

引用格式:王兴,赵鑫,王钰乔,等. 中国水稻生产的碳足迹分析[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 713-722. [Wang X, Zhao X, Wang Y Q, et al. Assessment of the carbon footprint of rice production in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(4): 713-722.] DOI: 10.18402/resci.2017.04.12

中国水稻生产的碳足迹分析

王兴¹, 赵鑫¹, 王钰乔¹, 薛建福², 张海林¹

(1. 中国农业大学农学院/农业部农作制度重点实验室, 北京 100193;

2. 山西农业大学农学院, 太谷 030801)

摘要:由温室气体排放引起的全球变暖问题已受到公众的广泛关注。农业生产对温室气体排放有重要影响,水稻是中国主要粮食作物,而稻田又是CH₄的主要排放源,因此研究其生产过程的碳足迹对实现农业节能减排具有重要意义。本研究基于2004-2014年水稻生产相关统计数据,利用碳足迹评价方法核算了中国水稻生产碳足迹及其变化趋势。研究结果表明:①中国水稻生产温室气体排放量、单位面积碳足迹呈逐年增长,而单位产量碳足迹则出现下降趋势,年均增长量分别为21.24亿kgCO₂-eq、32.58kgCO₂-eq/hm²和-2.82kgCO₂-eq/t;②不同省份由于水稻生产条件差异,其碳足迹存在较大差别,如年均单位面积碳足迹最高的江苏达7411.91kgCO₂-eq/hm²,最低的黑龙江为4305.87kgCO₂-eq/hm²;③年均单位产量碳足迹方面,最高海南为1419.35kgCO₂-eq/t,最低吉林为602.12kgCO₂-eq/t;④综合比较单位面积与单位产量碳足迹发现,华南双季稻稻作区(广西、广东、福建等),华中双季稻稻作区(江苏、湖南、江西等),其单位碳足迹均高于全国平均水平;⑤水稻生产碳足迹组成中占比最大的部分为稻田CH₄排放,达85.05%,农资投入导致的温室气体排放仅占14.95%,其中化肥投入占总碳足迹的10.25%。最后,本文建议通过改进农田管理措施(如间歇性灌溉、改进施肥、合理使用农业投入品),提高水稻机械化生产效率来有效减少水稻温室气体排放。

关键词:气候变化;碳排放;水稻;生命周期评价法;中国

DOI: 10.18402/resci.2017.04.12

1 引言

气候变暖是全球面临的严峻环境问题之一,如何实现温室气体减排已经成为涉及环境、经济、政治、外交等多方面的全球性课题^[1]。研究表明,全球气候变暖的一半以上是由人类活动造成的^[2]。1880-2012年全球温度平均升高0.85℃(0.65~1.06℃)^[3],其中温室气体排放被认为是引起全球气候变暖的主要因素^[4]。而非CO₂类温室气体排放约占总温室气体排放量的50%,农业是非CO₂类温室气体排放的主要来源,如CH₄、N₂O分别占人类活动CH₄、N₂O排放总量的60%和61%^[3]。农业作为主要的温室气体排放源之一,其排放量占人类活动温室气体排放

量的14%^[5]。在中国,农业生产排放的温室气体约占全国温室气体排放总量的17%^[6],且改革开放后农业源温室气体甚至在以每年5%的速度增长^[7]。随着农业现代化的推进,在农业源温室气体排放对气候环境影响加剧的同时,也增加了农业自身发展的不确定性^[8],严重威胁粮食供应以及农产品品质安全^[9,10]。因此,研究农业源温室气体对于探索温室气体减排具有重要指导意义。

碳足迹是指一项活动、一个产品(或服务)的整个生命周期或者某一地理范围内直接或间接产生的CO₂排放总量^[11],它是估算碳排放对温室效应影响的一种方法。Mondelaers等计算小麦生产碳足迹

收稿日期:2016-08-24;修订日期:2016-12-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300201)。

作者简介:王兴,男,甘肃天水人,硕士生,主要研究方向为农田生态。E-mail:jiaxing0103@163.com

通讯作者:张海林,E-mail:hailin@cau.edu.cn

为290kgCO₂-eq/t^[12]。Pathak等发现不同农产品的碳足迹存在较大差别,水稻生产碳足迹约为小麦的10.2倍^[13]。除对农业系统作物生产碳足迹的核算外,国外学者也在分析不同农作措施对农产品碳足迹的影响。如Lal综合前人大量研究,估算不同耕作措施产生的温室气体排放在(7.33~73.33)kgCO₂-eq/hm²^[14]。Koga等发现,少耕措施下CO₂排放量较传统耕作模式要减少15%~29%^[15]。国内针对农田生态系统的碳足迹研究主要集中在对区域农田碳足迹、碳效率的计算,以及不同耕作措施碳足迹的比较等方面。有研究表明农田生态系统碳排放、碳吸收和碳足迹均呈不断增长的状态^[16,17]。史磊刚等研究华北地区冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹,结论认为该系统碳足迹为(6370.36±1235.74)kgCO₂-eq/hm²,玉米生产碳足迹为2330kgCO₂-eq/hm²,系统种植规模与碳成本呈负相关^[18]。王明新等估算的华北平原冬小麦碳足迹为2450kgCO₂-eq/hm²^[19],而王钰乔等研究结果为3521.76kgCO₂-eq/hm²^[20]。曹黎明等研究发现上海水稻生产碳足迹为11 810kgCO₂-eq/hm²^[21]。薛建福发现早稻采取不同耕作措施会造成碳足迹差异,翻耕秸秆还田大于旋耕秸秆还田^[22]。不同研究对农作物生产的碳足迹测算结果存在差异^[23]。目前全国尺度作物排放的相关研究较少,针对作物全国尺度生产碳足迹以及排放清单的研究有助于更好地理解中国作物生产对气候变化的影响和如何实现作物生产的低碳减排。

水稻作为中国主要粮食作物之一,是中国65%以上人口的主粮^[24]。水稻在中国的种植历史悠久,种植区域广泛。水稻种植业作为中国农业生产部门的基础产业,对中国粮食安全影响巨大。本研究以核算2004-2014年中国各主产省份水稻生产碳足迹及其清单组成排放的动态变化为基础,分析各省级区域碳足迹的时空变化特征及趋势,提出生态环境友好型农业发展意见,以期能为中国农业低碳研究提供参考。

2 研究区概况、研究方法 with 数据来源

2.1 研究区域概况

中国水稻种植区域十分广阔,除青海省没有种植外,其余省份均有水稻种植,主产区主要分布于秦岭-淮河线以南。但随着经济社会的发展,中国南

方地区尤其在东南沿海,水稻种植面积不断缩减,水稻种植重心有向中国东北方向迁移的趋势^[25],结合梅方权等^[26]、肖玉对中国水稻种植区的划分^[27],本研究确定的研究范围涉及20个省级行政区,具体分为华南双季稻作区(福建、广东、广西、海南),华中双季稻作区(江西、浙江、安徽、江苏、湖南、湖北),西南稻作区(云南、四川、重庆、贵州),华北单季稻作区(河南、河北、山东),东北早熟单季稻作区(黑龙江、吉林、辽宁),基本能够覆盖中国水稻生产的主要区域。2014年研究区域内水稻总产量占全国水稻产量的98.15%,种植面积占全国水稻总种植面积的98.43%,需要说明的是,由于数据获取困难,本次研究不包括香港、台湾和澳门。

2.2 碳足迹计算方法

本研究结合生命周期评价法(LCA)和ISO/TS14067^[28]产品碳足迹核算方法对中国水稻生产碳足迹进行研究。根据数据的可获得性和连续性,选取2004-2014年为研究年限,研究的系统边界为水稻从播种到收获全过程各项投入造成的温室气体排放,具体包括各项农资(化肥、种子、农膜、柴油、灌溉耗电、农药等)投入温室气体排放,水稻生育期内稻田CH₄排放等。碳足迹计算方法及稻田CH₄排放的相关参数均来源于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[29]。水稻从播种到收获过程的农资投入碳足迹计算为:

$$CF_i = \sum_{i=1}^n AI_i \times EF_i \quad (1)$$

式中 AI_i 为第 i 种投入; EF_i 为第 i 种投入的排放参数(见表1); n 为水稻生产过程消耗的 n 种能源(柴油和电能等)或生产资料(化肥、农药和种子等)。本研究统一使用CO₂排放当量(kgCO₂-eq)作为温室气体排放量的核算单位。

因稻田是CH₄的主要排放源^[22],而稻田N₂O的直接排放很小^[21],可忽略不计,故本研究在计算碳足迹的构成时,根据ISO/TS 14067^[28]碳足迹核算标准估算了稻田CH₄的排放量。水稻生长期间CH₄引起的碳排放计算公式为:

$$CH_{4\text{水稻}} = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \times 10^{-6}) \quad (2)$$

$$EF_f = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \times SF_{s,r} \quad (3)$$

$$SF_o = (1 + \sum ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (4)$$

2017年4月

表1 水稻生产排放清单及转换因子

Table 1 List of emissions and conversion factors in agricultural inputs of rice production

排放项	排放系数	数据来源
氮肥	1.53kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
磷肥	1.63kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
钾肥	0.65kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
复合肥	1.77kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
水稻种子	1.84kgCO ₂ -eq/kg	ecoinvent 2.2
农膜	22.72kgCO ₂ -eq/kg	ecoinvent 2.2
柴油	0.89kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
灌溉耗电	0.97kgCO ₂ -eq/3.6MJ	CLCD 0.7(中国西北)
	1.23kgCO ₂ -eq/3.6MJ	CLCD 0.7(中国北方)
	0.82kgCO ₂ -eq/3.6MJ	CLCD 0.7(中国南方)
除草剂	10.15kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
杀虫剂	16.61kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7
杀菌剂	10.57kgCO ₂ -eq/kg	CLCD 0.7

$$CF_{CH_4} = 25 \times CH_{4\text{水稻}} \quad (5)$$

式中 $CH_{4\text{水稻}}$ 是水稻种植中的年度CH₄排放(GgCH₄/year); $EF_{i,j,k}$ 是在*i*,*j*和*k*条件下的日排放因子(kgCH₄/(hm²·day)); $t_{ijk}=i,j$ 和*k*条件下的水稻种植期(日); A_{ijk} 是在*i*,*j*和*k*条件下水稻的年收获面积(hm²/year);*i*,*j*,*k*分别代表不同的生态系统,水分状况和有机添加量,以及其它可以引起水稻甲烷排放变化的条件; EF_7 是特定收获面积的调整后的日排放因子; EF_c 是不含有机添加物的持续性灌水稻田的基准排放因子(1.3kgCH₄/(hm²·day)); 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前季前不同水分状况的换算系数,结合肖玉的研究^[27],对不同稻作区进行不同的取值:华南双季稻稻作区($SF_w=1$, $SF_p=1$)、华中双季稻区($SF_w=1$, $SF_p=1$)、西南稻作区($SF_w=0.60$, $SF_p=0.68$)、华北单季稻稻作区($SF_w=0.52$, $SF_p=0.68$)、东北早熟单季稻稻作区($SF_w=0.52$, $SF_p=0.68$); SF_o 是有机添加物类型和数量变化的换算系数; $SF_{s,r}$ 是土壤类型,水稻品种等的换算系数,但由于缺乏足够的实验数据支持对不同水稻品种土质的实际取值^[30],模型中通常取1; $CFOA=1$ 表示在品种土质之间有机添加物的转换系数; CF_{CH_4} 是CH₄排放引起的碳足迹;25为甲烷的全球增温潜势;水稻种植期为各省不同站点记录的水稻生育期的平均值; ROA_i 为有机添加物的施用比率,其中秸秆还田量的计算参考逯非等^[31]的研究

方法。水稻生产排放清单及转换因子见表1。

水稻生产的碳足迹(CF),单位产量碳足迹(CF_1),单位面积碳足迹(CF_2)的计算分别见公式(6),公式(7),公式(8);而单位产量碳足迹与单位面积碳足迹的大小能够体现生产的碳效率。碳效率^[32]是评价单位碳排放产出和利用效率的指标。

$$CF = CF_f + CF_{CH_4} \quad (6)$$

$$CF_1 = CF/A \quad (7)$$

$$CF_2 = CF/B \quad (8)$$

式中*A*为水稻产量(kg);*B*为水稻种植面积(hm²)。

2.3 数据来源

水稻产量及播种面积数据来自《中国农业统计年鉴》(2005-2015)^[33];水稻生产过程中的农资投入(氮肥、磷肥、钾肥、复合肥等化肥,水稻种子,农膜,柴油)数据来自2005-2015年《全国农产品成本收益资料汇编》^[34]及《中国农业统计年鉴》^[33]。除草剂、杀虫剂、杀菌剂用量参考相关文献^[35]。水稻生育期相关数据来源于中国气象数据网^[36]。

3 结果及分析

3.1 中国水稻生产碳足迹总体变化趋势

2004-2014年中国水稻生产的温室气体排放量呈现不断增长的趋势(图1a)。2004年水稻生产温室气体排放总量约为1614.15亿kgCO₂-eq,到2014年达到1811.48亿kgCO₂-eq,年均增长量约为21.24亿kgCO₂-eq($R^2=0.9218$, $P<0.0001$)。2006年出现最低值,为1595.55亿kgCO₂-eq,2014年出现最大值。在水稻生产单位面积碳足迹方面(图1b),2004年水稻生产单位面积碳足迹为5788.41kgCO₂-eq/hm²,到2014年达到6072.00kgCO₂-eq/hm²,年均增长量为32.58kgCO₂-eq/hm²($R^2=0.6617$, $P=0.0023$),水稻生产单位面积碳足迹与温室气体排放总量年际趋势表现一致,增长明显;水稻生产单位产量碳足迹呈明显年际波动,总体下降的趋势(图1c),2004年水稻生产单位产量碳足迹为918.75kgCO₂-eq/t,到2014年降至893.74kgCO₂-eq/t,年均增长量为-2.82kgCO₂-eq/t($R^2=0.3340$, $P=0.0626$)。

3.2 各省水稻生产碳足迹

(1)水稻生产碳足迹分析。本研究对2004-2014年中国主要省份水稻生产碳足迹进行了计算分析(图2)。从全国总体来看,水稻生产的单位面

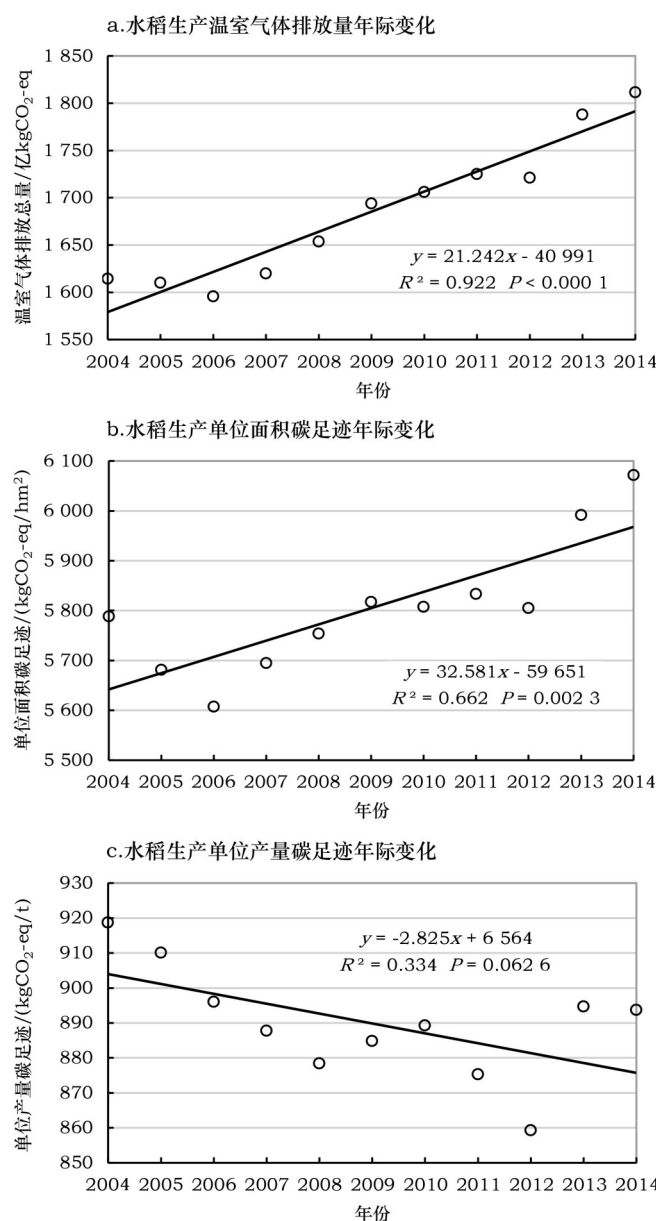


图1 2004—2014年中国水稻生产温室气体排放量及单位面积、单位产量碳足迹年际变化

Figure 1 Total greenhouse gas emissions, carbon footprint per area and carbon footprint per yield of rice production in China from 2004 to 2014

积排放与单位产量排放存在显著正相关关系($R^2=0.4845, P<0.001$)。另一方面,综合比较不同省份单位面积、产量碳足迹发现:华南双季稻稻作区(广西、广东、福建等),华中双季稻稻作区(江苏、湖南、浙江等)大部单位面积碳足迹,单位产量碳足迹均大于全国平均水平。而西南稻作区(四川、重庆、贵州等),华北单季稻稻作区(河南、河北、山东),东北

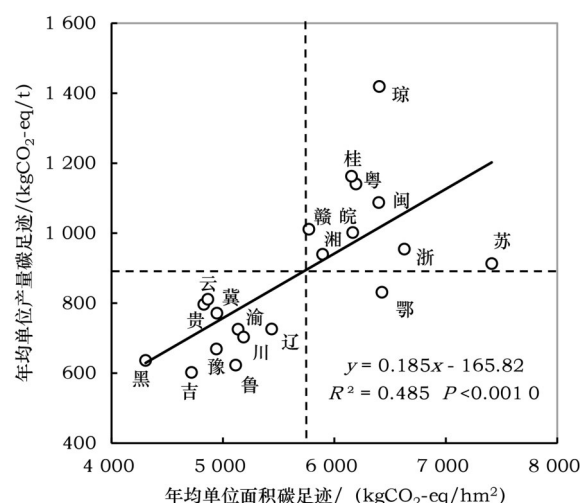


图2 2004—2014年中国部分省(市、自治区)水稻年均单位产量及年均单位面积碳足迹分布

Figure 2 Average annual carbon footprint per yield and per area in provincial rice production of research area in China from 2004 to 2014

早熟单季稻稻作区(黑龙江、吉林、辽宁)均小于全国水平。双季稻产区的温室气体排放压力明显。

(2)水稻生产温室气体排放。图3a所示,水稻生产温室气体排放主要集中在华南、华中双季稻稻作区(湖南、湖北、江西等),是中国传统的水稻种植区;其次随着东北地区水稻种植业的发展,以黑龙江为代表的东北早熟单季稻稻作区温室气体排放增加快速。而水稻生产温室气体排放总量较小的华北各省(河北、山东、河南等),其单位产量碳足迹普遍较大。在各省水稻温室气体排放总量中,湖南水稻生产温室气体排放总量最大,年均均为234.32亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$,其次为江西(187.85亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$)和江苏(165.19亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$);河北年均最小(4.19亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$),其次为山东(6.46亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$)和海南(20.08亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$)。省际间水稻种植温室气体排放量存在明显差距,其中湖南水稻生产温室气体排放量是河北的55.79倍。

(3)水稻生产单位面积碳足迹。图3b所示,中国水稻生产年均单位面积碳足迹为 $5804.92\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$,研究区域内大于全国年均单位面积碳足迹的省份包括浙江、安徽、湖北、湖南、江苏、福建、广东、广西和海南。其中江苏水稻生产年均单位面积碳足迹达 $7411.91\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$,其次为浙江、湖北,

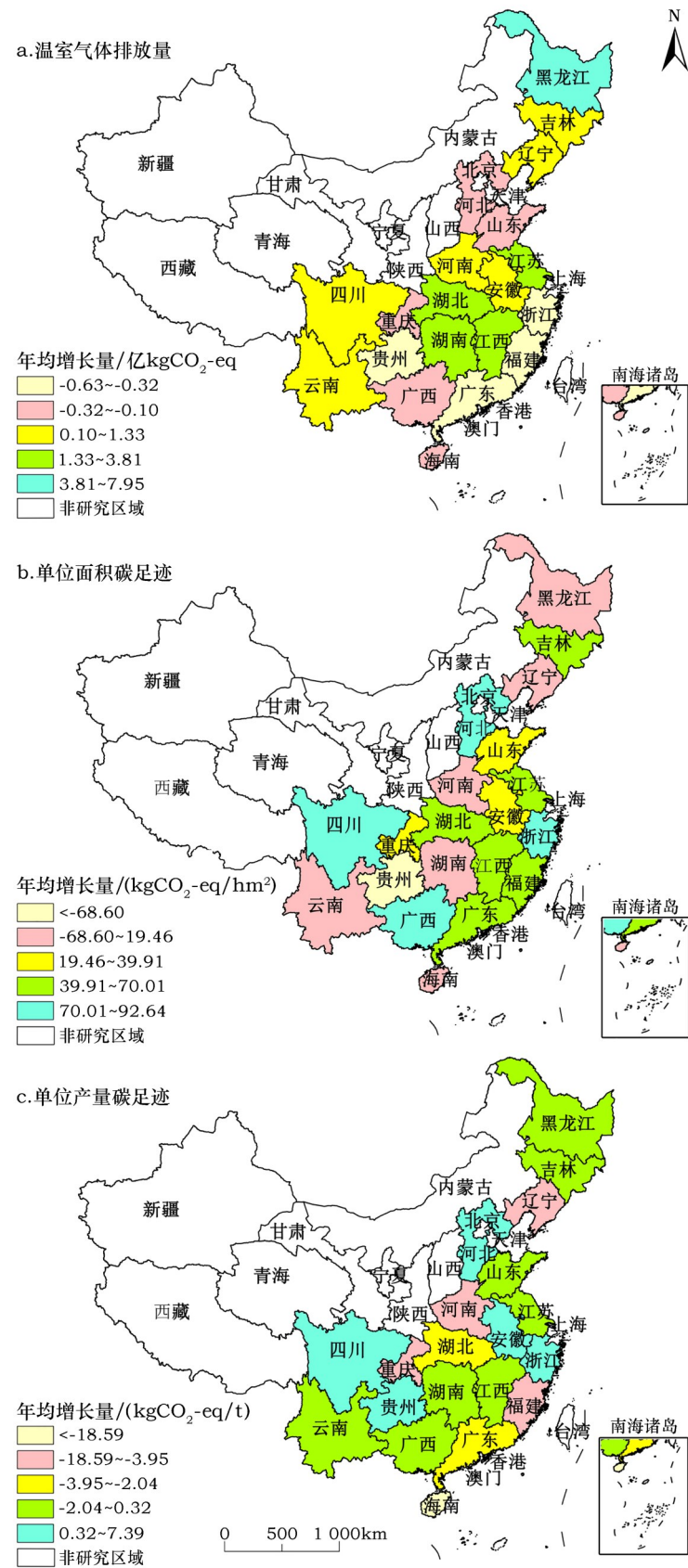


图3 2004–2014年中国部分省(市、自治区)水稻温室气体排放及单位面积、单位产量碳足迹年均增长量分布

Figure 3 Average annual increases in greenhouse gas emissions, carbon footprint per area or yield in some provincial rice in China from 2004 to 2014

年均单位面积碳足迹分别为 $6627.58\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 和 $6426.54\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 。江苏水稻生产年均单位面积碳足迹是全国水平的 1.28 倍。图 3b 中各省间差异明显。

(4) 水稻生产单位产量碳足迹方面。图 3c 所示全国年均单位产量碳足迹为 $889.85\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 大于全国平均值的省份有浙江、安徽、江西、湖南、江苏、福建、广东、广西及海南, 其中前三位分别为海南 $1419.35\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 广西 $1162.94\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$ 和广东 $1140.72\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 分别是全国平均值的 1.60 倍、1.31 倍、1.28 倍。水稻生产年均单位产量碳足迹最小的为吉林, 为 $602.12\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 其次为山东和黑龙江, 其值分别为 $622.99\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, $636.38\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$ 。各省份间年均单位产量碳足迹存在明显差异, 海南年均单位产量碳足迹是吉林的 2.36 倍。

(5) 综合分析。在 2004-2014 年间, 各省水稻生产温室气体排放量, 单位面积碳足迹, 单位产量碳足迹随时间有不同的变化趋势。温室气体排放方面, 黑龙江、江西、湖南年均增长量最大, 分别达到 7.95 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 、3.81 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 和 2.91 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$, 而浙江、贵州、福建、广东、广西出现了负增长, 年均增长量分别为 -0.63 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 、-0.62 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 、-0.53 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 、-0.32 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 和 -0.12 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$; 水稻生产单位面积碳足迹方面, 河南、贵州、云南出现负增长, 年均单位面积碳足迹增长量分别为 -10.79 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 、-68.61 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 和 -14.80 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 。其余各省均呈现出正增长的趋势, 其中浙江、广西、四川年均增长量较大, 分别达到 92.64 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 、86.85 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 和 77.71 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 。水稻生产单位产量碳足迹方面, 东北早熟单季稻稻作区(除吉林)、华北单季稻作区(除河北)、华中双季稻稻作区的部分(江西、湖北、湖南)、西南稻区的部分(重庆、云南)以及华南双季稻稻作区全部均表现为负增长, 其中海南单位产量碳足迹年均负增长量最大, 达到 -18.60 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 其次为河南 -9.00 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 福建 -4.35 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$; 其余

省份均表现出波动增长趋势, 其中前三位分别为贵州 7.39 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 浙江 3.49 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$, 河北 2.84 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$ 。

各省在水稻生产温室气体排放总量, 单位面积碳足迹, 单位产量碳足迹方面差异性明显。同一省份不同年份存在动态波动, 且研究范围内的不同省份增长变化趋势存在差异。

3.3 水稻生产碳足迹组成结构分析

根据 2004-2014 年的计算结果, 中国水稻生产碳足迹组成中水稻种植产生的 CH_4 占比最大, 约占总碳足迹的 85.05%, 农资投入品引起的碳足迹占 14.95% (图 4)。在农资投入品中, 占比最大的为化肥投入, 占总碳足迹的 10.25%, 种子、地膜、柴油以及农药投入造成的碳足迹只占总碳足迹的 4.70%, 稻田 CH_4 排放是水稻生产过程中主要的温室气体排放来源。各个省份水稻生产碳足迹组分占比虽然有一定程度的差别, 但是总体结构与上述分析一致。在农资投入排放方面, 水稻生产所用农资投入引起的温室气体排放量年均增长约 8.65 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$, 而稻田 CH_4 引起的温室气体排放年均增长量约为 12.5 亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 。随着中国水稻种植面积、产量的增长以及农业现代化的发展, 水稻生产引起的温室气体排放对环境的影响有不断加剧的趋势。

4 讨论

中国水稻生产温室气体排放压力不断增大与

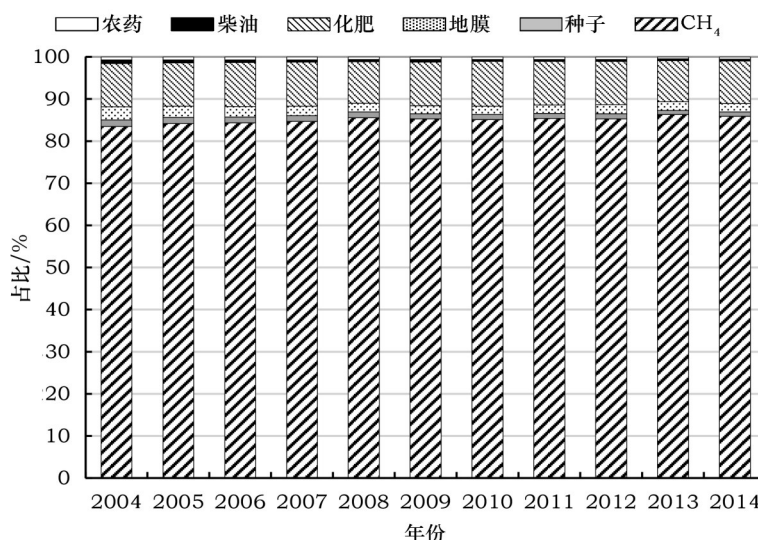


图4 2004-2014年中国水稻生产碳足迹结构组分占比

Figure 4 Components of carbon footprint in China's rice production from 2004 to 2014

2017年4月

中国水稻生产规模扩大,农资依赖性增加有密切联系。2004-2014年中国水稻种植面积增加193.33亿 hm^2 ,总产量增加0.28亿t。由此带来的稻田 CH_4 ,农资投入排放量也相应增加。随着水稻生产对化肥等农资投入的依赖加剧,中国水稻生产温室气体排放总量增长是个必然趋势。

总体来看,水稻生产对生态环境的压力在不断增加。华南双季稻稻作区(广西、广东、福建等),华中双季稻稻作区(江苏、湖南、浙江等)等的8个省份单位碳足迹大于全国平均水平,这些区域是中国水稻温室气体排放压力的主要来源。但辽宁、黑龙江等省单位产量碳足迹出现不同程度的负增长,表明水稻单产增加提高了区域碳足迹生产效率。随着中国水稻种植重心的北移^[24],2004-2014年东北三省水稻产量增加了1321.07万t,产量增加大于温室气体的增排,区域内碳生产效率处于不断优化改善的状态。而非传统水稻主产区,如河北、河南等省份单位碳足迹的生产效率下降较快,温室气体排放压力增大,故应改良其种植制度,逐步减少该区域水稻生产。其次,不同省份水稻温室气体排放,单位面积碳足迹,单位产量碳足迹存在明显差异,这与水稻生产条件的区域差异有关,例如西南地区与东北地区均以种植中稻为主,但由于地处环境不同,种植措施差异,使得在农资投入及稻田 CH_4 方面存在不同。中国各省水稻生产对于农资投入的规模,各结构组分比例也不同,例如不同省份对灌溉需求不同,相对于水资源丰富的华南、华中双季稻稻作区,中国北方稻作区对灌溉的需求更大。水稻生产碳足迹增加主要受稻田 CH_4 增排以及农资用量增长影响较大。随着科技的发展,传统人工作业模式逐步被机械代替,造成柴油使用量增长迅速,但随着生产机械化程度不断加深,水稻机械化生产效率在不断提高,柴油使用的增加量趋缓。

水稻生产温室气体排放量不断增长增加了生态环境可持续发展的压力。因此在不断增强水稻种植业自身固碳作用的同时,发展节能减排的种植技术,实行利于可持续发展的政策措施,对不断优化中国水稻产业结构,减少温室气体排放,实现农业的可持续发展有积极作用。稻田 CH_4 排放是中国水稻生产碳足迹的主要来源之一。影响稻田 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^[6]。针对这些影响因素,在稻田灌溉^[37]、肥料管理^[38]、品种选择^[39]、稻田综合种养^[40]、耕作方式^[37]等方面采取措施有助于稻田 CH_4 减排。其次不同省份水稻碳足迹生产效率存在差异,农业部门在制定水稻产业,甚至农业碳减排政策时,应考虑区域差异,通过财税,碳权市场交易^[41]等手段,实现碳减排责任与各地区生产水平协调一致。同时中国在促进水稻种植业现代化发展的过程中应该注重改良水稻种植模式,提高水稻生产的资源利用效率,合理适量的施用农药、化肥等农资品,提高农业机械化生产效率,减少石油等能源物质的消耗,综合提高农资的使用效率,通过鼓励推广高效的种植模式,减少水稻生产过程中的温室气体排放,实现水稻种植业的高效,高产,可持续发展。

本研究主要运用IPCC提供的碳排放模型计算方法,以统计年鉴,气象资料和相关研究为数据基础,相比于实地调研和大田实验,在宏观趋势的把握上具有一定的优势。通过对不同研究的结果对比^[42-44],发现具体计算结果虽有不同,但总体排放规模,成分占比,趋势变化具有一致性。本研究的一大难点在于参数的选择,尚有待更多的大田实验支持优化。

5 结论

(1)2014年中国水稻生产温室气体排放量、单位面积碳足迹、单位产量碳足迹分别为1811.48亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 、6072.00 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 和893.74 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$,2004-2014年间年均增长量分别达21.24亿 $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ 、32.58 $\text{kgCO}_2\text{-eq/hm}^2$ 和-2.82 $\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$ 。

(2)2004-2014年各省水稻生产温室气体排放量,单位面积碳足迹,单位产量碳足迹差异明显。综合比较单位面积与单位产量碳足迹发现,华南双季稻稻作区(广西、广东、福建等)、华中双季稻稻作区(江苏、湖南、浙江等)的大部单位面积碳足迹,单位产量碳足迹均大于全国平均水平;西南稻作区(四川、重庆、贵州等),华北单季稻稻作区(河南、河北、山东),东北早熟单季稻稻作区(黑龙江、吉林、辽宁)大部单位面积碳足迹,单位产量碳足迹均小于全国水平。双季稻产区的温室气体排放压力明显。

(3)2004-2014年间水稻生产碳足迹各组分占比变化幅度不大,其中平均占比最大的部分为稻田CH₄排放,为85.05%。农资投入引发的温室气体排放仅占14.95%,其中化肥投入占总碳足迹的10.25%。

中国水稻生产温室气体排放压力呈逐步增长的状态,合理调整中国水稻生产布局,优化稻田管理措施,推广水稻高效种植模式,提高农资综合利用效率是缓解中国水稻温室气体排放压力的关键。

参考文献(References):

- [1] 齐玉春,董云社. 中国能源领域温室气体排放现状及减排对策研究[J]. 地理科学, 2004, 24(5): 528-534. [Qi Y C, Dong Y S. Emission of greenhouse gases from energy field and mitigation countermeasures in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(5): 528-534.]
- [2] 秦大河, Thomas S. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. [Qin D H, Thomas S. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1-6.]
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013: The Physical Science Basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties[J]. *Science China-earth Sciences*, 2011, 54(10): 1458-1468.
- [5] Bouwman A F, Boumans L, Batjes N H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1-13.
- [6] 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 H M, Li Y E, Tao X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269-273.]
- [7] 冉光和, 王建洪, 王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J]. 农业经济问题, 2011, (2): 32-38. [Ran G H, Wang J H, Wang D X. Study on the changing tendency and countermeasures of carbon emission produced by agricultural production in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, (2): 32-38.]
- [8] 李颖, 葛颜祥, 梁勇. 农业碳排放与农业产出关系分析[J]. 中国农业资源与区划, 2013, (3): 60-65. [Li Y, Ge Y X, Liang Y. Relationship between agricultural carbon emissions and agricultural gross value of output[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, (3): 60-65.]
- [9] Schmidhuber J, Tubiello F N. Global food security under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(50): 19703-19708.
- [10] Miraglia M, Marvin H J P, Kleter G A, et al. Climate change and food safety: An emerging issue with special focus on Europe[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2009, 47(5): 1009-1021.
- [11] 耿涌, 董会娟, 郝凤明, 等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 6-12. [Geng Y, Dong H J, Xi F M, et al. A review of the research on carbon footprint responding to climate change [J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(10): 6-12.]
- [12] Mondelaers K, Aertsens J, Huylenbroeck G. A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming[J]. *British Food Journal*, 2009, 111(10): 1098-1119.
- [13] Pathak H, Jain N, Bhatia A, et al. Carbon footprints of Indian food items[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(1-2): 66-73.
- [14] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [15] Kcoga N, Tsuruta H, Tsuji H, et al. Fuel consumption-derived CO₂ emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 99(1-3): 213-219.
- [16] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208. [Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208.]
- [17] 王兴, 薛建福, 王钰乔, 等. 我国西部地区种植业碳收支分析[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 104-111. [Wang X, Xue J F, Wang Y Q, et al. Evaluation on carbon balance of crop production in western China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(3): 104-111.]
- [18] 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9): 93-98. [Shi L G, Chen F, Kong F L, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on north China plain[J]. *China Population Resources and Environment*, 2011, 21(9): 93-98.]
- [19] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1127-1132. [Wang M X, Bao Y H, Wu W L, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in north China plain[J]. *Journal of*

2017年4月

- Agro-environment Science*, 2006, 25(5): 1127-1132.]
- [20] 王钰乔, 赵鑫, 李可嘉, 等. 华北平原小麦生产的碳足迹变化动态的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, (S2): 258-261. [Wang Y Q, Zhao X, Li K J, *et al.* Dynamics of carbon footprint for wheat production in the north China plain[J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, (S2): 258-261.]
- [21] 曹黎明, 李茂柏, 王新其, 等. 基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 491-499. [Cao L M, Li M B, Wang X Q, *et al.* Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 491-499.]
- [22] 薛建福. 耕作措施对南方双季稻田碳、氮效应的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [Xue J F. Effects of Tillage on Soil Carbon and Nitrogen in Double Paddy Cropping System of Southern China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.]
- [23] 张丹, 张卫峰. 低碳农业与农作物碳足迹核算研究述评[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1395-1405. [Zhang D, Zhang W F. Low carbon agriculture and a review of calculation methods for crop production carbon footprint accounting[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1395-1405.]
- [24] 王紫露. 中国水稻产业布局变迁的经济和生态分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. [Wang Z L. Economical and Ecological Analysis of Rice Production Structure Changes in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.]
- [25] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 等. 近30年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 680-693. [Liu Z H, Li Z G, Tang P Q, *et al.* Spatial-temporal changes of rice area and production in China during 1980-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 680-693.]
- [26] 梅方权, 吴宪章, 姚长溪, 等. 中国水稻种植区划[J]. 中国水稻科学, 1988, 2(3): 97-110. [Mei F Q, Wu X Z, Yao C X, *et al.* Rice cropping regionalization in China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1988, 2(3): 97-110.]
- [27] 肖玉. 中国稻田生态系统服务功能及其经济价值研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005. [Xiao Y. Study on the Ecosystem Services by the Rice Paddies in China and Their Monetary Values[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, 2005.]
- [28] International Organization for Standardization (ISO). ISO/TS 14067: 2013; Greenhouse Gases- Carbon Footprint of Products- Requirements and Guidelines for Quantification and Communication[EB/OL]. (2013-05-01) [2015-09-30]. <https://www.iso.org/standard/59521.html>.
- [29] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2006: Synthesis Report[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [30] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 低碳发展及省级温室气体清单编制培训教材[R]. 北京: 国家发展和改革委员会应对气候变化司, 2013. [National Development and Reform Commission on Climate Change. Training Materials for Low Carbon Development and the Establishment of the Provincial Greenhouse Gas Inventory[R]. Beijing: National Development and Reform Commission on Climate Change, 2013.]
- [31] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108. [Lu F, Wang X K, Han B, *et al.* Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 99-108.]
- [32] 史磊刚, 范士超, 孔凡磊, 等. 华北平原主要作物生产的碳效率研究初报[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1485-1490. [Shi L G, Fan S C, Kong F L, *et al.* Preliminary study on the carbon efficiency of main crops production in north China plain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1485-1490.]
- [33] 中华人民共和国国家统计局. 中国农业统计年鉴 2005-2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [National Bureau of Statistics of China. China Agricultural Statistical Yearbook 2005-2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2015.]
- [34] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编 2005-2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [The Prices Division of National Development and Reform Commission. Data Compilation of the National Agricultural Costs and Returns 2005-2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2015.]
- [35] Xue J F, Liu S L, Chen Z D, *et al.* Assessment of carbon sustainability under different tillage systems in a double rice cropping system in Southern China[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(9): 1581-1592.
- [36] 中国气象数据网. 农气资料[EB/OL]. (2014-10-11) [2015-08-07]. <http://data.cma.cn/data/index/111675654f35e824.html>. China Meteorological Data Sharing Service System. Agricultural Meteorological Data[EB/OL]. (2014-10-11) [2015-08-07]. <http://data.cma.cn/data/index/111675654f35e824.html>]
- [37] 曹凑贵, 李成芳, 展茗, 等. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 93-98. [Cao C G, Li C F, Zhan M, *et al.* Effects of agricultural management practices on carbon emissions in paddy fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 93-98.]
- [38] 李晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究及评价[J]. 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[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(3): 99-107.]
- [39] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732. [Huang Y. Emissions of greenhouse gases

- in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 722-732.]
- [40] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭共作对甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2666-2672. [Zhan M, Cao C G, Wang J P, *et al.* Effects of rice-duck farming on paddy field's methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2666-2672.]
- [41] Mccarl B A, Schneider U A. US agriculture's role in a greenhouse gas emission mitigation world: An economic perspective [J]. *Review of Agricultural Economics*, 2000, 22(1): 134-159.
- [42] 黄晓敏, 陈长青, 陈铭洲, 等. 2004-2013年东北三省主要粮食作物生产碳足迹[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3307-3315. [Huang X M, Chen C Q, Chen M Z, *et al.* Carbon footprints of major staple grain crops production in three provinces of northeast China during 2004-2013[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3307-3315.]
- [43] Xue J F, Pu C, Liu S L, *et al.* Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 64(1): 249-257.
- [44] Cheng K, Yan M, Nayak D, *et al.* Carbon footprint of crop production in China: An analysis of national statistics data[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(3): 422-431.

Assessment of the carbon footprint of rice production in China

WANG Xing¹, ZHAO Xin¹, WANG Yuqiao¹, XUE Jianfu², ZHANG Hailin¹

(1. Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture; College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Global warming has raised public concern and reducing anthropogenic carbon emissions has become a heated issue. Agriculture plays an important role in greenhouse gas (GHG) emission and offsetting. Rice is one of China's three major cereal crops and assessing the carbon footprint (CF) of rice production is a vital component of low-carbon goal in China's agriculture. Data from China Agricultural Statistics from 2004 to 2014 were collected for estimating CF and its components in rice production. The results showed that GHG emissions and CF per area were observed an annual average increase rate of 2.12 billionkgCO₂-eq, 32.58kgCO₂-eq/ha respectively, and annual reduction of CF per yield is -2.82kgCO₂-eq/t. Results varied among provinces. For example, the average CF per unit area of rice was the highest in Jiangsu at 7411.91kgCO₂-eq/ha and the least in Heilongjiang province at 4305.87kgCO₂-eq/ha; average CF per unit of production was highest in Hainan at 2.36 times higher than Jilin Province (the lowest one). In the double cropping rice area of southern China (Guangxi, Guangdong and Fujian) and the double cropping rice area of central China (Jiangsu, Hunan and Jiangxi), the carbon footprints are higher than the national average. CH₄ emissions were the largest component of CF, accounting for 85.05% of the total carbon emission following by agricultural inputs for 14.95%, and fertilizer inputs for 10.25% of the agricultural inputs. Strategies to reduce GHGs emissions and improve carbon efficiency in rice production depends on a combination of field operations such as intermittent irrigation, suitable usage of fertilization and other agricultural inputs, and improved mechanical efficiency.

Key words: climate change; carbon emission; rice production; life cycle assessment; China