

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.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.002.

水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略

陈松文¹, 刘天奇¹, 曹凑贵¹, 凌霖², 王斌³

1. 华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 武汉 430070;

2. 华中农业大学植物科学技术学院/宏观农业研究院, 武汉 430070;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要 稻田固碳减排, 是国家实现碳中和战略的重要举措。为推动长江中下游地区水稻绿色生产, 本文在界定水稻生产碳源、碳汇功能的基础上, 分析了长江中下游省(市)区域碳排放及碳中和现状, 解析了不同稻作模式的碳排放特征, 评估了不同农艺措施对稻田固碳减排的影响及潜力, 提出并构建了“增汇、减排、降耗、循环”的低碳稻作体系。基于文献统计结果显示: 长江中下游省(市)区域的碳中和水平为 $-1.52 \sim 1.75 \text{ Mt C-eq}$; 区域内稻作模式的碳中和水平为 $-401 \sim 2\,673 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 总体而言, 免耕、秸秆还田、氮肥减施、间歇灌溉及稻田种养等农艺措施均可实现碳盈余, 表明通过合理农艺措施、优化布局稻作模式, 能够提高水稻生产碳中和水平。

关键词 碳中和; 低碳稻作; 温室气体排放; 水稻绿色生产; 稻作模式; 农艺措施; 固碳减排; 循环降耗

中图分类号 S 181.3 : S 511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0003-10

全球变暖是当前及未来人类社会面临的主要环境挑战, 减少温室气体排放是应对气候变化的重要举措。习总书记在第75届联合国大会一般性辩论上宣布力争在2030年前碳达峰, 努力争取2060年实现碳中和; 党的十九届五中全会提出要加快推动绿色低碳发展。中国农业排放约占二氧化碳当量($\text{CO}_2\text{-eq}$, 下同)排放总量的5.4%, 其中水稻种植约占农业 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 排放总量的16%; 长江中下游地区稻作面积约占中国的50.6%, 是中国水稻温室气体排放的重点区域; 加之水稻生产氮肥损失大、生产投入高、环境负荷重等问题突出。因此, 认清区域水稻种植碳排放特征, 明晰不同农艺措施对水稻种植碳排放的影响规律, 探讨水稻生产固碳减排策略, 对于推动长江中下游水稻绿色生产, 走低碳稻作发展之路, 助力实现国家碳中和具有重要意义。

1 水稻生产兼具碳汇和碳源双重功能

水稻生产具有碳汇和碳源双重功能(图1)。碳汇功能表现为水稻生产期间, 水稻光合作用将 CO_2

和水合成碳水化合物储存, 并以根茬、秸秆及凋落物等形式移至土壤中, 碳固定主要包括秸秆固碳、根系固碳和土壤固碳三部分。碳源功能表现为水稻生产过程期间的碳排放, 包括直接碳排放和间接碳排放, 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_2 、 CH_4 及 N_2O 等温室气体形式释放的碳, 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、化肥、农药、农膜、燃油及电能等农业生产资料形式释放的碳, 约占水稻生产碳排放总量的40%^[1]。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, 其计算公式为:

$$\text{区域碳中和} = \sum [\text{不同类型水稻播种面积} \times (\text{单位面积})\text{碳中和}] \quad (1)$$

$$\text{碳中和} = \text{碳固定} - \text{碳排放} \quad (2)$$

$$\text{碳固定} = \text{秸秆固碳量} + \text{根系固碳量} + \text{土壤固碳量} \quad (3)$$

$$\text{秸秆固碳量} = \text{秸秆生物量} \times \text{秸秆含碳量} \quad (4)$$

$$\text{秸秆生物量} = \frac{\text{籽粒产量}}{\text{收获指数}} - \text{籽粒产量} \quad (5)$$

$$\text{根系固碳量} = \text{根系生物量} \times \text{根系含碳量} \quad (6)$$

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670447); 国家重点研发计划专项(2017YFD0301400)

陈松文, E-mail: swc@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 曹凑贵, E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn

$$\begin{aligned} \text{根系生物量} &= \text{根冠比} \times \frac{\text{籽粒产量}}{\text{收获指数}} & (7) \\ \text{土壤固碳量} &= \text{有机质变化量} \times \text{土壤容重} \times \\ &\quad \text{耕作层厚度} \times 0.37 & (8) \\ \text{碳排放} &= \text{直接碳排放} + \text{间接碳排放} & (9) \\ \text{直接碳排放} &= (\text{甲烷累积排放量} \times 25 + \\ &\quad \text{氧化亚氮累积排放量} \times 298) \times \frac{12}{44} & (10) \\ \text{间接碳排放} &= \Sigma(\text{生产资料投入量} \times \\ &\quad \text{碳排放系数}) & (11) \\ \text{碳排放系数} &= \text{温室气体排放系数} \times \frac{12}{44} & (12) \end{aligned}$$

本文中水稻生产类型分为早稻、中稻和一季晚稻、双季晚稻。秸秆及根系生物量是根据水稻籽粒产量与相应系数关系换算得出,收获指数取 0.55,根冠比取 0.1;秸秆及根系含碳量分别取 0.4、0.3。耕作层厚度为 20 cm;土壤容重取 1.15 g/cm³;由于土壤有机质变化为周年尺度,而本文核算土壤固碳量的时间尺度为水稻生长季,按水稻生长期平均 135 d,矫正系数取值为 0.37;25 和 298 分别是单位质量甲烷和氧化亚氮在 100 a 时间尺度上的全球增温潜势系数; $\frac{12}{44}$ 是将 CO₂转化为 C 的系数。

表 1 农业生产资料的碳排放系数
Table 1 Emission factors of carbon of different materials for agricultural inputs

项目 Item	温室气体排放系数/ (kg CO ₂ -eq/kg)	来源 Source
氮肥 Nitrogen fertilizer	8.20	[1]
磷肥 Phosphate fertilizer	1.53	[1]
钾肥 Potash fertilizer	1.07	[1]
燃油 Diesel	3.9	[1]
电能 Electrical energy	0.96	[1]
除草剂 Herbicides	12.18	[1]
杀虫剂 Insecticides	17.92	[1]
杀菌剂 Fungicides	12.56	[1]
农膜 Film	18.94	[1]
水稻种子 Rice seed	2.03	CLCD 1.0

注 Note:CLCD;Chinese Life Cycle Database.

中国水稻常年播种面积稳定在 30 Mhm² 以上,按年均 200 Mt 籽粒产量核算,我国秸秆固碳量约为 65 Mt,根系固碳量约为 11 Mt;按我国 30 年来土壤有机质变化-0.07~0.30 g/(kg·a)^[2]核算,土壤固碳量约为-2.07~7.65 Mt,水稻生产的总固碳量约

为 73.93~83.65 Mt。按中国水稻种植直接 CO₂-eq 排放量 142.88~163.2 Mt 换算,我国水稻生产直接碳排放量约为 38.97~44.51 Mt,间接碳排放量约为 29.67 Mt,总碳排放量约为 68.64~74.18 Mt;碳中和状态为-0.25~15.01 Mt。由此可见,我国的水稻生产有可能成为碳源,也有可能成为碳汇。水稻生产的碳汇和碳源功能受到多种因素调控。碳汇功能与水稻品种、稻作模式、耕作方式、水肥及残茬管理、气候及土壤类型等相关;而碳源功能与播种面积、农资及人力投入(尤其是氮肥投入)、耕作及管理过程、气候及土壤类型等相关。不合理的耕作方式与水肥管理措施不仅影响水稻固碳,还会消耗土壤有机质,降低稻田土壤碳汇功能,加之化肥农药等过量投入增加间接碳排放,导致水稻生产碳盈亏,当前水稻生产仍然面临着较高的碳风险;针对区域气候土壤特点,从区域布局、品种结构、稻作模式、耕作方式、管理举措等方面进行技术创新,增强稻田土壤固碳、减少温室气体排放、降低农资能耗,通过固碳减排稳步提升碳盈余量,可提高水稻生产碳中和水平。

2 长江流域水稻生产碳排放及碳中和现状

长江中下游水稻种植面积约 15.33 Mhm²,产量约 109 Mt,分别占全国的 51.7%和 52.7%,是国家水稻生产重要功能区,也是温室气体排放主要区域,区域水稻生产碳排放总量约 36.32 Mt C-eq,约占中国水稻种植的碳排放总量的 50.86%。

2.1 不同省(市)稻田碳排放与碳中和

长江中下游各省(市)稻田碳排放和碳中和现状差异较大(表 2),主要受水稻播种面积、产量以及稻田管理等因素影响。从碳排放来看,湖南、江西和安徽 3 个省碳排放总量约占区域的 64.7%,是长江中下游地区水稻生产减排工作的重点省区;各省(市)直接碳排放约占 65%~73%,表明降低以 CH₄ 和 N₂O 形式的直接碳排放是各省市水稻生产减排的重点。从碳固定来看,碳固定总量与省(市)的水稻产量相关,湖南省固碳量最高,达 9.24 Mt C-eq。从碳中和来看,除安徽省和江西省外其他省(市)均实现碳中和并呈现碳盈余状态,且江苏和湖南省碳盈余量相对较高。

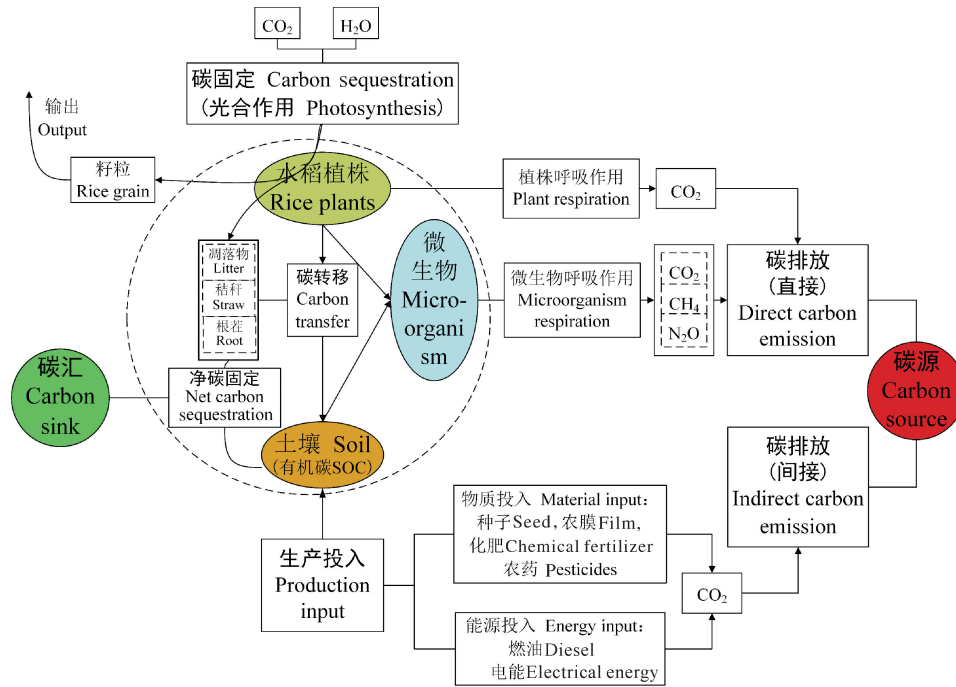


图 1 水稻生产系统的碳汇、碳源示意图

Fig.1 Schematic diagram of carbon sink and carbon source in rice production system

表 2 长江中下游地区水稻生产及碳排放数据

Table 2 Rice production and carbon emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River

省(市) Province or city	面积/ km ² Area	产量/Mt Yield	直接二氧化碳 当量排放/ Mt CO ₂ -eq Direct carbon emission	间接二氧化碳 当量排放/ Mt CO ₂ -eq Indirect carbon emission	总二氧化碳 当量排放/ Mt CO ₂ -eq Total carbon emission	总碳排放/ Mt C-eq Total carbon emission	总固碳量/ Mt C-eq Total carbon sequestration	碳中和/ Mt C-eq Carbon neutral	基础数据 来源文献 Source
湖南 Hunan	4 009	26.74	21.39	8.09	29.48	8.04	9.24	1.20	[3-4]
江西 Jiangxi	3 436	20.92	21.82	7.96	29.78	8.12	7.23	-0.89	[5-6]
安徽 Anhui	2 545	16.81	20.47	6.39	26.86	7.33	5.81	-1.52	[7]
湖北 Hubei	2 391	19.66	16.40	5.98	22.38	6.10	6.79	0.69	[8-13]
江苏 Jiangsu	2 215	19.58	12.10	6.28	18.38	5.01	6.76	1.75	[14-16]
浙江 Zhejiang	651	4.77	3.58	1.86	5.44	1.48	1.65	0.17	[14-16]
上海 Shanghai	104	0.88	0.57	0.30	0.87	0.24	0.30	0.06	[14-16]

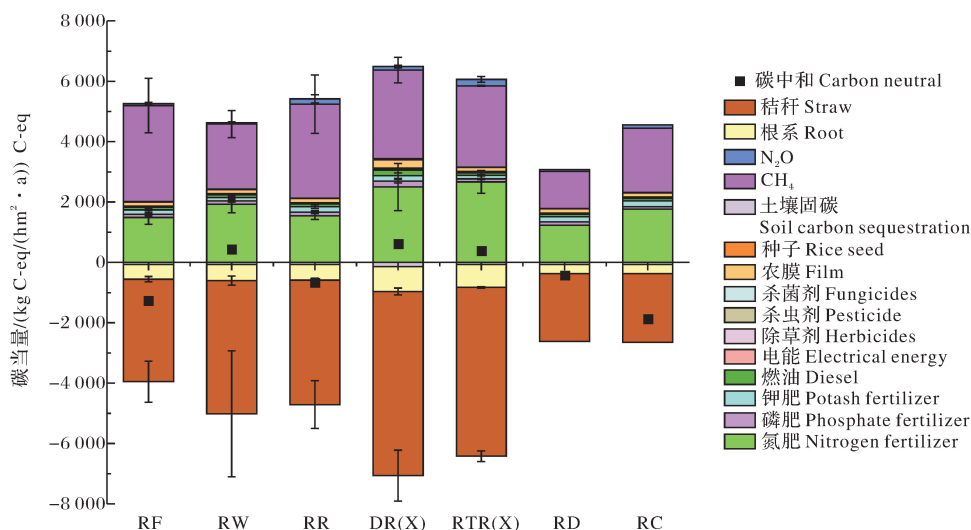
注:1)直接及间接碳排放是不同类型水稻播种面积乘对应类型水稻的(单位面积)直接或间接碳排放的和,表中的面积为 2018 年不同类型水稻的播种面积之和,(单位面积)直接或间接碳排放计算过程中的基础数据源于文献;2)因省(市)土壤固碳量数据难以获取,且比重小,故忽略。Note:1)Direct and indirect carbon emissions are the sum of the sown area of different types of rice multiplied by the (unit area) direct or indirect carbon emissions of the corresponding type of rice. The area in the table is the sum of the sown area of different types of rice in 2018,the basic data in the calculation of (unit area) direct or indirect carbon emissions comes from the literature; 2)Because the soil carbon sequestration data of provinces and cities is difficult to obtain,and the proportion is small,it is ignored.

2.2 不同稻作模式碳排放与碳中和

1)碳排放。中稻休闲、稻油模式、再生稻模式和双季稻模式的碳排放量较高,均在 5 000 kg C-eq/(hm²·a)以上,而稻鸭模式碳排放量最小,为 3 076 kg C-eq/(hm²·a)(图 2),这是由于中稻休

闲、稻油和再生稻模式具有较高的 CH₄ 和 N₂O 排放量;在各稻作模式中 CH₄ 和 N₂O 所产生的直接碳排放是碳排放的主要来源,其占比在 41.9%~61.7%,其中 CH₄ 是水稻生产中直接碳排放的主要形式;氮肥、磷肥和钾肥等肥料投入是间接碳排放的

主要来源,在间接碳排放中的占比为 33.0%~49.0%。因此,减少稻田直接碳排放是稻作模式降低碳排放的重点,尤其是降低稻田 CH_4 排放量;减少稻作模式间接碳排放的关键是控制化肥投入。



1)模式编码解释及数据来源。RF:中稻休闲模式^[13,15,17-20];RR:稻油轮作模式^[17,21-23];RW:稻麦轮作模式^[14,16,24];RC:稻虾共作模式^[13];RD:稻鸭共育模式^[18];DR(X):双季稻及双季稻复合模式^[3,5-6,9,17,24];RTR(X):再生稻及再生稻复合模式^[17,25];下同。2)碳中和=碳固定-碳排放,正值表示碳盈余,负值表示碳损失。1)Mode code explanation and data source. RF:Middle-season rice monoculture mode;RR:Rice-rapeseed rotation mode;RW:Rice-wheat rotation mode;RC:Rice-crayfish co-culture farming;RD:Rice-duck farming;DR(X):Double rice farming(X:Winter crop);RTR(X):Ratoon rice(X:Winter crop),the same as below. 2)Carbon neutral is equal to carbon sequestration minus carbon emissions,a positive value indicates a carbon surplus,a negative value indicates a carbon loss.

图 2 不同稻作模式碳排放、碳固定和碳中和

Fig.2 Carbon emission,carbon sequestration and carbon neutral in various rice cultivation modes

2)碳固定。双季稻模式和再生稻模式的固碳量较高,均在 6 000 kg C-eq/(hm²·a)以上,而稻鸭模式和稻虾模式的固碳量较低(图 2),这是由于双季稻和再生稻模式具有较高的秸秆产量,秸秆是碳固定的主要形式,其占比 85%~88%,根系在碳固定总量占比 10%~12%,土壤固碳相对较少,有些出现碳盈亏,这也是水稻生产碳中和的短板。

不同稻作模式碳中和水平为-401~2 673 kg C-eq/(hm²·a)(图 2),双季稻模式最高,为 581 kg C-eq/(hm²·a),稻鸭模式碳盈余最低,为 354 kg C-eq/(hm²·a),但总体上,稻麦、双季稻和再生稻模式碳盈余量较低,面临较大碳中和风险,而中稻休闲、稻油、稻鸭和稻虾模式均为碳损失。

3)全球增温潜势(global warming potential,GWP)。从图 3 可以看出,稻油轮作模式、双季稻模式和中稻休闲模式增温潜势较高;而稻麦模式、稻虾模式和稻鸭模式相对较低,稻鸭模式最低。双季稻和再生稻模式属于高产高排型,稻麦模式、稻虾模式、稻鸭模式及稻油模式属于低产低排型,中稻休闲模式属于高排放型;如何从农艺措施角度协调产量与碳排放关系,实现高产低排是低碳稻作的方向。

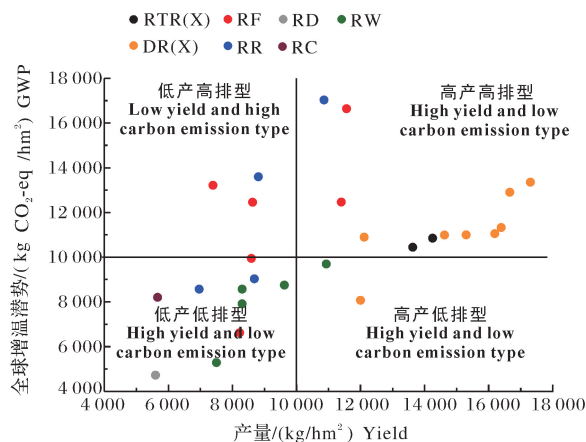


图 3 长江中下游地区不同稻作模式水稻产量与增温潜势

Fig.3 Rice yield and global warming potential(GWP) under various rice cultivation modes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

3 不同农艺措施对稻田固碳减排的影响

水稻生产的碳源和碳汇功能受多种因素影响,明确相应气候、土壤条件下农艺措施对稻田碳源和碳汇功能的影响规律,有助于挖掘水稻生产固碳减

排的潜力。

3.1 不同农艺措施固碳减排效果及差异

1)免耕。与翻耕相比,稻田免耕均能降低 CH_4 排放量,其中双季稻模式 CH_4 减排效应最明显;稻田免耕也增加了 N_2O 排放量,增幅 15%~17%;免耕对水稻产量影响较小,变幅 -5.7%~1.8%;和翻耕相比,免耕降低了 7.7%~41.3%的增温潜势(表 3)。

2)秸秆还田。秸秆是水稻生产碳吸收的重要形式,秸秆还田虽然增加了稻田温室气体排放,但也增加了系统碳固定量,是土壤碳汇的重要来源。与不还田相比,稻田秸秆还田均增加了 7.1%~737.0%的 CH_4 排放量;而对 N_2O 排放量的影响不定且幅度较小,变幅 -88.4%~134%;秸秆还田对水稻产量影响不定,变幅 -6.9%~13.5%;总体而言,秸秆还田增加了增温潜势,变幅 -6.5%~684.7%(表 3)。

3)氮肥减施。与常规施氮相比,稻田氮肥减施

均降低了 CH_4 排放量,降幅 4.6%~45.5%;且降低了 N_2O 排放量,降幅 51.6%~96.1%;氮肥减施对水稻产量有一定减产效应,降幅在 10.1%~64.4%;和常规施氮相比,氮肥减施降低了增温潜势,降幅 27.9%~48.0%(表 3)。

4)间歇灌溉。与常规淹灌相比,间歇灌溉均降低了 CH_4 排放量,降幅 46.4%~66.3%;却显著增加了 N_2O 排放量,增幅 53.4%~2 500%;间歇灌溉略微增加水稻产量,增幅 0~18.8%;和常规淹灌相比,间歇灌溉均降低了增温潜势,降幅 42.7%~54.6%(表 3)。

5)稻田种养。与中稻单作相比,稻田种养降低了 CH_4 排放量,降幅 19.0%~19.5%;但增加 12.9%~27.4%的 N_2O 排放量;稻田种养稳定甚至增加了水稻产量,尤其是稻虾模式增幅近 14.87%;多种稻田种养模式均降低了增温潜势,降幅 16.5%~17.5%(表 3)。

表 3 农艺措施对稻田固碳减排的影响与潜力

Table 3 Effects and potential of agronomic measures on carbon sequestration and emission reduction in rice fields

农艺措施 Agronomic measure	影响幅度/% Range ability		变化潜力/(kg C-eq/(hm ² ·a)) Potential for change			基础数据来源文献 Source
	全球增温潜势 GWP	产量 Yield	碳排放 Carbon emission	碳固定 Carbon sequestration	碳中和 Carbon neutral	
免耕 No-tillage	-41.3~ -7.7	-5.7~ 1.8	-1 504~ -181	-457~ 93	-150~ 1 194	[3,5,20-21, 26-28]
秸秆还田 Straw returning	-6.5~ 685	-6.9~ 13.5	162~ 7 955	1 026~ 6 989	-6 325~ 3 324	[5,13-14,16, 24,29-32]
氮肥减施 Nitrogen reduction	-48.0~ -27.95	-64.5~ -10.1	-3 954~ -2 014	-2 804~ -1 020	-703~ 2 933	[4,20-22,28]
间歇灌溉 Intermittent irrigation	-54.6~ -42.3	0~ 18.8	-2 541~ -365	-822~ 469	834~ 2 682	[22,30,33]
稻田种 Intergate rice-animal farming	-17.5~ -16.5	-0.5~ 14.9	-476~ -284	-18~ 1141	266~ 1 617	[10-13]

注:1)表中每种农艺措施的试验对象是涵盖了不同地点的不同稻作模式,试验时间是水稻生长季节;2)秸秆还田是指在水稻种植季节之前将前茬作物的秸秆全量还田,秸秆还田方式及还田深度因来源文献而异;3)氮肥减施是指在传统施氮量的基础上降低一定量的氮肥用量,表中氮肥减施的比例均为 100%,即:不施氮肥;4)间歇灌溉是指在水稻生长期采用淹水-烤田-淹水-干湿交替方式进行灌溉,其对照组为全生育期淹水;5)稻田种养是指以水稻作为基础,在水田中放养禽类或水产动物,通过水稻与动物间互惠互利而形成复合生态模式,对照组为水稻单作。Note: 1)The experimental subjects of each agronomic measure in the table are various rice cultivation modes in different locations, and the experimental time is the rice growing season; 2)Straw returning refers to returning all the straw of the previous crop to the field before the rice planting season, and the returning methods and depths of straw returning vary depending on the source literature; 3)Nitrogen reduction refers to the reduction of a certain amount of nitrogen fertilizer on the basis of the traditional nitrogen application. The proportion of nitrogen reduction in the table 3 is 100%, and that is to say no nitrogen fertilizer; 4)Intermittent irrigation refers to the method of flooding-roasting-flooding- alternate drying and wetting during the rice growth period, and the control group is flooding during the whole growth period; 5)Intergated farming of rice and animals refers to breeding poultries or aquatic animals in the paddy field on the basis of rice planting, and the formation of a complex ecological model through mutual benefit between rice and animals, and the control group is rice monoculture.

3.2 不同农艺措施固碳减排潜力

1)免耕。与翻耕相比,免耕均降低了碳排放,减

排潜力 181~1 504 kg C-eq/(hm²·a);而对碳固定影响不确定,范围 -457~93 kg C-eq/(hm²·a);

碳中和变化 $-150 \sim 1\,194 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表3);免耕主要是通过减排实现碳盈余(图4)。

2) 秸秆还田。与不还田相比,秸秆还田均增加了碳排放,增加潜力 $162 \sim 7\,955 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;秸秆还田因秸秆碳的返还而显著增加碳固定量,范围 $1\,026 \sim 6\,989 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;碳中和变化 $-6\,325 \sim 3\,324 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表3);秸秆还田主要是通过增汇实现碳盈余(图4)。

3) 氮肥减施。与常规施氮相比,氮肥减施既降低了碳排放也降低了碳固定,碳排放增加潜力 $2\,014 \sim 3\,954 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,主要是因为氮肥减施显著降低间接碳排放;碳固定降低 $1\,020 \sim 2\,804 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,虽然碳中和变化 $-703 \sim 2\,933 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表3),但总体而言,施肥主要是通过影响碳汇及碳排实现碳盈余(图4)。

4) 间歇灌溉。与常规淹灌相比,间歇灌溉均减少了碳排放,减排潜力 $365 \sim 2\,541 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,而对碳固定影响不确定,变化范围 $-822 \sim 469 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,但均实现了碳盈余,变化范围 $834 \sim 2\,682 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表3),间歇灌溉主要通过减排实现碳盈余(图4)。

5) 稻田种养。与常规稻作相比(表3),稻田种养均降低了碳排放,减排潜力 $284 \sim 476 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;对碳固定影响不确定,范

围 $-18 \sim 1\,141 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,碳中和变化 $266 \sim 1\,617 \text{ kg C-eq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;稻田种养主要是通过减排及碳循环利用实现碳盈余(图4)。

4 低碳稻作与稻田固碳减排技术体系

低碳稻作是以高产、低排、高效为目标,以增加碳汇、减少碳排、降低能耗、促进循环为路径,从品种结构、稻作模式、耕作方式、管理举措等方面协调水稻生产碳源和碳汇功能,实现高效率、低能耗、低碳排、高碳汇的稻作体系^[34]。构建低碳稻作体系应从4个方面着手(图5):一是控制碳的生产性输入及消耗;二是减少水稻生产系统的碳排放;三是增加水稻生产系统的碳汇;四是提高水稻生产系统的碳利用效率,构建“增汇优先、减耗为主、减排为重、循环利用”的低碳稻作体系^[35]。

4.1 增汇优先,增汇是实现水稻生产低碳高产、生态安全的核心内容

增加 CO_2 的吸收、转化、固定能力是减缓全球变暖的根本。增强水稻生产碳汇功能一方面要提升水稻生产力,另一方面要增强碳储存能力,重点在于增加土壤碳汇。增强土壤碳汇核心是提高土壤有机质含量,技术途径有:(1)通过秸秆还田、绿肥种植、有机肥及人粪畜尿、植被覆盖等措施增加土壤有机质来源量;(2)通过复种轮作、土地整治、土壤改良、

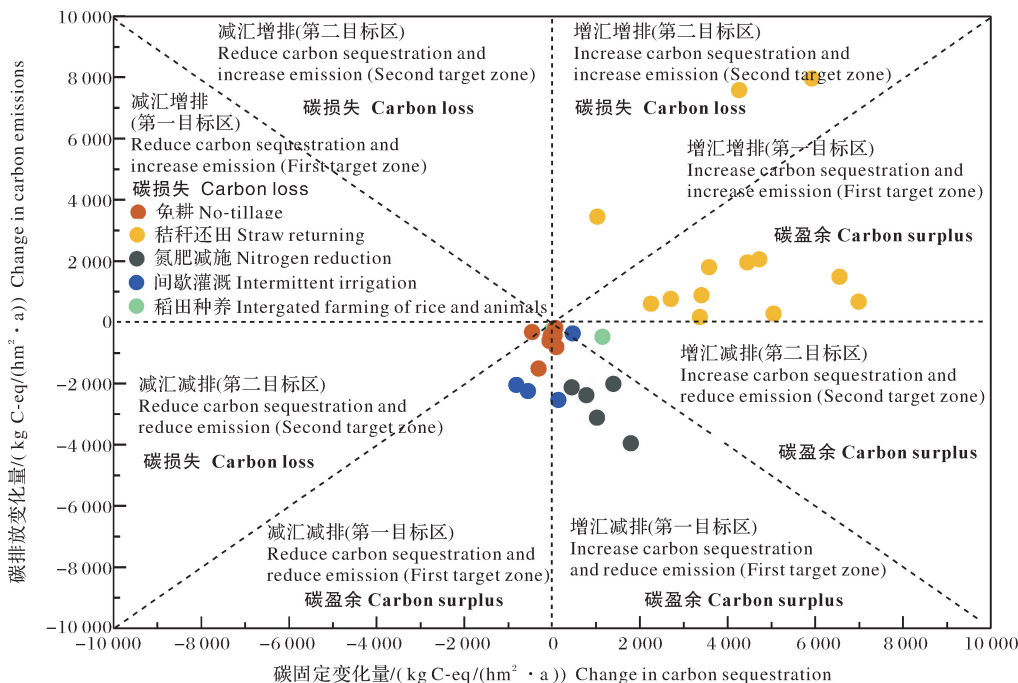


图4 农艺措施对水稻生产固碳减排的影响

Fig.4 Effects of agronomic measures on carbon sequestration and emission reduction in rice production

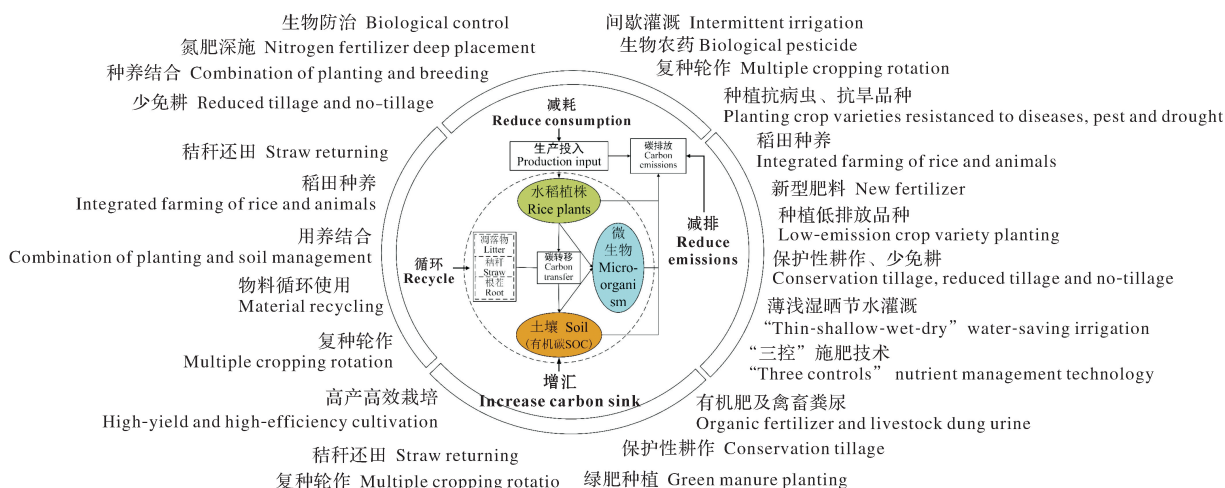


图5 低碳稻作理论与技术体系图

Fig.5 Theoretical and technical system map of low-carbon rice farming

土壤修复、配方施肥等改善土壤环境从而增加土壤有机碳容量;(3)通过控制施肥、合理轮作、保护性耕作、少免耕等措施减少土壤有机质消耗量,从而保证土壤有机碳储量增加。

4.2 减耗为主,减耗是实现水稻生产低碳高产、资源安全的主导内容

水稻生产因农资及能源投入产生的间接碳排放约占碳排放总量的 38.33%~58.07%,是水稻生产中高耗能、高排放的重要原因。减少水稻生产能耗,既要从投入上减少肥料、农药、水资源及能源消耗,也要从过程上提升化肥、农药等资源利用效率,从而降低碳成本提升碳效率。减少碳排放的技术路径有:(1)通过合理轮作、种养结合、绿肥种植、氮肥深施、配方施肥等途径实现减肥;(2)通过抗病虫新品种培育、利用天敌、生物农药、生物修复、种间关系等实现减药;(3)通过干湿交替间歇灌溉、节水抗旱品种等实现节水;(4)通过少免耕、生物耕作、一体化联合机械作业等实现节能。

4.3 减排为重,减排是实现水稻生产低碳高效、环境安全的根本要求

稻田直接碳排放约占碳排放总量的 50%~80%,其中以 CH_4 形态为主的碳排放约占 60%以上,是水稻生产减排的重中之重。减少稻田直接碳排放尤其是 CH_4 排放的路径有:(1)通过稻田种养、合理水肥管理、少免耕及低排品种种植等途径减少稻田直接碳排放;(2)通过使用新型肥料及先进施肥技术提高利用效率减少化肥施用从而抑制土壤有机质分解,降低土壤 CO_2 及 N_2O 的排放。

4.4 循环利用,循环是提升水稻生产碳效率,降低污染的重要途径

水稻生产模式结构单一,系统稳定性差,不仅造成土壤肥力下降,而且产生大量“废弃物”造成浪费;构建水稻生产循环体系,是实现秸秆等副产物资源化利用、促进水稻生产碳循环、提高碳效率的重要途径。技术途径有:(1)农田生产层面通过秸秆还田、稻田种养、用养结合等途径实现稻田小循环;(2)产业层面通过水稻种植业与畜禽养殖及食用菌栽培相结合实现副产物物质和能量的多级多层次利用;(3)区域层面通过区域内种养加产业链间耦合,实现资源在不同组织和产业间的充分利用。

5 展望

水稻种植作为农业温室气体排放的重要来源,同时也是温室气体吸收的重要渠道,通过农艺措施实现水稻增汇减源是低碳稻作的发展方向。如何在更大程度上发挥水稻生产碳汇功能并将其作为助力国家碳中和的重要手段,是推进水稻绿色低碳高质量发展的重要内涵,关键是要进一步增强稻田土壤碳汇功能,土壤碳库容量分别是植物碳库的 3 倍和大气碳库的 2 倍,有学者估算全球农业土壤碳汇潜力为 0.4~0.6 Gt C/a ^[36],当前我国水稻生产中土壤固碳占比约为 12%,如果我国土壤固碳年均增长率提升 1 个百分点,那么每年稻田土壤将多增加 2 Mt 有机碳,相当于吸收(或减排)了 7.33 Mt $\text{CO}_2\text{-eq}$,其减排效应占总碳排放的 9.4%;而农艺措施是影响稻田土壤碳汇功能的重要手段,其潜力约占农业总减

- versity, 2013(in Chinese with English abstract).
- [16] 许国春.不同轮作系统和稻作模式对稻田温室气体排放及氮素平衡的影响[D].南京:南京农业大学, 2017.XU G C. Effects of different rotation systems and cultivation modes on greenhouse gas emissions and nitrogen balance in rice field [D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017(in Chinese with English abstract).
- [17] 邓志明.长江中游区域不同稻田种植系统的固碳能力和碳足迹[D].武汉:华中农业大学, 2020.DENG Z M. Carbon footprints and carbon sequestration capacity of different rice cropping systems in the middle yangtze river region [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [18] 盛锋.稻鸭共育对稻田环境的影响及效益评估[D].武汉:华中农业大学, 2019.SHENG F. Effects of rice-duck rarming on rice field environment and its benefit evaluation[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019(in Chinese with English abstract).
- [19] 陶冶.不同种植方式下水道产量、水氮利用效率及稻田温室气体排放比较研究[D].武汉:华中农业大学, 2016.TAO Y. Comparison among different rice establishment methods: grain yielded, water and nitrogen utilization efficiencies and greenhouse gas emissions [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016(in Chinese with English abstract).
- [20] 王雷.不同油菜秸秆还田方式对稻田温室气体排放和水稻产量的影响[D].武汉:华中农业大学, 2020.WANG L. Effects of different rape straw returning methods on greenhouse gas emissions and rice production in paddy field [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈建.不同氮肥类型和耕作方式对稻田温室气体排放及土壤碳库的影响[D].武汉:华中农业大学, 2016.CHEN J. Effects of different fertilizer sources and tillage practices on GHG emissions and soil carbon pool in paddy fields[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [22] 樊代佳.氮肥深施对免耕稻田土壤有机质特性、甲烷排放及微生物群落的影响机制[D].武汉:华中农业大学, 2020.FAN D J. Effects of nitrogen fertilizer deep placement on organic matter properties, methane emissions and microbial communities in no-tillage paddy soil [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020(in Chinese with English abstract).
- [23] 代光照.免耕施肥对稻田土壤生物学特性及温室气体排放的影响[D].武汉:华中农业大学, 2009.DAI G Z. Effects of no-tillage and application of fertilizer on paddy soil biological characteristics and emissions of the greenhouse gas [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009(in Chinese with English abstract).
- [24] 黄太庆.不同轮作制度稻田生态系统温室气体排放研究[D].南京:南京农业大学, 2011.HUANG T Q. Greenhouse gases emissions from different rotation systems in paddy fields [D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [25] 邓桥江.栽培模式对再生稻稻田土壤肥力、温室气体排放与产量的影响研究[D].武汉:华中农业大学, 2019.DENG Q J. Effects of cultivation modes on soil fertility, greenhouse gases emission and yield in ratoon rice fields[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [26] 郭梨锦.免耕与秸秆还田对稻麦种植系统土壤有机碳库与微生物多样性的影响[D].武汉:华中农业大学, 2018.GUO L J. Effects of no-tillage and straw return on soil organic carbon pool and microbial diversity in rice-wheat systems [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [27] 陈晓龙.耕作方式对圩区单季稻田和冬小麦田温室气体排放的影响研究[D].合肥:安徽农业大学, 2016.CHEN X L. Effects of different tillage methods on the emission of methane and nitrous oxide from the rice-wheat rotation cropland of polder [D].Hefei: Anhui Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [28] 寇志奎.耕作和施肥对稻田生态系统土壤碳排放及碳收支影响的研究[D].武汉:华中农业大学, 2011.KOU Z K. Effects of tillage and application of fertilizer on paddy soil carbon emission and carbon balance [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011(in Chinese with English abstract).
- [29] 秦晓波.长期施肥对稻田温室气体排放影响的田间观测及模拟研究[D].北京:中国农业科学院, 2005.QIN X B. The effect of long-term fertilization on GHG emission from rice field and its simulation study [D].Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005(in Chinese with English abstract).
- [30] 汤宏.秸秆还田下稻田温室气体排放及其对水分管理的响应[D].长沙:湖南农业大学, 2013.TANG H. Greenhouse gases emission from paddy field as affected by rice straw incorporation and its response to water regime [D].Changsha: Hunan Agricultural University, 2013(in Chinese with English abstract).
- [31] 柴凯斌.秸秆还田对稻麦系统作物产量及温室气体排放的影响[D].武汉:华中农业大学, 2018.CHAI K B. The Effects of straw incorporation on crop yield and greenhouse gas emissions under rice-wheat cropping systems [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [32] 刘东琦.秸秆直接还田与炭化还田下稻田土壤性质、水稻生长及温室气体排放变化[D].南京:南京农业大学, 2015.LIU D Q. Effect of straw returning and biochar amendment on soil properties, rice growth and greenhouse gas emission [D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015(in Chinese with English abstract).
- [33] 徐莹.稻田节水灌溉对稻-油轮作温室气体排放及土壤有机碳的影响机制[D].武汉:华中农业大学, 2016.XU Y. Mechanisms of greenhouse gas emissions and soil organic carbon dynamics from rice-rapeseed rotation in different water-saving irrigation

- paddy fields [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [34] 曹凑贵, 李成芳. 低碳稻作理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 25. CAO C G, LI C F. The theory and practice of low carbon rice farming[M]. Beijing: Science Press, 2014: 25 (in Chinese).
- [35] 秦艳梅. 常规与有机生产方式下稻田和菜地温室气体(CH₄和N₂O)排放研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. QIN Y M. Greenhouse gases (CH₄ and N₂O) emission from rice and vegetable fields under conventional and organic cropping regimes in southeast China [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [36] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623-1627.

Situation of carbon neutrality in rice production and techniques for low-carbon rice farming

CHEN Songwen¹, LIU Tianqi¹, CAO Cougui¹, LING Lin², WANG Bin³

1. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation (The Middle Reaches of Yangtze River) / College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Macro Agriculture Research Institute / College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract Carbon sequestration and emission reduction of rice field is an important measure for China to achieve the strategy for carbon neutrality. Based on defining the carbon source and carbon sink function of rice production, the situation of regional carbon emission and carbon neutrality of provinces and cities in the middle and lower reaches of the Yangtze River was analyzed. The characteristics of carbon emission under different rice farming modes were studied. The impact and potential of different agronomic measures on carbon sequestration and emission reduction of rice fields were evaluated. A low-carbon rice farming pattern of “Increase carbon sequestration, reduce emission, reduce consumption and recycle” was proposed and constructed. Results of statistically analyzing literature showed that the carbon neutrality level of provinces and cities in the middle and lower reaches of the Yangtze River ranged from -1.52 to 1.75 million tons C-eq. The carbon neutrality level of the rice farming model in the region ranged from -401 to 2 673 C-eq (hm² · a). In general, carbon surplus can be achieved by agronomic measures including no-tillage, straw returning, nitrogen reduction, intermittent irrigation, integrated planting and farming in rice field. It is indicated that the carbon neutrality level of rice production can be improved through reasonable agronomic measures and optimizing the layout of rice cultivation patterns.

Keywords carbon neutrality; low-carbon rice farming; emission of greenhouse gases; green production of rice; rice cultivation modes; agronomic measures; carbon sequestration and emission reduction; circulation and consumption reduction

(责任编辑: 张志钰)