



我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径

唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 张卫建

Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China

TANG Zhiwei, ZHANG Jun, DENG Aixing, and ZHANG Weijian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210887>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机制的研究进展

The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: A review

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 175–181

水肥管理对稻田CH₄排放及其全球增温潜势影响的评估

Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(7): 958–967

基于DNDC模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放

Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jiangnan Plain based on DNDC model

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1291–1301

长江中下游典型种植业氨排放特征与减排关键技术

Ammonia emission patterns of typical planting systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River and key technologies for ammonia emission reduction

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(12): 1981–1989

中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析

Space-time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1257–1268

稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响

Effect of rice-crayfish co-culture on greenhouse gases emission in straw-puddled paddy fields

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(11): 1591–1603



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210887

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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 582-591

TANG Z W, ZHANG J, DENG A X, ZHANG W J. Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 582-591

我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径*

唐志伟¹, 张俊^{1,2}, 邓艾兴¹, 张卫建^{1,2**}

(1. 中国农业科学院作物科学研究所 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业农村碳达峰碳中和研究中心 北京 100081)

摘要: 水稻是我国第一大口粮作物, 甲烷(CH₄)是全球第二大温室气体, 稻田CH₄减排意义重大。本文基于国家统计数据 and 文献收集, 计算分析了我国2001—2018年水稻播种面积和单位产量CH₄排放的时空特征, 并进一步总结了稻田CH₄排放的关键过程及其主要影响因子。研究结果表明, 2001—2018年我国水稻总播种面积和稻田CH₄总排放量呈先降低后升高再降低的趋势, 单位水稻产量CH₄排放则呈整体下降趋势。稻田CH₄排放包括土壤CH₄产生、氧化与传输3个过程, 主要受水稻品种、土壤特性、气候条件、农艺措施等因素影响。受水稻播种面积影响, 我国稻田CH₄排放量呈东南高西北低的特征, 单位产量CH₄排放量呈南高北低的特征。基于上述分析, 本文提出选用低排放水稻品种、应用减排稻作技术、施用CH₄减排产品等水稻栽培减排途径。同时, 针对我国稻田CH₄排放的区域特征, 提出在选用高产低排放品种基础上, 南方平原稻作区重点应用好氧耕作与控水增氧等减排技术, 南方丘陵稻作区重点应用生物炭和石灰等减排产品, 北方稻作区重点应用好氧耕作和硫酸铵替代部分尿素等减排技术。最后, 本文还提出了促进稻田CH₄减排的科技创新与政策创设建议, 以期为实现水稻丰产与稻田CH₄减排的协同提供理论参考。

关键词: 稻田; 甲烷; 排放特征; 减排途径; 碳中和

中图分类号: S5-33

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China*

TANG Zhiwei¹, ZHANG Jun^{1,2}, DENG Aixing¹, ZHANG Weijian^{1,2**}

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Center for Carbon Neutrality in Agriculture and Rural Region, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Rice is the main staple crop in China and methane (CH₄) is the second most important greenhouse gas worldwide. Therefore, it is important to reduce CH₄ emissions from paddy fields. Based on national statistical data and literature collection, we calculated and analyzed the spatial and temporal characteristics of CH₄ emissions at the rice sown-area scale and yield scale in China from 2001 to 2018 and further summarized the key processes and main influencing factors of CH₄ emissions. The results of this study showed that the total sown area of rice and area-scaled CH₄ emissions from rice fields in China showed an overall trend of first de-

* 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-22)、中国科学院学部咨询评议重点项目(2021-SM01-B-008)和中国农业科学院科技创新工程(Y2021YJ02, CAAS-XTXC2016008)资助

** 通信作者: 张卫建, 主要从事农田生态系统和耕作制研究。E-mail: zhangweijian@caas.cn

唐志伟, 主要研究方向为耕作制度与农田生态。E-mail: 1623161491@qq.com

收稿日期: 2021-12-14 接受日期: 2022-01-11

* This study was supported by the Modern Agro-industry Technology Research System of China (CARS-22), the Key Projects of Consultation and Evaluation of the Academic Department of the Chinese Academy of Sciences (2021-SM01-B-008) and the Agricultural Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (Y2021YJ02, CAAS-XTXC2016008).

** Corresponding author, E-mail: zhangweijian@caas.cn

Received Dec. 14, 2021; accepted Jan. 11, 2022

creasing, then increasing, then decreasing again from 2001 to 2018; however, yield-scaled CH₄ emissions in all regions showed a decreasing trend. CH₄ emissions from rice fields mainly included three processes of production, oxidation, and transport, which were mainly influenced by rice varieties, soil characteristics, climatic conditions, and agronomic measures. Owing to the influence of rice sown areas, area-scaled CH₄ emissions from paddy fields in China were high in the southeast and low in the northwest, and yield-scaled CH₄ emissions were high in the south and low in the north. Based on the above findings, this study suggested reducing CH₄ emissions by applying a new rice cultivar, cropping mode, and products with high yield and low CH₄ emissions. Given the regional characteristics of CH₄ emissions in China, this study first proposed the selection of rice cultivars with high yield and low CH₄ emissions and the application of aerobic dry tillage and water-control irrigation in the southern plain region, biochar and lime in the southern hilly region, and aerobic dry tillage and partially alternative urea with ammonium sulfate in the northern rice cropping region. Finally, some suggestions were put forward related to science, technology and policy innovations for CH₄ emission reduction to provide important references for achieving the win-win target of high yield and low CH₄ emissions.

Keywords: Rice fields; Methane; Emission characteristics; Emission reduction pathways; Carbon neutrality

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告指出, 至少到 2050 年, 大气中温室气体排放的增加仍将导致全球表面温度继续升高^[1]。甲烷 (CH₄) 是仅次于二氧化碳 (CO₂) 的全球第二大温室气体, 在百年尺度内, CH₄ 的增温潜势是 CO₂ 的 27.9 倍, 在大气中存留时长为 11.8 年^[1]。稻田是最重要的人为 CH₄ 排放源之一, 占全球人为 CH₄ 排放的 10%~13%^[2]。我国是世界上最大的水稻 (*Oryza sativa* L.) 生产国和稻米消费国, 水稻种植面积占全球水稻种植总面积 18.5%^[3-4]。我国稻田 CH₄ 排放占全球稻田 CH₄ 排放的 21.9%^[5]。因此, 在全球气候变暖背景下, 实现水稻丰产和稻田 CH₄ 减排的协同对于保障国家粮食安全、减缓全球气候变暖以及兑现 2060 年碳中和的国际承诺具有重要意义。目前关于稻田 CH₄ 排放的关键过程与主要影响因素的研究比较多, 但针对我国各区域稻田 CH₄ 排放特征及其减排途径的论述还不充分。张学智等^[6] 基于 CH₄MOD 模型估算了稻田 CH₄ 的排放量, 结果表明 2018 年我国稻田 CH₄ 排放量为 6.408×10⁶ t, 但对稻田 CH₄ 排放的关键过程和减排措施论述不够。任万辉等^[7] 综述了我国近 20 年来稻田 CH₄ 的研究现状, 阐述了稻田 CH₄ 排放的关键过程与主要影响因子, 研究认为稻田 CH₄ 排放是稻田土壤 CH₄ 的产生、转化以及传输共同作用的结果, 受土壤、温度、农业管理措施、水稻品种等因素的影响, 但对稻田 CH₄ 减排途径的探讨不多。刘珂纯等^[8] 基于 Meta 分析, 总结了稻田 CH₄ 主要减排措施的技术效应和影响因素, 发现复合种养、适当的施氮水平、有机肥堆沤发酵后还田、施控释肥或配施生物抑制剂、适量生物炭还田、节水灌溉以及少耕免耕等措施有助于稻田 CH₄ 减排, 但对我国各区域 CH₄ 排放特征的分析不够。尽管还有不少关于稻田 CH₄ 影响因素和减排措施的分析研究, 这些研究多侧

重于氮肥施用^[9]、秸秆还田^[10]、水稻品种筛选^[11]、节水灌溉^[12]、保护性耕作^[13] 等单个或多个影响因素和减排措施, 对稻田 CH₄ 排放的主要影响因素和减排措施梳理还不够。为此, 本文量化分析了我国水稻播种面积、稻田 CH₄ 排放和单位产量 CH₄ 排放的时空变化特征, 并结合对稻田 CH₄ 排放关键过程和主要影响因素的总结, 探讨我国水稻丰产减排的技术途径及科技与政策创新建议, 为 2020s 稻田 CH₄ 减排提供理论与技术参考。

1 数据来源与计算方法

1.1 数据来源

本文涉及的数据资料主要包括全国各省份 (不含港澳台地区) 水稻播种面积 (单季稻、双季早稻、双季晚稻)、稻谷产量和稻田 CH₄ 排放因子。播种面积数据来自国家数据中心 (<http://data.stats.gov.cn/>), 稻谷产量数据来源于《中国统计年鉴》, 稻田 CH₄ 排放因子推荐值来源于《省级温室气体清单编制指南》^[14] (表 1)。研究年份为 2001—2018 年, 区域包括华北、华东、华中、华南、西南、东北、西北。

1.2 计算方法

水稻播种面积(10⁴ hm²) = 单季稻播种面积 + 双季早稻播种面积 + 双季晚稻播种面积 (1)

稻田 CH₄ 排放量是该区域不同类型稻田所产生的 CH₄ 排放量求和, 具体计算公式如下:

$$E_{\text{CH}_4} = \sum \text{EF}_i \times \text{AD}_i \times 10^{-4} \times 27.9 \quad (2)$$

式中: E_{CH_4} 为稻田 CH₄ 排放总量 (×10⁴ t CE) (CE 为 CO₂ 当量, 下同); EF_i 为分类型稻田 CH₄ 排放因子推荐值 (kg·hm⁻²) (表 1); AD_i 为对应于该排放因子的水稻播种面积 (×10⁴ hm²); 下标 i 表示稻田类型, 分别指单季稻、双季早稻和双季晚稻; 27.9 为 CH₄ 折算 CO₂ 当量系数 (根据 2021 年 IPCC 报告)^[1]。

表 1 不同区域不同类型稻田 CH₄ 排放因子
Table 1 Methane emission factors from different types of rice fields in different regions of China kg·hm⁻²

区域 Region	单季稻 Single cropping rice			双季早稻 Double cropping early rice			双季晚稻 Double cropping late rice		
	推荐值 Recommended value	最低值 Minimum value	最高值 Maximum value	推荐值 Recommended value	最低值 Minimum value	最高值 Maximum value	推荐值 Recommended value	最低值 Minimum value	最高值 Maximum value
华北 North China	234.0	134.4	341.9						
华东 East China	215.5	158.2	255.9	211.4	153.1	259.0	224.0	143.4	261.3
中华和华中 Central and South China	236.7	170.2	320.1	241.0	169.5	387.2	273.2	185.3	357.9
西南 Southwest China	156.2	75.0	246.5	156.2	73.7	276.6	171.7	75.1	265.1
东北 Northeast China	168.0	112.6	230.3						
西北 Northwest China	231.2	175.9	319.5						

华北包括北京、天津、河北、山西、内蒙古等省(市、自治区);华东包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东等省(市);华中包括河南、湖北、湖南等省;华南包括广东、广西、海南等省;西南包括重庆、四川、贵州、云南、西藏等省(市、自治区);东北包括辽宁、吉林、黑龙江等省;西北包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等省(自治区)。该排放因子基于2005年各地区稻田平均有机肥(包括作物秸秆和农家肥)施水平、稻田水分管理方式、气候条件和水稻生产力水平(水稻单产)等得到。North China includes Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi, Inner Mongolia; East China includes Shanghai, Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Fujian, Jiangxi, Shandong; Central China includes Henan, Hubei, Hunan; South China includes Guangdong, Guangxi, Hainan; Southwest China includes Chongqing, Sichuan, Guizhou, Yunnan, Tibet; Northeast China includes Liaoning, Jilin, Heilongjiang; Northwest China includes Shaanxi, Gansu, Qinghai, Ningxia, Xinjiang. This emission factor was obtained based on the average level of organic fertilizer (including crop straw and farmyard manure) application, paddy moisture management practices, climatic conditions, and rice productivity levels (rice yields) in paddy fields in each region in 2005.

单位产量CH₄排放量[kg(CE)·kg⁻¹]=当年该地区CH₄排放总量/当年该地区稻谷总产量 (3)

1.3 文献收集分析

为进一步总结归纳稻田土壤 CH₄ 排放的关键过程与影响因素,本文基于中国知网、Web of Science 数据库,围绕稻田 CH₄ 排放过程、影响因素、减排途径等收集文献资料,通过阅读、整理和归纳,系统总结了稻田 CH₄ 排放的关键过程、主要影响因素及其影响机制,以探讨丰产减排技术途径。

2 我国水稻播种面积与稻田 CH₄ 排放的时空特征

2.1 我国水稻播种面积的时空特征

从图 1 可以看出,2001—2018 年我国水稻总播种面积整体呈先降低、后升高、再降低的趋势,其中以 2015 年水稻播种面积最高(3.078×10⁷ hm²),

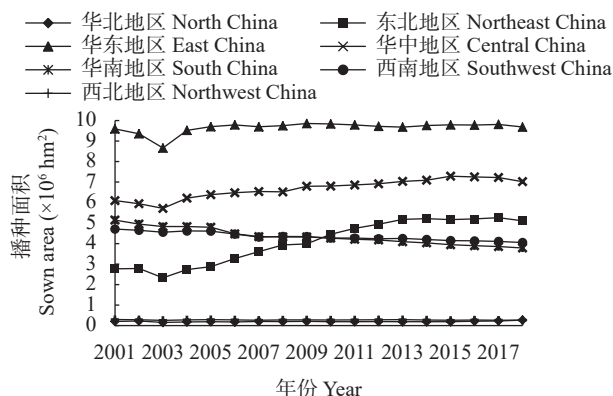


图 1 2001—2018 年我国不同区域的水稻播种面积
Fig. 1 Rice sown areas in different regions of China from 2001 to 2018

2003 年最低(2.651×10⁷ hm²)。2001—2007 年,我国各区域水稻播种面积从高到低依次为华东地区、华中地区、华南地区、西南地区、东北地区、西北地区、华北地区;2008 年起,西南地区水稻播种面积超过华南地区,仅次于华东和华中地区;2010 起,东北地区水稻播种面积超过西南和华南地区,仅次于华东和华中地区。2018 年我国水稻播种面积以华东地区最高(9.684×10⁶ hm²),其他区域从高到低依次为华中地区、东北地区、西南地区、华南地区、华北地区、西北地区,呈现东南高、西北低的趋势。

2.2 我国稻田 CH₄ 排放和单位产量排放的时空特征

从图 2a 可以看出,2001—2018 年,我国稻田 CH₄ 排放总量呈先降低、后升高、再降低的趋势,其中以 2015 年稻田 CH₄ 排放总量最高(1.829×10⁸ t CE),2003 年稻田 CH₄ 排放总量最低(1.601×10⁸ t CE)。2001—2009 年,我国各区域稻田 CH₄ 排放总量从高到低依次为华东地区、华中地区、华南地区、西南地区、东北地区、西北地区、华北地区;2010—2018 年,我国各区域稻田 CH₄ 排放总量从高到低依次为华东地区、华中地区、华南地区、东北地区、西南地区、西北地区、华北地区。

从图 2b 可以看出,2001—2018 年,我国稻田单位产量 CH₄ 排放总体呈下降趋势,其中以 2003 年最高[0.991 kg(CE)·kg⁻¹],2018 年最低[0.841 kg(CE)·kg⁻¹]。2001—2018 年,我国各区域稻田单位产量 CH₄ 排放量由高到低总体依次为华南地区、华中地区、华北地区、华东地区、西北地区、东北地区、西南地区。2018 年各区域稻田单位产量 CH₄ 排放量以华南地区最高[1.246 kg(CE)·kg⁻¹],其他各区域由高到低依次

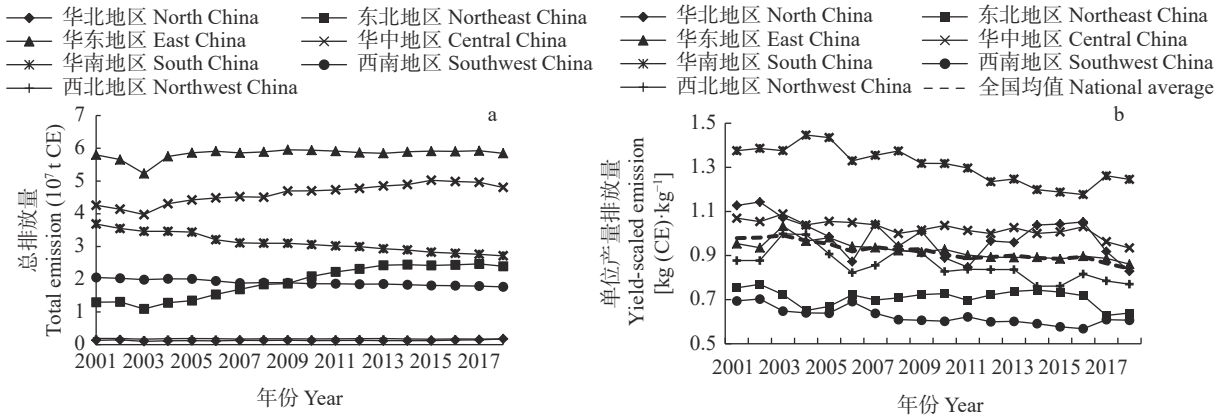


图 2 2001—2018 年我国不同区域稻田 CH₄ 排放总量 (a) 和单位产量 CH₄ 排放量 (b) 特征

Fig. 2 Total CH₄ emission (a) and yield-scaled CH₄ emission (b) from rice fields in different regions of China from 2001 to 2018

为华中地区、华东地区、华北地区、西北地区、东北地区, 西南地区最低 [0.606 kg(CE)·kg⁻¹]. 排放量受水稻播种面积、气候条件等因素的影响, 我国各区域稻田 CH₄ 排放总量和单位产量 CH₄ 排放量总体呈南高北低的趋势。

其向大气传输 3 个关键过程 (图 3)。稻田 CH₄ 的产生过程主要发生在土壤耕层的厌氧层 (2~20 cm)。在极端厌氧条件下, 土壤中的有机物质经厌氧微生物的作用, 水解和发酵后形成乙酸 (CH₃COOH)、CO₂ 和氢气 (H₂) 等, 其中 CH₃COOH、CO₂/H₂ 被 CH₄ 产生菌利用还原成 CH₄。两种途径对 CH₄ 产生的贡献在不同的稻田土壤存在差异, 这主要取决于稻田土壤 CH₄ 产生菌种群的差异, 嗜乙酸 CH₄ 产生菌偏爱乙酸或乙酸盐, 而嗜氢 CH₄ 产生菌则首选 CO₂ 和 H₂ 作

3 稻田 CH₄ 排放的关键过程及其主要影响因素

3.1 稻田 CH₄ 排放的关键过程与调控途径

稻田 CH₄ 排放主要包括土壤 CH₄ 产生、氧化及

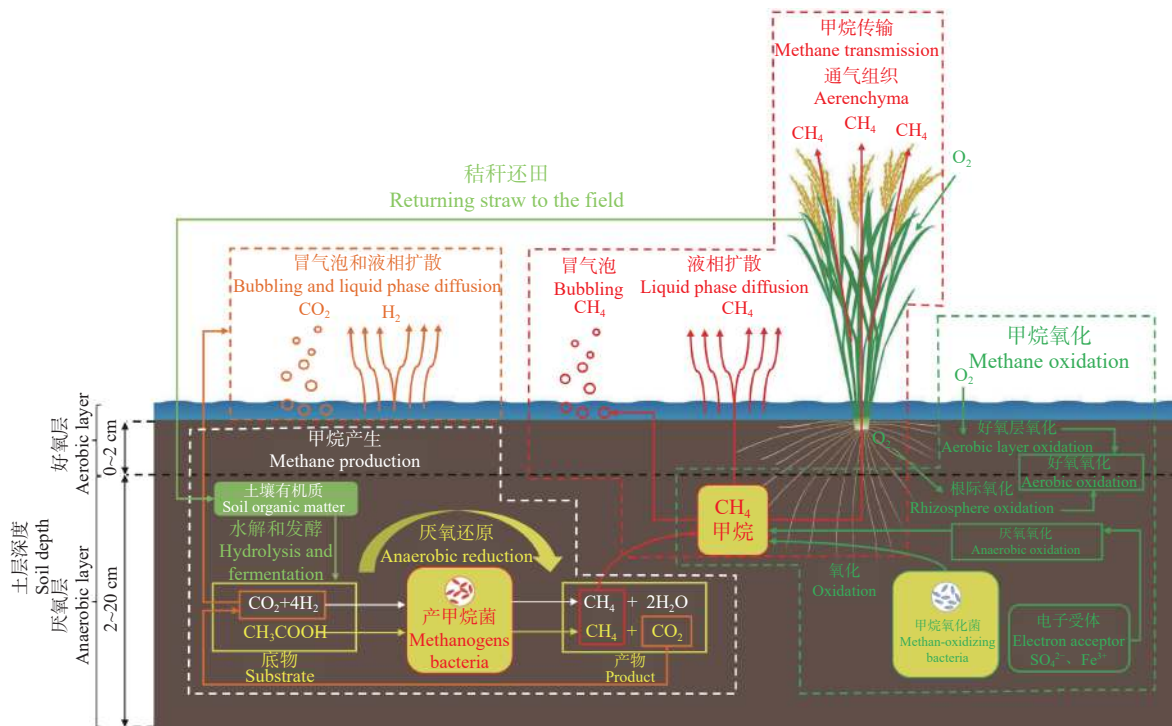


图 3 稻田 CH₄ 排放的关键过程

Fig. 3 Key processes of methane emission from rice fields

图中白色虚线方框为 CH₄ 产生过程, 绿色虚线方框为 CH₄ 氧化过程, 红色虚线方框为 CH₄ 传输过程, 橙色虚线方框为 CH₄ 产生过程中排放的气体。The white dashed box in the figure shows the methane production process, the green dashed box shows the methane oxidation process, the red dashed box shows the methane transport process, and the orange dashed box shows the gas emitted during the methane production process.

为前体物^[15]。多数情况下,稻田 CH₄ 产生主要以乙酸途径为主导^[16]。

稻田 CH₄ 的氧化分为好氧氧化和厌氧氧化,其中以好氧氧化为主。好氧氧化主要发生在土壤和灌溉水交界面的好氧层和水稻根系泌氧区的根际好氧区;厌氧氧化主要发生在土壤耕作厌氧层,受微生物种间直接电子传递的影响^[17]。CH₄ 氧化细菌和硝化细菌是土壤中消耗 CH₄ 的两种主要微生物,前者氧化 CH₄ 的速率显著高于后者,因此,土壤 CH₄ 的氧化主要由 CH₄ 氧化细菌完成^[18]。稻田产生的大部分 CH₄ (70%~90%) 在穿过土壤表层的好氧层和水稻根际好氧区两个氧气较为富集的区域时被氧化,只有少部分未被氧化的 CH₄ 传输至大气^[19]。

稻田 CH₄ 主要通过水稻植物体内部的通气组织、冒气泡和水中液相扩散 3 种途径传输至大气,其中水稻植株通气组织是稻田 CH₄ 最主要的传输通道(80% 以上)。只有当土壤中 CH₄ 含量积累到一定程度,并且 CH₄ 在土壤、水层及水稻植株的传输途径中被较少地氧化,并且 3 种排放途径较为通畅时,才

会出现较大的 CH₄ 排放量^[20]。

3.2 影响稻田 CH₄ 排放的主要因素及其作用机制

稻田 CH₄ 排放的主要影响因素有水稻品种、土壤特性、气候条件、农艺措施等(图 4)。不同水稻品种间 CH₄ 排放量存在显著差异,高生物量的杂交稻品种一般通气组织较为发达,因此,排放量低于低生物量的常规稻品种^[20]。稻田 CH₄ 排放与植株的通气组织、地上部与根系形态及其生理、当季光合产物和生物量等有关^[21]。提高收获指数可以减少水稻根系分泌的有机物,从而减少 CH₄ 产生菌所需的底物^[22],以此减少 CH₄ 产生。多熟制种植是我国的重要耕作模式之一,在水旱两熟或多熟制种植模式中,旱地作物种植次数越多,水稻季 CH₄ 排放就越少^[23]。因此,作物周年 CH₄ 排放量的高低主要取决于周期内旱地种植季的时间长短。耕作方式通过影响土壤理化性质和生物学过程直接或间接地影响 CH₄ 排放,少耕或免耕保持了土壤原有的孔隙结构,可以促进 CH₄ 氧化^[24]。

土壤特性也是稻田 CH₄ 排放的主要影响因子,

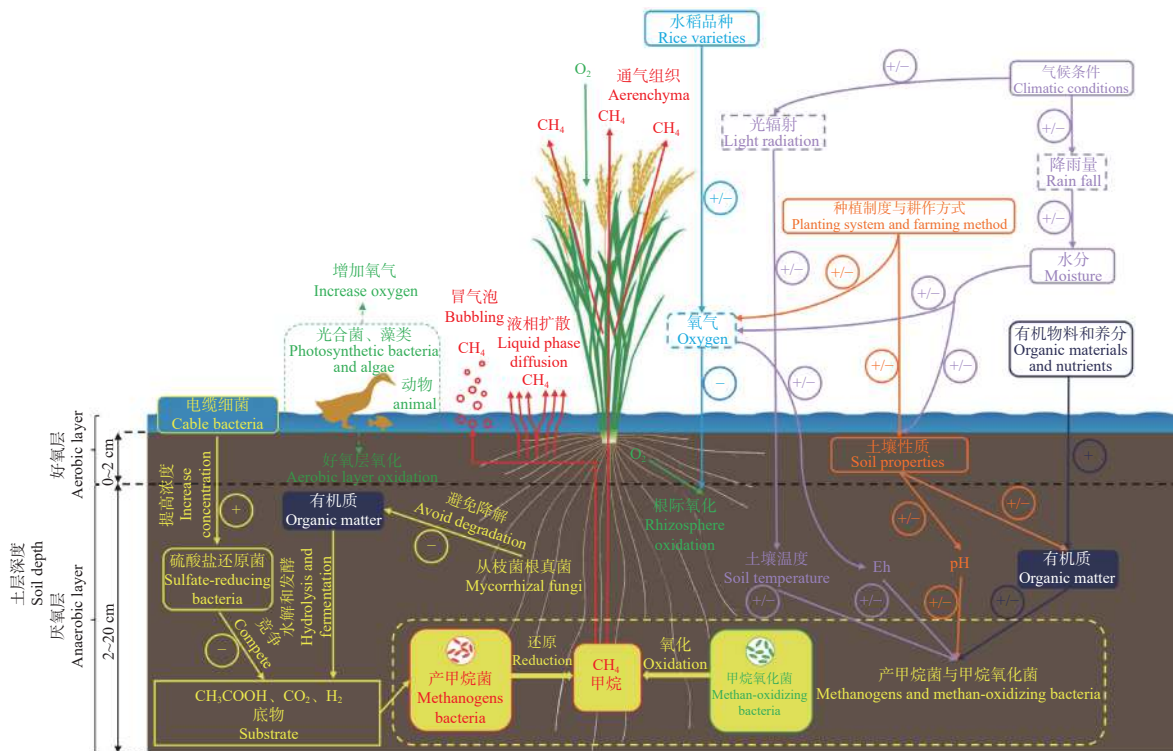


图 4 影响稻田 CH₄ 排放的主要因素及其作用机制

Fig. 4 Main factors affecting methane emission from rice fields and their underlying mechanisms

图中“⊕”表示正效应,“⊖”表示负效应,“⊕⊖”表示正效应和负效应并存;红色、黄色、绿色、青色、紫色、橙色、蓝色线条和文字分别代表 CH₄ 传输、微生物介导、CH₄ 氧化、水稻品种、气候条件、种植制度与耕作方式、有机物料和养分等过程和影响因素。In the figure, “⊕” indicates positive effect, “⊖” indicates negative effect, “⊕⊖” indicates both positive and negative effects; red, yellow, green, cyan, purple, orange, and blue lines and texts represent processes and influencing factors of methane transport, microbial mediation, methane oxidation, rice varieties, climatic conditions, cropping system and tillage practices, organic materials, and nutrients, respectively.

包括土壤水分、有机质、氧化还原电位 (Eh)、酸碱度 (pH)、质地等^[25]。CH₄ 产生菌的生长繁殖需要严格厌氧环境, 所以水分管理是影响土壤 CH₄ 产生、氧化以及排放的决定性因素^[26]。土壤不同干湿程度影响了土壤好氧和厌氧区域的空间大小, 田间水层的深浅控制了 CH₄ 氧化与扩散的途径, 淹水时间的长短决定了稻田土壤 Eh 的高低^[27]。在一定条件下, CH₄ 产生量和排放量随土壤有机质含量的增加而提高, 稻田 CH₄ 排放通量受土壤有机碳、易矿化有机碳、水溶性有机碳和微生物量碳的间接影响^[28]。土壤氮含量也能显著影响稻田 CH₄ 排放, 但其效应取决于土壤氮素和有机质含量, 目前尚无定论^[29]。在厌氧发酵系统中, 厌氧微生物最适宜生长繁殖的 C/N 比为 20~30 : 1^[30], 因此, 当稻田土壤 C/N 比过高, CH₄ 产生菌的生长受到有效氮的制约, 投入无机氮可提高 CH₄ 排放; 反之, CH₄ 产生菌的生长受到碳源的限制, 继续投入无机氮反而会减少 CH₄ 排放^[31]。土壤 Eh 主要受水分影响, 若土壤长期处于淹水状态, 土壤通透性变差、还原性增强, Eh 下降, CH₄ 排放增加。土壤 pH 可影响 CH₄ 产生菌的活性和土壤有机质的分解速率。当 pH 高于 8.75 或低于 5.75 时, CH₄ 产生菌的生长繁殖将受到抑制, 稻田 CH₄ 排放会急剧减少甚至不产生 CH₄ 排放^[32]。土壤质地主要影响土壤

氧气含量和有机质的分解速率, 壤质和砂质土壤的 CH₄ 排放显著低于黏质土壤^[33]。气候条件主要通过光辐射和降雨量影响土壤温度和水分, 进而影响 CH₄ 排放。气温影响土壤温度, 进而通过影响植物体氧气消耗、土壤微生物活性、有机质发酵分解速度等来影响 CH₄ 产生与传输速率^[34]。在全球气候变暖的背景下, 大气中 CO₂ 浓度升高会显著增加 CH₄ 排放, CO₂ 浓度升高和温度上升对稻田 CH₄ 排放的影响具有累加效应^[35]。最新研究发现, 在 CO₂ 浓度升高的条件下, 随着秸秆还田年限的延长, 稻田 CH₄ 排放有降低的趋势^[36]。

4 我国稻田 CH₄ 的减排途径

4.1 稻田 CH₄ 减排的主要技术途径

水稻丰产与稻田 CH₄ 减排协同的主要技术途径包括优质丰产低 CH₄ 排放品种、低 CH₄ 排放稻作技术和 CH₄ 减排产品等 (图 5)。首先是选用优质丰产低 CH₄ 排放的水稻品种。研究表明, 在土壤有机质含量高的条件下 (>2.1%), 高产水稻品种显著减少了稻田 CH₄ 排放^[36]。我国水稻主产区稻田土壤有机质含量均比较高, 属于中高产稻田, 因此, 选用高产水稻新品种, 均可实现丰产与减排的协同^[37]。收获指数高、通气组织发达的水稻品种 CH₄ 排放量较低, 可作为低 CH₄ 排放品种的筛选指标^[38]。

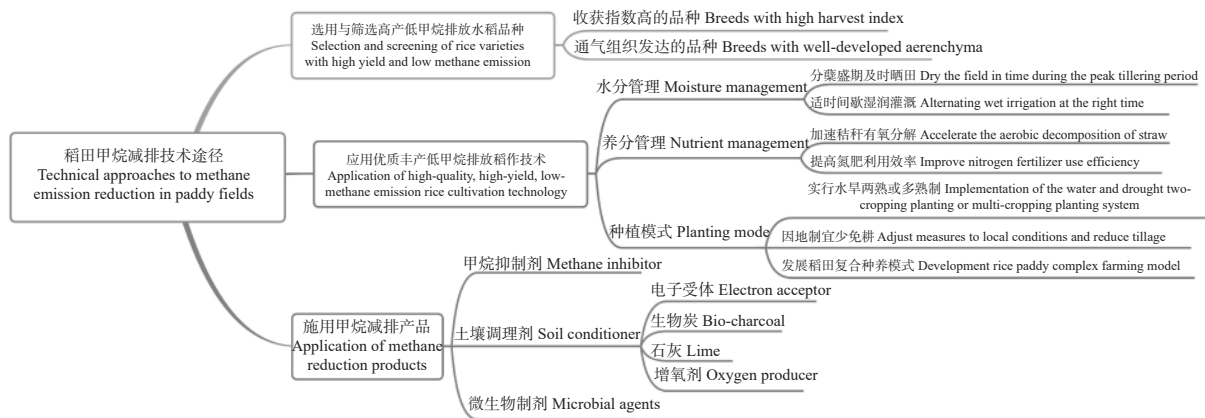


图 5 水稻丰产与稻田 CH₄ 减排协同的主要技术途径

Fig. 5 Main technical approaches for the win-win target of high rice yield and less methane emission

其次是应用优质丰产低 CH₄ 排放的稻作技术。在水分管理方面, 节水灌溉技术可明显减少 CH₄ 排放^[39], 为适应机械化收获, 前期淹水、中期烤田、后期干湿交替至水稻收获的水分管理方式已成为一项减少温室气体排放的重要农业措施^[40]。因此, 未来的控水减排需要考虑水稻生育前期, 在确保水稻丰产前提下, 实现 CH₄ 的大幅度减排。在肥料运筹上, 优

化氮肥施用量和土壤培肥技术创新可有效降低 CH₄ 排放^[41], 比如测土配方施肥或施用控释肥^[42], 以及施用腐熟有机肥、绿肥秸秆联合还田、秸秆好氧还田等^[43-44]。在种植模式上, 实行水旱两熟或多熟制种植, 并适当提高旱地作物的种植频率可实现减排增收^[45]。少免耕也有促进 CH₄ 氧化和阻碍 CH₄ 传输的双重作用^[46], 可在农业机械操作不便的地区适当采用。稻田

复合种养可通过动物的活动促进 CH_4 氧化, 有利于稳产减排^[47], 但稻渔综合种养需要控制沟坑比例, 保障水稻生产面积。

另外, 还可以施用 CH_4 减排产品。比如 CH_4 抑制剂可在不影响水稻产量的前提下, 通过减少产 CH_4 底物或抑制 CH_4 产生菌活性来减少稻田 CH_4 排放量, 如 AMI-AR2 等^[48]。土壤调理剂主要包括电子受体、生物炭、石灰和增氧剂等。电子受体主要降低了 CH_4 厌氧氧化过程中 CH_4 底物浓度, 从而减少稻田 CH_4 排放, 如硫酸铵等^[49]。生物炭可通过提高稻田土壤孔隙度和 CH_4 氧化菌的活性来减少 CH_4 的产生^[50], 不过生物炭施用过量会引起当年土壤氮素固定, 因此, 在当年需要适当提高氮肥用量或优化前期和后期氮肥施用比例。施用石灰可促进土壤有机质的分解和降低 CH_4 产生菌的丰度, 通过减少 CH_4 产生菌所需的底物和影响 CH_4 产生菌的活性, 以此减少稻田 CH_4 排放^[51]。增氧剂施入稻田后, 与水发生反应产生氧气, 从而抑制 CH_4 产生菌且增强 CH_4 氧化菌的活性, 进而减少 CH_4 排放, 如过氧化钙等^[52], 但要考虑增氧剂的经济可接受性。微生物减排制剂, 比如丛枝菌根真菌 (AMF), 能与大部分农作物形成共生关系^[53], 其产生的多糖等次级化合物可保护有机质免受微生物分解, 从而起到固碳减排效果^[54]。又比如电缆细菌 (cable bacteria), 可通过电硫氧化提高土壤硫酸盐浓度, 促进硫酸盐还原菌与 CH_4 产生菌竞争底物, 从而减少 CH_4 产生^[55], 具有较好的产品开发前景。

4.2 我国稻田 CH_4 减排的重点区域及对策

我国稻田 CH_4 排放的空间特征显示, 华东、华中和华南地区在稻田 CH_4 排放总量上明显高于西南、东北、华北和西北地区, 总体呈现东南高、西北低的趋势。因此, 华东、华中和华南地区是我国稻田 CH_4 减排的重点区域。应针对这些区域 CH_4 排放量相对较高、水稻生育期雨水充沛和温光资源充足等特点, 制定减排对策。首先, 在选用丰产低排水稻品种的基础上, 可考虑调整种植模式, 实行水旱两熟或多熟制种植, 以改善土壤理化性状, 实现稻田 CH_4 的大幅度减排。其次, 应采用秸秆和绿肥还田的“早耕湿整好氧”耕作措施, 并在水稻生育期内采用“前期湿润灌溉、中期晒田、后期干湿交替、成熟期落干晒田”的水分管理方式, 提高耕层和根际氧含量, 促进 CH_4 氧化, 减少排放。最后, 在排水不良的南方丘陵稻作区, 可增施生物炭、石灰、过氧化钙或进行稻鸭综合种养等措施, 抑制 CH_4 产生, 减少排放。

针对我国西南、东北、华北、西北地区稻田

CH_4 排放量相对较低、水稻生育期内雨水相对较少等特点, 在选用丰产低排水稻品种基础上, 采取水稻种植前测土配方施肥或施用控释氮肥等方式, 提高稻田养分利用率, 可同时避免养分浪费及 N_2O 排放升高。此外, 适当实行少耕或免耕, 可促进稻田 CH_4 氧化和阻碍稻田 CH_4 传输。有条件的地方, 可以增施硫酸铵和 CH_4 抑制剂等减排产品, 降低稻田 CH_4 产生, 促进稻田减排。

5 主要结论与建议

2001—2018 年我国水稻总播种面积和稻田 CH_4 总排放量整体呈先降低、后升高、再降低的趋势; 各区域年均单位产量 CH_4 排放量总体呈下降趋势。我国各区域水稻播种面积和稻田 CH_4 排放量总体呈东南高西北低的趋势; 单位产量 CH_4 排放量总体呈南高北低的趋势。稻田 CH_4 排放主要包括土壤 CH_4 产生、氧化与传输 3 个过程, 主要受水稻品种、土壤特性、气候条件、农艺措施等因素的影响。因此, 在保证水稻丰产前提下, 选用低排水稻品种、应用减排稻作技术、施用 CH_4 减排产品等技术是减少稻田 CH_4 排放的有效措施。

进入 2020 s, 我国稻田 CH_4 减排将面临更为严峻的挑战。在减排理论上, 要加强水稻丰产与 CH_4 减排的协调理论创新, 确保安全减排。在技术层面, 要加强丰产减排协调技术的创新与减排产品的研发, 为稻田 CH_4 减排提供技术支撑。在品种层面, 可设立专项资金, 支持高产低排水稻品种筛选和选育, 并加大高产低排水稻品种的推广与应用。在政策层面, 政府部门可联合科研院所、企业制定和完善稻田减排固碳相关行业标准与技术规程, 完善监测与评估方法与体系^[56], 并创新激励措施和设立专项, 推动稻田 CH_4 减排行动。

参考文献 References

- [1] Change Intergovernmental Panel on Climate. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [2] WANG Z, ZHANG X Y, LIU L, et al. Estimates of methane emissions from Chinese rice fields using the DNDC model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108368
- [3] ZHANG W J, ZHENG C Y, SONG Z W, et al. Farming systems in China: Innovations for sustainable crop production[M]// SADRAS V O, CALDERINI D F. *Crop Physiology*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 43–64
- [4] FAO. FAOSTAT Rice Cultivation[DB/OL]. FAO. 2019.

- <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/GR>
- [5] FAO. FAOSTAT Emission Shares[DB/OL]. FAO. 2019. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/EM>
- [6] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 等. 中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 200–208
ZHANG X Z, WANG J Y, ZHANG T L, et al. Evaluation of methane emissions and low-carbon measures in China's agricultural system[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(3): 200–208
- [7] 任万辉, 许黎, 王振会. 中国稻田甲烷产生和排放研究 I. 产生和排放机理及其影响因子[J]. 气象, 2004, 30(6): 3–7
REN W H, XU L, WANG Z H. A review on study of methane emission from rice field in China I. Mechanism and affecting factors[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(6): 3–7
- [8] 刘珂纯, 王旭东, 赵鑫, 等. 稻田甲烷主要减排措施的技术效应与影响因素研究[J/OL]. 吉林农业大学学报. [2021-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210826.0854.002.html>
LIU K C, WANG X D, ZHAO X, et al. Study on the technical effects and influencing factors of the main methane abatement measures in rice fields[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University, (2021-08-26) [2021-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210826.0854.002.html>
- [9] KANG H, LEE J, ZHOU X, et al. The effects of N enrichment on microbial cycling of non-CO₂ greenhouse gases in soils — a review and a meta-analysis[J]. Microbial Ecology, 2021: 1–13
- [10] 张俊, 邓艾兴, 尚子吟, 等. 秸秆还田下水稻丰产与甲烷减排的技术模式[J]. 作物杂志, 2021(6): 230–235
ZHANG J, DENG A X, SHANG Z Y, et al. Innovative rice cropping for higher yield and less CH₄ emission under crop straw incorporation[J]. Crops, 2021(6): 230–235
- [11] BHARALI A, BARUAH K K, GOGOI N. Potential option for mitigating methane emission from tropical paddy rice through selection of suitable rice varieties[J]. Crop and Pasture Science, 2017, 68(5): 421
- [12] LI L B, LI F S, DONG Y F. Greenhouse gas emissions and global warming potential in double-cropping rice fields as influenced by two water-saving irrigation modes in South China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(4): 2617–2630
- [13] SHANG Q Y, CHENG C, WANG J J, et al. Net global warming potential, greenhouse gas intensity and carbon footprint as affected by different tillage systems from Chinese double-cropping paddy fields[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104947
- [14] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[EB/OL]. 北京: 国家发展和改革委员会应对气候变化司, 2011 [2021-12-11]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>
Department of Climate Change, National Development and Reform Commission. Guidelines for the Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories (for Trial Implementation)[EB/OL]. Beijing: Department of Climate Change, National Development and Reform Commission, 2011 [2021-12-11]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>
- [15] 葛会敏, 陈璐, 于一帆, 等. 稻田甲烷排放与减排的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 160–166
GE H M, CHEN L, YU Y F, et al. Advances in methane emission and emission reduction in rice field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 160–166
- [16] 张广斌, 马静, 徐华, 等. 稻田甲烷产生途径研究进展[J]. 土壤, 2011, 43(1): 6–11
ZHANG G B, MA J, XU H, et al. Advances on methanogenic pathways in rice fields[J]. Soils, 2011, 43(1): 6–11
- [17] 翟俊, 马宏璞, 陈忠礼, 等. 湿地甲烷厌氧氧化的重要性和机制综述[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3506–3514
ZHAI J, MA H P, CHEN Z L, et al. Review on the importance and mechanisms of anaerobic oxidation of methane in wetlands[J]. China Environmental Science, 2017, 37(9): 3506–3514
- [18] 颜晓元, 蔡祖聪. 水稻土中CH₄氧化的研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 589–594
YAN X Y, CAI Z C. Methane oxidation in paddy soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(6): 589–594
- [19] 黄剑冰. 铁肥和水稻品种对稻田甲烷排放的影响[D]. 海口: 海南大学, 2016
HUANG J B. Effects of iron fertilizer and rice varieties on methane emissions from rice fields[D]. Haikou: Hainan University, 2016
- [20] 张晓艳, 马静, 李小平, 等. 稻田甲烷传输的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(2): 181–187
ZHANG X Y, MA J, LI X P, et al. Reviews on methane transport in rice paddy field[J]. Soils, 2012, 44(2): 181–187
- [21] 江瑜, 管大海, 张卫建. 水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机制的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 175–181
JIANG Y, GUAN D H, ZHANG W J. The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: a review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 175–181
- [22] JIANG Y, QIAN H Y, WANG L, et al. Limited potential of harvest index improvement to reduce methane emissions from rice paddies[J]. Global Change Biology, 2019, 25(2): 686–698
- [23] 宿敏敏, 况福虹, 吕阳, 等. 不同轮作体系不同施氮量甲烷排放比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 913–920
SU M M, KUANG F H, LYU Y, et al. Impact of N fertilization on CH₄ emission from paddy field under different rotation systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(4): 913–920
- [24] 成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1887–1895
CHENG C, ZENG Y J, YANG X X, et al. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1887–1895
- [25] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1781–1788

- LI H F, XIA H P, XIONG Y M, et al. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: a review[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1781–1788
- [26] 颜晓元, 蔡祖聪. 淹水土壤中甲烷产生的影响因素研究进展[J]. *环境科学进展*, 1996(2): 24–32
- YAN X Y, CAI Z C. Advance in study of factors influencing methane production and emission in wetland soils[J]. *Advances in Environmental Science*, 1996(2): 24–32
- [27] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 269–273
- DONG H M, LI Y E, TAO X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269–273
- [28] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(10): 1672–1679
- DING W X, CAI Z C. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1672–1679
- [29] 马晨蕾, 裴自伟, 李伏生. 灌溉方式及施氮对双季稻田甲烷排放及有机碳组分的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(5): 41–49
- MA C L, PEI Z W, LI F S. Effects of irrigation method and nitrogen application on methane emission and organic carbon fraction in double-cropping rice field[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(5): 41–49
- [30] 杨茜, 鞠美庭, 李维尊. 秸秆厌氧消化产甲烷的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 232–242
- YANG Q, JU M T, LI W Z. Review of methane production from straws anaerobic digestion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 232–242
- [31] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田 CH_4 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(14): 2484–2499
- LIU S W, YIN M, CHU G, et al. Effects of various paddy-upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on CH_4 emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(14): 2484–2499
- [32] 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 等. 双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 904–914
- XIAO Z X, FU Z Q, XU H Q, et al. Differences and relationship between rhizosphere characteristics and methane emissions of double-cropping rice variety[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 904–914
- [33] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 等. 土壤质地、温度和Eh对稻田甲烷排放的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35(2): 145–154
- CAI Z C, SHEN G Y, YAN X Y, et al. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emissions from rice paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 145–154
- [34] 葛瑞娟, 宋长春, 王丽丽. 湿地甲烷生物化学过程及影响因素的研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 229–235
- GE R J, SONG C C, WANG L L. Review on biochemical processes of methane and its impacting factors in wetlands[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 229–235
- [35] WANG C, JIN Y G, JI C, et al. An additive effect of elevated atmospheric CO_2 and rising temperature on methane emissions related to methanogenic community in rice paddies[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 257: 165–174
- [36] QIAN H Y, HUANG S, CHEN J, et al. Lower-than-expected CH_4 emissions from rice paddies with rising CO_2 concentrations[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2368–2376
- [37] 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
- [38] 张卫建, 张艺, 邓艾兴, 等. 我国水稻品种更新与稻作技术改进对碳排放的综合影响及趋势分析[J]. *中国稻米*, 2021, 27(4): 53–57
- ZHANG W J, ZHANG Y, DENG A X, et al. Integrated impacts and trend analysis of rice cultivar renewal and planting technology improvement on carbon emission in China[J]. *China Rice*, 2021, 27(4): 53–57
- [39] FENG J F, CHEN C Q, ZHANG Y, et al. Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 220–228
- [40] 李香兰, 徐华, 李小平, 等. 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 221–227
- LI X L, XU H, LI X P, et al. Water regime management affects methane emission from rice paddy field: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 221–227
- [41] CHEN Z D, CHEN F, ZHANG H L, et al. Effects of nitrogen application rates on net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in double-rice cropping systems of the southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(24): 24781–24795
- [42] 张卫建, 陈长青, 江瑜, 等. 气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 805–811
- ZHANG W J, CHEN C Q, JIANG Y, et al. Comprehensive influence of climate warming on rice production and countermeasure for food security in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 805–811
- [43] RAHEEM A, ZHANG J, HUANG J, et al. Greenhouse gas emissions from a rice-rice-green manure cropping system in South China[J]. *Geoderma*, 2019, 353: 331–339
- [44] DENG A X, CHEN C Q, FENG J F, et al. Cropping system innovation for coping with climatic warming in China[J]. *The Crop Journal*, 2017, 5(2): 136–150
- [45] JIANG Y, CARRIJO D, HUANG S, et al. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2019, 234: 47–54
- [46] CHEN Z D, DIKGWATLHE S B, XUE J F, et al. Tillage impacts on net carbon flux in paddy soil of the southern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 70–76
- [47] 温婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 排放规律及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7): 1442–1450
- WEN T, ZHAO B L, ZHANG J E. Emission pathways and influencing factors for CH_4 and N_2O from rice-duck farming[J].

- Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1442–1450
- [48] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放消长关系及其减排措施[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2123–2130
LI X L, XU H, CAI Z C. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2123–2130
- [49] 刘俊霞, 陈槐, 薛丹, 等. 微生物介导的甲烷厌氧氧化过程及其影响因子研究进展[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 1033–1044
LIU J X, CHEN H, XUE D, et al. Advances in microbial mediated anaerobic oxidation of methane and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3): 1033–1044
- [50] 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 等. 椰糠生物炭对热区双季稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3931–3942
WANG Z J, WANG H H, LI J Q, et al. Effects of coconut chaff biochar amendment on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3931–3942
- [51] JIANG Y, LIAO P, VAN GESTEL N, et al. Lime application lowers the global warming potential of a double rice cropping system[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 1–8
- [52] 袁颖红, 李丽, 芮绍云, 等. 生物质炭及过氧化钙对旱地红壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 642–650
YUAN Y H, LI L, RUI S Y, et al. Effects of biochar and calcium peroxide on the emissions of CH_4 , CO_2 and N_2O in upland red soil[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 642–650
- [53] 刘云龙, 钱浩宇, 张鑫, 等. 丛枝菌根真菌对豆科作物生长和生物固氮及磷素吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1761–1767
LIU Y L, QIAN H Y, ZHANG X, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth, N bio-fixation, and phosphorus uptake of legume crop[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1761–1767
- [54] QIU Y P, GUO L J, XU X Y, et al. Warming and elevated ozone induce tradeoffs between fine roots and mycorrhizal fungi and stimulate organic carbon decomposition[J]. *Science Advances*, 2021, 7(28): eabe9256
- [55] SCHOLZ V V, MECKENSTOCK R U, NIELSEN L P, et al. Cable bacteria reduce methane emissions from rice-vegetated soils[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1878
- [56] 张卫建, 严圣吉, 张俊, 等. 国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(18): 3892–3902
ZHANG W J, YAN S J, ZHANG J, et al. Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(18): 3892–3902