

# 宁夏回族自治区平罗县主要农作物碳足迹研究

曾宪芳<sup>1</sup>, 赵世伟<sup>1,2</sup>, 李晓晓<sup>1</sup>, 李婷<sup>1</sup>, 刘京<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学  
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 农田碳足迹可以全面地反映农作物生产过程中各种因素引起的碳排放效应, 是指导农业生产节能减排的重要指标。为探明农作物生产的碳足迹, 基于宁夏回族自治区平罗县农田生产的实地调查数据, 利用碳足迹的基本理论和方法, 测算了该县农作物碳足迹。结果表明, 水稻、玉米和小麦的碳足迹分别为  $1\,487.56 \pm 164.59$ ,  $913.03 \pm 142.99$  和  $809.75 \pm 144.99$  kg Ce/(hm<sup>2</sup> · a); 碳成本分别为  $0.17 \pm 0.05$ ,  $0.08 \pm 0.02$  g 和  $0.12 \pm 0.03$  kg Ce/kg; 化肥的施用量是影响碳足迹的主要因素, 而水稻生产过程中灌溉水及育秧过程也是其碳足迹较高的主要原因。为了提高农田固碳减排增汇效益, 应压缩水稻种植面积, 扩大玉米和小麦种植, 同时, 建立节肥低碳高效的种植模式是实现平罗县农田节能减排的有效途径。

**关键词:** 平罗县; 农田; 碳足迹; 碳成本

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0061-05

中图分类号: P467, X511

## Main Crops Carbon Footprint in Pingluo County of the Ningxia Hui Autonomous Region

ZENG Xian-fang<sup>1</sup>, ZHAO Shi-wei<sup>1,2</sup>, LI Xiao-xiao<sup>1</sup>, LI Ting<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The carbon emission caused by various factors during the crop production process can be roundly evaluated using carbon footprint of farmland, which is an important indicator that can provide a guidance for energy saving and emission reduction in agricultural industry. In order to find out the carbon footprint of crop production, the carbon footprint of Pingluo County in Ningxia Hui Autonomous Region is calculated based on the investigated data of farmland production in the county by using basic theories and research approaches of carbon footprint. Results show that the carbon footprints of rice, corn and wheat are  $1\,487.56 \pm 164.59$ ,  $913.03 \pm 142.99$  and  $809.75 \pm 144.99$  kg Ce/(hm<sup>2</sup> · a) and the carbon costs,  $0.17 \pm 0.05$ ,  $0.08 \pm 0.02$  and  $0.12 \pm 0.03$  kg Ce/kg, respectively. The application rate of chemical fertilizer is a main influence factor for the carbon footprint. Additionally, irrigation water and seedling production are the key causes of high-carbon footprint during rice production. To improve the benefits of fixing carbon, reducing emissions and adding carbon sinks of farmland, rice planting area should be reduced and corn and wheat planting areas should be expanded. Meanwhile, the construction of fertilizer-saving, low-carbon and efficient agricultural cropping patterns is an effective way to realize energy saving and emission reduction of the farmlands in Pingluo County.

**Keywords:** Pingluo County; farmland; carbon footprint; carbon cost

碳足迹(carbon footprint, CF)是对某种活动引起的或某种产品生命周期内积累的直接或间接的 CO<sub>2</sub> 排放量的度量<sup>[1]</sup>。作为一种测量碳排放对全球

环境影响和压力程度的新方法,碳足迹成为近年来国外生态学研究的新的热点领域<sup>[2]</sup>。我国学者也在碳排放、碳足迹核算以及碳足迹影响等方面开展了研

收稿日期:2012-04-10

修回日期:2012-06-16

资助项目:中国科学院战略先导专项“中国农田固碳潜力与速率研究”(XDA05050500)

作者简介:曾宪芳(1987—),女(汉族),湖北省老河口市人,硕士研究生,主要从事植被恢复的土壤环境效应研究。E-mail:zxf2266@gmail.com。

通信作者:赵世伟(1962—),男(汉族),四川省荣县人,硕士生导师,研究员,主要从事植被与土壤固碳关系研究。E-mail:swzhao@iswc.ac.cn。

究<sup>[3]</sup>。目前,对碳足迹的研究主要涉及碳足迹的内涵及核算<sup>[4]</sup>、土地利用变化对碳足迹的影响、能源消费视角的产业碳足迹<sup>[5-6]</sup>等,而农业碳足迹的研究尚处在起步阶段,研究主要集中在区域农业碳足迹<sup>[7]</sup>、作物碳足迹<sup>[8]</sup>等方面。

国际科学界认为,全球变暖现象 90% 以上可能是来自于温室气体的排放,CO<sub>2</sub> 是最重要的温室气体,对温室效应的贡献达 50%<sup>[9-10]</sup>。随着农业对化石能源消费量的不断提升,引起 CO<sub>2</sub> 排放量的迅速增加,同时作物生长、土壤碳库的动态变化等也会产生碳排放。据 Bouwman 等<sup>[11]</sup>研究,农业活动是重要的温室气体排放源,大气中 20% 的 CO<sub>2</sub>, 70% 的 CH<sub>4</sub> 和 90% 的 N<sub>2</sub>O 来源于农业活动及其相关过程。1990—2005 年农业源温室气体排放增长了 14%, 平均每年相当于排放 4.9×10<sup>7</sup> t CO<sub>2</sub><sup>[12]</sup>。农田碳足迹能够系统地评价耕作、播种、施肥、灌溉和收获等农作物生产活动过程中,由于人为因素引起的直接和间接的碳排放总量,定量测算农作物生产活动对温室效应的影响<sup>[8,13]</sup>。农田碳足迹包括直接碳足迹和间接碳足迹:直接碳足迹是指在农业机械进行耕作、播种和收获等农业生产的过程中,柴油消耗直接的碳排放,同时也包括由于施用化肥而导致土壤增加的直接碳排放量;间接碳足迹是指在生产、运输、化肥、农药和种子等农业生产资料过程中,农业上游部门的电能产生的碳排放<sup>[14]</sup>。Nelson 等<sup>[15]</sup>测算了美国农业的碳足迹,国外学者分别对冬油菜、春燕麦和冬小麦等多种农作物从播种到收获整个田间生长期的碳足迹进行了研究<sup>[7]</sup>。国内农业碳足迹研究,梁龙等<sup>[16]</sup>估算了生产 1 t 小麦—玉米的碳成本。但迄今为止,国内西部地区以灌溉为主的农作物碳足迹的研究仍然不足。

本研究以宁夏平罗县为例,基于农户生产数据的实地调查,运用农业碳足迹基本理论,并结合生命周期法和投入—产出法<sup>[17]</sup>,对平罗县主要农作物碳足迹进行了研究,以期获得其主要作物生产的碳排放清单,分析不同作物碳足迹的差异及产生差异的原因,为作物种植的合理布局,建立低碳高效的农业生产及节能减排提供科学的依据。

## 1 研究区概况

平罗县位于宁夏银川平原北部,青铜峡引黄灌区下游,东滨黄河,西依贺兰山并与内蒙古阿拉善盟接壤,地处东经 105° 58′—106° 50′,北纬 38° 41′—39° 09′,是石嘴山市所辖唯一的建制县。该县属中温带干旱气候区,是典型的大陆性气候。年均温

9.1℃,极端最低温 -28.2℃,极端最高温 37.9℃,≥10℃ 年均积温 3 223.6℃。全年无霜期 152~170 d,年均降水量 189.9 mm,年均蒸发量 2 249.5 mm,是平均降水量的 11.8 倍。整个地势呈西高东低并由西南向东北倾斜,贺兰山景区最高海拔 3 475.9 m,贺兰山以下海拔 1 091~1 024 m,平原自然坡度 1/3 000~1/4 000,黄河年平均过境水量 3.15×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>。全县总面积 2 086.13 km<sup>2</sup>,耕地面积 5.20×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,宜农可垦荒地 2.50×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,西大滩有天然草地约 1.3×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。土壤类型主要有灰钙土、浅色草甸土、灌淤土、盐土、湖土、白僵土、新积土、沙丘沙地 9 类。其中灌淤土占土壤总面积的 39.25%,占耕地面积的 80%,是平罗县主要的农业土壤。种植制度为一年一熟,主要种植作物为水稻、玉米和小麦,3 种作物占播种面积的比例分别为 20.9%,43.4%和 33.2%。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

本研究数据来源于平罗县 76 户农户实地生产调查,农户样地的选择主要考虑土壤类型和农田土地利用,同时综合考虑该县地形地貌、种植模式、管理措施、农作物类型及产量水平,穿越主要作物种植区域,并结合 Geoway 软件,线路在主要耕作区分布均衡,样点在各类型单元中数目及在空间上分布大致均匀,单元布点数目按单元面积所占比例进行分配。水稻、玉米和小麦的调查地块数分别为 22,32 和 22 个,其面积分别为 19.8,19.2 和 15.4 hm<sup>2</sup>,调查内容包括播种量、肥料品种及施用量、农药用量、灌溉耗电量、农机投入消耗的柴油量、各种农作物的播种面积及产量等。

### 2.2 碳足迹计算方法

农田碳足迹边界为从农田翻耕开始到农作物收获移除田块结束。农田碳足迹的测算内容为直接碳足迹和间接碳足迹,计算公式:

$$CF = \sum_{i=1}^n CF_i \sum_{i=1}^n (m\alpha)$$

式中:CF——农田碳足迹; $n$ ——农作物生产过程中消耗了  $n$  种能源(柴油和电能等)或生产资料(种子、化肥和农药等); $CF_i$ ——第  $i$  种能源或农资的碳足迹; $m$ ——消耗第  $i$  种能源或农资的量; $\alpha$ ——第  $i$  种能源或农资的碳排放参数。碳足迹的单位是 kg Ce/(hm<sup>2</sup>·a)。

农作物碳成本是农作物碳足迹与农作物单位产量的比值,单位为 kg Ce/kg;碳效率是农作物单位产量与农作物碳足迹的比值,单位为 kg/kg Ce。两者互为倒数关系。

### 2.3 碳排放参数选择

由于农田碳足迹研究的发展尚处在初级阶段,国内许多碳排放参数还不完整。因此,本研究碳排放参数参考前人研究的结果,首选国内的参数,其次是国外的参数。各种农田物质的碳排放参数见表 1,用单位数量排放的碳当量来表示(carbon equivalent, Ce)<sup>[12]</sup>。

表 1 农田物质的碳排放参数

项目	碳排放参数	参考文献
氮肥(N)	1.74 kg Ce/kg	文献[17]
磷肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.20 kg Ce/kg	文献[12]
钾肥(K <sub>2</sub> O)	0.15 kg Ce/kg	文献[12]
除草剂	6.30 kg Ce/kg	文献[12]
杀虫剂	5.10 kg Ce/kg	文献[12]
灭菌剂	3.90 kg Ce/kg	文献[12]
柴油	0.94 kg Ce/kg	文献[12]
电能	0.25 kg Ce/kWh	文献[13, 17]
水稻种子	0.86 kg Ce/kg	文献[18]
玉米种子	1.05 kg Ce/kg	文献[18]
小麦种子	0.11 kg Ce/kg	文献[19]

## 3 结果与分析

### 3.1 农作物碳足迹清单

在整个作物生产过程中,农田物质投入主要包括:化肥(氮肥、磷肥和钾肥)、农药(除草剂、杀虫剂和灭菌剂)、机械(柴油)、灌溉(电能)和种子 5 部分,各部分碳足迹各不相同,详见图 1 和表 2。水稻、玉米和小麦 3 种作物因施用化肥造成的碳足迹都是最大的,其中,玉米化肥碳足迹最大,水稻次之,小麦最小,施用农药造成的碳足迹最小。

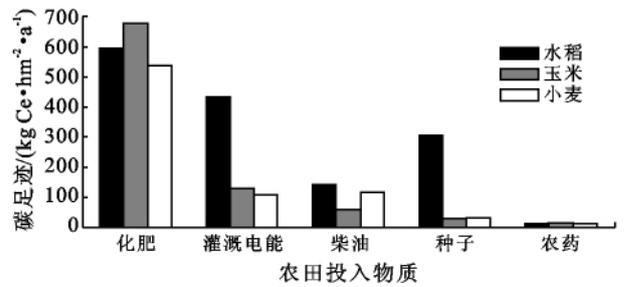


图 1 农田碳足迹构成

肥料施用为氮肥、磷肥和钾肥,基本无有机肥投入,故其肥料碳足迹由氮肥、磷肥和钾肥组成,3 种肥料的碳足迹中氮肥最高,磷肥次之,钾肥最低。水稻氮肥碳足迹占化肥碳足迹的 96.74%,磷肥占 2.51%,钾肥占 0.75%;玉米氮肥碳足迹占化肥碳足迹的 96.29%,磷肥占 2.88%,钾肥占 0.83%;小麦氮肥碳足迹占化肥碳足迹的 96.80%,磷肥占 2.79%,钾肥占 0.41%。不仅因为氮肥的碳排放系数是化肥中最大的,更表明这 3 种作物对氮肥的需求量也很大。

水稻灌溉电能碳足迹为 432.69 ± 23.08 kg Ce/(hm<sup>2</sup> · a),玉米灌溉电能碳足迹为 129.81 ± 25.96 kg Ce/(hm<sup>2</sup> · a),小麦灌溉电能碳足迹为 108.17 ± 21.63 kg Ce/(hm<sup>2</sup> · a)。其中,水稻灌溉耗电能碳足迹是玉米或小麦的 3 倍多,这是由于水稻是水田作物,其灌溉水量比较大,成为水稻碳足迹的第 2 高分组。

柴油碳足迹中,玉米与水稻或小麦相比较小,这是因为水稻和小麦收获时是采用机械收割,而玉米则是人工收割所致。

农药碳足迹由除草剂、杀虫剂和灭菌剂组成,其中,小麦农药碳足迹中除草剂碳足迹最大,水稻和玉米农药碳足迹中,除草剂、杀虫剂和灭菌剂碳足迹都较低。尽管农药的碳排放系数很大,但 3 种作物的农药的施用量很少,故农药碳足迹均较低。

表 2 农作物主要物质投入的碳足迹排放清单

项目	水稻碳足迹		玉米碳足迹		小麦碳足迹		
	投入量	碳足迹	投入量	碳足迹	投入量	碳足迹	
化肥	氮肥(N)	330.45 ± 59.70	574.98 ± 103.88	375.15 ± 56.25	652.76 ± 97.88	299.25 ± 59.40	520.70 ± 103.36
	磷肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	74.55 ± 14.25	14.91 ± 2.85	97.65 ± 17.40	19.53 ± 3.48	75.15 ± 15.15	15.03 ± 3.03
	钾肥(K <sub>2</sub> O)	29.89 ± 5.55	4.48 ± 0.83	37.65 ± 7.35	5.65 ± 1.10	14.85 ± 2.85	2.23 ± 0.43
农药	除草剂	0.90 ± 0.18	5.67 ± 1.13	0.75 ± 0.15	4.73 ± 0.95	1.13 ± 0.23	7.09 ± 1.42
	杀虫剂	0.83 ± 0.17	4.21 ± 0.84	0.98 ± 0.20	4.97 ± 0.99	0.45 ± 0.09	2.30 ± 0.46
	灭菌剂	1.05 ± 0.21	4.10 ± 0.82	1.28 ± 0.23	4.97 ± 0.90	0.75 ± 0.15	2.93 ± 0.59
机械	柴油	151.07 ± 13.99	142.01 ± 13.15	62.87 ± 5.67	59.10 ± 5.33	125.87 ± 12.47	118.32 ± 11.73
	灌溉 电能	1 730.77 ± 95.19	432.69 ± 23.80	519.23 ± 103.85	129.81 ± 25.96	432.69 ± 86.54	108.17 ± 21.63
种子	354.09 ± 20.10	304.52 ± 13.15	30.01 ± 6.01	31.51 ± 6.31	299.99 ± 21.40	33.00 ± 2.35	
合计		1 487.56 ± 164.59		912.82 ± 142.90		809.75 ± 144.99	

注:投入量的单位是 kg/(hm<sup>2</sup> · a),灌溉电能投入量项中的单位是 kWh/(hm<sup>2</sup> · a),碳足迹的单位是 kg Ce/(hm<sup>2</sup> · a)。

### 3.2 农田碳足迹的影响因素分析

农田碳足迹受多种因素的影响,影响水稻、玉米和小麦 3 种农作物碳足迹的因素中,水稻的化肥碳足迹为  $594.37 \pm 107.56 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,占总碳足迹的 40%,灌溉电能碳足迹为  $432.69 \pm 23.08 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,占总碳足迹的 29%,种子育苗的碳足迹为  $304.52 \pm 17.29 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,占总碳足迹的 20%,三者是主要的影响因素。

玉米的化肥碳足迹为  $677.94 \pm 142.90 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,占总碳足迹的 75%,是最主要的影响因素,其次是灌溉电能碳足迹为  $129.81 \pm 25.96 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,占总碳足迹的 14%。

小麦的化肥碳足迹为  $537.95 \pm 144.99 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,占总碳足迹的 66%,是最主要的影响因素,其次是柴油碳足迹,占总碳足迹的 15%,灌溉电能碳足迹,占总碳足迹的 13%。

3 种作物的化肥碳足迹均为最大,这是由于当地化肥的施用量很大,尤其是氮肥;该县位于西北干旱区,地处银川平原引黄灌区,灌溉用水量大,所以灌溉水碳足迹占总碳足迹比例较高。

### 3.3 主要农作物碳足迹的差异

碳成本是单位粮食产量的碳足迹,碳效率是单位碳足迹的粮食产量。水稻、玉米和小麦 3 种农作物的产量、碳足迹、碳成本和碳效率如表 3 所示。

表 3 3 种作物碳足迹、碳成本及碳效率比较

作物	产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	碳足迹/ $(\text{kg Ce} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	碳成本/ $(\text{kg Ce} \cdot \text{kg}^{-1})$	碳效率/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ce})$
水稻	$8\ 839.29 \pm 293.10$	$1\ 487.56 \pm 164.59$	$0.17 \pm 0.05$	$5.94 \pm 0.05$
玉米	$11\ 017.24 \pm 361.65$	$913.03 \pm 142.90$	$0.08 \pm 0.02$	$12.07 \pm 0.02$
小麦	$6\ 875.00 \pm 226.95$	$809.75 \pm 144.99$	$0.12 \pm 0.03$	$8.49 \pm 0.03$

3 种作物的碳足迹、碳成本和碳效率差异很大。水稻的碳足迹及碳成本在 3 种作物中均最高,这是由于水稻的灌溉水量比玉米和小麦大很多,耗电能的碳足迹就比较大;另外,水稻种植是采用先育苗,然后机械插秧播种,而玉米和小麦都是直接播种,水稻育苗过程中产生的碳足迹比直播产生的碳足迹要大很多。水稻的碳成本最高,说明单位产量的水稻的碳足迹最大;水稻的碳效率最低,说明单位重量的碳排放的水稻产出最低。玉米的碳成本最低、碳效率最高,说明种植玉米的碳排放量少,是一种低碳作物。

## 4 结论

### 4.1 化肥是影响农田碳足迹最关键的因素

农田碳足迹构成中,化肥尤其是氮肥造成的碳足迹所占的比例最大,这与很多学者的研究结果是相一致的<sup>[8]</sup>。化肥本身在生产和运输过程中需要消耗大量的化石燃料,由于农民依靠化肥增产,使用化肥的数量比较大,从而造成化肥的碳足迹最大。因此,适当减少化肥用量、提高化肥的利用效率是降低平罗县农田碳足迹的关键。

### 4.2 农作物种类对农业碳足迹的影响

本研究结果表明平罗县的水稻、玉米和小麦的碳足迹差异显著,三者碳足迹分别为  $1\ 487.56 \pm 164.59$ ,  $913.03 \pm 142.90$  和  $809.75 \pm 144.99 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;碳成本分别为  $0.17 \pm 0.05$ ,  $0.08 \pm 0.02$  和  $0.12 \pm 0.03 \text{ kg Ce}/\text{kg}$ 。其中,水稻的碳成本都最低,碳效率最低;而玉米的碳成本最低,碳效率最高。因此,要使农业

生产节能减排,应该把水稻作为减排重点对象,可以适当减少水稻的种植面积,大量种植玉米作物。

### 4.3 平罗县农业节能减排潜力大

农田碳足迹受农作物种类、土壤类型、耕作方式及社会经济等多方面因素的影响,并且各因素彼此之间有相互作用,因此,不同区域、不同种植模式,农业碳足迹差异显著;相同区域、不同种植模式以及相同种植模式、不同区域也会存在差异。Nelson 等<sup>[15]</sup>计算出美国农业的碳足迹为  $91 \sim 365 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;王微等<sup>[20]</sup>在苏格兰研究得出冬小麦的碳足迹为  $764.9 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;Mondelaers<sup>[7]</sup>等计算出小麦的碳成本为  $0.08 \text{ kg Ce}/\text{kg}$ ;梁龙等<sup>[16]</sup>测算出冬小麦—夏玉米的碳成本为  $0.15 \text{ kg Ce}/\text{kg}$ ;徐小明<sup>[20]</sup>测算了吉林西部水田水稻碳足迹为  $1\ 330.26 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;王明新等<sup>[21]</sup>测算了华北平原冬小麦碳足迹为  $667.02 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;史磊刚等<sup>[22]</sup>测算了华北平原夏玉米碳足迹为  $636.06 \text{ kg Ce}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究的农田碳足迹普遍高于国内外的研究结果,主要是由于本研究区域是一年一熟的种植模式,在化肥、灌溉水和机械等投入量很大;农户在农业生产过程中,对化肥、灌溉水和农药等农资利用效率低;农户播种量偏大和国产农机能耗高也是造成碳足迹高的原因。本文研究结果表明平罗县农田碳足迹相对较高,因此具有巨大的减排潜力。

本文利用碳足迹的基本理论及方法初步测算了平罗县的主要农作物的碳足迹,并列出了种植水稻、玉米和小麦 3 种农作物过程中,在施肥、灌溉和农机

投入等方面的碳足迹清单,以及生产3种农作物的碳成本。综上所述,减少化肥投入量、提高化肥利用率、压缩水稻种植面积、扩大玉米和小麦种植、优化农作物种植布局、建立节肥低碳高效的种植模式是降低农业碳足迹、构建低碳高效农作系统和实现农业节能减排的科学途径。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Weidema B P, Thrane M, Christensen P, et al. Carbon footprint: A catalyst for life cycle assessment[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(1): 3-6.
- [2] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis B-1012-2008[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [3] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. *地理学报*, 2010, 65(09): 1048-1057.
- [4] 计军平,马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. *生态经济*, 2011(4): 76-80.
- [5] 邓舟,耿欣,张丽颖,等. 沼气利用方式的碳足迹分析[J]. *环境卫生工程*, 2010, 18(5): 23-26.
- [6] 聂祚仁. 碳足迹与节能减排[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(2): 60-63.
- [7] Mondelaers K, Aertsens J, Van 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.
- [8] Hillier J, Hawes C, Squire G, et al. The carbon footprints of food crop production[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7(2): 107-118.
- [9] 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(05): 528-534.
- [10] 张志强,曲建升,曾静静. 温室气体排放评价指标及其定量分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(7): 693-702.
- [11] Bouwman A F, Centre I S R A, et al. Soils and the greenhouse effect: The present status and future trends concerning the effect of soils and their cover on the fluxes of greenhouse gasses, the surface energy balance, and the water balance. *Proceedings of the International Conference Soils and the Greenhouse Effect*[M]. University of California: Wiley, 1990.
- [12] 罗良国,近藤始彦,伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田  $N_2O$  和  $CH_4$  排放特征及其环境影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3200-3206.
- [13] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [14] 夏德建,任玉珑,史乐峰. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J]. *统计研究*, 2010, 27(8): 82-89.
- [15] Nelson R G, Hellwinckel C M, Brandt C C, et al. Energy use and carbon dioxide emissions from cropland production in the United States, 1990—2004[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2): 418-425.
- [16] 梁龙,吴文良,孟凡乔. 华北集约高产农田温室气体净排放研究初探[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(3): 47-50.
- [17] 逯非,王效科,韩冰,等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239-2250.
- [18] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [19] 徐小明. 吉林西部水田土壤碳库时空模拟及水稻生产的碳足迹研究[D]. 长春:吉林大学, 2011.
- [20] 王微,林剑艺,崔胜辉,等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(7): 71-78.
- [21] 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.
- [22] 史磊刚,陈阜,孔凡磊,等. 华北平原科小麦—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.