



董文军,张俊,唐傲,等.黑龙江省2010—2019年水稻生产碳中和概况及低碳稻作技术对策分析[J].黑龙江农业科学,2021(12):84-90.

# 黑龙江省2010—2019年水稻生产碳中和概况及 低碳稻作技术对策分析

董文军<sup>1</sup>,张俊<sup>2</sup>,唐傲<sup>1</sup>,刘猷红<sup>1</sup>,徐英哲<sup>3</sup>,王文龙<sup>3</sup>,来永才<sup>4</sup>,王玉杰<sup>5</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 耕作栽培研究所/农业部东北地区作物栽培科学观测试验站/黑龙江省寒地作物生理生态重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150086;2. 中国农业科学院 作物科学研究所,北京 100081;3. 东北农业大学 农学院,黑龙江 哈尔滨 150030;4. 黑龙江省农业科学院,黑龙江 哈尔滨 150086;5. 黑龙江省农业科学院 生物技术研究,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**稻田固碳减排是我国实现碳中和的重要技术措施。为推动我国寒地水稻绿色、低碳、可持续发展,本文在了解我国寒地稻田系统2010—2019年碳排放及碳中和概况的基础上,探索我国寒地稻田系统固碳减排的对策,包括选用氮素利用率高的水稻品种、适宜的水分管理模式、综合考虑有机肥和氮肥的施用种类及比例、翻耕和旋耕每年交替的轮耕制度等。并提出今后寒地稻田固碳减排应重点考虑加强寒地稻田温室气体产生、排放的机理及影响因素研究,强化寒地稻田温室气体排放量的准确估算,通过多学科交叉融合研究寒地稻田温室气体排放。

**关键词:**黑龙江省;水稻生产;碳中和;温室气体排放;固碳减排;低碳稻作技术

全球气候正经历着一次以变暖为主要特征的显著变化<sup>[1]</sup>。IPCC第五次评估报告<sup>[2]</sup>显示,到21世纪末,全球平均表面温度和过去20年相比可能上升0.3~4.8℃。全球变暖已经加速且不可逆转,是威胁当前及未来人类生存的重大环境问题。研究普遍认为,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<sup>[1,3-7]</sup>。同时,该协定还指出,全球将尽快实现温室气体排放达峰,21世纪下半叶实现温室气体净零排放<sup>[8]</sup>。2020年9月22日习总书记在第75届联合国大会一般性辩论上宣布中国力争

在2030年前碳达峰,努力争取2060年实现碳中和。碳达峰是指二氧化碳的排放不再增长,达到峰值之后逐步降低。碳中和是指在一定时间一定范围内直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式,抵消自身产生的二氧化碳排放量,实现二氧化碳“零排放”<sup>[9-13]</sup>。

甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是大气中两种重要的温室气体,其浓度的不断增加加剧了全球温室效应。自工业革命(1750年)以来,全球大气中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度明显增加,其浓度已由工业革命前的约0.715和0.270 mg·L<sup>-1</sup>分别增至2011年的1.803和0.324 2 mg·L<sup>-1</sup>。CH<sub>4</sub>是仅次于CO<sub>2</sub>的一种温室气体,它的全球增温潜势相当于CO<sub>2</sub>的25倍。虽然N<sub>2</sub>O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<sub>2</sub>的298倍<sup>[14]</sup>。可见,采取各种有效的措施来减少CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放对于减缓温室效应刻不容缓。

温室气体的排放经常被简称为“碳排放”,碳排放给人类带来的影响也早已从一个专门的科学研究问题,拓展成为受各界广泛关注的政治、经济、环境问题的综合体<sup>[15]</sup>。中国农业排放约占二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>-eq,下同)排放总量的5.4%,其中水稻种植约占农业CO<sub>2</sub>-eq排放总量的

收稿日期:2021-09-15

基金项目:黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28030403);国家重点研发计划项目(2016YFD0300909-02);黑龙江省农业科学院2021年度科技攻关项目(杰出青年基金项目);黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX1302, HNK2019CX02);黑龙江省农业科学院2021年度《乡村振兴科技支撑示范项目》(乡村振兴技术储备项目)。

第一作者:董文军(1981—),男,博士,副研究员,从事水稻耕作栽培与稻田生态系统方面的研究。E-mail: dongwenjun0911@163.com。

通信作者:王玉杰(1963—),男,学士,研究员,从事农作物耕作栽培与育种研究。E-mail: lkwangyujie@126.com。

16%<sup>[16]</sup>;近年来,黑龙江省水稻年种植面积稳定在400万hm<sup>2</sup>左右,约占我国水稻种植面积的13.3%<sup>[1,17]</sup>,是我国水稻碳排放的重要区域。此外,寒地水稻生产水资源消耗量大、氮肥用量大、生产投入成本高、环境承载力高等问题日益突显。为此,本文在了解我国寒地稻田系统碳中和概况的基础上,探索我国寒地稻田系统固碳减排的对策,以期为推动我国寒地绿色水稻生产,发展低碳、可持续发展的现代化大农业提供技术保障,为我国稻田固碳减排的综合调控和国际谈判提供科学依据和技术支撑,为我国早日实现碳中和提供理论和技术参考。

### 1 寒地水稻生产碳排放及碳中和概况

陈松文等<sup>[16]</sup>研究发现,我国水稻生产具有碳源和碳汇的双重作用。碳源是指水稻生产过程中的碳排放,包括直接和间接碳排放,直接碳排放是指在水稻、土壤及微生物等生态过程产生的以CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O等温室气体形式排放的碳,约占水稻生产碳排放总量的60%;间接碳排放是指在水稻生产中以种子、农药、化肥和燃油等农业生产资料形式排放的碳,约占水稻生产碳排放总量的40%<sup>[18]</sup>。碳汇是指水稻生产过程中,通过光合作用将CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O合成碳水化合物储存,并以根茬、秸秆和凋落物等形式转移、固定到土壤中,碳固定主要包括秸秆、根系和土壤固碳三部分<sup>[16]</sup>。水稻碳中和水平是碳固定量与碳排放量的差值,零值表示碳中和,正值表示碳盈余,负值表示碳损失,其计算公式及过程参照文献<sup>[16]</sup>,本文中水稻生产为北方一季稻。收获指数取0.53,土壤容重取1.45g·cm<sup>-3</sup>,其他取值保持不变。

表1列出了黑龙江省2010—2019年水稻播种面积和籽粒产量,数据来源于2020年黑龙江统计年鉴<sup>[19]</sup>。可以看出,播种面积呈先增加后下降

的趋势,在2014年达到最大值396.8万hm<sup>2</sup>;近5年黑龙江省水稻年播种面积基本维持在380万~390万hm<sup>2</sup>。籽粒产量呈先增加后下降再增加再下降的趋势,在2014年第一次达到最大值2797.2万t,在2017年第二次达到最大值2819.3万t;近5年黑龙江省年水稻籽粒产量基本维持在2700万~2800万t。

表1 黑龙江省2010—2019年水稻播种面积和籽粒产量

年份	播种面积/(×10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	籽粒产量/(×10 <sup>4</sup> t)
2010	313.9	2277.5
2011	343.7	2438.4
2012	363.1	2600.2
2013	386.1	2710.8
2014	396.8	2797.2
2015	391.8	2720.9
2016	392.5	2763.6
2017	394.9	2819.3
2018	378.3	2685.5
2019	381.3	2663.5

表2显示的是黑龙江省稻田不同试验处理甲烷和氧化亚氮的综合温室效应,用来估算稻田的直接碳排放。在2012年哈尔滨试验点研究发现,甲烷和氧化亚氮的综合温室效应平均为9136.1kg·hm<sup>-2</sup>,在2013年哈尔滨试验点研究发现,甲烷和氧化亚氮的综合温室效应平均为10981.2kg·hm<sup>-2</sup>,在2006年三江平原试验点结果发现,甲烷和氧化亚氮的综合温室效应为6015kg·hm<sup>-2</sup>,在2016年庆安试验点结果发现,甲烷和氧化亚氮的综合温室效应平均为5901.6kg·hm<sup>-2</sup>。通过以上不同时间开展的试验结果可以看出,甲烷和氧化亚氮的综合温室效应范围为5.9~11.0t·hm<sup>-2</sup>。

表2 黑龙江省稻田不同试验处理甲烷和氧化亚氮的综合温室效应

试验地点	试验时间	试验处理	甲烷和氧化亚氮的综合温室效应/(kg·hm <sup>-2</sup> )	参考文献
哈尔滨	2012	不同水肥管理	5599.100~12673.100	[20]
哈尔滨	2013	不同水肥管理	7990.100~13972.300	[20]
三江平原	2006	不同密度	6015.000	[21]
庆安	2016	不同灌溉模式	3648.147~8154.975	[22]

注:甲烷和氧化亚氮的综合温室效应=甲烷累积排放量×25+氧化亚氮累积排放量×298。

从表3可知,黑龙江省2010—2019年估算的年秸秆固碳量约为807.9万~1000.1万t,年根

系固碳量约为128.9万~159.6万t,按我国30年来土壤有机质变化-0.07~0.30g·(kg·a)<sup>-1</sup><sup>[16,23]</sup>估算,

年土壤固碳量约为-29.8万~127.7万t,年总固碳量约为913.2万~1286.8万t,主要以秸秆固碳量为主,因此,黑龙江省要重点实施秸秆还田为主的农业措施,这也与黑龙江省最近制定并实施的以秸秆还田为主的秸秆综合利用政策相吻合,为黑土地的保护与利用,土壤固碳培肥,地力持续提升提供技术支撑。年直接碳排放量约为505.1万~1190.4万t,年间接碳排放量约为336.7万~793.6万t,年总碳排放量约为841.8万~1984.0万t,每一年的碳中和水平均为负值到正值的变化范围,约为-869.3万~

227.7万t。可见,黑龙江省近年来水稻生产有可能成为碳源,也有可能成为碳汇,而成为碳源的可能性更大。水稻生产的碳源和碳汇作用与品种、播种面积、耕作和栽培方式、生产物资种类和数量的投入、水肥管理水平以及区域气候资源等密切相关,通过对水稻生产各个环节的关键技术进行优化、完善和创新,形成不同区域有针对性的技术对策,以期不断提高稻田土壤固碳能力,降低稻田碳排放,通过固碳减排逐渐提高水稻生产的碳盈余量,为我国水稻生产尽早实现碳中和提供理论与技术参考。

表 3 黑龙江省 2010—2019 年水稻生产碳排放数据

单位:万 t

年份	秸秆固碳量	根系固碳量	土壤固碳量	总固碳量	直接碳排放量	间接碳排放量	总碳排放量	碳中和
2010	807.9	128.9	-23.6~101.0	913.2~1037.8	505.1~941.7	336.7~627.8	841.8~1569.5	-656.3~196.0
2011	864.9	138.0	-25.8~110.6	977.1~1113.6	553.0~1031.1	368.7~687.4	921.7~1718.5	-741.4~191.9
2012	922.3	147.2	-27.3~116.9	1042.2~1186.4	584.3~1089.3	389.5~726.2	973.8~1815.5	-773.3~212.6
2013	961.6	153.4	-29.0~124.3	1086.0~1239.3	621.3~1158.3	414.2~772.2	1035.5~1930.5	-844.5~203.8
2014	992.2	158.3	-29.8~127.7	1120.7~1278.3	638.5~1190.4	425.7~793.6	1064.1~1984.0	-863.3~214.1
2015	965.1	154.0	-29.4~126.1	1089.7~1245.3	630.4~1175.4	420.3~783.6	1050.7~1959.0	-869.3~194.5
2016	980.3	156.4	-29.5~126.3	1107.2~1263.1	631.6~1177.5	421.0~785.0	1052.6~1962.5	-855.3~210.5
2017	1000.1	159.6	-29.7~127.1	1130.0~1286.8	635.4~1184.7	423.6~789.8	1059.1~1974.5	-844.5~227.7
2018	952.6	152.0	-28.4~121.8	1076.2~1226.4	608.7~1134.9	405.8~756.6	1014.5~1891.5	-815.3~211.8
2019	944.8	150.8	-28.6~122.7	1066.9~1218.3	613.5~1143.9	409.0~762.6	1022.6~1906.5	-839.6~195.7

2 寒地低碳稻作与稻田固碳减排对策

2.1 低碳品种选择

不同水稻品种由于在生理结构、根系分泌物数量和组分、分蘖数量、养分利用效率等因素上存在的差异,会对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放产生重要影响<sup>[24-26]</sup>。在三江平原对3个主栽水稻品种(空育131、龙粳18、垦鉴稻6号)生长季碳排放的研究发现<sup>[27]</sup>,垦鉴稻6号的碳排放较空育131和龙粳18分别下降14.0%和17.7%。可见,品种间碳排放差异明显。通常情况下,稻田CH<sub>4</sub>排放和水稻的植物总重量成反比关系,即具有较大植物总重量的水稻品种的稻田CH<sub>4</sub>排放较小。水稻生物量大,吸收与固定的碳量高,从而减少了CH<sub>4</sub>排放量<sup>[28]</sup>。盆栽试验表明,强大的根系和发育良好的通气组织显著增加氧气的输送,从而促进CH<sub>4</sub>氧化,不仅利于水稻增产,也有助于稻田CH<sub>4</sub>的减排<sup>[29]</sup>。相关大田试验也有类似的结果,可能的原因是根系发达,根体积大,根系活力大,促进了根系氧化能力和泌氧能力,根际Eh值上升,抑制产CH<sub>4</sub>菌活性,同时增强了CH<sub>4</sub>氧化菌

活性,促进了CH<sub>4</sub>的氧化,从而导致CH<sub>4</sub>排放通量减少;同时,根系活力强,与微生物竞争NO<sub>3</sub>,减弱了反硝化作用,从而减少了N<sub>2</sub>O的产生量,排放量也相应减少<sup>[30]</sup>。可见,选用根系活力强、产量潜力大的品种,能有效降低稻田系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放<sup>[30-31]</sup>。此外,选用氮素利用率高的水稻品种,可适当地减少氮肥的施用量,减少氮肥在稻田土壤中的存留时间,降低水稻生长过程中N<sub>2</sub>O产生的排放<sup>[17]</sup>。因此,在具体的寒地水稻品种选择上,既要保证一定的水稻产量,又要相对减少CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放,最终降低碳排放。在寒地水稻生产过程中,高产低CH<sub>4</sub>水稻品种的种植是低碳稻作潜在的重要措施,推广种植较少温室气体排放的水稻品种是控制稻田温室气体排放的有效措施之一。

2.2 水分管理

水分管理方式是影响稻田系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O产生、氧化和排放的重要因素之一。我国水稻种植较为普遍的水分管理方式包括长期淹水灌溉和间歇灌溉两种方式。近年来,由于寒地水稻种植

面积扩大,用水量也随之增加,地下水呈明显的漏斗状态,因此,在确保一定水稻种植面积的前提下,节水灌溉显得尤为重要。稻田长期淹水是处于极端还原状态,厌氧性产  $\text{CH}_4$  菌作用于产  $\text{CH}_4$  基质而产生  $\text{CH}_4$  气体<sup>[1]</sup>。在哈尔滨的田间试验结果表明,间歇灌溉显著降低  $\text{CH}_4$  的排放,长期淹水  $\text{N}_2\text{O}$  排放很小,但在水分消失之初  $\text{N}_2\text{O}$  排放出现峰值<sup>[20]</sup>;节水灌溉(控水灌溉和间歇灌溉)抑制稻田  $\text{CH}_4$  的排放,虽促进了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,但降低了总的碳排放<sup>[32]</sup>。王孟雪等<sup>[33]</sup>在庆安的研究显示,相对于长期淹灌,浅湿灌溉、控制灌溉和间歇灌溉稻田  $\text{CH}_4$  累积排放量分别降低了 27.2%、34.0% 和 48.2%。长期淹灌稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量比间歇灌溉减少  $0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,比控制灌溉和浅湿灌溉分别增加 0.38 和  $0.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。总体上,节水灌溉模式能有效抑制温室气体的排放并显著地降低总的碳排放。大量研究表明<sup>[34-36]</sup>,相对于长期淹水,间歇灌溉能大幅度降低稻田  $\text{CH}_4$  排量,而增加  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。彭世彰等<sup>[37]</sup>在南方的相关研究也发现,控制灌溉稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的总碳排放较常规灌溉稻田显著减少,减少幅度为 15.0%~34.8%。另外,在水稻生长季,通过采取一次或多次的排水晒田也可有效减少  $\text{CH}_4$  排放<sup>[38]</sup>。综上所述,稻田系统水分管理对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放具有相反的影响,一种气体排放降低而另一种气体排放则增加,需要提出寒地稻田适宜的水分管理模式,综合考虑  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的消长关系,才能平衡两种温室气体排放的综合效应。

### 2.3 肥料施用

肥料施用对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响大小与施用肥料的种类、施用量以及施用时期等有关。其中有机肥的种类也较多,主要包括农作物秸秆、堆肥、绿肥、厩肥和沼渣肥等,对稻田  $\text{CH}_4$  的排放影响存在抑制或促进作用<sup>[1]</sup>。龚振平等<sup>[39]</sup>在哈尔滨的观测结果表明,水稻田  $\text{CH}_4$  排放通量呈双峰变化趋势;秸秆低量还田( $6.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、秸秆高量还田( $12.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )处理  $\text{CH}_4$  排放通量与地表温度、5 cm 土层温度、10 cm 土层温度极显著相关,与气温相关不显著; $\text{CH}_4$  排放通量和  $\text{CH}_4$  排放量随秸秆还田量增加而升高。而张卫建等<sup>[40]</sup>在哈尔滨另有研究发现,与农户模式秸秆不还田相比,2017 年优化模式秸秆还田的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  引起的总碳排放增加 13.3%,而 2018 和 2019 年平均显

著下降 39.2%。邹建文等<sup>[41]</sup>在南方的试验研究发现,不同有机肥处理的碳排放表现为菜饼>秸秆>牛厩肥>化肥>猪厩肥。王聪等<sup>[42]</sup>在双季稻田的研究表明,用猪粪替代 50% 的化学氮肥处理  $\text{CH}_4$  排放较化学氮肥处理提高 33.85%~54.83%。但是沈仕洲等<sup>[43]</sup>的研究结果表明,经过干燥处理的沼渣肥能够降低  $\text{CH}_4$  排放约 50%,而未经处理的沼渣因向土壤中带入了产甲烷菌而增加  $\text{CH}_4$  排放量;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  $\text{CH}_4$  排放<sup>[44-46]</sup>。此外,施用有机肥对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响结论也不太一致,有的研究发现<sup>[47-48]</sup>,施用有机肥可降低  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量。然而王聪等<sup>[42]</sup>研究表明,在氮肥用量相同的情况下,增施有机肥(猪粪)能提高  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量。因此,应根据不同区域的生态特点,因地制宜地选择适合当地的固碳减排的有机肥施用种类以及施用量等。

氮肥施用是水稻产量增加的重要影响因素,为了获得更高的产量,过量施入氮肥,由此引起了一系列的环境问题。氮肥施用是影响稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放增加的主要因素。Nie 等<sup>[49]</sup>在庆安试验点结果表明,施用氮肥可显著增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放量,而不同氮肥处理的  $\text{CH}_4$  排放量差异很小。Dong 等<sup>[20]</sup>在哈尔滨的田间试验研究发现,在低氮( $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )条件下  $\text{CH}_4$  的排放增加,但是在中氮( $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )和高氮( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )条件下  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  综合排放均不受影响。Eichnerm 等<sup>[50]</sup>通过统计分析发现,由于氮肥施用所排放的  $\text{N}_2\text{O}$  占土壤总  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的 25%~82%。此外,稻田  $\text{CH}_4$  的排放量随氮肥的施用量有增有减<sup>[51-52]</sup>。总之,施肥对寒地稻田系统土壤中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放影响较大, $\text{CH}_4$  的排放受有机肥的促进作用较大,而  $\text{N}_2\text{O}$  的排放受氮肥的促进作用较大<sup>[1]</sup>,只有综合考虑有机肥和氮肥的施用种类和比例等,才能协调  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放、作物产量以及土壤培肥等综合效应。

### 2.4 耕作制度

不同的耕作制度对寒地稻田系统碳排放具有明显的影响。张卫建等<sup>[40]</sup>在哈尔滨试验点研究发现,在秸秆还田下,与旋耕相比,轮耕(一年翻耕,一年旋耕交替进行)和翻耕 2017—2019 年平均  $\text{CH}_4$  排放量分别显著降低 28.4% 和 14.4%,轮耕 2018—2019 年平均  $\text{N}_2\text{O}$  排放量降低 22.1%,轮耕和翻耕 2017—2019 年碳排放平均分别显著

降低 27.7% 和 14.1%。马二登等<sup>[53]</sup> 研究显示, 浅旋耕稻田  $\text{CH}_4$  排放量较深翻耕减少 31.3%。金国强等<sup>[54]</sup> 研究发现, 稻麦旋耕的处理  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{C}_2\text{O}$  的排放量显著低于麦季和稻季均免耕的处理。秦晓波等<sup>[55]</sup> 在双季稻的研究表明, 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。张军科等<sup>[56]</sup> 研究发现, 不同耕作方式对紫色稻田系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  所产生的总碳排放表现为平作>垄作免耕>厢作免耕>水旱轮作。可以看出, 不同稻作区适宜的低碳耕作方式不尽相同, 对于寒地稻作区, 采用翻耕和旋耕每年交替的轮耕技术比较适宜。

## 2.5 其他措施

通过使用硝化抑制剂、新型肥料和低碳新产品等进一步降低水稻生产过程中的温室气体排放。王国强等<sup>[57]</sup> 研究表明, 秸秆还田下配施硝化抑制剂双氰胺(DCD)在保证水稻产量的前提下, 显著降低稻田土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 是一种经济可行的温室气体减排措施。李方敏等<sup>[58]</sup> 研究发现, 施用新型肥料(包膜型控释肥)比未包膜复合肥能极显著地降低稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量。此外, 不同的栽培方式对稻田系统温室气体排放也具有显著的影响。马二登等<sup>[53]</sup> 研究表明, 水稻直播较移栽能够显著降低水稻生育前期  $\text{CH}_4$  排放, 具有一定的  $\text{CH}_4$  减排潜力。臧英等<sup>[59]</sup> 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  $\text{CH}_4$  的排放。张喜娟等<sup>[60]</sup> 在寒地稻田系统, 水直播和旱直播的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量比插秧栽培略微有所增加, 但  $\text{CH}_4$  排放量和综合温室效应均明显低于插秧栽培。可见, 在寒地水稻生产中, 直播技术是减少稻田  $\text{CH}_4$  排放的有效措施。

## 3 研究展望

目前, 有关我国稻田碳排放已做了大量的工作, 多数集中在南方, 对北方单季稻田的研究相对较少。近年来, 由于黑龙江寒地水稻种植面积较大, 稻田系统的减排潜力巨大。有关我国寒地稻田碳排放已开展了一些工作, 主要从栽培方式、品种选择、水分管理、肥料施用、耕作制度以及秸秆还田等方面开展了一定的研究, 但仍存在很多的不足和不确定性。因此, 今后关于寒地稻田固碳减排应重点考虑以下 3 方面的内容: (1) 加强寒地稻田温室气体产生、排放的机理及影响因素研究。重点加强寒地稻田不同调控技术下  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$

产生、排放的生理、分子等机理及影响因素研究, 为寒地稻田更好地建立固碳减排技术提供理论基础; (2) 强化寒地稻田温室气体排放量的准确估算。寒地稻田温室气体固碳减排不仅要革新水稻管理技术措施, 而且还要结合更精确、更快捷的手段, 如“3S 技术”、自动监测系统、数据分析方法及模型模拟验证等手段, 实现寒地稻田温室气体排放量的准确估算。目前, 被人们公认的、广泛应用的、效果明显且持久的固碳减排技术相对较少, 因此, 要实现固碳减排效果最大化, 就必须综合考虑土壤性质、气候条件、作物品种、耕作方式、水肥管理以及时空差异等影响因素, 尽可能地明确各因素间的协同作用和负效应, 同时结合环境、经济和社会效益来开发和选择适宜的固碳减排技术, 如在有效控制稻田水分管理的同时, 优化氮肥施用结合抑制剂以及低碳产品的应用等; (3) 通过多学科交叉融合研究寒地稻田温室气体排放。通过土壤学、植物营养学、环境学、微生物学、生态学以及地球化学等多学科交叉融合研究寒地稻田系统温室气体排放, 对寒地稻田温室气体固碳减排具有十分重要的意义。

总之, 我国寒地水稻种植面积大, 区域分布广, 加强不同区域寒地稻田温室气体综合减排技术并集成示范研究, 对探明我国农田温室气体排放清单, 发展低碳、生态农业, 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重要的意义, 为制定更加合理、准确的碳中和技术路径提供可靠的依据。

## 参考文献:

- [1] 来永才, 董文军, 孟英, 等. 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.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 李慧明. 巴黎之后: 全球绿色发展潮流与中国的生态现代化战略[J]. 科学与现代化, 2016(4): 170-182.
- [4] 王鹤樟. 可再生能源消费和经济增长的关系—OECD 国家和中国的比较[D]. 武汉: 湖北大学, 2016.
- [5] 曲相霁. 气候变化背景下的健康权保障[J]. 人权, 2016(6): 80-93.
- [6] 李慧明. 构建人类命运共同体背景下的全球气候治理新形势及中国的战略选择[J]. 国际关系研究, 2018(4): 3-20, 152-153.
- [7] 曲相霁. 气候变化背景下的健康权保障[J]. 人权, 2016(6): 85-98.
- [8] 冯迪凡, 章轲. 巴黎协定: 本世纪下半叶全球实现温室气体净零排放[EB/OL]. (2015-12-14) [2021-07-06]. <http://>

- news.sohu.com/20151214/n431149565.shtml.
- [9] 靳惠怡,韩玥,李媛.碳达峰、碳中和 和大国雄心,建材行业须担当[J]. 中国建材,2021(2):26-33.
  - [10] 杨子.“碳中和”背景下,再生铝将迎来重大机遇[J]. 资源再生,2021(2):1.
  - [11] 刘志坚.目标“碳中和”茂源林业一直在行动[J]. 纸和造纸,2021,40(1):67-68.
  - [12] 戈晶晶.碳中和倒逼能源智慧发展[J]. 中国信息界,2021(1):51-54.
  - [13] 张海波.碳中和愿景引领下绿色金融发展展望[J]. 金融纵横,2021(1):58-63.
  - [14] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
  - [15] 王文文,孙文静,孙慧,等.我国碳排放管控现状与未来展望[J]. 现代化工,2021,41(2):19-22.
  - [16] 陈松文,刘天奇,曹凑贵,等.水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略[J]. 华中农业大学学报,2021,40(3):3-12.
  - [17] 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.
  - [18] XIA L L, TI C P, LI B L, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 116-125.
  - [19] 黑龙江省统计局,国家统计局黑龙江调查总队. 黑龙江统计年鉴-2020[M]. 北京:中国统计出版社,2020.
  - [20] 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, 2018, 64: 289-297.
  - [21] CHEN W W, WANG Y Y, ZHAO Z C, et al. The effect of planting density on carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from a cold paddy field in the Sanjiang Plain, northeast China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 178: 64-70.
  - [22] 王长明,张忠学,吕纯波,等.不同灌溉模式寒地稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及增温潜势分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 14-20, 68.
  - [23] 曲潇琳,任意,王红叶,等.我国耕地质量主要性状 30 年变化情况报告[J]. 中国农业综合开发,2020(5):25-26.
  - [24] BUTTERBACH-BAHL K, PAPEN H, RENNENBERG H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields[J]. Plant, Cell and Environment, 1997, 20(9): 1175-1183.
  - [25] YAO H, YAGI K, NOUCHI I. Importance of physical plant properties on methane transport through several rice cultivars[J]. Plant and Soil, 2000, 222(1/2): 83-93.
  - [26] 孙会峰,周胜,陈桂发,等.水稻品种对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1595-1602.
  - [27] 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, 107.
  - [28] 李晶,王明星,陈德章.水稻田甲烷的减排方法研究[J]. 中国农业气象, 1997, 18(6): 9-14.
  - [29] 王丽丽,闫晓君,王瑜,等.超级稻宁梗 1 号与常规梗稻  $\text{CH}_4$  排放特征的分析[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(4): 413-418.
  - [30] 傅志强,朱华武,陈灿,等.水稻根系生物特性与稻田温室气体排放相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 30(12): 2416-2421.
  - [31] 曹云英,朱庆森,郎有忠,等.水稻品种及栽培措施对稻田甲烷放的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(3): 22-27.
  - [32] 王晓萌. 水肥运筹对黑龙江省稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放影响的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2019.
  - [33] 王孟雪,张忠学,吕纯波,等.不同灌溉模式下寒地稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及温室效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 95-100.
  - [34] 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.
  - [35] 袁伟玲,曹凑贵,程建平,等.间歇灌溉模式下稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294-4300.
  - [36] 耿春伟,付志强.稻田水肥组合模式的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及其差异比较[J]. 作物研究, 2012, 26(7): 9-13.
  - [37] 彭世彰,侯会静,徐俊增,等.稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.
  - [38] 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.
  - [39] 龚振平,颜双双,闫超,等.寒地水稻秸秆还田和温度对稻田甲烷排放的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(12): 8-15.
  - [40] 张卫建,张俊,张会民,等.稻田土壤培肥与丰产增效耕作理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2021.
  - [41] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.不同种类有机肥施用对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
  - [42] 王聪,沈健林,郑亮,等.猪粪化肥配施对双季稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3120-3127.
  - [43] 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.
  - [44] YAGI K, TSURUTA H, MINAMI K. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49: 213-220.
  - [45] WASSMANN R, NEUE H U, LADHA J K, et al. Mitigating greenhouse gas emissions from rice-wheat cropping systems in Asia[J]. Environment Development and Sustainability, 2004, 6: 65-90.
  - [46] MINAMIKAWA K, SAKAI N, YAGI K. Methane emission from paddy fields and its mitigation options on a field scale [J]. Microbes and Environments, 2006, 21(3): 135-147.
  - [47] 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.
- [48] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 707-720.
- [49] 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: 1639.
- [50] EICHNERM J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data[J]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19: 272-280.
- [51] BANIK A, SEN M, SEN S P. Effects of inorganic fertilizers and micronutrients on methane production from wetland rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 21(4): 319-322.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 金国强, 徐攀峰, 方文英, 等. 不同稻-麦栽培管理方式对双季农田温室气体排放的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(4): 1015-1020.
- [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  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216-224.
- [56] 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  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1979-1986.
- [57] 王国强, 常玉妍, 宋星星, 等. 稻草还田下添加 DCD 对稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2431-2439.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 张喜娟, 来永才, 曾山. 寒地水稻直播栽培机理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.

## Carbon Neutrality Profiles of Rice Production and Technological Strategies of Low-carbon Rice Cultivation in Heilongjiang Province from 2010 to 2019

DONG Wen-jun<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, TANG Ao<sup>1</sup>, LIU You-hong<sup>1</sup>, XU Ying-zhe<sup>3</sup>, WANG Wen-long<sup>3</sup>, LAI Yong-cai<sup>4</sup>, WANG Yu-jie<sup>5</sup>

(1. Institute of Crop Cultivation and Tillage, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in Northeast China, Ministry of Agriculture/Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Cold Region, Harbin 150086, China; 2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 5. Institute of Biotechnology, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:** Carbon sequestration and emission reduction in paddy field is an important technical measure to achieve carbon neutrality in China. In order to promote the green, low-carbon and sustainable development of cold rice in China, based on the carbon emission and carbon neutrality profiles of cold rice field system was analyzed in China from 2010 to 2019, the countermeasures of carbon sequestration and emission reduction of cold rice field system were explored in China, including the selection of rice varieties with high nitrogen use efficiency, appropriate water regime management, comprehensive consideration of the application types and proportion of organic fertilizer and nitrogen fertilizer, the rotation system of annual alternation of ploughing and rotary tillage, etc. In the future, it was proposed that the carbon sequestration and emission reduction of cold paddy fields should focus on strengthening the research on the mechanism and influencing factors of greenhouse gas generation and emission of cold paddy fields, strengthening the accurate estimation of greenhouse gas emission of cold paddy fields, and studying the greenhouse gas emission of cold paddy fields through interdisciplinary integration.

**Keywords:** Heilongjiang Province; rice production; carbon neutrality; emission of greenhouse gases; carbon sequestration and emission reduction; low-carbon rice cultivation technology