

氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响

张枝盛, 汪本福, 李阳, 杨晓龙, 胡杨, 王玲菲, 程建平

引用本文:

张枝盛, 汪本福, 李阳, 等. 氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1400–1408.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1185>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望

周胜, 张鲜鲜, 王从, 孙会峰, 张继宁

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 852–862 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0060>

化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响

杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 闫颖, 刘鸣达, 谢桂先

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2443–2450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0416>

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱波

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2334–2341 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0195>

稻草还田下添加DCD对稻田CH₄、N₂O和CO₂排放的影响

王国强, 常玉妍, 宋星星, 朱思明, 毛艳玲

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2431–2439 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0877>

水旱轮作系统中土壤CH₄和N₂O排放研究进展

熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 李尝君

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 863–871 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0101>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张枝盛, 汪本福, 李 阳, 等. 氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1400–1408.

ZHANG Zhi-sheng, WANG Ben-fu, LI Yang, et al. Effects of different nitrogen regimes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1400–1408.



开放科学 OSID

氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响

张枝盛¹, 汪本福¹, 李 阳¹, 杨晓龙¹, 胡 杨^{1,2}, 王玲菲², 程建平^{1,2*}

(1. 湖北省农业科学院粮食作物研究所/粮食作物种质创新与遗传改良湖北省重点实验室, 武汉 430064; 2. 长江大学/主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434023)

摘 要:为探明不同施肥模式对稻田温室气体排放和水稻产量的影响,本研究以江汉平原一季中稻为研究对象,通过大田试验设置5个氮肥处理:不施氮肥(CK)、农民习惯施肥(FFP)、实时氮肥管理(RTNM)、精确定量施氮(PQNA)和一次性施肥(OOF),采用静态箱-气相色谱法研究了稻田CH₄和N₂O排放特征。结果表明:与CK相比,FFP、PQNA、RTNM和OOF显著增加了CH₄和N₂O排放。FFP、PQNA和RTNM处理CH₄排放并没有显著差异,但是OOF处理比FFP处理CH₄减排27.5%;RTNM和OOF处理比FFP处理N₂O排放分别减少了23.1%和25.0%。与FFP相比,OOF并没有降低水稻产量,而RTNM和PQNA显著增加了水稻产量。OOF较FFP、RTNM和PQNA处理增温潜势(GWP)分别减少了27.4%、12.5%和18.5%。PQNA、RTNM和OOF处理的温室气体排放强度(GHGI)较FFP分别降低了22.2%、24.4%和26.7%。研究表明,采用合理的施肥模式,在保障水稻产量的同时,能够减缓稻田温室气体排放,实现丰产增效和环境友好。在所有施肥模式中,OOF具有最低的GWP,同时能够维持水稻产量并减少追肥次数,是一种低碳丰产的施肥技术,值得在江汉平原大面积推广。

关键词:稻田;温室气体;实时氮肥管理;精确定量施氮;一次性施肥

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)06-1400-09 **doi:**10.11654/jaes.2019-1185

Effects of different nitrogen regimes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields

ZHANG Zhi-sheng¹, WANG Ben-fu¹, LI Yang¹, YANG Xiao-long¹, HU Yang^{1,2}, WANG Ling-fei², CHENG Jian-ping^{1,2*}

(1. Food Crops Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences/Hubei Key Laboratory of Food Crop Germplasm and Genetic Improvement, Wuhan 430064, China; 2. Yangtze University/Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Jingzhou 434023, China)

Abstract: To explore the impacts of different N regimes on greenhouse gas emissions and rice grain yield, a field experiment was conducted to examine the greenhouse gas emissions and rice grain yield under no N fertilizer input (CK), local farmer fertilization practice (FFP), real-time N management (RTNM), precise and quantitative N application (PQNA), and one-off fertilization (OOF) in paddy fields of Sanhu Farm, Jiangling City. The results showed that FFP, PQNA, RTNM, and OOF significantly increased the CH₄ and N₂O emissions compared with CK. There were no significant differences in CH₄ emissions between FFP, PQNA, and RTNM. Moreover, compared with FFP, OOF decreased CH₄ emissions by 27.5%, while RTNM and OOF decreased N₂O emissions by 23.1% and 25.0%, respectively. Rice grain yield showed few differences between FFP and OOF. RTNM and PQNA significantly increased the rice grain yield compared with FFP. The lowest global warming potential (GWP) was provided by OOF, which was 27.4%, 12.5%, and 18.5% lower than that of FFP, RTNM, and

收稿日期: 2019-10-29 录用日期: 2020-01-21

作者简介: 张枝盛(1987—),男,湖北洪湖人,博士,助理研究员,从事农业生态研究。E-mail: zzhisheng@yeah.net

*通信作者: 程建平 E-mail: chjp609@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301405, 2018YFD0301303); 国家自然科学基金项目(31701386); 中国博士后科学基金(176589)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0301405, 2018YFD0301303); The Natural Science Foundation of China (31701386); China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (176589)

PQNA, respectively. The greenhouse gas emission intensity of PQNA, RTNM, and OOF was 22.2%, 24.4%, and 26.7% lower than that of FFP, respectively. This study shows that the use of optimized N fertilizer management practices such as PQNA, RTNM, and OOF can not only reduce greenhouse gas emissions from paddy fields, but also ensure rice grain yield, thereby achieving the goals of high yield, high efficiency, and environmental friendliness. OOF has the lowest GWP and lowest topdressing rate without decreasing the rice grain yield, and can be widely used in the Jiangnan Plain.

Keywords: paddy field; greenhouse gas; real-time nitrogen management; precise and quantitative nitrogen application; one-off fertilization

水稻是我国重要的粮食作物。我国用占世界18.6%的水稻种植面积,贡献了占世界27.6%的水稻产量^[1],为世界保障粮食安全做出了巨大贡献。近年来,作为重要的人为温室气体排放源之一,稻田温室气体排放日益受到关注^[2]。全球稻田CH₄排放量约为 2.5×10^4 Gg^[1],约占全球CH₄总排放量的6%^[3],占全球农业CH₄排放的24%^[2]。其中,中国稻田CH₄排放约为 5.4×10^3 Gg,约占全球稻田CH₄排放的21.5%^[1]。农田土壤是最主要的N₂O来源之一,贡献约5~5.5 Tg人为N₂O排放,其中由于氮肥施用产生的N₂O约占54%^[2,4]。尽管稻田土壤N₂O排放远低于旱地土壤,但是每年中国水稻种植仍然贡献了33 Gg N的N₂O排放^[5]。因此,在保障水稻持续丰产的同时,减少水稻生产的环境影响,尤其是减缓稻田温室气体排放具有重要意义。

江汉平原是我国重要的水稻产区,也是传统的双季稻区之一。由于经济的发展,劳动力的转移以及种粮比较效益的下降,双季稻生产面积逐渐下滑^[6]。越来越多的农户采用一季中稻替代双季稻种植,并通过减少施肥次数来减少人工投入,增加施肥量尤其是氮肥用量以提高产量潜力,来弥补双季改为一季稻后的产量损失^[7]。不合理的施氮一方面增加了农业生产成本,浪费资源,另一方面造成耕地板结、土壤酸化^[8-9],同时也导致土壤温室气体排放的增加^[10]。

要减少氮肥的用量,提高水稻氮素利用率,实现水稻高产和养分高效,就要求肥料养分的供应与作物的需求同步^[11]。对此,前人进行了大量的研究,形成了测土配方施肥、实时实地氮肥管理、精确定量施氮、一次性施肥等一系列的科学施肥技术^[10-15]。这些技术通过看苗施肥、分次施肥、氮肥后移等措施,实现了养分供应与作物养分吸收相吻合。结果表明,科学施肥技术能够提高氮素利用率10%~15%,并显著增加产量^[12-16]。目前关于一次性施肥技术对稻田温室气体排放的研究较多,但是结果并不一致^[10,17]。例如,在湖南的中稻试验中,周旋等^[10]研究认为分次施肥较不同生化抑制剂组合的尿素一次性施肥可以有效减

少稻田土壤CH₄排放;而在江汉平原的油稻模式下,徐驰等^[17]则发现传统施肥模式与一次性控释肥基施相比显著增加了稻田CH₄排放。此外,国内关于精确定量施氮和实时氮肥管理对温室气体排放的影响报道还比较少。因此,本研究在江汉平原的一季稻区设置了实时氮肥管理、精确定量施氮和一次性施肥等不同科学施肥模式,研究其对温室气体排放和水稻产量的影响,为不同科学施肥模式的环境效益评价提供科学依据,为指导该区域一季中稻模式下水稻科学施肥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地设置在湖北省江陵县三湖农场湖北省农业科学院试验示范基地(112°52'E, 30°21'N)。该试验点属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温16.2℃,年均降雨量1000 mm左右。试验点为冲积型潮土性水稻土,试验前长期种植制度为中稻-冬闲。试验地耕层土壤(0~20 cm)基本理化性状为:容重 $1.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、有机质 $29.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $2.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $18.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $187.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $13.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $166.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 6.87。2018年5月开始设置试验,供试水稻品种为丰两优四号(*Oryza sativa* L.)。

1.2 试验设计和田间管理

试验设置5种施肥模式,为不施肥(CK)、农民习惯施肥(FFP)、实时氮肥管理(RTNM)、精确定量施氮(PQNA)和一次性施肥(OOF)。采用完全随机区组设计,每个处理面积6 m×8 m,重复3次。前季水稻收获后秸秆全量还田,2018年5月18日进行软盘育秧,秧龄20 d,6月4日施用基肥后,采用旋耕机灌水旋耕2次,6月5日采用人工插秧,行距×株距为30 cm×16 cm,每穴2苗,9月20日收获。各施肥处理,P、K肥用量保持一致,作基肥一次性施入,换算成P₂O₅和K₂O的纯量均为90 kg·hm⁻²。

对于CK处理,全生育期不施用氮肥。

对于FFP处理,氮肥施用总量为180 kg N·hm⁻²,基肥、分蘖肥和穗肥的氮素用量分别为90、54 kg N·hm⁻²和36 kg N·hm⁻²。基肥采用三要素复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:10:22,山东红日化工股份有限公司),追肥采用尿素(含氮量46%,中化平原化工有限公司)。

对于RTNM处理,根据贺帆等^[14]的研究和本试验于2017年预试验结果,将丰两优四号的最佳氮肥施用SPAD阈值设置为37,小于37则施氮肥,反之不施氮肥。具体施氮措施为:不施基肥,自栽后10 d至穗分化,若叶绿素仪读数(SPAD)<37,施纯氮30 kg N·hm⁻²,反之不施氮肥;自穗分化至抽穗,若SPAD<37,施氮45 kg N·hm⁻²,反之不施氮肥。每周测1次。实际施肥为6月23日30 kg N·hm⁻²,7月7日30 kg N·hm⁻²,7月21日45 kg N·hm⁻²,7月30日45 kg N·hm⁻²。施氮总量为150 kg N·hm⁻²,所用氮肥均为尿素(含氮量46%,中化平原化工有限公司)。

对于PQNA处理,根据凌启鸿等^[13]的研究和本试验于2017年预试验结果,施氮总量为187.5 kg N·hm⁻²,基肥、分蘖肥、促花肥和保花肥氮素用量分别为72.15、30.9、42.6 kg N·hm⁻²和42.15 kg N·hm⁻²。基肥采用三要素复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:10:22,山东红日化工股份有限公司),追肥采用尿素(含氮量46%,中化平原化工有限公司)。

对于OOF处理,施氮总量为180 kg N·hm⁻²,采用金正大水稻专用缓释肥(21:10:11,氯基,控释养分含量8%,金正大生态工程集团股份有限公司)162 kg N·hm⁻²和尿素(含氮量46%,中化平原化工有限公司)18 kg N·hm⁻²作为基肥一次性施入。

RTNM处理在水稻收获前10 d断水搁田,其他时期均保持田间浅水灌溉(1~3 cm);其他处理采用间隙灌溉,水稻分蘖盛期和收获前10 d断水搁田。病虫害管理均根据当地高产田块的管理办法进行,各处理保持一致。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 土壤CH₄和N₂O排放通量测定

采用密闭箱-气相色谱法测定稻田CH₄与N₂O排放通量^[17]。采样箱为圆柱形PVC桶,高1.10 m、直径0.3 m,每次采样时采样箱罩住1株水稻。采样时间间隔为5 min,分别在0、5、10 min和15 min,使用注射器抽取20 mL箱内混合均匀气体收集于预先抽取真空的20 mL气瓶中。

CH₄检测器为FID,载气为氮气,流速为30 mL·min⁻¹;氢气为燃气,流速为30 mL·min⁻¹;空气为助燃气,流速为400 mL·min⁻¹。检测器温度为200℃,分离柱温度为55℃。N₂O检测器为ECD,分离柱内填充料为80/100目PorapakQ,检测温度300℃,柱温65℃,载气为氮气,流速40 mL·min⁻¹。N₂O与CH₄排放通量根据以下公式计算^[17]:

$$F = \rho \times h \times dC/dt \times 273 / (273 + T)$$

式中: F 为气体流通量,mg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下气体密度,kg·m⁻³; h 为箱高,m; dC/dt 为采样箱内气体浓度变化率,μL·L⁻¹·min⁻¹; T 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

温室气体累积排放量为相邻的两个采样时期的气体排放量累加,而相邻的两个采样时期的气体排放量为平均排放通量与采样时间的乘积。

1.3.2 增温潜势(Global warming potential, GWP)和温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI)的计算

100 a时间尺度上CH₄和N₂O的温室效应分别为相当于CO₂的30倍和268倍^[3]。将CH₄和N₂O排放量按温室效应转换成CO₂当量,因此GWP的计算公式如下:

$$\text{GWP}(\text{t CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}) = [\text{CH}_4(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 30 + \text{N}_2\text{O}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 268] / 1000$$

GHGI是指单位产量的综合温室效应,计算公式如下:

$$\text{GHGI}(\text{t CO}_2\text{-eq} \cdot \text{t}^{-1}) = \text{GWP}(\text{t CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}) / \text{水稻产量}(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$$

1.3.3 水稻地上部分干物质积累量与产量调查

在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,分别按照各个小区平均分蘖数或有效穗数,齐地取8兜水稻地上部分,烘干后测定其质量,计算地上部分干物质积累量(t·hm⁻²)。

水稻成熟后,每小区选长势均一的地块,取3个1 m×1 m样方作为测产区,人工收割脱粒、晒干、去杂后,称质量并测定含水量,按标准含水量13.5%折算水稻产量(t·hm⁻²)。

1.3.4 数据统计与分析

数据运算和作图采用Excel 2010以及Origin 9.0。应用SPSS 19.0软件进行数据的统计分析,采用方差分析和最小显著差异法(LSD)分析比较不同处理间的差异,利用单变量分析确定不同处理的标准偏差(SD)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对稻田CH₄和N₂O排放的季节性变化的影响

不同施肥模式CH₄排放表现出不同的排放特征(图1)。CK、FFP、RTNM、PQNA和OOF的CH₄排放通量分别为0.29~5.28、1.05~21.50、1.09~12.62、0.91~13.75 mg·m⁻²·h⁻¹和1.33~9.97 mg·m⁻²·h⁻¹。FFP、RTNM、PQNA和OOF的平均CH₄排放通量分别为5.74、4.68、5.10 mg·m⁻²·h⁻¹和4.18 mg·m⁻²·h⁻¹,是CK平均CH₄排放通量的(2.54 mg·m⁻²·h⁻¹)的2.26、1.84、2.01倍和1.64倍。

施用基肥后,FFP、PQNA和OOF的N₂O排放通量即达到峰值(图2),N₂O排放峰值大小表现为FFP(287.95 μg·m⁻²·h⁻¹)>PQNA(249.89 μg·m⁻²·h⁻¹)>OOF(227.65 μg·m⁻²·h⁻¹)。其他时期追肥导致N₂O排放小幅上升,并迅速回落。CK处理N₂O排放平均通量为

6.34 μg·m⁻²·h⁻¹,是FFP(30.25 μg·m⁻²·h⁻¹)、RTNM(17.16 μg·m⁻²·h⁻¹)、PQNA(27.41 μg·m⁻²·h⁻¹)和OOF(23.02 μg·m⁻²·h⁻¹)处理的20.96%、36.95%、23.13%和27.54%。

施肥显著增加了CH₄和N₂O的累积排放量(表1)。与CK相比,FFP、RTNM、PQNA和OOF处理CH₄累积排放量分别增加了119.2%、82.5%、95.7%和59.0%,N₂O累积排放量增加了372.7%、263.6%、309.1%和254.5%。FFP、RTNM和PQNA处理间CH₄排放没有显著差异,而OOF处理相对于FFP处理减少了CH₄排放27.5%和N₂O排放25.0%;同时RTNM较FFP处理降低了N₂O排放23.1%。

2.2 不同施肥模式对水稻地上部分干物质积累和产量的影响

由表2可见,CK处理在各个时期干物质积累量均显著低于其他处理。与RTNM、PQNA和OOF比较,FFP处理在各个生育期的干物质积累量均没有显

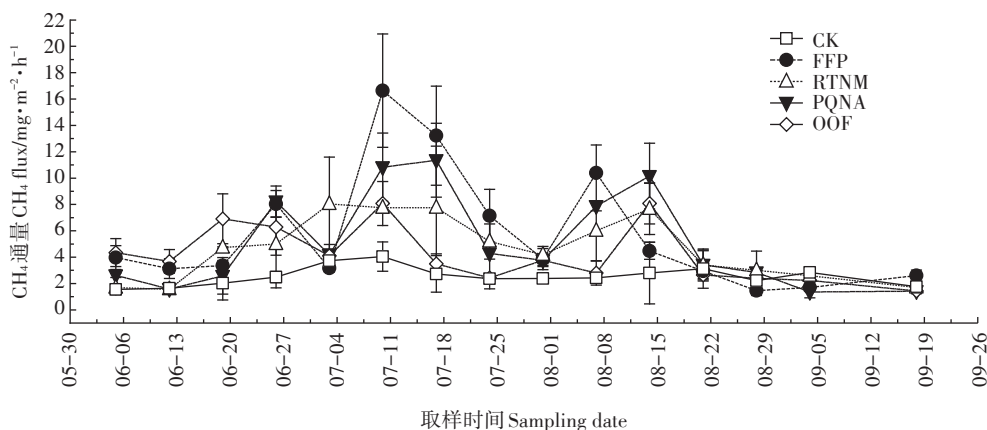


图1 不同施肥模式下稻田CH₄排放通量的季节性变化(2018)

Figure 1 Seasonal variations of CH₄ fluxes during rice growing season under different fertilizer regimes (2018)

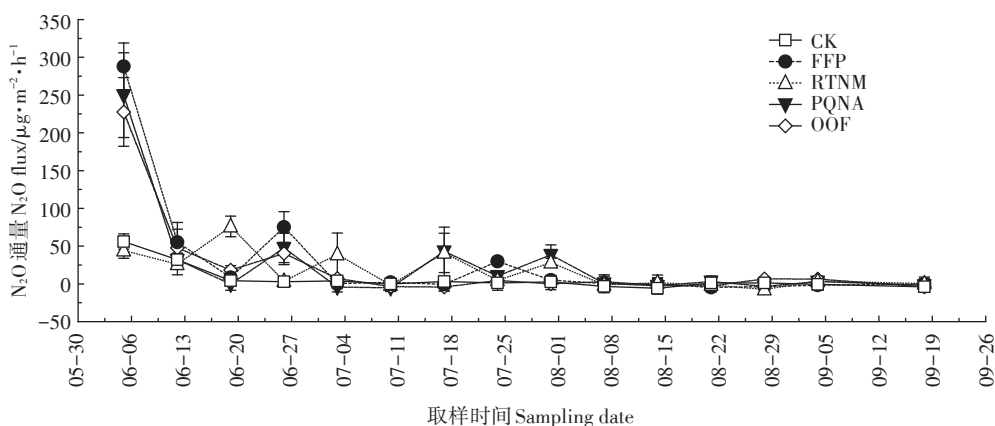


图2 不同施肥模式下稻田N₂O排放通量的季节性变化(2018)

Figure 2 Seasonal variations of N₂O fluxes during rice growing season under different fertilizer regimes (2018)

表1 不同施肥模式对CH₄和N₂O累积排放、CH₄和N₂O对综合增温潜势的贡献、GWP和GHGI的影响
Table 1 Seasonal cumulative CH₄ and N₂O emissions, CH₄ and N₂O contributions to GWP, GWP and GHGI as affected by different fertilizer regimes

处理 Treatments	CH ₄ 排放量 CH ₄ emissions/ kg·hm ⁻²	N ₂ O排放量 N ₂ O emissions/ kg·hm ⁻²	CH ₄ 对综合增温潜势的贡献 Contribution to GWP of CH ₄ /%	N ₂ O对综合增温潜势的贡献 Contribution to GWP of N ₂ O/%	GWP/ t CO ₂ -eq·hm ⁻²	GHGI/ t CO ₂ -eq·t ⁻¹
CK	65.1±5.5c	0.11 ±0.03c	98.49±0.38a	1.51±0.38b	1.98±0.17d	0.29±0.04c
FFP	142.7±12.2a	0.52±0.05a	96.84±0.47b	3.16±0.47a	4.42±0.36a	0.45±0.05a
RTNM	118.8±10.9ab	0.40±0.05b	97.07±0.49b	2.93±0.49a	3.67±0.32bc	0.34±0.03bc
PQNA	127.4±15.7ab	0.45±0.03ab	96.91±0.43b	3.09±0.43a	3.94±0.47ab	0.35±0.05b
OOF	103.5±11.7b	0.39±0.02b	96.67±0.49b	3.33±0.49a	3.21±0.35c	0.33±0.03bc

注:小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$). The same below.

表2 不同施肥模式对不同时期水稻地上部分干物质积累和产量的影响(t·hm⁻²)
Table 2 Above-ground dry-matter accumulation during the different rice growth periods and grain yield as affected by different fertilizer regimes(t·hm⁻²)

处理 Treatments	干物质积累量The amount of dry-matter accumulation				产量 Grain yield
	分蘖期Tillering stage	拔节期Jointing stage	抽穗期Heading stage	成熟期Maturity	
CK	2.06±0.04c	5.18±0.04c	9.85±1.27b	14.56±1.28c	6.87±0.32c
FFP	2.25±0.06ab	5.38±0.06ab	13.11±0.92a	19.87±1.42ab	9.82±0.35b
RTNM	2.16±0.05b	5.44±0.10ab	13.26±1.23a	21.26±1.46a	10.94±0.35a
PQNA	2.20±0.06b	5.35±0.07b	13.98±0.34a	21.72±0.31a	11.22±0.36a
OOF	2.34±0.02a	5.48±0.06a	13.06±0.55a	18.61±0.64b	9.77±0.38b

著差异。与RTNM和PQNA处理相比,OOF处理在水稻分蘖期干物质积累量分别提高了8.33%和6.36%,但是在成熟期干物质积累量分别减少了12.46%和14.32%。

施肥显著影响了水稻产量(表2)。FFP、RTNM、PQNA和OOF处理水稻产量分别是CK处理的1.43、1.59、1.63倍和1.42倍(表2)。与FFP相比,RTNM和PQNA处理增加了水稻产量,增幅达11.4%和14.3%。OOF与FFP处理水稻产量没有显著差异。

2.3 不同施肥模式对GWP的影响

施肥显著提高了稻田GWP(表1)。与CK相比,FFP、RTNM、PQNA和OOF处理分别提高了稻田GWP,增幅分别为123.2%、85.4%、98.9%和62.1%。与FFP处理相比,RTNM和OOF处理显著降低了GWP,降幅为17.0%和27.4%。PQNA和FFP处理间GWP没有显著差异。

2.4 不同施肥模式对GHGI的影响

CK具有最低的GHGI,而FFP处理GHGI最高(表1)。同时RTNM、PQNA和OOF处理下GHGI没有显著差异。与FFP相比,RTNM、PQNA和OOF处理GHGI分别降低了24.4%、22.2%和26.7%。

3 讨论

3.1 不同施肥模式对稻田CH₄排放的影响

稻田CH₄的产生主要来自土壤有机质分解,由一系列复杂的土壤微生物过程驱动^[18]。本研究中,施肥显著提高了土壤CH₄的排放。其主要原因:一方面是氮素的增加提高了土壤有机质的分解速率,提高土壤中氧化菌的活性,同时较高的土壤NH₄⁺含量能抑制CH₄氧化,促进CH₄的产生^[19]。另一方面,本研究中,施肥处理(FFP、RTNM、PQNA和OOF)在各个时期的地上部分干物质积累均显著高于CK(表2),氮肥的施用能够促进水稻的生长,使更多的根系分泌物和水稻凋落物进入土壤,为CH₄的产生提供了更多的底物,同时更加发达的水稻植株也为CH₄提供了更好的释放通道^[17]。

多数研究者认为增加施氮量会导致更多的CH₄排放^[20-21]。傅志强等^[22]认为,稻田CH₄排放随施氮量的增加而增加。但是,也有研究认为,无论是以NH₄⁺为主的氮肥(如硫酸铵),还是以NO₃⁻为主的氮肥(如尿素),CH₄排放均会随着氮肥的增加而降低^[23]。Nie等^[24]则认为与不施氮相比,施氮会增加CH₄排放,但

是不同的施氮量对 CH_4 排放没有显著影响。可能是因为氮肥的施用一定程度上会增加 CH_4 的产生,但是更多的氮素添加导致更多的 NH_4^+ 进入土壤,进而促进 CH_4 氧化菌的活性,反而抑制 CH_4 的产生^[25]。同时,当氮肥水平差异太小($\leq 25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时,施氮对 CH_4 排放的促进或抑制作用都不显著^[24]。因此,本研究中,与农民习惯施肥(FFP)相比,精确定量施氮(PQNA)增加了施肥量 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但是 CH_4 排放并没有增加。

尽管与其他施肥模式的间歇灌溉相比,实时氮肥管理(RTNM)长期保持田面有水层,可能导致更高的产 CH_4 潜力,但由于其更低的施氮量(比农民习惯施肥少 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),并没有增加 CH_4 排放(表1)。Nie等^[24]的研究发现,无论施肥量如何,长期淹水灌溉条件下 CH_4 排放均会高于间歇灌溉处理。但是Dong等^[26]的研究则发现水分管理和氮肥用量对稻田 CH_4 排放有显著的交互效应,在合适的氮肥用量下,即使采用长期淹灌也并不增加 CH_4 排放。此外,值得注意的是,在长期有水层管理条件下,RTNM处理下并没有出现明显的 CH_4 排放高峰(图1),可能的原因是RTNM减少了中期晒田的过程,避免了 CH_4 的集中排放,更多的 CH_4 闭蓄在水体中。实时氮肥管理模式采用的长期有水层管理,与其他处理水分管理并不一致,其温室气体排放特征可能和其他处理不同,后期的研究中通过增加采样频次或采用连续的自动采样装置以更好地分析温室气体的季节变化是很有必要的。

与农民习惯施肥(FFP)相比,一次性施肥(OOF)能够显著降低 CH_4 排放(表1),其原因主要是缓释肥减缓了肥料氮素的供应,释放的氮素被作物优先利用而减少了产 CH_4 菌的底物,进而减少了 CH_4 排放^[27]。将不同类型的缓控氮肥应用到双季稻生产中,王斌等^[28]发现,应用缓释肥能够减少 CH_4 排放43.8%~55.4%。在油稻系统中,徐驰等^[17]也有类似的结果。

3.2 不同施肥模式对稻田 N_2O 排放的影响

施肥直接为土壤硝化与反硝化作用提供N源,是影响土壤 N_2O 排放最重要的因素之一。与不施氮处理(CK)相比,施肥处理均显著提高了土壤 N_2O 排放(表1)。研究表明,稻田 N_2O 排放随着施氮量的增加而增加^[22-24]。Shcherbak等^[29]在分析了78篇相关文献之后发现,土壤 N_2O 排放随着施氮量的增加呈指数增长。但是,在本研究中增加施肥量并没有提高 N_2O 排放,与农民习惯施肥相比,PQNA增加了 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但是其 N_2O 排放并没有增加,反而有降低的趋势。

实时氮肥管理(RTNM)减少了氮肥的用量,在减少了 N_2O 产生底物的同时,由于长期处于有水状态,抑制了土-水界面的气体交换,抑制了硝化作用,减少 N_2O 的产生。彭少兵等^[8]认为,不采用中期晒田管理,有可能提高水稻的氮素吸收能力,提高氮素利用率,而减少氮素的损失。Bhatia等^[30]在稻麦模式中发现,通过叶色值指导施肥能够促进氮素更有效地被作物吸收,即使在更高的氮肥用量下,也能比农民习惯施肥减少 N_2O 。在本研究中,虽然采用了长期有水层管理并减少了氮肥的用量,但是与FFP相比,RTNM处理下干物质积累并没有降低,产量反而显著提高了,说明采用RTNM能够促进水稻的氮素吸收,减少氮素损失^[6,30]。

本研究的结果表明,施氮量并不是影响 N_2O 排放的唯一因素,通过合理的氮肥运筹,规划施肥时间和协调不同生育期氮肥的用量,使氮肥供应与水稻氮素吸收同步,减少土壤中肥料氮的残留,即使适当增加氮肥施用也不会提高 N_2O 排放。

应用缓释肥的一次性施肥技术(OOF)能够显著降低 N_2O 排放(表1),与农民习惯施肥(FFP)相比,一次性施肥(OOF)降低了 N_2O 排放25.0%。类似的结果在中稻和双季稻中均有报道^[28,31-32]。但是,在与本文类似区域的研究中,徐驰等^[17]发现缓释尿素作为基肥一次性施入与常规施肥相比 N_2O 排放并没有显著差异。不同结果可能是因为所用肥料和施肥量的不同,也可能与不同的土壤类型和肥力条件有关。

3.3 不同施肥模式对水稻产量的影响

施肥能够显著提高产量,但是不同施肥模式对水稻产量的影响是复杂的。本研究中,精确定量施氮(PQNA)和实时氮肥管理(RTNM)处理下水稻产量最高,比农民习惯施肥(FFP)水稻产量分别提高了14.26%和11.41%(表2)。凌启鸿等^[13]在12个不同地力水平的稻田研究结果显示,目标产量定位 $9.9.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,采用精确定量施氮(PQNA)比农民习惯施肥(FFP)分别能够增加产量8.32%、7.40%和6.57%。但是他们同样发现^[13],不同的品种、秧龄长短以及土壤的供氮特征对精确定量施氮的相关参数都会产生影响,同时还需要综合考虑种植区域、土壤类型、土壤肥力、栽培制度、生态条件等因素。刘立军等^[12]发现采用实时实地氮肥管理能够增加水稻产量3.3%~9.3%,此外还提高了氮肥农学利用率204.3%~276.4%。增产的原理主要是高氮情况下农民习惯施肥导致大量的氮素积累在稻草中,造成奢侈吸收,而

采取实时实地施氮管理能够实现施肥时期和氮肥用量与作物对氮素吸收的协调一致,提高氮素利用的同时,保障了氮素的供应^[12,14,30]。

缓释肥可根据作物不同生长阶段对养分的需求,调节养分释放速率和释放量,使养分释放曲线与作物养分需求同步^[11]。本研究中,一次性施肥模式(OOF)与农民习惯施肥模式(FFP)相比水稻产量并没有显著差异,可是与RTNM和PQNA相比,OOF降低了水稻产量。OOF处理能够增加分蘖期的干物质积累量,但降低了成熟期的干物质积累量(表2),说明一次性施肥模式下缓释肥后期的供氮能力仍需要进一步加强。王强等^[33]在不同地点的11个缓释氮肥一次性施肥试验中发现,不同类型缓释氮肥在减少氮肥用量的同时,并不会降低水稻产量。Zhang等^[32]也有类似的结果。李健陵等^[34]发现不同的缓控肥料的施用均会提高作物产量。而丁武汉等^[35]在油稻系统的研究中发现,一次性施用缓释氮肥反而比农民习惯施肥降低水稻产量。不同的结果可能与土壤基础地力、土壤质地、氮肥施用量和种类、水稻品种、年度间气候差异、施肥方式等有关^[35]。

3.4 不同施肥模式对GWP和GHGI的影响

GWP是一个准确、实用的指标,可用来评价田间管理措施对减缓气候变化影响的效果^[18]。本研究中GWP在1.98~4.42 t CO₂-eq·hm⁻²间波动,和武开阔等^[27]、王斌等^[28]的研究结果类似。武开阔等^[27]在东北稻区的研究中发现,稻季的GWP在2.25~8.80 t CO₂-eq·hm⁻²。王斌等^[28]在江汉平原的双季稻研究中发现GWP在2.25~5.12 t CO₂-eq·hm⁻²。本研究中,CH₄排放对GWP的贡献在96.28%~98.92%,说明需要进一步研究合理的管理措施以减少稻田CH₄排放,这对于缓解稻田温室气体排放、促进稻田可持续生产意义重大。与农民习惯施肥(FFP)相比,实时氮肥管理(RTNM)、一次性施肥(OOF)能够减少CH₄和N₂O排放,降低稻田GWP,精确定量施氮(PQNA)也表现出减少GWP的趋势。同时,本研究还表明,采用科学施肥模式能够维持或者增加水稻产量。实时氮肥管理(RTNM)、精确定量施氮(PQNA)、一次性施肥(OOF)比农民习惯施肥(FFP)分别降低稻田的GHGI 11.55%、9.93%和12.29%,结果表明,通过合理的施肥模式,优化氮素的供应,在保障产量的同时,能够减缓温室气体排放,因此大力推广科学施肥模式对于实现水稻丰产、增效和环境友好具有重要意义。值得注意的是,在施用氮肥的情况下,一次性施肥模式(OOF)

具有最低的GWP和相对较高的水稻产量,与PQNA相比减少了氮肥的用量,与RTNM相比节约了灌溉用水,此外还能减少施肥次数,减少劳动力投入。说明一次性施肥模式是一种低碳丰产的肥料管理模式,然而缓释肥较高的销售价格使其推广较为缓慢,因此通过合理的生态补贴促进缓释肥的应用是很有必要的。

本研究中,实时氮肥管理和精确定量施氮的参数是根据前人的研究结果和本研究前期的预试验得到,可能与相关施肥技术的最优管理模式还有一定差距;同时氮肥管理对温室气体排放和产量的影响也受到气候条件、土壤状况、水稻品种和肥料类型等影响,因此加强多年多点的定位观测,并开展不同施肥模式的经济效益分析,能更全面地评价不同科学施肥模式的经济效益和环境影响。

4 结论

(1)与农民习惯施肥(FFP)相比,实时氮肥管理(RTNM)和精确定量施氮(PQNA)并没有影响CH₄排放,但是一次性施肥(OOF)显著降低了CH₄排放。此外,实时氮肥管理(RTNM)和一次性施肥(OOF)能够显著降低N₂O排放,而精确定量施氮(PQNA)没有影响N₂O排放。

(2)一次性施肥(OOF)并没有降低水稻产量,实时氮肥管理(RTNM)和精确定量施氮(PQNA)则提高了水稻产量。

(3)一次性施肥(OOF)和实时氮肥管理(RTNM)能够降低GWP,精确定量施氮(PQNA)与农民习惯施肥(FFP)的GWP并没有显著差异。与农民习惯施肥(FFP)相比,实时氮肥管理(RTNM)、精确定量施氮(PQNA)和一次性施肥(OOF)均能显著降低水稻GHGI。

(4)一次性施肥(OOF)是一种低碳丰产的肥料管理模式。

参考文献:

- [1] FAOSTAT. Food and agriculture data 2017: Production and emissions in the World[DB/OL]. [2019-10-2]. <http://www.fao.org>.
- [2] IPCC. Climate change and land 2019: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[R/OL]. (2019-8-7)[2019-10-5]. <https://www.ipcc.ch/report/src-cl/>.
- [3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.

- [4] Tian H Q, Yang J, Xu R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 640–659.
- [5] Aliyu G, Luo J, Di H J, et al. Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 547–558.
- [6] 龙毅, 李晶晶, 龚长东, 等. 近20年湖北省水稻产量变动及其原因分析[J]. 安徽农业科学, 2012(7): 3953–3955.
LONG Yi, LI Jing-jing, GONG Chang-dong, et al. Analysis on fluctuation in production and yield of rice and its causes in Hubei Province in recent 20 years[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012(7): 3953–3955.
- [7] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(8): 845–850.
PENG Shao-bing. Reflection on China's rice production strategies during the transition period[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2014, 44(8): 845–850.
- [8] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103.
PENG Shao-bing, HUANG Jian-liang, ZHONG Xu-hua, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095–1103.
- [9] 中华人民共和国. 农业农村部. 到2020年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL]. (2015-03-18) [2019-10-2]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. Action plan of fertilizer use zero growth by year 2020[EB/OL]. (2015-03-18) [2019-10-2]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.
- [10] 周旋, 吴良欢, 戴锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1122–1130.
ZHOU Xuan, WU Liang-huan, DAI Feng, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on CH₄ and N₂O emission from yellow clayey field during rice growth season[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(12): 1122–1130.
- [11] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827–3839.
LIU Zhao-hui, WU Xiao-bin, TAN De-shui, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827–3839.
- [12] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456–1461.
LIU Li-jun, SANG Da-zhi, LIU Cui-lian, et al. Effect of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1456–1461.
- [13] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2457–2467.
LING Qi-hong, ZHANG Hong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457–2467.
- [14] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2008(2): 470–479.
HE Fan, HUANG Jian-liang, CUI Ke-hui, et al. Effect of real-time and site-specific nitrogen management on various hybrid rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(2): 470–479.
- [15] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 84–92.
JI Lin, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan. Establishing fertilization recommendation index of paddy soil based on the “3414” field experiments in the middle of Sichuan hilly regions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 84–92.
- [16] Li P, Lu J, Hou W, et al. Reducing nitrogen losses through ammonia volatilization and surface runoff to improve apparent nitrogen recovery of double cropping of late rice using controlled release urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(12): 11722–11733.
- [17] 徐驰, 谢海宽, 丁武汉, 等. 油菜-水稻复种系统一次性施肥对CH₄和N₂O净排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3972–3984.
XU Chi, XIE Hai-kuan, DING Wu-han, et al. The impacts of CH₄ and N₂O net emission under one-off fertilization of rape-paddy planting system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3972–3984.
- [18] Zhao X, Pu C, Ma S T, et al. Management-induced greenhouse gases emission mitigation in global rice production[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1299–1306.
- [19] Mosier A, Schimel D, Valentine D, et al. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands[J]. *Nature*, 1991, 350(6316): 330.
- [20] Lindau C W, Bollich P K, Delaune R D, et al. Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH₄ emissions from a Louisiana, USA rice field[J]. *Plant and Soil*, 1991, 136(2): 195–203.
- [21] Banger K, Tian H, Lu C. Do nitrogen fertilizers stimulate or inhibit methane emissions from rice fields?[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(10): 3259–3267.
- [22] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3365–3372.
FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, et al. Effects of water and nitrogenous fertilizer coupling on CH₄ and N₂O emission from double-season rice paddy field[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(9): 3365–3372.
- [23] Cai Z, Xing G, Yan X, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7–14.
- [24] Nie T Z, Chen P, Zhang Z X, et al. Effects of different types of water and nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions, yield, and water consumption of paddy fields in cold region of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public*

- Health, 2019, 16(9):1639.
- [25] Schimel J. Global change: Rice, microbes and methane[J]. *Nature*, 2000, 403(6768):375-377.
- [26] Dong W J, Guo J, Xu L J, et al. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 64(2):289-297.
- [27] 武开阔, 张丽莉, 宋玉超, 等. 稳定性氮肥配合秸秆还田对水稻产量及 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1287-1294.
- WU Kai-kuo, ZHANG Li-li, SONG Yu-chao, et al. Effects of stabilized N fertilizer combined with straw returning on rice yield and emission of N_2O and CH_4 in a paddy field[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1287-1294.
- [28] 王 斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2):314-323.
- WANG Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2):314-323.
- [29] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global meta analysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N_2O) emissions to fertilizer nitrogen[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(25):9199-9204.
- [30] Bhatia A, Pathak H, Jain N, et al. Greenhouse gas mitigation in rice-wheat system with leaf color chart-based urea application[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(5):3095-3107.
- [31] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):578-584.
- XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):578-584.
- [32] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144:274-281.
- [33] 王 强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20):3951-3960.
- WANG Qiang, JIANG Li-na, PAN Jian-qing, et al. Yield and nitrogen adsorption of single-cropping rice as influenced by one-off fertilization of slow-released nitrogen fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20):3951-3960.
- [34] 李健陵, 李玉娥, 周守华, 等. 节水灌溉, 树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20):3958-3967.
- LI Jian-ling, LI Yu-e, ZHOU Shou-hua, et al. Synergistic effects of water-saving irrigation, polymer-coated nitrogen fertilizer and urease/nitrification inhibitor on mitigation of greenhouse gas emissions from the double rice cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20):3958-3967.
- [35] 丁武汉, 谢海宽, 徐 驰, 等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1097-1109.
- DING Wu-han, XIE Hai-kuan, XU Chi, et al. Impacts of one-off fertilization on nitrogen leaching and economic benefits for rice-rape rotation system[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1097-1109.