中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

# 2004-2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化

陈中督，徐春春，纪龙，方福平

引用本文:
陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 2004–2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1105–1114.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181025

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

不同耕作措施对雨养冬小麦碳足迹的影响

Effect of tillage practice on carbon footprint of rainfed winter wheat

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 839–847 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160981

不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响

Effects of different winter planting patterns on carbon management index of paddy field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1163–1171 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180995

生态文明视角下四川省资源环境压力的时空变化特征

Spatio-temporal changes in resource environment pressure due to eco-civilization in Sichuan Province, China

中国生态农业学报. 2016(1): 121–130 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150849

基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价

Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint

中国生态农业学报. 2015(5): 650–658 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141312

农产品水足迹评价研究进展

A review of water footprint assessment for agricultural products

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1071–1080 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170027

**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.181025**

陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平. 2004—2015 年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1105−1114
CHEN Z D, XU C C, JI L, FANG F P. Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004−2015[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1105−1114

# 2004—2015 年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化*

陈中督, 徐春春, 纪 龙, 方福平**

(中国水稻研究所 杭州 311300)

**摘 要:** 长江流域是我国油菜生产的主产区, 系统分析油菜生产碳足迹对促进该地区农业低碳化生产与缓解气候变化的影响具有重要的意义。本文基于油菜播种面积、产量及生产投入等统计资料数据, 运用农业碳足迹理论和生命周期评价法定量分析 2004—2015 年长江中下游地区油菜生产碳足迹时空变化动态及其构成。研究结果表明, 油菜生产的碳足迹呈先下降后上升的趋势, 最低点出现在 2013 年, 为 2 177.6 kg·hm$^{-2}$; 肥料和人工是长江流域油菜生产主要的温室气体排放源, 分别占总碳足迹的 50.9%~53.1%和 5.8%~8.4%。不同省份间油菜生产碳足迹具有明显的差异, 江苏省和浙江省的单位面积碳足迹($CF_a$)和单位产量碳足迹($CF_y$)均较高, 而湖南和江西两省的 $CF_a$ 和 $CF_y$ 均较低。长江中下游地区油菜高产省 $CF_a$、$CF_y$ 显著高于低产省, 其中, 氮肥、磷肥和复合肥产生的碳足迹值均显著高于低产省份, 分别提高 81.7%、81.2%和 112.8%($P$<0.05)。研究表明发展油菜生产节肥技术, 加强机械一体化技术以减少人工成本是未来长江流域油菜应对气候变化发展低碳农业的重要举措。结果部分尽量详细些

**关键词:** 碳足迹; 油菜; 全球变暖; 生命周期; 时空变化; 减排

**中图分类号:** S181.6; S511.047

**文章编号:** 2096-6237(2019)07-1105-10 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

# Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004–2015*

CHEN Zhongdu, XU Chunchun, JI Long, FANG Fuping**

(China National Rice Research Institute, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** The Yangtze River is one of the major oilseed rape producing areas in China. It is therefore of great significance to analyze the carbon footprint of oilseed rape, for developing low-carbon agriculture and for climate change mitigation in this region. Based on the statistical data of sown area, crop yield, and farmland investment of oilseed rape production along the Yangtze River, the spatiotemporal dynamic change in carbon footprint and its composition of oilseed rape during 2004–2015 in the middle and lower reaches of Yangtze River was estimated using the theory of carbon footprint and life cycle assessment

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300210)和浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ18G030013)资助

** 通信作者: 方福平, 主要研究方向为稻田生态及产业经济研究。E-mail: fangfuping@caas.cn
陈中督, 主要从事低碳农作制研究。E-mail: chenzhongdu@caas.cn

收稿日期: 2018-11-26 接受日期: 2019-02-18

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300210) and the Natural Science Foundation of Zhejiang (LQ18G030013).

** Corresponding author, E-mail: fangfuping@caas.cn

Received Nov. 26, 2018; accepted Feb. 18, 2019

method in the agricultural sector. The results showed the carbon footprint of oilseed rape at first decreased and then increased, the lowest point being 2 177.6 kg·hm$^{-2}$ in 2013. The main components of the carbon footprint for oilseed rape production were fertilizer (50.9%–53.1%) and labor (5.8%–8.4%). Obvious differences were found among main agricultural provinces in the study area. The carbon footprint per unit area ($CF_a$) and per unit yield ($CF_y$) of Jiangsu and Zhejiang Provinces were higher, while that of Hunan and Jiangxi Provinces were lower. What was more, the $CF_a$ and $CF_y$ in high yield regions were significantly higher than that in low yield regions. Among them, the carbon footprint of nitrogenous fertilizer, phosphate fertilizer, and compound fertilizer was significantly higher than that for low-yielding provinces, which increased by 81.7%, 81.2%, and 112.8%, respectively, ($P < 0.05$). The results suggest that improving crop management practices that limit fertilizer consumption and strengthen mechanical integration technology to reduce labor costs could help mitigate greenhouse gas emissions from oilseed rape production along the middle and lower reaches of Yangtze River.

**Keywords:** Carbon footprint; Oilseed rape; Global warming; Life cycle assessment; Spatio-temporal variation; Greenhouse gas mitigation

目前, 人为活动所引起的氧化亚氮($N_2O$)、甲烷($CH_4$)和二氧化碳($CO_2$)等温室气体排放含量逐步升高, 从而导致全球气候发生变化, 引起了国内外学者的高度关注[1-2]。农业是人为温室气体(主要是$N_2O$、$CH_4$、$CO_2$)排放的主要来源, 估计占全球排放量的 10%~12%[3-4], 其中农产品的生产运输过程中所产生的间接排放也将导致全球温室气体排放进一步增加[5-6]。在这种背景下, 以高效率、低能耗、低排放和高碳汇为特征的低碳农业成为一种全新的现代农业发展模式而备受关注[7]。中国作为世界上一个重要的农业大国, 作物生产对全球碳排放的影响不可忽视[8]。因此, 减少农业温室气体排放和促进农业低碳经济在控制温室气体排放总量方面显得尤为重要。

碳足迹定义为衡量一项活动直接或间接造成的温室气体排放总量, 或者是在产品生命阶段积累的温室气体排放总量[9-10]。当前, 碳足迹理论已经广泛运用到农业领域中。陈中督[11]基于南方双季稻区水稻(*Oryza.sativa* L.)生产统计数据表明, 南方稻区各个省份早晚稻生产碳足迹大部分表现为增加趋势, 早稻生产碳足迹较晚稻大。王占彪等[2]对河北省棉花(*Gossypium* spp.)生产碳足迹大小及构成进行了计算分析, 指出应该逐步扩大棉花种植面积, 并发展棉花节肥节水免覆膜技术。米松华等[12]基于浙江省投入产出表, 结合投入产出和生命周期评价法, 详细阐明了浙江省农业碳排放特征及其组成成分。所有这些研究表明, 农业碳足迹理论结合生命周期评价方法, 可用于评估农作物在气候变化下的生态影响, 为绿色低碳的粮食作物系统评价提供了强有力的数据支撑和理论依据。

油菜(*Brassica napus* L.)是我国食用油和蛋白质饲料的主要来源, 在我国食用油市场中具有十分重要的地位[13-14]。目前, 油菜集中生长区主要分布在我国长江中下游流域的湖北、湖南、江西、安徽、江苏及浙江 6 个省份, 年均种植面积为 600 万 hm$^2$ 左右, 达全国种植面积的 80%以上[15]。然而, 随着农户对于产量需求的不断增加, 其农资投入逐步增加, 尤其是氮肥的施用, 多地出现过量施氮以及偏施氮肥的现象[16], 从而不可避免地带来温室气体排放量的增加。协调好作物持续高产和生态环境保护之间的矛盾, 一直是备受关注的焦点[17-18]。目前, 我国经济作物的碳足迹研究较少, 研究长江流域油菜生产碳足迹, 并分析各组分碳足迹贡献率, 将会丰富目前我国经济作物生产碳足迹研究, 对于我国低碳可持续农业的发展有着重要意义。本研究基于调研数据, 利用农业碳足迹理论及生命周期评价法, 定量分析了长江流域油菜生产碳足迹时空动态变化, 并对其影响因素进行解析, 并探讨了长江流域油菜生产低碳策略与潜力, 为实现我国低碳农业提供理论支撑与科学依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本研究立足于长江中下游流域江苏、浙江、上海、安徽、湖南、湖北、江西 7 个油菜生产省份, 基本覆盖了我国长江中下游地区油菜生产的主要区域。油菜生产中各项投入与产出的数据主要来源于《2004—2015 年全国农产品成本收益资料汇编》和其他相关统计报表(中国农村统计年鉴、中国统计局国家数据网等), 其中数据主要包括单位面积油菜的产量、柴油使用量、肥料施用量、种子用量以及劳动者用工等。柴油使用费用通过公式[柴油费用=(机械作业费+排灌费–水费)×21%+燃料动力费[11]]计算得出, 每年柴油单价数据来源于我国油价网数据库(http://youjia. chemcp.com/)。

### 1.2 研究边界

本研究的系统边界为油菜季生育期内温室气体

排放, 主要包括油菜生产所需要的农资投入品(种子、肥料、农膜、农药等)生产、运输和施用产生的温室气体排放, 农事操作(耕作、灌溉、收获等)过程中能源消耗产生的温室气体排放, 人工耗能产生的温室气体排放, 以及油菜生长发育过程中田间直接温室气体排放, 主要包括 $CH_4$、$N_2O$ 和 $CO_2$ 等, 由于作物光合作用所固定的 $CO_2$ 要大于呼吸 $CO_2$, 在生育期内的 $CO_2$ 净排放通量为负值, 因此, $CO_2$ 一般不列入温室气体排放清单中予以计算[19]。另外, 油菜属于旱地作物, $CH_4$ 排放量可忽略不计, 本研究中不予以计算(图 2)。

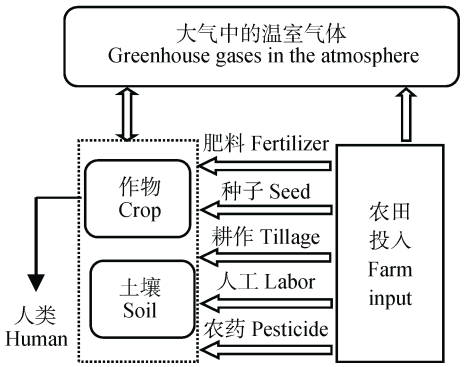


**图 1**　油菜生产的碳足迹计算边界

Fig. 1　System boundary for calculating greenhouse gases emissions of oilseed rape production

### 1.3　计算方法

碳足迹计算方法相关参数均来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[20]。油菜生产农业投入碳足迹计算公式为:

$$CF_a = \sum_{i=1}^{n} (\partial m)_i \quad (1)$$

式中: $CF_a$ 为油菜生产的农资投入单位面积碳足迹[$kg(CO_2\text{-}eq)\cdot hm^{-2}$]; $n$ 表示该油菜生产系统从播种到收获整个过程消耗的农业生产资料种类和农事操作(化肥、农药、柴油等); $\partial$ 表示某种农资的消耗量(kg); $m$ 表示某种农资的温室气体排放参数, 本研究排放参数主要源于中国生命周期数据库(CLCD)和 Ecoinvent 2.2 数据库(表 1)。

旱地直接和间接的 $N_2O$ 排放主要由施用氮肥所引起, 因此 $N_2O$ 排放的计算公式为:

$$CF_{N_2O} = DCF_{N_2O} + GCF_{N_2O} + LCF_{N_2O} \quad (2)$$

$$DCF_{N_2O} = N \times F_1 \times 44/28 \times 298 \quad (3)$$

$$GCF_{N_2O} = N \times F_G \times F_2 \times 44/28 \times 298 \quad (4)$$

$$LCF_{N_2O} = N \times F_L \times F_3 \times 44/28 \times 298 \quad (5)$$

式中: $CF_{N_2O}$ 为 $N_2O$ 排放引起的 $CO_2$ 排放当量; $DCF_{N_2O}$ 为氮肥引起的田间 $N_2O$ 直接排放; $GCF_{N_2O}$ 是由 $NH_3$ 和 $NH_x$ 形式挥发到大气后氮沉降造成的间接 $N_2O$ 排放; $LCF_{N_2O}$ 为通过淋失和径流损失的氮素造成的间接 $N_2O$ 排放; $F_1$、$F_2$、$F_3$ 分别为氮肥投入引起的 $N_2O$ 直接排放的排放因子、氮沉降造成的间接 $N_2O$ 排放因子以及淋失和径流损失的氮素造成的间接 $N_2O$ 排放因子, 系数分别为 0.01、0.01 和 0.007 5; $F_G$ 和 $F_L$ 分别为以 $NH_3$ 和 $NH_x$ 形式挥发的化肥氮比例(0.1 $kg\cdot kg^{-1}$)和土壤中淋失和径流损失的氮比例(0.3 $kg\cdot kg^{-1}$); 44/28 为 $N_2O$ 与 $N_2O$-N 分子量之比; 298 为在 100 年尺度上将 $N_2O$ 转化为 $CO_2$ 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。

**表 1**　油菜生产中各农业投入资料的温室气体排放系数

Table 1　Greenhouse gases emissions coefficients of different agricultural materials for oilseed production

| 项目 Item | 系数 Coefficient | 来源 Sources |
|---|---|---|
| 柴油 Diesel | 0.89 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | CLCD0.7 |
| 柴油燃烧 Diesel combustion | 4.1 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | CLCD0.7 |
| 氮肥 N fertilizer | 1.53 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | CLCD0.7 |
| 磷肥 P fertilizer | 1.63 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | CLCD0.7 |
| 钾肥 K fertilizer | 0.65 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | CLCD0.7 |
| 复合肥 Compound fertilizer | 1.77 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | CLCD0.7 |
| 人工 Labor | 0.86 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot d^{-1}\cdot person^{-1}$ | 刘巽浩等[21] LIU, et al[21] |
| 杀虫剂 Insecticides | 16.61 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | Ecoinvent2.2 |
| 除草剂 Herbicides | 10.15 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | Ecoinvent2.2 |
| 杀菌剂 Fungicides | 10.57 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | Ecoinvent2.2 |
| 油菜种子 Rice seed | 0.83 $kg(CO_2\text{-}eq)\cdot kg^{-1}$ | Gan, et al[22] |

作物生产的单位面积碳足迹($CF_a$)、单位产量碳足迹($CF_y$)计算公式分别为:

$$CF_a = CF_i + CF_{N_2O} \quad (6)$$

$$CF_y = CF/Y \quad (7)$$

式中: $Y$ 指作物产量。

### 1.4　数据处理与分析

利用 Microsoft excel 2011 和 SPSS 17.0 软件对数据进行处理和统计分析, 采用 Microsoft excel 2011 和 Sigmaplot 12 制作图表。

## 2　结果与分析

### 2.1　长江流域油菜生产碳足迹总体变化趋势

从表 2 可以看出, 肥料、人工和 $N_2O$ 排放是长江流域油菜生产主要的温室气体排放源, 分别占单位面积碳足迹的 50.9%~53.1%、5.8%~8.4%和 34.6%~36.5%。其中, 化肥投入所产生的碳足迹呈逐

年下降的趋势, 年均降低幅度为 1.3%。油菜化肥主要由氮肥、磷肥、钾肥和复混肥 4 种组成, 分别占化肥碳足迹的 39.3%~48.7%、21.2%~39.5%、0.1%~0.6%和 11.3%~38.5%; 其中氮肥、磷肥、钾肥呈逐年下降的趋势, 而复混肥呈逐年上升的趋势, 增加的碳足迹值被氮肥、磷肥、钾肥连年下降的碳足迹所抵消。人工碳足迹表现为 2004—2008 年保持相对稳定, 维持在 198.1 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$; 2008—2011 年迅速下降, 降低幅度为 27.1%; 2011—2015 年呈缓慢下降的趋势。

**表 2 2004—2015 年长江中下游流域油菜生产单位面积碳足迹组成**

Table 2 Composition of carbon footprint of oilseed rape production of the middle and lower reaches of Yangtze River from 2004 to 2015

| 项目 Item | | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 农田投入 Farm input [kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$] | 氮肥 N fertilizer | 714.4 | 693.7 | 577.8 | 573.5 | 589.2 | 572.9 | 554.1 | 526.0 | 525.3 | 470.8 | 484.9 | 484.4 |
| | 磷肥 P fertilizer | 579.7 | 612.5 | 417.2 | 474.0 | 357.7 | 358.8 | 330.3 | 324.8 | 285.3 | 237.5 | 261.7 | 269.4 |
| | 钾肥 K fertilizer | 8.1 | 6.6 | 4.4 | 3.8 | 1.8 | 3.2 | 3.6 | 1.8 | 2.6 | 2.7 | 1.7 | 3.6 |
| | 复合肥 Compound fertilizer | 165.3 | 245.8 | 243.7 | 273.8 | 336.5 | 326.8 | 371.9 | 355.4 | 364.9 | 409.3 | 455.8 | 474.7 |
| | 种子 Seed | 2.7 | 4.7 | 5.0 | 4.3 | 3.5 | 3.5 | 3.3 | 3.3 | 3.6 | 3.0 | 3.3 | 3.1 |
| | 人工 Labor | 192.5 | 187.2 | 203.5 | 202.3 | 205.1 | 197.1 | 166.7 | 149.5 | 147.1 | 147.4 | 139.1 | 136.1 |
| | 除草剂 Herbicide | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| | 杀虫剂 Insecticide | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| | 杀菌剂 Fungicide | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 | 73.7 |
| | 柴油 Diesel | 27.3 | 27.5 | 22.0 | 31.1 | 33.7 | 38.7 | 42.3 | 39.5 | 52.3 | 56.8 | 73.8 | 91.6 |
| $N_2O$ 排放量 $N_2O$ emission (kg·$hm^{-2}$) | | 998.3 | 986.7 | 865.4 | 873.9 | 923.5 | 886.9 | 874.2 | 826.8 | 827.4 | 773.9 | 804.9 | 813.2 |
| 单位面积碳足迹($CF_a$) Carbon footprint per unit area [kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$] | | 2 764.3 | 2 840.7 | 2 415.1 | 2 512.6 | 2 527.1 | 2 463.9 | 2 422.3 | 2 303.1 | 2 284.4 | 2 177.6 | 2 301.3 | 2 352.2 |
| 产量 Yield (kg·$hm^{-2}$) | | 2 068.1 | 1 941.0 | 1 843.5 | 2 086.5 | 2 030.6 | 2 047.3 | 1 803.7 | 1 861.3 | 1 909.7 | 2 133.0 | 1 989.2 | 2 154.9 |
| 单位产量碳足迹($CF_y$) Carbon footprint per unit yield [kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$] | | 1.34 | 1.46 | 1.31 | 1.20 | 1.24 | 1.20 | 1.34 | 1.24 | 1.20 | 1.02 | 1.16 | 1.09 |

土壤 $N_2O$ 随氮肥施用量的降低而呈逐年降低的趋势, 年降低率约为 1.5%。农药施用产生的碳足迹占比较小, 约为 2.7%~3.5%, 其中贡献率表现为杀菌剂>除草剂≈杀虫剂。耕作及收获等农事操作所产生的柴油碳足迹较小, 只占 0.9%~3.9%, 随着年份的增加呈逐年上升的趋势, 增加幅度为 19.6%。油菜种子加工及运输所产生的温室气体排放总体呈逐年下降的趋势(除 2004 年外), 2005—2015 年年均降低幅度为 3.1%, 由其所造成的温室气体排放量微乎其微, 贡献率不足 0.2%。2004—2015 年油菜产量呈现先降低后增加的趋势, 最低值出现在 2010 年, 为 1 803.7 kg·$hm^{-2}$。从图 2 可以看出, 2004—2015 年长江中下游流域油菜生产单位面积碳足迹呈现先下降后上升的趋势, 2013 年出现最低值, 为 2 177.6 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 从 2004 年的 2 764.3 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$ 下降到 2013 年的 2 177.6 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 年均降低幅度为 2.4%($R^2$=0.803 3, $P$<0.01); 之后呈升高趋势, 从 2013 年的 2 177.6 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$ 上升到 2015 年的 2 352.2 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 年均增加幅度为 4.0%($R^2$=0.945 2, $P$<0.01)。油菜生产单位产量碳足迹呈现出逐年下降的趋势, 年均降低幅度为 1.6%($R^2$=0.614 4, $P$<0.01)。

**2.2** 长江流域不同时间段油菜生产碳足迹影响因素

依据油菜生产系统的碳足迹组分的绝对值, 选取氮肥、磷肥、钾肥、复混肥、种子、人工、除草剂、杀虫剂、除菌剂和柴油 10 个农资投入实际量, 分别对长江流域油菜生产系统在快速下降期(2004—2013 年)、快速上升期(2013—2015 年)以及整个时期的碳足迹进行逐步回归分析(表 2)。由表 3 可知, 2004—2013 年, 油菜生产系统碳足迹表现出逐年下降的趋势, 主要氮肥实际投入量($X_1$)的影响表现为正相关, 决定系数为 0.975, 通过 1%的显著水平, 可

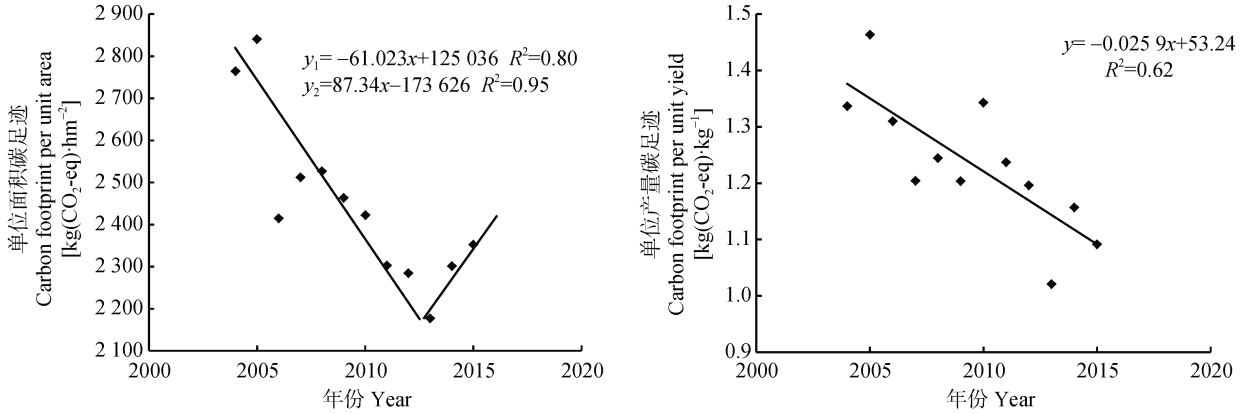


**图 2　2004—2015 年长江中下游流域油菜生产单位面积碳足迹和单位产量碳足迹变化情况**

Fig. 2　Range of carbon footprint per unit area and carbon footprint per unit yield of oilseed rape production of the middle and lower reaches of Yangtze River from 2004 to 2015

**表 3　长江中下游流域不同时期油菜生产碳足迹回归方程**

Table 3　Regression equations of carbon footprint of oilseed rape production in different periods of the middle and lower reaches of Yangtze River

| 项目 Item | 时间段 Time period | | |
|---|---|---|---|
| | 2004—2013 | 2013—2015 | 2004—2015 |
| 回归方程 Regression equation | $Y_2$=12.40$X_1$+122.17 | $Y_2$=10.40$X_4$+0.29$X_{10}$+975.83 | $Y_1$=12.81$X_1$+12.20$X_2$+6.27$X4$+102.08 |
| 决定系数 $R^2$ | 0.950 | 0.989 | 0.956 |
| 标准回归系数 Standard regression coefficient | | | |
| 氮肥 N fertilizer ($X_1$) | 0.975** | 0.333 | 1.132** |
| 磷肥 P fertilizer ($X_2$) | 0.311 | 0.445 | 0.528** |
| 钾肥 K fertilizer ($X_3$) | 0.360 | 0.367 | 0.112 |
| 复合肥 Compound fertilizer ($X_4$) | 0.195 | 0.989** | 0.743** |
| 油菜种子 Rice seed ($X_5$) | 0.391 | 0.321 | 0.387 |
| 人工 Labor ($X_6$) | 0.459 | 0.124 | 0.349 |
| 除草剂 Herbicide ($X_7$) | 0.123 | 0.131 | 0.112 |
| 杀虫剂 Insecticide ($X_8$) | 0.213 | 0.176 | 0.231 |
| 杀菌剂 Fungicide ($X_9$) | 0.312 | 0.211 | 0.412 |
| 柴油 Diesel ($X_{10}$) | 0.447 | 0.011** | 0.419 |

以表示为 $Y_1$=12.40$X_1$+122.17; 2013—2015 年, 碳足迹快速增加是复混肥和柴油共同作用的结果, 且复混肥的直接作用约是柴油的 9 倍, 决定系数为 0.989, 都通过 1%的显著水平, 回归方程表示为 $Y_2$=10.40$X_4$+0.29$X_{10}$+975.83, $X_4$ 和 $X_{10}$ 分别为复混肥和柴油实际投入量。总之, 2004—2015 年, 油菜生产系统碳足迹的变化同时受氮肥、磷肥和复混肥的影响, 影响程度从大到小依次为氮肥、复混肥和磷肥, 决定系数为 0.956, 都通过 1%的显著水平, 回归方程表示为 $Y_3$=12.81$X_1$+12.20$X_2$+6.27$X_4$+102.08, $X_1$、$X_2$ 和 $X_4$ 分别为氮肥、磷肥和复混肥实际投入量。

### 2.3　长江流域各省油菜生产碳足迹分析

图 3 显示 2004—2015 年长江流域不同省份之间年均油菜生产的碳足迹存在显著差异。其中, 单位面积碳足迹最高的省份为江苏省, 年均值为 3 390.9 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$; 其次为上海市, 年均值为 3 191.2 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$; 最低的省份为安徽、江西和湖南, 年均值介于 1 826.0~1 857.2 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 与最高值相比, 差值达 1 564.9 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$。长江流域油菜生产单位面积碳足迹呈向东部倾斜趋势。过去 12 年中, 单位面积碳足迹的变化率为−97~−12 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$·$a^{-1}$, 表明长江流域 7 个省份的单位面积碳足迹均呈下降趋势, 其中浙江、上海、安徽 3 省市下降幅度较大。各省份单位产量碳足迹分布与单位面积碳足迹类似, 最高单位产量碳足迹出现在江苏省, 其次为浙江省, 分别为 1.53 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$ 和

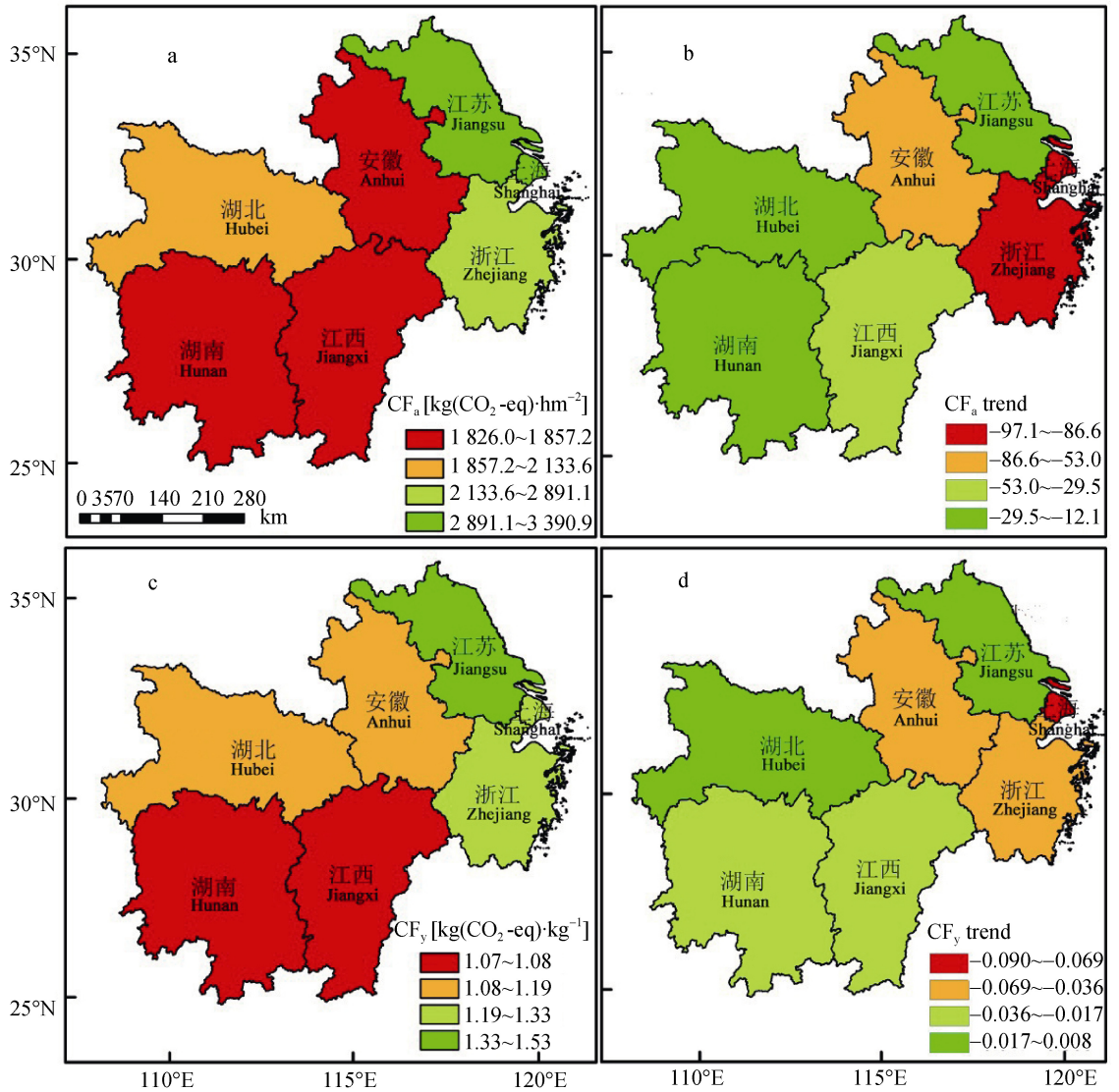


**图 3** 长江中下游流域各省份 **2004—2015** 年油菜生产单位面积碳足迹、单位产量碳足迹及其变化率分布

Fig. 3 Distribution of carbon footprint per unit area, carbon footprint per unit yield and their trends of oilseed rape production during 2004–2015 in each province of the middle and lower reaches of Yangtze River

a: 单位面积碳足迹分布, 单位为 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$; b: 2004—2015 年单位面积碳足迹变化率分布($CF_a$ trend), 单位为 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$·$a^{-1}$; c: 单位产量碳足迹分布($CF_y$), 单位为 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$; d: 2004—2015 年单位产量碳足迹变化率分布($CF_y$ trend), 单位为 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$·$a^{-1}$。a: distribution of carbon footprint per unit area ($CF_a$), kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$; b: distribution of change in carbon footprint trends per unit area during 2004–2015 ($CF_a$ trend), kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$·$a^{-1}$; c: distribution of carbon footprint per unit yield ($CF_y$), kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$; d: distribution of change in carbon footprint trends per unit yield during 2004–2015 ($CF_y$ trend), kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$·$a^{-1}$.

1.33 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$; 最低值出现在湖南和江西两省, 均约为 1.07 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$, 最高值与最低值差距达 0.46 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$。过去 12 年中, 单位产量碳足迹的变化率为−0.006~0.008 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$·$a^{-1}$, 除江苏和湖北两省单位产量碳足迹呈现出增加趋势外, 其他 5 个省市单位产量碳足迹均呈现出下降趋势, 其中上海市下降幅度最大, 变化率为−0.069 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$·$a^{-1}$。

### 2.4 长江流域典型省份油菜生产碳足迹、投入及构成分析

如表 4 所示, 长江流域油菜高产省份平均单产为 2 153.9 kg·$hm^{-2}$, 较低产省份提高 36.6%。对比分析高产省份与低产省份的碳足迹、单位面积投入和构成发现, 与低产省相比, 高产省 $CF_a$、$CF_y$ 分别较低产省份提高 71.5%、27.3%($P$<0.05)。单位面积农资投入中, 氮肥、磷肥和复合肥产生的碳足迹值高产省份均高于低产省份, 分别提高 81.7%、81.2%和 112.8%, 差异达显著水平($P$<0.05); 但是钾肥显著低于低产省份, 降低幅度为 46.9%; 其他农资投入如种子、人工、柴油等差异不显著。油菜田间 $N_2O$ 排放在高产省份中平均达 1 156.7 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 显著高于低产省份, 提高 69.2%($P$<0.05)。

表 4　长江中下游流域典型省份碳足迹、投入及产业构成

Table 4　Carbon footprint, input and composition of industry of typical provinces in the middle and lower reaches of Yangtze River

| 项目 Item | | 高产省份(江苏、浙江) High yield provinces (Jiangsu, Zhejiang) | 低产省份(江西、湖南) Low yield provinces (Jiangxi, Hunan) |
|---|---|---|---|
| 农田投入 Farm input [kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$] | 氮肥 N fertilizer | 775.7±141.1a | 427.0±21.8b |
| | 磷肥 P fertilizer | 464±111.2a | 256.1±70.3b |
| | 钾肥 K fertilizer | 1.7±0.8b | 3.2±0.6a |
| | 复合肥 Compound fertilizer | 434.8±155.1a | 204.3±114.3b |
| | 种子 Seed | 3.1±1.2a | 4.7±2.2a |
| | 人工 Labor | 190.9±72.2a | 161.0±70.2a |
| | 除草剂 Herbicide | 1.2a | 1.2a |
| | 杀虫剂 Insecticide | 1.1a | 1.1a |
| | 杀菌剂 Fungicide | 73.7a | 73.7a |
| | 柴油 Diesel | 54.8±20.2a | 32.1±20.3a |
| $N_2O$ 排放量 $N_2O$ emission (kg·$hm^{-2}$) | | 1 156.7±342.2a | 683.5±80.3b |
| 产量 Yield (kg·$hm^{-2}$) | | 2 153.9±322.7a | 1 621.3±197.1b |
| 单位面积碳足迹($CF_a$) Carbon footprint per unit area [kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$] | | 3 157.7±451.2a | 1 848.8±201.2b |
| 单位产量碳足迹($CF_y$) Carbon footprint per unit yield [kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$] | | 1.4±0.1a | 1.1±0.1b |

同行数据后不同小写字母表示高产与低产省份在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same row mean significant differences at 0.05 level between provinces of high yield and low yield.

## 3　讨论与结论

### 3.1　长江中下游地区油菜生产碳足迹

改进农作物的耕作方式, 不仅可以提供高品质、价格适中的食品, 同时可以尽量减少对环境的负面影响[23]。研究表明, 采用不同的种植制度, 在精心设计的作物序列中安排其他作物品种, 比传统的单一栽培耕作制度具有巨大的环境优势。使用不同的种植系统可以减少生产投入[24]和害虫侵扰[25], 提高用水效率[26], 并提高作物的净产量[27]。油菜是作物多样化的主要作物。例如, 中国油菜播种面积已从 1997 年的 6.475 1 ×$10^6$ $hm^2$ 增加到 2016 年的近 7.331 1×$10^6$ $hm^2$(中华人民共和国国家统计局), 占农田总面积的约 4.4%。然而, 关于油籽作物生产的环境影响的研究很少。因此, 迫切需要确定长江中下游地区(油菜主产区)油菜生产温室气体排放大小、分布及其构成。本研究发现, 油菜单位面积的碳足迹为 1 989 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 单位产量碳足迹为 1.23 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$, 该值远高于加拿大油菜生产的单位面积碳足迹 1 355 kg($CO_2$-eq)·$hm^{-2}$, 单位产量碳足迹 0.52 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$[28]。可见, 中国油菜生产的碳排放显著高于加拿大, 说明中国在油菜生产管理方面有较大的减排潜力。作物生产碳足迹受种植制度、农作措施以及社会经济等多方面影响, 并且各因素存在互作, 因此不同作物的碳足迹存在显著差异。卢小宏[29]基于田间试验数据, 计算分析了河北省吴桥县玉米(*Zea mays* L.)单位产量碳足迹值为 0.29 kg·$kg^{-1}$, 冬小麦(*Triticum aestivum* L.)单位产量碳足迹为 0.58 kg·$kg^{-1}$。陈中督[11]利用统计数据计算分析了长江流域双季稻区单位产量碳足迹平均值为 0.89 kg·$kg^{-1}$。可见, 长江流域单位产量碳足迹平均值表现为水稻>冬小麦>冬油菜>夏玉米, 说明作物生产中水稻、冬小麦单位面积碳足迹较大, 油菜与玉米单位面积碳足迹较小, 因此在未来长江流域作物生产布局中应适当压缩双季稻、稻麦播种面积, 扩大油菜种植面积来减少农业温室气体排放。

### 3.2　长江流域油菜生产碳足迹主要构成

本研究发现, 肥料和人工是长江流域油菜生产主要的温室气体排放源, 分别占碳足迹的 50.9%~53.1%和 5.8%~8.4%。旱地直接和间接的 $N_2O$ 排放主要由施用氮肥所引起, 可见肥料和人工正在成为长江流域油菜低碳发展的限制因子。Hillier 等[30]研究表明, 虽然英国作物生长氮肥引起的碳排放量占总排放的比例为 75%, 但其单位面积和单位产量的氮肥碳足迹仍然大大低于我国。原因可能在于以下两个方面: 第一, 本研究氮肥生产过程中的温室气体排放系数基于中国生命周期基础数据库(CLCD)[31], 系数为 1.53 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$, 远高于国

外氮肥温室气体排放系数[0.86 kg($CO_2$-eq)·$kg^{-1}$], 从而造成了氮肥生产过程中的高排放。第二, 我国农作物连续高产的同时, 也伴随着我国化肥的高使用量。研究表明我国当季氮肥和磷肥利用率普遍较低, 分别为 35%和 18%, 远低于国际标准水平[32]。近年来, 随着我国城乡二元结构变化和农村产业结构的调整, 大量的农村劳动力转移, 从事农业生产的劳动力减少, 劳动力价格全面提长, 加上机械化水平较低, 使得油菜生产过程中的劳动力成本大幅提高, 人工费用已经成为油菜生产成本中所占比例最高的成本, 用机械代替人工作业, 减少人工成本, 是油菜生产过程中降低成本、提高效益的有效途径之一。

### 3.3 长江流域省级区域间油菜生产碳足迹差异

长江中下游区域不同省份油菜单位面积碳足迹、单位产量碳足迹存在明显差异, 这与油菜生产条件的区域差异有关, 例如内陆地区与东部沿海地区油菜种植品种相同, 但是由于地处环境不同, 气候条件存在较为明显差异, 农作措施存在显著差异, 从而使得农资投入水平及油菜田之间温室气体排放存在差别。再者, 目前我国油菜生产主要是手工操作, 整地、育苗、移栽、除草、施肥、收割和脱粒等生产环节需要投入大量劳动力。随着农村劳动力价格的迅速上涨, 用工费用在油菜生产成本中的比重越来越大。由《2004—2015 年全国农产品成本收益资料汇编》发现, 我国浙江地区 2015 年劳动力成本较江西地区提高 15.4%。再者, 受到经济、技术和交通等因素的制约, 各地区肥料施用量存在较大差异, 各结构组分的比例也不同。东部沿海地区油菜种植肥料投入水平较高, 而中部地区投入水平较低, 较难满足农业生产水平的需求。

### 3.4 长江流域油菜生产低碳策略

从本研究结果来看, 长江中下游地区油菜低碳生产应优先考虑减少肥料施用以及机械化管理。首先, 通过调节氮肥施用时期、比例和配比, 满足油菜前期快速生长的氮素需求, 后期则主要通过发挥土壤氮素供应, 促进油菜氮素转移再利用。其次, 综合考虑不同轮作、秸秆还田条件下土壤氮素供应特点及后效, 统筹氮肥的施用; 配合合理密植、水肥管理、同其他元素肥料配施、机械深施等措施, 以协同增效的方式实现油菜的高产和氮肥的高效[33]。在油菜机械化管理上, 减少油菜生产人工用量, 加大油菜播种、移栽、收获等关键机械的研制和实验力度, 提高油菜机械的适应性、稳定性, 提高效率, 降低作业成本[34]。

### 3.5 研究局限性

本研究是基于统计年鉴中农作物面积、产量、化肥投入和其他农业投入进行计算和分析, 而不同的数据库之间数据质量会存在一定的偏差, 从而导致最后结果的准确度。例如《2004—2015 年全国农产品成本收益资料汇编》中没有柴油使用量的基础数据, 本研究只能借鉴崔晓晨等[35]建立的农作物作业效益与作业量和成本之间的函数关系计算得出, 每年柴油单价数据来源于我国油价网数据库(http://youjia.chemcp.com/)。其次, 不确定性还来源于温室气体排放因子的选取, IPCC(2006)[20]对全球数据进行整合分析得出氧化亚氮的直接排放因子, 但是区域间气候、作物和土壤类型等因素的差别将会导致排放因子的差异, 因此, 采用单一的排放因子将会给研究带来一定的不确定性。农资投入中油菜种子的排放因子采用国外的数据[30], 而采用国外排放因子来计算中国的碳排放也会带来研究结果的不确定性。另外, 本研究采用生命周期评价法, 系统边界存在一定的争议, 例如计算碳足迹时是否考虑土壤碳储量变化、人工投入以及机械磨损等[21]。这些争议需要国内外学者进一步的讨论和完善, 从而为农作物碳足迹的研究制定一套统一的评价体系, 为最终构建低碳农业生态系统做铺垫。

## 4 结论

本研究基于碳足迹理论和生命周期法, 利用长江中下游油菜生产区 2004—2015 年 7 个省份的油菜产量、农资投入、播种面积等历年统计数据, 分析了长江中下游地区油菜生产单位播种面积碳足迹时空动态分布, 并对油菜碳足迹构成进行了分析。研究结果表明长江中下游流域油菜生产单位面积碳足迹随着年限增加都表现为下降趋势。油菜生产过程中肥料产生的碳足迹占油菜生产总碳足迹比例最大, 为 50.9%~53.1%, 其次是人工所产生的碳足迹比例占比 5.8%~8.4%。不同省份之间油菜生产存在巨大差异, 其中江苏省和浙江省的单位面积碳足迹和单位产量碳足迹均较高, 而湖南和江西两省的单位面积碳足迹和单位产量碳足迹均较低。油菜高产省份氮肥、磷肥和复合肥产生的碳足迹值均显著高于低产省份, 分别提高 81.7%、81.2%和 112.8% ($P$<0.05), 因此单位面积碳足迹较大。调整油菜生产布局, 增加农资投入效率和提高机械化作业效率是降低长江中下游地区油菜生产碳足迹和提高单位产量的关键途径。

## 参考文献 References


[1] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change[M]. Contribution of Working Group Ⅲ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014

[2] 王占彪, 陈静, 张立峰, 等. 河北省棉花生产碳足迹分析[J]. 棉花学报, 2016, 28(6): 594–601
WANG Z B, CHEN J, ZHANG L F, et al. Carbon footprint analysis of cotton production in Hebei Province[J]. Cotton Science, 2016, 28(6): 594–601

[3] LEHUGER S, GABRIELLE B, LAVILLE P. Predicting and mitigating the net greenhouse gas emissions of crop rotations in Western Europe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1654–1671

[4] LINQUIST B, VAN GROENIGEN K J, ADVIENTO-BORBE M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. Global Change Biology, 2012, 18(1): 194–209

[5] ROBERTSON G P, PAUL E A, HARWOOD R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. Science, 2000, 289: 1922–1925

[6] LAL R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 353–362

[7] 杜受祜. 低碳发展: 城市可持续发展的必然战略选择[J]. 成都发展改革研究, 2010, (1): 40–41
DU S H. Low-carbon development: An inevitable strategic choice for sustainable urban development[J]. Chengdu Development and Reform Research, 2010, (1): 40–41

[8] 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

[9] WIEDMANN T, MINX J. A definition of 'Carbon Footprint'[M]//PERTSOVA C C. Ecological Economics Research Trends. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2009: 193–195

[10] GAN Y T, LIANG C, HAMEL C, et al. Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(4): 643–656

[11] 陈中督. 农作措施对双季稻田固碳减排效应与农户低碳技术采纳行为研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
CHEN Z D. Farming practices on carbon sequestration and emission mitigation in double rice field and adoption behavior of low carbon technology by rice farmers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017

[12] 米松华, 黄祖辉, 朱奇彪, 等. 农户低碳减排技术采纳行为研究[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(3): 797–804
MI S H, HUANG Z H, ZHU Q B, et al. Study on factors influencing farmers' adoption of low-carbon technologies[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2014, 26(3): 797–804

[13] 傅廷栋. 中国油菜生产与品种改良[J]. 华中农业大学学报, 1999, 18(6): 501–504
FU T D. Rapeseed production and variety improvement in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1999, 18(6): 501–504

[14] 涂金星, 张冬晓, 张毅, 等. 我国油菜育种目标及品种审定问题的商榷[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 350–352
TU J X, ZHANG D X, ZHANG Y, et al. Discussion on some standards of variety registration and breeding goals of *Brassica napus* in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(3): 350–352

[15] 中华人民共和国国家统计局. 中国农村统计年鉴—2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014
National Statistical Bureau of the People's Republic of China. China Rural Statistical Yearbook, 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014

[16] 徐华丽. 长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012
XU H L. Investigation on fertilization and effect of formulated fertilization of winter rapeseed in Yangtze River Basin[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012

[17] 王红, 张瑞芳, 周大迈. 氮肥引起的面源污染问题研究进展[J]. 北方园艺, 2011, (5): 201–203
WANG H, ZHANG R F, ZHOU D M. Current situations and research progress of non-point pollution problems caused by nitrogen[J]. Northern Horticulture, 2011, (5): 201–203

[18] 唐浩, 邱卫国, 周翾, 等. 稻麦轮作条件下氮素流失特性及控制对策研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(6): 64–66
TANG H, QIU W G, ZHOU X, et al. Study on nitrogen loss characteristics and control measures under crop rotation[J]. Yellow River, 2010, 32(6): 64–66

[19] RÖÖS E, SUNDBERG C, HANSSON P A. Carbon footprint of food products[M]//MUTHU S S. Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1. Singapore: Springer, 2014: 85–112

[20] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2006: Synthesis Report[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006

[21] 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

[22] GAN Y T, LIANG C, HUANG G B, et al. Carbon footprint of canola and mustard is a function of the rate of N fertilizer[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(1): 58–68

[23] LIEBIG M A, TANAKA D L, KRUPINSKY J M, et al. Dynamic cropping systems: Contributions to improve agroecosystem sustainability[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(4): 899–903

[24] ZENTNER R P, LAFOND G P, DERKSEN D A, et al. Effects

of tillage method and crop rotation on non-renewable energy use efficiency for a thin Black Chernozem in the Canadian Prairies[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 77(2): 125–136

[25] KRUPINSKY J M, BAILEY K L, MCMULLEN M P, et al. Managing plant disease risk in diversified cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(2): 198–209

[26] MILLER P R, GAN Y T, MCCONKEY B G, et al. Pulse crops for the northern great plains: Ⅰ. Grain productivity and residual effects on soil water and nitrogen[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(4): 972–979

[27] TANAKA D L, KRUPINSKY J M, MERRILL S D, et al. Dynamic cropping systems for sustainable crop production in the northern great plains[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(4): 904–911

[28] OSBORNE B, SAUNDERS M, WALMSLEY D, et al. Key questions and uncertainties associated with the assessment of the cropland greenhouse gas balance[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(3): 293–301

[29] 卢小宏. 不同农作措施下冬小麦-夏玉米碳足迹及优化潜力评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
LU X H. Carbon footprint and optimization potential of winter wheat and summer maize under different agricultural measures[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013

[30] 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

[31] 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[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2136–2144

[32] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 217–225
YANG F, MENG Y D, JIANG Y, et al. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(1): 217–225

[33] 任涛, 鲁剑巍. 中国冬油菜氮素养分管理策略[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3506–3521
REN T, LU J W. Integrated nitrogen management strategy for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(18): 3506–3521

[34] 周广生, 左青松, 廖庆喜, 等. 我国油菜机械化生产现状、存在问题及对策[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(9): 2153–2157
ZHOU G S, ZUO Q S, LIAO Q X, et al. Mechanical production status, existing problems and strategy discussion of rapeseed in China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(9): 2153–2157

[35] 崔晓晨, 李安宁, 王国占, 等. 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, 33(2): 15–18
CUI X C, LI A N, WANG G Z, et al. Research on machinery cost of grain-production in China-based on a nationwide questionnaire survey[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(2): 15–18