

## 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

引用本文:

周胜, 张鲜鲜, 王从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 852-862.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0060>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 水旱轮作系统中土壤 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 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>

### 我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展

张国, 王效科

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 872-881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0102>

### 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望

夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 834-841 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0108>

### 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮

李玥, 巨晓棠

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 842-851 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0245>

### 中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望

夏龙龙, 颜晓元

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 665-672 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0109>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周 胜, 张鲜鲜, 王 从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 852–862.

ZHOU Sheng, ZHANG Xian-xian, WANG Cong, et al. Research progress and prospects of water and crop residue managements to mitigate greenhouse gases emissions from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 852–862.



开放科学 OSID

# 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望

周 胜<sup>1,2</sup>, 张鲜鲜<sup>1,2</sup>, 王 从<sup>1,2</sup>, 孙会峰<sup>1,2</sup>, 张继宁<sup>1,2</sup>

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2. 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201403)

**摘 要:**水稻生产过程是人为源温室气体甲烷(Methane, CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(Nitrous oxide, N<sub>2</sub>O)的重要排放源, 稻田中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的产生与排放受农事管理与环境因素影响, 尤其是水分管理和秸秆还田措施, 直接影响稻田土壤氧化还原状况和土壤中易分解有机质的含量, 对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放具有显著的影响效果。很多研究结果表明, 控制灌溉、干湿交替等节水灌溉措施能显著降低CH<sub>4</sub>排放量, 但同时也可能促进N<sub>2</sub>O的排放, 因此如何同时减少CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量是实现稻田温室气体减排的关键所在; 另外, 秸秆还田在改良土壤肥力的同时也增加了外源性有机质的输入, 促进了稻田CH<sub>4</sub>的排放。如何优化秸秆还田措施, 并耦合水分管理以达到土壤改良和温室气体减排的双重效益对稻田系统的可持续利用至关重要。本文从水分管理、秸秆管理、以及水分和秸秆协同管理等几个方面综述了近年来稻田温室气体减排的研究进展, 重点总结了国内外通过水分管理减排稻田温室气体的效果、水分与施肥耦合的减排效果、秸秆还田措施以及水分管理与秸秆还田耦合对稻田温室气体排放的影响, 并对今后稻田温室气体减排的研究方向作了展望。

**关键词:**水分管理; 秸秆还田; 甲烷; 氧化亚氮; 减排措施; 全球增温潜势

**中图分类号:** X71      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-2043(2020)04-0852-11      **doi:** 10.11654/jaes.2020-0060

## Research progress and prospects of water and crop residue managements to mitigate greenhouse gases emissions from paddy field

ZHOU Sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xian-xian<sup>1,2</sup>, WANG Cong<sup>1,2</sup>, SUN Hui-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-ning<sup>1,2</sup>

(1. Eco-environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Engineering Research Centre of Low-carbon Agriculture, Shanghai 201403, China)

**Abstract:** Rice production is an important emission source of anthropogenic greenhouse gases methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). The production and emission of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in paddy field are affected by agricultural management and environmental factors, especially water management and straw returning measures, which directly affect the redox status of paddy soil and the content of decomposed organic matter in soil. Both water and straw management measures have significant effect on the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission in paddy field. Many research results show that water management measures, such as controlling irrigation and alternate wetting and drying can significantly mitigate CH<sub>4</sub> emission, but may also promote N<sub>2</sub>O emission. Hence, how to mitigate CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions simultaneously is the key factor to achieve greenhouse gases emission mitigation in paddy fields. On the other hand, straw returning can improve the soil fertility of paddy fields and increase the exogenous carbon source, which promotes CH<sub>4</sub> emission in paddy field. How to optimize the straw returning measures, coupling with water management, to achieve the co-benefits of soil improvement and greenhouse gases emission mitigation is very important for sustainable utilization of paddy field. In this paper, the research progress of greenhouse gases emission mitigation in paddy field in recent

收稿日期: 2020-01-15      录用日期: 2020-03-24

作者简介: 周 胜(1971—), 男, 安徽黄山人, 博士, 研究员, 主要从事低碳与循环农业研究。E-mail: zhous@263.net

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2016)第6-3-1号)

Project supported: Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program(G(2016)No.06-03-01)

years is reviewed from the aspects of water management, straw management and water and straw collaborative management in paddy field. The research results of the effect of water management, water management coupling with fertilizer application on greenhouse gases mitigation in paddy field, and the effect of straw returning and water management coupling straw returning on greenhouse gases emission in paddy field are summarized. Furthermore, the future research of greenhouse gases emission mitigation in paddy field is prospected.

**Keywords:** water management; straw returning; methane; nitrous oxide; mitigation strategy; global warming potential

全球气候变化不仅影响经济的可持续发展而且也将影响人类生存环境。人类活动排放大量温室气体进入大气层,是导致全球气候变化的主要原因,农业生产也是温室气体排放的主要来源之一。根据我国政府报告<sup>[1]</sup>,2014年中国温室气体净排放总量为111.86亿t二氧化碳(CO<sub>2</sub>)当量,其中CO<sub>2</sub>排放量约为91.24亿t,甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)分别为11.61亿t和6.10亿t(CO<sub>2</sub>当量);40%的CH<sub>4</sub>和60%的N<sub>2</sub>O来源于农业活动,其中水稻种植排放的CH<sub>4</sub>占农业活动排放量的40%,农用地土壤排放N<sub>2</sub>O占79%。

栽培稻生产是我国最重要的粮食生产方式之一。栽培稻在长期的选育过程中倾向于适应淹水环境,使栽培稻在淹水条件下能维持较高的产量。因此,为满足水稻高产稳产需求,在稻季进行淹水种植成为保障粮食安全的必然选择。稻田水分状况对温室气体的产生和排放起到重要的调控作用,通过管理稻田灌溉方式和土壤水分状况,调控稻田土壤中温室气体产生和消耗过程,可以实现减少稻田温室气体排放的目的。我国在20世纪80年代以后,为了减少水稻的无效分蘖、强化根系活力从而达到增产目的,稻田水分管理从传统持续淹灌转变为淹灌+中期烤田,该措施在达到水稻增产目的的同时,大幅减少了稻田CH<sub>4</sub>排放量(至2000年大约降低了500万t CH<sub>4</sub>排放量,相当于1.25亿t CO<sub>2</sub>当量)<sup>[2]</sup>,验证了水分管理减排稻田温室气体的巨大潜力。

另外,农业生产过程中产生的秸秆资源十分丰富,据估算我国每年作物秸秆产生量可达6亿~8亿t<sup>[3]</sup>。秸秆还田对稻田土壤有机质积累、土壤结构改善、地力提升等均具有明显的效果<sup>[4]</sup>。对于实施秸秆还田的稻田,秸秆还田措施在提升稻田土壤肥力的同时,为稻田CH<sub>4</sub>的产生提供了大量外源性有机质代谢底物。稻田淹水过程中,土壤中的秸秆等有机质在厌氧环境下进行分解,促进了稻田CH<sub>4</sub>的产生与排放,间接上降低了秸秆还田的环境效益<sup>[5]</sup>。而与持续淹灌相比,采用节水灌溉技术,可大幅降低稻田CH<sub>4</sub>排放,虽然一定程度上会促进土壤N<sub>2</sub>O的产生与排放<sup>[6-7]</sup>,但总体上,可在保障水稻产量的前提下,降低

稻田综合温室气体效应。因此,合理的水分管理不仅能大幅降低淹水稻田CH<sub>4</sub>的产生与排放,还能抑制因秸秆还田造成的CH<sub>4</sub>排放量增加的趋势,水分与秸秆的协同管理可保障秸秆还田在土壤保育和温室气体减排方面的综合环境效益,对于我国水稻生产的可持续发展具有重要指导意义。

## 1 水分管理对稻田温室气体排放的影响

### 1.1 节水灌溉管理减排稻田温室气体的效果

常见的稻田水分管理方式可分为常规灌溉和节水灌溉(图1)。常规灌溉根据水稻生育与需水特点,为了减少无效分蘖、提高水稻产量,已经从传统的持续淹灌(常规灌溉<sup>①</sup>)逐步发展到淹灌+中期烤田(常规灌溉<sup>②</sup>),或者前期淹灌+中期烤田+后期间隙式灌溉(常规灌溉<sup>③</sup>)。由于几种常规灌溉方式下稻田水分条件不同,温室气体排放也具有不同的规律。中期烤田使稻田土壤通气状况变好,O<sub>2</sub>含量升高,抑制了土壤中CH<sub>4</sub>的产生,促进了CH<sub>4</sub>的氧化<sup>[8]</sup>。因此,与常规灌溉<sup>①</sup>相比,常规灌溉<sup>②</sup>的中期烤田使CH<sub>4</sub>排放量降低20%~60%<sup>[9]</sup>;水稻移栽28d后进行为期9d的中期烤田,CH<sub>4</sub>降低50%~53%,N<sub>2</sub>O增加20%~37%,有效降低46%~50%的全球增温潜势(Global warming potential, GWP)<sup>[10]</sup>;和单次烤田相比,在水稻生长期进行多次烤田可减少更多的CH<sub>4</sub>排放量<sup>[11]</sup>;如果中期烤田后进行间歇灌溉(常规灌溉<sup>③</sup>),同样可有效减少CH<sub>4</sub>排放,从而降低综合GWP<sup>[12]</sup>。

节水灌溉以满足水稻基本需水要求为基础,根据种植区域水利条件、气候环境和土壤条件等制定详细的技术规程,在减少灌溉量的同时获得稳定产量。与常规灌溉保持一定深度的田面水层相比,节水灌溉一般保持土壤湿润或薄水层。水稻生产上较为成熟的节水灌溉技术主要有湿润灌溉、干湿交替(Alternate wetting and drying, AWD)和覆膜栽培等。水稻生产过程中减少灌溉量可显著降低温室气体排放量,与常规灌溉<sup>②</sup>相比,减少30%灌溉量可以降低30%~53%的CH<sub>4</sub>排放量,减少70%灌溉量可以降低51%~77%的CH<sub>4</sub>排放量<sup>[13]</sup>。

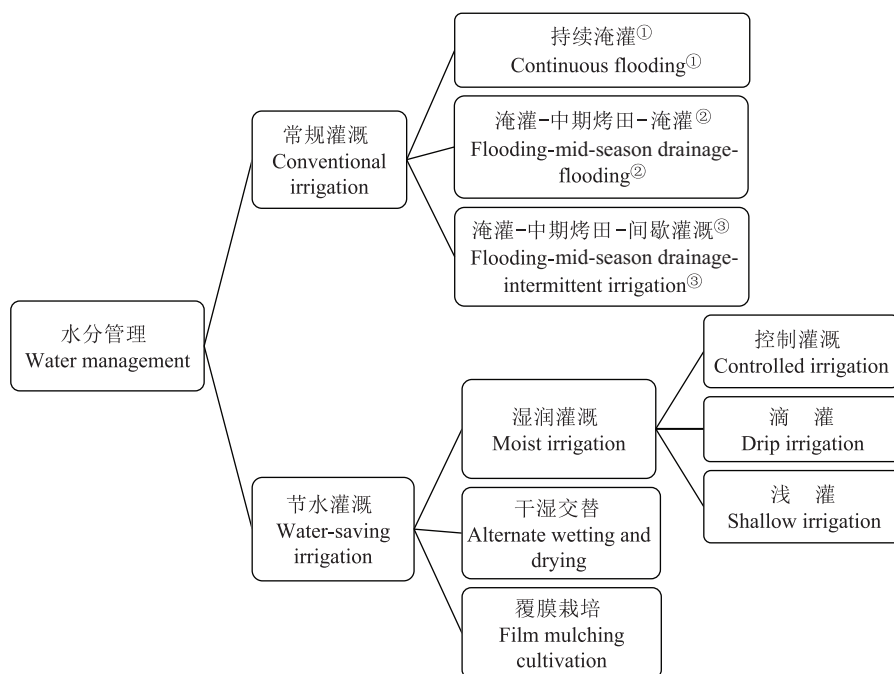


图1 稻田常规灌溉和节水灌溉管理方式

Figure 1 Conventional irrigation and water-saving irrigation management of paddy field

节水灌溉技术中的湿润灌溉模式基于水稻需水规律,满足水稻生长关键期需水,控制非关键期的灌溉量,可分为控制灌溉、滴灌以及浅灌模式。控制灌溉要求返青期水层0.5~2.5 cm,除施肥、打药、除草等外不再建立水层(降雨除外),以稻田土壤体积含水率作为灌水的调控指标,与常规灌溉<sup>②</sup>相比,稻田CH<sub>4</sub>排放量显著降低60%以上<sup>[14-15]</sup>;水稻滴灌生产模式下稻田CH<sub>4</sub>排放量比常规灌溉<sup>②</sup>降低90%,综合GWP降低36%<sup>[16]</sup>,从全生命周期角度进行评价的结果也表明滴灌减少50%的灌溉用水,显著降低66%的综合GWP<sup>[17]</sup>;浅灌模式仅需维持稻田1~2 cm的水层,与常规灌溉<sup>②</sup>相比,CH<sub>4</sub>排放未出现高峰值,总体排放通量显著降低,综合GWP减少78%<sup>[18]</sup>。

干湿交替基于设定的土壤水分阈值进行淹水-落干-复水-落干的水分管理,主要在我国南方和东南亚地区(如印度、印尼及菲律宾)主要水稻种植国家推广应用。与常规灌溉<sup>①</sup>相比,我国南方移栽稻田进行干湿交替管理,在节约19%~30%灌溉用水的同时,显著降低了37%~77%的CH<sub>4</sub>排放量<sup>[19]</sup>。在泰国直播稻田,干湿交替管理增加了12%的水稻产量,虽然CH<sub>4</sub>排放量降低的同时N<sub>2</sub>O排放量增加,但是综合GWP降低了22%<sup>[20]</sup>。N<sub>2</sub>O排放量增加主要是因为干湿交替管理造成土壤在润湿和干燥两种状况之间频繁切换,好氧环境下铵态氮通过硝化作用生成硝态

氮,在润湿的厌氧环境中硝态氮又容易反硝化产生N<sub>2</sub>O,所以干湿交替的稻田水分状况加剧了土壤中氮素的硝化-反硝化过程<sup>[21]</sup>,促进了N<sub>2</sub>O的生成和排放。另外,水稻覆膜栽培技术是将水稻直播或秧苗移栽至有地膜覆盖的地畦上,可有效降低灌溉用水<sup>[22-23]</sup>。与常规灌溉<sup>①</sup>移栽相比,覆膜移栽稻田在保持水稻稳产的同时,降低了63%的CH<sub>4</sub>排放量,虽然N<sub>2</sub>O排放量增加了4.1倍,但综合GWP降低了58%<sup>[24]</sup>。N<sub>2</sub>O排放量的增加可能是由于*qnorB*和AOA转录增强以及*nifH*转录降低的综合效应,促进了土壤矿化、硝化和反硝化作用<sup>[25]</sup>。

综上所述,节水灌溉措施在节约灌溉用水的同时,能大幅降低稻田CH<sub>4</sub>排放量,但由于促进了硝化和反硝化作用,会增加N<sub>2</sub>O排放量,但总体上降低了稻田综合GWP。另外,为降低劳动力投入和农资消耗量,减少水稻生产环节,实际生产中从传统育秧移栽改为稻田直播并配合节水灌溉是今后轻简化栽培的发展趋势,能达到稳产减排的目的<sup>[26-28]</sup>。与常规灌溉<sup>③</sup>的育秧移栽稻田相比,直播浅灌可显著降低CH<sub>4</sub>排放量,虽然N<sub>2</sub>O排放量增加,但综合GWP明显下降<sup>[29-30]</sup>。不同栽培模式下水分管理对稻田温室气体排放量和产量的影响效果见表1。综合而言,插秧移栽采用控制灌溉或浅灌,基本能兼顾稳产减排;插秧移栽进行覆膜栽培时,能在保持水稻产量的同时,大

表1 不同节水灌溉措施对稻田温室气体排放量及产量的影响效果

Table 1 Effect of water-saving irrigation measures on greenhouse gas emission and yield in rice field

| 栽培模式<br>Cultivation  | 水分管理<br>Water management                            | CH <sub>4</sub> 排放量<br>CH <sub>4</sub> emission | N <sub>2</sub> O 排放量<br>N <sub>2</sub> O emission | 全球增温潜势<br>GWP            | 产量<br>Yield             | 文献<br>Reference     |
|----------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 移栽<br>Transplant     | 湿润灌溉-控制灌溉<br>Moist irrigation-Controlled irrigation | -84%~-79% <sup>①②</sup>                         | 4%~137% <sup>①</sup>                              | -62%~-41% <sup>①</sup>   | -2%~7% <sup>①②</sup>    | [14-15, 31]         |
|                      | 湿润灌溉-浅灌<br>Moist irrigation-Shallow irrigation      | -78%~-32% <sup>①②③</sup>                        | 17%~533% <sup>①③</sup>                            | -78%~-21% <sup>①③</sup>  | -11%~7% <sup>①②③</sup>  | [13, 18, 30, 32-33] |
|                      | 干湿交替<br>Alternate wetting and drying                | -72%~-31% <sup>①</sup>                          | 11%~70% <sup>①</sup>                              | -50%~25% <sup>①</sup>    | 3%~4% <sup>①</sup>      | [19, 34-35]         |
|                      | 覆膜栽培<br>Film mulching cultivation                   | -69%~-63% <sup>①②</sup>                         | 40%~413% <sup>①②</sup>                            | -58%~-5% <sup>①②</sup>   | 0~9% <sup>①②</sup>      | [24, 36]            |
|                      | 湿润灌溉-滴灌<br>Moist irrigation-Drip irrigation         | -28% <sup>①</sup>                               | -100% <sup>①</sup>                                | -66%~-37% <sup>①</sup>   | -28% <sup>①</sup>       | [16-17]             |
| 直播<br>Direct seeding | 干湿交替<br>Alternate wetting and drying                | -31%~-22% <sup>①</sup>                          | 8%~25% <sup>①</sup>                               | -22%~-21% <sup>①</sup>   | 7%~12% <sup>①</sup>     | [20, 37]            |
|                      | 覆膜栽培<br>Film mulching cultivation                   | -132%~-100% <sup>①②</sup>                       | -59%~867% <sup>①②</sup>                           | -103%~475% <sup>①②</sup> | -19%~-12% <sup>①②</sup> | [38-39]             |
|                      |                                                     |                                                 |                                                   |                          |                         |                     |

注:表中数值代表与常规灌溉稻田相比节水灌溉的影响效果,其中负值代表降低量,正值代表增加量;上标<sup>①</sup>、<sup>②</sup>和<sup>③</sup>分别代表对照是常规灌溉中的持续淹灌、淹灌-中期烤田-淹灌和淹灌-中期烤田-间歇灌溉。

Note: The values represent the effect of water-saving irrigation compared with that of conventional irrigation, in which the negative value represents the decrease and the positive value represents the increase; the superscripts <sup>①</sup>, <sup>②</sup> and <sup>③</sup> respectively represent the continuous flooding, flooding-mid-season drainage-flooding and flooding-mid-season drainage-intermittent irrigation in conventional irrigation.

幅降低CH<sub>4</sub>排放量,但N<sub>2</sub>O增加较大;干湿交替无论是对插秧移栽还是直播都有增产效果,同时具有较好的减排效果;而直播栽培采用滴灌或覆膜,减产幅度较大。因此,插秧移栽采用控制灌溉或浅灌,以及不管插秧移栽还是直播都可采用干湿交替管理方式,均有利于实现作物稳产和温室气体减排的目标。

1.2 不同种植类型的水分条件对稻田温室气体排放的影响

由于水稻种植区域的环境条件不同,水稻种植类型及其水分管理方式具有鲜明的地域特色。除传统淹灌稻田外,常见的基于当地环境条件的水分管理还包括雨养稻、深水稻和旱稻等。雨养稻和深水稻多见于东南亚地区,是为充分适应季节性洪涝或干旱环境而衍生出来的水分管理模式。雨养稻在稻季排放的CH<sub>4</sub>是淹灌稻季的40%<sup>[40]</sup>;深水稻的CH<sub>4</sub>排放通量比常规灌溉<sup>①</sup>减少42%,但因其稻季持续时间长,总排放量反而增加了32%<sup>[41]</sup>。

与传统水稻淹水种植不同,旱稻多种植于没有田埂的地里,传统意义上的旱稻产量较低。在菲律宾旱季分别对水稻进行淹水灌溉和旱管种植管理(旱管种植是指整个生长发育期间以利用雨水为主,或缺水敏感期适当灌溉的种植方式)<sup>[42]</sup>,与淹灌相比,旱管种植条件下CH<sub>4</sub>排放量显著降低90%以上,N<sub>2</sub>O排放量增

加了50%,但旱管种植条件下稻谷产量显著下降<sup>[43]</sup>;与水稻淹灌相比,旱稻生长期维持70%的田间持水量可以大幅度降低CH<sub>4</sub>排放量,降低幅度高达90%以上,N<sub>2</sub>O显著增加,增加量为188%,同时产量保持相对稳定<sup>[44]</sup>。近年来我国研发出不同于水稻和旱稻的新型栽培稻品种——节水抗旱稻,节水抗旱稻既具有水稻的高产优质特性又具有旱稻的节水抗旱特性,具有较好的抗旱能力,适用于旱管种植,在节水50%时产量和品质与传统水稻持平<sup>[45]</sup>。节水抗旱稻在接近旱管(灌溉量减少70%)种植条件下,与常规灌溉<sup>②</sup>相比,CH<sub>4</sub>排放量降低了51%~77%,而产量能够保持相对稳定<sup>[13]</sup>。

1.3 水肥耦合管理对稻田温室气体排放的影响

一般情况下,稻田CH<sub>4</sub>排放和N<sub>2</sub>O排放呈现此消彼长的关系。室内培养试验表明,在土壤深层(7.5 cm)氧化还原电位(Eh)低于-150 mV时CH<sub>4</sub>排放增强;土壤表层(2 cm)Eh高于140 mV时N<sub>2</sub>O排放增强<sup>[46]</sup>;但是当土壤水分增加到土壤孔隙含水量为75%时,N<sub>2</sub>O排放达到最高。这主要是因为N<sub>2</sub>O不仅来源于硝化作用,也来自反硝化作用<sup>[47]</sup>。利用节水灌溉措施对稻田CH<sub>4</sub>进行减排时,由于稻田土壤氧化还原状况的交替变化,会促进N<sub>2</sub>O的排放,而产生N<sub>2</sub>O的氮素主要来自田间施肥。氮肥是硝化和反硝化作用的

重要底物,当氮肥施入稻田后,稻田土壤从淹水到落干阶段硝化作用加强,有利于铵态氮转化为硝态氮,促进 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放;灌溉复水后,土壤通气性变差,为反硝化作用提供了厌氧环境,同时前期生成的大量硝态氮为反硝化作用提供了充足的底物,硝化和反硝化的共同作用促进了 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放。因此,通过水分管理耦合施肥措施控制 $\text{N}_2\text{O}$ 的生成和排放是综合减排稻田温室气体的重要途径。

研究证实, $\text{N}_2\text{O}$ 排放量随氮肥施用量的增加而增加<sup>[48]</sup>,因此,降低氮肥施入量是最基本的减排措施。合适的施氮量可使土壤中的有效氮素在分蘖盛期被消耗掉,从而减少产生 $\text{N}_2\text{O}$ 的底物浓度;采用干湿交替等节水灌溉措施时,铵态氮转化为硝态氮是产生 $\text{N}_2\text{O}$ 的重要途径,通过施加缓释肥或在氮肥中添加硝化抑制剂、脲酶抑制剂等可有效降低 $\text{N}_2\text{O}$ 排放<sup>[49]</sup>。因此,采用节水灌溉减排稻田 $\text{CH}_4$ 时,通过耦合氮肥施用措施可同时降低 $\text{N}_2\text{O}$ 排放,从而减少稻田综合温室气体排放强度。例如干湿交替灌溉模式下通过耦合缓释肥、硝化抑制剂+脲酶抑制剂的施肥管理措施,在降低 $\text{CH}_4$ 排放量的同时,有效降低了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量,降低幅度分别为28%~49%和12%~44%<sup>[50]</sup>。

## 2 秸秆管理对稻田温室气体排放的影响

### 2.1 秸秆离田与还田管理对稻田温室气体排放的影响

作物秸秆是重要的生物质资源,2015年我国秸秆综合利用率达到80.1%,主要利用方式有秸秆肥料化、饲料化、燃料化、原料化和基料化。从秸秆类型来看,小麦、水稻秸秆以肥料化利用为主,利用率分别为63.1%和55.2%<sup>[51]</sup>。除了秸秆作为肥料还田利用外,其他几种利用方式均属于秸秆离田综合利用。秸秆离田使生产过程中产生的大部分秸秆生物质被带离稻田土壤。因此,水稻季的 $\text{CH}_4$ 排放量大幅下降,只有秸秆还田的22%~33%<sup>[52-53]</sup>。离田秸秆经过加工处理,有的作为肥料或改良剂等又返还到稻田,例如近年来研究较多的秸秆生物质炭的加工与施用,其对稻田温室气体排放的影响不同于秸秆直接还田。有的研究表明,在常规氮肥施用条件下,稻田土壤添加小麦秸秆生物质炭可显著降低水稻季 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量,但对稻田 $\text{CH}_4$ 排放量没有显著影响<sup>[54]</sup>;而有的研究则表明,水稻和小麦秸秆加工而成的生物质炭,均可显著降低稻田 $\text{CH}_4$ 排放量,同时稻田 $\text{CH}_4$ 排放量与生物质炭施用量成显著负相关,并且水稻和小麦秸秆生物质炭之间没有显著差异<sup>[55]</sup>。总体而言,在相同水肥管理

条件下,离田秸秆进行炭化后再还田可不同程度地降低稻田综合温室气体排放强度。

和秸秆离田利用相比,水稻和小麦秸秆的直接还田肥料化利用仍是目前最主要的管理方式,根据还田秸秆量的多寡可分为全量还田和减量还田。在相同水肥管理条件下,小麦秸秆还田可导致水稻季稻田 $\text{CH}_4$ 排放量显著增加,但同时会一定程度抑制 $\text{N}_2\text{O}$ 排放,但在总体上导致水稻季 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放产生的综合GWP显著升高<sup>[6,56-57]</sup>。水稻秸秆是双季稻田秸秆还田的主要投入物料,双季稻的水稻秸秆还田对稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量的影响与小麦秸秆还田效果一致<sup>[58-59]</sup>,并且晚稻季的 $\text{CH}_4$ 排放量受秸秆还田的影响比早稻季大<sup>[58]</sup>。秸秆还田导致水稻季 $\text{CH}_4$ 排放量增加,主要是由于秸秆直接还田导致稻田土壤系统中外源性碳源增加,在水稻季前期,还田秸秆在稻田土壤厌氧环境中分解,为产甲烷微生物提供额外的能量和碳代谢底物,从而促进了稻田土壤 $\text{CH}_4$ 的产生与排放,并且秸秆还田量与稻田 $\text{CH}_4$ 排放量呈正相关关系<sup>[53,60-61]</sup>;而稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放受到抑制,秸秆还田量与稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量之间则呈现负相关关系<sup>[62]</sup>,这可能是由于作物秸秆在分解过程中快速消耗稻田土壤中的 $\text{O}_2$ ,造成秸秆分解区域周围的稻田土壤处于强还原环境,由于在强还原环境下 $\text{N}_2\text{O}$ 易被还原为 $\text{N}_2$ ,因此降低了稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量<sup>[56]</sup>。此外由于秸秆施用导致稻田土壤C/N增加,影响稻田土壤中硝化与反硝化过程可利用的氮素量,从而抑制产生 $\text{N}_2\text{O}$ 的相关氮循环过程,最终影响稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 的产生与排放<sup>[63]</sup>。

### 2.2 秸秆还田方式对稻田温室气体排放的影响

秸秆还田从施用方式上主要包括旋耕还田、翻耕还田、沟埋还田、免耕还田(表层覆盖)等形式,其中旋耕、翻耕和沟埋方式为秸秆埋施还田,以秸秆和稻田土壤混合为特点。秸秆在旋耕与翻耕还田过程中与土壤混合比较充分,而沟埋还田以开沟秸秆集中覆埋为特点,相对减少了秸秆与稻田土壤的接触;免耕还田则多为秸秆直接覆盖于土壤表面。无论秸秆以何种形式施入稻田土壤,和无秸秆还田相比,温室气体排放量均有较大幅度提高,但秸秆还田也相应地提高了作物产量。

秸秆以旋耕或翻耕方式还田的稻田 $\text{CH}_4$ 排放速率较高,旋耕还田的稻田 $\text{CH}_4$ 排放速率一般大于翻耕还田方式<sup>[64-65]</sup>,或者基本相同<sup>[66]</sup>。与旋耕和翻耕还田方式相比,秸秆免耕还田可使稻田 $\text{CH}_4$ 排放速率降低27%和24.3%,并且推迟了 $\text{CH}_4$ 排放峰值出现的时间,

主要是与水稻季前期实行浅灌有关;同时免耕还田降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率 16.7% 和 42.1%<sup>[66]</sup>。在浅灌条件下,免耕还田秸秆与旋耕、翻耕还田秸秆相比,处于非严格厌氧环境,其好氧分解程度更高,因此减少了分解产物向  $\text{CH}_4$  的转化。但如果水稻季前期免耕还田(表层覆盖)秸秆与土壤接触少,分解速度慢,不仅降低了水稻季前期稻田土壤 Eh,为  $\text{CH}_4$  的产生提供了有利环境,而且增加了淹水期稻田的有机质供应量,为产甲烷菌提供了更多的反应底物,反而会促进水稻季的  $\text{CH}_4$  累积排放量,使秸秆免耕还田的  $\text{CH}_4$  累积排放量比旋耕还田或均匀混施还要高<sup>[67-68]</sup>。因此,秸秆免耕还田(表层覆盖)需要协同合适的水分管理,才能达到降低稻田温室气体排放的目的。另外,与秸秆旋耕或翻耕还田相比,沟埋还田可降低稻田温室气体排放强度<sup>[67,69]</sup>。与翻耕还田相比,沟埋还田条件下  $\text{CH}_4$  排放量平均减少了 11%~42%,虽然  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增至 1.0~1.4 倍<sup>[69]</sup>,但综合温室气体排放强度降低了 6%~35%。 $\text{N}_2\text{O}$  排放量的增加表明秸秆沟埋还田对于稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的抑制作用可能具有时滞效应。一般来说,在长年秸秆还田条件下,稻田土壤碳库的累积效应可导致土壤 C/N 升高,进而增加土壤固持氮的能力,相应地减少土壤硝化和反硝化过程可利用的氮素含量,从而减少  $\text{N}_2\text{O}$  的产生<sup>[61,63]</sup>。

### 2.3 秸秆还田时机对稻田温室气体排放的影响

秸秆还田本质上是外源性有机质向稻田土壤系统的输入过程,该过程通过增加外源碳、氮底物供给刺激稻田土壤碳氮循环过程,从而促进了稻田  $\text{CH}_4$  的产生和排放。秸秆还田的时机选择对水稻季稻田温室气体排放也具有重要影响,水稻秸秆在休闲季施用,与水稻移栽前还田相比,可以使秸秆在好氧条件下一定程度地分解,从而减少水稻季稻田土壤中秸秆厌氧分解过程中产生  $\text{CH}_4$  的相关底物,进而显著降低秸秆对水稻季  $\text{CH}_4$  排放的促进效应<sup>[70]</sup>。另外,与休闲季后的整田期施用水稻秸秆相比,休闲季前施用水稻秸秆可减少水稻季 11% 的  $\text{CH}_4$  排放<sup>[71]</sup>,该结果也印证了上述研究结果,即延长水稻种植前的好氧分解过程,可有效减少还田秸秆在水稻季对  $\text{CH}_4$  排放的促进作用。IPCC 发布的《国家温室气体清单指南》中也指出,与水稻移栽前施用秸秆相比,休闲季施用秸秆会降低由秸秆还田引起的水稻季  $\text{CH}_4$  排放<sup>[72]</sup>。上述结果均表明,与秸秆在农田淹水状态下还田或还田后立即淹水相比,休闲季或旱作季施用秸秆,使秸秆在土壤中经历更长的好氧分解过程,可以部分减缓由秸秆

还田引起的  $\text{CH}_4$  产生与排放。

### 2.4 绿肥还田对稻田温室气体排放的影响

稻-绿肥茬口轮作是一种重要的稻田生产模式。稻田绿肥作物主要以豆科作物为主,常见绿肥作物包括:蚕豆、豌豆、苜蓿和紫云英。利用 DNDC 模型结合实测数据的研究结果表明,水稻季苜蓿和蚕豆全量还田均显著增加水稻季  $\text{CH}_4$  排放量,其中蚕豆全量还田对稻田  $\text{CH}_4$  排放的促进作用大于苜蓿还田<sup>[73]</sup>。双季稻田施用紫云英,在早、晚稻季均导致稻田  $\text{CH}_4$  排放量显著增加,而  $\text{N}_2\text{O}$  排放量则显著降低<sup>[74]</sup>。绿肥还田对稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响机制与稻、麦秸秆还田对稻田  $\text{CH}_4$  排放的促进机制基本相同。例如紫云英施用导致稻田土壤  $\text{CH}_4$  排放量增加,主要是由于绿肥还田增加了稻田土壤还原性物质含量,降低土壤 Eh,促进了  $\text{CH}_4$  排放<sup>[62]</sup>。

绿肥还田对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的抑制作用与稻、麦秸秆还田对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响机制基本相似,但略有差异。与稻、麦等禾本科作物秸秆相比,豆科绿肥作物植株 C/N 更低,其平均值在 15:1~20:1 之间<sup>[75]</sup>。在此基础上,相比于稻、麦秸秆还田,绿肥还田及其分解过程中,基本不会对稻田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放产生的关键氮循环过程产生氮素胁迫。因此,绿肥还田对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的抑制作用,主要被认为是绿肥分解过程中释放的还原性物质,改变了稻田土壤氧化还原特征,促进淹水稻田土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  向  $\text{N}_2$  的转化,从而抑制稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[62]</sup>。

## 3 水分和秸秆协同管理对稻田温室气体排放的影响

### 3.1 水分和秸秆协同管理对稻田 $\text{CH}_4$ 排放的影响

无论是在常规灌溉还是节水灌溉条件下,和无秸秆还田相比,秸秆还田均会促进  $\text{CH}_4$  排放<sup>[53]</sup>。与常规灌溉相比,节水灌溉措施可显著降低秸秆还田条件下稻田  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[9,11]</sup>。在同等秸秆还田量条件下,控制灌溉与常规灌溉<sup>②</sup>相比,稻田  $\text{CH}_4$  排放量下降了 58%~63%<sup>[53]</sup>。另外,如前文所述,秸秆免耕还田时水稻季前期实行浅水灌溉管理,可促进秸秆有机质的好氧分解,减少分解产物向  $\text{CH}_4$  转化,显著降低  $\text{CH}_4$  排放量。虽然秸秆还田条件下稻田覆膜滴灌的相关研究资料较少,但与常规灌溉<sup>①</sup>相比,绿肥还田条件下的覆膜滴灌可显著降低稻田  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[38]</sup>,秸秆还田条件下的覆膜湿润灌溉和秸秆覆盖湿润灌溉亦显著降低稻田  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[26]</sup>。

### 3.2 水分和秸秆协同管理对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要受氮肥施用水平和土壤水分条件的影响,常规灌溉时的中期烤田或节水灌溉措施会刺激稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[56,76]</sup>。在相同水肥管理条件下,受外源性有机质输入和稻田土壤氧化还原响应特征的调控,和无秸秆还田稻田相比,秸秆还田稻田的  $\text{N}_2\text{O}$  排放有降低的趋势。相较常规灌溉<sup>①</sup>稻田,覆膜湿润灌溉和秸秆覆盖湿润灌溉的稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量均显著增加<sup>[7]</sup>,且两种节水灌溉方式之间无显著差异。在绿肥还田条件下,覆膜滴灌稻田与常规灌溉<sup>①</sup>稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量之间无显著差异<sup>[38]</sup>。两项研究结果的差异,可能是由于实验过程中土壤水分控制差异所致。另一项土壤培养实验结果则表明,在一定的土壤含水量( $0.25\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ )条件下,秸秆等外源性有机质输入可导致土壤系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著增加<sup>[77]</sup>,主要是由于肥料和秸秆中的氮源参与了硝化反应,促进  $\text{N}_2\text{O}$  的产生与排放;同样,如果稻田土壤处于水分不饱和状态,土壤氧化还原状态利于硝化作用的发生,从而导致  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著增加<sup>[7]</sup>。综上所述,与稻田  $\text{CH}_4$  排放响应相似,水分管理与秸秆还田协同作用下,水分管理是影响稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主导因素。常规灌溉<sup>①</sup>增加稻田土壤还原性,抑制稻田土壤硝化作用的同时促进  $\text{N}_2\text{O}$  向  $\text{N}_2$  转化,因此,  $\text{N}_2\text{O}$  排放量低。而节水灌溉(湿润灌溉、干湿交替及覆膜等)条件下,土壤处于好氧-厌氧的交替状态,硝化-反硝化作用增强,最终促进稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的产生与排放。

### 3.3 水分和秸秆协同管理对稻田综合温室效应的影响

由于稻田  $\text{CH}_4$  的产生途径主要是产甲烷菌参与下的有机质厌氧分解,而好氧条件下的硝化作用是  $\text{N}_2\text{O}$  产生的主要反应过程,因此水分管理条件下稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放之间通常具有相反的消长趋势<sup>[56,63,78]</sup>,例如干湿交替造成稻田水分落干和淹水之间频繁交替,导致  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰交替出现,虽然  $\text{CH}_4$  排放引起的温室效应显著低于常规灌溉<sup>①</sup>,但  $\text{N}_2\text{O}$  排放引起的温室效应可能会增加;另外,秸秆还田是大量外源有机质输入稻田土壤系统的过程,显著增加水稻季  $\text{CH}_4$  排放引起的温室效应。与常规灌溉<sup>①</sup>稻田相比,秸秆免耕还田(表层覆盖)条件下的湿润灌溉可降低稻田  $\text{CH}_4$  排放量达 94.6%,但同时也使稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量提高 5.16 倍,最终仅使稻田综合温室效应降低 9.8%,基本抵消了稻草免耕还田产生的  $\text{CH}_4$  减排贡献<sup>[7]</sup>。因此,协同运筹管理水分与秸秆还田,是降低秸秆还田对环境不利影响的重要手段。在秸秆还田

条件下,通过协同节水灌溉可大幅减少稻田  $\text{CH}_4$  排放量,但同时需要采取减少施氮量、添加硝化抑制剂等降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放的措施,避免大量产生  $\text{N}_2\text{O}$ ,防止减排  $\text{CH}_4$  的环境效益被增加的  $\text{N}_2\text{O}$  排放所抵消。

## 4 结论与展望

### 4.1 主要结论

水分管理对稻田温室气体减排至关重要。中期烤田、间隙灌溉等常规灌溉中的措施不仅有利于增产,也降低了稻田  $\text{CH}_4$  排放量。节水灌溉基于水稻需水特性减少灌溉量,进一步改变了稻田土壤氧化还原状况,从而抑制  $\text{CH}_4$  的生成并促进  $\text{CH}_4$  的氧化,大幅减少稻田  $\text{CH}_4$  排放量,但由于稻田土壤中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  此消彼长的排放规律,节水灌溉在显著降低  $\text{CH}_4$  排放的同时,也可能促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。因此,为进一步提升节水灌溉技术减排稻田温室气体的效果,水肥耦合管理是关键所在。通过文献分析可知,插秧移栽采用控制灌溉或浅灌,以及无论插秧移栽还是直播采用干湿交替管理方式,均有利于实现作物稳产和温室气体减排的目标,尤其是采用干湿交替等节水灌溉耦合缓释肥或添加硝化抑制剂,在降低稻田  $\text{CH}_4$  排放量的同时,能有效抑制  $\text{N}_2\text{O}$  的生成和排放。

秸秆还田是最重要的秸秆利用方式,既改良土壤肥力,又有利于作物增产。秸秆还田虽然有抑制  $\text{N}_2\text{O}$  生成与排放的潜力,但增加了稻田土壤有机质的输入,促进了稻田  $\text{CH}_4$  的排放。减少因秸秆还田造成的  $\text{CH}_4$  排放关键在于采用合适的秸秆还田方式与时机,创造秸秆好氧分解环境,减少秸秆处于厌氧环境的时间。因此,秸秆还田与稻田水分状况的耦合就显得尤为重要,可行的措施包括秸秆在稻田休闲季还田、秸秆沟埋还田适当降低秸秆与土壤的混合程度、秸秆免耕还田配合湿润灌溉等,以上均可显著降低  $\text{CH}_4$  排放量。

### 4.2 研究展望

稻田生态系统对于保障我国粮食安全、维护经济社会可持续发展具有重要的作用。为更好发挥稻田生态系统的生产与生态功能,适应水稻生产发展新趋势,降低稻田温室气体排放强度,今后需要考虑从以下几个方面开展研究:

(1)为进一步减少节水灌溉模式下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,一方面,今后需要深入研究如何优化节水灌溉条件下的施肥措施,研发适用于节水稻田水分特性的专用缓释肥,提高作物氮素利用率,增强土壤氮素固持能力,从而抑制  $\text{N}_2\text{O}$  的生成与排放,达到同时减少稻田  $\text{CH}_4$

和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的目的。另一方面,秸秆还田是对稻田土壤碳库的有效补充,本质上是将一部分光合作用固定下来的 $\text{CO}_2$ 通过秸秆还田储存于稻田土壤。因此,为综合评估稻田温室效应,需要针对秸秆还田土壤有机质(碳库)变化和温室气体排放开展长期的观测,综合定量评估秸秆还田形成的土壤固碳与温室气体排放之间的关系。

(2)近年来新型品种与栽培管理技术不断成熟与推广。例如新型栽培稻品种——节水抗旱稻结合旱管种植的栽培方式,生长发育期间以利用雨水为主,或仅在缺水敏感期适当灌溉,整个稻季田间基本处于无淹水状况,彻底改变了传统稻田土壤的水分状况,在保证产量稳定的同时大幅减少灌溉用水量和 $\text{CH}_4$ 排放量。因此,深入研究新型栽培稻品种在旱管种植条件下的稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 协同减排机制、土壤有机质变迁与碳氮动态等,可为大规模推广旱管种植减排稻田温室气体技术提供科学依据和技术支撑。

(3)利用稻田的水环境养殖虾蟹类、鱼类、鸭等水产或水禽的新型稻田种养结合模式近年来得到了迅速发展,此类“水稻+水产/水禽”的互利共生模式提高了稻田综合利用率,增加了农民收益,是实现稻作供给侧改革的重要措施。稻田种养模式的水肥管理不仅要满足水稻的生长需要,养殖期间还必须维持一定的水层,有些养殖甚至需要投入饵料,这增加了水土环境的有机质含量,在厌氧环境下可能会促进 $\text{CH}_4$ 的大量排放。因此,如何优化稻田种养系统的水分管理,合理移除水稻秸秆,减少饵料等有机物料投入,调控整个系统的碳氮收支平衡,从而降低温室气体排放总量,是减少新型种养结合模式综合温室效应的重要研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 中国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R]. 北京:中国生态环境部, 2018.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The People's Republic of China Second biennial update report on climate change[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2008.
- [2] Li C S, Qiu J J, Frolking S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980—2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20): 33. doi:10.1029/2002GL015370.
- [3] 彭春艳, 罗怀良, 孔 静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 14-20.  
PENG Chun-yan, LUO Huai-liang, KONG Jing. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3): 14-20.
- [4] 劳秀荣, 孙伟红, 王 真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.  
LAO Xiu-rong, SUN Wei-hong, WANG Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618-623.
- [5] Ma J, Xu H, Yagi K, et al. Methane emission from paddy soils as affected by wheat straw returning mode[J]. *Plant and Soil*, 2008, 313(1/2): 167-174.
- [6] Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice-wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(5): 691-698.
- [7] Xu Y C, Shen Q R, Li M L, et al. Effect of soil water status and mulching on  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emission from lowland rice field in China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(3): 215-217.
- [8] Yagi K, Tsuruta H, Minami K. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1): 213-220.
- [9] Li C S, Salas W, Deangelo B, et al. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1554-1565.
- [10] Haque M M, Kim G W, Kim P J, et al. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 133-142.
- [11] Sander B O, Wassmann R, Siopongco J D L C. Mitigating greenhouse gas emissions from rice production through water-saving techniques: Potential, adoption and empirical evidence[M]. 8. Cabi Publishing-C a B Int, Cabi Publishing, Wallingford Ox10 8de, Oxon, UK, 2016: 193-207.
- [12] 朱士江. 寒地稻作不同灌溉模式的节水及温室气体排放效应试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.  
ZHU Shi-jiang. Experiment for water-saving and greenhouse effect of irrigation mode in cold rice area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.
- [13] Sun H, Zhou S, Song X, et al.  $\text{CH}_4$  Emission in response to water-saving and drought-resistance rice(WDR) and common rice varieties under different irrigation managements[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2016, 227(2). doi:10.1007/S11270-015-2741-7.
- [14] Hou H, Yang S, Wang F, et al. Controlled irrigation mitigates the annual integrative global warming potential of methane and nitrous oxide from the rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86: 239-246.
- [15] 彭世彰, 和玉璞, 杨士红, 等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 100-107.  
PENG Shi-zhang, HE Yu-pu, YANG Shi-hong, et al. Mitigation of methane emissions from paddy fields under controlled irrigation[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8):100–107.
- [16] Fangueiro D, Becerra D, Albarran A, et al. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing eco-systems[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 150:303–312.
- [17] Coltro L, Marton L F M, Pilecco F P, et al. Environmental profile of rice production in southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153(1):491–505.
- [18] Ahn J H, Choi M Y, Kim B Y, et al. Effects of water-saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil[J]. *Microbial Ecology*, 2014, 68(2):271–283.
- [19] Liang K, Zhong X, Huang N, et al. Grain yield, water productivity and CH<sub>4</sub> emission of irrigated rice in response to water management in south China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163:319–331.
- [20] Maneepitak S, Ullah H, Datta A, et al. Effects of water and rice straw management practices on water savings and greenhouse gas emissions from a double-rice paddy field in the central plain of Thailand[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 107:18–29.
- [21] Katayanagi N, Furukawa Y, Fumoto T, et al. Validation of the DNDC-rice model by using CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux data from rice cultivated in pots under alternate wetting and drying irrigation management[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(3):360–372.
- [22] 黄新宇, 徐阳春, 沈其荣, 等. 不同地表覆盖旱作水稻和水作水稻水分利用效率的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3):140–143.  
HUANG Xin-yu, XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, et al. Water use efficiency of rice crop cultivated under waterlogged and aerobic soil mulched with different materials[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3):140–143.
- [23] Tao Y Y, Zhang Y N, Jin X X, et al. More rice with less water – evaluation of yield and resource use efficiency in ground cover rice production system with transplanting[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 68:13–21.
- [24] Zhang G, Yang Y, Huang Q, et al. Reducing yield-scaled global warming potential and water use by rice plastic film mulching in a winter flooded paddy field[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 114:126007.
- [25] Chen Z, Lin S, Yao Z, et al. Enhanced nitrogen cycling and N<sub>2</sub>O loss in water-saving ground cover rice production systems (GCRPS) [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 121:77–86.
- [26] Cabangon R J, Tuong T P, Abdullah N B. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 57(1):11–31.
- [27] Kumar V, Ladha J K. Direct seeding of rice: Recent developments and future research needs[M]//Sparks D L, editor. *Advances in Agronomy*, Vol 111, San Diego: Elsevier Academic Press Inc, 2011: 297–413.
- [28] Farooq M, Siddique K H M, Rehman H, et al. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 111(2):87–98.
- [29] Liu S, Zhang Y, Lin F, et al. Methane and nitrous oxide emissions from direct-seeded and seedling-transplanted rice paddies in south-east China[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2):285–297.
- [30] Gupta D K, Bhatia A, Kumar A, et al. Mitigation of greenhouse gas emission from rice-wheat system of the Indo-Gangetic plains: Through tillage, irrigation and fertilizer management[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 230:1–9.
- [31] Yang S, Peng S, Xu J, et al. Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, 53/54:30–37.
- [32] Win K T, Nonaka R, Win A T, et al. Effects of water saving irrigation and rice variety on greenhouse gas emissions and water use efficiency in a paddy field fertilized with anaerobically digested pig slurry[J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, 13(1):51–60.
- [33] Liu G, Yu H, Zhang G, et al. Combination of wet irrigation and nitrification inhibitor reduced nitrous oxide and methane emissions from a rice cropping system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17):17426–17436.
- [34] Liang L, Lal R, Ridoutt B G, et al. Multi-indicator assessment of a water-saving agricultural engineering project in north Beijing, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 200:34–46.
- [35] Oo A Z, Sudo S, Inubushi K, et al. Mitigation potential and yield-scaled global warming potential of early-season drainage from a rice paddy in Tamil Nadu, India[J]. *Agronomy-Basel*, 2018, 8(10):202.
- [36] Yao Z, Du Y, Tao Y, et al. Water-saving ground cover rice production system reduces net greenhouse gas fluxes in an annual rice-based cropping system[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(22):6221–6236.
- [37] Thi Thai Hoa H, Dinh Thuc D, Thi Thu Giang T, et al. Incorporation of rice straw mitigates CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in water saving paddy fields of central Vietnam[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(1):113–124.
- [38] Fawibe O O, Honda K, Taguchi Y, et al. Greenhouse gas emissions from rice field cultivation with drip irrigation and plastic film mulch [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 113(1):51–62.
- [39] Kreye C, Dittert K, Zheng X, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(3):293–304.
- [40] Wassmann R, Neue H U, Lantin R S, et al. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. II. Differences among irrigated, rainfed, and deepwater rice[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1):13–22.
- [41] Chareonsilp N, Buddhaboon C, Promnart P, et al. Methane emission from deepwater rice fields in Thailand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/2/3):121–130.
- [42] 中华人民共和国农业部. 节水抗旱稻术语[M]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2015.  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Water-saving and drought-resistance rice(NY/T 2862—2015): Terminology[M]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2015.
- [43] Weller S, Janz B, Joerg L, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation

- systems[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(1):432-448.
- [44] Khaliq M A, Khan Tarin M W, Jingxia G, et al. Soil liming effects on CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O emission and Cd, Pb accumulation in upland and paddy rice [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 248:408-420.
- [45] 罗利军. 节水抗旱稻的培育与应用[J]. 生命科学, 2018, 30(10): 1108-1112.
- LUO Li-jun. Development of water-saving and drought-resistance rice(WDR)[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2018, 30(10):1108-1112.
- [46] Johnson-Beebout S E, Angeles O R, Alberto M C R, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants[J]. *Geoderma*, 2009, 149(1/2): 45-53.
- [47] Tan X, Shao D, Gu W. Effects of temperature and soil moisture on gross nitrification and denitrification rates of a Chinese lowland paddy field soil[J]. *Paddy and Water Environment*, 2018, 16(4):687-698.
- [48] Nie T, Chen P, Zhang Z, 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. doi:10.3390/ijerph16091639.
- [49] Linnquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135:10-21.
- [50] Li J, Li Y E, Wan Y, 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.
- [51] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13):218-224.
- HUO Li-li, ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo, et al. Study on straw multi-use potential in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13):218-224.
- [52] Sun H, Zhou S, Zhang J, et al. Year-to-year climate variability affects methane emission from paddy fields under irrigated conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020. doi: 10.1007/s11356-020-07951-w.
- [53] Nie T, Chen P, Zhang Z, et al. Effects of irrigation method and rice straw incorporation on CH<sub>4</sub> emissions of paddy fields in northeast China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2020, 18:111-120.
- [54] 张 斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23):4844-4853.
- ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844-4853.
- [55] 蒋 晨, 麻培侠, 胡保国, 等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15):184-191.
- JIANG Chen, MA Pei-xia, HU Bao-guo, et al. Effect of biochar re-
- turning to paddy field on CH<sub>4</sub> emission reduction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15):184-191.
- [56] 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.
- [57] Yao Z, Zheng X, Wang R, et al. Nitrous oxide and methane fluxes from a rice-wheat crop rotation under wheat residue incorporation and no-tillage practices[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79:641-649.
- [58] 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 Fen-lin, ZHANG Hai-lin, LI Lin, 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.
- [59] 侯晓莉, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同稻秆处理方式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.
- HOU Xiao-li, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Greenhouse gases emission from paddy fields under different rice straw treatments[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(5):803-809.
- [60] Lee C H, Do Park K, Jung K Y, et al. Effect of Chinese milk vetch (*As-tragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 138(3/4):343-347.
- [61] 蒋静艳, 黄 耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):105-109.
- JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of water controlling and straw application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5):105-109.
- [62] 常单娜, 刘春增, 李本银, 等. 翻压紫云英对稻田土壤还原物质变化特征及温室气体排放的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(12):133-144.
- CHANG Dan-na, LIU Chun-zeng, LI Ben-yin, et al. Effects of incorporating Chinese milk vetch on reductive material characteristics and greenhouse gas emissions in paddy soil[J]. *Acta prataculturae Sinica*, 2018, 27(12):133-144.
- [63] Bronson K F, Neue H U, Singh U, et al. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil. 1. Residue, nitrogen, and water management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(3):981-987.
- [64] Hu N, Wang B, Gu Z, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 223:115-122.
- [65] 白小琳, 徐尚起, 汤文光, 等. 不同耕作措施下双季稻田生态系统碳循环及其生态服务价值[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2489-2494.
- BAI Xiao-lin, XU Shang-qi, TANG Wen-guang, et al. Ecosystem service value and carbon cycle of double cropping paddy under different tillage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2489-

- 2494.
- [66] 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.
- XIAO Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(5):629-632.
- [67] 王保君, 胡乃娟, 顾泽海, 等. 稻秆还田方式对稻麦轮作农田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3):367-375.
- WANG Bao-jun, HU Nai-juan, GU Ze-hai, et al. Impact of rice straw return methods on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions across a rice-wheat rotation [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(3):367-375.
- [68] 马二登, 马静, 徐华, 等. 麦季稻秆还田方式对后续稻季  $\text{CH}_4$  排放的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3):729-732.
- MA Er-deng, MA Jing, XU Hua, et al. Effects of rice straw returning methods in wheat-growing season on  $\text{CH}_4$  emissions from following rice-growing season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(3):729-732.
- [69] Ma J, Ma E, Xu H, et al. Wheat straw management affects  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5):1022-1028.
- [70] Xu H, Cai Z C, Li X P, et al. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on  $\text{CH}_4$  emission from rice cultivation [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(1):1-12.
- [71] Lu W F, Chen W, Duan B W, et al. Methane emissions and mitigation options in irrigated rice fields in southeast China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/2/3):65-73.
- [72] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. 4. Japan:IGES, 2006.
- [73] 高小叶, 袁世力, 吕爱敏, 等. DNDC 模型评估苜蓿绿肥对水稻产量和温室气体排放的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(12):14-26.
- GAO Xiao-ye, YUAN Shi-li, LÜ Ai-min, et al. Effects of alfalfa green manure on rice production and greenhouse gas emissions based on a DNDC model simulation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(12):14-26.
- [74] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, et al. Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue incorporation on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from a double-rice paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(9):1537-1544.
- [75] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J]. 核农学报, 2018, 32(11):2274-2280.
- ZHANG Jing-ting, ZHANG Li-hua, LÜ Li-hua, et al. Overview of the characteristics of crop straw decomposition and nutrients release of returned field crops[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(11):2274-2280.
- [76] 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 Xiang-lan, XU Hua, LI Xiao-ping, 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.
- [77] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(6):973-981.
- [78] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies[J]. *Biogeochemistry*, 1989, 7(1):33-53.