等学者的已有研究数据^[33] 以及 2016 年《中国农业年鉴》。

2 结果与分析

2.1 我国稻田甲烷日排放因子基准值与调整值估算结果分析

2015 年我国稻田甲烷日排放因子基准值空间分布存在一定的不均衡性, 各地区稻田甲烷日排放因子间存在较大差异 (图 1)。在全国范围内, 稻田甲烷日排放因子基准值 EF_c 分布在 $0-3.450 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.912 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 标准偏差为 0.723。而在我国水稻种植区域内, 稻田甲烷日排放因子基准值 EF_c 分布在 $0-3.450 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间, 平均值为 $1.231 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 标准偏差为 0.945。从全国各省份的分区统计结果来看, 各省日排放因子基准值 EF_c 的平均值较高的区域集中分布在西南和华南地区, 其中广东、香港、西藏、四川和安徽在全国排名前五, 平均值分别为 1.740、1.608、1.460、1.383、1.277 $\text{kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 而各省日排放因子基准值 EF_c 的最大值较高区域主要分布在华东、华中和西南地区, 如安徽、江苏、湖北、四川等地, EF_c 最大值分别为 3.450、3.450、3.367 和 3.367 $\text{kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

2015 年我国稻田甲烷日排放因子调整值 EF_i 较高的区域 ($4.720 < EF_i < 7.410$) 主要分布在华东、华中和华南地区, 这与《2005 年中国温室气体排放清单》中提供的不同地区的甲烷排放因子区域特征相一致 (图 1)。在全国范围内, 日排放因子调整值 EF_i 分布在 $0-7.413 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.062 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 标准偏差为 0.420。而在水稻种植区域范围内, 稻田甲烷排放因子调整值 EF_i 虽然也分布在 $0-7.413 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间, 但其平均值升高至 $1.764 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 标准偏差为 1.448。全国与水稻种植区之间平均值相差较大的原因主要是由于全国非水稻种植区的人为影响因素小 (估算中带入的数值接近于 0), 导致整体平均后的数值偏低。通过对省级数据进行分区统计发现, 排放因子 EF_i 最大值超过 7 的地区主要分布在华东和华南地区, 广东、广西和湖北的排放因子 EF_i 最大值分别为 7.413、7.372、7.074 $\text{kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。而排放因子 EF_i 平均值较高的地区则主要集中在华中、华南和华东地区, 广西、福建、安徽、湖南以及广东的排放因子 EF_i 平均值分别为 2.695、2.545、2.396、2.357、2.317 $\text{kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

2.2 我国稻田甲烷排放总量估算结果分析

2015 年我国稻田甲烷总排放量呈现出明显地域性特征, 甲烷排放量主要集中在华中、华南和华东地区, 全国稻田甲烷排放总量为 7.541 Tg CH_4/a 。从空间分布来看, 稻田甲烷排放总量的最大值和平均值较高的区域仍主要集中在华中、华南和华东地区。该地区是我国最大的水稻分布区, 稻田分布广且面积较大, 此外以双

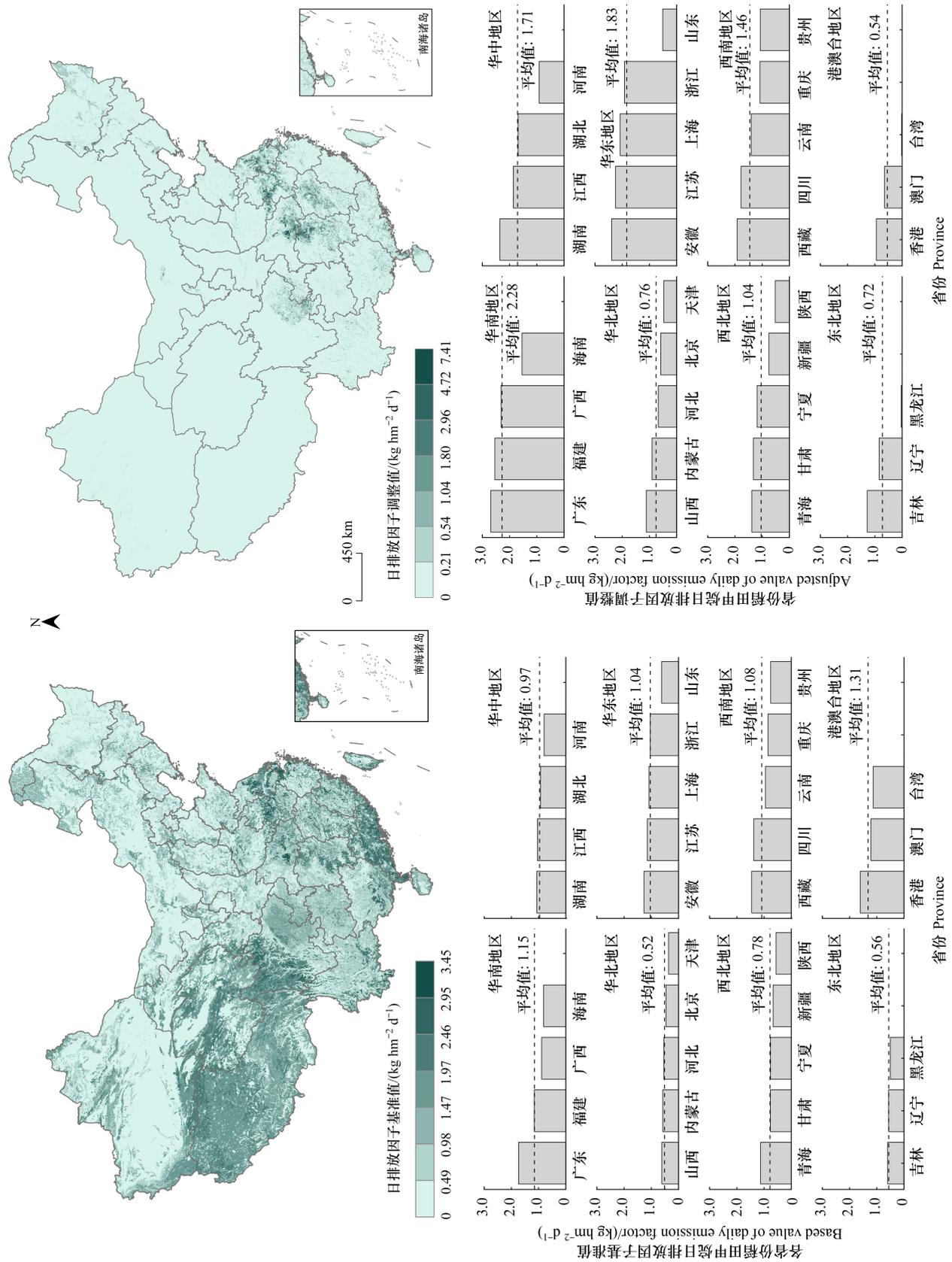


图 1 2015 年我国不同区域稻田甲烷日排放因子基准值与调整值

Fig.1 Base and adjusted values of daily methane emission factors from rice paddies in different regions of China, 2015

季稻种植为主,水稻生长期长,稻田甲烷排放持续时间较长,最终导致该地区内稻田甲烷排放总量较大。其中,华中地区的湖南、江西和湖北稻田甲烷总排放量分别排名全国第一、第四和第五,排放量分别为 1.078、0.819、0.786 Tg CH₄/a。华东地区的安徽和江苏稻田甲烷总排放量分别排名全国第二和第六,排放量分别为 0.864 和 0.633 Tg CH₄/a。华南地区的广东稻田甲烷总排放量排名全国第三,排放量为 0.826 Tg CH₄/a。而作为我国粮仓的东北地区,整体排放总量在全国各省中排名较为靠后,黑龙江、吉林、辽宁分别位列全国第九、十五和十八名,基本低于全国平均水平。这主要是由于东北地区为单季稻,水稻全年生长周期较南方双季稻短,且年均温较低,甲烷排放通量低。

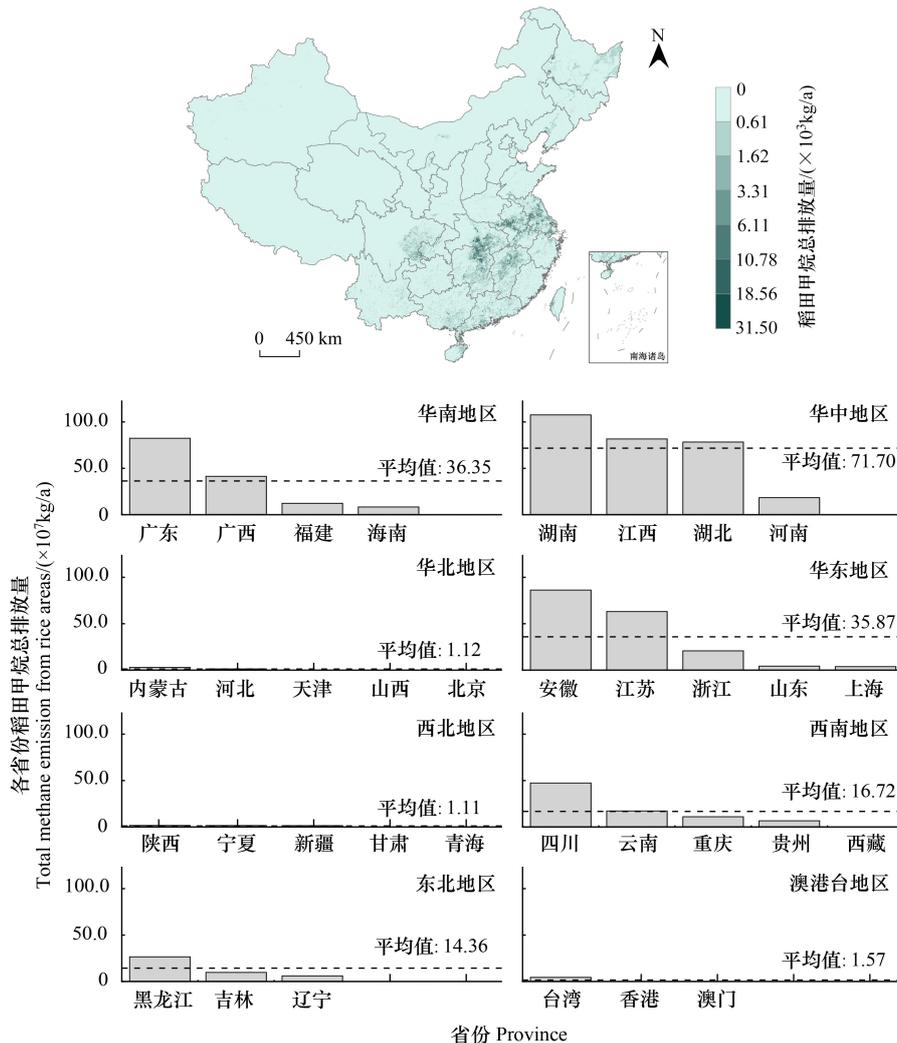


图 2 2015 年我国不同区域稻田甲烷排放总量

Fig.2 Total methane emission from rice paddies in different regions of China, 2015

3 讨论与建议

本研究与已有研究基于不同方法估算的不同时期全国稻田甲烷排放总量进行对比,来检验本文估算结果的准确性和可靠性(图 3)。从 1995 年到 2020 年,我国稻田甲烷的排放总量的平均值总体呈现出小幅度波动下降的趋势,主要是由于近年来我国各地区对于水稻品种的改良、灌溉方式的改善以及肥料施用的调整等农业减排措施的推广落实,稻田甲烷的总体排放量有所下降^[34]。通过横向对比模型估算方法和清单方法的估算结果表明,相对来说模型估算方法的不确定性范围往往大于清单估算方法的不确定性范围,这主要是受到

估算方法内在原理和数据源差异性的影响。而从纵向视角与其他采用 IPCC 清单方法的研究进行对比表明,本研究估算的 2015 年全国稻田甲烷排放总量为 7.54 Tg CH₄/a,与已有学者基于 IPCC 方法估算的 2015 年稻田甲烷排放量值 7.31 Tg CH₄/a 之间的差异较小,进一步证明本研究估算结果的可靠性^[24]。本研究分析稻田甲烷排放量估算结果间的细微差别主要来自于水稻分布数据的分辨率优化以及甲烷排放因子的更新。从不确定性角度来看,本研究估算结果的不确定性范围明显偏小,表明在核算稻田甲烷排放中通过进一步明确特定区域的稻田甲烷日排放因子,能够适当减小估算结果的不确定性,这一研究结论也与 2019 年 IPCC 指南中提供的 Wang 等人的研究结果相一致^[35]。

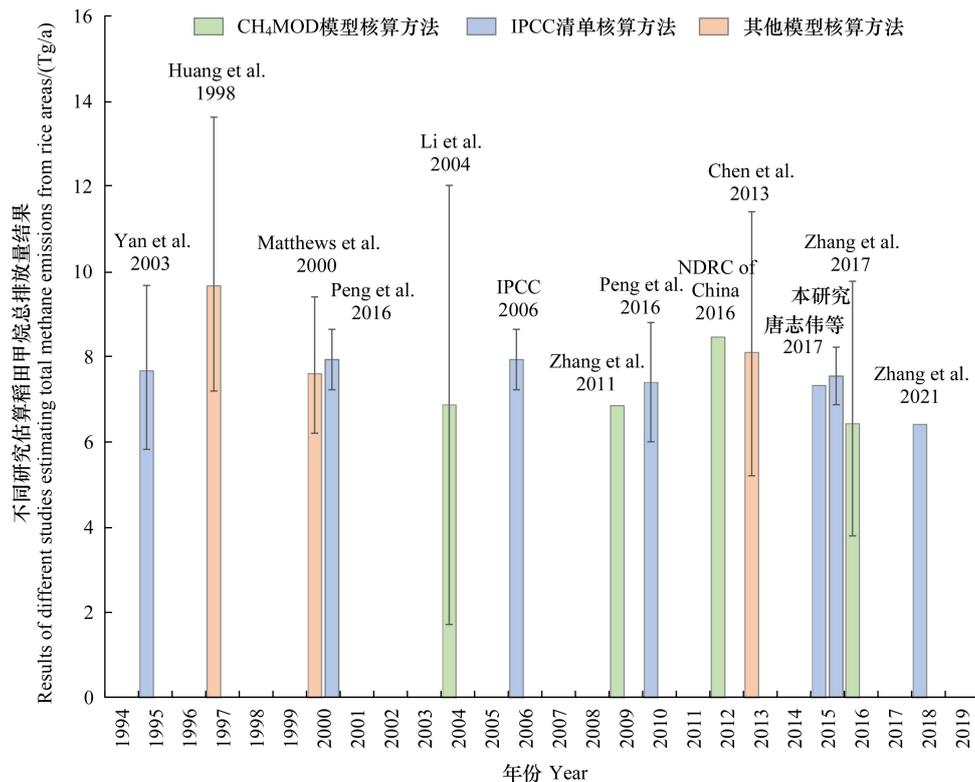


图 3 近 20 年利用典型方法估算的全国稻田甲烷排放总量结果对比

Fig.3 Comparison of the results of total methane emissions from rice paddies in China estimated by typical methods in the last 20 years

图中文献数据来源为 Yan 等^[26]、Huang 等^[36]、Matthews 等^[37]、Li 等^[38]、乐群等^[23]、2006 年 IPCC 指南、Zhang 等^[19]、Peng 等^[20]、NDRC of China^[39]、Wang 等^[18]、Chen 等^[40]、唐志伟等^[24]、Zhang 等^[41]、Zhang 等^[25]学者的研究结论;NDRC of China:中华人民共和国国家发展和改革委员会 National Development and Reform Commission People's Republic of China

本研究基于遥感稻田空间分布数据,将稻田甲烷日排放因子在高分辨率网格中进行量化与更新,形成了适用于中国地区的稻田甲烷日排放因子参考值,并在此基础上估算了我国 2015 年稻田甲烷排放量。目前,已有研究大多使用《2005 年中国温室气体排放清单》中稻田 CH₄日排放因子的推荐系数,或是 IPCC 指南及典型研究中提供的日排放因子推荐系数。但不同区域之间的日排放因子由于气候条件、种植习惯的差异仍存在较大差异^[29-42]。研究根据 IPCC 指南提供的甲烷排放因子计算方法重新量化了适用于中国不同水稻种植区的甲烷日排放因子基准值及调整值,相较于同类型研究提升了稻田甲烷估算结果的准确性。而从空间尺度上看,已有研究大多基于省级尺度、地理大区尺度或是全国尺度为主来估算稻田甲烷排放量,为了进一步精确核算我国的稻田甲烷排放量,基于 Zhang 等学者制备的 2015 年 500m 全国稻田分布空间数据^[33],将稻田甲烷排放因子的空间尺度从省级层面提升到栅格层面,进一步提升和优化了我国 2015 年稻田甲烷排放量的精度。

基于本文估算的我国不同区稻田甲烷排放总量,研究进一步提出了区域稻田减排的政策建议。主要如

下:①我国典型水稻区域甲烷排放量呈现出从东南到西北逐渐递减的趋势,主要排放区域集中在我国的华中、华南以及华东地区。因此,地方政府在制定政策时应厘清影响各区域稻田甲烷排放的主要因素,分区制定减排政策,坚持统筹协调的原则。②由于不同的秸秆还田方式对于稻田甲烷排放的影响存在较大差异,所以各地区应进一步优化稻田秸秆还田的比例和方式,实践“水稻丰产—甲烷减排”协同理论。③完善农田基础设施,培养农户的养地意识,逐步恢复耕地地力,重视多熟制技术的引进和推广,进一步缓解熟制缩短的问题。同时,当地政府还需要落实农村土地产权制度改革,明晰农民的土地财产权利,完善耕地流转机制,从而提升水稻种植的经济效益和规模效益。通过完善水稻种植的惠农补贴政策,维护广大农民群众的利益,调动农民种田养田的积极性。

综上,在基于 IPCC 清单方法进行稻田甲烷排放量估算研究中,对排放因子,尤其是稻田分布数据的精细度方面,相较于其他研究有所提升,但受限于经济活动数据的可用性及准确性,研究在稻田有机肥和淹水参数上进行了简化。稻田甲烷排放总量与稻田分布数据密切相关,但由于当前缺乏统一分辨率的长时序的稻田类型数据,因此在统一不同稻田数据尺度时可能带来误差。未来在相关高精度数据的支持下,研究将进一步拓展到长时续的稻田甲烷排放量估算,为我国温室气体排放估算以及区域气候管理等政策提供数据参考和建议。

参考文献 (References):

- [1] Wang Z, Zhang X Y, Liu L, Wang S Q, Zhao L M, Wu X D, Zhang W T, Huang X J. Inhibition of methane emissions from Chinese rice fields by nitrogen deposition based on the DNDC model. *Agricultural Systems*, 2020, 184: 102919.
- [2] Song J Y, Chen Y T, Mao Q, Hong X F, Yan C. The effect of early season rice varieties and establishment methods on greenhouse gas emissions in southeast China. *Cereal Research Communications*, 2021, 49(4): 567-576.
- [3] Wu X K, Zhang Y, Han Y H, Zhang Y G, Zhang Y H, Cheng X D, Zhong, P, Yuan, X, Zhang Y X, Li Z Q. Advances in methane emissions from agricultural sources: Part I. Accounting and mitigation. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 140(8): 279-291
- [4] Nisbet E G, Dlugokencky E J, Bousquet P. Atmospheric science. methane on the rise—again. *Science*, 2014, 343(6170): 493-495.
- [5] 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 Quééré 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.
- [6] Kai F M, Tyler S C, Randerson J T, Blake D R. Reduced methane growth rate explained by decreased Northern Hemisphere microbial sources. *Nature*, 2011, 476: 194-197.
- [7] Qian H Y, Zhu X C, Huang S, Linqvist B, Kuzyakov Y, Wassmann R, Minamikawa K, Martinez-Eixarch M, Yan X Y, Zhou F, Sander B O, Zhang W J, Shang Z Y, Zou J W, Zheng X H, Li G H, Liu Z H, Wang S H, Ding Y F, van Groenigen K J, Jiang Y. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(10): 716-732.
- [8] Qu Z, Jacob D J, Shen L, Lu X, Zhang Y Z, Scarpelli T R, Nesser H, Sulprizio M P, Maasakkers J D, Bloom A A, Worden J R, Parker R J, Delgado A L. Global distribution of methane emissions: a comparative inverse analysis of observations from the TROPOMI and GOSAT satellite instruments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(18): 14159-14175.
- [9] Saunois M, Stavert A R, Poulter B, Bousquet P, Canadell J G, Jackson R B, Raymond P A, Dlugokencky E J, Houweling S, Patra P K, Ciais P, Arora V K, Bastviken D, Bergamaschi P, Blake D R, Brailsford G, Bruhwiler L, Carlson K M, Carrol M, Castaldi S, Chandra N, Crevoisier C, Crill P M, Covey K, Curry C L, Etiope G, Frankenberg C, Gedney N, Hegglin M I, Höglund-Isaksson L, Hugelius G, Ishizawa M, Ito A, Janssens-Maenhout G, Jensen K M, Joos F, Kleinen T, Krummel P B, Langenfelds R L, Laruelle G G, Liu L C, Machida T, Maksyutov S, McDonald K C, McNorton J, Miller P A, Melton J R, Morino I, Müller J, Murguía-Flores F, Naik V, Niwa Y, Noce S, O'Doherty S, Parker R J, Peng C H, Peng S S, Peters G P, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Regnier P, Riley W J, Rosentretter J A, Segers A, Simpson I J, Shi H, Smith S J, Steele L P, Thornton B F, Tian H Q, Tohjima Y, Tubiello F N, Tsuruta A, Viovy N, Voulgarakis A, Weber T S, van Weele M, van der Werf G R, Weiss R F, Worthy D, Wunch D, Yin Y, Yoshida Y, Zhang W X, Zhang Z, Zhao Y H, Zheng B, Zhu Q, Zhu Q A, Zhuang Q L. The global methane budget 2000—2017. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561-1623.
- [10] 周正平, 占小登, 沈希宏, 曹立勇. 我国水稻育种发展现状、展望及对策. *中国稻米*, 2019, 25(5): 1-4.
- [11] 张强, 张戈丽, 朱道林, 邸媛媛, 杨彤, 刘若琪, 董金玮. 1980—2018 年中国水稻生产变化的时空格局. *资源科学*, 2022, 44(4): 687-700.
- [12] Ren W, Tian H Q, Xu X F, Liu M L, Lu C Q, Chen G S, Melillo J, Reilly J, Liu J Y. Spatial and temporal patterns of CO₂ and CH₄ fluxes in

- China's croplands in response to multifactor environmental changes. *Tellus B*, 2011, 63(2): 222-240.
- [13] Tian H Q, Xu X F, Lu C Q, Liu M L, Ren W, Chen G S, Melillo J, Liu J Y. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G2): G02011.
- [14] Cheng K, Ogle S M, Parton W J, Pan G X. Simulating greenhouse gas mitigation potentials for Chinese Croplands using the DAYCENT ecosystem model. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 948-962.
- [15] Guo Y, Zhang G B, Abdalla M, Kuhnert M, Bao H J, Xu H, Ma J, Begum K, Smith P. Modelling methane emissions and grain yields for a double-rice system in Southern China with DAYCENT and DNDC models. *Geoderma*, 2023, 431: 116364.
- [16] 张远, 李颖, 王毅勇, 宋书艺, 李长生. 三江平原稻田甲烷排放的模拟与估算. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 293-298.
- [17] Wang Y C, Tao F L, Yin L C, Chen Y. Spatiotemporal changes in greenhouse gas emissions and soil organic carbon sequestration for major cropping systems across China and their drivers over the past two decades. *The Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155087.
- [18] Wang Z, Zhang X Y, Liu L, Wang S Q, Zhao L M, Wu X D, Zhang W T, Huang X J. Estimates of methane emissions from Chinese rice fields using the DNDC model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108368.
- [19] Zhang W, Yu Y Q, Huang Y, Li T T, Wang P. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050. *Global Change Biology*, 2011, 17(12): 3511-3523.
- [20] Peng S S, Piao S L, Bousquet P, Ciais P, Li B G, Lin X, Tao S, Wang Z P, Zhang Y, Zhou F. Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(22): 14545-14562.
- [21] Zhang B, Chen G Q. China's CH₄ and CO₂ emissions: bottom-up estimation and comparative analysis. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 112-122.
- [22] Wang J Y, Ciais P, Smith P, Yan X Y, Kuzyakov Y, Liu S W, Li T T, Zou J W. The role of rice cultivation in changes in atmospheric methane concentration and the Global Methane Pledge. *Global Change Biology*, 2023, 29(10): 2776-2789.
- [23] 乐群, 张国君, 王铮. 中国各省甲烷排放量初步估算及空间分布. *地理研究*, 2012, 31(9): 1559-1570.
- [24] 唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 张卫建. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径. *中国生态农业学报: 中英文*, 2022, 30(4): 582-591.
- [25] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 李柏霖, 焉莉. 中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施. *环境科学与技术*, 2021, 44(3): 200-208.
- [26] Yan X Y, Cai Z C, Ohara T, Akimoto H. Methane emission from rice fields in mainland China: amount and seasonal and spatial distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D16): e2002jd003182.
- [27] Yan X Y, Yagi K, Akiyama H, Akimoto H. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1131-1141.
- [28] 谢立勇, 许婧, 郭李萍, 徐玉秀, 孙雪, 赵洪亮, 郭飞, 赵迅. 水肥管理对稻田 CH₄ 排放及其全球增温潜势影响的评估. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 958-967.
- [29] 王保君, 胡乃娟, 顾泽海, 陈兵林, 陈利根, 朱利群. 稻秆还田方式对稻麦轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响. *南京农业大学学报*, 2017, 40(3): 367-375.
- [30] Jiang Y, Qian H Y, Huang S, Zhang X Y, Wang L, Zhang L, Shen M X, Xiao X P, Chen F, Zhang H L, Lu C Y, Li C, Zhang J, Deng A X, van Groenigen K J, Zhang W J. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau9038.
- [31] 黄满堂, 王体健, 赵雄飞, 谢晓栋, 王德羿. 2015 年中国地区大气甲烷排放估计及空间分布. *环境科学学报*, 2019, 39(5): 1371-1380.
- [32] Yan X Y, Ohara T, Akimoto H. Development of region-specific emission factors and estimation of methane emission from rice fields in the East, Southeast and South Asian countries. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 237-254.
- [33] Zhang G L, Xiao X M, Dong J W, Xin F F, Zhang Y, Qin Y W, Doughty R B, Moore B. Fingerprint of rice paddies in spatial-temporal dynamics of atmospheric methane concentration in monsoon Asia. *Nature Communications*, 2020, 11: 554.
- [34] 张博, 李蕙竹, 仲冰, 高俊莲. 中国甲烷控排面临的形势、问题与对策. *中国矿业*, 2022, 31(2): 1-10.
- [35] Wang J Y, Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Controlling variables and emission factors of methane from global rice fields. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(14): 10419-10431.
- [36] Huang Y, Sass R L, Fisher F M Jr. Model estimates of methane emission from irrigated rice cultivation of China. *Global Change Biology*, 1998, 4(8): 809-821.
- [37] Matthews R B, Wassmann R, Arah J. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia. I. model development. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1): 141-159.
- [38] Li C S, Mosier A, Wassmann R, Cai Z C, Zheng X H, Huang Y, Tsuruta H, Boonjawat J, Lantin R. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: sensitivity and upscaling. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(1): GB1043.
- [39] 王兴, 赵鑫, 王钰乔, 薛建福, 张海林. 中国水稻生产的碳足迹分析. *资源科学*, 2017, 39(4): 713-722.
- [40] 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, and lakes in China: synthesis and new estimate. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 19-32.
- [41] Zhang W, Sun W J, Li T T. Uncertainties in the national inventory of methane emissions from rice cultivation: field measurements and modeling approaches. *Biogeosciences*, 2017, 14(1): 163-176.
- [42] Chen Z C, Jacob D J, Nesser H, Sulprizio M P, Lorente A, Varon D J, Lu X, Shen L, Qu Z, Penn E, Yu X Y. Methane emissions from China: a high-resolution inversion of TROPOMI satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22(16): 10809-10826.