

DOI: 10.5846/stxb201911162472

崔文超, 焦雯珺, 闵庆文, 吴敏芳, 孙业红. 基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价——以青田稻鱼共生系统为例. 生态学报, 2020, 40(13): 4362-4370.

Cui W C, Jiao W J, Min Q W, Wu M F, Sun Y H. Environmental impact assessment on traditional agricultural systems based on carbon footprint: a case study of Qingtian rice-fish culture system. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4362-4370.

基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价 ——以青田稻鱼共生系统为例

崔文超^{1,2}, 焦雯珺^{1,*}, 闵庆文^{1,2}, 吴敏芳³, 孙业红⁴

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 青田县农作物管理站, 丽水 323900

4 北京联合大学旅游学院, 北京 100101

摘要:现代农业在带来粮食高产的同时也产生许多生态环境问题,这促使人们再次把目光转向传统农业系统。一些传统农业系统不仅具有突出的经济、社会和文化价值,还具有多种重要的生态功能,如温室气体减排。然而,已有研究缺乏对传统农业系统整个生命周期的固碳减排能力的测算及其环境影响评价。为此,基于农户调研数据,运用生命周期评价法对青田稻鱼共生系统的碳足迹进行了测算,并与当地水稻单作系统进行比较。研究发现:(1)青田稻鱼共生系统和水稻单作系统碳足迹分别为 6266.7 kgCO₂-eq/hm²和 7520.0 kgCO₂-eq/hm²,单位产值碳足迹分别为 0.12 kgCO₂-eq/元和 0.21 kgCO₂-eq/元。与水稻单作系统相比,稻鱼共生系统排放的温室气体更少,环境影响更小,生态和经济效益更高。(2)农业生产过程中积累的 CH₄是碳足迹的最主要来源,农业生产资料投入中的化肥是碳足迹的第二大来源。农业生产资料投入中的饲料则是稻鱼共生系统碳足迹的另一重要来源。通过碳足迹的方法对青田稻鱼共生系统的环境影响进行量化,不仅丰富了碳足迹在实际应用中的适用类型,对于其他传统农业系统的环境影响评价也具有借鉴意义。

关键词:青田稻鱼共生系统; 碳足迹; 生命周期评价法; 环境影响评价; 全球重要农业文化遗产

Environmental impact assessment on traditional agricultural systems based on carbon footprint: a case study of Qingtian rice-fish culture system

CUI Wenchao^{1,2}, JIAO Wenjun^{1,*}, MIN Qingwen^{1,2}, WU Minfang³, SUN Yehong⁴

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Crop Management Station of Qingtian County, Lishui 323900, China

4 Tourism College of Beijing Union University, Beijing 100101, China

Abstract: Modern agriculture not only brings high yield of grain but also produces many ecological and environmental problems, which urges people to turn their attention to traditional agriculture again. Some traditional agricultural systems not only have outstanding economic, social and cultural values, but also have a variety of important ecological functions, such as GHG emission reduction. However, there were rarely studies to estimate the carbon sequestration and emission reduction capacities of traditional agricultural systems and evaluate their environmental impacts throughout their life cycles. Therefore, the carbon footprint of the rice-fish culture system in Qingtian county, Zhejiang province was measured by life cycle

基金项目:国家自然科学基金项目(41801204, 41971264)

收稿日期:2019-11-16; 修订日期:2020-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaowj@igsnrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

assessment based on the data of farmer surveys, and was compared with that of the local rice monoculture system. The results showed that: (1) the carbon footprints of Qingtian rice-fish culture system and rice monoculture system were 6266.7 kgCO₂-eq/hm² and 7520.0 kgCO₂-eq/hm², respectively, while the carbon footprints of output per unit were 0.12 kgCO₂-eq/yuan and 0.21 kgCO₂-eq/yuan, respectively. Compared with the rice monoculture system, the rice-fish culture system emitted less greenhouse gas, had less environmental impact, and had higher ecological and economic benefits. (2) The CH₄ accumulated in the agricultural production was the main source of carbon footprint, and the fertilizer input to agricultural production materials was the second source of carbon footprint. Feed from agricultural inputs was another important source of carbon footprint of rice-fish culture system. Quantifying the environmental impact of rice-fish culture system in Qingtian by carbon footprint method not only enriches the applicable types of carbon footprint in practical application, but also has reference significance for environmental impact assessment of other traditional agricultural systems.

Key Words: Qingtian rice-fish culture system; carbon footprint; life cycle assessment; environmental impact assessment; Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS)

现代农业以消耗大量资源和能源为基础,在带来粮食高产的同时也造成了生态系统退化、环境污染等生态环境问题的日益加剧,促使人类社会开始反思农业发展的模式和技术^[1-2]。与之相比,传统农业通过长期的农业生产实践,实现了农业生态系统各种要素的优化组合,维持了农业生态系统的动态平衡,并促进了农业生态系统中物质能量的良性循环,体现了独特的动态保护思想以及农业可持续发展的理念^[3-4]。为了保护具有全球重要性的传统农业系统,联合国粮食及农业组织于 2002 年发起了“全球重要农业文化遗产(Globally Important Agricultural Heritage Systems, GIAHS)”保护倡议。截至 2020 年 1 月,全球共有 21 个国家的 58 个传统农业系统被认定为全球重要农业文化遗产;中国有 15 项全球重要农业文化遗产,位居各国之首。

这些传统农业系统由农民世代传承并不断发展而来,不仅具有显著的经济、社会和文化价值^[5],而且具有生物多样性保护^[6]、土壤改良^[7]、温室气体减排^[8]、病虫害控制^[9]等多种生态功能。在全球气候变化背景下,传统农业系统在固碳减排方面所发挥的作用,对于应对气候变化、保障粮食安全、促进经济社会可持续发展均具有重要意义^[5]。然而,目前的研究多侧重传统农业生产过程中温室气体排放量的测算^[10-12],并没有从整个生产周期的角度出发对传统农业系统的固碳减排能力进行测算,更没有对其在固碳减排方面所产生的环境影响进行评价。

碳足迹(Carbon Footprint)是对某一活动引起的或某一产品生命周期内积累的直接和间接的温室气体排放总量,以 CO₂排放当量(CO₂-eq)表示^[13-14]。具体到农业生产系统,碳足迹由农业生产资料投入引起的间接温室气体排放和农业生产过程引起的直接温室气体排放两部分组成^[15]。生命周期评价(Life Cycle Assessment)是评价某生产过程或活动整个生命周期内的环境负荷的一种工具^[16]。基于生命周期评价的碳足迹能够量化农业生产系统的温室气体排放量,从而揭示农业生产活动及管理实践的环境影响,在大尺度农业生产^[17-18]、某一农作物生产^[19-21]、不同田间管理措施^[22]等的环境影响评价上均得到应用。

为了揭示传统农业系统固碳减排能力的环境影响,本文以全球重要农业文化遗产地浙江省青田县龙现村为研究区,采用生命周期评价法对区内稻鱼共生系统和水稻单作系统的碳足迹进行量化,通过对比分析揭示青田稻鱼共生系统的固碳减排能力及其环境影响,以期为基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价提供理论方法。

1 研究区概况

青田县地处浙江东南部,瓯江流域的中下游,1300 多年来当地农民一直保持着稻田养鱼的传统农业生产方式。稻田养鱼即稻鱼共生,通过利用水稻与田鱼之间的互生互惠关系,既能使水稻丰产,又能收获田鱼,还有效地保护了农田生态环境,同时实现了经济、社会和生态效益^[23]。2005 年 6 月,联合国粮食及农业组织将

“青田稻鱼共生系统”认定为首批全球重要农业文化遗产。

青田田鱼属鲤科,学名“瓯江彩鲤”,俗称“田鱼”^[24]。当地农民通常在水稻移栽 4 天左右将鱼苗放入田里,水稻收割前约 1 个月收获田鱼,从鱼苗到可食用或可出售的田鱼一般需要 2 年。田鱼吃食杂草、觅食害虫,减少水稻病虫害的发生,觅食时搅动水体,不但可以改善田间通风透气状况,而且可以增加水体的溶氧,促进水稻生长^[25];稻田为田鱼的生长、发育、觅食、栖息提供了良好的生态环境,稻花以及稻田内丰富的水生生物可以为田鱼提供饵料^[26]。受到现代化生产技术的影响,如今部分农民也会施用适量化肥和有机肥、使用环保型低浓度农药、投喂饲料以及利用小型机械,来提高稻田中水稻和田鱼的产量。

龙现村位于青田县城东南部的方山乡,是全球重要农业文化遗产青田稻鱼共生系统的核心保护区。全村华侨数量 800 多人,侨居世界 30 多个国家。2019 年,龙现村户籍人口为 1560 人,常住人口却仅为 160 人,其中从事农业生产的有 39 户、约 60 人,平均年龄在 60 岁左右。受到青壮年劳动力流失、白鹭捕食田鱼造成减产等影响,一些农民转而进行水稻单一种植,使得当地出现稻鱼共生和水稻单作两种生产模式。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

稻鱼共生系统的生命周期从水稻播种开始,以水稻收获结束。在这一生命周期内,碳足迹主要由农业生产资料投入引起的间接温室气体排放和农业生产过程中引起的直接温室气体排放两部分构成(图 1)。其中,农业生产资料投入主要包括化肥、有机肥、农药、饲料、燃料等,农业生产过程中所产生的直接温室气体主要是指稻田排放的 CH_4 和 N_2O 。

相对于稻鱼共生系统,水稻单作系统在农业生产资料中没有饲料的投入,在生产过程中则因稻田中无鱼而在稻田 CH_4 和 N_2O 排放上存在差异。

2.1.1 农资投入温室气体排放计算

农业生产资料投入产生的温室气体排放(Carbon footprint of agricultural inputs, CF_{input})计算公式为:

$$CF_{\text{input}} = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot m_i \quad (1)$$

式中, CF_{input} 是农业生产资料投入产生的温室气体排放量($\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$), n 为农业生产资料投入的种类, δ_i 表示第 i 种农业生产资料的投入量(kg/hm^2), m_i 表示第 i 种农业生产资料的温室气体排放因子($\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$)。

当地农民在稻田中投放的饲料以小麦、玉米为主,施用的化肥以氮肥、复合肥为主,耕地、收割、打谷过程中使用机器以消耗汽油为主。因此,对于稻鱼共生系统,农业生产资料投入主要考虑了氮肥、复合肥、农药、小麦饲料、玉米饲料和汽油 6 种;对于水稻单作系统,则主要考虑了氮肥、复合肥、农药和汽油 4 种。由于有机肥难以进行相关排放因子的量化,故在本研究中暂未考虑。

2.1.2 生产过程温室气体排放计算

生产过程温室气体排放(Carbon footprint in the field, CF_{field})计算公式为:

$$CF_{\text{field}} = CF_{\text{N}_2\text{O}} + CF_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

式中, CF_{field} 是生产过程温室气体排放量($\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$), $CF_{\text{N}_2\text{O}}$ (Carbon footprint of N_2O) 是稻田积累的 N_2O 的 CO_2 排放当量($\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$), CF_{CH_4} (Carbon footprint of CH_4) 是稻田积累的 CH_4 的 CO_2 排放当量($\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$)。

IPCC 报告显示, N_2O 是影响全球气候的主要温室气体之一,单位质量的 N_2O 的全球增温趋势是 CO_2 的

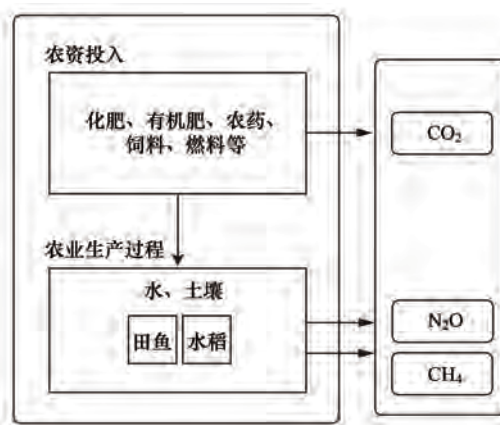


图 1 稻鱼共生系统碳足迹核算边界

Fig. 1 Carbon footprint accounting boundary of rice-fish culture system

265 倍^[27]。本研究仅考虑了由于施用氮肥造成的 N_2O 排放,其他原因造成的 N_2O 排放暂未考虑。因此,稻田积累的 N_2O 的 CO_2 排放当量(CF_{N_2O})的计算公式可表示为:

$$CF_{N_2O} = N \times a \times \frac{44}{28} \times 265 \quad (3)$$

式中, CF_{N_2O} 是稻田积累的 N_2O 的 CO_2 排放当量($kgCO_2\text{-eq}/hm^2$), N 是施用化肥中氮的折纯量(kgN/hm^2), a 是 N 投入引起的 N_2O 排放的排放因子,取值为 $0.003\text{ }kgN_2O\text{-N}/kgN$ ^[28]。

袁伟玲等^[11]在 2006—2007 年进行了连续两年的对照实验,研究表明稻鱼共生能有效抑制稻田 CH_4 排放并显著降低其温室效应。根据该研究结论,本文选取 2 年实验结果的平均值作为稻田积累的 CH_4 的 CO_2 排放当量,稻鱼共生系统和水稻单作系统分别为 $4024.5\text{ }kgCO_2\text{-eq}/hm^2$ 和 $5035.8\text{ }kgCO_2\text{-eq}/hm^2$ 。

2.1.3 农业生产碳足迹计算

农业生产碳足迹(Carbon footprint of agriculture, $CF_{\text{agriculture}}$)计算公式可表示为:

$$CF_{\text{agriculture}} = CF_{\text{input}} + CF_{\text{field}} \quad (4)$$

式中, $CF_{\text{agriculture}}$ 为农业生产碳足迹($kgCO_2\text{-eq}/hm^2$), CF_{input} 为农业生产资料投入的间接温室气体排放量($kgCO_2\text{-eq}/hm^2$), CF_{field} 为农业生产过程温室气体排放量($kgCO_2\text{-eq}/hm^2$)。

2.1.4 单位产值碳足迹计算

为了对经济效益和环境效益进行综合评价,本文还计算了单位农业产值碳足迹(Carbon footprint of agricultural output, CF_{output}),计算公式可表示为:

$$CF_{\text{output}} = CF_{\text{agriculture}} / P \quad (5)$$

式中, CF_{output} 为单位农业产值碳足迹($kgCO_2\text{-eq}/\text{元}$), $CF_{\text{agriculture}}$ 为农业生产碳足迹($kgCO_2\text{-eq}/hm^2$), P 为单位面积的农业产值($\text{元}/hm^2$)。

2.2 数据来源

研究团队于 2019 年 7 月在浙江省青田县龙现村开展实地调研,针对从事农业生产的 39 户农户进行问卷调查和深度访谈。调查采用封闭式问卷结构,内容涉及土地利用、生产方式、投入产出、劳动力结构、经济收入等方面,共发放问卷 36 份,回收 36 份,其中有效问卷 35 份,占当地从事农业生产农户总数的 90%。利用 EXCEL 2016 和 SPSS Statistics 软件对数据进行统计分析,得到农业生产资料投入量、水稻和田鱼产量、农业产值等统计值。

各项农资投入的温室气体排放因子主要源于中国生命周期数据库 CLCD 0.7、Ecoinvent 2.2 数据库和相关研究结果(表 1)。

表 1 各项农资投入的温室气体排放因子

Table 1 GHG emission factors of various agricultural inputs

项目 Item	排放因子 Emission factor	数据来源 Data source
化肥 Fertilizer	氮肥 Nitrogen fertilizer	$1.53\text{ }kgCO_2\text{-eq}/kg$ CLCD 0.7 ^[29]
	复合肥 Compound fertilizer	$1.77\text{ }kgCO_2\text{-eq}/kg$ CLCD 0.7 ^[29]
农药 Pesticide		$16.61\text{ }kgCO_2\text{-eq}/kg$ Ecoinvent 2.2 ^[30]
饲料 Feed	小麦 Wheat	$1.01\text{ }kgCO_2\text{-eq}/kg$ 王钰乔等 ^[31]
	玉米 Corn	$0.79\text{ }kgCO_2\text{-eq}/kg$ 王钰乔等 ^[31]
燃料 Fuel	汽油 Gasoline	$3.12\text{ }kgCO_2\text{-eq}/kg$ Lal ^[32]

GHG:温室气体 Greenhouse gas

3 结果与分析

3.1 农业生产方式与生产资料投入

在调研的 39 户农户中,有 2 户只种植水稻,有 3 户既有水稻单作又有稻田养鱼,其余均只进行稻田养鱼。稻田养鱼总面积为 11.2 hm²,水稻单作总面积为 2.3 hm²,分别占稻田总面积的 83%和 17%。稻鱼共生系统和水稻单作系统的农资投入情况见表 2。

表 2 不同生产方式农资投入情况/(kg/hm²)
Table 2 The agricultural inputs of different production models

生产方式 Production model	化肥 Fertilizer		农药 Pesticide	饲料 Feed		燃料 Fuel
	氮肥 Nitrogen fertilizer	复合肥 Compound fertilizer		小麦 Wheat	玉米 Corn	汽油 Gasoline
稻鱼共生 Rice-fish culture	181.8	630.6	2.6	220.4	336.1	42.7
水稻单作 Rice monoculture	300.0	891.8	3.1			35.7

从表 2 中可以看出,稻鱼共生系统的氮肥和复合肥施用量均明显低于水稻单作系统,仅为水稻单作系统氮肥和复合肥施用量的 60%和 70%。就施肥结构而言,在稻鱼共生系统和水稻单作系统中复合肥的施用量均高于氮肥,但是稻鱼共生系统的复合肥比例(78%)略高于水稻单作系统(75%)。

除了化肥投入,稻鱼共生系统的农药投入也低于水稻单作系统,约为水稻单作系统的 84%。相比之下,稻鱼共生系统的汽油投入却高出水稻单作系统的 20%,这主要是因为稻鱼共生农户在收获田鱼时也需要进行运输,对汽油的消耗高于水稻单作农户。在农资投入中最大的差异莫过于饲料投入,小麦饲料(220.4 kg/hm²)和玉米饲料(336.1 kg/hm²)的投入对稻鱼共生系统的农资投入温室气体排放具有重要影响。

3.2 农资投入温室气体排放

利用公式(1)计算得到稻鱼共生系统和水稻单作系统的农资投入温室气体排放(表 3)。从表 3 中可以看出,稻鱼共生系统的农资投入温室气体排放量为 2058.9 kgCO₂-eq/hm²,低于水稻单作系统(2200.4 kgCO₂-eq/hm²)。就具体农业生产资料投入而言,稻鱼共生系统的化肥投入温室气体排放量明显低于水稻单作系统,仅为水稻单作系统的 68%;农药投入温室气体排放量为 43.2 kgCO₂-eq/hm²,略低于水稻单作系统(51.5 kgCO₂-eq/hm²);燃料投入温室气体排放量高出水稻单作系统的 20%;饲料投入温室气体排放量则高达 488.1 kgCO₂-eq/hm²。这与农业生产资料投入分析呈现出类似的规律。

表 3 不同生产方式农资投入温室气体排放量/(kgCO₂-eq/hm²)
Table 3 GHG emissions from agricultural production inputs of different production models

生产方式 Production model	化肥 Fertilizer		农药 Pesticide	饲料 Feed		燃料 Fuel	合计 Total
	氮肥 Nitrogen fertilizer	复合肥 Compound fertilizer		小麦 Wheat	玉米 Corn	汽油 Gasoline	
稻鱼共生 Rice-fish culture	278.2	1116.2	43.2	222.6	265.5	133.2	2058.9
水稻单作 Rice monoculture	459.0	1578.5	51.5			111.4	2200.4

化肥投入温室气体排放是农资投入温室气体排放的重要组成,在稻鱼共生系统中占比为 68%,而在水稻单作系统中占比高达 93%(图 2)。其中,氮肥和复合肥投入温室气体排放量在稻鱼共生系统分别占到 14%和 54%,在水稻单作系统中则为 21%和 72%。可见,化肥投入对于农资投入温室气体排放具有重要作用。农药、燃料占比不高,在稻鱼共生系统中为 2%和 6%,在水稻单作系统中为 2%和 5%,差异不大。饲料投入占比

24%,对于稻鱼共生系统的农资投入 CO_2 排放具有重要影响。

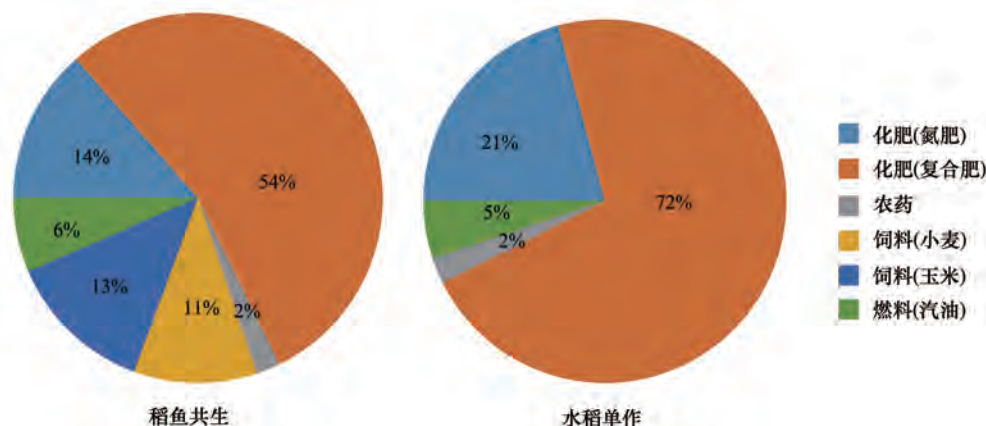


图 2 稻鱼共生系统和水稻单作系统农资投入温室气体排放比例

Fig.2 Proportion of GHG emissions from agricultural production inputs of rice-fish culture system and rice monoculture system

3.3 生产过程温室气体排放

利用公式(2)和(3)计算得到稻鱼共生系统和水稻单作系统的生产过程温室气体排放(表4)。从表4中可以看出,稻鱼共生系统生产过程温室气体排放量为 $4207.8 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$,明显低于水稻单作系统($5319.6 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$)。不论是稻田排放 N_2O 的 CO_2 排放当量还是稻田排放 CH_4 的 CO_2 排放当量,稻鱼共生系统均低于水稻单作系统。

造成这种差异的原因,一方面是稻田排放 N_2O 的 CO_2 排放当量与化肥的施用量密切相关,而农资投入分析表明稻鱼共生系统的化肥施用量仅为水稻单作系统的68%,另一方面,稻田排放 CH_4 的 CO_2 排放当量来自袁伟玲等^[11]的实验结果。研究表明,稻鱼共生系统中由于鱼的活动,增加了稻田土壤气体的交换,增强了 CH_4 通过水体扩散外排的途径,因此稻鱼共生系统 CH_4 的 CO_2 排放当量低于水稻单作系统。

就构成而言, CH_4 的 CO_2 排放当量占比较大,在稻鱼共生系统和水稻单作系统中分别占比96%和95%,对生产过程温室气体排放有主要贡献; N_2O 的 CO_2 排放当量则占比较少,在稻鱼共生系统和水稻单作系统中仅占4%和6%,对生产过程温室气体排放的贡献远远低于 CH_4 的 CO_2 排放当量。

表 4 不同生产方式生产过程温室气体排放量/($\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$)

Table 4 GHG emissions from the field of different production models

生产方式 Production model	N_2O 的 CO_2 排放当量 $CF_{\text{N}_2\text{O}}$	CH_4 的 CO_2 排放当量 CF_{CH_4}	生产过程温室气体排放量 CF_{field}
稻鱼共生 Rice-fish culture	183.3	4024.5	4207.8
水稻单作 Rice monoculture	283.8	5035.8	5319.6

3.4 碳足迹分析

利用公式(4)计算得到稻鱼共生系统和水稻单作系统碳足迹(表5)。稻鱼共生系统碳足迹为 $6266.7 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$,低于水稻单作系统($7520.0 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$),这说明相对于水稻单作系统稻鱼共生系统环境影响更小,具有较好的环境效益。与王兴等^[15]对中国水稻生产的碳足迹的研究结果相比,研究区稻鱼共生系统碳足迹($6266.7 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$)低于浙江省2004—2014年水稻生产的年均碳足迹($6627.6 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$),但高于全国水稻生产年均碳足迹($5804.9 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$),研究区水稻单作系统碳足迹同时超过了全国和浙江省的平均水平。

表 5 不同生产方式碳足迹/(kgCO₂-eq/hm²)

Table 5 Carbon footprint of different productin models

生产方式 Production model	农资投入温室气体排放 Carbon footprint of agricultural inputs CF_{input}	生产过程温室气体排放 Carbon footprint in the field CF_{field}	农业生产碳足迹 Carbon footprint of agriculture $CF_{agriculture}$
稻鱼共生 Rice-fish culture	2058.9	4207.8	6266.7
水稻单作 Rice monoculture	2200.4	5319.6	7520.0

农业生产碳足迹的核算受到很多因素的影响,如数据来源、核算内容、核算方法等,因此研究结果之间的可比性受到一定影响。尽管如此,从比较结果依然可以看出,稻鱼共生系统的碳足迹并不低,主要原因在于白鹭的捕食增多,导致稻鱼共生系统自然生态协调机制受到干扰,这使得农户不得不增加肥料投入和饲料投入。

在稻鱼共生系统碳足迹中,生产过程温室气体排放与农资投入温室气体排放的贡献比约为 2:1;而在水稻单作系统中,生产过程温室气体排放所占比例超过 70%,农资投入温室气体排放所占比例不足 30%(图 3)。就具体构成而言,农业生产过程积累的 CH₄和化肥投入在稻鱼共生系统碳足迹中的比重最大,分别占比 64%和 22%,水稻单作系统碳足迹也表现出相似的规律。不同的是,稻鱼共生系统中饲料投入引起的温室气体排放量在碳足迹中占比达 8%,成为稻鱼共生系统碳足迹的重要组成。

3.5 单位产值碳足迹

运用市场价格法,对稻鱼共生系统和水稻单作系统单位面积经济价值进行了计算。2018 年当地稻谷市场平均价格为 3.0 元/kg,当地田鱼价格为 100.0 元/kg,根据公式(5)可以计算出青田稻鱼共生系统和水稻单作系统单位产值碳足迹(表 6)。

稻鱼共生系统的水稻单位面积产量比水稻单作系统低 43%,因此稻鱼共生系统水稻单位面积产值较低。然而,稻鱼共生系统中田鱼产量为 318.3 kg/hm²,为稻鱼共生系统增加产值 31830.0 元/hm²。由于额外增加了鱼的经济收入,稻鱼共生系统单位面积产值(52323.6 元/hm²)比水稻单作系统(36225.0 元/hm²)高出 44%。

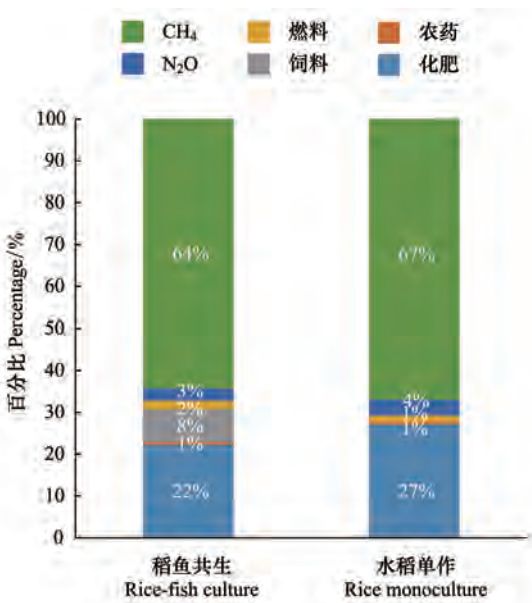


图 3 稻鱼共生系统和水稻单作系统碳足迹构成

Fig.3 Composition of carbon footprint of rice-fish culture system and rice monoculture system

表 6 稻鱼共生系统和水稻单作系统单位产值碳足迹

Table 6 Carbon footprint of agricultural output of of rice-fish culture system and rice monoculture system

项目 Item		稻鱼共生系统 Rice-fish culture system	水稻单作系统 Rice monoculture system
水稻 Rice	产量/(kg/hm ²)	6831.2	12075.0
	产值/(元/hm ²)	20493.6	36225.0
田鱼 Fish	产量/(kg/hm ²)	318.3	
	产值/(元/hm ²)	31830.0	
单位面积产值 Output per unit area/(元/hm ²)		52323.6	36225.0
单位产值碳足迹 CF_{output} /(kgCO ₂ -eq/元)		0.12	0.21

从表 6 可以看出,稻鱼共生系统单位产值碳足迹为 $0.12 \text{ kgCO}_2\text{-eq/元}$, 低于水稻单作系统 ($0.21 \text{ kgCO}_2\text{-eq/元}$), 这说明稻鱼共生系统不仅产值更高, 而且单位产值温室气体排放更少。可见, 相对于水稻单作系统, 稻鱼共生系统具有更高的经济效益和生态效益。

4 结论

本研究通过浙江省青田县龙现村的农户调查数据, 利用生命周期评价法对稻鱼共生和水稻单作两种生产方式的碳足迹进行了核算。研究发现, 稻鱼共生系统碳足迹为 $6266.7 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$, 单位产值碳足迹为 $0.12 \text{ kgCO}_2\text{-eq/元}$, 水稻单作系统碳足迹为 $7520.0 \text{ kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$, 单位产值碳足迹为 $0.21 \text{ kgCO}_2\text{-eq/元}$ 。与水稻单作系统相比, 稻鱼共生系统排放的温室气体更少, 环境影响更小, 生态和经济效益更高。

农业生产过程积累的 CH_4 是碳足迹的主要来源, 在稻鱼共生系统和水稻单作系统的碳足迹中分别占比 64% 和 67%。农资投入中的化肥投入是碳足迹的第二来源, 在稻鱼共生系统和水稻单作系统的碳足迹中分别占比 22% 和 27%。农资投入中的饲料投入是稻鱼共生系统碳足迹的另一重要来源, 所占比例高达 8%。尽管稻鱼共生系统的温室气体排放比水稻单作系统低, 然而与相关研究结果的比较反映出稻鱼共生系统由于肥料和饲料投入的增加正面临着生态环境风险的增加, 不得不引起重视。

本文的创新点在于从农户实地调研数据入手进行碳足迹分析, 从而更为真实和有效地反映当地农业生产系统对环境产生的影响。农户调研数据也为研究农户行为对于碳足迹的影响提供了基础, 这也成为未来的研究方向。另一方面, 通过碳足迹的方法对青田稻鱼共生系统的环境影响进行量化, 丰富了碳足迹在实际应用中的适用类型, 对于其他传统农业系统的环境影响评价也具有借鉴意义。

尽管如此, 利用碳足迹方法评估农业生产的环境影响仍然存在局限性。首先, 农业生产资料投入品的实际情况存在差异, 使用数据库或国外的参考数据会使核算结果产生一定偏差。再者, 人力、畜力、土壤碳变化等也需要考虑, 但是具体应用时往往会受到实际情况的限制^[33]。另外, CH_4 和 N_2O 排放量的核算很难做到准确, 即使以某一可靠实验数据作为标准, 也会因实际差异导致结果出现偏差。

参考文献 (References):

- [1] 李文华, 刘某承, 闵庆文. 农业文化遗产保护: 生态农业发展的新契机. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 663-667.
- [2] 李文华, 刘某承, 闵庆文. 中国生态农业的发展与展望. 资源科学, 2010, 32(6): 1015-1021.
- [3] 焦雯璐, 闵庆文, 成升魁, 张丹. 基于生态足迹的传统农业地区生态承载力分析——以浙江省青田县为例. 资源科学, 2009, 31(1): 63-68.
- [4] 李文华. 农业文化遗产的保护与发展. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 1-6.
- [5] 闵庆文. 全球重要农业文化遗产——一种新的世界遗产类型. 资源科学, 2006, 28(4): 206-208.
- [6] Liu W W, Li W H, Liu M C, Fuller A M. Traditional Agroforestry Systems: One Type of Globally Important Agricultural Heritage Systems. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(4): 306-313.
- [7] Drinkwater L E, Wagoner P, Sarrantonio M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. Nature, 1998, 396(6708): 262-265.
- [8] Yuan W L, Cao C G, Wang J P. Economic valuation of gas regulation as a service by rice-duck-fish complex ecosystem. Ecological Economy, 2008, 4(3): 266-272.
- [9] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, Wang Y Y, Li Y, Chen J B, Fan J X, Yang S S, Hu L P, Mew T W, Teng P S, Wang Z H, Mundt C C. Genetic diversity and disease control in rice. Nature, 2000, 406(6797): 718-722.
- [10] 向平安, 黄璜, 黄梅, 甘德欣, 周燕, 付志强. 稻-鸭生态种养技术减排甲烷的研究及经济评价. 中国农业科学, 2006, 39(5): 968-975.
- [11] 袁伟玲, 曹湊贵, 李成芳, 展茗, 蔡明历, 汪金平. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH_4 和 N_2O 温室效应及经济效益评估. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2052-2060.
- [12] Zhang J E, Ouyang Y, Huang Z X, Quan G M. Dynamic emission of CH_4 from a rice-duck farming ecosystem. Journal of Environmental Protection, 2011, 2(5): 537-544.
- [13] Wiedmann T, Minx J. A definition of 'carbon footprint' // Pertsova C G, ed. Ecological Economics Research Trends. Hauppauge, USA: Nova

- Science Publishers, 2008: 1-11.
- [14] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4): 332-350.
- [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.
- [16] Roy P, Nei D, Orikasa T, Xu Q Y, Okadome H, Nakamura N, Shiina T. A review of Life Cycle Assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(1): 1-10.
- [17] Sah D, Devakumar A S. The carbon footprint of agricultural crop cultivation in India. *Carbon Management*, 2018, 9(3): 213-225.
- [18] Huang X M, Chen C Q, Qian H Y, Chen M Z, Deng A X, Zhang J, Zhang W J. Quantification for carbon footprint of agricultural inputs of grains cultivation in China since 1978. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142: 1629-1637.
- [19] 刘松, 王效琴, 崔利利, 段雪琴, 赵加磊. 关中平原饲料作物生产的碳足迹及影响因素研究. *环境科学学报*, 2017, 37(3): 1201-1208.
- [20] 宋博, 穆月英. 设施蔬菜生产系统碳足迹研究——以北京市为例. *资源科学*, 2015, 37(1): 175-183.
- [21] Clavreul J, Butnar I, Rubio V, King H. Intra-and inter-year variability of agricultural carbon footprints-A case study on field-grown tomatoes. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 158: 156-164.
- [22] 刘晶晶, 张阿凤, 冯浩, 邹小阳, 陈海心. 不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 169-179.
- [23] 刘某承, 张丹, 李文华. 稻田养鱼与常规稻田耕作模式的综合效益比较研究——以浙江省青田县为例. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 164-169.
- [24] 丁伟华, 李娜娜, 任伟征, 胡亮亮, 陈欣, 唐建军. 传统稻鱼系统生产力提升对稻田水体环境的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 308-314.
- [25] 谢坚, 刘领, 陈欣, 陈坚, 杨星星, 唐建军. 传统稻鱼系统病虫害控制. *科技通报*, 2009, 25(6): 801-805, 810-810.
- [26] 孙业红, 闵庆文, 成升魁. “稻鱼共生系统”全球重要农业文化遗产价值研究. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 991-994.
- [27] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [28] IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [29] 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.
- [30] Ecoinvent Database[EB/OL]. (2011-05-11) [2016-06-30]. <http://www.ecoinvent.ch>.
- [31] 王钰乔, 赵鑫, 王兴, 刘胜利, 刘洋, 张海林. 基于碳足迹角度的中国小麦生产可持续性评价. *中国农业大学学报*, 2018, 23(2): 1-10.
- [32] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [33] 刘翼浩, 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, 34(6): 1-11.