

Greenhouse Gas Emissions from Paddy Field Ecosystems in China and Corresponding Mitigation Strategies

Yongcai Lai^{1*}, Wenjun Dong^{1,2,3#}, Ying Meng¹, Jun Zhang⁴, Ao Tang¹, Xijuan Zhang¹, Chunxu Leng¹, Youhong Liu¹, Lianmin Wang¹, Lizhi Wang¹, Shufeng Di¹, Zhongliang Yang⁵, Lei Chen⁶

¹Institute of Farming and Cultivation, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin Heilongjiang

²Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences Postdoctoral Programme, Harbin Heilongjiang

³Northern Japonica Rice Molecular Breeding Joint Research Center, Chinese Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang

⁴Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing

⁵Rice Institute of Wuchang, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Wuchang Heilongjiang

⁶Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin Heilongjiang

Email: yame0451@163.com, #dongwenjun0911@163.com

Received: Apr. 8th, 2017; accepted: Apr. 24th, 2017; published: Apr. 27th, 2017

Abstract

In recent years, the issue of increase in greenhouse gas emissions and greenhouse effect induced by them has already aroused people's great attention. Reducing greenhouse gas emission has become an urgent problem, which should be solved as soon as possible. CH₄ and N₂O are two major greenhouse gases, which play very significant role in global warming. Paddy field ecosystem is the important greenhouse gases (CH₄ and N₂O) emission sources. For the purpose of providing technological support for the sustainable development of low carbon agriculture, and making a positive contribution in reducing China's greenhouse gas emission and relieving global warming, several controlling methods for reducing greenhouse gas emissions in Chinese paddy field ecosystem were elaborated from the following aspects: varieties selection, irrigation, fertilizer application, cropping system, straw amendments and straw complex utilization.

Keywords

Paddy Field, Greenhouse Gases, Climate Change, Methane, Nitrous Oxide, Mitigation Strategies

我国稻田系统温室气体排放及减排对策分析

来永才^{1*}, 董文军^{1,2,3#}, 孟英¹, 张俊⁴, 唐傲¹, 张喜娟¹, 冷春旭¹, 刘猷红¹, 王连敏¹, 王立志¹, 邸树峰¹, 杨忠良⁵, 陈磊⁶

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 来永才, 董文军, 孟英, 张俊, 唐傲, 张喜娟, 冷春旭, 刘猷红, 王连敏, 王立志, 邸树峰, 杨忠良, 陈磊. 我国稻田系统温室气体排放及减排对策分析[J]. 气候变化研究快报, 2017, 6(2): 88-95.

<https://doi.org/10.12677/ccrl.2017.62012>

¹黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所, 黑龙江 哈尔滨

²黑龙江省农业科学院博士后科研工作站, 黑龙江 哈尔滨

³中国科学院北方粳稻分子育种联合研究中心, 黑龙江 哈尔滨

⁴中国农业科学院作物科学研究所, 北京

⁵黑龙江省农业科学院五常水稻研究所, 黑龙江 五常

⁶黑龙江省农业科学院, 黑龙江 哈尔滨

Email: yame0451@163.com, #dongwenjun0911@163.com

收稿日期: 2017年4月8日; 录用日期: 2017年4月24日; 发布日期: 2017年4月27日

摘要

近年来温室气体排放增加引起的全球气候变暖备受人们的广泛关注, 减缓温室气体排放势在必行。 CH_4 和 N_2O 是大气中两种重要的温室气体, 在全球变暖中具有非常重要的作用。稻田系统是重要的温室气体排放源, 本文从品种选择、水分管理、肥料施用、耕作制度以及秸秆还田和综合利用等几个方面总结了可以减缓我国稻田温室气体排放的一些措施, 为我国低碳农业的可持续发展提供一定的技术支持, 为我国温室气体减排和缓解全球气候变暖作出积极的贡献。

关键词

稻田, 温室气体, 气候变化, 甲烷, 氧化亚氮, 减排对策

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化与人类社会的生产、消费和生活息息相关, 全球气候正经历着一次以变暖为主要特征的显著变化。IPCC 第五次评估报告[1]显示, 到本世纪末, 全球平均表面温度和过去 20 年相比可能上升 $0.3^\circ\text{C}\sim 4.8^\circ\text{C}$ 。全球变暖已是不争的事实, 也是威胁人类生存的重大环境问题。普遍认为, 全球变暖主要是由于人为温室气体排放增加所致。2016 年 11 月正式生效的《巴黎协定》指出, 气候变化对人类社会和地球构成紧迫的可能无法逆转的威胁, 这就要求所有国家尽可能开展最广泛的合作, 参与有效和适当的国际应对行动, 以期更快地减少全球温室气体排放量。

甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是大气中两种重要的温室气体, 其浓度的不断升高加剧了全球温室效应。自工业革命(1750 年)以来, 全球大气中 CH_4 和 N_2O 浓度明显增加, 其浓度已由工业革命前的约 715 ppb 和 270 ppb 分别增至 2011 年的 1803 ppb 和 324.2 ppb。 CH_4 是仅次于 CO_2 的一种温室气体, 它的全球增温潜势(GWP: Global Warming Potential)相当于 CO_2 的 25 倍。虽然 N_2O 是大气中一种含量更低的痕量温室气体, 但它在大气中滞留的时间较长, 并具有更大的全球增温潜势, 相当于 CO_2 的 298 倍[2]。由此可见, 采取各种有效的措施来减少 CH_4 和 N_2O 的排放对于减缓温室效应迫在眉睫。

稻田系统是重要的温室气体排放源。我国是世界上重要的水稻生产大国, 水稻种植面积达 3000 万 hm^2 , 占世界稻田面积的 27%, 占我国粮食作物耕地面积的 34% [3], 因此, 稻田系统温室气体减排潜力

巨大。为此，在掌握我国稻田系统温室气体排放概况的基础上，探索我国稻田系统温室气体排放的减排对策，为我国发展低碳、可持续发展的农业提供技术保障，为我国稻田节能减排的综合调控和国际谈判提供科学依据和技术支撑。

2. 我国稻田系统温室气体排放概况

据 2007 年 IPCC 第 4 次评估报告显示[2]，稻田 CH₄ 的年排放量为 31~112 Tg，占全球总排放量的 5%~19%。另有报道[4] [5]统计，稻田 CH₄ 排放约占全球每年总排放量的 20%或 17%左右。通过对文献资料和大量研究结果分析得出[6]，中国农业源温室气体占全国温室气体排放总量的 17%。根据 2004 年中国政府向联合国提交的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》[7]显示，1994 年我国稻田 CH₄ 排放量为 6.147 Tg，占到农业活动 CH₄ 排放总量的 35.75%。Zou 等[8]研究发现，在 20 世纪 90 年代，我国稻田 CH₄ 的年排放量为 6~10 Tg。通过模型与 GIS 技术相结合[9]表明，我国大陆 2000 年水稻生长季的稻田 CH₄ 排放量为 6.02 Tg。

稻田 N₂O 主要通过土壤和肥料中微生物的硝化和反硝化作用产生，大气中 N₂O 有 90%来源于这两个过程[10]。据统计[11] [12]，2012 年我国稻田排放的 N₂O 占我国农田总排放的 7%~11%。Gao 等[13]通过模型预测，我国稻田 N₂O 每年排放约为 35.7 Gg，氮肥的施用对 N₂O 的排放具有促进作用，在我国随着氮肥的大量投入，N₂O 的排放也呈明显的增加趋势[14]。

3. 减缓我国稻田系统温室气体排放的对策

3.1. 品种选择

不同类型的水稻品种在相同的土壤和栽培管理水平下，稻田温室气体排放也存在很大的差异。王丽丽等[15]研究发现，由于超级稻宁粳 1 号有强大的根系，CH₄ 排放总量比常规稻镇稻 11 低 35.22%。对不同类型超级稻品种的研究显示[16]，籼型超级稻的平均 CH₄ 排放总量比粳型超级稻低 37.6%，籼型超级稻 CH₄ 排放量低主要是由于其根系生物量显著高于粳型超级稻。可见，水稻庞大的根系具有较强的氧化能力，泌氧能力强，使得根际氧化还原电位上升，抑制了 CH₄ 的产生；与此同时，CH₄ 氧化菌活力增强，促进 CH₄ 的氧化，则 CH₄ 的排放量降低[17]。综合比较植株产量形成和 CH₄ 排放强度，发现 CH₄ 排放总量与总生物量、籽粒产量和收获指数等呈显著负相关或相关不显著[16]，且选用根系活力强、产量潜力大的品种，能有效降低稻田系统 CH₄ 的排放[17]。对三江平原 3 个主栽品种的温室气体排放研究发现[18]，垦鉴稻 6 产生的温室效应较空育 131 和龙粳 18 分别下降 14.0%和 17.7%。可见，品种间温室气体排放差异明显。此外，选用氮高效利用的水稻品种，可适当的减少氮肥用量，防止氮素流失，减少氮肥在稻田土壤中的存留时间，降低水稻生长过程中 N₂O 产生的排放[3]。

3.2. 水分管理

水分是影响稻田系统 CH₄ 和 N₂O 产生、氧化和排放的最为重要的影响因素之一。长期淹水和间歇灌溉是我国水稻种植的两种较为普遍的水分管理方式。长期淹水条件下，由于是处于极端还原状态，厌氧性产 CH₄ 菌作用于产 CH₄ 基质而产生 CH₄ 气体。前人研究表明[19]，厌氧条件下产生的 CH₄ 有 58%~80% 被水—土界面和根—土界面的 CH₄ 氧化细菌所氧化而释放到大气中。已有研究表明[20] [21] [22]，与长期淹水相比，间歇灌溉能大幅度降低稻田 CH₄ 排放量，而增加 N₂O 的排放量。彭世彰等[23]研究发现，控制灌溉稻田 CH₄ 和 N₂O 的综合全球增温潜势较常规灌溉稻田显著减少，减少幅度为 15.0%~34.8%。此外，在水稻生长季，通过采取一次或多次的排水烤田措施可有效减少 CH₄ 排放[24]。还有研究显示，如果水稻生育时期烤田至少一次，则全球每年可减少 4.1×10^9 t 的 CH₄ 排放，但增加了 N₂O 的排放[25] [26]。通

过盆栽试验对烤田结束后复水期 CH_4 和 N_2O 的排放研究发现[27], 间隙灌溉条件下, N_2O 排放主要集中在烤田期及随后的复水期, CH_4 排放峰值出现在烤田开始后的第 3 d 并在烤田结束前降为零。另有研究表明[28], 水稻生长期 N_2O 的排放集中在施分蘖肥后的烤田期间及随后复水的 5~8 天之内, 长期淹水 N_2O 的排放通量是正常烤田的 12.1%, 随着烤田开始时间的推迟, N_2O 排放量逐渐降低。最新的模拟研究表明[29], 稻田落干开始后 4h N_2O 释放量就明显增加, 在 24 h 时 N_2O 的释放量比淹水条件增加了 5 倍多。因此, 稻田系统水分管理对减少 N_2O 和 CH_4 的排放具有相反的作用, 一种气体排放降低而另一种气体排放则增加, 需要提出适宜的水分管理制度, 对两种温室气体排放的综合效应进行协调。

3.3. 肥料施用

肥料对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响程度与施用肥料的种类、施用量等有关。其中有机肥的种类也很多, 主要包括农作物秸秆、堆肥、绿肥、厩肥和沼渣肥等, 对稻田 CH_4 的排放影响存在抑制或促进作用。邹建文等[30]研究指出, 不同有机肥处理的全球增温潜势表现为菜饼 > 秸秆 > 牛厩肥 > 化肥 > 猪厩肥。大量研究表明[31] [32], 增施有机肥能明显促进稻田 CH_4 的排放。盆栽试验显示[33], 施用小麦秸秆大大促进了 CH_4 的排放, 其增幅在 2.0~8.3 倍。最新研究表明[34], 在双季稻田用猪粪替代 50% 的化学氮肥处理 CH_4 排放较化学氮肥处理提高 33.85%~54.83%。但是另有研究表明, 经过干燥处理的沼渣肥能够降低 CH_4 排放约 50%, 而未经处理的沼渣肥向土壤中带入了产甲烷菌而增加 CH_4 排放量[35]。与施用新鲜有机肥相比, 施用好氧条件下腐熟的堆肥能有效控制 CH_4 排放[36] [37] [38]。可见, 有机肥对 CH_4 排放的影响十分复杂, 不同类型有机肥对 CH_4 排放量的影响程度还有待进一步研究。施用有机肥对稻田 N_2O 排放的影响也较为复杂, 尚无明确定论。如有研究表明[39] [40], 施用有机肥可降低 N_2O 的排放通量。然而另有研究发现[34], 在氮肥施用相同的情况下, 增施有机肥(猪粪)能提高 N_2O 的排放量。

由于我国稻田氮肥的利用率较低, 约为 30% 左右, 为了获得更高的产量, 盲目增加氮肥的用量, 由此带来了一系列的环境问题。氮肥施用是增加稻田 N_2O 排放的主要因素。统计分析表明[41], 由于施用氮肥所排放的 N_2O 占土壤总 N_2O 排放量的 25%~82%。稻田系统中, 通过施用尿素或硫酸铵, N_2O 的排放量均随施氮量的增加而增加[42] [43], 因此有效地控制氮源可减少稻田土壤 N_2O 的排放[44]。研究还发现, 施用包膜型控释肥比未包膜复合肥能极显著地降低稻田 N_2O 的排放量[45]。另外, 稻田 CH_4 的排放量随氮肥的施用量有的增加[46]有的降低[47], 结果不太一致。比如石英尧等的研究表明, 随着氮肥用量的增加稻田 CH_4 排放量增加[48], 而另有研究则发现相反的结果[49]。张鲜鲜等[50]对上海崇明岛稻田研究发现, 适当降低氮肥用量可显著降低稻田温室气体排放。中国稻田施纯氮量一般在 120~300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 氮肥用量对 CH_4 排放减少的作用不可低估[43]。综上所述, 施肥对稻田系统土壤中 CH_4 和 N_2O 的排放有很大的影响, CH_4 的排放受有机肥的促进作用较大, 而 N_2O 的排放受氮肥的促进作用较大, 但是不同氮肥和有机肥对 CH_4 和 N_2O 的排放以及综合效应还有待于进一步研究。

3.4. 耕作制度

不同的耕作制度对稻田系统温室气体排放具有显著的影响。已有学者[51] [52]研究表明, 广州地区早稻和晚稻采用水旱轮作能有效减少稻田 CH_4 排放。江长胜等[53]研究显示, 在川中丘陵区冬灌田采用水旱轮作制后, 冬灌田 CH_4 排放量大大降低而 N_2O 排放量显著增大, 最终大大减少排放 CH_4 和 N_2O 所产生的综合全球增温潜势。另有研究发现[54]就不同耕作方式对紫色稻田系统 CH_4 和 N_2O 所产生的综合增温潜势表现为平作 > 垄作免耕 > 厢作免耕 > 水旱轮作。最新的研究表明[55], 免耕高茬还田模式能显著减缓双季稻田温室气体排放强度。另有研究显示[56], 稻麦旋耕的处理 CH_4 、 N_2O 和 C_2O 的排放量显著低于麦季和稻季均免耕的处理。马二登等[57]研究表明, 在抛秧方式下, 浅旋耕稻田 CH_4 排放量较深

翻耕减少 31.3%。可见, 采用科学合理的耕作制度能减少稻田排放 CH_4 和 N_2O 产生的综合全球增温潜势 [58]。

3.5. 其他措施

最新研究表明[59], 秸秆还田下配施硝化抑制剂双氰胺 DCD 在保证水稻产量的基础上, 显著降低稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放, 是一种经济可行的温室气体减排措施。侯晓莉等[60]发现, 田间原位焚烧秸秆与直接还田相比, 能大幅减少 CH_4 排放, 小幅减少 N_2O 排放, 但降低了土壤性质, 同时排放大量污染性气体。可见, 秸秆被大量焚烧, 虽能减少温室气体排放, 但浪费资源, 污染环境[61], 今后需要加强稻田温室气体减排的秸秆还田技术以及秸秆资源综合利用研究[62]。

前人大量研究[63] [64] [65]证实, 添加生物质炭可抑制水稻土 N_2O 的排放。在江苏太湖地区的水稻田中, 生物质炭与氮肥配施和单施生物质炭处理的 N_2O 排放分别降低了 40%~51% 和 21%~28% [64]。在水稻-小麦轮作体系中, 添加由小麦秸秆制成的生物质炭, 水稻季 N_2O 排放也降低 39.5%~45.1% [66]。此外, 生物质炭添加还可通过提高 N 肥利用率, 减少 N 肥损失[64], 从而减少 N_2O 的排放[67]。而 Shen 等 [68]的研究表明, 在湖南典型的双季稻田中添加小麦秸秆制成的生物质炭, 添加的当季 CH_4 排放降低, 但效果并不显著, 而在后续的水稻季及休闲季中, 生物质炭显著降低了 CH_4 排放[69], 主要是由于添加生物质炭增加了土壤孔隙度, 改善了土壤通气状况[63], 抑制了产甲烷菌的活性[70], 而为甲烷氧化菌的生长提供了良好的环境[71]。Liu 等[72]在稻田淹水条件下, 分别添加竹炭和稻秆炭后发现均能明显抑制 CH_4 的排放, 且秸秆炭对淹水稻田土壤 CH_4 排放的抑制作用要明显优于竹炭[73], 可能是由于秸秆炭的碳含量低于竹炭, 分解矿化产生的 CH_4 较竹炭少[74]。

此外, 不同的栽培方式对稻田系统温室气体排放具有明显的影响。马二登等[57]研究表明, 与水稻移栽相比, 水稻直播能够显著降低水稻生育前期 CH_4 排放, 具有一定的 CH_4 减排潜力。臧英等[75]研究显示, 开沟起垄穴直播技术可以有效降低水稻分蘖前期 CH_4 的排放, 可见, 水稻直播技术是减少稻田 CH_4 排放的有效措施。

4. 小结

全球气候变化日益引起人们的重视, 目前已成为各国关注的重大环境问题。《巴黎协定》要求所有国家尽可能开展最广泛的合作, 更快地减少全球温室气体排放量。《中美气候变化联合声明》中强调, 中国计划 2030 年左右 CO_2 排放达到峰值且将努力早日达峰, 并计划到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20%左右。《中国应对气候变化的政策与行动 2016 年度报告》中明确指出, 农业部推动实施“到 2020 年化肥使用量零增长行动”, 提高秸秆综合利用水平, 实施保护性耕作等, 减少农业温室气体排放。由此可见, 应对全球气候变化这一重大环境问题既是世界的需要, 也是我国未来发展低碳、绿色和环保型国家的需要, 为此, 我国要加大农业减排的力度, 尤其要加强稻田系统温室气体减排。在了解目前我国稻田温室气体排放状况的基础上, 重点对我国稻田温室气体的减排对策进行了阐述, 主要从品种选择、水分管理、肥料施用、耕作制度以及秸秆还田和综合利用等方面展开。由于我国稻田类型较多, 包括单季稻田、双季稻田和水旱轮作田等, 南方和北方气候、土壤和耕作制度等条件的不同, 为此, 针对我国不同的稻作区, 研究相应的减排对策, 对于缓解我国温室气体排放以及引起的气候变暖等环境问题, 具有非常重要的意义。

基金项目

国家科技支撑计划项目(2015BAC02B02); 国家自然科学基金(31501263); 公益性行业(农业)科研专项(201303102); 中国博士后科学基金项目(2012M511005); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300900);

黑龙江省应用技术与开发计划国家项目省级资助项目(GX16B002); 黑龙江省农业科学院引进博士人员科研启动金项目(201507-14); 黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA15B101)。

参考文献 (References)

- [1] IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- [2] IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- [3] 董文军, 来永才, 孟英, 等. 稻田生态系统温室气体排放影响因素的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2015(5): 145-148.
- [4] Wuebbles, D.J. and Hayhoe, K. (2002) Atmospheric Methane and Global Change. *Earth-Science Reviews*, **57**, 177-210.
- [5] Cai, Z.C., Kang, G.D., Tsuruta, H., *et al.* (2005) Estimate of CH₄ Emission from Year-Round Flooded Rice Fields during Rice Growing Season In China. *Pedosphere*, **15**, 66-71.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 15-20.
- [8] Zou, J., Huang, Y., Qin, Y., *et al.* (2009) Changes in Fertilizer-Induced Direct N₂O Emissions from Paddy Fields during Rice-Growing Season in China between 1950s and 1990s. *Global Change Biology*, **15**, 229-242. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01775.x>
- [9] 黄耀, 张稳, 郑循华, 等. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 980-988.
- [10] 廖松婷, 王忠波, 张忠学, 等. 稻田温室气体排放研究综述[J]. 农机化研究, 2014(10): 6-11.
- [11] Wang, M. and Li, J. (2002) CH₄ Emission and Oxidation in Chinese Rice Paddies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **64**, 43-55.
- [12] Zou, J., Huang, Y., Zheng, X., *et al.* (2007) Quantifying Direct N₂O Emissions in Paddy Fields during Rice Growing Season in Mainland China: Dependence on Water Regime. *Atmospheric Environment*, **41**, 8030-8042.
- [13] Gao, B., Ju, X.T., Zhang, Q., *et al.* (2011) New Estimates of Direct N₂O Emissions from Chinese Croplands from 1980 to 2007 Using Localized Emission Factors. *Biogeosciences*, **8**, 3011-3024. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3011-2011>
- [14] 章永松, 柴如山, 付丽丽, 等. 中国主要农业源温室气体排放及减排对策[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(1): 97-107.
- [15] 王丽丽, 闫晓君, 江瑜, 等. 超级稻宁粳 1 号与常规粳稻 CH₄ 排放特征的比较分析[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(4): 413-418.
- [16] 闫晓君, 王丽丽, 江瑜, 等. 长江三角洲主要超级稻 CH₄ 排放特征及其与植株生长特性的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2518-2524.
- [17] 曹云英, 朱庆森, 郎有忠, 等. 水稻品种及栽培措施对稻田甲烷排放的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(3): 22-27.
- [18] 牟长城, 陶祥云, 黄忠文, 等. 水稻品种对三江平原稻田温室气体排放的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(11): 89-92.
- [19] Dannenberg, S. and Conrad, R. (1999) Effect of Rice Plants on Methane Production and Rhizospheric Metabolism in Paddy Soil. *Biogeochemistry*, **45**, 53-71. <https://doi.org/10.1007/BF00992873>
- [20] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294-298.
- [21] 袁伟玲, 曹湊贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294-4300.
- [22] 耿春伟, 付志强. 稻田水肥组合模式的 CH₄ 和 N₂O 排放特征及其差异比较[J]. 作物研究, 2012, 26(7): 9-13.
- [23] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.
- [24] 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔, 等. 农田固碳措施对温室气体减排影响的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 43-48.

- [25] Towprayoon, S., Smakgahn, K. and Poonkaew, S. (2005) Mitigation of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Drained Irrigated Rice Fields. *Chemosphere*, **59**, 1547-1556.
- [26] Yan, X.Y., Akiyama, H. and Yagi, K. (2009) Global Estimations of the Inventory and Mitigation Potential of Methane Emissions from Rice Cultivation Conducted Using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, **23**, GB2002. <https://doi.org/10.1029/2008GB003299>
- [27] 李香兰, 马静, 徐华, 等. 水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 535-541.
- [28] 李香兰, 徐华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 703-707.
- [29] 卢静, 刘金波, 盛荣, 等. 短期落干对水稻土反硝化微生物丰度和 N_2O 释放的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2879-2884.
- [30] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
- [31] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552-556.
- [32] 肖小平, 伍芬琳, 黄风球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 629-632.
- [33] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 有机肥施用、土壤有效铜和氮素对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 565-569.
- [34] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3120-3127.
- [35] 沈仕洲, 王凤, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 1-8.
- [36] Yagi, K., Tsuruta, H. and Minami, K. (1997) Possible Options for Mitigating Methane Emission from Rice Cultivation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **49**, 213-220. <https://doi.org/10.1023/A:1009743909716>
- [37] Wassmann, R., Neue, H.U., Ladha, J.K., et al. (2004) Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Rice-Wheat Cropping Systems in Asia. *Environment Development and Sustainability*, **6**, 65-90. <https://doi.org/10.1023/B:ENVI.0000003630.54494.a7>
- [38] Minamikawa, K., Sakai, N. and Yagi, K. (2006) Methane Emission from Paddy Fields and Its Mitigation Options on a Field Scale. *Microbes and Environments*, **21**, 135-147. <https://doi.org/10.1264/jsme2.21.135>
- [39] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(4): 273-276.
- [40] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 707-720.
- [41] Eicherm, J. (1990) Nitrous Oxide Emissions from Fertilized Soils: Summary of Available Data. *Journal of Environmental Quality*, **19**, 272-280. <https://doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900020013x>
- [42] Xu, H., Xing, G., Cai, Z.C., et al. (1997) Nitrous Oxide Emissions from Three Rice Paddy Fields in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **49**, 23-28. <https://doi.org/10.1023/A:1009779514395>
- [43] 朱小红, 马友华, 杨书运, 等. 施肥对农田温室气体排放的影响研究[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(5): 42-46.
- [44] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2094-2098.
- [45] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 2170-2174.
- [46] Banik, A., Sen, M. and Sen, S.P. (1996) Effects of Inorganic Fertilizers and Micronutrients on Methane Production from Wetland Rice (*Oryza sativa* L.). *Biology and Fertility of Soils*, **21**, 319-322. <https://doi.org/10.1007/BF00334910>
- [47] Zou, J.W., Huang, Y., Jiang, J.Y., et al. (2005) 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. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB2021. <https://doi.org/10.1029/2004GB002401>
- [48] 石英尧, 石扬娟, 申广勒, 等. 氮肥施用量和节水灌溉对稻田甲烷排放量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(2): 471-472.
- [49] Cai, Z.C., Xing, G.X., Yan, X.Y., et al. (1997) Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice Paddy Fields as Affected by Nitrogen Fertilizers and Water Management. *Plant and Soil*, **196**, 7-14. <https://doi.org/10.1023/A:1004263405020>
- [50] 张鲜鲜, 殷杉, 朱鹏华, 等. 上海崇明岛不同施肥条件下的稻田温室气体排放格局[J]. 上海交通大学学报(农业

- 科学版), 2013, 31(2): 34-39.
- [51] 卢维盛, 张建国, 廖宗文, 等. 不同水管理及耕作制度对广州地区稻田 CH_4 排放的影响[J]. 华南农业大学学报, 1997, 18(3): 57-61.
- [52] 卢维盛, 廖宗文, 张建国, 等. 不同水旱轮作方式对稻田甲烷排放影响的研究[J]. 农业环境保护, 1999, 18(5): 200-202.
- [53] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 207-213.
- [54] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1979-1986.
- [55] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216-224.
- [56] 金国强, 徐攀峰, 方文英, 等. 不同稻-麦栽培管理方式对稻季农田温室气体排放的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(4): 1015-1020.
- [57] 马二登, 纪洋, 马静, 等. 耕种方式对稻田甲烷排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 513-518.
- [58] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 290-296.
- [59] 王国强, 常玉妍, 宋星星, 等. 稻草还田下添加 DCD 对稻田 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2431-2439.
- [60] 侯晓莉, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同稻秆处理下双季稻温室气体排放通量研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 803-809.
- [61] 郑支林. 土壤肥力逐年下降, 秸秆还田势在必行[J]. 现代化农业, 1998(10): 205-206.
- [62] 顾道健, 薛朋, 陆希婕, 等. 秸秆还田对水稻生长发育和稻田温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20(3): 1-5.
- [63] Zwieter, V.L., Singh, B., Joseph, S., *et al.* (2009) Biochar Reduces Emissions of Non- CO_2 GHG from Soil. In: Lehmann, J. and Joseph, S., Eds., *Biochar for Environmental Management*, Earthscan Publications, London, 227-249.
- [64] Zhang, A.F., Cui, L.Q., Pan, G.X., *et al.* (2010) Effect of Biochar Amendment on Yield and Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice Paddy from Tai Lake Plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **139**, 469-475.
- [65] Wang, J.Y., Pan, X.J., Liu, Y.L., *et al.* (2012) Effects of Biochar Amendment in Two Soils on Greenhouse Gas Emissions and Crop Production. *Plant and Soil*, **360**, 287-298. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1250-3>
- [66] Zhang, A.F., Bian, R.J., Hussaina, Q., *et al.* (2013) Change in Net Global Warming Potential of a Rice-Wheat Cropping System with Biochar Soil Amendment in a Rice Paddy from China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **173**, 37-45.
- [67] 刘杰云, 沈健林, 邱虎森, 等. 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 205-212.
- [68] Shen, J.L., Tong, H., Liu, J.Y., *et al.* (2014) Contrasting Effects of Straw and Straw Derived Biochar Amendments on Greenhouse Gas Emissions within Double Rice Cropping Systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **188**, 264-274.
- [69] Liu, J.Y., Shen, J.L., Li, Y., *et al.* (2014) Effects of Biochar Amendment on the Net Greenhouse Gas Emission and Greenhouse Gas Intensity in a Chinese Double Rice Cropping System. *European Journal of Soil Biology*, **65**, 30-39.
- [70] 王欣欣, 邹平, 符建荣, 等. 不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 198-204.
- [71] Feng, Y.Z., Xu, Y.P., Yu, Y.C., *et al.* (2012) Mechanisms of Biochar Decreasing Methane Emission from Chinese Paddy Soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **46**, 80-88.
- [72] Liu, Y.X., Yang, M., Wu, Y.M., *et al.* (2011) Reducing CH_4 and CO_2 Emissions from Waterlogged Paddy Soil with Biochar. *Journal of Soils and Sediments*, **11**, 930-939. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0376-x>
- [73] 刘玉学. 生物质炭输入对土壤氮素流失和温室气体排放特性的影响[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [74] 花莉, 唐志刚, 解井坤, 等. 生物质炭对农田温室气体排放的作用效应及其影响因素探讨[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1068-1073.
- [75] 臧英, 罗锡文, 张国忠, 等. 开沟起垄穴直播方式对水稻分蘖前期甲烷排放的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(2): 96-100.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ccrl@hanspub.org