

周杏, 李晶, 于书霞, 等. 基于减排潜力与减排成本的水稻种植模式综合评价——以湖北省为例[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 568-575.

ZHOU Xing, LI Jing, YU Shu-xia, et al. Comprehensive Assessment of Rice Planting Patterns Based on Emission Reduction Potential and Cost: A Case Study of Hubei Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(6): 568-575.

基于减排潜力与减排成本的水稻种植模式综合评价——以湖北省为例

周杏¹, 李晶^{1,2}, 于书霞^{1*}, 刘微¹, 胡荣桂¹

(1.华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 2.河南省濮阳市清丰县环境保护监测站, 河南 濮阳 457300)

摘要:种植模式是影响农业碳排放的重要因素之一,分析通过改变种植模式实现碳减排的可行性,筛选并推荐适宜的低碳种植模式,对实现农业低碳高效发展具有重要的意义。本文以湖北省水稻种植为例,在识别区域主要种植模式的基础上,核算模式间的碳排放强度和生产成本,分析通过生产模式转换实现碳减排的可行性和潜力,并最终筛选出适宜的低碳排、高效益型种植模式。结果表明,湖北省3个主要水稻种植区20种植模式间碳排放强度及生产成本差异明显,通过种植模式的调整可实现碳减排。鄂中水稻种植区适宜推广的种植模式为:中稻-油菜、间歇灌溉、适量施肥、秸秆不还田和机械耕作;江汉平原水稻种植区适宜推广的种植模式为:中稻-油菜、淹水-烤田-淹水-间歇灌溉、适量施肥、秸秆不还田和机械耕作;鄂东北水稻种植区适宜推广的低碳种植模式为:中稻-小麦、间歇灌溉、适量施肥、秸秆不还田和机械耕作。种植模式从基准模式向各个区域推荐模式转换过程,可以实现碳排放强度和生产成本的同时降低。研究结果可以为种植模式综合评估和低碳农业发展路径选择提供参考。

关键词:水稻种植模式;减排潜力;减排成本;湖北省

中图分类号:S181

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)06-0568-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0115

Comprehensive Assessment of Rice Planting Patterns Based on Emission Reduction Potential and Cost: A Case Study of Hubei Province, China

ZHOU Xing¹, LI Jing^{1,2}, YU Shu-xia^{1*}, LIU Wei¹, HU Rong-gui¹

(1.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.Environmental Protection Monitoring Station of Qingfeng of Henan Province, Puyang 457300, China)

Abstract: The planting pattern is one of the important factors that affect the agricultural carbon emission. Analyzing the feasibility of carbon reduction through changing the planting pattern, screening and recommending the suitable low-carbon planting pattern are of great significance to realize the low-carbon and efficient development of agriculture. Based on the identification of the main paddy planting patterns in Hubei Province, the carbon emission intensity and production costs among patterns were calculated, the feasibility and potential of carbon reduction through transformation of production modes were analyzed, and the suitable low-carbon and high-efficiency planting patterns were selected. The results showed that there were significant differences of carbon emission intensity and production costs among 20 planting patterns in three major paddy growing areas in Hubei Province. It indicated carbon reduction could be achieved through adjusting the planting pattern. The carbon emission intensity and production costs could be reduced simultaneously, when the base planting pattern was converted to the recommended mode of each area. The reasonable irrigation practices and rotation systems and the adjustment of agricultural inputs were the key factors in achieving effective reductions in carbon emissions while reducing economic costs. The results of this study can provide a reference for the comprehensive evaluation of planting patterns and the selection of low-carbon agriculture development path.

Keywords: paddy planting pattern; emission reduction potential; emission reduction cost; Hubei Province

收稿日期:2017-05-04 录用日期:2017-09-05

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资助(2662015PY065);中国清洁发展机制基金赠款项目“湖北省低碳农业模式研究”(2012020)

作者简介:周杏(1993—),女,广西玉林人,硕士研究生,主要从事环境规划与管理方面的研究。E-mail:461036774@qq.com

*通信作者:于书霞 E-mail:shuxia_yu@mail.hazu.edu.cn

随着建设生态文明、深化节能减排战略的持续推进,农业面临着保障粮食安全与减少碳排放的双重压力。种植模式是影响碳排放的重要因素之一,不同模式间碳排放及经济成本差异显著。目前关于种植模式的评价多关注经济、社会效益的分析,主要包括对产量、经济收益、劳动力投入等的评估^[1],鲜有将碳排放指标纳入评价体系。识别种植模式,定量核算其碳排放及相关经济成本,分析通过改变种植模式实现碳减排的可行性,对于评价种植模式的综合效益,实现农业低碳排、高效益的发展目标具有重要的参考意义。

农业碳减排的可行性受技术、经济 2 个方面因素影响,分别用减排潜力和减排成本表征。减排潜力是指通过调整农田管理措施而产生的碳排放量改变,反映技术措施对碳减排的贡献。推广免耕、合理施肥、优化稻田水分管理方式等是目前应用最为广泛的种植业碳减排措施。如推广配方施肥以及加施缓释肥可显著降低农业用地 N_2O 排放^[2],稻田间歇灌溉较长期淹灌处理减少 46% 的稻田 CH_4 排放及 42% 的总温室效应^[3]。秦晓波等^[4]的研究结果则显示免耕高茬还田的耕作方式能在提高水稻产量的同时降低双季稻田温室气体排放强度。减排成本表示减少(增加)单位农业碳排放量所导致生产成本的变化量,反映减排措施的经济有效性。关于农业减排成本的研究多集中于应用边际减排成本核算不同国家或部门层面的减排成本及单项减排措施的实施成本^[5-7]。农业边际减排成本与碳排放强度密切相关,碳排放强度越低,其农业减排成本相对越高,通过减轻农业碳减排成本较高区域的减排任务可促进区域农业经济发展^[8]。定量分析不同种植模式的碳减排潜力、减排成本,从经济效益及环境影响方面辨析种植模式,可为种植业低碳排高效益种植模式的筛选提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

湖北省属于我国华东、华中单双季稻作带,亚热带季风性湿润气候,光照充足,降雨充沛,雨热同季,耕地质量优越,是我国仅次于湖南、江西的第三大水稻生产省份。水稻作为湖北省产量最高、种植面积最广的粮食作物,在农业发展中占有极重要的地位。受地形、土壤、气候、降水、耕作习惯等多方面因素影响,湖北省可分为鄂中北丘陵岗地种植区、江汉平原种植区、鄂东北低山丘陵种植区三大区域。本文选取武汉市新洲区、仙桃市、荆门市沙洋县为三大种植区域代表,依据种植习惯及发展现状识别现有种植模式,从碳排放及经济成本两方面对模式进行比较分析,评估其减排潜力及综合效益。

1.2 研究方法

1.2.1 水稻种植模式及基准模式

水稻种植模式是特定自然条件下种植习惯的组合。除自然因素外,耕作方式、水分管理、施肥习惯、秸秆处理方式和轮作制度是区分水稻种植模式的主要依据^[9-10]。本研究基于实地调研结果,依据上述几方面因素识别归纳各区域的主要种植模式。

基准模式是区域内具有较高普及程度,能够代表区域种植平均水平的种植模式。利用种植模式的普及度、碳排放负荷、经济成本 3 个指标,从社会、环境、经济等方面对基准模式进行筛选,确保其符合当下的农业现状并具备技术及经济有效性,从而确保种植模式综合效益评价的客观可靠。其中,普及度是进行基准模式选取的首要因素,代表区域的种植现状,碳负荷代表种植模式的碳水平,经济成本则代表区域农业经济水平。各指标含义及评价方法见表 1。

利用表 1 所确定的指标,通过确定指标权重,结

表 1 基准模式选取指标
Table 1 The index for selecting baseline pattern

评价指标	权重系数	指标释义	评价方法
普及度	0.5	使用特定种植模式的农户数占总调研农户数的比重	对 n 个模式的普及度进行排序,普及度最小的模式评分为 1,最大的评分为 n,以此类推。公式: $P_i = P_x \cdot P_A$ 。其中, P_i 为某一种种植模式的普及度指标评分; P_x 为该模式的普及度评分; P_A 为普及度权重。
碳负荷	0.25	特定种植模式下单位水稻产出所产生的温室气体排放量	对 n 个模式碳负荷与平均负荷差值的绝对值进行排序,绝对值最大的模式评分为 1,最小的评分为 n。公式: $C_i = C_x \cdot C_A$ 。其中, C_i 为某一种种植模式的碳负荷指标评分; C_x 为该模式的碳负荷评分; C_A 为碳负荷权重。
经济成本	0.25	特定种植模式下单位水稻产出所需的成本	对 n 个模式经济成本与平均成本间差值的绝对值进行排序,绝对值最大的模式评分为 1,最小的评分为 n。公式: $E_i = E_x \cdot E_A$ 。其中, E_i 为某一种种植模式的经济成本指标评分; E_x 为该模式的经济成本评分; E_A 为经济成本权重。

合实际调研情况对各指标进行排序评分,最终将各指标评分进行加和排名,选取得分最高,即普及度较高,碳排放负荷及经济效益接近平均水平的模式作为基准模式。

1.2.2 水稻产出碳排放及经济成本核算

水稻生产过程的净碳排放量,即碳源与碳汇的差值。本文中碳源包括稻田甲烷排放、农用能源和农业投入品生产及使用过程中的间接碳排放、秸秆处置产生的碳排放。碳汇部分则包括水稻经济产量、水稻根系和秸秆中的固碳量。计算方法见表 2。

单位水稻产出碳排放核算如下:

$$E_{Ti} = (E_{CH_4} + E_{ei} + E_{mi} + E_{ji}) - E_{Hi} \quad (1)$$

式中: E_{Ti} 、 E_{CH_4} 、 E_{ei} 、 E_{mi} 、 E_{ji} 、 E_{Hi} 分别代表 i 种植模式下单位水稻产出的净碳排放量、甲烷排放量、农用能源生产及使用碳排放量、农资生产及使用碳排放量、水稻秸秆处置产生碳排放量、水稻固碳量, $\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本文将秸秆处置方式分为还田和不还田 2 种,秸秆不还田统一简化为焚烧情景。秸秆还田后秸秆在微生物的作用下,大部分被分解最终以 CO_2 形式进入大气中,只有少量被微生物同化或加工,以微生物残体或代谢产物的形式进入土壤有机碳库^[11]。本文假设秸秆和根系固碳量与秸秆焚烧及秸秆还田腐解产生碳排放可以相互抵消,因此不考虑秸秆还田的碳排放

量,秸秆焚烧主要关注 CH_4 、 N_2O 的排放,不考虑 CO_2 排放,水稻固碳量指水稻经济产量部分的固碳,不包括秸秆和根系的固碳。

水稻产出成本的核算范围界定为可能影响到碳排放的人为可控投入。主要包括水稻种植过程中购买化肥、农药产生的费用(农资成本)、雇佣农机的费用以及灌溉过程中所消耗的电力。当一项投入变化后造成的结果不会对碳排放造成影响,或造成的影响并非人为可控时,则不包含在本次经济成本核算中。计算方法见表 2。

单位水稻产出成本核算如下:

$$W_{Ti} = W_{li} + W_{2i} + W_{ai} \quad (2)$$

式中: W_{Ti} 、 W_{li} 、 W_{2i} 、 W_{ai} 分别表示 i 种植模式下单位水稻产出消耗的成本、农资成本、农用机械使用成本及灌溉成本, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2.3 基于碳减排潜力与减排成本的种植模式综合评价

水稻种植模式的减排潜力是指当基准模式向另一种种植模式转变时,单位水稻产出所带来的碳排放的变化:

$$\Delta Q_i = E_{Ti} - E_{Ti} \quad (3)$$

式中: ΔQ_i 表示 i 种植模式下单位水稻产出的减排潜力($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$); E_{Ti} 、 E_{Ti} 分别表示基准种植模式与

表 2 水稻种植碳排放及相关成本核算

Table 2 The methods for calculating carbon emissions and costs in paddy planting

项目	计算方法	相关文献
稻田甲烷排放(E_{CH_4})	由修正后的 CH_4MOD 模型模拟	[12]
农用能源生产及使用碳排放(E_e)	柴油、汽油碳排放(E_{ei}): $E_{ei} = Q_e \times f_{ei}$; $f_{ei} = f_{ei} + f_{ui}$; $f_{ui} = f_{ui} \times 4 \times 186.8 \times 10^{-12} \times q$ 。其中 Q_e 为单位水稻产出的柴油、汽油使用量($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); f_{ei} 为能源全生命周期碳排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$); f_{ei} 为原油开采、储运、炼制过程中的碳排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$),取值 0.036; f_{ui} 为能源燃烧的建议排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$); f_{ui} 为一次能源的 CO_2 原始排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{TJ}^{-1}$); q 为我国单位能源所含热值($\text{Kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$)。	[13]
农资碳排放(E_m)	电力碳排放(E_{e2}): $E_{e2} = E_n \times P_f \times F_c \times f_{ec}$ 其中 E_n 为单位水稻产出的耗电量($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$); P_f 为火力发电占比(%); F_c 为火力发电的平均煤耗($\text{kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$),取值 0.326; f_{ec} 为我国标煤建议碳排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标煤)。	[13]
	化肥生产及使用碳排放(E_{mi}): $E_{mi} = (f_{mi} + f_{vi}) \times Q_f$ 其中 f_{mi} 、 f_{vi} 为不同化肥的生产、使用碳排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$); Q_f 为单位水稻产出的化肥消耗量($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。	[14-15]
	农药碳排放(E_{m2}): $E_{m2} = Q_N \times f_{Nc}$ 其中 Q_N 为单位水稻产出消耗的农药量($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); f_{Nc} 为农药全生命周期碳排放系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$),取值 13.8。	[16-17]
秸秆处置碳排放(E_{ji})	秸秆焚烧的温室气体排放量(E_{ji}): $E_{ji} = Y \times \alpha \times f_i \times GWP_i$ 。其中 Y 为水稻产量(kg); α 为秸秆转化系数; f_i 为秸秆燃烧温室气体排放因子($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$),其中秸秆燃烧 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放因子分别为 0.656、 2.19×10^{-3} 和 0.11×10^{-3} ; GWP_i 为温室气体效应值,其中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的 GWP 分别为 1、25 和 298。	[13, 18]
水稻种植固碳量(E_{Hi})	$E_{Hi} = Y \times (1 - \omega) \times f_{ci}$ 其中 Y 为水稻产量(kg); ω 为稻谷含水量(%); f_{ci} 为生物量与含碳量的转化系数($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$),取值 0.45。	[19-20]
农资成本(W_1)	$W_1 = W_F + W_N$ 。其中 W_F 、 W_N 分别为单位水稻产出所需化肥及农药的费用($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。	—
农用机械使用成本(W_2)	$W_2 = W_A + W_B + W_C$ 。其中 W_A 、 W_B 、 W_C 分别为单位水稻产出翻耕机、插秧机、收割机使用费($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。	—
灌溉成本(W_3)	$W_3 = T_e \times e_g$ 。其中 T_e 为单位水稻产出所需灌溉时间($\text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$); e_g 为灌溉 1 h 所需电费($\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$)。	—

注:碳排放系数来自 IPCC,我国能源所含热值参考《省级温室气体排放清单编制指南》。

i 种植模式下单位水稻产出的碳排放量($\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

减排成本是单位碳排放改变而产生的经济成本的差异:

$$C_i = \frac{W_{Ti} - W_{T0}}{\Delta Q_i} \tag{4}$$

式中: C_i 表示 i 种植模式下的减排成本[元·($\text{kg CO}_2\text{-eq}$) $^{-1}$]; W_{T0} 、 W_{Ti} 分别表示基准种植模式与 i 种植模式下单位水稻产出的经济成本(元· kg^{-1})。

1.3 数据来源

区域内水稻种植模式确定数据由实地调研获得,有效问卷共 158 份。各排放系数、温室气体排放因子和模型运行所需数据来自《IPCC 温室气体排放清单指南》、《省级温室气体清单编制指南》、《湖北农村统计年鉴》(2014 年)、《湖北统计年鉴》(2014 年)、《中国能源统计年鉴》。

2 结果与讨论

2.1 水稻种植模式及基准模式

湖北省水稻轮作模式以水稻-油菜、水稻-小麦为主。水分管理方式包括全淹水、淹水-烤田-淹水-间歇灌溉、淹水-烤田-间歇灌溉、间歇灌溉等。以农

业主管部门的推荐施肥量为标准,大于推荐肥料施用量 30%视为过量施肥,反之视为不足,±30%区间内则属于适量施肥。调研结果显示各区域均存在过量施肥现象,秸秆还田在农户间的推广并不理想,大部分农户仍选择焚烧或其他方式处理秸秆,论文对不还田秸秆均以焚烧处理来核算其碳排放。研究区域已基本实现水稻机械收割、翻耕,畜力使用比重较低。依据实际调研结果中各项管理措施在 3 个稻作区的应用,归纳出 20 种主要水稻种植模式(表 3)。

排名结果显示最能代表湖北省水稻种植普遍水平的模式为 1-3,即鄂中丘陵岗地种植区的中稻-油菜、淹水-烤田-复水-间歇灌溉、适量施肥、秸秆不还田、机械耕作模式。水稻种植模式的单位减排潜力、单位减排成本均以此为基础进行核算。

2.2 碳排负荷与经济成本分析

各种植区域由于自然条件、种植习惯的不同,单位面积稻田碳排放量及生产成本差异显著(图 1)。单位面积碳净排放量最高为模式 2-1,达 17 215.2 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$,最低的为模式 2-3,仅 3 019.5 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此通过排放因子法进行稻田碳排放的核算存在较大的不确定性,不能充分体现种植模式对碳排放的影响。

表 3 湖北省水稻种植模式
Table 3 Paddy planting patterns in Hubei Province

种植区域	模式编号	轮作模式	灌溉模式	施肥程度	秸秆处理	耕作情况	代表性排名
鄂中丘陵岗地种植区	1-1	中稻-油菜	淹-烤-间	适量	不还田	50%机械	17
	1-2	中稻-油菜	淹-烤-间	过量	100%还田	牛耕	6
	1-3	中稻-油菜	淹-烤-淹-间	适量	不还田	机械耕作	1
	1-4	中稻-油菜	淹-烤-淹-间	过量	不还田	机械耕作	8
	1-5	中稻-闲田	淹-烤-间	过量	不还田	机械耕作	9
	1-6	中稻-闲田	淹-烤-淹-间	适量	100%还田	机械耕作	3
	1-7	中稻-油菜	间歇灌溉	适量	不还田	机械耕作	18
江汉平原种植区	2-1	中稻-小麦	淹-烤-淹-间	过量	不还田	机械耕作	9
	2-2	中稻-油菜	淹-烤-淹-间	过量	不还田	机械耕作	20
	2-3	中稻-闲田	淹-烤-淹-间	适量	100%还田	机械耕作	3
	2-4	中稻-油菜	淹-烤-淹-间	适量	不还田	机械耕作	14
	2-5	中稻-油菜	间歇灌溉	过量	不还田	机械耕作	9
	2-6	中稻-油菜	间歇灌溉	适量	不还田	机械耕作	2
	2-7	中稻-小麦	淹-烤-间	适量	不还田	机械耕作	9
鄂东北丘陵种植区	3-1	中稻-油菜	淹-烤-间	适量	不还田	牛耕	6
	3-2	中稻-油菜	淹-烤-淹-间	适量	100%还田	机械耕作	13
	3-3	中稻-小麦	间歇灌溉	适量	不还田	机械耕作	15
	3-4	中稻-闲田	淹-烤-淹-间	过量	不还田	机械耕作	15
	3-5	中稻-油菜	间歇灌溉	适量	不还田	牛耕	3
	3-6	中稻-闲田	淹-烤-间	适量	不还田	机械耕作	18

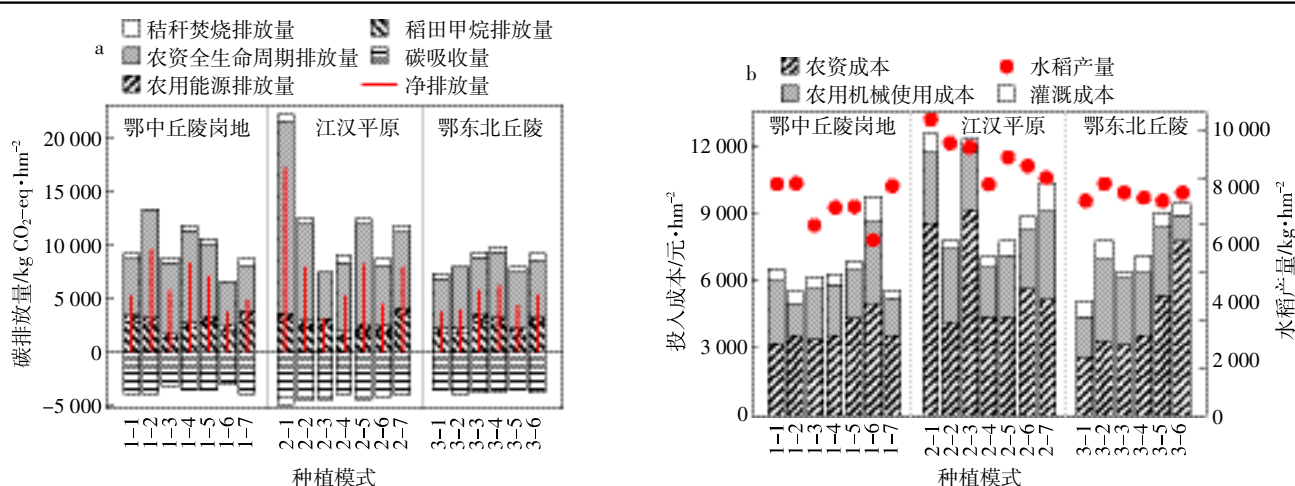


图 1 湖北省各水稻种植区域水稻种植碳排放及投入成本结构图

Figure 1 Structure of carbon emissions and input costs in different paddy planting patterns in Hubei Province

碳排放负荷指标能综合评价不同模式产量、碳排放的特征。已识别的 20 种模式中,碳排放负荷差异显著,最高的是模式 2-1,单位水稻产出的碳排放为 $1.38 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$,模式 2-3 碳排放负荷最低,单位水稻产出碳排放仅为 $0.27 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。分区统计结果显示,鄂中丘陵岗地种植区各模式碳排放负荷为 $0.50\sim 0.97 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值 $0.71 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。江汉平原种植区各模式的排放负荷为 $0.27\sim 1.38 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值 $0.69 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鄂东北丘陵种植区各模式碳排放负荷为 $0.41\sim 0.68 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值 $0.53 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。区域间碳排放负荷差异不明显,而区域内不同模式间差异显著,水稻碳排放负荷主要受人为管理措施而非自然条件影响。由各种种植模式的碳排放构成可知(图 1a),农资生产及使用所产生的碳排放占比最大,占总碳排放量 $50\%\sim 81\%$,稻田甲烷的贡献次之,占总碳排放量的 $14\%\sim 31\%$ 。降低农业碳排放负荷,应从提高农资利用效率、优化稻田管理措施降低甲烷排放入手。

模式间与碳排放有关的生产成本差异明显(图 1b)。模式 1-6 单位水稻产出经济成本最高,达 $1.32 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$,模式 1-2,3-1 成本最低,仅为 $0.57 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同区域及不同模式间农资投入强度、产量水平的差异是引起农资投入成本差异的主要因素。如模式 1-6 的施肥程度为适量,但因为其具有较高的农药投入、农机雇佣费用及灌溉成本和较低的产量导致该模式单位产出成本代价高于其他种植模式。调研结果显示,农资投入是影响经济成本的主要因素,模式间化肥投入成本差异明显。降低水稻产出成本的关键在于提高农资尤其是化肥的利用效率。

2.3 水稻低碳种植模式综合评估

以模式 1-3 为基准模式,计算当基准模式向各水稻种植模式转换时的减排潜力及减排成本(图 2~图 4),进而对区域水稻种植模式进行评价。所有模式中,低排放低成本($\Delta Q_i > 0$ 且 $C_i < 0$)的种植模式有 6 种,占有所有模式 30%。高排放低成本($\Delta Q_i < 0$ 且 $C_i < 0$)种植模式有 3 种,占有所有模式的 15%,高排放高成本($\Delta Q_i < 0$ 且 $C_i > 0$)种植模式有 3 种,占有所有模式的 15%。低排放高成本($\Delta Q_i > 0$ 且 $C_i > 0$)的种植模式有 7 种,占有所有模式的 35%。湖北省水稻种植模式仍有巨大的优化空间,已识别的种植模式中有 13 种模式相对于基准模式有减排的潜力,通过调整种植模式在区域内实现碳减排具有可行性。其中有 6 种模式在实现碳减排的同时具有低的生产成本,能够满足低碳排放高效益的发展要求。

由于水稻种植碳排放及经济成本、种植习惯等存在地域性差异,且模式的推广也应兼顾地域性特征,分区域进行。

2.3.1 鄂中丘陵岗地种植区

鄂中丘陵岗地种植区,模式 1-1、1-7 相对于基准模式具有低的碳排放和经济成本,模式 1-2、1-4 减少单位碳排放的经济成本较基准模式低,但碳排放强度较高,模式 1-6 碳排放强度较低,但成本相对基准模式高,模式 1-5 具有高的碳排放和经济成本。模式 1-1 和 1-7 的减排潜力(ΔQ_i)分别为 $0.16 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.21 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$,对应碳减排成本(C_i)分别为 $-0.64 \text{ 元}\cdot(\text{kg CO}_2\text{-eq})^{-1}$ 和 $-0.95 \text{ 元}\cdot(\text{kg CO}_2\text{-eq})^{-1}$ (图 2)。两种模式之间的差别在于灌溉模式、农资投入和耕作方式。间歇灌溉需要反复抽水灌溉,由此引

起的农用能源碳排放较淹水-烤田-间歇灌溉模式高。水分管理通过影响土壤温度、土壤呼吸强度和组分影响温室气体的排放^[21-23](图 1a)。模式 1-7 农资投入水平小于模式 1-1(图 1b)。因此,产量相近的情况下,模式 1-7 具有较高的减排潜力,且经济成本低,具有更高经济效益。此外结合调研结果,农户更偏好机械耕作,模式 1-7 较模式 1-1 有较高的推广可行性。鄂中丘陵岗地种植区已有的种植模式向中稻-油菜轮作、间歇灌溉、适量施肥、机械耕作、秸秆不还田模式转换,可以产生较好的经济效益,同时降低单位水稻产出的碳排放强度。

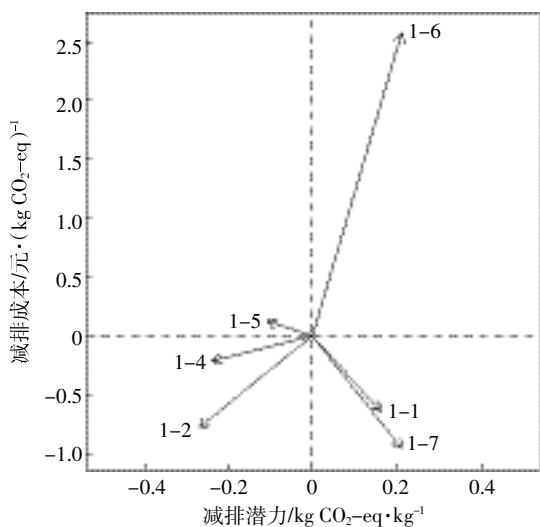


图 2 鄂中丘陵岗地水稻种植模式单位减排潜力及单位减排成本
Figure 2 The unit emission reduction potential and cost in different paddy planting patterns in middle hill

2.3.2 江汉平原种植区

江汉平原种植区内,由基准模式向已识别的种植模式转换时,模式 2-2、2-3、2-4、2-6 都将带来一定的碳减排($\Delta Q_i > 0$),碳减排潜力介于 $0.02 \sim 0.44 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。当基准模式向模式 2-1、2-5、2-7 转换时,将在不同程度上增加单位产出的碳排放($\Delta Q_i < 0$),增幅在 $0.05 \sim 0.67 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间(图 3)。轮作模式、秸秆处理方式和农资投入强度是影响不同模式间碳排放强度的主要因素。轮作模式通过影响土壤含水量、温度等理化性质影响稻田 CH_4 排放,中稻-闲田轮作模式种植前的闲田阶段杂草提供了大量产甲烷基质,会增加稻作季 CH_4 的排放,中稻-小麦和中稻-油菜轮作模式因前茬种植小麦和油菜在秸秆不还田的情况下可能降低土壤有机碳含量,从而降低 CH_4 产生量^[24-25](图 1a)。秸秆处理方式显著影响

碳排放,秸秆不还田增加碳排放的同时,不利于提高土壤肥力和增加作物产量,因此模式 2-3 具有高的减排潜力。但依据调研结果,稻-小麦和稻-油菜轮作是区域内主要的轮作模式,具有较高的代表性(表 3)且对于稳定粮食产量有重要作用,因此中稻-闲田的模式在江汉平原推广存在一定难度。江汉平原种植区碳减排成本(C_i)差异显著,单位碳排放变化所带来的生产成本变化量在 $-6.55 \sim 3.14 \text{ 元} \cdot (\text{kg CO}_2\text{-eq})^{-1}$ 之间。模式 2-3 和模式 2-6 具有一定的减排潜力,但其减排成本显著高于基准模式,不具有推广价值。模式 2-2、2-4 均属于低排放高效益模式。就减排成本而言模式 2-2 最具优势,但模式 2-4 具有更高的减排潜力,且适量施肥更符合农业发展需求。以模式 2-4 为代表的中稻-油菜轮作,淹水、烤田、淹水间歇灌溉的水分管理,适量施肥,秸秆不还田情景下已具有较好的减排潜力和成本优势,辅以秸秆还田改进措施将可以产生更好的综合效益,可以作为该区域的推荐模式。

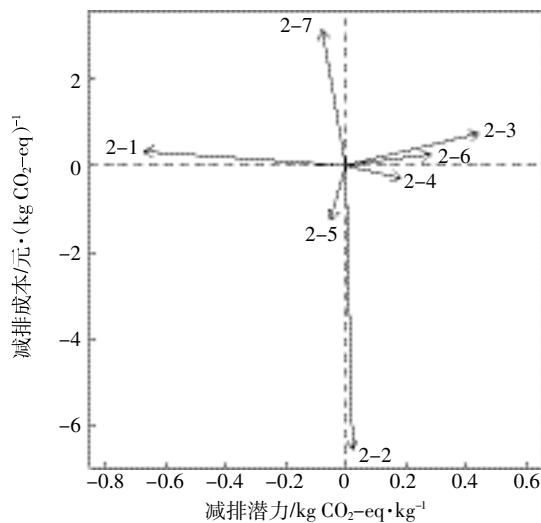


图 3 江汉平原水稻种植模式单位减排潜力及单位减排成本
Figure 3 The unit emission reduction potential and cost in different paddy planting patterns in Jiangnan plain

2.3.3 鄂东北丘陵种植区

种植模式受地域种植习惯和种植条件的限制,鄂东北种植区农资投入强度低于鄂中丘陵岗地和江汉平原地区,其中推荐施肥量最低,仅为鄂中丘陵岗地种植区 89%,因而具有较高的减排潜力。鄂东北丘陵种植区所有种植模式单位水稻产出碳排放量均小于基准模式,具有一定减排潜力($\Delta Q_i > 0$),减排潜力介于 $0.03 \sim 0.29 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。模式间减排成本(C_i)差异显著,不同模式减少单位碳排放所带来的生产成

本差异在 $-0.88 \sim 1.81$ 元 $\cdot(\text{kg CO}_2\text{-eq})^{-1}$ 之间。模式3-3减排成本最低,单位碳减排将带来0.88元的相对收益。模式3-1减排成本仅次于模式3-3,每单位碳排放的降低将减少0.71元生产成本。综合考虑减排潜力及单位减排成本,模式3-1及模式3-3较其他模式更具推广价值。模式3-1水分管理方式下稻田淹水时间短,能有效降低稻田 CH_4 排放,具有较高的减排潜力,但模式3-3具有较高的减排收益,且机械耕作方式更易于被农户接受。鄂东北丘陵种植区中稻-油菜是较为普遍的轮作模式,因此模式3-3可以作为该区域的推广模式。

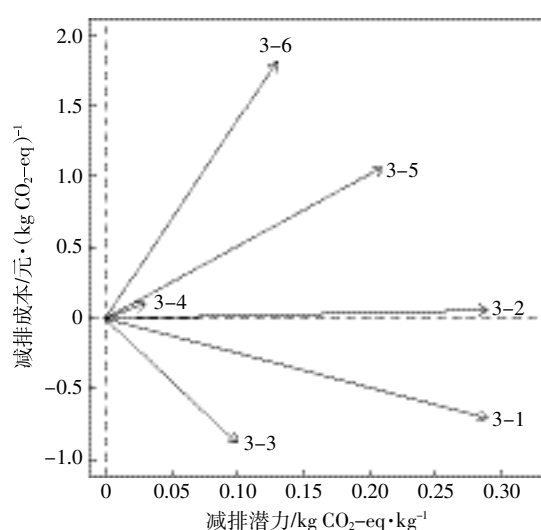


图4 鄂东北丘陵水稻种植模式单位减排潜力及单位减排成本
Figure 4 The unit emission reduction potential and cost in different paddy planting patterns in northeast hill

3 结论

综合碳排放和经济成本2个基本属性对所识别的水稻种植模式进行综合评估,并结合不同种植区域的生产实际,分别筛选出区域内低碳排、低成本的水稻种植模式。种植模式间碳排放及经济成本差异明显,通过改变种植模式可以在降低生产成本的同时,实现碳减排。结果可为区域发展低碳高效稻作提供借鉴。

不同种植区域内由于种植习惯及种植条件等不同,适宜推广的低碳排、低成本水稻种植模式具有明显差异。鄂中丘陵岗地种植区已有的种植模式中,中稻-油菜轮作、间歇灌溉、适量施肥、机械耕作、秸秆不还田种植模式最具推广价值。江汉平原种植区适宜推广的种植模式为中稻-油菜轮作、淹水-烤田-淹水-间歇灌溉、适量施肥、机械耕作、秸秆不还田。鄂东北

丘陵种植区适宜推广的模式则为中稻-小麦轮作、间歇灌溉、适量施肥、机械耕作、秸秆不还田。

合理的灌溉方式、轮作制度是影响水稻碳排放强度的关键因素,而农资投入水平不仅影响碳排放,也是影响生产成本的关键因素。通过调整优化农资投入,在有效减少碳排放的同时也可以带来经济成本的降低即减排效益的增加。

文中种植模式均是生产实际调研所获得,各个区域所推荐模式仍具有进一步优化的空间,如秸秆由不还田调整为还田,将更有助于降低生产成本、提高土壤肥力并降低碳排放强度。

参考文献:

- [1] 王晓杰. 基于比较优势理论的江苏省种植模式优势度评价[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
WANG Xiao-jie. A dominance evaluation of cropping pattern based on the comparative advantage theory in Jiangsu province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [2] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273.
DONG Hong-min, LI Yu-e, TAO Xiu-ping, et al. China greenhouse gas emission from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 269-273. (in Chinese)
- [3] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008(12): 4294-4300.
YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH_4 and N_2O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(12): 4294-4300. (in Chinese)
- [4] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216-224.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH_4 and N_2O emission from double rice field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11): 216-224. (in Chinese)
- [5] Minihan E S, Wu Z. Economic structure and strategies for greenhouse gas mitigation[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 350-357.
- [6] Pathak H, Wassmann R. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture: I. Generation of technical coefficients[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94(3): 807-825.
- [7] Wassmann R, Pathak H. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture: II. Cost-benefit assessment for different technologies, regions and scales[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94(3): 826-840.
- [8] 吴贤荣, 张俊彪, 朱 烨, 等. 中国省域低碳农业绩效评估及边际减排成本分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(10): 57-63.
WU Xian-rong, ZHANG Jun-biao, ZHU Ye, et al. Evaluation of provincial low-carbon agriculture performance and estimation of marginal abatement costs in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(10): 57-63. (in Chinese)

- [9] 林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 等. 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5):267-270.
LIN Kuang-fei, XIANG Ya-ling, JIANG Da-bing, et al. Methane emission flux from paddy fields and its control in Hubei[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(5):267-270. (in Chinese)
- [10] 胡立峰, 李琳, 陈阜, 等. 不同耕作制度对南方稻田甲烷排放的影响[J]. 生态环境学报, 2006, 15(6):1216-1219.
HU Li-feng, LI Lin, CHEN Fu, et al. Effect of different tillage on methane emissions in paddy field[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6):1216-1219. (in Chinese)
- [11] 王金洲. 秸秆还田的土壤有机碳周转特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
WANG Jin-zhou. Soil organic carbon turnover under straw return[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [12] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究——模型及其修正[J]. 生态学报, 2004, 24(11):2347-2352.
ZHANG Wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model and modification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11):2347-2352. (in Chinese)
- [13] Paustian K, Ravindran N H, Amstel A V. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories (volume 4): Agriculture, forestry and other land use[M]. Kanagawa: IGES, 2006.
- [14] Silva G A, Kulay L A. Application of life cycle assessment to the LCA case studies single superphosphate production[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(4):209-214.
- [15] 籍春蕾, 丁美, 王彬鑫, 等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价[J]. 土壤通报, 2012(2):412-417.
JI Chun-lei, DING Mei, WANG Bin-xin, et al. Comparative evaluation of chemical and organic fertilizer on the base of life cycle analysis methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012(2):412-417. (in Chinese)
- [16] 李波, 张俊彪, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8):80-86.
LI Bo, ZANG Jun-biao, LI Hai-peng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8):80-86. (in Chinese)
- [17] 黄祖辉, 米松华. 农业碳足迹研究——以浙江省为例[J]. 农业经济问题, 2011(11):40-47.
HUANG Zu-hui, MI Song-hua. Study on agricultural carbon footprint: A case study of Zhejiang province [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011(11):40-47. (in Chinese)
- [18] 刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 农业残留物燃烧温室气体排放清单研究: 以江苏省为例[J]. 环境科学, 2011, 32(5):1242-1248.
LIU Li-hua, JIANG Jing-yan, ZONG Liang-gang. Emission inventory of greenhouse gases from agricultural residues combustion: A case study of Jiangsu province [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1242-1248. (in Chinese)
- [19] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4):332-350.
- [20] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(6):804-812.
FANG Jing-yun, GUO Zhao-di, PIAO Shi-long, et al. Estimation of carbon sinks from terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2007, 37(6):804-812. (in Chinese)
- [21] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61(1-2):77-92.
- [22] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3):820.
- [23] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12):2420-2430.
ZHANG Qian-bing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12):2420-2430. (in Chinese)
- [24] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3):290-296.
ZHANG Yue-fang, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Methane and nitrous oxide emission under different paddy-upland crop rotation systems during rice growth season in Taihu lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3):290-296. (in Chinese)
- [25] 张广斌, 马二登, 张晓艳, 等. 冬季秸秆还田和土地管理对水稻生长期 CH_4 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2501-2505.
ZHANG Guang-bin, MA Er-deng, ZHANG Xiao-yan, et al. Effects of rice straw incorporation and land management in winter on methane emission during rice-growing season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2501-2505. (in Chinese)