

## 基于农户调查的长江中游地区双季稻生产碳足迹及其构成

陈中督 徐春春 纪龙 方福平\*

(中国水稻研究所, 杭州 311300; \*通讯联系人, E-mail: ffping1971@hotmail.com)

### Carbon Footprint Analysis of Double Cropping Rice Production in the Middle Yangtze River Valley Based on Household Surveys

CHEN Zhongdu, XU Chunchun, JI Long, FANG Fuping\*

(China National Rice Research Institute, Hangzhou 311300, China; \*Corresponding author, E-mail: ffping1971@hotmail.com)

**Abstract:** 【Objective】The middle Yangtze River Valley is one of the major double cropping rice areas in China, and it is of great significance to analyze the carbon footprint of double cropping rice for developing low-carbon agriculture in this region. 【Method】According to a survey on farmers, the carbon footprint of double rice production in the middle Yangtze River Basin was estimated using a life-cycle assessment method in the agricultural sector. The proportion of different agricultural inputs in the carbon footprint of double cropping rice production was explored. In addition, the relationships between fertilizer and irrigation inputs and the double cropping rice yield, carbon footprint and the rice grain yield were analyzed. 【Result】The results showed carbon footprint per unit yield, carbon footprint per unit biomass and carbon footprint per unit production value for double rice in the middle Yangtze River Valley were 0.67 kg/kg, 0.35 kg/kg and 0.27 kg/CNY, respectively, showing a significant decrease with the increase of double yield. The main components of the carbon footprint were CH<sub>4</sub> (66.2%), Diesel consumption (13.2%) and fertilizer (10.9%). With low grain yield, 22.4% early rice field and 36.7% late rice field were found excessively-fertilized, and 28.4% and 33.5% were excessive in irrigation. There were large potentials in energy saving and emission reduction. A decrease of carbon footprint in early rice and late rice was found in large-sized farms by 29.7% and 37.2%, respectively, compared to smaller ones. This study demonstrated that carbon footprint of crop production could be affected by farm size and climate condition as well as crop management practices. 【Conclusion】Thus, moderate reduction of double-cropping rice area and developing technology that saves water and fertilizer, as well as conservation tillage technology and large scaled farms could help mitigate greenhouse gas emissions from double-cropping rice production of the middle Yangtze River Valley.

**Key words:** carbon footprint; double cropping rice; global warming; life cycle assessment

**摘要:** 【目的】长江中游地区是我国双季稻主产区, 系统分析双季稻生产碳足迹构成对于该地区农业的固碳减排和发展低碳农业具有重要的意义。【方法】基于农业碳足迹理论及生命周期评价法, 采用问卷调查方式定量研究长江中游地区双季稻生产碳足迹, 分析其构成因素, 解析长江中游地区双季稻生产肥料、灌溉投入以及碳足迹与水稻产量的关系。【内容】长江中游地区双季稻单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹分别为 0.67 kg/kg、0.35 kg/kg 和 0.27 kg/元, 随着产量的增加呈现显著降低的趋势。CH<sub>4</sub> 排放、柴油、肥料为长江中游地区双季稻生产碳排放主要来源, 分别占双季稻生产碳足迹的 66.2%、13.1% 和 10.9%。早稻和晚稻生产分别有 22.4% 和 36.7% 的地块氮肥投入过量, 28.4% 和 33.5% 的地块灌溉投入过量且产量较低, 存在着较大的节能减排潜力。种植规模与碳足迹呈现显著负相关关系。与小规模双季稻种植相比, 大规模早稻和晚稻种植单位产量碳足迹分别降低了 29.7% 和 37.2%。这项研究表明, 作物生产的碳足迹可能受到农场规模、气候条件以及作物管理实践的影响。【结论】因此, 适当减少双季稻种植面积并发展水稻节水节肥及免耕技术, 构建规模化的低碳种植模式必将成为未来长江流域双季稻生产应对气候变化发展低碳农业的重要举措。

**关键词:** 碳足迹; 双季稻; 全球变暖; 生命周期

中图分类号: S181.6; S511.047

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)06-0601-09

当前, 人类面临的最为严峻的环境问题之一是全球气候变暖, 研究表明, 近 50 年由自然因素和

人类活动共同造成气候变暖是过去几十年甚至千年来史无前例的<sup>[1]</sup>。世界绝大多数国家已经意识

收稿日期: 2018-06-19; 修改稿收到日期: 2018-07-31。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(粮食丰产增效科技创新, 2016YFD0300210); 浙江省自然科学基金项目(LQ18G030013)。

到减排任务的重要性,并在2014年联合国气候峰会和2015年巴黎气候峰会上承诺在未来的15年将全球碳排放降低到20年前的水平,从而降低全球温度<sup>[2]</sup>。根据IPCC最新评估报告显示,在全球温室气体排放占比中,农业源温室气体排放所占比例较大(24%),其中农业CH<sub>4</sub>年均排放量所占比例为70%,远远高出工业领域排放<sup>[3]</sup>。近20年,化肥生产、施用及运输所带来的温室气体排放呈现急剧上升趋势,占到农业领域温室气体排放量的13%~20%。因此,如何通过技术进步和政策的优化来提高农业领域作物的生产效率,从而发展农业低碳经济,有利于我国农业可持续性健康发展。

碳足迹起源于生态足迹,用以表征人类活动的温室效应代价。农业碳足迹指代农产品在这个生育时期内直接和间接产生的温室气体总量,其单位以全球增温潜势表示<sup>[4]</sup>。目前,碳足迹已经广泛地运用于农业领域。Cheng等<sup>[5]</sup>利用近30年的国家农作物农资投入统计数据,计算评估了我国不同农作物的单位产量碳足迹,指出水稻、小麦、玉米和大豆的单位产量碳足迹分别为0.37、0.14、0.12和0.10 kg/kg。黄祖辉和米松华<sup>[6]</sup>采用2008年浙江省投入产出表统计数据和联合国政府间气候变化专门委员会相关实验数据,运用生命周期法对我国浙江省农业碳排放及其组分进行了深度分析,指出化肥生产及运输引起的碳排在浙江省农业系统碳排放中所占比重最大。王占彪等<sup>[7]</sup>通过对河北省棉花的调研数据,评估了河北省棉花碳足迹及其组成,并对氮肥及灌溉投入量与产量的关系进行分析。现阶段,国内外对农作物的碳足迹的研究较多,但是基本上是基于生产投入统计数据,基于农户大规模调研数据的双季稻碳足迹及其低碳减排策略的研究鲜见报道。另外,通过文献分析表明,目前碳足迹分析基本上基于面积和产量作为功能单位进行碳足迹评价,较少从生产投入产出角度,基于经济产值及净利润等方面进行综合分析,从而达到农户作物生产的生态及经济的协调统一。

长江中游地区的双季稻生产在中国占有重要地位,其中2016年湖南和江西两地双季稻播种面积为 $5.77 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,占到全国双季稻播种面积的49.1%,双季稻产量为 $3.48 \times 10^7$  t,占到全国双季稻总产量的50.2%(中国农业统计资料2016)。近20年来,我国双季稻单产呈现显著增长的趋势,但是化肥等农资投入同样呈现增加的趋势,从而带来温室气体排放的显著增加。研究长江中游地区双季稻碳足迹及其构成,为长江中游地区双季稻健康可持

续性发展提供有力的数据支持显得尤为重要。因此,本研究基于农户调研数据,运用生命周期法评价分析长江中游地区双季稻生产碳足迹及构成,并阐述碳足迹影响因素机制,以期为我国长江流域双季稻低碳生产提供理论指导及数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

于2016–2017年调研了长江中游地区江西、湖南双季稻主产区,每个省份选取2~3个县,每个县选择2~3个农村,每个村庄随机选择20名双季稻种粮户,对其双季稻种植过程中的农资投入数据进行详细调研和分析,共计收到问卷120份,有效问卷106份,问卷合格率达88%。调查内容包括双季稻种子投入量、销售价格,化肥投入、农膜使用量、机械柴油消耗量、灌溉耗水量等。

### 1.2 研究边界

以水稻季播种到收获整个生育期为研究界限,计算分析生育期内水稻生产直接温室气体排放和间接温室气体排放(图1)。具体而言,主要包括三部分内容:1)种子、化肥、农膜、农药等生产和运用中所产生的间接温室气体排放;2)农事操作过程中灌溉耗电、耕作收获耗油间接耗费化石燃料所形成的温室气体排放;3)水稻种植期间,所产生的稻田温室气体直接排放。理论上,稻田温室气体排放主要包括有CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>等,但水稻光合作用所固定的CO<sub>2</sub>要大于呼吸产生的CO<sub>2</sub>,在水稻生育期内的CO<sub>2</sub>净排放通量为负值,因此,CO<sub>2</sub>一般不列入稻田温室气体排放清单<sup>[9]</sup>。

### 1.3 计算方法

碳足迹及稻田CH<sub>4</sub>计算方法主要参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》<sup>[10]</sup>。水稻农资投入碳足迹计算如下:

$$CF_i = \sum_{i=1}^n (\partial m)_i \quad (1)$$

式中, $CF_i$ 为早稻和晚稻生产的农资投入单位面积碳足迹(kg/hm<sup>2</sup>); $n$ 表示该双季稻生产系统从播种到收获整个过程消耗的农业生产资料种类和农事操作(化肥、农药、柴油等); $\partial$ 表示某种农资的消耗量(kg); $m$ 表示某种农资的温室气体排放参数。本研究排放参数主要源于中国生命周期数据库(CLCD 0.7)和Ecoinvent 2.2数据库(表1)。

稻田CH<sub>4</sub>的排放量的计算方法参考ISO/TS14067碳足迹核算标准,计算公式如下:

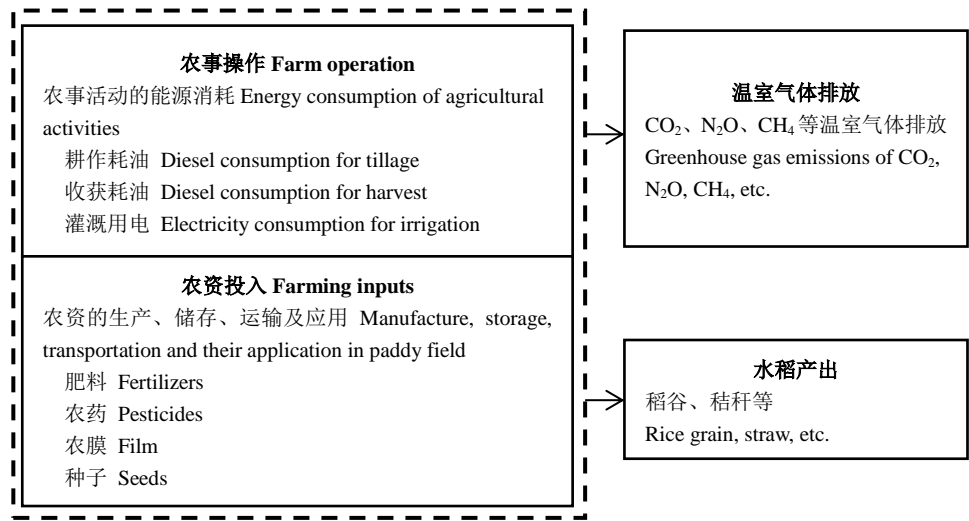


图 1 水稻生产碳足迹计算边界  
Fig. 1. System boundary for calculating greenhouse gas(GHG) emissions in the rice cropping system.

表 1 农业投入资料的温室气体排放系数  
Table 1. Index of greenhouse gas(GHG) emission of different material for agricultural production.

项目 Item	单位 Unit	系数 Coefficient	来源 Source
柴油 Diesel	kg/kg	0.89	CLCD 0.7
柴油燃烧 Diesel combustion	kg/kg	4.10	CLCD 0.7
灌溉用电 Electricity for irrigation	kg/kg	0.82	CLCD 0.7
氮肥 N	kg/kg	1.53	CLCD 0.7
磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg/kg	1.63	CLCD 0.7
钾肥 K <sub>2</sub> O	kg/kg	0.65	CLCD 0.7
农膜 Film	kg/kg	22.72	Ecoinvent 2.2
杀虫剂 Insecticides	kg/kg	16.61	Ecoinvent 2.2
除草剂 Herbicides	kg/kg	10.15	Ecoinvent 2.2
杀菌剂 Fungicides	kg/kg	10.57	Ecoinvent 2.2
水稻种子 Rice seed	kg/kg	1.84	Ecoinvent 2.2

$$CF_{CH_4} = EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times 25$$
$$EF_{i,j,k} = EF_C \times SF_W \times SF_P \times SF_O$$
$$SF_O = (1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59}$$
$$ROA_i = Y \times 0.623 \times ISR_p \times 0.85$$

2)

3)

4)

5)

$SF_W$ 、 $SF_P$  分别为种植期不同水分状况的换算系数和种植期之前不同水分状况的换算系数。结合肖玉的研究<sup>[12]</sup>，本研究中  $SF_W=1$ 、 $SF_P=1$ 。 $SF_O$  是有机添加物类型和数量变化的换算系数。 $CFOA$  表示在品种土质之间有机添加物的转换系数，本研究调查发现调查农户均在种植前不久进行秸秆还田处理，因此  $CFOA$  取值为 1<sup>[10]</sup>； $ROA_i$  为有机添加物的施用比率； $Y$  为双季稻产量(kg/hm<sup>2</sup>)；0.623 为水稻草谷比； $ISR_p$  为稻谷的秸秆还田系数，表示农户稻草还田占稻草产量的比例。0.85 为水稻秸秆干质量占鲜质量的比值<sup>[13]</sup>。

稻田直接 N<sub>2</sub>O 通过氮肥施用量进行估算<sup>[14]</sup>，计算公式如下：

$$CF_{N_2O} = N \times 0.003 \times \frac{44}{28} \times 298$$

6)

式中,  $CF_{N_2O}$  为田间  $N_2O$  排放引起的二氧化碳排放当量。N 是稻田纯氮投入量( $kg/hm^2$ )。0.003 是农田土壤  $N_2O$  排放系数; 44/28 为  $N_2O$  与  $N_2$  分子量比重; 298 为  $N_2O$  转换成 100 年尺度上的相对全球增温潜势。

水稻生产的单位面积碳足迹( $CF$ ), 单位产量碳足迹( $CF_y$ )、单位生物产量碳足迹( $CF_b$ )、单位产值的作物生产碳足迹( $CF_v$ )的计算分别见以下公式:

$$CF = CF_i + CF_{CH_4} + CF_{N_2O} \quad (7)$$

$$CF_y = CF/Y \quad (8)$$

$$CF_b = CF/B \quad (9)$$

$$CF_v = CF/V \quad (10)$$

式中,  $Y$  为双季稻经济产量,  $B$  为双季稻生物产量,  $V$  为双季稻出售产值。

#### 1.4 数据处理与分析

利用 EXCEL 2011 和 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, US) 软件对数据进行处理和统计分析, 采用 EXCEL 2011 和 Sigmaplot 12 制作图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 长江中游地区双季稻生产的碳足迹

长江中游地区双季稻生产碳足迹如图 2 所示。长江中游地区早稻生产单位产量碳足迹值为 0.67 kg/kg, 最大值与最小值分别为 0.94、0.52 kg/kg; 单位生物产量图 3 显示了双季稻生产过程中氮肥及灌

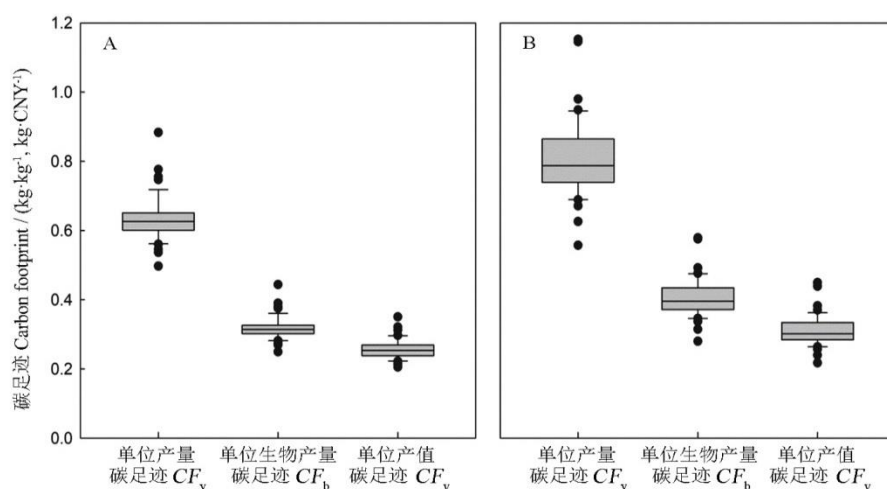
溉量投入与双季稻产量的相关关系。从图 3 中可知, 双季稻量碳足迹值为 0.34 kg/kg, 最大值与最小值分别为 0.47、0.26 kg/kg; 单位产值碳足迹值为 0.27 kg/元, 最大值与最小值分别为 0.37、0.22 kg/元; 长江中游地区晚稻生产单位产量碳足迹值为 0.67 kg/kg, 最大值与最小值分别为 0.96、0.46 kg/kg; 单位生物产量碳足迹值为 0.33 kg/kg, 最大值与最小值分别为 0.48、0.23 kg/kg; 单位产量碳足迹值为 0.26 kg/元, 最大值与最小值分别为 0.37、0.18 kg/元。

### 2.2 长江中游地区双季稻生产的碳足迹构成

长江中游地区双季稻生产的碳足迹构成如表 2 所示。早稻和晚稻生产碳足迹组成中水稻种植产生的  $CH_4$  占比最大, 约占 66%, 直接  $N_2O$  占 5%, 农资投入品引起的碳足迹占 29%。在农资投入品中, 柴油投入所产生的碳足迹最大, 早稻生长季所占比例为 44%, 而晚稻生长季所占比例更大, 占 47%。其次是化肥投入引起的碳足迹, 早稻和晚稻生产分别占农资投入碳足迹的 34% 和 42% (早稻: 氮肥 27%、磷肥 3%、钾肥 5%; 晚稻: 氮肥 33%、磷肥 4%、钾肥 6%)。农膜生产所带来的温室气体排在第四位, 早稻排放占农资投入碳足迹 11%, 稍高于种子所产生的碳足迹, 而由于农膜可以重复利用, 晚稻生产过程中不再产生由农膜引起的碳足迹。农药投入所带来的温室气体排放最低, 早稻和晚稻贡献度分别为 1.3% 和 1.8%。其中, 农药组成中, 贡献率表现为杀菌剂>杀虫剂>除草剂。

### 2.3 氮肥和灌溉投入量对水稻产量的影响

图 3 显示了双季稻生产过程中氮肥及灌溉量投



A—早稻单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹; B—晚稻单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹。

A, Carbon footprint per unit yield( $CF_y$ ), biomass( $CF_b$ ), and output value( $CF_v$ ) of early rice; B, Carbon footprint per unit yield( $CF_y$ ), biomass( $CF_b$ ), and output value( $CF_v$ ) of late rice.

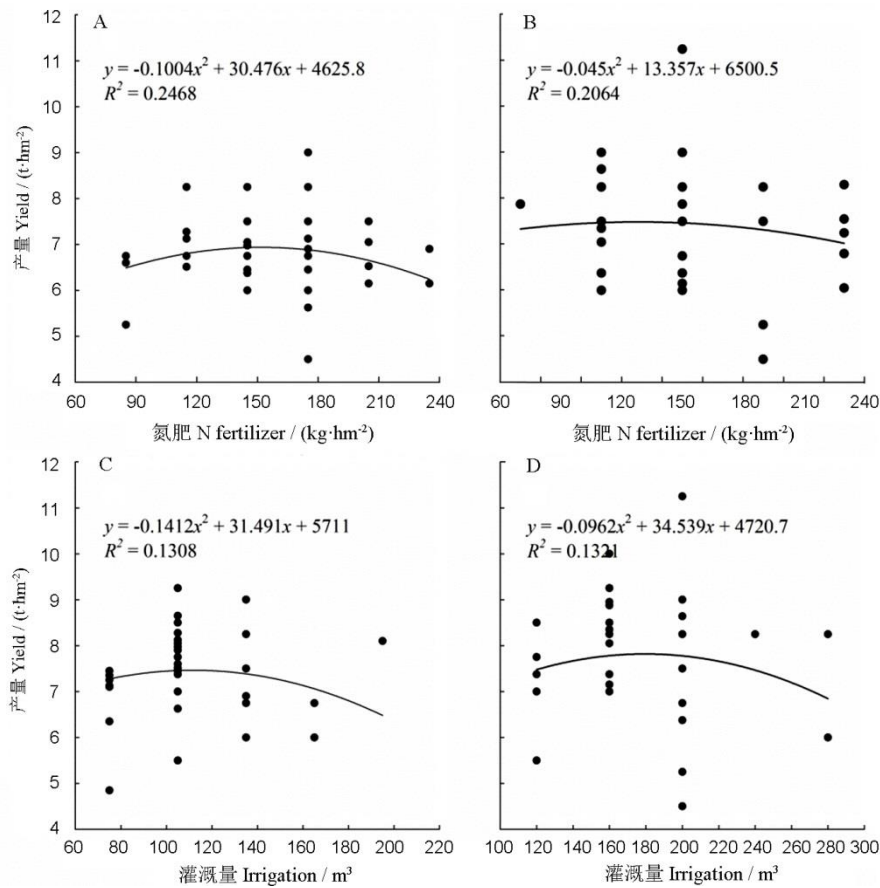
图 2 长江中游地区双季稻生产碳足迹

Fig. 2. Carbon footprint of double cropping rice production in the middle Yangtze River Valley.

表 2 长江中游地区双季稻生产碳足迹构成

Table 2. Mean proportions of the carbon footprint of double cropping rice in the middle Yangtze River Valley.

项目 Item	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	双季稻 Double rice
N <sub>2</sub> O	4.92	5.04	4.98
CH <sub>4</sub>	63.5	68.7	66.2
柴油 Diesel fuel	13.9	12.3	13.1
灌溉 Irrigation	0.5	0.6	0.5
农膜 Plastic film	3.6	0.0	1.7
种子 Seeds	2.5	1.7	2.1
除草剂 Herbicides	0.0	0.1	0.1
杀虫剂 Insecticides	0.2	0.2	0.2
杀菌剂 Fungicides	0.2	0.2	0.2
氮肥 N	8.4	8.6	8.5
磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.9	1.1	1.0
钾肥 K <sub>2</sub> O	1.4	1.5	1.5



A—早稻产量与氮肥施用量的关系；B—晚稻产量与氮肥施用量的关系；C—早稻产量与灌溉量的关系；D—晚稻产量与灌溉量的关系。

A, Relationship of actual yield of early rice with N-fertilizer application rate; B, Relationship of actual yield of early rice with N-fertilizer application rate; C, Relationship of actual yield of early rice with irrigation amount; D, Relationship of actual yield of early rice with irrigation amount.

图 3 长江中游地区双季稻氮肥和灌溉投入量与产量的关系

Fig. 3. Relationship of N-fertilizer and irrigation inputs with yield of double-cropping rice in the middle Yangtze River Valley.

入与双季稻产量的相关关系。从图中可知，双季稻产量与氮肥投入呈现出二次曲线关系，即随着氮肥投入的增加呈现先增加后减少的趋势。拟合曲线表明，早稻和晚稻产量峰值分别出现在氮肥投入量达到 151.8 和 148.4 kg/hm<sup>2</sup> 时，说明长江中游地区双

季稻可实现低投入高产出的最优氮肥施用量。调研稻田中，超过早稻田最佳氮肥施用量 151.8 kg/hm<sup>2</sup> 和晚稻田最佳氮肥施用量 148.4 kg/hm<sup>2</sup>，农户数分别占到调研农户的 61.2% 和 79.6%，其中 38.8% 的地块早稻和 36.7% 的地块晚稻化肥超过最佳化肥施

表3 长江中游地区双季稻不同种植规模碳足迹投入及构成

Fig. 3. Carbon footprint of double cropping rice at different scales in the middle Yangtze River Valley. kg/hm<sup>2</sup>

项目 Items	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	大规模 LZF	中规模 MZF	小规模 SZF	大规模 LZF	中规模 MZF	小规模 SZF
柴油 Diesel fuel	484.7±65.2 b	526.8±91.3 b	676.2±44.1 a	525.3±77.1 b	571.5±102.1 b	772.0±66.6 a
氮肥 N	255.6±31.1 c	361.4±53.3 b	470.9±50.2 a	332.2±54.5 c	412.5±20.1 b	554.2±77.9 a
磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	19.2±8.2 b	38.5±11.4 a	42.9±10.5 a	34.2±9.7 b	36.9±16.4 b	66.3±15.4 a
钾肥 K <sub>2</sub> O	65.5±20.1 a	57.1±17.2 a	67.1±15.9 a	52.4±15.1 b	85.1±16.8 a	96.2±9.4 a
灌溉 Irrigation	15.3±5.1 b	18.3±3.8 b	25.3±1.8 a	31.7±8.6 a	23.8±7.1 a	39.3±10.2 a
农膜 Film	153.9±39.1 a	165.4±61.1 a	167.2±38.6 a	-	-	-
种子 Seed	123.6±49.5 a	118.8±55.3 a	111.5±51.7 a	132.3±66.1 a	55.6±19.1 b	74.5±21.9 b
除草剂 Herbicides	1.9±0.9 a	2.0±1.1 a	2.1±0.8 a	3.1±1.2 a	4.5±2.1 a	2.6±1.3 a
杀虫剂 Insecticides	7.0±2.7 a	10.3±4.5 a	5.2±3.9 a	7.3±2.9 a	10.8±3.1 a	10.0±2.9 a
杀菌剂 Fungicides	7.3±3.8 a	8.3±2.9 a	10.5±4.6 a	6.0±3.3 a	8.7±2.7 a	7.3±2.5 a
甲烷 CH <sub>4</sub>	2751.0±902.7 a	2863.1±962.7 a	3018.8±802.9 a	3106.4±1009.1 a	3403.8±122.1 a	3480.1±1245.4 a
氧化亚氮 N <sub>2</sub> O	149.9±31.1 c	212.2±28.2 b	276.3±28.2 a	198.2±21.8 c	252.2±32.9 c	329.6±41.5 c
面积碳足迹 Cf	4035.1±302.7 b	4382.2±232.1 b	4874.0±202.1 a	4429.3±333.1 b	4865.3±298.1 b	5532.2±442.1 a
产量 Yield	7500.0±511.2 a	6653.2±302.7 b	6222.0±441.2 b	7800.0±311.1 a	7403.6±413.2 a	6037.5±849.1 b
产量碳足迹 Cf <sub>y</sub>	0.54±0.05 c	0.66±0.02 b	0.78±0.08 a	0.57±0.05 b	0.66±0.09 b	0.92±0.13 a

不同小写字母表示不同种植规模间的差异显著水平 ( $P<0.05$ )。种植规模分为小( $<0.67\text{ hm}^2$ )、中( $0.67\sim2.0\text{ hm}^2$ )和大( $>2.0\text{ hm}^2$ )三种类型。  
Different small letters indicate significant differences between farm size classes at  $P<0.05$ . LZF, Large sized farm( $>2.0\text{ hm}^2$ ); MZF, Medium sized farm( $0.67\sim2.0\text{ hm}^2$ ); SZP, Small sized farm( $<0.67\text{ hm}^2$ ).

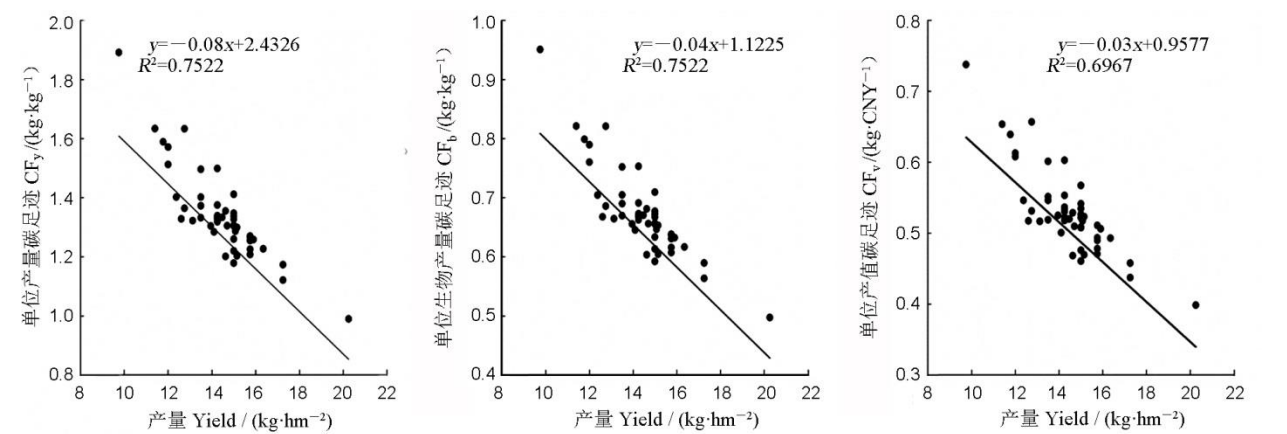


图4 长江中游地区双季稻碳足迹与产量的关系

Fig. 4. Relationship of carbon footprint with actual grain yield of double-cropping rice in the middle Yangtze River Valley.

用量的同时产量低于峰值,进一步说明长江中游地区早稻和晚稻生产分别有 38.8%和 36.7%的地块出现氮肥过剩现象,引起不必要的温室气体排放。水稻产量与灌溉量的相关关系与氮肥投入量类似,数学上表现为二次曲线关系,即随着灌溉量的增加呈现出先增加后减少的关系,早稻和晚稻产量峰值分别出现在灌溉量为 111.5 m<sup>3</sup>和 179.5 m<sup>3</sup>时,同样说明,水稻田可避免减少不必要的灌溉次数。调研稻田中,超过早稻田最佳灌溉量 111.5 m<sup>3</sup>和最佳灌溉量 179.5 m<sup>3</sup>的农户数分别占到调研农户的 59.4%和 66.7%,其中 28.4%的早稻田和 33.5%的晚稻田灌溉量超过最佳灌溉量的同时产量低于峰值,说明长江中游地区早稻和晚稻生产分别有 28.4%和 33.5%的

地块灌溉投入过量,可适当减少田间灌溉次数,从而达到节能高效的目的。

2.4 长江中游地区双季稻不同种植规模碳足迹

不同种植规模的双季稻生产粮食的碳足迹情况见表 3。由表 3 可知,双季稻碳足迹与种植规模显著负相关,即碳足迹随着种植规模的增大而呈下降趋势。进一步将种植规模分为小( $<0.67\text{ hm}^2$ )、中( $2\sim6.67\text{ hm}^2$ )和大( $>20\text{ hm}^2$ )三种类型进行研究,早稻单位产量碳足迹分别为 0.78、0.66、0.54 kg/kg,而晚稻相应的碳足迹分别为 0.92、0.66 和 0.57 kg/kg,小规模和大规模差异均达显著水平( $P<0.05$ )。长江中游地区早稻大规模种植平均单产为 7500 kg/hm<sup>2</sup>,较小规模种植平均单产(6222.0 kg/hm<sup>2</sup>)提高了



20.5%。大规模早稻生产单位面积柴油、氮肥和磷肥碳足迹显著低于小规模早稻生产，降幅分别为28.3%、45.7%和55.2% ( $P < 0.05$ )。大规模种植晚稻平均单产为  $7800.0 \text{ kg/hm}^2$ ，较小规模种植平均单产 ( $6037.5 \text{ kg/hm}^2$ ) 提高了29.2%，差异呈显著水平 ( $P < 0.05$ )。比较各构成比例发现，晚稻单位面积柴油、氮肥和磷肥碳足迹显著低于小规模晚稻生产，而种子碳足迹显著高于大规模晚稻生产。

## 2.5 水稻产量与碳足迹关系

长江中游地区双季稻生产碳足迹与产量的关系如图4所示。长江中游地区双季稻产量与单位产量碳足迹、单位生物量碳足迹和单位产值碳足迹之间存在显著的负相关，即双季稻单位产量碳足迹、单位生物量碳足迹和单位产值碳足迹随着产量的增加呈现显著降低的趋势。具体而言，双季稻产量每增加  $1 \text{ t/hm}^2$ ，其单位产量碳足迹降低  $0.07 \text{ kg/kg}$  ( $R^2=0.7862$ )，单位生物量碳足迹降低  $0.04 \text{ kg/kg}$  ( $R^2=0.7863$ )，单位产值碳足迹降低  $0.03 \text{ kg/元}$  ( $R^2=0.7314$ )。

## 3 讨论

### 3.1 长江中游地区水稻碳足迹

本研究通过长江中游地区双季稻种植农户调查数据，基于生命周期评价法，结合碳足迹模型计算分析了碳足迹大小及组成。王兴等<sup>[15]</sup>基于2004—2014年水稻生产相关统计数据，指出我国双季稻生产平均单位产量碳足迹为  $0.89 \text{ kg/kg}$ 。本研究中，长江中游地区双季稻生产单位产量碳足迹、单位产值碳足迹分别为  $0.67 \text{ kg/kg}$ ， $0.27 \text{ kg/元}$ 。该数据稍低于王兴等<sup>[15]</sup>研究结果。农业碳足迹受土壤农作措施及社会经济等多因素的影响，并且各因素彼此之间又存在互作，因此不同区域、不同种植模式，农业碳足迹差异显著；相同区域内不同种植模式以及相同种植模式在不同区域都会存在差异<sup>[16]</sup>。陈中督等<sup>[17]</sup>通过文献综合分析和统计分析相结合的方法，计算分析了我国南方九省双季稻碳足迹情况，指出浙江、广东和海南省早稻和晚稻碳足迹最高，约为  $0.90 \text{ kg/kg}$ ；安徽、福建、湖北和广西四个省份碳足迹较低，约为  $0.50 \text{ kg/kg}$ 。不同作物由于其产量、农资投入水平、田间管理模式不同等因素，碳足迹差异显著。Cheng等<sup>[18]</sup>对我国农作物的单位产量碳足迹进行了估算，得出现阶段我国农作物平均单位产量碳足迹为  $0.11 \text{ kg/kg}$ 。例如，卢小宏等<sup>[19]</sup>基于田间试验数据，计算分析了河北吴桥小

麦和玉米单位产量碳足迹值，分别为  $0.58$  和  $0.29 \text{ kg/kg}$ 。Nelson等<sup>[20]</sup>计算出英国1990—2004年普通小麦的碳足迹为  $0.33 \text{ kg/kg}$ ；王占彪等<sup>[7]</sup>基于农户调研数据，指出河北省棉花单位产量碳足迹平均值为  $0.11 \text{ kg/kg}$ 。可见，单位产量碳足迹表现为水稻>冬小麦>夏玉米>棉花，说明长江中游地区水稻生产投入较高，而不同作物之间双季稻单位产量碳足迹较大。因此，在长江中游地区作物生产布局中应适当压缩双季稻播种面积，适当扩大小麦种植面积，推广稻麦轮作模式，从而减少农业温室气体排放。

### 3.2 长江中游地区双季稻生产碳足迹主要构成

稻田  $\text{CH}_4$  排放是水稻生产碳足迹的主要来源之一，该研究得到科学界的广泛认同。曹黎明等<sup>[11]</sup>对上海市单季晚稻农田温室气体评估值为  $1.28 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ，占全部碳排放的77.2%。Shang等<sup>[21]</sup>的研究发现江苏省2007—2009年双季稻温室气体年均排放量为  $1.55 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ，其中  $\text{CH}_4$  排放量对整个双季稻生产系统碳排放贡献显著。有研究表明，稻田排水烤田及较高的下渗速度都会促进氧气进入到土壤中，有利于提高土壤氧化还原电位，抑制  $\text{CH}_4$  生成，提高  $\text{CH}_4$  氧化能力<sup>[22]</sup>。Yagi等<sup>[23]</sup>的研究表明，水稻生长期的多次排水烤田能有效减少稻田  $\text{CH}_4$  排放，与持续淹水稻田的  $\text{CH}_4$  排放量相比平均可降低45%。影响稻田  $\text{CH}_4$  排放的因素有很多，如土壤性质、水分因素、施肥、气候因素等<sup>[24]</sup>。针对这些影响因素，在稻田灌溉<sup>[25]</sup>、肥料管理<sup>[26]</sup>、品种选择<sup>[27]</sup>、稻田综合种养<sup>[28]</sup>、耕作方式<sup>[25]</sup>等方面采取措施有助于稻田  $\text{CH}_4$  减排。另外，本研究发现柴油投入在双季稻农资投入碳排放中所占比重较大。随着我国农业的高速发展，农业机械化及其自动化是我国农业未来发展的方向及目标，因此，如何协调生态环境及经济效益和谐发展是未来研究的重点，从经济能源高效利用角度实现我国低碳农业生产。肥料碳排放也是农资投入碳足迹的主要排放源，双季稻化肥碳排放占农资投入碳足迹的40%左右，相关研究表明，湖南农业尤其是集约高产产区化肥施用过量，较全国化肥平均施用量高出30%<sup>[29]</sup>。另外，从农户调查中发现，由于早稻生产早期较低的田间温度，为了保证较好的出苗率，农户早稻种子投入量普遍比晚稻高，早稻种子温室气体排放量较晚稻种子提高了35.3%。本研究通过农户调研发现长江中游地区38.8%的早稻地块和36.7%的晚稻地块化肥超过最佳化肥施用量，28.4%的早稻田和33.5%的晚稻田灌溉量超过最佳灌溉量，产量均较低，表明长江中游地区稻农在水稻种植中存在过量施用

氮肥及灌溉现象。因此,应指导稻农在保持水稻产量稳定的情况下,科学施肥及灌溉,提高氮肥及灌溉利用效率,减少双季稻碳足迹。

### 3.3 长江中游地区水稻生产低碳策略

本研究发现,长江中游地区水稻生产碳足迹主要来源于肥料、柴油、种子以及稻田  $\text{CH}_4$  的直接排放上,因此如何减少稻田碳足迹需着重从这几方面进行考虑。通过选用培育根系较大,氧化活力较强,经济系数高,  $\text{CH}_4$  排放量低的水稻品种,提高根系活力,提高氮肥利用率和生物产量,从而降低单位产量碳足迹。农田管理上,采用配方施肥、缓控释肥等技术来提高肥料利用效率,减少肥料使用与排放。大力发展节水农业,在重点灌区全面开展规模化高效节水灌溉行动,配建稻田水肥一体化等技术和设备,实施湿润灌溉、旱作、烤田等措施,努力提高水资源的利用效率,同时减少稻田  $\text{CH}_4$  的排放。通过免耕栽培技术,降低劳动强度,节约柴油消耗,提高土壤有机质含量,从而达到保肥减排的目的。通过推广保护性耕作、早育秧、平衡施肥、适当控水措施为特点的水稻高产栽培技术,可有效减少农资消耗,降低田间温室气体直接排放,有利于长江中游地区水稻低碳农业的可持续性发展。

### 3.4 研究局限性

本研究利用农户调研数据核算双季稻生产的碳足迹,计算过程考虑了水稻生产中最主要的10种农资投入以及田间  $\text{CH}_4$  排放,实现了水稻生产在同一标准下较为全面的计算衡量与比较。但是,本研究所采用的生命周期评价法,系统边界存在一定争议如碳足迹计算时是否考虑人力、畜力、机械磨损和土壤碳变化等。国外学者认为劳动者不管是否在劳作,都需要进行呼吸,呼吸量的多少不以劳动量的多少而改变,因此碳足迹计算时不需要考虑劳动者自身的能源消耗<sup>[3]</sup>。我国学者刘巽浩等<sup>[30]</sup>指出,劳动者作为农业生产的主体,不同的农业活动,其直接能源消耗亦会出现显著差别,因此碳足迹计算时需要着重考虑。王占彪等<sup>[7]</sup>对于河北棉花碳足迹计算时,考虑了劳动者的人力能源消耗,指出人工所占棉花生产碳足迹比例为6.42%,高于农药和柴油等所贡献的碳足迹值。另外,由于中国生命周期数据库中部分参数的缺失,在计算碳足迹时部分参数采用国外参数,所得结果与实际值之间会有一定的差异。因此,在今后的研究中,本课题组将通过布置田间试验,通过实测数据排除背景影响,进一步提高试验结果的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 于兴安. 当代国际环境法发展面临的内外问题与对策分析. 鄱阳湖学刊, 2017: 75-82.  
Yu X A. Internal and external problems and countermeasures in the development of contemporary international environmental law. *J Poyang Lake*, 2017: 75-82. (in Chinese)
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistical Yearbook 2013: World Food and Agriculture. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [3] West T O, Marland G. Net carbon flux from agriculture: Carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1): 73-83.
- [4] Hammod G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue. *Nature*, 2007, 445(7125): 256.
- [5] Cheng K, Pan G, Smith P, Luo T, Li L, Zheng J. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993-2007. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 142(3-4): 231-237
- [6] 米松华, 黄祖辉, 朱奇彪, 黄莉莉. 农户低碳减排技术采纳行为研究. 浙江农业学报, 2014, 26(3): 797-804  
Mi S H, Huang Z H, Zhu Q F, Huang L L. Study on factors influencing farmers' adoption of low-carbon technologies. *Acta Agric Zhejiang*, 2014, 26(3): 797-804. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王占彪, 陈静, 张立峰, 陈阜, 孙红春, 李连涛. 河北省棉花生产碳足迹分析. 棉花学报, 2016, 28(6): 594-601.  
Wang Z B, Chen J, Zhang L F, Chen B, Sun L H, Li L T. Carbon footprint analysis of cotton production in Hebei Province. *Cotton Sci*, 2016, 28(6): 594-601. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 何琴, 张浩, 姜睿, 陈雪雪, 侯萍. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.  
Liu X L, Wang H C, Chen J, He Q, Zhang H, Jiang R, Chen X X, Hou P. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database. *Acta Sci Circumst*, 2010, 30(10): 2136-2144. (in Chinese with English abstract)
- [9] Rös E, Sundberg C, Hansson P A. Carbon Footprint of Food Products//Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1. Springer Singapore, 2014: 85-112.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2006: Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- [11] Yan X, Yagi K, Akiyama H, Akimoto H. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biol*, 2005, 11: 1131-1141.
- [12] 肖玉. 中国稻田生态系统服务功能及其经济价值研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.  
Xiao Y. Study on the service function and economic value



- of rice field ecosystem in China. Beijing: Institute of Geographical Science and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [13] 逯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 郑华. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108.
- Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Zheng H. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(1): 99-108. (in Chinese with English abstract)
- [14] Xue J F, Pu C, Liu S L, Zhao X, Zhang R, Chen F. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China. *Ecol Indic*, 2016, 64: 249-257.
- [15] 王兴, 赵鑫, 王钰乔, 薛建福, 张海林. 中国水稻生产的碳足迹分析. 资源科学, 2017, 39(4): 713-722.
- Wang X, Zhao X, Wang Y Q, Xue J F, Zhang H L. Carbon footprint analysis of rice production in China. *Resour Sci*, 2017, 39(4): 713-722. (in Chinese)
- [16] 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 范士超. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究. 中国人口资源与环境, 2011, 21(9): 93-98.
- Shi L G, Chen F, Kong F L, Fang S C. The Carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China. *China Popul, Resour Environ*, 2011, 21(9): 93-98. (in Chinese)
- [17] 陈中督. 农作措施对双季稻田固碳减排效应与农户低碳技术采纳行为研究. 北京: 中国农业大学, 2017.
- Chen Z D. Impacts of farming practices on carbon sequestration and emission mitigation in double rice field and farmers' adoption behavior of low carbon technology. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [18] Cheng K, Pan G, Smith P, Luo T, Li L, Zheng J. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro statistics data over 1993-2007. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 142: 231-237.
- [19] 卢小宏. 不同农作措施下冬小麦-夏玉米碳足迹及优化潜力评价. 北京: 中国农业大学, 2013.
- Lu X. Carbon footprint and optimization potential of winter wheat and summer maize under different agricultural measures. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [20] Nelson R G, Hellwinckel C M, Brandt C C. Energy Use and Carbon Dioxide Emissions from Cropland Production in the United States, 1990-2004. *J Environ Qual*, 2009, 38(2): 418-425
- [21] Shang Q, Yang X, Gao C. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. *Global Change Biol*, 2011, 17: 2196-2210.
- [22] 周胜, 宋祥甫, 颜晓元. 水稻低碳生产研究进展. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 213-222.
- Zhou S, Song X F, Yan X Y. Progress in research on low-carbon rice production technology. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(2): 213-222. (in Chinese with English abstract)
- [23] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K I, Minami, K. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochem Cycles*, 1996, 10(2): 255-267.
- [24] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 彭小培, 李娜, 朱志平. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273.
- Dong H M, Li Y E, Tao X P, Peng X P, Li N, Zhu Z P. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy. *T Chin Soc Agric Eng*, 2008, 24(10): 269-273. (in Chinese with English abstract)
- [25] 曹凑贵, 李成芳, 展茗, 汪金平. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响. 中国农业科学, 2011, 44(1): 93-98.
- Cao C G, Li C F, Zhang M, Wang J P. Effects of agricultural management practices on carbon emissions in paddy fields. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(1): 93-98. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究及评价. 大气科学, 1998, 22(3): 99-107.
- Li J, Wang M X, Chen D Z. Studies on mitigation methods of methane emission from rice paddies. *Acta Seismol Sin*, 1998, 22(3): 99-107. (in Chinese with English abstract)
- [27] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.
- Huang Y. Emissions of greenhouse gases in china and its reduction strategy. *Quatern Sci*, 2006, 26(5): 722-732. (in Chinese with English abstract)
- [28] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 袁伟玲, 江洋, 高大伟. 稻鸭共作对甲烷排放的影响. 应用生态学报, 2008, 19 (12): 2666-2672.
- Zhang M, Chao C G, Wang J P, Yuan W L, Jiang Y, Gao D W. Effects of rice-duck farming on paddy field's methane emission. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(12): 2666-2672. (in Chinese with English abstract)
- [29] 文再坤. 发展湖南低碳农业科技创新体系建设的思考. 作物研究, 2010, 24(4): 244-245.
- Wen Z K. Thoughts on developing hunan low-carbon agricultural science and technology innovation system. *Crop Res*, 2010, 24(4): 244-245. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 褚庆全, 杨晓琳, 陈阜. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率. 中国农业资源与区划, 2013, 35(6): 1-11.
- Liu J H, Xu W X, Li Z J, Chu Q Q, Yang X L, Chen F. The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of china's intensive farming. *Chin J Agric Resour Reg Plann*, 2013, 35(6): 1-11. (in Chinese with English abstract)