

# 基于生命周期法评价山西省 2004—2013 年 小麦碳足迹动态及其构成解析

薛建福<sup>1,2</sup> 李慧<sup>1</sup> 高志强<sup>1\*</sup> 张海林<sup>2</sup> 杜天庆<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801;

2. 中国农业大学 农学院/农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193)

**摘要** 基于《全国农产品成本收益资料汇编》以及收集的相关参数数据,采用生命周期评价法分析 2004—2013 年山西省小麦生产中不同功能单位的碳足迹变化动态并解析其构成,以期对山西省小麦的低碳清洁化生产与气候变化的缓解提供一定的理论依据。结果表明:山西省小麦生产的温室气体排放从 2004 年的 3 798.5 kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq) 增加到 2013 年的 4 650.5 kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq), 年均增加 74.9 kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq); 肥料应用(尤其是氮肥和复合肥)、土壤 N<sub>2</sub>O 以及机械操作的能源消耗是其主要构成, 占总排放的 90% 以上。山西省小麦的产量碳足迹总体上变化不大, 而产值碳足迹、成本碳足迹以及净利润碳足迹均表现为逐渐降低的趋势, 其中成本碳足迹达到显著水平。考虑土壤有机碳储量变化后, 不同功能单位的小麦碳足迹均大幅度降低。综上所述, 合理施肥、加强机械一体化推广以及增加土壤固碳是降低山西省小麦碳足迹的主要途径。

**关键词** 气候变化; 碳足迹; 小麦; 收益; 山西

中图分类号 S19

文章编号 1007-4333(2017)10-0015-11

文献标志码 A

## Dynamic of carbon footprint and its composition for wheat production based on life cycle assessment from 2004 to 2013 in Shanxi Province

XUE Jianfu<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, GAO Zhiqiang<sup>1\*</sup>, ZHANG Hailin<sup>2</sup>, DU Tianqing<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China/  
College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Based on the National Cost-Benefit Survey for agricultural product from 2004 to 2013 in China, the dynamic of carbon footprint and its composition for wheat production based on different functional units in the study were assessed to provide theoretical basis for a low-carbon and cleaner wheat production and climate change mitigation in Shanxi province. The results showed that GHG emissions in the wheat production process in Shanxi province increased from 3 798.5 kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq) in 2004 to 4 650.5 kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq) in 2013, with an increasing rate of 74.9 kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq) each year. Fertilizers application, soil N<sub>2</sub>O, and energy consumption from mechanical operation accounted for >90% of the total GHG emissions in whole wheat production. Carbon footprint at yield-scale for wheat production was observed with a subtle change trend, however, which at production value-scale, cost-scale, and net-income-scale decreased gradually since 2004. Carbon footprint of wheat based on different functional units decreased markedly when change in soil organic carbon stock was taken into account. Overall, the rational fertilizer management, the promotion of

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(K461501024); 国家公益性行业(农业)科研专项(201303104); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03-01-24)

第一作者: 薛建福, 博士后, 主要从事农作制度与农田生态研究, E-mail: fudange95@cau.edu.cn

通讯作者: 高志强, 教授, 主要从事旱作栽培与作物生态研究, E-mail: gaozhiqiang1964@126.com

multi-functional machinery, and the enhancement of soil organic carbon sequestration could be some potential solutions to reduce carbon footprint of wheat in Shanxi province.

**Keywords** climate change; carbon footprint; wheat; profit; Shanxi

人为温室气体排放引起的全球气候变化已成为不争的事实,如何有效地缓减气候变化已成为全球科学家、政治家和公众所关注的焦点问题。农业是全球人为温室气体排放的主要来源之一,通过有效的措施减少温室气体排放是众多国际科学家所努力的方向,而定量评价农业生产过程各个环节的温室气体排放量,对于减少温室气体排放有非常重要的意义。碳足迹是基于生态足迹的概念,最早在英国被提出,为定量评价人类活动对全球气候变化的影响<sup>[1]</sup>。为统一碳足迹的基本概念、内容及其核算方法等,国际标准化组织经过多年的交流与探讨,发布了产品碳足迹计算的技术规范草案 ISO/TS 14067,将产品碳足迹定义为,基于生命周期评价方法计算产品生产系统内温室气体排放与消纳之和,并以 CO<sub>2</sub> 当量形式来表达评价对气候变化的单一影响<sup>[2]</sup>。

目前,国际上关于农产品碳足迹的研究逐渐增多,不同地区、不同农产品的碳足迹及其构成要素差别较大<sup>[3-4]</sup>。近年来,国内关于农产品碳足迹的研究逐渐增多<sup>[5-6]</sup>,但大多研究是以面积和产量作为功能单位来进行碳足迹评价,很少研究从经济投入与产出的角度,结合农产品产值、投入成本以及净利润等方面进行碳足迹分析。作物生产中的投入成本以及收益在很大程度上能够影响农民的种粮积极性,进而影响农作物生产以及由此造成的温室气体排放。因此,基于多种功能单位评价农产品的碳足迹,

有助于从多角度理解农产品生产与气候变化的关联。

山西省小麦占农作物播种面积的 20% 以上,其产量约占全省粮食产量的 25%<sup>[7]</sup>,在山西省农业生产中占有十分重要的地位。因此,山西省小麦种植过程中由各种农资投入及其使用所造成的温室气体排放不容忽视,定量地评价各环节排放对于缓解温室气体排放有重要意义。本研究主要以山西省小麦生产为例,分析 2004—2013 年小麦生产造成的温室气体排放动态及其影响因素,并基于作物产量、经济投入与收益等角度比较不同功能单位的碳足迹,为山西省小麦的低碳清洁化生产以及气候变化的缓减提供相应的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究的系统边界和数据来源

本研究分析山西省小麦生产的碳足迹,基于生命周期评价法定量估算小麦整个生产周期过程中温室气体排放与消纳,为该省小麦的低碳清洁化生产提供相应的依据。本研究主要分析山西省小麦生产过程由化肥、柴油、农药和种子等农资投入造成的潜在温室气体排放,土壤非 CO<sub>2</sub> 的温室气体排放以及土壤有机碳固定。本研究的系统边界(图 1)包括小麦整个生产阶段,从农资投入的原材料开采、生产、加工和运输等全生命周期过程到小麦收获,温室气体排放主要包括以下内容:1)农资投入(如化肥、种

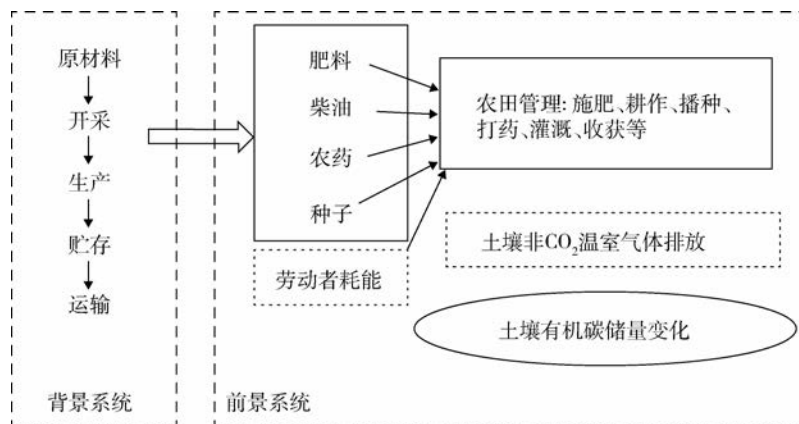


图 1 本研究中小麦碳足迹的系统边界

Fig. 1 The system boundary for carbon footprint of wheat in the present study

子、柴油和农药等)的生产、加工及运输过程造成的排放;2)小麦生产中的各环节农事操作造成的能源消耗(如耕作、播种、收获和灌溉等)以及劳动者工作造成的能量消耗;3)土壤非 CO<sub>2</sub> 温室气体排放(如 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O),一般非稻田土壤的 CH<sub>4</sub> 排放量很少、甚至是吸收汇<sup>[8]</sup>,麦田亦有类似的结论<sup>[9-10]</sup>,因此,在计算时不考虑 CH<sub>4</sub> 排放,仅考虑土壤 N<sub>2</sub>O 排放。本研究定义小麦为产品,功能单位选择单位产量、产值、成本和净利润,定量评价山西省每生产 1 kg 小麦、每创造 1 元产值、每花费 1 元人民币成本和每产生 1 元人民币净利润的温室气体排放。

本研究中山西省小麦生产中各项投入与产出的数据主要来源于 2005—2014 年发布的《全国农产品成本收益资料汇编》<sup>[11]</sup>,包括单位面积小麦的产量、产值、成本和净利润,各种肥料的施用量、种子用量以及劳动者用工。在该统计资料中,总成本是指小麦生产过程中耗费的现金、实物、劳动力和土地等所有资源的成本,其包括生产成本(物质与服务费用及人工成本)和土地成本(流转地租金和自营地折租)两部分。在统计资料中,各种肥料(氮肥、磷肥、钾肥和复混肥)投入为折纯量,本研究中各项投入的温室气体排放因子为每生产单位质量肥料(实物量)的排放量,因此,根据肥料中养分含量将折纯量换算为肥料实物量以便碳足迹计算需要,其中,不同肥料的折纯率分别为尿素 46%、碳酸氢铵 17%、过磷酸钙 17%、氯化钾 55%和复合肥 45%<sup>[12]</sup>。由于缺乏各环节机械操作耗能数据,本研究将统计资料中的机械作业费进行了换算。崔晓晨等<sup>[13]</sup>通过调查我国三大粮食作物农机作业成本得出,小麦生产中土壤耕作、播种和收获等机械操作所消耗的柴油其成本分别占机械作业费的 26.9%、29.3%和 30.7%。通过以上比例以及统计年鉴中机械作业费来计算小麦生产中各环节柴油成本,并根据当年中国的柴油价格来计算得出各环节柴油消耗量。另外,由于统计资料中缺乏关于灌溉能源消耗和农药使用量的信息,本研究参考 Yan 等<sup>[5]</sup>基于山西省的相关调查结果,其分别为 142 和 1.6 kg/hm<sup>2</sup>。另外,本研究中各项农资投入的温室气体排放因子见表 1,小麦碳足迹计算的具体排放清单见表 2。

## 1.2 碳足迹计算

本研究中小麦生产的碳足迹采用式(2)进行计算得出<sup>[2,14]</sup>。

$$CE_{\text{total}} = CE_{\text{inputs}} + CE_{\text{N}_2\text{O}} \quad (1)$$

$$CF = \frac{CE_{\text{total}}}{M} \quad (2)$$

表 1 各项农资投入的温室气体排放因子  
Table 1 Greenhouse gas emission factors of different agricultural inputs

项目 Item	排放系数 Emission factors
尿素/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Urea	2.390 0
碳铵/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Ammonium bicarbonate	0.648 4
其他氮肥/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Others N fertilizers	1.526 0
过磷酸钙/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Calcium superphosphates	2.676 0
其他磷肥/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Others P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> fertilizers	1.631 0
氯化钾/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Potassium chloride	0.707 9
其他钾肥/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Others K <sub>2</sub> O fertilizers	0.654 5
复合肥/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Compound fertilizer	1.772 0
机械耗柴油/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Diesel oil for machine	4.986 6
农药/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Pesticides	12.440 0
小麦种子/(kg/kg)(CO <sub>2</sub> -eq) Wheat seed	0.576 5
灌溉用电/(kg/kWh)(CO <sub>2</sub> -eq) Electricity for irrigation	1.229 0
劳动力/(kg/(人·日))(CO <sub>2</sub> -eq) Labor	0.860 0

注:以上大多排放因子来源于我国自主研发本地化的生命周期基础数据库,劳动力的排放因子来源于刘巽浩等<sup>[15]</sup>。

Note: Most of emission factors for different agricultural inputs are adapted from the Chinese Life Cycle Database, and the emission factor for labor is adapted from reference<sup>[15]</sup>.

表2 2004—2013年山西省小麦生产过程中农资投入造成的温室气体排放清单

Table 2 The inventory of greenhouse gases emissions from agricultural inputs in the process of wheat production in Shanxi province from 2004 to 2013

项目 Item	年份 Year										
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
机械操作/(kg/hm <sup>2</sup> ) Mechanical operation											
耕作 Tillage	51.90	50.16	53.18	51.95	53.72	52.22	50.42	51.76	57.74	63.25	
播种 Sowing	56.62	54.72	58.02	56.68	58.60	56.97	55.01	56.47	62.99	69.01	
收获 Harvest	59.35	57.36	60.81	59.41	61.43	59.71	57.66	59.19	66.02	72.33	
氮肥/(kg/hm <sup>2</sup> ) N fertilizers											
尿素 Urea	56.70	61.95	76.05	98.55	113.25	92.25	78.45	121.50	137.40	136.35	
碳酸铵 Ammonium bicarbonate	48.60	63.15	55.65	44.10	33.75	36.15	39.15	46.50	28.65	13.35	
其他 Others	0.75	0.45					0.45				
磷肥/(kg/hm <sup>2</sup> ) P fertilizers											
过磷酸钙 Calcium superphosphates	69.60	77.85	60.45	65.55	43.05	46.80	61.80	62.70	38.40	32.55	
其他 Others	7.95	2.55	24.45	9.75	6.60	13.50	4.35	0.00			
钾肥/(kg/hm <sup>2</sup> ) K fertilizers											
氯化钾 Potassium chloride				1.20							
其他 Others				1.05		0.60	0.75				
复混肥/(kg/hm <sup>2</sup> ) Compound and mixed fertilizers											
复合肥 Compound fertilizers	44.10	57.00	81.45	102.15	86.85	105.30	115.95	116.85	157.50	192.60	
其他 Others	2.25	13.80	19.05	52.22	19.65	36.75	50.10	78.15	92.70	94.95	
种子/(kg/hm <sup>2</sup> ) Seed	204.75	205.05	218.40	214.50	217.35	236.85	248.40	225.30	288.35	233.40	
农药/(kg/hm <sup>2</sup> ) Pesticides	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	
灌溉/(kW h/hm <sup>2</sup> ) Irrigation	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	
劳动力/(天/hm <sup>2</sup> ) Labor	101.25	86.55	89.25	87.45	91.80	70.50	73.95	77.10	75.30	74.85	

式中,CF 为小麦生产的碳足迹,本研究 4 种不同功能单位的碳足迹:产量碳足迹,kg/kg(CO<sub>2</sub>-eq);产值碳足迹,kg/元(CO<sub>2</sub>-eq);成本碳足迹,kg/元(CO<sub>2</sub>-eq)和净利润碳足迹,kg/元(CO<sub>2</sub>-eq);CE<sub>total</sub>为小麦生产过程中总温室气体排放量 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq),包括农资投入应用造成的温室气体排放与土壤 N<sub>2</sub>O 排放,其通过式(1)计算的得出;M 为山西省小麦的产量,kg/hm<sup>2</sup>;产值,元/hm<sup>2</sup>;成本,元/hm<sup>2</sup>和净利润,元/hm<sup>2</sup>。

$$CE_{\text{inputs}} = \sum_i (Q_{\text{used}_i} \times \epsilon_i) \quad (3)$$

式中:CE<sub>inputs</sub>为由农资投入造成的潜在温室气体排放,kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq);CE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为由于氮肥施用造成的土壤 N<sub>2</sub>O 排放量,kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq);Q<sub>used<sub>i</sub></sub>为小麦生产过程中各项农资投入的使用量 kg/hm<sup>2</sup>,包括肥料、柴油、电力、农药和种子等;ε<sub>i</sub>为各项农资投入的排放因子,kg/kg(CO<sub>2</sub>-eq)。

土壤 N<sub>2</sub>O 排放采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》进行估算<sup>[16]</sup>,施用氮肥是导致土壤 N<sub>2</sub>O 直接排放和间接排放的主要因素,其通过式(7)计算得出。

$$DCE_{\text{N}_2\text{O}} = F_{\text{SN}} \times EF_1 \times \frac{44}{28} \times 298 \quad (4)$$

$$VCE_{\text{N}_2\text{O}} = F_{\text{SN}} \times \text{Frac}_{\text{GASF}} \times EF_2 \times \frac{44}{28} \times 298 \quad (5)$$

$$LCE_{\text{N}_2\text{O}} = F_{\text{SN}} \times \text{Frac}_{\text{LEACH}} \times EF_3 \times \frac{44}{28} \times 298 \quad (6)$$

式中:F<sub>SN</sub>为小麦生产过程中的施氮量,kg/hm<sup>2</sup>,包括由氮肥与复混肥,复混肥的含氮量采用我国小麦的配方肥推荐量,其中雨养区 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 质量比为 28:12:5,灌溉区 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 质量比为 17:18:10<sup>[12]</sup>,目前,山西省雨养区和灌溉区小麦分别占总面积的 57%和 43%,按面积加权计算复合肥中施氮量;EF<sub>1</sub>为由氮肥投入引起的 N<sub>2</sub>O 直接排放的排放因子(0.01 kg/kg(N<sub>2</sub>O-N)N 投入);Frac<sub>GASF</sub>为以 NH<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 形式挥发的化肥氮比例,(0.1 kg/kg(N 挥发)N 投入);EF<sub>2</sub>为大气沉降到土壤表面氮素的 N<sub>2</sub>O 间接排放因子(0.01 kg/kg(N<sub>2</sub>O-N)挥发的 NH<sub>3</sub>-N and NO<sub>x</sub>-N);Frac<sub>LEACH</sub>为土壤中淋失和径流损失的施加氮比例(0.3 kg/kg(N)N 投入);EF<sub>3</sub>为氮淋失和径流引起 N<sub>2</sub>O 间接排放的排放因子(0.007 5 kg/kg(N<sub>2</sub>O-N)淋失和径

流氮);44/28 为 N<sub>2</sub>O 与 N<sub>2</sub>O-N 分子量之比;298 为在 100 年尺度上将 N<sub>2</sub>O 转化为 CO<sub>2</sub> 的全球增温潜势,以上排放因子均来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》<sup>[16]</sup>。

$$CE_{\text{N}_2\text{O}} = DCE_{\text{N}_2\text{O}} + VCE_{\text{N}_2\text{O}} + LCE_{\text{N}_2\text{O}} \quad (7)$$

式中:DCE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为土壤 N<sub>2</sub>O 直接排放量,kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq),通过式(4)得出;VCE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为农田土壤中以 NH<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 形式挥发到大气后氮沉降造成的间接 N<sub>2</sub>O 排放,kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq),通过式(5)得出;LCE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为通过淋失和径流损失的氮素造成的间接 N<sub>2</sub>O 排放,kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq),通过式(6)得出。

土壤耕作、施肥和秸秆管理等农作措施能够改变土壤有机碳含量与分布特征,进而改变土壤有机碳储量。近年来部分学者在计算农产品碳足迹时开始考虑土壤有机碳储量的变化<sup>[15,17]</sup>,因此,本研究结合土壤有机碳的变化对小麦的碳足迹进行了估算评价。

$$CF_{\text{soc}} = \frac{CE_{\text{total}} - \Delta\text{SOC}}{M} \quad (8)$$

式中:CF<sub>soc</sub>为考虑土壤有机碳储量变化后生产小麦的碳足迹,ΔSOC 为土壤有机碳储量的年变化量 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq)。由于缺乏相关的数据,本研究参考 Lu 等<sup>[18]</sup>估算的在当前秸秆还田条件下,山西省土壤有机碳固定速率来进行计算,年增加量为 1 624.3 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq)。

### 1.3 数据分析

本研究采用 SPSS 16.0 进行数据的相关分析,采用 Microsoft Excel 2010 进行绘图以及回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 山西省小麦生产造成的温室气体排放动态

2004—2013 年,山西省小麦生产造成的温室气体排放总体上呈逐渐增加的趋势(表 3),从 2004 年的 3 798.5 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq)增加到 2013 年的 4 650.5 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq),增幅达 22.4%,年均增加 74.9 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq)。肥料、土壤 N<sub>2</sub>O 以及机械操作是山西省小麦生产的主要温室气体排放源,其分别占总排放的 43.7%~49.8%、19.1%~27.1%和 17.8%~22.0%。肥料施用造成的温室气体排放主要是由氮肥和复混肥的增加造成的,年增加量分别为 29.1 和 54.1 kg/hm<sup>2</sup>(CO<sub>2</sub>-eq),而磷肥造成的排放则表现为连年降低,年减少 70.6 kg/hm<sup>2</sup>

(CO<sub>2</sub>-eq)。由于小麦生产中钾肥施用量很少,由其造成的温室气体排放量微乎其微。可以看出,磷肥施用所降低的温室气体排放被氮肥和复混肥的增加所抵消。土壤 N<sub>2</sub>O 随氮肥施用量的增加而呈逐年增加的趋势,年增加率约 0.72%。由耕作、播种和收获等机械操作造成的温室气体排放量亦呈逐年增

加的趋势,其所占比例总体的变化趋势较为稳定。此外,由灌溉和种子应用造成的温室气体排放分别占总排放的 3.7%~4.6%和 2.8%~3.5%,人工劳动产生的温室气体排放约占 1.4%~2.3%,而农药施用对小麦生产温室气体排放造成的贡献不足 1%。

表 3 2004—2013 年山西省小麦生产造成的温室气体排放动态

Table 3 Dynamic of greenhouse gases emission in the process of wheat production in Shanxi province from 2004 to 2013  
kg/hm<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>-eq)

项目 Item	年份 Year									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
机械操作 Mechanical operation										
耕作 Tillage	258.8	250.1	265.2	259.0	267.9	260.4	251.4	258.1	287.9	315.4
播种 Sowing	282.3	272.9	289.3	282.6	292.2	284.1	274.3	281.6	314.1	344.1
收获 Harvest	295.9	286.0	303.2	296.2	306.3	297.8	287.5	295.2	329.2	360.7
肥料 Fertilizers										
氮肥 N fertilizers	486.7	566.8	607.4	680.2	717.1	617.2	561.0	808.6	823.2	759.3
磷肥 P fertilizers	1 171.9	1 249.9	1 186.1	1 125.4	741.0	866.2	1 014.5	987.0	604.5	512.4
钾肥 K fertilizers			1.5	1.2		0.7	0.9			
复混肥 Compound and mixed fertilizers	179.6	224.5	349.1	402.2	363.9	427.6	456.6	467.2	637.9	758.4
种子 Seed	118.0	118.2	125.9	123.7	125.3	136.5	143.2	129.9	137.4	134.6
农药 Pesticides	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9
灌溉 Irrigation	174.5	174.5	174.5	174.5	174.5	174.5	174.5	174.5	174.5	174.5
劳动力 Labor	87.1	74.4	76.8	75.2	78.9	60.6	63.6	66.3	64.8	64.4
土壤 N <sub>2</sub> O 排放 Soil N <sub>2</sub> O emission	723.8	861.3	945.1	1 032.5	1 045.4	953.4	899.8	1 213.6	1 264.1	1 206.8
共计 Sum	3 798.5	4 098.5	4 344.0	4 472.8	4 132.5	4 099.0	4 147.3	4 701.9	4 657.5	4 650.5

## 2.2 山西省小麦生产的碳足迹变化动态

2004—2013 年,山西省小麦的单位面积产量在 3 247.5~5 260.5 kg/hm<sup>2</sup>,其总体上表现为逐年增加的趋势,但未达到显著水平(图 2(a))。山西省小麦生产的产值呈显著的二次方程增长趋势(图 2(b));同时小麦生产的成本亦呈现同样的增长趋势(图 2(c)),由 2004 年的 4 931.3 元/hm<sup>2</sup> 突增

到 2013 年的 14 313.9 元/hm<sup>2</sup>。山西省生产小麦的净利润逐年显著减少,年减少量达 332 元/hm<sup>2</sup>,且大多年份处于亏本状态(图 2(d));除 2004 和 2013 年外,其他年份小麦净利润波动较小,在 -962.7~452.7 元/hm<sup>2</sup>。山西省小麦生产中温室气体排放与小麦产量没有显著相关性,与产值和成本呈显著正相关,与净利润呈显著负相关(表 4)。

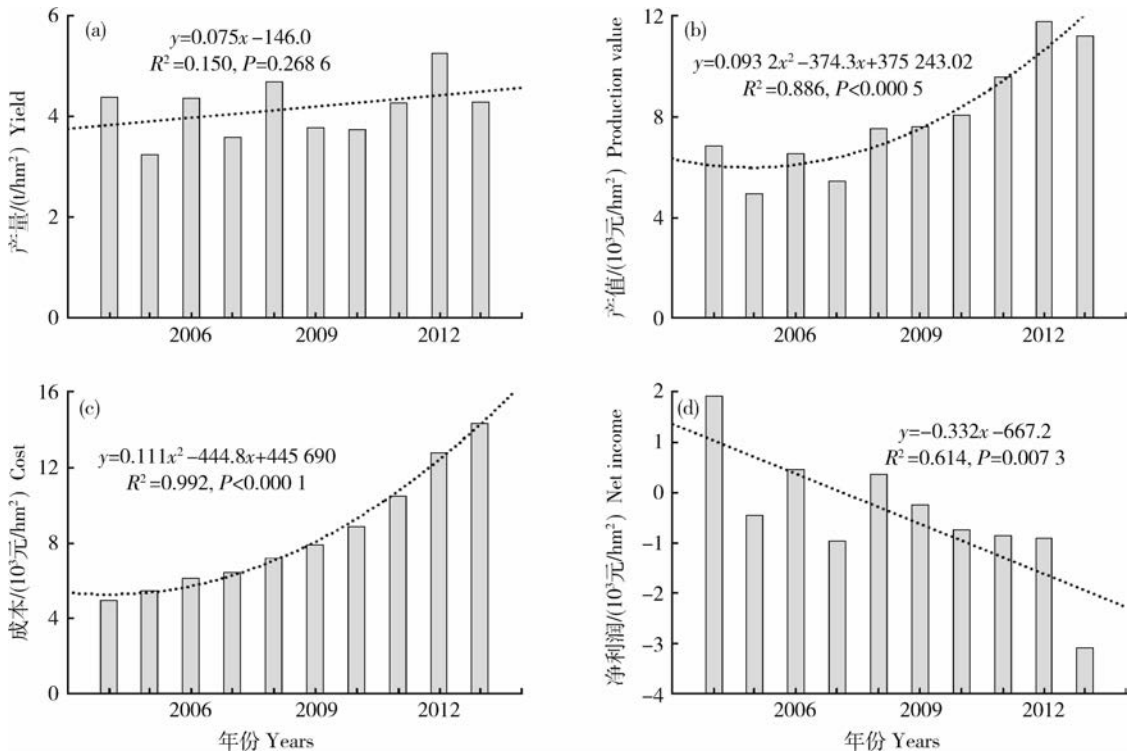


图 2 2004—2013 年山西省小麦产量(a)、产值(b)、成本(c)和净利润(d)的变化动态

Fig. 2 Dynamic of the yield (a), production value (b), cost (c) and net income (d) for wheat in Shanxi province from 2004 to 2013

表 4 2004—2013 年山西省小麦生产中温室气体排放与产量、产值、成本和净利润的相关关系

Table 4 The relationship between GHG emission and the yield, production value, cost, and net income for the wheat production in Shanxi province from 2004 to 2013

指标 Index	产量 Yield	产值 Production value	成本 Cost	净利润 Net income
温室气体排放 GHG emission	0.327	0.636*	0.763*	-0.749*

注：\* 代表显著相关性  $P < 0.05$ ，\*\* 代表极显著相关性  $P < 0.01$ 。

Note: \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

从多角度评价山西省小麦碳足迹发现,功能单位不同,碳足迹的表现有所差异(图 3 和图 4)。2004—2013 年,在不考虑土壤有机碳储量变化时,山西省小麦的产量碳足迹介于 0.85~1.24 kg/kg ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ),年际间波动较大但整体趋势变化较小(图 3(a))。而产值碳足迹(图 3(b))、成本碳足迹(图 3(c))和净利润碳足迹(图 3(d))分别介于 0.39~0.81、0.32~0.75 和 -15.86~11.34 kg/元 ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ),其均呈逐年递减的趋势,其中产值碳足迹和成本碳足迹达到显著水平。而考虑土壤有机碳储量变化后(图 4),不同功能单位的小麦碳足迹均大幅降低,降幅在 34.5%~42.8%。

### 3 讨论

#### 3.1 山西省小麦生产中温室气体排放影响因素分析

2004—2013 年,山西省小麦生产造成的温室气体排放逐年增加,这主要与氮肥、复混肥以及机械操作的柴油消耗的增加有关。分析看出,山西省小麦生产中氮肥和复合肥的施用量快速增加,而磷肥用量明显减少,几乎不专门另施钾肥,因此,科学合理施用氮肥和复合肥,提高肥料利用率将是缓减温室气体排放的重要途径之一。另外,当前山西省旱地小麦种植面积约占总面积的一半以上,在其种植过程中通常在播前采用“一炮轰”的施肥方式,即播种

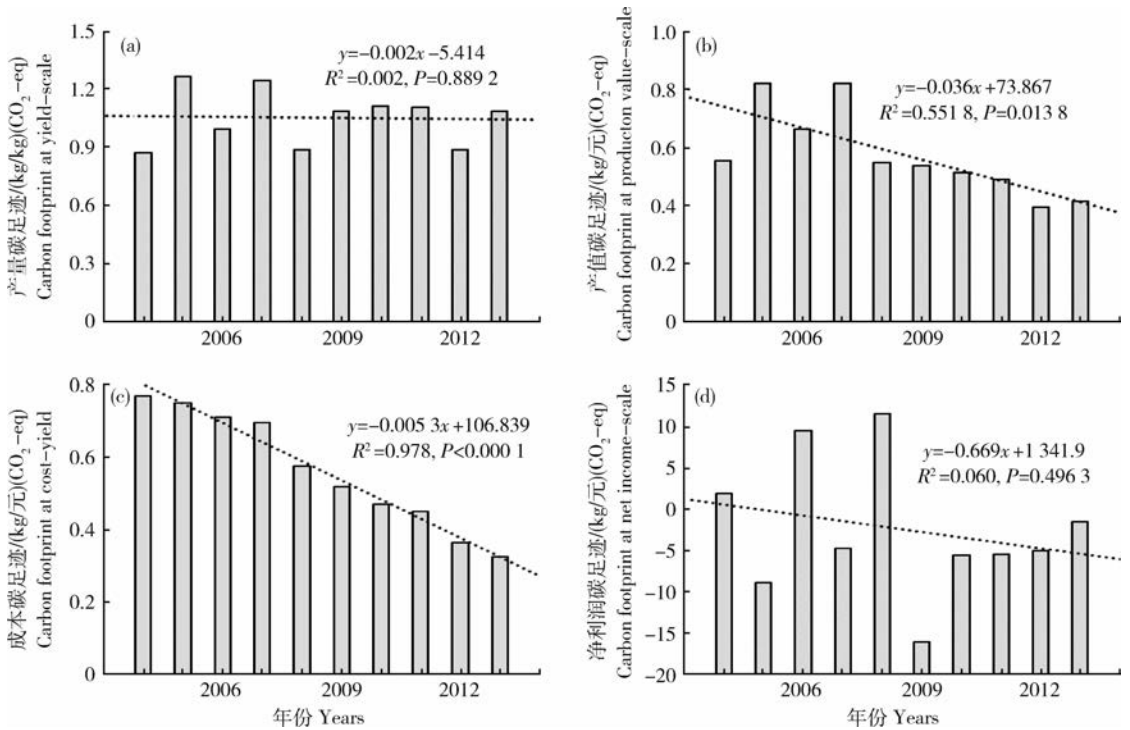


图3 2004—2013年山西省小麦基于产量碳足迹(a),产值碳足迹(b),成本碳足迹(c)和净利润碳足迹(d)变化动态(不包括土壤有机碳储量变化)

Fig. 3 Dynamic of carbon footprint of wheat at yield- (a), production value- (b), cost- (c) and net income-scale (d) in Shanxi province (Without the change in soil organic carbon stock) from 2004 to 2013

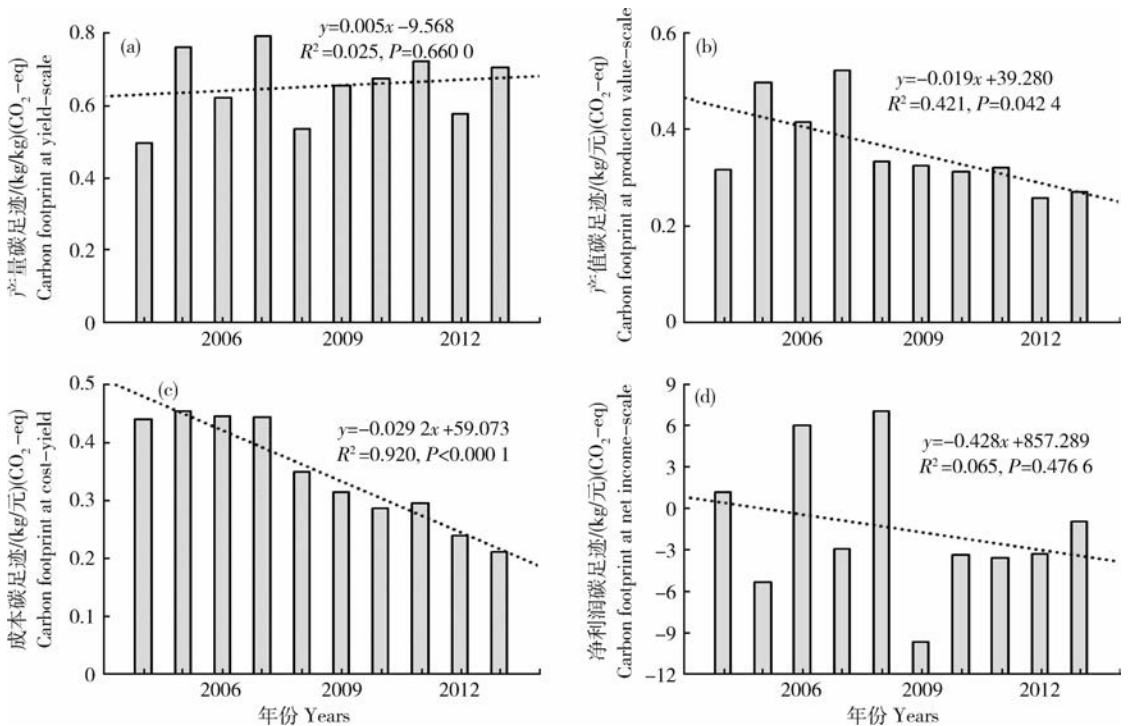


图4 2004—2013年山西省小麦基于产量碳足迹(a),产值碳足迹(b),成本碳足迹(c)和净利润碳足迹(d)变化动态(包括土壤有机碳储量变化)

Fig. 4 Dynamic of carbon footprint of wheat at yield- (a), production value- (b), cost- (c) and net income-scale (d) in Shanxi province including the change in soil organic carbon stock from 2004 to 2013



前一次性将肥料施入土壤,此后不再追肥。由于施入土壤的部分肥料以挥发、淋失等多种途径损失,且小麦在漫长的冬季对氮素吸收较少,导致肥料利用率较低<sup>[19-20]</sup>。根据农业部制定的《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,到 2020 年,我国将通过推进测土配方施肥、推进施肥方式转变、推进新肥料新技术应用、推进有机肥资源利用和提高耕地质量水平这 5 个方面,初步建立科学施肥管理和技术体系,明显提升科学施肥水平<sup>[21]</sup>,该方案的实施对于缓减农业温室气体排放将具有十分重要的影响。据分析,自 2005 年国家启动实施测土配方施肥项目以来,我国肥料利用率稳步回升,小麦氮肥、磷肥和钾肥利用率分别提高到 32%、19%和 44%,同时,化肥用量增幅出现下降趋势<sup>[21]</sup>,而山西省针对以上肥料管理措施及其利用效率相关的研究较少,需进一步基于山西省的具体情况加强该方面的工作,努力实现山西省麦田化肥零增长。另外,采用免耕等保护性耕作措施能够减少土壤耕作而降低机械耗能造成的温室气体的间接排放,减少麦田土壤 N<sub>2</sub>O 排放,进而减少小麦生产中总温室气体排放<sup>[22]</sup>。加强多功能一体化农机的研发与推广,如将土壤耕作、施肥和播种等功能集于一体,减少机械操作环节,从而有效减少由机械操作耗能造成的温室气体排放。近年来,小麦宽窄行探墒沟播栽培技术在晋南地区被大面积推广<sup>[23]</sup>,该技术同时兼具灭茬、开沟、施肥、播种和镇压等多个优势,减少了由机械操作耗能造成的温室气体排放。

本研究中由农药使用导致的温室气体排放量及其比重很小,然而,为防治病虫害,在小麦生产中经常使用过量的农药,其购买费用大幅度增加<sup>[14]</sup>。而过量的使用农药残留在农产品以及周边农田环境中,影响农产品质量和生态环境安全<sup>[21]</sup>,因此,在小麦生产中亦要控制农药使用。目前,在计算农田生态系统温室气体排放时,众多学者关于是否考虑劳动者工作造成的能源消耗有不同的看法。West 等<sup>[24]</sup>认为,不管劳动者劳动与否,均进行正常的呼吸作用,而在计算时不考虑劳动者的能源消耗。刘巽浩等<sup>[15]</sup>则认为,无论发达国家还是不发达国家,人工耗能均是农业生产能源消耗的重要内容之一,不应该忽略不计。李洁静等<sup>[25]</sup>在计算稻田碳排放时亦对劳动力进行了核算。

### 3.2 山西省小麦碳足迹变化及其影响因素

目前,大多关于农产品碳足迹的研究是以单位

面积或单位质量为功能单位进行评价,研究表明,我国小麦的平均产量碳足迹约为 0.265<sup>[26]</sup>、0.220<sup>[6]</sup>和 0.660 kg/kg (CO<sub>2</sub>-eq)<sup>[5]</sup>。本研究得出,不考虑土壤有机碳储量变化时,山西省小麦的产量碳足迹介于 0.85~1.24 kg/kg (CO<sub>2</sub>-eq),远高于其他研究;考虑有机碳储量后,其介于 0.50~0.79 kg/kg (CO<sub>2</sub>-eq),与 Yan 等<sup>[5]</sup>基本一致。分析认为,这可能与计算碳足迹的方法、研究的区域尺度、农资投入的碳排放因子参数等方面的差异造成的。本研究采用生命周期评价法,尽可能地考虑山西省小麦生产中温室气体排放清单,并采用了我国本地化的碳排放参数,一般国内农资品的生产耗能较国外更高,因此,本研究中小麦生产的碳足迹值高于其他研究。另外,由于不同区域气候条件、地理位置和科技水平等差异,小麦生产中的农田管理措施有所不同,这也可能造成山西省与我国碳足迹平均水平有一定差异。

当碳足迹计算包括土壤有机碳储量变化时,农产品碳足迹大幅度降低,在实施固碳减排技术条件下甚至表现为负值,即表现为碳汇<sup>[14,17]</sup>。本研究结合土壤有机碳储量得出,不同功能单位的小麦碳足迹均大幅度降低。本研究中土壤有机碳储量变化参考 Lu 等<sup>[18]</sup>在当前秸秆还田条件下的估算值,在一定程度上影响小麦碳足迹的精确度,但其总体的变化规律是基本一致的,而进一步对麦区土壤有机碳储量变化进行调研分析是很有必要的。目前,国内碳足迹计算时,各项农资投入的温室气体排放因子大多基于国外的参数,而本研究则基于我国本地化的生命周期数据库,与其他研究相比碳足迹值更加接近于实际情况。另外,由于缺乏山西省小麦生产中农药用量与灌溉耗能的数据,本研究中相关数据参考已有文献<sup>[5]</sup>,虽然年际间动态未能体现,但整体上看小麦生产碳足迹的变化规律是基本一致的,进一步通过实际调查等途径准确收集该部分数据对于准确计算山西小麦生产碳足迹有重要意义。

本研究基于不同的功能单位评价小麦生产的碳足迹,结果得出,不同功能单位的小麦碳足迹差异较大,尤其净利润碳足迹年际间波动很大。除产量碳足迹外,小麦生产的其他功能单位的碳足迹均表现为逐年降低的趋势。山西省小麦生产中温室气体排放与小麦的产值和成本呈显著正相关关系,与净利润呈显著负相关关系。这可能由于小麦生产成本的增加主要用于购买肥料和能源等农资品,进而造成

温室气体的增加。而近年来山西省小麦种植基本处于亏本状态,从而净利润碳足迹为负值,但并不意味着小麦生产为碳汇。在小麦碳足迹降低的同时,降低小麦生产成本,增加净利润,是平衡小麦生产力、生态环境及经济效益的关键。通过调整施肥量、改变施肥时期和施肥方法、选用适当的肥料品种能够在实现作物增产的同时适当的降低肥料投入成本。加强多功能一体化农机的研发与推广,减少小麦生产中的能源消耗是降低投入成本的重要途径,同时也是减少温室气体排放,缓减气候变化的重要手段。

### 3.3 局限之处

本研究采用生命周期评价法分析了山西省小麦生产的碳足迹变化动态,大部分数据是源于《全国农产品成本收益资料汇编》,但该资料库仍有部分所需数据缺失或者需要转换。针对此问题,本研究基于前人的文献进行了相应的补充。另外,本研究计算碳足迹时,土壤  $N_2O$  排放的计算采用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》提供的方法与缺省值,由于气候条件、土壤环境、作物品种以及农田管理措施的差异,本研究中土壤  $N_2O$  排放与实际排放是有一定差异的,但总体的变化规律是基本一致的。目前,静态箱测定法常被用来测定土壤  $N_2O$  排放,进一步对山西省小麦主产区进行实际测算,对于进一步准确计算小麦碳足迹、制定相应的温室气体缓减措施有十分重要意义。

## 4 结论

2004—2013年,山西省小麦生产造成的温室气体排放逐年增加,年均增加量达  $74.9 \text{ kg/hm}^2$  ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ );其中,肥料、土壤  $N_2O$  以及机械操作是主要排放源,约占总温室气体排放量的90%以上,合理施肥、加强机械一体化以及土壤固碳是减少山西省小麦中温室气体排放以及降低碳足迹的主要途径。山西省小麦的单产略有增加,而产值和成本呈极显著增加,而净利润则呈极显著降低的趋势。另外,山西省小麦的产量碳足迹总体上变化较小,但年际间波动较大;而产值碳足迹、成本碳足迹以及净利润碳足迹均表现为逐年降低的趋势。

## 参考文献 References

[1] Finkbeiner M. Carbon footprinting-opportunities and threats [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*,

2009,14(2):91-94

- [2] ISO 14067-2013. Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products-Requirements and Guidelines for Quantification and Communication [S]. Geneva: International Organization for Standardization
- [3] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009,23(4):332-350
- [4] Pathak H, Jain N, Bhatia A, Patel J, Aggarwal P K. Carbon footprints of Indian food items[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010,139(1-2):66-73
- [5] Yan M, Cheng K, Luo T, Yan Y, Pan G, Rees R M. Carbon footprint of grain crop production in China-based on farm survey data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130-138
- [6] Cheng K, Yan M, Nayak D, Pan G X, Smith P, Zheng J F, Zheng J W. Carbon footprint of crop production in China: an analysis of National Statistics data [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015,153(3):422-431
- [7] 杨丽雯,张永清,张定一,王大勇,乔莎莎. 山西省小麦生产的现状、问题与对策分析[J]. *麦类作物学报*, 2010,30(6):1154-1159
- Yang L W, Zhang Y Q, Zhang D Y, Wang D Y, Qiao S S. Analysis on problems and strategies of wheat production in shanxi province[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010,30(6): 1154-1159 (in Chinese)
- [8] Zhao X, Liu S L, Pu C, Zhang X Q, Xue J F, Zhang R, Wang Y Q, Lal R, Zhang H L, Chen F. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2016,22(4):1372-1374
- [9] 王丙文,迟淑筠,田慎重,宁堂原,陈国庆,赵红香,李增嘉. 不同留茬高度秸秆还田冬小麦田甲烷吸收及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2013,29(5):170-178
- Wang B, Chi S, Tian S, Ning T, Chen G, Zhao H, Li Z.  $\text{CH}_4$  uptake and its affecting factors in winter wheat field under different stubble height of straw returning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (5):170-178 (in Chinese)
- [10] 刘全全,王俊,陈蓉蓉,刘文兆, Sainju U M. 黄土高原冬小麦田土壤  $\text{CH}_4$  通量对人工降水的短期相应[J]. *应用生态学报*, 2015,26(1):140-146
- Liu Q Q, Wang J, Chen R R, Liu W Z, Sainju U M. Short-term response of soil  $\text{CH}_4$  flux to simulated precipitation in a winter wheat field on the Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (1): 140-146 (in Chinese)
- [11] 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 [M]. 北京:中国统计出版社
- Price Department of National Development and Reform Commission. *The National Cost-Benefit Survey for Agricultural Product* [M]. Beijing: China Statistics Press (in

- Chinese)
- [12] 任庆亚, 褚彦朝, 褚清河, 吕凯. 我国主要作物区域配方肥配方及应用中存在的问题[J]. 山西农业科学, 2016, 44(2): 199-203  
Ren Q Y, Chu Y C, Chu Q H, Lv K. Problems about the formulation of fertilizer and its application in the main crop region of China[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(2): 199-203 (in Chinese)
- [13] 崔晓晨, 李安宁, 王国占, 王德成. 三大粮食作物农机作业成本及效益分析: 基于全国 26 个省的农机户问卷调查[J]. 农机化研究, 2011, (2): 15-18  
Cui X C, Li A N, Wang G Z, Wang D C. Research on machinery cost of grain-production in China: Based on a nationwide questionnaire survey[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, (2): 15-18 (in Chinese)
- [14] Gan Y T, Liang C, Campbell C A, Zentner R P, Lemke R L, Wang H, Yang C. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 175-184
- [15] 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: 兼析中国集约化农作碳效率[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 1-11  
Liu X, Xu W, Li Z, Chu Q, Yang X, 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 [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(6): 1-11 (in Chinese)
- [16] IPCC. 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [M]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006
- [17] Xue J F, Liu S L, Chen Z D, Chen F, Lal R, Tang H M, Zhang H L. Assessment of carbon sustainability under different tillage systems in a double rice cropping system in Southern China [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(9): 1581-1592
- [18] Lu F, Wang X, Han B, Ouyang Z, Duan X, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15: 281-305
- [19] 陈磊, 郝明德, 张少民, 樊虎玲. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 230-235  
Chen L, Hao M D, Zhang S M, Fan H L. Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2007, 13(2): 230-235 (in Chinese)
- [20] 樊军, 郝明德. 旱地农田土壤剖面硝态氮累计的原因初探[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 263-266  
Fan J, Hao M D. Nitrate accumulation in soil profile of dryland farmland [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2003, 22(3): 263-266 (in Chinese)
- [21] 农业部. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知 [DB/OL]. (2016-06-18) [http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318\\_4444765.htm](http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm)  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The action program of zero growth of chemical fertilizers use amount by 2020 and The Action Program of Zero growth of pesticides use amount by 2020 [DB/OL]. (2016-06-18) [http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318\\_4444765.htm](http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm)
- [22] 赵建波, 迟淑筠, 宁堂原, 李增嘉, 谷淑波, 袁立群, 吕美容, 田慎重. 保护性耕作条件下小麦田 N<sub>2</sub>O 排放及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 196-200  
Zhao J B, Chi S J, Ning T Y, Li Z J, Gu S B, Qiu L Q, Lv M R, Tian S Z. Study of N<sub>2</sub>O emission and its affecting factors in wheat fields of conservation tillage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 22(3): 35-36 (in Chinese)
- [23] 石建军, 张成荣. 运城市小麦宽窄行探墒沟播技术的推广成效及经验启示[J]. 农业技术与装备, 2016, (4): 35-36  
Shi J J, Zhang C R. Promotion effect and experience enlightenment of wheat wide and narrow row spacing explore moisture in the soil and furrow sowing technology [J]. *Agricultural Technology and Equipment*, 2016 (4): 35-36 (in Chinese)
- [24] West T, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems; methodology for full carbon cycle analyses [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 439-444
- [25] 李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 红壤丘陵双季稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2520-2525  
Li J J, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Estimation of net carbon balance and benefit of rice-rice cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2520-2525 (in Chinese)
- [26] Wang W, Guo L, Li Y, Su M, Lin Y, De Perthuis C, Moran D. Greenhouse gas intensity of three main crops and implications for low-carbon agriculture in China [J]. *Climatic Change*, 2015, 128: 57-70