

引用格式:王钰乔,濮超,赵鑫,等. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1800–1811. [Wang Y Q, Pu C, Zhao X, et al. Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1800–1811.] DOI:10.18402/resci.2018.09.10

中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势

王钰乔, 濮超, 赵鑫, 王兴, 刘胜利, 张海林

(中国农业大学农学院, 农业部农作制度重点实验室, 北京 100193)

摘要:气候变化是当今国际研究的热点问题, 小麦、玉米是中国主要粮食作物, 分析小麦、玉米生产碳足迹的时空动态和中国相关农业政策对小麦、玉米生产的温室气体减排的引导效果对于合理应对气候变化具有重要的意义。本研究基于生命周期评价法(LCA)对2005—2015年中国小麦、玉米生产碳足迹进行了核算, 并在此基础上, 根据种植业结构及化肥、农药调整政策模拟分析了不同玉米种植面积和不同单位面积化肥及农药施用量等4种情景下2020年小麦、玉米生产的温室气体排放和单位面积碳足迹。研究结果显示:2005—2015年小麦、玉米生产的单位面积碳足迹和温室气体排放量均呈现出显著增加的趋势($P < 0.05$);模拟分析结果表明:通过缩减种植面积, 优化化肥、农药投入能够有效降低小麦、玉米生产的碳足迹, 实现(168.89~560.07)亿 kg CO₂-eq的减排潜力。因此建议构建科学施肥技术体系, 提高农资投入品的利用效率, 以实现中国的温室气体减排目标。

关键词:小麦; 玉米; 农业政策; 碳足迹; 生命周期评价法

DOI:10.18402/resci.2018.09.10

1 引言

自20世纪以来, 全球变暖及其引发的一系列的环境问题引起了国际社会的广泛关注^[1]。为了应对和缓解气候变化, 各国政府根据《哥本哈根协议》提交了本国的减排目标, 中国政府表示:到2020年中国单位产值温室气体排放量较2005年下降40%~45%。农业生产过程排放了大量的温室气体, 占人为温室气体排放量的21%~25%, 粮食生产所产生的温室气体对全球的碳排放具有重大影响^[2]。中国是重要的农业大国, 农业生态系统能够排放大量的温室气体, 同时也能够固定温室气体^[3], 缓解温室气体排放对环境造成的负面影响, 深入分析农田生态系统温室气体排放来源, 探究农田温室气体减排策略已经成为政府和学者关注的热点问题。近年来, 在农业转型的关键时间节点上, 农业部于2015年分别出台了《全国种植业调整规划2016—2020》^[4]、《到2020年化肥使用量零增长行动方案》^[5]和《到2020

年农药使用量零增长行动方案》^[6], 以期达到农业生产“增收”、“提效”的目的, 实现“稳粮增收调结构, 提质增效转方式”, 因此, 探究农业政策对中国农田温室气体减排的影响可以为低碳高效农业的发展提供数据支持, 具有一定的现实意义。

碳足迹是指一个产品或一项服务在整个生命周期(或地理范围内)所产生的直接和间接的温室气体排放量^[7], 是衡量碳排放水平的指标, 能够指示不同功能单位的碳排放^[8]。碳足迹的计算对于评价农业生产的减排潜力和创建低碳生产模式有重要的作用^[7]。20世纪末, Wackernagel首先给出了碳足迹的定义和计算方法, 开启了碳足迹的研究先河^[9]。21世纪初, Lal等对碳足迹指标体系进行了归纳, 为农业领域碳足迹的研究奠定了基础^[10]。近年来, 国内外许多学者从不同尺度对作物生产的碳足迹进行了评估, 王兴等基于区域尺度对中国双季稻生产碳足迹进行了评估^[11]。Xue等和Gan等从田间试验

收稿日期:2017-10-17;修订日期:2018-07-12

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300210)。

作者简介:王钰乔, 女, 河北唐山人, 硕士生, 主要研究方向为农田生态。E-mail: wangyq94@cau.edu.cn

通讯作者:张海林, E-mail: hailin@cau.edu.cn

2018年9月

尺度分别对双季稻和旱作小麦生产的碳足迹进行了评估^[12, 13]。这对衡量农业生产的温室气体排放、评估农业生产过程对环境造成的影响具有重要意义。目前,有关农业政策对作物生产碳足迹的影响研究较少,针对相关农业政策从全国尺度对作物生产的碳足迹进行研究,有助于量化不同农业政策下作物生产对中国气候变化的影响,更好地理解农业政策下作物生产低碳减排效益。

小麦、玉米是中国主要的粮食作物,在中国的粮食生产中占有重要的地位,然而小麦、玉米生产过程中农资过度投入也带来了一系列环境问题^[13]。未来随着农业转型和绿色发展的需要,提高农业生产的资源利用效率,对于减少温室气体排放,应对和缓解气候变化具有重要的理论和现实意义。现阶段的研究主要集中在定量评价粮食作物生产过程所产生的碳足迹及其组分的时空差异^[11-13],而从农业政策角度探讨不同情景碳足迹的研究相对较少。因此,本研究选取中国小麦、玉米为研究对象来展开案例分析,系统研究了中国小麦、玉米生产过程的碳足迹与温室气体排放量的时空差异,并将区域农田生态系统碳足迹核算与作物生产碳足迹未来趋势预测相结合,从全国尺度对2005—2015年省级区域小麦、玉米生产的碳足迹和温室气体排放量的时空变化特征进行分析,并根据2015年农业部出台的相关政策^[4-6]设计不同的情景,模拟分析不同农药、化肥施用量和不同玉米种植面积下2020年中国小麦、玉米生产的单位面积碳足迹及温室气体排放量,以期量化农业政策对小麦、玉米生产和气候变化的影响,促进农业生产的绿色转型,为中国农业生产的低碳减排提供数据支持。

2 研究方法与数据

2.1 研究区域及数据来源

考虑到数据的连续性和可获取性,本研究选取2005—2015年为研究年限,以中国小麦、玉米为研究对象;玉米研究区域包括中国20个省(市、自治区),涵盖河北、山西、内蒙古、吉林、辽宁、黑龙江、江苏、安徽、山东、河南、湖北、广西、四川、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、宁夏、新疆。其中,2015年研究区域内玉米播种面积占到了全国玉米总播种面积的97.36%,研究区域能够涵盖中国玉米种植的主要区域。小麦研究省份包括我国15个省(自治区),

涵盖河北、山西、内蒙古、黑龙江、江苏、安徽、山东、河南、湖北、四川、云南、陕西、甘肃、宁夏、新疆。2015年研究区域内小麦播种面积占到了全国小麦总播种面积的96.84%,研究区域能够涵盖中国小麦种植的主要区域。各省份小麦、玉米种植面积、单产、总产数据来源于《中国统计年鉴》^[14],小麦、玉米生产过程农资投入数据(包括种子使用量、化肥施用、农用柴油、灌溉耗电、农药)来源于2005—2015年《全国农产品成本收益资料汇编》^[15]。

2.2 碳足迹及其计算方法

2.2.1 本研究系统边界

国际标准化组织(ISO)在2013年公布产品碳足迹的核算标准ISO 14067^[16],被广泛应用于碳足迹的研究,农业生产温室气体排放是农业生产温室气体排放和消纳的总称^[17],本研究系统边界设为农作物从播种到收获全过程中各项投入造成的直接和间接温室气体排放,主要来自三方面:①农资投入包括化肥、农药、种子、灌溉耗电、柴油投入引起的温室气体排放;②作物生长过程土壤N₂O排放;③作物生长过程CH₄排放,小麦、玉米为旱生作物,旱地作物生长过程中CH₄的排放量可以忽略不计,因此,本研究未考虑作物生长过程中农田CH₄排放。

2.2.2 碳足迹计算方法

碳足迹的计算方法参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[18]。

小麦、玉米从播种到收获过程中农资投入产生的碳足迹为^[7]:

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

式中 CF 为作物播种到收获过程农资投入产生的碳足迹(kg CO₂-eq/hm²); AI_i 为第 i 种农业生产投入品用量(kg/hm²); EF_i 为第 i 种投入的排放参数(kg CO₂-eq/kg),各排放参数见表1。

土壤N₂O的排放包括直接排放和间接排放,其中直接排放为:

$$DF_{N_2O} = F_{SN} \times EF_1 \times \frac{44}{28} \times 265 \quad (2)$$

式中 DF_{N_2O} 为土壤N₂O直接排放量以CO₂排放当量表示(kg CO₂-eq/hm²); F_{SN} 为土壤中氮肥的年施用量(kg/(hm²·a)); EF_1 为氮投入引起土壤N₂O排放的排放因子(kg N₂O-N/kgN投入)^[19];44/28为氮元素与氧化亚氮的转换系数;265为100年尺度下氧化亚

表1 小麦、玉米生产排放清单及转换因子

Table 1 Emission factor for different agricultural material inputs during wheat and maize production

农资投入		排放参数	参数来源
种子	小麦	0.58 kg CO ₂ -eq /kg	ecoinvent 2.2 ^[20]
	玉米	1.93 (kg CO ₂ -eq /kg	ecoinvent 2.2
柴油		0.89 kg CO ₂ -eq /kg	CLCD 0.7 ^[21]
化肥	复合肥	1.77 kg CO ₂ -eq /kg	CLCD 0.7
	氮肥	1.53 kg CO ₂ -eq /kg	CLCD 0.7
	磷肥	1.63 kg CO ₂ -eq /kg	CLCD 0.7
	钾肥	0.65 kg CO ₂ -eq /kg	CLCD 0.7
农药	杀虫剂	16.61 kg CO ₂ -eq /kg	ecoinvent 2.2
	杀菌剂	10.57 kg CO ₂ -eq /kg	ecoinvent 2.2
	除草剂	10.15 kg CO ₂ -eq /kg	ecoinvent 2.2
农膜		22.72 kg CO ₂ -eq /kg	ecoinvent 2.2
灌溉耗电	中国西北	0.97 kg CO ₂ -eq /3.6MJ	CLCD 0.7
	中国北方	1.23 kg CO ₂ -eq /3.6MJ	CLCD 0.7
	中国南方	0.82 kg CO ₂ -eq /3.6MJ	CLCD 0.7
柴油燃烧		4.10 kg CO ₂ -eq /kg	CLCD 0.7

注:本研究中灌溉耗电的排放参数,中国西北包括陕西、甘肃、宁夏、新疆;中国北方包括河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南;中国南方包括江苏、安徽、湖北、广西、重庆、四川、贵州、云南。氮的增温潜势^[1]。

土壤 N₂O 间接排放产生的碳足迹为:

$$IDF_{N_2O_i} = F_{SN} \times Frac_{GASF} \times EF_4 \times \frac{44}{28} \times 265 \quad (3)$$

式中 $IDF_{N_2O_i}$ 为土壤 N₂O 间接排放量以 CO₂ 排放当量表示 (kg CO₂-eq /hm²); $Frac_{GASF}$ 为以 NH₃ 和 NO_x 形式挥发的化肥氮比例 (kg 挥发氮/kg 施用氮); EF_4 为土壤和水面氮大气沉积的 N₂O 排放的排放因子 (kg N₂O-N /kg (NH₃-N+NO_x-N))。

土壤 N₂O 排放产生的碳足迹为:

$$CF_{N_2O} = DF_{N_2O} + IDF_{N_2O_i} \quad (4)$$

式中 CF_{N_2O} 为土壤 N₂O 排放产生的碳足迹 (kg CO₂-eq/hm²)。

小麦、玉米整个生命周期所产生的温室气体排放为:

$$C_T = (CF + CF_{N_2O}) \times A \quad (5)$$

式中 C_T 为作物生产所产生的温室气体排放 (kg CO₂-eq); A 为作物的播种面积 (hm²)。

本研究选取的功能单位为单位面积、单位产量与单位产值的二氧化碳排放当量,小麦、玉米整个生命周期所产生的单位面积碳足迹,单位产量碳足

迹,单位产值碳足迹分别为:

$$CF_T = CF + CF_{N_2O} \quad (6)$$

$$CF_y = \frac{CF_T}{Y} \quad (7)$$

$$CF_e = \frac{CF_T}{E} \quad (8)$$

式中 CF_T 为作物生产的单位面积碳足迹 (kg CO₂-eq /hm²); CF_y 为作物生产的单位产量碳足迹 (kg CO₂-eq /kg); CF_e 为作物生产的单位产值碳足迹 (kg CO₂-eq /元); Y 为小麦、玉米的单位面积产量 (kg/hm²); E 为小麦、玉米的单位产值 (元/hm²)。

2.3 2020 年小麦、玉米生产碳足迹模拟情景设定

《全国种植业调整规划 2016—2020》^[4]中指出到 2020 年维持粮食作物种植面积 1.10 亿 hm²,其中玉米种植面积缩减至 3333.33 万 hm²,小麦种植面积稳定在 2400.00 万 hm²。2015 年中国玉米种植面积 3771.42 万 hm²,小麦种植面积 2337.77 万 hm²。《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》^[5]和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》^[6]中指出与 2015 年相比,2020 年主要粮食作物化肥、农药使用量争取实现零增长。2015 年玉米生产的化肥、农药的年使用量分别为 364.50 kg/hm²、27.54 kg/hm²。小麦生产的化肥、农药的年施用量分别为 405.75 kg/hm²、30.45 kg/hm²。本研究基于《全国种植业调整规划 2016—2020》^[4]、《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》^[5]和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》^[6]的政策调整情况设定有关小麦、玉米化肥农药施用量及种植面积变化的 4 种情景,除化肥、农药外的其他碳足迹组成部分(灌溉耗电、机械燃油、种子投入等)使用多元线性回归进行预测,4 种情景如下:

S1: 小麦种植面积与 2015 年持平,玉米种植面积稳定在 3333.33 万 hm²;单位面积化肥及农药使用量降低 10%;

S2: 小麦种植面积与 2015 年持平,玉米种植面积稳定在 3333.33 万 hm²;单位面积化肥及农药使用量降低 5%;

S3: 小麦种植面积与 2015 年持平,玉米种植面积稳定在 3333.33 万 hm²;单位面积化肥及农药使用量与 2015 年持平;

S4: 小麦种植面积与 2015 年持平,玉米种植面积与 2015 年持平;单位面积化肥及农药使用量与

2018年9月

2015年持平。

由于小麦播种面积与《全国种植业调整规划2016—2020》^[4]中小麦种植面积接近,所以以上4种情景小麦播种面积与2015年持平,均为2337.77万 hm^2 ,小麦、玉米的化肥、农药投入情况详见(表2)。其中,情景S1—S3分别代表2020年玉米种植面积缩减和化肥、农药施用量调整的不同完成情况。S4用来衡量2015—2020年间除化肥、农药外其他农资投入(灌溉耗电、机械燃油、种子投入)变化对中国小麦、玉米碳足迹产生的影响。

2.4 基于最小二乘法的多元线性回归预测

2005—2015年农用机械使用、灌溉耗电、种子投入受到不同因素的影响,通过对2005—2015年的历史数据进行分析,构建多元回归模型模拟农用机械使用、灌溉耗电、种子投入所产生的碳足迹的变化,进一步推算出不同情景模式下作物生产所产生的碳足迹的变化。在本研究中农膜使用所产生的碳足迹在小麦和玉米生产过程中所占比例极小,因此未对农膜使用所产生的碳足迹及温室气体排放量进行分析。构建多元回归模型如下:

$$Y_i = \alpha_i + \beta \times F_i \quad (9)$$

式中 α_i 为回归常数; β 为回归系数; F_i 为时间序列; β 是一个 $1 \times K$ 阶矩阵,指作物播种面积占粮食作物总播种面积不同占比下碳足迹变化情况的回归系数,反映作物播种面积变化对作物生产过程中机械使用、灌溉耗电、种子投入产生碳足迹的可能影响。本研究通过对2005—2015年小麦、玉米生产过程中不同省份灌溉耗电、农用柴油、种子等农资投入所产生的温室气体排放量随年份及作物播种面积变化构建多元回归模型得出不同年份及播种面积下作物生产的温室气体排放量,并通过2005—2015年的历史数据对模型的参数进行验证。模拟结果与实测结果之

间的线性回归决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和归一化均方根误差(NRMSE)作为模型检验的指标:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Sim_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{Obs_i}} \times 100\% \quad (11)$$

式中 Obs_i 为作物生产温室气体排放量实际值($\text{kg CO}_2\text{-eq}$); Sim_i 为作物生产温室气体排放量模拟值($\text{kg CO}_2\text{-eq}$); $\overline{Obs_i}$ 为实际值的平均值($\text{kg CO}_2\text{-eq}$); n 为研究年数。

2.5 数据分析

本研究采用Microsoft Excel 2013进行数据的整理以及相关分析,SigmaPlot12.0进行图形的绘制,使用EViews8软件进行多元线性回归方程的模拟与预测。

3 结果与分析

3.1 省级区域小麦碳足迹差异

2005—2015年中国小麦生产的碳足迹不同省份之间差异显著,单位面积碳足迹的均值为 $3994.26 \text{ kg CO}_2\text{-eq /hm}^2$ (图1),河北、河南、山西、山东、新疆、内蒙古、陕西和江苏小麦生产单位面积碳足迹高于全国均值。河北小麦生产单位面积碳足迹最高为 $6076.37 \text{ kg CO}_2\text{-eq /hm}^2$,其次为陕西 $5505.47 \text{ kg CO}_2\text{-eq /hm}^2$,内蒙古 $5115.01 \text{ kg CO}_2\text{-eq /hm}^2$ 。小麦生产单位产量碳足迹的均值为 $1.01 \text{ kg CO}_2\text{-eq /kg}$,山西、陕西、内蒙古、宁夏、河北和甘肃小麦生产单位产量碳足迹高于全国均值。内蒙古的小麦生产单位产量碳足迹最高为 $1.65 \text{ kg CO}_2\text{-eq /kg}$,其次为陕西 $1.54 \text{ kg CO}_2\text{-eq /kg}$,山西 $1.42 \text{ kg CO}_2\text{-eq /kg}$ 。小麦生产单位产值碳足迹的均值为 $0.39 \text{ kg CO}_2\text{-eq /元}$,山西、陕西、河北、江苏、云南、宁夏、新疆小麦生产单位产值碳足迹高于全国均值。

表2 不同情景下小麦、玉米播种面积及化肥、农药投入情况

Table 2 Planting area, fertilizer and pesticides of different scene of wheat and maize

情景	小麦			玉米		
	播种面积/(万 hm^2)	化肥/(kg/hm^2)	农药/(kg/hm^2)	播种面积/(万 hm^2)	化肥/(kg/hm^2)	农药/(kg/hm^2)
S1	2 337.77	365.18	27.41	3 333.33	328.05	24.79
S2	2 337.77	385.46	28.93	3 333.33	346.28	26.16
S3	2 337.77	405.75	30.45	3 333.33	364.50	27.54
S4	2 337.77	405.75	30.45	3 771.42	364.50	27.54

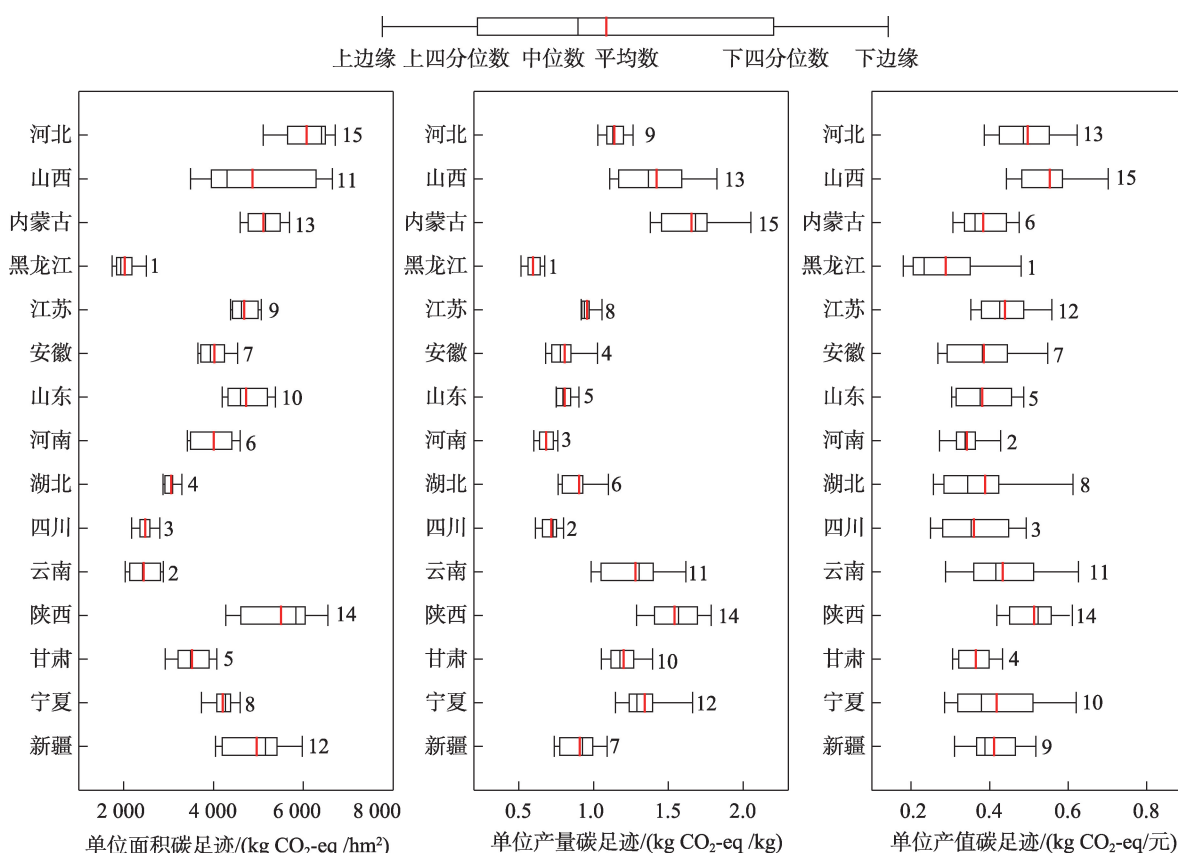


图1 2005—2015年中国部分省(自治区)小麦生产碳足迹情况

Figure 1 Carbon footprint of wheat production of some province in China from 2005 to 2015

注:图中1,2,3,...,15表示2005—2015年各省份小麦生产碳足迹均值排序。

山西小麦生产单位产值碳足迹最高为0.55 kg CO₂-eq/元,其次为陕西0.51 kg CO₂-eq/元,河北0.50 kg CO₂-eq/元。综合比较不同省份小麦生产产量碳足迹、面积碳足迹、产值碳足迹发现,华北地区(河北、河南、山西、山东)小麦生产单位面积碳足迹均高于全国水平,但该区的河南、山东小麦生产单位产量与单位面积碳足迹低于全国平均值,综合分析可知,该区域小麦单位产量和产值均较高,降低了小麦生产的单位产量温室气体排放压力;而小麦产量较低的省份如宁夏、甘肃小麦生产单位面积碳足迹低于全国平均值,但是该区域单位产量碳足迹高于全国平均值。

3.2 省级区域玉米碳足迹差异

2005—2015年玉米生产单位面积碳足迹的均值为4098.47 kg CO₂-eq/hm²(图2),甘肃、新疆、云南、陕西、宁夏、广西、山东、湖北、内蒙古、吉林、江苏和山西玉米生产单位面积碳足迹高于全国均值。甘肃玉米生产的单位面积碳足迹最高为6148.76 kg CO₂-eq/hm²,其次为新疆5692.57 kg CO₂-eq/hm²,云南

5032.46 kg CO₂-eq/hm²。玉米生产单位产量碳足迹的均值为0.79 kg CO₂-eq/kg,甘肃、云南、陕西、广西、湖北、安徽、新疆、山西和江苏玉米生产单位产量碳足迹高于全国均值。甘肃玉米生产单位产量碳足迹最高为1.21 kg CO₂-eq/kg,其次为云南1.17 kg CO₂-eq/kg,陕西1.05 kg CO₂-eq/kg。玉米生产单位产值碳足迹的均值为0.34 kg CO₂-eq/元,广西、云南、陕西、湖北、江苏、甘肃、新疆、宁夏和安徽玉米生产单位产值碳足迹高于全国均值。广西的玉米生产单位产值碳足迹最高为0.47 kg CO₂-eq/元,其次为云南0.45 kg CO₂-eq/元,陕西0.43 kg CO₂-eq/元。综合比较不同省份玉米生产单位面积、单位产量、单位产值碳足迹发现,东北地区(黑龙江、吉林、辽宁)玉米生产碳足迹普遍低于全国均值;西北地区(新疆、甘肃、宁夏、陕西)玉米生产碳足迹普遍高于全国均值。

3.3 2005—2015年小麦、玉米碳足迹及温室气体排放量变化

2005—2015年,中国小麦与玉米生产的单位面

2018年9月

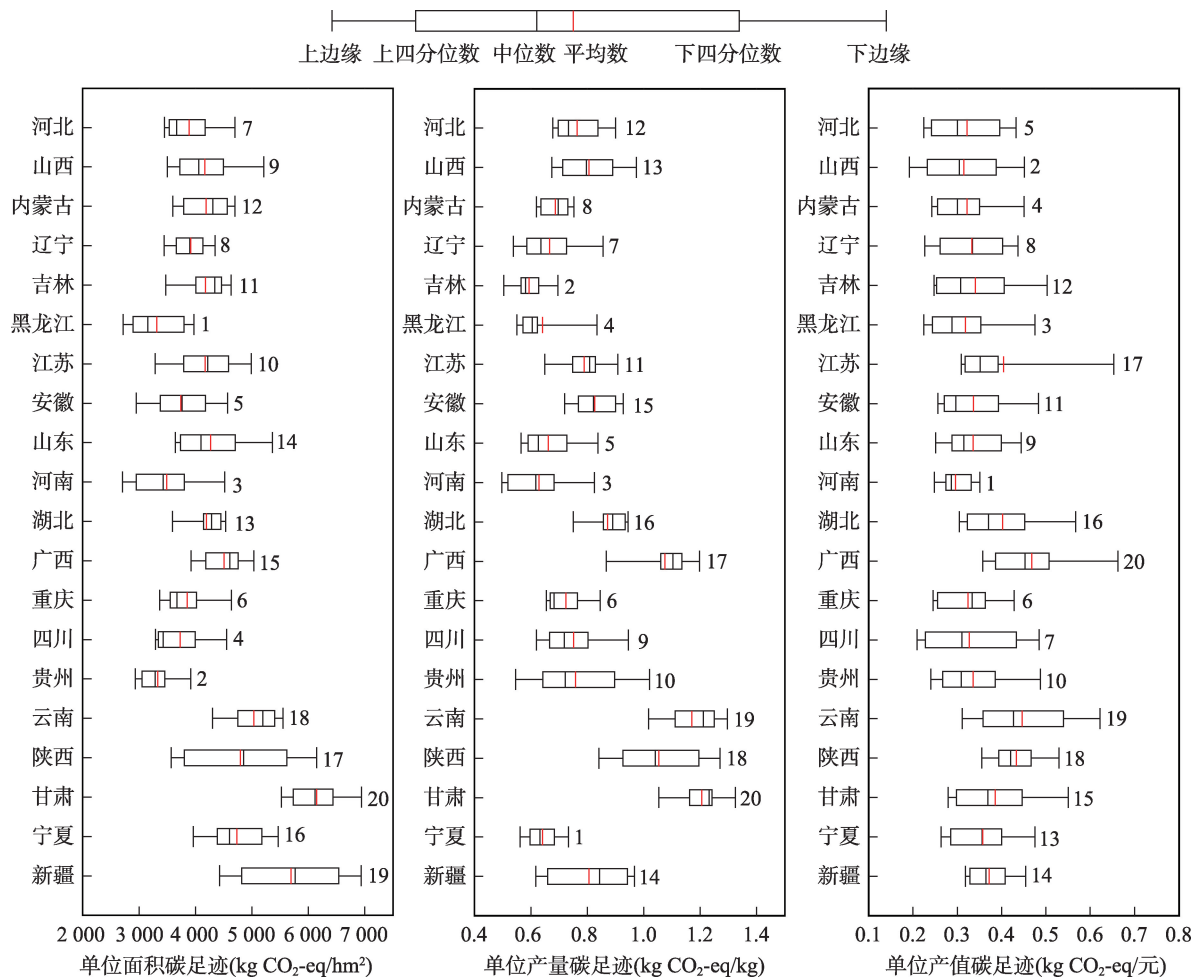


图2 2005—2015年中国部分省(市、自治区)玉米生产碳足迹情况

Figure 2 Carbon footprint of maize production of some province in China from 2005 to 2015

注:图中1,2,3,⋯,20表示2005—2015年各省份玉米生产碳足迹均值排序。

积碳足迹年际变化趋势表现一致,均呈现显著增长趋势(图3a),小麦生产的单位面积碳足迹和增长速率均高于玉米。小麦生产的单位面积碳足迹年均增长量为 $144.30 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$ ($R^2=0.92, P<0.01$),玉米生产单位面积增加速率为 $113.38 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$ ($R^2=0.93, P<0.01$)。2005—2015年小麦和玉米生产的温室气体排放量年际变化趋势亦表现一致,均呈现逐年增长趋势(图3b),玉米生产的温室气体排放量增长速率高于小麦。小麦生产温室气体排放量的增加速率为 $31.11 \text{ 亿 kg CO}_2\text{-eq}$ ($R^2=0.89, P<0.01$);玉米生产的温室气体排放量增加速率为 $88.78 \text{ 亿 kg CO}_2\text{-eq}$ ($R^2=0.98, P<0.01$)。小麦生产的温室气体排放量在2005—2015年11年间增加了 $294.79 \text{ 亿 kg CO}_2\text{-eq}$,玉米生产的温室气体排放量增加了 $849.19 \text{ 亿 kg CO}_2\text{-eq}$ 。

3.4 2020年不同情境下小麦、玉米碳足迹分析

3.4.1 多元回归模型温室气体排放量模拟验证

在使用省级数据进行多元回归模拟的过程中,由于不同省份土壤条件差异较大,灌溉耗电和玉米生产机械燃油使用所产生的温室气体排放量的回归模拟离散程度较大(表3),但多元回归方程均通过了显著性检验($P<0.01$),结果具有代表性。利用2005—2015年小麦、玉米各省份生产温室气体排放量对多元回归模型进行历史检验,结果显示,小麦和玉米的温室气体排放量的模拟值和实际值的决定系数分别为0.96和0.99,均达到了极显著水平($P<0.01$),且模型模拟的归一化均方根误差分别为1.89%和1.20%,均低于5%(图4),因此模型能够用于模拟中国2020年小麦、玉米的温室气体排放量。

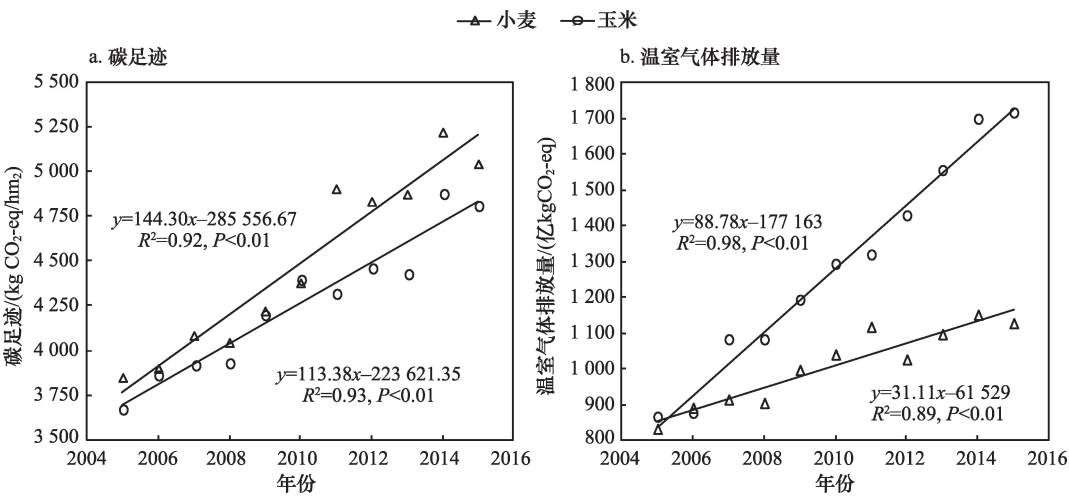


图3 2005—2015年中国小麦、玉米单位播种面积碳足迹与温室气体排放量年际变化

Figure 3 Variation of carbon footprint and total carbon emissions of wheat and maize in China from 2005 to 2015

表3 2020年中国小麦、玉米生产温室气体排放量模拟结果

Table 3 Simulation analysis of greenhouse gas emissions of wheat and maize production in China in 2020

参数意义	小麦模型预估结果	玉米模型预估结果
Y_1 柴油使用产生的温室气体排放量/万 kg CO ₂ -eq	$Y_1=23.35X_1+7\ 096.09$	$Y_1=31.78X_1+16\ 432.45$
A 年份(取1, 2, 3……)	($R^2=0.90$; $P<0.01$)	($R^2=0.37$; $P<0.01$)
B 玉米播种面积占粮食作物播种面积比例		
C 小麦播种面积占粮食作物播种面积比例		
X_1 农用机械总动力/万 kW	$X_1=C(3\ 254.75A + 46\ 113.15)$	$X_1=B(3\ 925.9A+52\ 238.41)$
	($R^2=0.99$; $P<0.01$)	($R^2=0.99$; $P<0.01$)
Y_2 灌溉耗电产生的温室气体排放量/万 kg CO ₂ -eq	$Y_2=112.40X_2-4\ 778.82$	$Y_2=810.34X_2-53\ 4628.3$
	($R^2=0.41$; $P<0.01$)	($R^2=0.35$; $P<0.01$)
X_2 灌溉面积/万 hm ²	$X_2=C(0.060A+2.55)$	$X_2=B(96.71A+4\ 432.84)$
	($R^2=0.99$; $P<0.01$)	($R^2=0.99$; $P<0.01$)
Y_3 种子使用的温室气体排放量/万 kg CO ₂ -eq	$Y_3=116.66X_3+3\ 405.76$	$Y_3=78.14X_3+8\ 903.29$
X_3 作物播种面积/万 hm ²	($R^2=0.92$; $P<0.01$)	($R^2=0.89$; $P<0.01$)

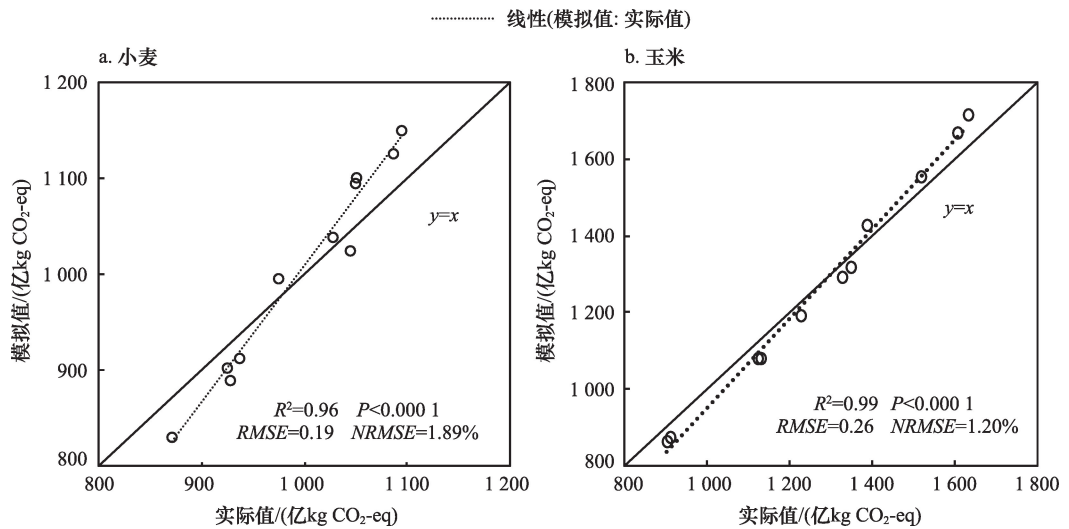


图4 小麦、玉米温室气体排放量模拟值的历史检验

Figure 4 History test of greenhouse gas emission of wheat and maize production

2018年9月

3.4.2 2020年不同情境下小麦、玉米温室气体排放量模拟

种植面积缩减和减少单位面积化肥、农药的使用量均能降低小麦、玉米生产的温室气体排放压力(表4)。在小麦种植面积与2015年持平、玉米种植面积和单位面积化肥、农药使用量分别与2015年持平时(S4),玉米生产的温室气体排放量较2015年降低了7.17%,减少温室气体排放量122.91亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了12.28%,减少碳足迹590.83 kg CO₂-eq/hm²;小麦生产的温室气体排放量较2015年降低了4.08%,减少温室气体排放量45.98亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了8.28%,减少单位面积碳足迹417.57 kg CO₂-eq/hm²。在小麦面积与2015年持平,缩减玉米种植面积至3333.33万hm²,单位面积化肥、农药使用量与2015年持平时(S3),玉米生产的温室气体排放量较2015年降低了17.61%,减少温室气体排放量302.66亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了11.95%,减少碳足迹575.14 kg CO₂-eq/hm²;小麦生产的温室气体排放量与单位面积碳足迹的变化情况与S4相同。在小麦面积与2015年持平,缩减玉米种植面积至3333.33万hm²,化肥、农药使用量较2015年缩减5%时(S2),玉米生产的温室气体排放量较2015年降低了21.05%,降低温室气体排放量361.65亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了15.63%,减少碳足迹752.13 kg CO₂-eq/hm²;小麦生产的温室气体排放量较2015年降低了8.52%,减少温室气体排放量96.12亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了12.54%,减少单位面积碳足迹632.04 kg CO₂-eq/hm²。在小麦面积与2015年持平,缩减玉米种植面积至3333.33万hm²,化肥、农药使用量较2015年缩减10%时(S1),玉米生产的温室气体排放量较2015年降低了24.49%,减少温室气体排

放量420.64亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了19.30%,减少碳足迹929.11 kg CO₂-eq/hm²;小麦生产的温室气体排放量较2015年降低了12.33%,减少温室气体排放量139.43亿kg CO₂-eq,单位面积碳足迹降低了16.21%,减少碳足迹816.45 kg CO₂-eq/hm²。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究利用多元回归模型通过对不同农资投入数据与小麦、玉米生产过程建立多元回归关系并根据最小二乘法对相关参数进行评估,同时,基于生命周期评价法(LCA)对2005—2015年小麦、玉米的碳足迹进行系统的核算,并使用2005—2015年历史数据对多元回归模型进行验证,得出结论如下:

(1)2005—2015年中国小麦生产单位面积碳足迹均值为3994.26 kg CO₂-eq/hm²,单位产量碳足迹均值为1.01 kg CO₂-eq/kg,单位产值碳足迹均值为0.39 kg CO₂-eq/元;玉米生产单位面积碳足迹均值为4098.47 kg CO₂-eq/hm²,单位产量碳足迹均值为0.79 kg CO₂-eq/kg,单位产值碳足迹均值为0.34 kg CO₂-eq/元。

(2)2005—2015年小麦、玉米单位面积碳足迹与温室气体排放均呈现出逐年上升的趋势,小麦生产的单位面积碳足迹年均增长量为144.30 kg CO₂-eq/hm²,高于玉米生产碳足迹的年均增长量113.38 kg CO₂-eq/hm²,而玉米生产的温室气体排放年均增长量为88.78亿kg CO₂-eq,高于小麦31.11亿kg CO₂-eq。

(3)根据《全国种植业调整规划2016—2020》^[4]、《到2020年化肥使用量零增长行动方案》^[5]、《到2020年农药使用量零增长行动方案》^[6]对小麦、玉米生产进行相关情景预测结果表明:4种情景模式下,2020年中国玉米生产的温室气体排放总量分别比2015年降低了24.49%、21.05%、17.61%、7.17%。单

表4 2020年不同情景下玉米、小麦生产碳足迹及温室气体排放量模拟值

Table 4 Carbon footprint and greenhouse gas emissions of maize and wheat production under different scenarios in 2020

情景	小麦		玉米	
	温室气体排放量 /(亿kg CO ₂ -eq)	单位面积碳足迹 /(kg CO ₂ -eq/hm ²)	温室气体排放量 /(亿kg CO ₂ -eq)	单位面积碳足迹 /(kg CO ₂ -eq/hm ²)
S1	987.61	4 224.55	1 294.63	3 883.89
S2	1 030.92	4 409.84	1 353.62	4 060.87
S3	1 081.06	4 624.31	1 412.62	4 237.86
S4	1 081.06	4 624.31	1 592.36	4 222.18

位面积碳足迹分别比2015年降低了19.30%、15.63%、11.95%、12.28%。2020年中国小麦生产的温室气体排放总量为分别比2015年降低了12.33%、8.52%、4.08%、4.08%。单位面积碳足迹分别比2015年降低了16.21%、12.54%、8.28%、8.28%。因此,优化化肥、农药投入能够有效降低小麦、玉米生产的碳足迹,实现(168.89~560.07)亿kg CO₂-eq的温室气体减排潜力。建议逐步构建科学施肥技术体系,提高农资投入的利用效率,降低农资投入量,以促进农业生产的节能减排。

4.2 讨论

2005—2015年中国小麦、玉米单位面积碳足迹与温室气体排放呈现出增加趋势,这与Xu等^[22]的研究结果类似。其主要原因为小麦、玉米生产过程农资投入的增加。近年来,中国化肥使用强度迅速提高,其中2014年农业生产化肥使用总量较上世纪增加了近4倍^[23],同时化肥使用所产生的碳足迹在农业生产的碳足迹中所占比例最高^[22,24],Ali等^[25]通过对意大利南部旱作小麦进行长期田间试验发现,氮肥使用量增加,小麦生产单位产量碳足迹呈现出先降低后升高的趋势,过量使用氮肥降低了小麦产量,同时也增加了生产过程的温室气体排放量,Wang等^[26]对中国华北平原旱作小麦的研究得出了相同的结论。传统的过量施肥的管理方式,造成施入土壤的肥料以淋失和挥发等方式损失,肥料利用率低,温室气体排放量较高。科学合理的肥料管理措施如:测土配方施肥,改善施肥方式,推进新型肥料(缓释肥,控释肥)等能措施能够提高化肥利用率,减少化肥的使用量,降低作物生产的碳足迹^[27,28]。化肥和农药的使用对粮食增产的贡献率达到了较高水平,同时也带来了大量的温室气体排放^[29-31],化肥和农药使用量降低10%的情景(S1)较化肥和农药使用量与2015年持平的情景(S3)中国小麦、玉米生产能够减少温室气体排放量211.44亿kg CO₂-eq(表4),约占2015年小麦生产温室气体排放量的19.20%。因此,构建科学施肥体系,提高农资投入品的利用率,控制和减少化肥及农药的使用量,能够降低中国小麦、玉米生产的碳足迹,为低碳农业的发展提供一定的支持。

在玉米种植面积和单位面积化肥农药使用量

均与2015年持平的情境下(S4),2020年玉米生产温室气体排放量模拟值较2015年降低了7.17%,减少温室气体排放量122.91亿kg CO₂-eq,小麦生产的温室气体排放较2015年降低了4.08%,减少温室气体排放量45.98亿kg CO₂-eq,其主要原因为农用机械使用、灌溉耗电和种子生产加工及运输过程所产生的温室气体排放差异。目前中国小麦、玉米单产已经达到了较高水平,在维持目前单产水平(2015年小麦4414.61 kg/hm²,玉米5707.13 kg/hm²)的条件下,S1情境中2020年玉米、小麦的单位产量碳足迹的估计值分别为0.68 kg CO₂-eq/kg、0.96 kg CO₂-eq/kg,低于2005—2015年玉米、小麦生产单位产量碳足迹的平均值。在小麦、玉米的单产维持不变的条件下,作物生产的碳产出恒定,但降低化肥及农药使用量降低小麦、玉米生产的碳投入,同时,化肥使用量与粮食产量之间存在着一定的相关性^[32],因此,针对中国目前农业生产“高投入、高产”的现状,提高农资投入品的使用效率和降低农资投入品的使用量同等重要。

本研究利用多元回归模型,依据农业政策设定不同情景,对2020年小麦、玉米生产的温室气体排放量和碳足迹进行了模拟预估。值得注意的是,由于玉米面积缩减和化肥农药等农资投入品使用量的变化受到农业政策和农民意愿等多方面因素的影响,变化过程十分复杂,情景设置中,考虑了种植面积及农药、化肥施用量的变化,受到情景模式的限制,随着预测年数的增加,模型的准确性可能存在偏差,会在以后的研究中逐步完善。同时,由于农业生态系统的碳足迹的计算过程中农田土壤N₂O排放量是结合统计数据对不同区域小麦、玉米生产过程中的土壤N₂O排放进行了估算得到,并非田间实测值,但本研究根据《低碳发展及省级温室气体清单培训教材》^[19]提供的不同区域农用地土壤N₂O直接排放参数分区域进行了核算,核算结果与大田实验得出的土壤N₂O排放占温室气体总排放的比值相近^[33,34],能够代表全国小麦、玉米生产过程土壤N₂O排放的整体情况。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working

2018年9月

- Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change[R]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Schmidhuber J, Tubiello F N. Global food security under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(50): 19703–19708.
- [3] 齐晔, 李惠民, 王晓. 农业与中国的低碳发展战略[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(1): 1–6. [Qi Y, Li H M, Wang X. Agriculture and low-carbon development strategy in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(1): 1–6.]
- [4] 中华人民共和国农业部. 全国种植业结构调整规划(2016–2020年)[EB/OL]. (2016–04–28)[2017–06–30]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/28/content_5068722.htm. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China 2016. National Structural Adjustment Plan for Plant Industry (2016–2020) [EB/OL]. (2016–04–28) [2017–06–30]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/28/content_5068722.htm.]
- [5] 中华人民共和国农业部. 到2020年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL]. (2015–03–18)[2017–06–30]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Preamble of Fertilizer Usage Zero Growth by 2020[EB/OL]. (2015–03–18)[2017–06–30]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.]
- [6] 中华人民共和国农业部. 到2020年农药使用量零增长行动方案[EB/OL]. (2015–03–18)[2017–06–30]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Preamble of Pesticide Usage Zero Growth by 2020 [EB/OL]. (2015–03–18)[2017–06–30]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.]
- [7] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 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[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(6): 1–11. [Liu X H, Xu W X, Li Z J, et al. 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[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(6): 1–11.]
- [8] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1327–1338. [Shi M J, Wang Y, Zhang Z Y, et al. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1327–1338.]
- [9] Wackernagel M. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning toward Sustainability[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1994.
- [10] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environmental International*, 2004, 30(7): 981–990.
- [11] 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.]
- [12] 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: 249–257.
- [13] Gan Y T, Liang C, Chai Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production [J]. *Nature Communications*, 2014, doi: 10.1038/ncomms6012.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2005–2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005–2015. [National bureau of statistics of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005–2015.]
- [15] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本资料收益汇编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[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005–2015.]
- [16] International Organization for Standardization (ISO). ISO/TS14067: 2013: Greenhouse Gases—Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantification and Communication [EB/OL]. (2013–05–01)[2017–06–30]. <https://www.iso.org/standard/59521.html>.
- [17] 田云, 张俊彪, 尹朝静, 等. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进—基于31个省(市、区)2002–2011年的面板数据分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(7): 91–98. [Tian Y, Zhang J B, Yin C J, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China's agriculture carbon emissions—an analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(7): 91–98.]
- [18] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2006: Synthesis Report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [19] 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. Low-Carbon Development and Provincial Greenhouse Gas Inventory Training Materials[R]. Beijing: National Development and Reform Commission on Climate Change, 2013.]
- [20] Ecoinvent Database [EB/OL]. (2011–05–11)[2016–06–30]. <http://www.ecoinvent.ch>.
- [21] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136–2144. [Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database of fundamental

- industries[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136–2144.]
- [22] Xu X M, Lan Y. Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146: 218–227.
- [23] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214–221. [Liu Q P. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 214–221.]
- [24] Cheng K, Yan M, Nayak D, *et al.* Carbon footprint of crop production in China: an analysis of National Statistics data[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 153(3): 422–431.
- [25] Ali S A, Tedone L, Verdini L, *et al.* Effect of different crop management systems on rainfed durum wheat greenhouse gas emissions and carbon footprint under Mediterranean conditions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140(2): 608–621.
- [26] Wang Z B, Zhang H L, Lu X H, *et al.* Lowering carbon footprint of winter wheat by improving management practices in North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 112: 149–157.
- [27] 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 Agriculture Science and Technology*, 2016, 18(3): 104–111.]
- [28] 段智源, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮肥处理春玉米温室气体的排放[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 216–224. [Duan Z Y, Li Y, Wan Y F, *et al.* Emission of greenhouse gases for spring maize on different fertilizer treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 216–224.]
- [29] Cui Z L, Wang G L, Yue S C, *et al.* Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security[J]. *Environ Science and Technology*, 2014, 48(10): 5780–5787.
- [30] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966–975. [Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, *et al.* Research advances on source/sink in densities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966–975.]
- [31] 顾乐民. 基于最小一乘准则的中国粮食产量与影响因素的相关性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 1–10. [Gu L M. Relative analysis of China's grain yield and influence factors based on criterion of least absolute deviation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(11): 1–10.]
- [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] Yan M, Cheng K, Luo T, *et al.* Carbon footprint of grain crop production in China—based on farm survey data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130–138.
- [34] Yao Z S, Yan G X, Zheng X H, *et al.* Straw return reduces yield-scaled N₂O plus NO emissions from annual winter wheat-based cropping systems in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590–591: 147–185.

Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China

WANG Yuqiao, PU Chao, ZHAO Xin, WANG Xing, LIU Shengli, ZHANG Hailin

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

Abstract: Risks for natural and human systems have been increasing during past decades due to global warming, which is one of the main consequences of the raising anthropogenic greenhouse gases (GHGs) emissions. Agriculture is one of the principal contributors to anthropogenic GHGs emissions. And wheat and maize are major cereal crops in China. Thus, assessing the carbon footprint (CF) of wheat and maize, investing the adjustment of agricultural policies and the effects on reduction in GHGs emissions will help to establish a reasonable strategy to mitigate climate change. A systematical analysis of the carbon footprint (CF) of wheat and maize production is critical to develop low carbon agriculture and enhance carbon sequestration in China. CF of wheat and maize production during 2005-2015 was computed, which was based on the Life Cycle Assessment (LCA). According to the completion of the relevant agricultural policy “National crop adjustment plan (2016-2020), ” “Fertilizer usage by 2020 zero increase action plan, ” and “Pesticides usage by 2020 zero increase action plan, ” a predicted CF of wheat and maize production in the near future five scenarios was established. The result showed a significant rising trend in CF and total greenhouse gases (GHGs) emissions for both wheat and maize production during 2005-2015 ($P < 0.01$). The CF of maize production was lower than wheat production. The growth rate of CF per unit area of wheat production was higher than that of maize, while the total GHGs emissions showed an opposite trend. Simulation on different scenarios indicated that all the projections in 2020 experienced a reduction on carbon emission for about (16.89~56.01) billion kg CO₂-eq. Therefore, strategies to balance crop production and agriculture inputs application are of great importance to achieve China’s 2020 GHGs emission targets.

Key words: wheat; maize; agricultural policy; carbon footprint; life cycle assessment