



汤宏波,余海峰,赵素婷,等.全球五大洲稻田生产效率及甲烷排放趋势研究[J].江西农业大学学报,2024,46(3):597-608.  
TANG H B, YU H F, ZHAO S T, et al. Research on rice field productivity and methane emission trends across five continents[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(3): 597-608.

# 全球五大洲稻田生产效率 及甲烷排放趋势研究

汤宏波<sup>1</sup>, 余海峰<sup>2</sup>, 赵素婷<sup>1</sup>, 李富山<sup>1</sup>, 吕新华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉文献情报中心/科技大数据湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院 武汉植物园/中国科学院中-非联合研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**【目的】水稻是全球近一半人口的主粮。随着全球人口持续增长,需要生产更多的稻米。然而,即使CO<sub>2</sub>排放量得以很好地控制,以现在全球甲烷排放量的温室效应,也足以挑战《巴黎协定》目标。【方法】全球五大洲稻田生产效率与联合国2030年消除饥饿的可持续发展目标、“全球甲烷承诺”的实现与否紧密关联,为此,研究利用联合国粮食及农业组织和联合国人口司相关数据,探析全球稻田生产效率格局及甲烷排放趋势。【结果】(1)2020年全球水稻种植甲烷排放量为24 503 974 t。为了满足2030年全球稻米需求,达成“全球甲烷承诺”目标,2020—2030年,水稻种植甲烷排放强度需降低19.48%~22.15%;(2)干湿交替浅水灌溉,翻耕+秸秆碳化还田,控释肥料、有机肥,铁(III)肥、种植高产杂交水稻和稻-油或稻-麦轮作等是降低甲烷排放强度的重要举措;(3)非洲地区将是“联合国2030年消除饥饿发展目标”最大挑战。由于较高的粮食生产环境成本(大约为50 kg/t)和人口增长率(23.83%~27.98%),非洲的粮食对外依存度将进一步升高,国际粮食价格呈上涨趋势;(4)稻米的温室效应至少是小麦、玉米的3倍以上,但是单位质量的小麦和玉米提供的热量、蛋白质和脂肪分别比大米高6.69%~41.54%、7.69%~125.00%和64.00%~277.78%。【结论】水稻生产甲烷减排压力大,持续加强田间管理和耕种技术创新发展的同时,大米消费大国应该大力推行主粮多样化战略。最后,本研究还提供了相关政策建议,以满足全球持续增长的人口粮食需求的同时,为降低农业温室气体排放量提供理论支撑。

**关键词:** 甲烷排放强度; 水稻; 粮食安全; “巴黎协定”; “全球甲烷排放承诺”

中图分类号: S511; X71 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)03-0597-12



## Research on rice field productivity and methane emission trends across five continents

TANG Hongbo<sup>1</sup>, YU Haifeng<sup>2</sup>, ZHAO Suting<sup>1</sup>, LI Fushan<sup>1</sup>, LYU Xinhua<sup>1</sup>

(1. National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Botanical Garden, Sino-Africa Joint Research Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

收稿日期: 2024-02-08 修回日期: 2024-03-08

基金项目: 中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项课题(GHJ-ZLZX-2024-07)和中国科学院国际合作局出国专题研究(科际批字0034号)

Project supported by the Special Project on the Construction of the Strategic Research and Decision Support System of the Chinese Academy of Sciences (GHJ-ZLZX-2024-07) and the Overseas Special Research Project of the International Cooperation Bureau of the Chinese Academy of Sciences (Interdepartmental Approval Number 0034)

作者简介: 汤宏波, 副研究员, 主要从事低碳农业、低碳经济研究, orcid.org/0000-0001-5100-9345, tanghb@mail.whlib.ac.cn.

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

**Abstract:** [Objective] Rice is the staple food for nearly half of the global population. With the continuous growth of the world's population, there is a need to produce more rice. However, even with effective control of carbon dioxide emissions, the greenhouse effect caused by global methane emissions poses a significant challenge to the targets set by the Paris Agreement. [Method] The productivity of rice production across the five continents is closely linked to the achievement of the United Nations' Sustainable Development Goal of eliminating hunger by 2030 and the global methane commitment. To explore this relationship, this study utilizes relevant data from the Food and Agriculture Organization (FAO) and the United Nations Population Division to analyze the global patterns of rice field productivity and methane emission trends. [Result] The research findings indicate that: (1) In 2020, global methane emissions from rice cultivation amounted to 24 503 974 metric tons. To meet the global rice demand by 2030 and achieve the goals of the global methane commitment, methane intensity in rice cultivation needs to be reduced by 19.48%–22.15% during the period from 2020 to 2030. (2) Important measures to reduce methane intensity include the adoption of intermittent flooding irrigation, tillage combined with straw carbonization and return, controlled-release fertilizers, organic fertilizers, iron(III) fertilizers, cultivating high-yielding hybrid rice, and rice-oil or rice-wheat rotation. (3) The African region poses the greatest challenge to achieving the United Nations' goal of eliminating hunger by 2030. Due to higher environmental costs of food production (approximately 50 kg CH<sub>4</sub>/t rice) and population growth rates (23.83%–27.98%), as well as the upward trend in food prices, Africa's dependence on external food sources is expected to increase further. (4) The greenhouse effect of rice is at least three times higher than that of wheat and maize. However, per unit weight, wheat and maize provide approximately 6.69%–41.54%, 7.69%–125.00%, and 64.00%–277.78% more calories, protein, and fat, respectively, compared to rice. [Conclusion] Rice production methane emission reduction pressure, while continuously strengthening field management and cultivation technology innovation development, major rice-consuming countries in Asia should vigorously promote a strategy of diversifying staple foods. Finally, this study provides relevant policy recommendations to support the theoretical framework for meeting the increasing global demand for food while reducing agricultural greenhouse gas emissions.

**Keywords:** methane intensity, rice, food security, Paris Agreement, global methane emission commitment

【研究意义】人为温室气体排放导致地球变暖,据观测,2015—2022年是自1880年开始观测以来最暖的8年<sup>[1]</sup>。自1993年以来,每个10年的气温都增加了0.3~0.4℃,2022年全球陆地年均气温变化为1.4℃,其中欧洲气温升幅最大(2.2℃),其次是亚洲(1.8℃)<sup>[1]</sup>。温度升高导致的极端降雨、极端高温对全球粮食安全有潜在威胁<sup>[2-3]</sup>。据联合国粮食与农业组织报告<sup>[4]</sup>,2021年有近10%的世界人口遭受饥饿,而2019年为8%,这相当于2年内新增了1.5亿饥饿人口;非洲的营养不良率最高,2021年有20.2%的人口营养不良;亚洲饥饿人口占世界饥饿人口总数的55%,其中饥饿人口最多的是印度(2.24亿)、巴基斯坦(0.37亿)。2017—2019年,中国粮食对外依存率为3.8%,2020年进口食物的经费为1 896亿美元,是最大的粮食净进口国(贸易逆差为-1 140亿美元)。2021年,全世界42%的人口无力负担健康膳食,2023年,全世界估计有近6亿人长期食物不足<sup>[5]</sup>。2020年,全球农业食品系统的排放量大约为16 Gt CO<sub>2</sub>eq,自2000年以来增加了9%<sup>[6]</sup>。减少温室气体排放是应对全球变暖的现有国际政策的核心,也是保障粮食安全、促进农业可持续发展的关键举措。甲烷(CH<sub>4</sub>)是仅次于二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的第二大人为温室气体(GHG)。CH<sub>4</sub>负荷的增加始于2007年,偏远地表背景空气中的全球平均摩尔分数从2006年的约1 775 ppb上升到2017年的1 850 ppb<sup>[7]</sup>。如果在未来几十年中继续大于5 ppb/a,即使在严格的CO<sub>2</sub>减排措施下,大气中持续增长的CH<sub>4</sub>含量就足以挑战《巴黎协定》<sup>[7]</sup>。Nzotungicimpaye等<sup>[8]</sup>的研究表明,在地球系统模型中采取严格的CO<sub>2</sub>减排措施情景下,在2030年前启动CH<sub>4</sub>减排,可以在未来3个世纪内将全球变暖限制在远低于2℃的范围内,如果将CH<sub>4</sub>减排延迟到2040年或之后会增加突破2℃限制的风险,每延迟10年会导致额外的峰值升温大约0.1℃。水稻种植是CH<sub>4</sub>的重要排放源,占全球人为甲烷(CH<sub>4</sub>)排放量的6%~11%<sup>[9]</sup>。

除南极洲外,另外五大洲均生产水稻,而且水稻是世界近一半人口的主要谷物作物,占近30亿人口每日热量的2/3<sup>[10-12]</sup>。据预测,大米产量每年必须增加800~1 000万t<sup>[13]</sup>,到2040年必须增加40%,才能满足以大米为主食的国家人口快速增长的需求<sup>[14]</sup>,随之而来的是提高稻米产量的同时,最大限度地减少用水量和减少CH<sub>4</sub>排放等各种挑战。【前人研究进展】目前国内外主要从以下方面对稻田的温室气体排放方面进行了研究。Habib等<sup>[15]</sup>、Liang等<sup>[16]</sup>和Feng等<sup>[17]</sup>从稻田灌溉方式研究了稻田CH<sub>4</sub>排放情况,总体上认为干湿交替更利于降低环境成本;Chen等<sup>[18]</sup>和伍芬琳等<sup>[19]</sup>从耕作方式方面展开了相关研究;Zhang等<sup>[20]</sup>、张熙栋等<sup>[21]</sup>和徐祥玉<sup>[22]</sup>试图从改良稻田土壤来增产减排;Yang等<sup>[23]</sup>和Yu等<sup>[24]</sup>则从稻田氮肥施用角度展开了有益的研究;Li等<sup>[25]</sup>从施肥和灌溉2个控制变量来研究稻田温室气体强度;Zou等<sup>[26]</sup>在水制度、作物秸秆掺入和合成肥料施用等综合农业管理条件下测量了稻田的N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放量;在大气CO<sub>2</sub>浓度逐年增高的背景下,Xu等<sup>[27]</sup>和Yu等<sup>[28]</sup>分析了大气CO<sub>2</sub>浓度对稻田产量和温室气体排放量的影响;在稻田CH<sub>4</sub>产生机制方面,学者从微生物产甲烷机制<sup>[29]</sup>以及磷营养<sup>[30]</sup>、铁营养<sup>[31]</sup>、土壤温度<sup>[32-33]</sup>和水稻品种<sup>[34-37]</sup>对稻田甲烷相关微生物群落的影响展开了丰富的研究;随着青壮年农民工进城务工,田间劳力的减少,我国直播水稻的栽培方式增多,一些学者积极开展了直播水稻的环境影响研究<sup>[38-39]</sup>;稻田轮作,可以节约耕地资源,提供丰富的农产品,一些学者在作物轮作模式的温室效应及减排措施等方面进行了探究<sup>[40-43]</sup>。另外,也有学者从土壤温度、土壤水分、土壤电导率、摩擦风速、相对湿度、水温和水稻种植生命周期等角度对稻田CH<sub>4</sub>排放展开了研究<sup>[44-47]</sup>。甲烷通量的测量方法通常采用涡度协方差法<sup>[38,45-46,48]</sup>和静态箱/气相色谱法<sup>[19,21,41-42]</sup>,一些学者比较了涡度协方差法和静态箱/气相色谱法两种生态系统碳通量观测方法的差异<sup>[49-50]</sup>。由于测量和对不同时间尺度CH<sub>4</sub>通量变化的潜在驱动因素的了解有限,对CH<sub>4</sub>排放的模式、规模和环境控制的研究仍然不足。有些学者直接利用农业发展方面最权威的智库——联合国粮食与农业组织的温室气体排放数据<sup>[51-52]</sup>,结合一定方法探析了农业系统温室气体排放的现状和趋势。

【本研究切入点】纵观已有的研究,从全球视野探析水稻种植的生产效率需求、CH<sub>4</sub>特征及趋势的不多。为揭示全球稻米生产效率和甲烷排放特征,本研究利用联合国粮食及农业组织和联合国人口司的相关数据,通过相关方法,分析全球水稻种植格局、粮食对外依存度及甲烷排放特征,预测2030年全球稻米的需求量和甲烷排放潜在趋势。【拟解决的关键问题】结合《巴黎协定》和“全球甲烷承诺”提出稻米生产效率需求,为未来全球粮食安全和农业可持续发展提供理论支持。

## 1 数据来源和研究方法

联合国粮食与农业组织为了促进建立一个没有饥饿的世界,通过调查表和国家出版物的形式,收集各成员国的农业相关数据,并传播及时、可靠的有关饥饿、粮食和农业的可靠统计数据。联合国粮食与农业组织还制定统计方法和标准,并通过技术援助和能力发展活动支持成员国发展粮食统计系统。联合国粮食与农业组织建立了“统计创新数据实验室(Data Lab on Statistical Innovation)”,数据实验室有助于填补官方数据很少的领域和地理区域的数据空白。由于联合国粮食与农业组织收集的数据来源多样,可能出现数据相互矛盾,因此该组织系统地通过交叉参照核对数据的一致性。

联合国粮食与农业组织统计数据库的温室气体排放测算采用IPCC的“AR5评价体系”。稻米温室气体排放当量是指稻米在农业生产活动(水稻残体 crop residues 产生的N<sub>2</sub>O、水稻种植 rice cultivation 产生的CH<sub>4</sub>、水稻残体焚烧 burning of crop residues、水稻肥料合成 synthetic fertilizers)中直接产生的温室气体排放量,其中1961—2020年水稻种植的温室气体排放量占整个稻米农业生产活动排放81.76%~93.90%。本研究重点是水稻种植部分的CH<sub>4</sub>排放量,水稻种植生产效率相关的甲烷排放强度和单位面积甲烷排放量的计算公式为:

$$\text{水稻种植甲烷排放强度} = \text{甲烷排放量} / \text{水稻产量} \quad (1)$$

$$\text{单位面积甲烷排放量} = \text{水稻甲烷排放强度} \times \text{单位面积稻米产量} \quad (2)$$

种植面积和作物单位面积产量来自农业普查、作物产量调查、农户调查和行政数据等。水稻总产量、大米供给量、大米对外依存度和大米储存与运输损失率计算公式如下:

$$\text{水稻总产量} = \text{水稻种植面积} \times \text{单位面积产量} \quad (3)$$

$$\text{大米供给量} = \text{大米生产量} + \text{大米进口量} + \text{上一年余粮} - \text{出口量} \quad (4)$$

$$\text{大米对外依存度} = (\text{大米自产量} - \text{大米供给量}) / \text{大米供给量} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{大米储存与运输损失率} = \text{大米储存与运输损失量} / \text{大米供给量} \times 100\% \quad (6)$$

各国/地区大米消耗包括供人类消费的口粮, 养殖饲料, 种子, 初级产品加工处理损失, 储存、运输过程的损失和非食品用途等方面。人口数据来自联合国人口司的相关报告。

## 2 研究结果

### 2.1 全球水稻产品特征

全球稻米产量从 1961 年的 2.16 亿 t 粮食增加到了 2020 年的 7.57 亿 t, 60 年间增加了 250.46%, 平均每年增加 4.17%。人均稻米产品供应量从 20 世纪 60 年代的 70.87 kg 增加到 2020 年的 100 kg 左右。从各大洲来看, 稻米产量最高的是亚洲, 1961 年以来, 始终占全球产量的 90% 左右, 其次是美洲和非洲, 美洲稻米产量全球占比 4%~6%, 非洲稻米全球占比从 1961 年的 2.00% 增加到 2020 年的 5.00%, 60 年间非洲稻米产量稳步增长了 779.15%。

2010—2020 年, 全球稻米产量较为稳定, 11 年间的年均增长率为 0.82%, 非洲、欧洲、大洋洲、美洲和亚洲的稻米产品量增加率分别为 39.06%、-5.92%、-70.19%、5.14% 和 8.07%。欧洲和大洋洲占比基本不到 1%。亚洲是水稻产品净出口地区, 非洲和欧洲是水稻产品净进口地区, 美洲从 2019 年开始由水稻产品净出口地区转变成净进口地区, 而大洋洲经历过程较为复杂(图 1)。

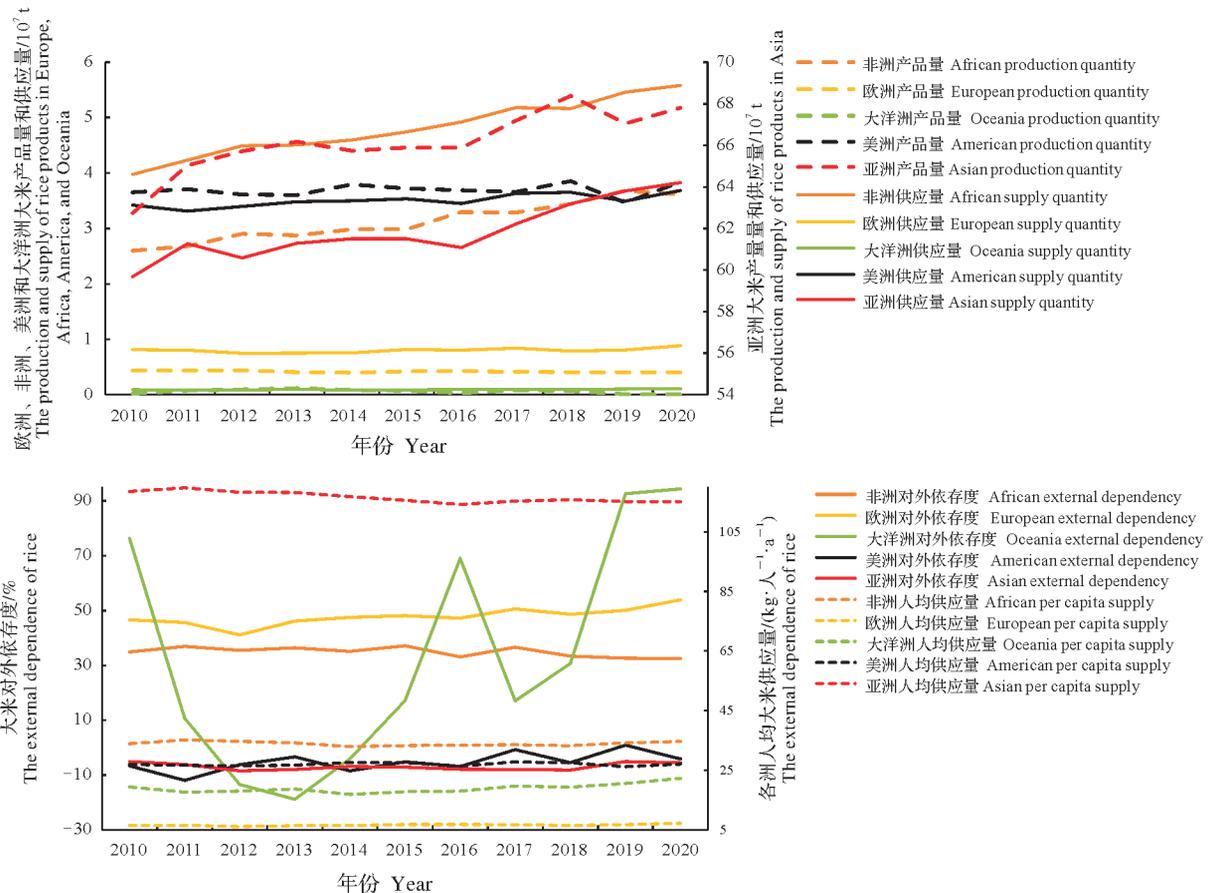


图 1 2010—2020 年五大洲稻米产量、供应量和对外依存度

Fig.1 Rice production, supply and external dependence in the five continents from 2010 to 2020

2010—2020 年, 大洋洲稻米对外依存度呈现 W 型, 澳大利亚的稻米产量占大洋洲稻米产量的 80.65%~99.14%, 呈倒“U”字形, 主导了大洋洲对外依存度变化过程。澳大利亚的水稻种植主要分布于新南威尔士州, 这个地区夏季干燥, 水稻完全依赖河水灌溉, 用水成本的升高是农民减少水稻种植的原因<sup>[53]</sup>。非洲作为五大洲人口营养不良率最高的地区, 其稻米对外依存度为 32.51%~36.91%, 该洲稻米产品较多的是尼日利亚、埃及、坦桑尼亚和马达加斯加, 该四国稻米产量占非洲稻米产量的 50% 以上。中

国和印度的稻米产量占亚洲一半以上,分别占亚洲产量的 30.90%~31.90% 和 22.95%~26.08%。美洲的稻米产品大国是巴西和美国,该两国的产量占美洲的一半以上,并且产量较为稳定。意大利、俄罗斯和西班牙的稻米产量占欧洲 70% 以上。就全球而言,稻米产量大国 TOP10 中,9 个国家是亚洲的,另外一个则是美洲的巴西, TOP20 稻米产量国家中,增加了非洲的四国。

### 2.2 全球水稻种植的甲烷排放特征和生产效率

1961—2020 年,全球水稻种植甲烷排放量从 1961 年的 17 426 473 t 增长到了 2020 年的 24 503 974 t, 60 年间增长了 40.61%。亚洲排放量全球占比呈现逐步降低趋势,从 1961 年的 93.00% 降到 2020 年的 86.53%(图 2a)。

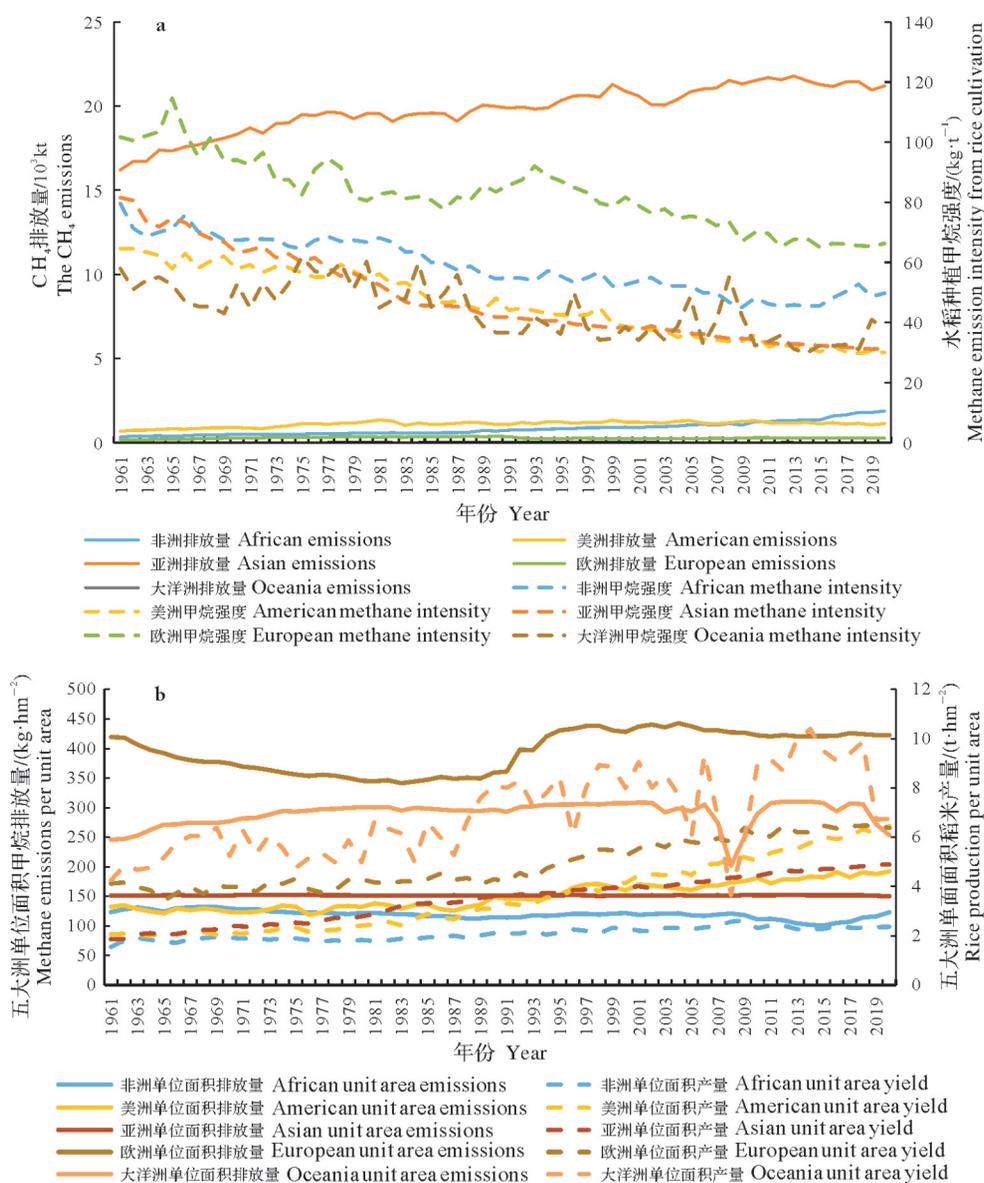


图2 1961—2020年五大洲水稻种植的CH<sub>4</sub>排放量和甲烷排放强度(a)、单位面积排放量和单位面积产量(b)  
Fig.2 Methane emissions and methane intensity(a), emissions per unit area and yield per unit area(b), from rice cultivation in the five continents from 1961 to 2020

从水稻种植甲烷排放强度看,60年来全球降低了 59.93%,大约平均 10.00%/10 a。20 世纪 60/70 年代水稻种植的甲烷排放强度降低最快,近 10 年全球甲烷排放强度降低减缓。甲烷排放强度最高的是欧洲,其次是非洲,2020 年,欧洲、非洲、亚洲、美洲和大洋洲的水稻种植甲烷排放强度分别为:66.28, 49.77, 31.34, 29.95, 37.96 kg/t(图 2a)。近 10 年,亚洲和美洲的甲烷排放强度最小且趋势一致性非常高,大洋洲、非洲的水稻种植甲烷排放强度分别增长了 17.28%、3.29%,亚洲、美洲和欧洲则分别降低了 8.60%、16.48% 和 10.51%。

1961年以来,全球单位面积产量从1961年的1.87 t/hm<sup>2</sup>增长到了2020年的4.72 t/hm<sup>2</sup>,60年间增长了152.31%;单位面积甲烷排放量从1961年的151.06 kg/hm<sup>2</sup>变为2020年的150.25 kg/hm<sup>2</sup>,降低了0.54%。60年间,亚洲生产效率提高最为明显,其单位面积的稻米产量和甲烷排放量分别增长了163.21%和-0.86%,稻米生产强度降低了62.33%,与全球生产效率极其接近(图2b),这也说明亚洲的生产效率对全球具有决定性的作用;美洲的生产效率最高,单位面积的稻米产量、甲烷排放量分别增长214.54%、45.17%;从单位面积甲烷排放量看,最高的是欧洲(2020年,422.65 kg/hm<sup>2</sup>),最低的是非洲(2020年,122.93 kg/hm<sup>2</sup>),值得注意的是,非洲、美洲、亚洲、欧洲和大洋洲的单位面积甲烷排放量分别增加了-0.43%、45.17%、-0.86%、0.83%和3.07%,也就是说,除了美洲外,其他四大洲的单位面积甲烷排放量60年间基本没有变化;从单位面积产量看,最高的是大洋洲(2020年,6.75 t/hm<sup>2</sup>),最低的是非洲(2020年,2.36 t/hm<sup>2</sup>),两者相差2.86倍。

北欧和北美洲的加拿大属于亚寒带大陆性气候,受制于水热条件,不适宜种植水稻。位于美洲热带雨林地带的国家稻米生产效率最高,甲烷排放强度最低的前10个国家中,有7个是该地带的国家,其中巴拿马的水稻产量在全球114个水稻种植的国家/地区中排名53位,甲烷排放强度全球最低,为3.57 kg/t。位于亚洲热带雨林的稻米产量全球第4和第8的印度尼西亚、菲律宾的甲烷排放强度分别是巴拿马的11.55、22.92倍,是全球稻米产量第9的巴西的4.20、8.33倍。

总体来看,1961—2020年,全球水稻种植甲烷排放量增长了6.77%/10 a,甲烷排放强度降低了10.00%/10 a,单位面积产量增长了25.39%/10 a,美洲的热带雨林地带是全球稻米生产效率最高的区域。

### 2.3 2030年稻米产品需求及甲烷排放量

依据2015年联合国确定的可持续发展第二项目标,到2030年,消除饥饿,消除一切形式的营养不良。而且在国际政治层面,CH<sub>4</sub>减排是2021年《联合国气候变化框架公约》的核心议题,在该会议上,105个国家签署了“全球甲烷承诺”,在2020—2030年10年时间段内,CH<sub>4</sub>人为排放量要减少30%。鉴

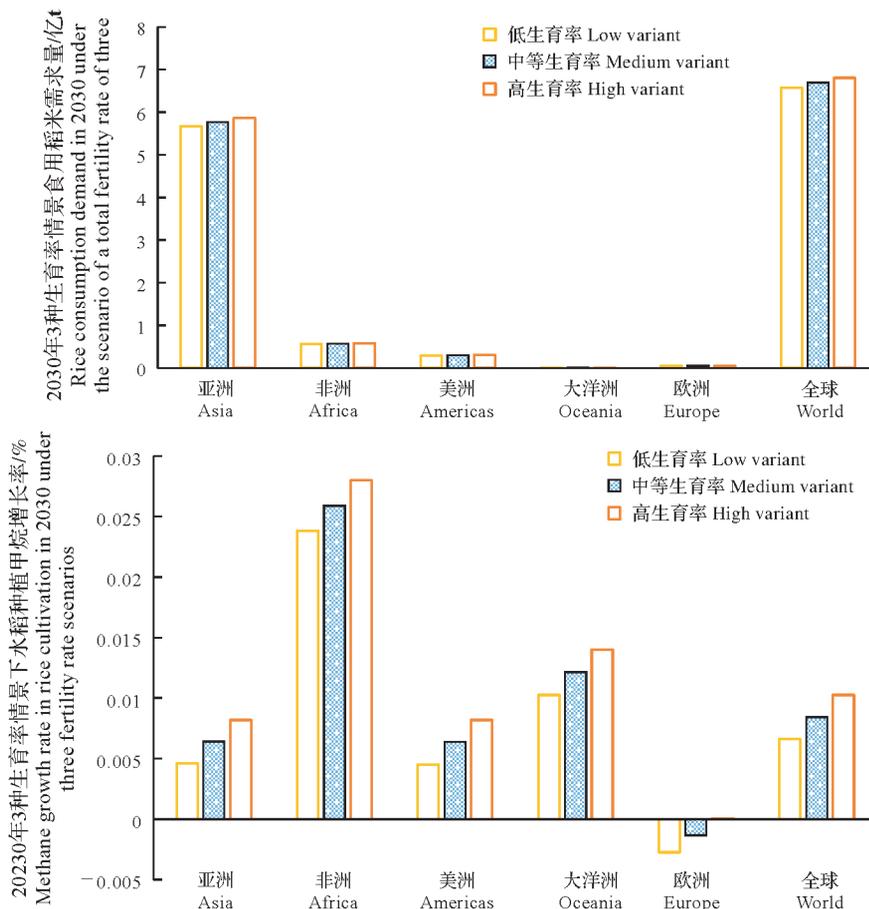


图3 2030年3种生育率情境下稻米需求量和水稻种植甲烷排放量

Fig.3 Rice demand and methane emissions from rice cultivation under three fertility rate scenarios in 2030

于2030年全球消除饥饿和人为甲烷排放量减少30%的“全球甲烷承诺”双重目标,故选取2030年作为稻米产品需求和甲烷排放研究时间点。2022年联合国经济和社会事务部人口司结合多项社会因素,出版了“World Population Prospects 2022”报告<sup>[54]</sup>,预测了全球人口变化趋势。相对于2020年,在低生育率、中等生育率和高等生育率3种情景下,2030年全球人口增长率分别为7.24%、9.06%和10.87%,其中非洲人口增长率最高,为23.83%~27.97%。

2010—2020年,五大洲人均稻米供应量非常稳定,取该时间段的历年稻米人均供应量的平均值作为各洲2030年的人均稻米需求量,则亚洲、非洲、美洲、大洋洲和欧洲的人均稻米供应量分别为116.60, 33.91, 26.97, 18.95, 6.60 kg/(人·a)。另假定未来10年,各大洲的水稻种植的甲烷排放强度不变,即亚洲、非洲、美洲、大洋洲和欧洲分别为31.34, 49.77, 29.95, 37.96, 66.28 kg/t,则可预计2030年的甲烷排放量。

2020年,供人类食用的稻米产品为620 857 216.40 t,到2030年,全球食用稻米产品需求量为657 882 612.70~680 410 741.4 t,相比于2020年,增长5.96%~9.59%,其中非洲增长率最大,为23.83%~27.98%(图3)。而全球水稻种植甲烷排放量增长率为6.63%~10.27%,这与2020—2030年间实现甲烷排放减少30%的“全球甲烷排放承诺”背道而驰。所以,怎么在保证粮食安全的前提下,实现国际承诺,是未来几年急需解决的重点难题。

## 3 讨论

### 3.1 水稻种植的生产效率需求

为了满足未来10年人口增长的粮食需求,达成联合国2030年消除饥饿的发展目标,稻米生产量需要增加5.96%~9.59%,按照现有农业生产水平,环境成本随之攀升,正如Nzotungicimpaye等<sup>[8]</sup>的研究结果——如果将CH<sub>4</sub>减排延迟到2040年或之后会增加突破2℃限制的风险,从而阻碍《巴黎协定》战略目标达成。中国农业部和国家发展改革委联合印发的《农业农村减排固碳实施方案》<sup>[55]</sup>中,第一条重大行动就是稻田甲烷减排行动。

再从水稻种植的甲烷排放强度看,近60年的大约降低了10%/10 a,而1990—2000年、2000—2010年和2010—2020年3个时间段的水稻种植甲烷排放强度分别降低了8.86%/10 a、9.91%/10 a和7.78%/10 a。假设2020—2030年水稻种植的甲烷排放强度和前面30年相似,则水稻种植的甲烷排放量可能仅仅达到不再增长的水平。“全球甲烷排放承诺”需要未来10年水稻种植的甲烷排放强度降低19.48%~22.15%,以前30年甲烷排放强度走势来看,显然是一个艰难的目标。面对如此困境,2020—2030年水稻种植需要采取更强有力的“开源节流”措施,所谓“开源”,即增加单位面积产量的同时,控制单面面积甲烷排放量;所谓“节流”,即减少稻米生产后的加工、运输、储存等环节的损失。不包括消费环节的浪费和加工环节的损失,2020年,全球运输、储存环节损失的稻米甲烷排放量占全球稻米生产排放量的0.67%,其中饥饿人口比例最高的非洲在运输、储存环节的损失量,可为2 498.18万人提供每年110 kg主粮(参照中国膳食标准中每人每天250~400 g主粮的标准),饥饿人口绝对数量最多的亚洲在运输、储存环节的损失量,可为24 392.73万饥饿人口提供110 kg稻米/(人·a)。

非洲的生产效率面临重大考验。正如前文所述,(1)非洲的营养不良率最高,2021年有20.2%的人口营养不良;(2)稻米对外依存度长期超过30%;(3)稻米生产甲烷排放强度高,大约为50 kg/t;(4)人口增长率最高,相对2020年,2030年人口将增长23.83%~27.97%。另外,随着农业生产投入资源价格的飙升,粮食价格将进一步上涨<sup>[56]</sup>。所以非洲将是“联合国2030年消除饥饿发展目标”的最重大的挑战。

2020年亚洲地区稻米产品人均供应量为其他大洲的3.44~17.67倍,其中西亚、中亚的人均稻米产品消费量分别与非洲、欧洲相近,东南亚、东亚和南亚稻米产品消费量占全球的84.92%。东南亚、东亚和南亚的水稻种植温室效应分别大约是小麦、玉米等谷物的8.62、5.01和3.56倍。不同地区、不同年份的大米、小麦和玉米单位质量产品提供的营养有些许不同,但是差别不大,大米提供的热量、蛋白质和脂肪分别大约为6.09~6.43 kcal/kg、0.12~0.13 g/kg和0.018~0.025 g/kg;小麦提供的热量、蛋白质和脂肪分别大约为7.02~8.62 kcal/kg、0.22~0.27 g/kg和0.041~0.058 g/kg;玉米提供的热量、蛋白质和脂肪分别大约为6.86~8.20 kcal/kg、0.14~0.15 g/kg和0.058~0.068 g/kg。从上面数据可以看出,单位质量的小麦和玉米提供的热量、蛋白质和脂肪分别比大米高大约6.69%~41.54%、7.69%~125.00%和64.00%~277.78%。综合

所述,相对于大米,小麦和玉米提供了更加丰富的营养和热量,而且温室效应至少低 3 倍以上,因此,东南亚、东亚和南亚稻应大力推行主粮多样化战略。

### 3.2 减少水稻种植的措施

从气候带角度看,2020 年有 114 个国家/地区种植水稻,其中水稻种植甲烷排放强度最低的前 10 名均位于南美洲和西非的热带雨林区;南亚、东南亚处于热带季风气候的国家中,印度、越南、泰国、缅甸、菲律宾和柬埔寨,稻米产量分别为全球的第 2、5、6、7、8 和 10,其甲烷排放强度分别是稻米产量第 3 的孟加拉国的 1.29、1.44、2.66、2.01、3.96 和 2.01 倍,说明除了气候因素外,还有其他变量影响各国/地区的水稻种植甲烷排放强度。

农田水管理方面,采取干湿交替灌溉法以降低甲烷排放的研究颇多。Habib 等<sup>[15]</sup>在孟加拉国农业大学研究农场分析了不同水稻品种在干湿交替和连续灌溉下 CH<sub>4</sub> 排放的差异性,结果表明,干湿交替比连续灌溉显著减少了大约 35% 的 CH<sub>4</sub> 排放量,而干湿交替和连续灌溉的产量分别为 5.38 t/hm<sup>2</sup> 和 5.16 t/hm<sup>2</sup>;Liang 等<sup>[16]</sup>研究表明,与连续大水灌溉相比,干湿交替显著减少了 82.1% 的 CH<sub>4</sub> 排放,但显著增加了 129.4% 的 N<sub>2</sub>O 排放,综合来看,使全球变暖潜势降低了 23.5%,并且认为干湿交替是水稻种植中减少用水和温室气体排放以及保持稻米产量的重要手段;Feng 等<sup>[17]</sup>进行了为期两年的田间试验,研究结果表明干湿交替使水稻种植的全球变暖潜势和温室气体强度分别降低了 42.2% 和 31.6%。欧洲水稻种植甲烷排放强度高的原因之一是灌溉方式,意大利的稻米产量占欧洲的 37.05%,是欧洲稻米种植第一大国,水稻灌溉方式历来采用湿播和连续灌溉的方式,近 15 年里,才采用干播和延迟灌溉<sup>[57]</sup>,干湿交替法仍然没有得到推广。据 Meijide 等<sup>[58]</sup>研究,意大利稻田水位高于 10~12 cm 的时候,甲烷排放量达到峰值。

耕作方式方面,Chen 等<sup>[18]</sup>研究了 3 种耕作处理方式(保留残茬的免耕处理、保留残茬的旋耕处理和掺入残茬的犁耕处理),与掺入残茬的犁耕处理相比,保留残茬的免耕处理和保留残茬的旋耕处理的双季稻产量分别提高了 0.8% 和 3.4%,并且保留残茬的免耕处理的平均全球变暖净潜势最低。伍芬琳等<sup>[19]</sup>研究结果表明全年 CH<sub>4</sub> 排放导致的温室效应由大到小依次为旋耕秸秆还田、翻耕秸秆还田、免耕秸秆还田和翻耕秸秆不还田,鉴于秸秆还田有利于增加稻田肥力,建议在长江中下游双季稻区推广以免耕秸秆还田为主的保护性耕作。另外,张熙栋等<sup>[21]</sup>研究表明,秸秆碳化还田,单位稻米产量的 CH<sub>4</sub> 排放量降低 19.9%。中国是世界上水稻田面积最大的国家,为节省劳动力,中国正在经历从传统的育苗-移栽水稻向直播水稻的转变。Li 等<sup>[38]</sup>利用协方差方法研究了移栽水稻和直播水稻之间的 CH<sub>4</sub> 排放量差异,结果表明,直播水稻栽培法比移栽水稻的 CH<sub>4</sub> 排放量高 25%。所以,面对国际化肥价格的上扬,翻耕+秸秆碳化还田是一种既可以减小环境成本,也可以减少稻田投入成本的耕作方式;至于移栽还是直播,各地可因地制宜。

施肥管理方面,Yang 等<sup>[23]</sup>通过 46 项田间研究表明,与传统氮肥相比,高效氮肥(包括抑制剂和缓释/控释肥料)显著减少了 16.2% 的 CH<sub>4</sub> 排放,增加了 7.3% 的稻米产量;Yu 等<sup>[24]</sup>在中国亚热带双季稻的研究表明,用有机氮肥代替化学氮肥,可以在不影响稻米产量的情况下,兼顾低气候和高氮利用效率;Li 等<sup>[25]</sup>的研究表明改良型氮肥与浅水干湿交替灌溉结合是一种既能提高粮食产量,也能减少温室气体排放的双赢措施;与常规灌溉+尿素方式相比,浅水干湿交替+尿素方式的早稻和晚稻生长季的全球增温潜势(GWP100)分别减少了 20% 和 25%,温室气体排放强度平均降低了 24%;与浅水干湿交替+尿素方式相比,聚合物包膜控释尿素+浅水干湿交替方式的 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和温室气体排放强度分别减少了 28%~49%、12%~44% 和 26%~45%。所以,控释肥料和有机肥料也是降低稻田种植成本,提高肥料利用率的重要手段。

土壤中的甲烷排放来自于相互拮抗但又相互关联的微生物活动。Gao 等<sup>[30]</sup>研究表明,磷营养的施用,增加水稻根圈土壤中甲烷菌的拷贝数和潜在活性,从而导致 CH<sub>4</sub> 排放排放量增加;Zhang 等<sup>[31]</sup>认为铁(III)肥明显降低甲烷菌的拷贝数和潜在活性,而对甲烷氧化菌则产生了相反的影响,因此通过在稻田添加铁(III)肥有助于调节甲烷菌和甲烷营养菌群体的差异来减少 CH<sub>4</sub> 排放;徐祥玉<sup>[22]</sup>研究表明,稻田养殖小龙虾,则可以使稻田土壤微生物群落更接近非稻季排水情景,从而降低 CH<sub>4</sub> 排放量;Ma 等<sup>[34]</sup>研究了杂交水稻(协优 9308)、籼米(金早 47)和粳米(春江 026)根圈土壤甲烷菌和甲烷氧化菌的组成和丰度,结果表明杂交水稻产量高于传统品种的同时,刺激了甲烷氧化菌的生长,减少了稻田土壤中 CH<sub>4</sub> 相对产生量;Jiang 等<sup>[35]</sup>认为,与低产栽培品种相比,高产栽培品种显著增加了根系孔隙度和消耗甲烷的

微生物数量,这表明高产栽培品种的根系更大、孔隙更多,通过促进氧气向土壤的输送,促进了甲烷的氧化。所以在稻田中,铁(III)肥、非稻季养殖小龙虾和种植高产杂交水稻等可以促进甲烷氧化菌增加拷贝数和潜在活性。

稻田轮作的相关研究中,陈友德等<sup>[41]</sup>认为,中国南方稻田采取杂交晚稻-油菜的轮作模式,有利于减少温室气体的排放;李成伟等<sup>[42]</sup>研究了江汉平原稻-麦、稻-油和再生稻3种模式的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放,结果也表明稻-油模式的温室气体排放强度比稻-麦、再生稻两种模式分别低35.14%、63.64%;张浪等<sup>[43]</sup>研究结果表明,长江中下游再生稻的甲烷排放强度比双季稻低23.08%。综合相关研究结果,温室气体排放强度由小到大依次为稻-油、稻-麦、再生稻和双季稻。另外,与稻田CH<sub>4</sub>排放相关的因素还包括土壤温度、土壤电导率、摩擦风速等<sup>[45]</sup>,5cm深的土壤温度是影响稻田CH<sub>4</sub>通量的重要变量<sup>[46]</sup>。

2020年,稻田单位面积甲烷排放量、单位面积稻米产量和甲烷排放强度的最高值、最低值之间分别相差76.78、22.48和162.85倍,环境成本相差如此大的机制是什么?同样位于南亚、东南亚的热带季风气候的稻米产量大国的甲烷排放强度差异主导因素是什么?位于亚洲热带雨林的稻米产量全球第4和第8的印度尼西亚、菲律宾的甲烷排放强度为什么分别是美洲热带雨林巴拿马的11.55倍、22.92倍,是全球稻米产量第9的巴西的4.20倍、8.33倍?是哪些因素使非洲热带草原气候的冈比亚的甲烷排放强度全球最高(585.00 kg/t)?结合前人研究结果来看,除了“水、土、气”等自然因素外,还有水稻品种、田间水管理、施肥方式、耕作方式和耕地资源轮作系统等人为因素影响稻田生产效率。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1)2020年全球水稻种植甲烷排放量为24 503 974 t。为了满足2030年全球稻米需求,达成《巴黎协定》和“全球甲烷承诺”国际战略目标,2020—2030年期间,水稻种植甲烷排放强度需降低19.48%~22.15%;

(2)干湿交替浅水灌溉,翻耕+秸秆碳化还田,控释肥料、有机肥,铁(III)肥、种植高产杂交水稻和稻-油或者稻-麦轮作等是降低甲烷排放强度的重要举措;

(3)2020年,美洲甲烷排放强度最低(29.95 kg/t),大洋洲单位面积产量最高(6.75 t/hm<sup>2</sup>),亚洲稻米产量最高(约占全球90%)。单位面积甲烷排放量和甲烷排放强度最高的欧洲,分别为422.65 kg/hm<sup>2</sup>和66.28 kg/t,非洲单位面积稻米产量最低(2.36 t/hm<sup>2</sup>);

(4)非洲地区将是“联合国2030年消除饥饿发展目标”最大挑战。由于较高的粮食生产环境成本(大约为50 kg/t)和人口增长率(23.83%~27.98%),非洲的粮食对外依存度将进一步升高,国际粮食价格呈上涨趋势;

(5)稻米的温室效应至少是小麦、玉米的3倍以上,但是单位质量的小麦和玉米提供的热量、蛋白质和脂肪分别比大米高约6.69%~41.54%、7.69%~125.00%和64.00%~277.78%,亚洲的大米消费大国应该大力推行主粮多样化战略。

### 4.2 建议

(1)全球范围内推广稻田浅水交替灌溉技术,培育高产抗旱新品种,合理施肥,采取因地制宜的轮作体系;

(2)加强各地稻田甲烷通量监测的广度和频次,深入研究各地稻田甲烷通量差异性来源,服务于提升稻田生产效率,从而降低稻米生产的环境成本;

(3)除了培育高产低碳品种、做好稻田水资源管理和合理施肥外,稻米种植大国还需在轮作体系方面加强研究,大力推行主粮多样化战略,普及地球环境和健康饮食科普知识。

### 参考文献:

- [1] FAO. Temperature change statistics 1961—2022. Global, regional and country trends [R/OL]. Rome: FAO. (2023-03-27) [2023-09-01]. <https://www.fao.org/3/cc5064en/cc5064en.pdf>.
- [2] FU J, JIAN Y W, WANG X H, et al. Extreme rainfall reduces one-twelfth of China's rice yield over the last two decades [J]. Nature food, 2023, 4(5): 416-426.
- [3] LESK C, COFFEL E, WINTER J, et al. Stronger temperature-moisture couplings exacerbate the impact of climate warming

- on global crop yields[J].*Nature food*, 2021, 2(9):683-691.
- [4] FAO. World Food and Agriculture-Statistical Yearbook 2022[EB/OL]. Rome: FAO. [2023-09-26]. <https://doi.org/10.4060/cc2211en>.
- [5] 联合国粮食及农业组织, 国际农业发展基金, 联合国儿童基金会, 等. 2023年世界粮食安全和营养状况: 贯穿城乡连续体的城市化、农业粮食体系转型和健康膳食[R/OL]. 罗马: 粮农组织. [2023-09-20]. <https://www.fao.org/3/cc6550zh/cc6550zh.pdf>.
- FAO, IFAD, UNICEF, et al. The state of food security and nutrition in the world 2023: urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum [R/OL]. Rome: FAO. [2023-09-20]. <https://www.fao.org/3/cc6550zh/cc6550zh.pdf>.
- [6] FAO. Greenhouse gas emissions from agrifood systems. global, regional and country trends, 2000—2020 [R/OL]. Rome: FAO. (2022-11-01) [2023-09-01]. <https://www.fao.org/3/cc2672en/cc2672en.pdf>.
- [7] NISBET E G, MANNING M R, DLUGOKENCKY E J, et al. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014—2017: implications for the Paris Agreement[J]. *Global biogeochemical cycles*, 2019, 33(3):318-342.
- [8] NZOTUNGICIMPAYE C M, MACISAAC A J, ZICKFELD K. Delaying methane mitigation increases the risk of breaching the 2 °C warming limit[J]. *Communications earth and environment*, 2023, 4(1):150.
- [9] SMITH P, REAY D, SMITH J U. Agricultural methane emissions and the potential for mitigation[J]. *Philosophical transactions of the royal society A*, 2021, 379:20200451.
- [10] KHUSH G S. What it will take to feed 5.0 billion rice consumers in 2030[J]. *Plant molecular biology*, 2005, 59(1):1-6.
- [11] MOSLEH M K, HASSAN Q K, CHOWDHURY E H. Application of remote sensors in mapping rice area and forecasting its production: a review[J]. *Sensors*, 2015, 15(1):769-791.
- [12] WANG C, LAI D Y F, SARDANS J, et al. Factors related with CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a paddy field: clues for management implications[J]. *Plos one*, 2017, 12(1):1-23.
- [13] SECK P A, DIAGNE A, MOHANTY S, et al. Crops that feed the world 7: rice[J]. *Food security*, 2012, 4(1):7-24.
- [14] OECD and Food and Agriculture Organization of the United Nations. OECD-FAO agricultural outlook 2011—2020[M]. Paris: OECD publishing, 2011.
- [15] HABIB M A, ISLAM S M M, HAQUE M A, et al. Effects of irrigation regimes and rice varieties on methane emissions and yield of dry season rice in Bangladesh[J]. *Soil systems*, 2023, 7(2):41.
- [16] LIANG H, XU J Z, HOU H J, et al. Modeling CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions for continuous and noncontinuous flooding rice systems[J]. *Agricultural systems*, 2022, 203:103528.
- [17] FENG Z Y, QIN T, DU X Z, et al. Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in central China[J]. *Agricultural water management*, 2021, 250:106830.
- [18] CHEN Z D, ZHANG H L, XUE J F, et al. A nine-year study on the effects of tillage on net annual global warming potential in double rice-cropping systems in Southern China[J]. *Soil and tillage research*, 2021, 206:104797.
- [19] 伍芬琳, 张海林, 李琳, 等. 保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9):2703-2709.
- WU F L, ZHANG H L, LI L, et al. Characteristics of CH<sub>4</sub> emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Scientia agricultura Sinica*, 2008, 41(9):2703-2709.
- [20] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2010, 139(4):469-475.
- [21] 张熙栋, 严玲, 周伟, 等. 稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(3):685-692.
- ZHANG X D, YAN L, ZHOU W, et al. Effects of different straw utilization methods on methane emissions from straw returning to paddy field in a rice-wheat rotation system[J]. *Journal of agro-environment science*, 2021, 40(3):685-692.
- [22] 徐祥玉. 三种中稻模式稻田温室气体排放及影响因子研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- XU Y X. Greenhouse gas emissions and influencing factors of three middle-season paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [23] YANG T, WANG M, WANG X, et al. Product type, rice variety, and agronomic measures determined the efficacy of enhanced-efficiency nitrogen fertilizer on the CH<sub>4</sub> emission and rice yields in paddy fields: a meta-analysis[J]. *Agronomy*, 2022,

- 12(10):2240.
- [24] YU K, FANG X T, ZHANG Y H, et al. Low greenhouse gases emissions associated with high nitrogen use efficiency under optimized fertilization regimes in double-rice cropping systems[J]. *Applied soil ecology*, 2021, 160: 103846.
- [25] LI J L, LI Y E, WAN Y F, et al. Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield[J]. *Geoderma*, 2018, 315: 1-10.
- [26] ZOU J W, HUANG Y, JIANG J Y, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global biogeochemical cycles*, 2005, 19(2): GB2021.
- [27] XU Z J, ZHENG X H, WANG Y S, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization on CH<sub>4</sub> emissions from paddy rice fields[J]. *Global biogeochemical cycles*, 2004, 18(3): GB3009.
- [28] YU H Y, ZHANG G B, MA J, et al. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> reduces CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions under two contrasting rice cultivars from a subtropical paddy field in China[J]. *Pedosphere*, 2022, 32(5): 707-717.
- [29] CONRAD R. Control of microbial methane production in wetland rice fields[J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2002, 64: 59-69.
- [30] GAO D D, SHENG R, WHITELEY A S, et al. Effect of phosphorus amendments on rice rhizospheric methanogens and methanotrophs in a phosphorus deficient soil[J]. *Geoderma*, 2020, 368: 114312.
- [31] ZHANG Y H, HUANG M Y, YU K, et al. Decreased CH<sub>4</sub> emissions associated with methanogenic and methanotrophic communities and their interactions following Fe(III) fertiliser application in rice paddies[J]. *Geoderma*, 2023, 431: 116375.
- [32] FAN L C, DIPPOLD M A, THIEL V, et al. Temperature sensitivity of anaerobic methane oxidation versus methanogenesis in paddy soil: implications for the CH<sub>4</sub> balance under global warming[J]. *Global change biology*, 2021, 28(2): 654-664.
- [33] KNOX S H, MATTHES J H, STURTEVANT C, et al. Biophysical controls on interannual variability in ecosystem-scale CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> exchange in a California rice paddy[J]. *Journal of geophysical research: biogeosciences*, 2016, 121(3): 978-1001.
- [34] MA K, QIU Q F, LU Y H. Microbial mechanism for rice variety control on methane emission from rice field soil[J]. *Global change biology*, 2010, 16(11): 3085-3095.
- [35] JIANG Y, VAN GROENIGEN K J, HUANG S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars[J]. *Global change biology*, 2017, 23(11): 4728-4738.
- [36] SOREMI P A S, CHIRINDA N, GRATEROL E, et al. Potential of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to mitigate methane emissions from irrigated systems in Latin America and the Caribbean[J]. *All earth*, 2023, 35(1): 149-157.
- [37] ZHANG Y, JIANG Y, LI Z J, et al. Aboveground morphological traits do not predict rice variety effects on CH<sub>4</sub> emissions[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2015, 208: 86-93.
- [38] LI H, GUO H Q, HELBIG M, et al. Does direct-seeded rice decrease ecosystem-scale methane emissions? — a case study from a rice paddy in southeast China[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2019, 272-273: 118-127.
- [39] HANG X, DANSO F, LUO J, et al. Effects of water-saving irrigation on direct-seeding rice yield and greenhouse gas emissions in north China[J]. *Agriculture*, 2022, 12(7): 937.
- [40] 刘志伟, 刘娟, 吴家森, 等. 生物炭和腐殖酸施用对稻麦轮作系统 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合温室效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 220-229.
- LIU Z W, LIU J, WU J S, et al. Effects of biochar and humic acid application on global warming potentials of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in a rice-wheat rotation system[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2023, 39(11): 220-229.
- [41] 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 等. 稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(10): 4701-4710.
- CHEN Y D, ZHAO Y, GAO D J, et al. Effects of different rotation patterns of oil-rice on methane and nitrous oxide emissions in rice fields[J]. *Environmental science*, 2020, 41(10): 4701-4710.
- [42] 李成伟, 刘章勇, 龚松玲, 等. 稻作模式改变对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(5): 961-968.
- LI C W, LIU Z Y, GONG S L, et al. Effects of changing rice cropping patterns on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy fields[J]. *Ecology and environmental sciences*, 2022, 31(5): 961-968.
- [43] 张浪, 徐华勤, 李林林, 等. 再生稻和双季稻田 CH<sub>4</sub> 排放对比研究[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2101-2113.
- ZHANG L, XU H Q, LI L L, et al. Comparative study on CH<sub>4</sub> emission from ratoon rice and double-cropping rice fields[J].

- Scientia agricultura Sinica, 2019, 52(12):2101-2113.
- [44] IWATA H, MANO M, ONO K, et al. Exploring sub-daily to seasonal variations in methane exchange in a single-crop rice paddy in central Japan[J]. Atmospheric environment, 2018, 179:156-165.
- [45] 鲍远航, 徐昔保, 陈晔. 太湖流域农田稻季 CH<sub>4</sub> 通量特征及影响因子[J]. 生态学报, 2020, 40(21):7690-7698.  
BAO Y H, XU X B, CHEN Y. Characteristics and impact factors of methane flux in the paddy fields of Taihu Lake Basin[J]. Acta ecologica Sinica, 2020, 40(21):7690-7698.
- [46] MA L H, LIU B, CUI Y L, et al. Variations and drivers of methane fluxes from double-cropping paddy fields in southern China at diurnal, seasonal and inter-seasonal timescales[J]. Water, 2021, 13(16):2171.
- [47] 时元智, 崔远来, 才硕, 等. 鄱阳湖平原直播稻 CH<sub>4</sub> 通量及其与 CO<sub>2</sub> 通量的综合温室效应[J]. 环境科学, 2023, 44(3):1572-1582.  
SHI Y Z, CUI Y L, CAI S, et al. CH<sub>4</sub> fluxes and their comprehensive greenhouse effects with CO<sub>2</sub> fluxes in direct-seeded rice in Poyang Lake Plain[J]. Environmental science, 2023, 44(3):1572-1582.
- [48] LIU X, DAI X Q, YANG F T, MENG S W, et al. CH<sub>4</sub> emissions from a double-cropping rice field in subtropical China over seven years[J]. Agricultural and forest meteorology, 2023, 339:109578.
- [49] 高艳红, 李新荣, 刘立超, 等. 腾格里荒漠红砂-珍珠群落 CO<sub>2</sub> 收支变化及其不同观测方法间的比较[J]. 生态学报, 2015, 35(7):2085-2093.  
GAO Y H, LI X R, LIU L C, et al. Variation of the carbon budget and comparison between static chamber method and eddy covariance method in the *Reaumuria soongorica-Salsola passerina* community in the Tennger Desert[J]. Acta ecologica Sinica, 2015, 35(7):2085-2093.
- [50] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2):290-298.  
ZHENG Z M, YU G R, SUN X M, et al. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration[J]. Chinese journal of applied ecology, 2008, 19(2):290-298.
- [51] ABBADE E B. Land footprint and GHG emissions from global food loss[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2023, 103(9):4430-4440.
- [52] 汤宏波, 吕新华, 李富山, 等. 全球粮食系统温室气体排放特征研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(11):2031-2039.  
TANG H B, LYU X H, LI F S, et al. Characteristics of greenhouse gas emissions in global food system[J]. Research of environmental sciences, 2023, 36(11):2031-2039.
- [53] FELL J, FRILAY J, GREENVILLE J, et al. Australian rice markets in 2020[EB/OL]. Canberra: Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, 2021. [2023-09-16]. <https://www.agriculture.gov.au/abares/research-topics/agricultural-outlook/rice#daff-page-main>.
- [54] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects 2022[R/OL]. New York: United Nations. [2023-09-26]. <https://population.un.org/wpp/>.
- [55] 农业农村部, 国家发展改革委. 农业农村减排固碳实施方案[EB/OL]. 北京: 农业农村部, 国家发展改革委. (2022-06-30)[2023-10-16]. [https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202206/t20220630\\_6403715.htm](https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202206/t20220630_6403715.htm).  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Development and Reform Commission. Implementation plan for agricultural and rural carbon reduction and fixation[EB/OL]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Development and Reform Commission. (2022-06-30)[2023-10-16]. [https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202206/t20220630\\_6403715.htm](https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202206/t20220630_6403715.htm).
- [56] OECD/FAO. OECD-FAO agricultural outlook 2023—2032[R/OL]. Paris: OECD. (2023-07-06)[2023-10-16]. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>.
- [57] GHARSALLAH O, RIENZNER M, MAYER A, et al. Economic, environmental, and social sustainability of alternate wetting and drying irrigation for rice in northern Italy[J]. Frontiers in water, 2023, 5:1213047.
- [58] MEIJIDE A, MANCA G, GODED I, et al. Seasonal trends and environmental controls of methane emissions in a paddy field in Northern Italy[J]. Biogeosciences, 2011, 8:3809-3821.