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

**华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价**

王上，李康利，聂江文，杨亚东，臧华栋，曾昭海

引用本文:
王上, 李康利, 聂江文, 等. 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 910-919.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190916

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例

Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 328-336 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160833

华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较

A comparative study of yield, cost-benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat-maize under rain-fed condition in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(5): 535-543 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150215

华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响

Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1663-1672 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190246

施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响

Effects of nitrogen application methodologies on yield and nitrogen use efficiencies in a summer maize (Zea mays)-winter wheat (Triticum aestivum)rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1682-1694 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190223

基于遥感的华北平原农作物时空分布变化特征分析

Using remote sensing to analyze spatiotemporal variations in crop planting in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(9): 1199-1209 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150506

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 6 月 第 28 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2020, 28(6): 910−919

**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190916**

王上, 李康利, 聂江文, 杨亚东, 臧华栋, 曾昭海. 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 910–919

WANG S, LI K L, NIE J W, YANG Y D, ZANG H D, ZENG Z H. Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean-summer maize cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 910–919

# 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价*

王 上, 李康利, 聂江文, 杨亚东, 臧华栋, 曾昭海**

(中国农业大学农学院/农业农村部农作制度重点实验室 北京 100193)

**摘 要:** 华北平原是我国重要的粮食生产基地, 长期集约化的冬小麦-夏玉米种植导致氮肥施用过量、地下水超采及碳排放增加等生态环境问题日益突出。因此, 调整现有种植结构, 构建资源节约型种植制度对缓解该区域生态环境问题具有重要意义。为明确新型春绿豆-夏玉米模式的可行性, 本研究基于大田试验和生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA), 定量评估了春绿豆-夏玉米模式与冬小麦-夏玉米模式的产量、经济效益、碳排放和碳足迹。结果表明, 春绿豆-夏玉米模式中绿豆与玉米的产量分别为 1 760.1 kg·hm$^{-2}$ 和 8 775.8 kg·hm$^{-2}$, 当量产量(换算为玉米产量)为 18 833.4 kg·hm$^{-2}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 20.4%($P$<0.05); 周年净收入为 27 085 ¥·hm$^{-2}$(包括每年 7 500 ¥·hm$^{-2}$ 的冬季休耕补贴), 比冬小麦-夏玉米模式高 20.2%; 周年碳排放为 4 642.1 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 36.1%; 单位产值碳足迹为 0.17 kg($CO_2$-eq)·¥$^{-1}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 48.5%($P$<0.01)。综合来看, 在华北平原引入春绿豆-夏玉米模式部分替代传统冬小麦-夏玉米模式, 能够改善种植结构, 同时提高农民收入、降低农业生产系统碳排放和碳足迹。

**关键词:** 春绿豆-夏玉米; 冬小麦-夏玉米; 经济当量产量; 碳排放; 碳足迹; 生命周期评价

**中图分类号:** S344.13; S512.1+1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

# Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean-summer maize cropping system in the North China Plain*

WANG Shang, LI Kangli, NIE Jiangwen, YANG Yadong, ZANG Huadong, ZENG Zhaohai**

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

**Abstract:** The North China Plain is an area of major grain production in China. The intensive winter wheat-summer maize cropping system has led to increasingly excessive nitrogen fertilization, over-exploitation of groundwater, and increased carbon emissions. Therefore, adjusting the existed planting structure and constructing a resource-saving planting system is critical to alleviate the ecological problems of the region. Here, the yield, economic benefits, carbon emissions, and carbon footprint were evaluated between

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300205-01)、国家自然科学基金项目(31671640, 31901470)和中央高校基本科研业务费专项资金(2019TC217)资助

** 通信作者: 曾昭海, 主要研究方向为豆禾轮作与土壤微生态。E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn
王上, 主要研究方向为新型种植制度构建。E-mail: wangshang@cau.edu.cn

收稿日期: 2019-12-27 接受日期: 2020-02-03

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300205-01), the National Natural Science Foundation of China (31671640, 31901470) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (2019TC217).

** Corresponding author, E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn

Received Dec. 27, 2019; accepted Feb. 3, 2020

spring mung bean-summer maize (MM) and winter wheat-summer maize (WM) cropping systems based on a field experiment and life cycle assessment (LCA). The yields of mung bean and maize were 1 760.1 kg·hm$^{-2}$ and 8 775.8 kg·hm$^{-2}$ under the MM treatment, respectively. The annual economic equivalent yield and annual net income of the MM treatment were 18 833.4 kg·hm$^{-2}$ and 27 085 ¥·hm$^{-2}$, respectively, which were 20.4% lower ($P < 0.05$) and 20.2% higher than those under the WM treatment, respectively. The annual carbon emission from the MM treatment was 4 642.1 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$, which was 36.1% lower than that from the WM. Additionally, the carbon footprint per unit of economic benefit of the MM treatment was 0.17 kg($CO_2$-eq)·¥$^{-1}$, 48.5% lower ($P < 0.01$) than that of WM. Therefore, the introduction of MM systems to replace some WM systems could potentially increase the net income of farmers, as well as reduce carbon emissions and carbon footprint.

**Keywords:** Spring mung bean-summer maize; Winter wheat-summer maize; Economic equivalent yield; Carbon emission; Carbon footprint; Life cycle assessment

华北平原是我国粮食主产区之一，耕地面积占全国总面积的 21.3%[1]。冬小麦(*Triticum aestivum* L.)-夏玉米(*Zea mays* L.)一年两熟制是该地区的主要种植模式，常年集约化的小麦-玉米种植以及生产中单一化的物质和能量投入，引发了一系列负面效应，如水肥利用效率低、地下水亏缺严重、温室气体排放加剧等，严重制约了该区域农业可持续发展[2-4]。因此，通过在该区域构建新型生态高效种植模式部分替代传统冬小麦-夏玉米种植模式，协调水分利用、氮肥投入及提高资源利用效率是发展可持续农业的重要途径之一[5-6]。

豆科作物(Leguminosae)与禾本科(Gramineae)作物轮作具有提高作物产量、降低农业生产氮肥投入、提高资源利用效率、减少温室气体排放、增加农民收入等优势，是发展可持续农业的重要途径[7-9]。Gan 等[10]通过对比小麦-豆类和小麦-休耕轮作模式发现，引入豆科作物的轮作系统，可以使两茬小麦的总籽粒产量增加 35.5%，总蛋白质产量提高 50.9%，总肥料利用效率提高 33.0%。在夏花生(*Arachis hypogaea* L.)-冬小麦种植模式下，花生通过地下部根际沉积转移可为小麦提供氮素约 1.9 kg(N)·hm$^{-2}$，地上部秸秆可为小麦提供氮素 0.9~2.4 kg(N)·hm$^{-2}$[11]。另外，Behnke 等[12]对比了长期大豆(*Glycine max* L.)或玉米连作与大豆-玉米轮作的作物产量及温室气体排放，发现大豆和玉米轮作与对应连作相比不仅提高了作物周年产量，同时减少了农田 $N_2O$ 和 $CO_2$ 排放。综上，发展豆科作物-禾本科作物轮作种植，对于缓解华北平原农业生产面临的问题，促进其农业可持续发展具有重要意义[13]。

绿豆(*Vigna radiata* L.)适应性广，生育期短，播期弹性大，属于抗旱作物，同时具有较好的固氮养地作用[14]。本研究组前期开展了春播绿豆引种试验，筛选出了多个适合该地区种植的高产优质品种，并在华北平原地区成功构建了春绿豆-夏玉米轮作模式[15]。与传统冬小麦-夏玉米模式相比，春绿豆-夏玉米模式中春绿豆生育期内较冬小麦减少灌溉 1~2 次，节水约 100~150 mm，具有较好的节水效果。但与冬小麦-夏玉米模式相比，春绿豆-夏玉米模式在产量、经济效益、碳排放和碳足迹等方面是否具有优势并不清楚，这制约了该模式的进一步推广。

前人对不同种植模式碳排放的比较通常使用碳足迹研究方法。碳足迹是指某个产品在其生命周期或生产过程中直接或间接造成的二氧化碳($CO_2$)排放总量，以二氧化碳当量表示($CO_2$-eq)[16]。在农业领域通常采用生命周期评价法(LCA)对作物生产系统碳足迹进行评价[17]，该方法计算的是农作物生产过程中由农事操作和农资投入所引起的直接或间接碳排放的总量。近年来，研究人员利用 LCA 方法对华北平原冬小麦-夏玉米模式[18]及单季作物[19]生产中的碳足迹进行了系统研究，但缺乏对基于豆科作物-禾本科作物种植系统的碳足迹研究。

综上所述，本研究结合大田试验和 LCA 评价方法，综合比较了新型春绿豆-夏玉米模式与传统冬小麦-夏玉米模式的产量、经济效益、碳排放和碳足迹，以期为春绿豆-夏玉米模式在华北平原的推广提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

田间试验于 2018—2019 年在河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥试验站试验田展开(116°37′E, 37°41′N)。试验区域年均气温 12.6 ℃，全年积温 4 862.9 ℃(≥0 ℃)，年均降水量 562 mm。试验地土壤为沙壤土，试验起始 0~20 cm 土层土壤基础性质分别为：全氮 0.98 g·kg$^{-1}$、碱解氮 65.2 mg·kg$^{-1}$、有效磷 124.9 mg·kg$^{-1}$、速效钾 15.3 mg·kg$^{-1}$、有机质含量 14.5 g·kg$^{-1}$。2018—2019 年试验周期内的气象数据如图 1 所示。

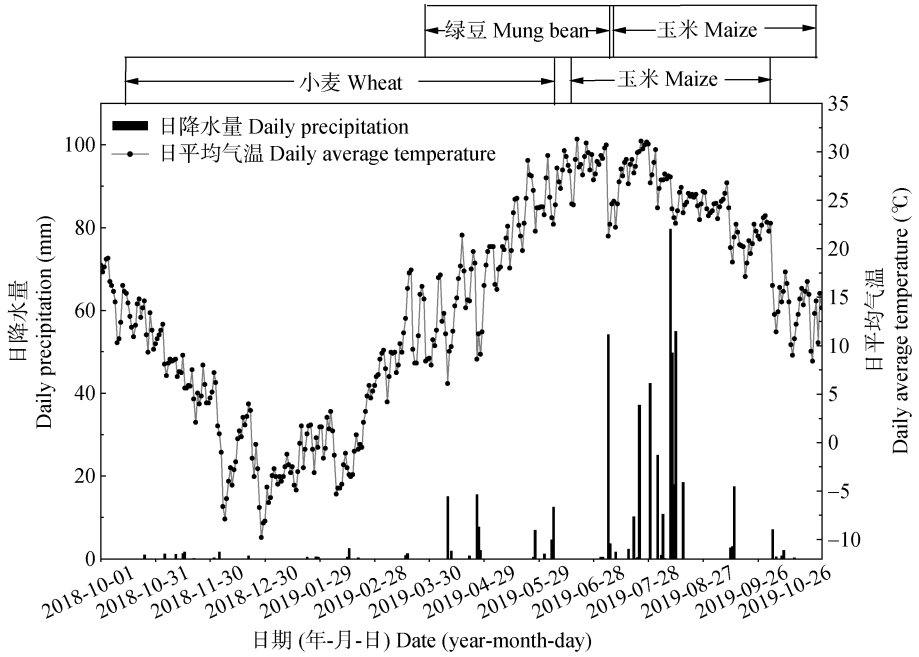


**图 1** 试验周期内研究区日平均气温和降水量

Fig. 1 Daily mean air temperature and precipitation during the experiment period in the study area

### 1.2 试验方案

本试验包括春绿豆-夏玉米模式和冬小麦-夏玉米模式两个处理，每个处理重复 3 次，小区面积为 33 $m^2$ (6 m×5.5 m)，试验采用随机排列设计。春绿豆-夏玉米模式的绿豆和玉米品种分别为‘BL 13-653’和‘永玉 2 号’，冬小麦-夏玉米模式的小麦和玉米品种分别为‘济麦 22’和‘郑单 958’。由于春绿豆的夏收时间比冬小麦晚近 1 个月，故春绿豆-夏玉米模式的夏玉米品种选择了生育期较短(85 d)的‘永玉 2 号’。

春绿豆-夏玉米模式中，春绿豆于 2019 年 4 月 1 日播种，采用人工穴播覆膜方式播种，行距 40 cm，穴距 12 cm，施肥量为 60 kg(N)·$hm^{-2}$、72.5 kg($P_2O_5$)·$hm^{-2}$ 和 150 kg($K_2O$)·$hm^{-2}$，2019 年 7 月 3 日收获；夏玉米于 2019 年 7 月 12 日播种，采用机械播种，行距 60 cm，株距 24 cm，施肥量为 180 kg(N)·$hm^{-2}$、108 kg($P_2O_5$)·$hm^{-2}$ 和 112.5 kg($K_2O$)·$hm^{-2}$，2019 年 10 月 31 日收获。在春绿豆播种前 4 d 灌底墒水，灌溉量为 750 $m^3$·$hm^{-2}$，夏玉米播前不进行灌溉，等雨播种，绿豆和玉米生育期内均不进行灌溉，其余农事管理措施同当地常规。

冬小麦-夏玉米模式中，冬小麦于 2018 年 10 月 18 日播种，采用机械播种，行距 15 cm，播种量 300 kg·$hm^{-2}$，施肥量为 180 kg(N)·$hm^{-2}$、138 kg($P_2O_5$)·$hm^{-2}$ 和 112.5 kg($K_2O$)·$hm^{-2}$，2019 年 6 月 9 日收获。分别在冬小麦播前(2018 年 10 月 18 日)和拔节期(2019 年 4 月 19 日)灌溉，每次灌溉量为 750 $m^3$·$hm^{-2}$。夏玉米于 2019 年 6 月 17 日播种，机械播种，行距 60 cm，株距 24 cm，施肥量为 180 kg(N)·$hm^{-2}$、138 kg($P_2O_5$)·$hm^{-2}$ 和 112.5 kg($K_2O$)·$hm^{-2}$，2019 年 10 月 7 日收获。夏玉米播种前和生育期内均不灌溉，其余农事管理措施同当地常规。

### 1.3 产量测定及农资投入

春绿豆-夏玉米模式的春绿豆和夏玉米收获时，均在每个小区选取两个 2 m 双行样段测产。冬小麦-夏玉米模式的冬小麦收获时，每个小区选取两个 1 $m^2$ 样方测产；夏玉米收获时，每个小区选取两个 2 m 双行样段测产[15]。

两种种植模式的农资投入量计算均依据田间试验实际投入量，各农资投入品价格采用试验实际交易价格(表 1)。小麦、玉米和绿豆籽粒变卖价格分别为 2.2 ¥·$kg^{-1}$、1.4 ¥·$kg^{-1}$ 和 8.0 ¥·$kg^{-1}$。此外，根据当地政策，该地区冬季休耕可享受 7 500 ¥·$hm^{-2}$ 的休耕补贴。

### 1.4 当量产量换算

为了对种植系统中不同作物的产量进行比较，参照公式(1)将所有单个作物的产量转换为玉米的当量产量(maize equivalent yield, MEY)[20]。

$$\mathrm{MEY} = \frac{P_{\text{non-maize}}}{P_{\text{maize}}} \times Y_{\text{non-maize}} \tag{1}$$

式中：MEY 为玉米当量产量，$P_{\text{non-maize}}$ 是除玉米之外作物的市场价格，$P_{\text{maize}}$ 是玉米的市场价格，$Y_{\text{non-maize}}$ 是除玉米之外的作物的产量。

表 1　春绿豆-夏玉米与冬小麦-夏玉米模式农资投入量及价格

Table 1　Amounts and prices of agricultural materials input in spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize cropping systems

| 农资 Agricultural material | 投入量 Amount | | 价格 Price |
|---|---|---|---|
| | 春绿豆-夏玉米 Spring mung bean-summer maize | 冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize | |
| 尿素 Urea | 430 kg·hm$^{-2}$ | 574 kg·hm$^{-2}$ | 1.8 ¥·kg$^{-1}$ |
| 磷酸二铵 $(NH_4)_2HPO_4$ | 235 kg·hm$^{-2}$ | 535 kg·hm$^{-2}$ | 3.5 ¥·kg$^{-1}$ |
| 过磷酸钙 $Ca(H_2PO_4)_2$ | 375 kg·hm$^{-2}$ | 0 | 0.8 ¥·kg$^{-1}$ |
| 硫酸钾 $K_2SO_4$ | 525 kg·hm$^{-2}$ | 450 kg·hm$^{-2}$ | 3.0 ¥·kg$^{-1}$ |
| 电力 Electricity | 1 200 kWh·hm$^{-2}$ | 3 600 kWh·hm$^{-2}$ | 0.55 ¥·kWh$^{-1}$ |
| 农用地膜 Mulch film | 41 kg·hm$^{-2}$ | 0 | 4.0 ¥·kg$^{-1}$ |
| 柴油 Diesel | 139 kg·hm$^{-2}$ | 196 kg·hm$^{-2}$ | 7.6 ¥·kg$^{-1}$ |
| 农药 Pesticides | 1.19 kg·hm$^{-2}$ | 4.75 kg·hm$^{-2}$ | 7.5 ¥·kg$^{-1}$ |
| 小麦种子 Wheat seeds | 0 | 300 kg·hm$^{-2}$ | 7.0 ¥·kg$^{-1}$ |
| 玉米种子 Maize seeds | 30 kg·hm$^{-2}$ | 30 kg·hm$^{-2}$ | 20.0 ¥·kg$^{-1}$ |
| 绿豆种子 Mung bean seeds | 37.5 kg·hm$^{-2}$ | 0 | 22.0 ¥·kg$^{-1}$ |

## 1.5　碳排放及碳足迹核算

### 1.5.1　碳排放核算

本研究中两种种植模式的碳排放均指在整个生产周年内所有投入的农资及生产资料在生产、运输、使用过程中排放的温室气体，农田 $N_2O$ 直接或间接排放的总和以及作物生长过程中 $CH_4$ 的排放，周年碳排放核算边界如图 2 所示。其中 $CO_2$ 以及秸秆等部分不参与 LCA 分析，由于华北平原为旱地农业，$CH_4$ 排放也不计入 LCA 分析[21]。

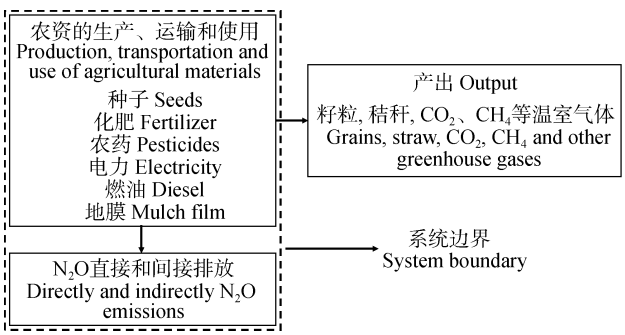


图 2　春绿豆-夏玉米与冬小麦-夏玉米模式周年生产碳足迹计算边界

Fig. 2　System boundary for calculating carbon footprint in spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize rotation systems

本研究中碳排放的计算方法是依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[22]。

两种种植模式碳排放的计算公式为:

$$CF_T = CF_i + CF_{N_2O} + CF_{N_2O_I} \tag{2}$$

$$CF_i = \sum_{i=1}^{n} AI_i \times EF_i \tag{3}$$

$$CF_{N_2O} = F_{SN} \times EF_1 \times \frac{44}{28} \times 298 \tag{4}$$

$$CF_{N_2O_I} = F_{SN} \times F_{RAC_{GASF}} \times EF_4 \times \frac{44}{28} \times 298 \tag{5}$$

不同种植模式的碳排放($CF_T$)按照公式(2)核算。其中，$CF_i$ 代表不同种植模式整个周年内各种生产资料产生的碳排放总和，$CF_{N_2O}$ 代表土壤因投入氮肥直接排放的 $N_2O$ 产生的碳排放，$CF_{N_2O_I}$ 代表土壤因投入氮肥间接排放的 $N_2O$ 产生的碳排放。

不同种植模式的生产资料产生、运输、使用过程中的碳排放按照公式(3)核算。其中，$i$ 代表第 $i$ 种生产资料，$AI_i$ 代表第 $i$ 种生产资料投入的量；$EF_i$ 代表第 $i$ 种生产资料的 $CO_2$ 排放参数(表 2)。

表 2　春绿豆-夏玉米与冬小麦-夏玉米模式农资的碳排放参数

Table 2　Index of greenhouse gas emission of different agricultural materials input in spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize cropping systems

| 项目 Item | 排放参数 Index of carbon emission |
|---|---|
| 氮肥 N fertilizer[1)] | 1.53 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$ |
| 磷肥 P fertilizer | 1.14 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$[17] |
| 钾肥 K fertilizer | 0.66 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$[17] |
| 农药 Pesticides | 6.58 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$[17] |
| 电力 Electricity | 0.92 kg($CO_2$-eq)·kW·h$^{-1}$[17] |
| 柴油 Diesel | 3.32 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$[17] |
| 农用地膜 Mulch film[2)] | 22.72 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$ |
| 小麦种子 Wheat seeds | 1.16 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$[17] |
| 玉米种子 Maize seeds | 1.22 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$[17] |
| 绿豆种子 Mung bean seeds[3)] | 0 |

1)数据来源为 CLCD (中国生命周期基础数据库) v0.7; 2)数据来源为 Ecoinvent v0.2; 3)绿豆种子属自繁种，故认为碳排放记为 0。1) The data is from CLCD v0.7; 2) The data is from Ecoinvent v0.2; 3) Mung bean seeds are self-breeding, so the index of carbon emission is zero.

不同种植模式土壤直接排放的 $N_2O$ 产生的碳排放按照公式(4)核算。其中, $F_{SN}$ 为土壤中化学氮肥施用量, N kg; $EF_1$ 为氮肥投入造成的 $N_2O$ 排放因子, 其值为 0.01[22]; $\frac{44}{28}$ 代表 $N_2O$ 中 N 的比例转化系数; 298 为 $N_2O$ 转化为 100 年尺度上的增温潜势。

不同种植模式土壤间接排放的 $N_2O$ 产生的碳排放按照公式(5)核算。其中, $F_{SN}$ 为土壤中化学氮肥施用量, N kg; $F_{RAC_{GASF}}$ 为土壤氨挥发系数, 其值为 0.11[22]; $EF_4$ 为土壤挥发或沉积产生的 $N_2O$ 排放因子, 其值为 0.01[22]。

### 1.5.2 碳足迹核算

不同种植模式的碳足迹按照公式(6)、(7)和(8)核算[22]。$CF_S$、$CF_Y$ 和 $CF_V$ 分别代表单位播种面积、单位产量和单位产值的碳排放, 其中, $T_A$、$T_Y$ 和 $T_V$ 分别代表播种面积、作物籽粒产量和经济产值。

$$CF_S = CF_T / T_A \quad (6)$$

$$CF_Y = CF_T / T_Y \quad (7)$$

$$CF_V = CF_T / T_V \quad (8)$$

### 1.6 统计与分析

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据汇总分析, 两种种植模式作物产量、经济效益、碳排放及碳足迹的统计学分析采用 IBM SPSS Statistics 20.0, 利用 Origin 2017 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 作物产量及当量产量

按照作物籽粒经济价值(小麦/玉米/绿豆=2.2/1.4/8.0)对两种种植模式各作物产量进行换算, 均折算为玉米当量产量后进行分析。春绿豆-夏玉米模式中绿豆和玉米的当量产量比冬小麦-夏玉米模式中小麦和玉米的当量产量低 19.0%($P$<0.05)和 22.0%($P$<0.05)。周年来看, 春绿豆-夏玉米模式的当量产量为 18 833.4 kg·hm$^{-2}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 20.4%($P$<0.05), 表明春绿豆-夏玉米模式在经济当量产量上仍不如冬小麦-夏玉米模式(表 3)。

### 2.2 经济效益比较分析

春绿豆-夏玉米模式和冬小麦-夏玉米模式的周年净收益分别为 27 085 ¥·hm$^{-2}$ 和 22 532 ¥·hm$^{-2}$; 春绿豆-夏玉米模式的总投入为 6 781 ¥·hm$^{-2}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 36.1%。综合计算, 春绿豆-夏玉米模式的净收益比冬小麦-夏玉米模式高 20.2%(图 3)。对于投入产出构成来看, 两种种植模式在化肥、农药上的投入相差不大。然而, 春绿豆-夏玉米模式比冬小麦-夏玉米模式少浇两次水, 节省电力费用 1 320 ¥·hm$^{-2}$, 占冬小麦-夏玉米模式投入的 12.4%。同时, 春绿豆-夏玉米模式比冬小麦-夏玉米模式增加 7 500 ¥·hm$^{-2}$ 的冬季休耕补贴, 占春绿豆-夏玉米模式净收益的 27.7%。因此, 节水与休耕补贴共同促成了春绿豆-夏玉米模式净收益高于冬小麦-夏玉米模式。如果不计 7 500 ¥·hm$^{-2}$ 的休耕补贴, 春绿豆-夏玉米模式的周年净收益为 19 585 ¥·hm$^{-2}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 13.1%。这也充分说明发展节水农业和政府政策引导是增加农民收入, 丰富种植模式和作物多样性的重要途径(图 3)。

### 2.3 碳排放和碳足迹分析

春绿豆-夏玉米模式的周年单位面积碳排放为 4 642.1 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$, 比冬小麦-夏玉米模式[7 262.8 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$]低 36.1%。春绿豆-夏玉米模式中绿豆和玉米的单位面积碳排放分别占周年排放的 61.8%和 38.2%; 冬小麦-夏玉米模式中小麦和玉米的单位面积碳排放分别占周年排放的 59.9%和 40.1%。两种种植模式的碳排放均是前茬作物高于后茬作物, 这主要是由于春绿豆季或冬小麦季灌溉用

**表 3 春绿豆-夏玉米与冬小麦-夏玉米模式的作物产量及当量产量**

Table 3 Grain yield and economic equivalent yield of spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize cropping systems

| 作物生长季 Crop season | 产量 Grain yield (kg·hm$^{-2}$) | | 经济当量产量 Economic equivalent yield [kg(maize)·hm$^{-2}$] | |
|---|---|---|---|---|
| | 春绿豆-夏玉米 Spring mung bean-summer maize | 冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize | 春绿豆-夏玉米 Spring mung bean-summer maize | 冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize |
| 非玉米季 Non-maize season | 1 760.1±126.8 | 7 902.7±376.7 | 10 057.7±724.6a | 12 418.6±592.0a |
| 玉米季 Maize season | 8 775.8±445.4 | 11 251.0±571.7 | 8 775.8±445.4b | 11 251.0±571.7a |
| 周年 Rotation system | — | — | 18 833.4±1 155.8b | 23 669.6±1 068.7a |

由于两种轮作模式的作物种类不同, 产量直接相加无实际意义, 故实际周年产量一栏空缺; 按照小麦/玉米/绿豆=2.2/1.4/8.0 的经济价值将冬小麦和春绿豆的实际产量换算为玉米经济当量产量。表中数值为平均值±标准误($n$=3), 每行不同小写字母表示不同种植模式之间差异显著($P$<0.05)。Due to the different crop types of the two rotation systems, the direct addition of the grain yield has no practical significance, so the rotation system grain yield column is vacant. The grain yield of winter wheat and spring mung bean were converted to maize economic equivalent yield according to the economic value of wheat/maize/mung bean=2.2/1.4/8.0. The values in the table are the mean ± standard error ($n$ = 3). Different lowercase letters in the same line represent significant differences between two rotation systems ($P$ < 0.05).

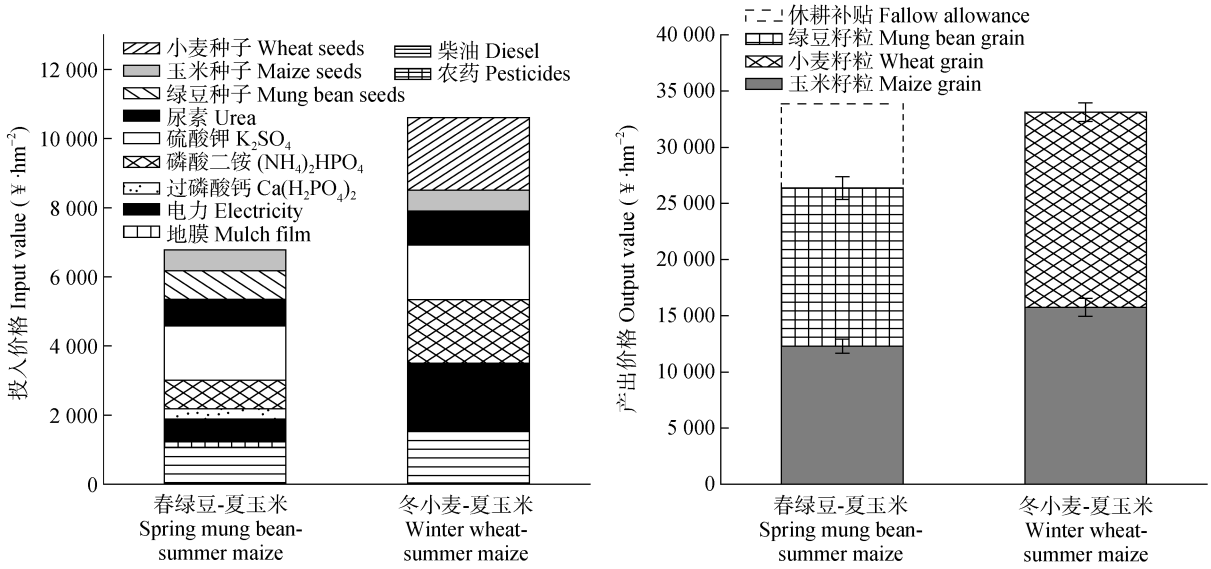


**图 3　春绿豆-夏玉米和冬小麦-夏玉米模式的投入产出**

Fig. 3　Input and output values comparison of spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize rotation systems

柱状图上的误差线为标准误($n$=3)。The error bars represent the standard error of the mean value ($n$ = 3).

电造成了较高的碳排放。春绿豆-夏玉米模式的周年单位产量碳足迹为 0.44 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$, 比冬小麦-夏玉米模式高 15.8%; 但由于春绿豆籽粒产量较低, 其单位产量碳足迹高达 1.65 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$, 远高于冬小麦和夏玉米($P$<0.01)。春绿豆-夏玉米模式的单位产值碳足迹为 0.17 kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$, 比冬小麦-夏玉米模式低 48.5%($P$<0.01), 这主要得益于春绿豆-夏玉米模式消耗了较少的电费和该模式配套的 7 500 ¥·hm$^{-2}$ 的休耕补贴(表 4)。

### 2.4　碳排放来源

春绿豆-夏玉米模式的碳排放主要来源于土壤直接 $N_2O$ 排放、电力和地膜, 三者分别占总碳排放的 24.21%、23.78%和 19.97%; 冬小麦-夏玉米模式的碳排放主要来源于电力(45.60%)和土壤直接 $N_2O$ 排放(23.21%), 两者合计占总碳排放的 68.81%。两种种植模式中, 电力和土壤直接 $N_2O$ 排放对周年碳排放贡献较大, 表明可通过降低电力消耗和土壤直接 $N_2O$ 排放来减少碳排放(图 4)。

## 3　讨论

### 3.1　产量及经济效益

研究表明在河北地区春播绿豆的平均产量可达 1 682.4 kg·hm$^{-2}$[23], 与本研究中春绿豆籽粒产量(1 760.1 kg·hm$^{-2}$)相当, 但是在本研究中由于春绿豆播种较早(4 月 1 日), 气温较低且土壤墒情一般, 一定程度上影响了绿豆出苗。此外, 由于绿豆无限结荚特性, 夏天光热条件充足, 绿豆可以无限生长, 但是为了后期不压缩玉米的生育期, 绿豆在收获时有部分豆荚尚未完全成熟, 这说明春绿豆尚有很大增产潜力。此外, 春绿豆-夏玉米模式的夏玉米产量比该区域常规冬小麦-夏玉米模式的夏玉米产量低 26.1%[24], 主要是由于该模式夏玉米比常规冬小麦-夏玉米模式的夏玉米晚播约 21 d, 导致玉米生育期积温减少, 光热资源不足, 致使玉米干物质积累量

**表 4　春绿豆-夏玉米和冬小麦-夏玉米轮作模式的单位面积碳排放和碳足迹**

Table 4　Carbon emission and footprint of spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize rotation systems

| 种植模式 Rotation system | 作物生长季 Crop season | 单位面积碳排放 Carbon emission per unit area [kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$] | 单位产量碳足迹 Carbon footprint per unit yield [kg($CO_2$-eq)·kg$^{-1}$] | 单位产值碳足迹 Carbon footprint per unit output value [kg($CO_2$-eq)·¥$^{-1}$] |
|---|---|---|---|---|
| 春绿豆-夏玉米 Spring mung bean-summer maize | 非玉米季 Non-maize season | 2 867.0 | 1.65±0.12 | 0.16±0.01 |
| | 玉米季 Maize season | 1 775.1 | 0.30±0.01 | 0.20±0.02 |
| | 周年 Rotation system | 4 642.1 | 0.44±0.02 | 0.17±0.01 |
| 冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize | 非玉米季 Non-maize season | 4 349.5 | 0.55±0.03 | 0.40±0.03 |
| | 玉米季 Maize season | 2 913.3 | 0.26±0.01 | 0.26±0.02 |
| | 周年 Rotation system | 7 262.8 | 0.38±0.01 | 0.33±0.02 |

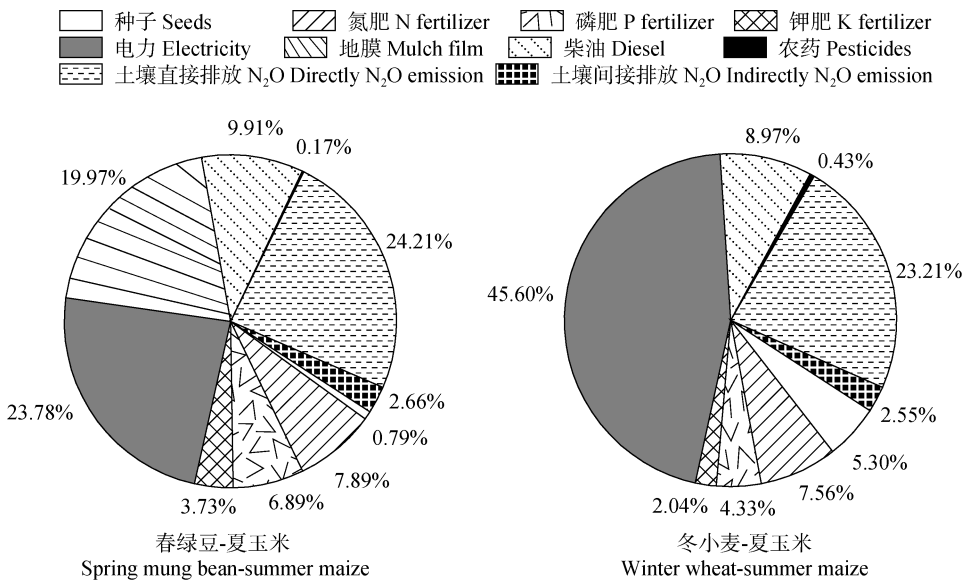


**图 4** 春绿豆-夏玉米和冬小麦-夏玉米轮作模式的碳排放来源

Fig. 4 Composition of carbon emission in spring mung bean-summer maize and winter wheat-summer maize rotation systems

下降并使产量降低[25]。此外，由于前茬绿豆压缩了玉米生育期，选用的夏玉米品种为青贮玉米品种‘永玉 2 号’。于德花等[26]研究表明，在该地区夏播青贮玉米的籽粒产量约为 8 000 kg·hm$^{-2}$，明显低于常规夏玉米产量。综上所述，未来应进一步探索适合生育期更短的高产春绿豆和夏玉米品种，同时通过水肥管理优化，如在作物生长和干物质积累关键时期进行灌溉追肥[27]，提高春绿豆-夏玉米模式的总产量。

经济效益是农民选择种植模式的决定因素之一[28]。由于当地实行冬季休耕补贴政策(7 500 ¥·hm$^{-2}$)，春绿豆-夏玉米模式的周年净收入比冬小麦-夏玉米模式高 20.2%，与张晶等[29]通过调研获得的结果相符。如果不计休耕补贴，春绿豆-夏玉米模式的周年净收入比冬小麦-夏玉米模式低 13.1%，说明政府补贴政策是推动新型种植制度构建与推广、提高农民收入的重要途径。张凯[30]研究表明华北平原常规冬小麦-夏玉米模式年收益为 8 200 ¥·hm$^{-2}$，本研究中两种模式的经济效益均偏高，主要是因为在经济效益核算时，并未计算人工投入成本，且大田经济作物的产量和单价受年际间气候和市场影响较大[31]。因此，虽然春绿豆-夏玉米模式的产量和当量产量仍比冬小麦-夏玉米模式低，但在政府实行冬季休耕补贴政策下，该模式的经济收益较高，能够满足农民的收入需求。

### 3.2 碳排放与碳足迹

农业生产中单位面积碳排放受生产区域、作物品种、气候、土壤、管理措施及生产规模等一系列因素影响[19]。因此，在碳排放及碳足迹评价时需要综合考虑多个因素。Nelson 等[32]计算了美国主要农作物的单季碳足迹，得出小麦、玉米和水稻(*Oryza sativa* L.)等常规作物的碳足迹介于 91.1~365.3 kg ($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$; Hillier 等[33]研究发现英格兰和威尔士冬小麦生产的碳足迹为 1 005 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$。本研究中两种模式下单季作物(冬小麦、春绿豆、夏玉米)的单位面积碳排放为 1 775.14~4 349.47 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$，显著高于发达国家单季作物碳足迹水平，主要归因于我国农业生产的化肥、灌溉用电及其他农资投入量均高于发达国家，而作物产量却低于发达国家。此外，我国农资生产所耗能源主要来源于煤炭，生产效率较低、碳排放系数高，进一步导致了农业生产的碳排放高[34-35]。

不同研究中作物生产的碳排放量结果差异可能由于试验数据来源、碳排放因子选择和农业生产资料投入不同。本研究中，冬小麦-夏玉米模式周年碳排放量比史磊刚等[18]在华北平原的研究结果高，主要是因为后者的数据来源于调研，且碳排放因子采用的是 Lal[36]在 2004 年的研究结果，其中大部分农资投入的碳排放因子均低于本研究中采用刘巽浩等[17]近期的研究结果。春绿豆季碳排放量比冬小麦季低 34.1%，是由于冬小麦季灌溉耗电造成的碳排放较大造成。春绿豆-夏玉米模式中夏玉米季碳排放量比冬小麦-夏玉米模式低 39.1%，主要是因为该模式夏玉米抢墒播种未灌溉，而冬小麦-夏玉米模式的夏玉米播前进行了灌溉，消耗电能造成的碳排放占到了该季作物碳排放的 37.9%。

由于电力消耗造成的碳排放分别占两种模式总碳排放的 23.8%和 45.6%，与 Cui 等[37]研究结果类似，但明显高于 Meisterling 等[38]的研究成果。主要是因

为华北地区需要抽取深层地下水对作物进行灌溉，消耗的电力及由此产生的碳排放高于用地表水和浅层地下水进行灌溉[20]。因此，通过构建新型种植制度或发展滴灌节水技术来提高水分利用效率，减少地下水开采，可以有效降低农业生产的碳排放。农田直接 $N_2O$ 排放造成的碳排放是整个系统碳排放的重要贡献因子[39]，优化田间管理，减少 $N_2O$ 直接排放也是降低农业生产碳排放的重要途径。此外，优化氮肥生产工艺，降低氮肥生产中造成的碳排放以及减少氮肥投入，充分利用豆科作物的生物固氮作用，也能有效降低农业生产碳足迹[7,16,40-42]。

与单位面积碳足迹结果类似，春绿豆-夏玉米模式周年的单位产值碳足迹比传统冬小麦-夏玉米模式低 48.5%，且春绿豆和夏玉米季单季单位产值碳足迹分别比冬小麦-夏玉米模式对应单季低 60.0%和 20.0%，是由于春绿豆经济价值较高[43]，且生育期内无灌溉[44]，同时将该模式的休耕补贴[29]计算在了春绿豆季，如果春绿豆季不计算休耕补贴，其单位产值碳足迹约为 0.28 kg($CO_2$-eq)·¥$^{-1}$，是冬小麦季的 1.4 倍。此外，在夏玉米季，虽然春绿豆-夏玉米模式的夏玉米产量较低(8 775.8 kg·hm$^{-1}$)，但是由于夏玉米抢墒播种生育期内无灌溉，减少了消耗电能的碳排放使得其单位产值碳足迹低于冬小麦-夏玉米模式。因此，探索适宜的短生育期高产品种、优化水肥管理以及合理的政策引导，能有效提高春绿豆-夏玉米模式产量和经济效益，同时降低碳排放及碳足迹，有助于该模式的进一步推广。

## 4　结论

本研究得出在华北平原春绿豆-夏玉米模式的产量和经济当量产量均低于冬小麦-夏玉米模式，周年经济效益比冬小麦-夏玉米模式低 2 947 ¥·hm$^{-2}$。但在每年 7 500 ¥·hm$^{-2}$的冬季休耕补贴政策下，春绿豆-夏玉米模式周年净收入比冬小麦-夏玉米模式高 20.2%。春绿豆-夏玉米模式的周年碳排放和单位产值碳足迹分别为 4 642.1 kg($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$ 和 0.17 kg($CO_2$-eq)·¥$^{-1}$，比冬小麦-夏玉米模式分别低 36.1%和 48.5%。因此，在华北平原推广春绿豆-夏玉米种植模式，有助于节水、减排及增加作物多样性，但仍需补贴政策支持以保障农民收益。

## 参考文献 References


[1] 中国知网. 中国经济社会大数据研究平台[DB/OL]. 中国知网. [2019-12-27]. http://lib.tcu.edu.cn/info/1075/1911.htm
CNKI. China economic and social big data research platform[DB/OL]. CNKI. [2019-12-27]. http://lib.tcu.edu.cn/info/1075/1911.htm

[2] 裴宏伟, 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型农田氮素与水分循环[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 283–296
PEI H W, SHEN Y J, LIU C M. Nitrogen and water cycling of typical cropland in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 283–296

[3] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285–293
ZHONG Q, JU X T, ZHANG F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 285–293

[4] 张光辉, 连英立, 刘春华, 等. 华北平原水资源紧缺情势与因源[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 172–176
ZHANG G H, LIAN Y L, LIU C H, et al. Situation and origin of water resources in short supply in North China Plain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 172–176

[5] 张凯, 周婕, 赵杰, 等. 华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 328–336
ZHANG K, ZHOU J, ZHAO J, et al. Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 328–336

[6] 姜雨林, 陈中督, 逄晋松, 等. 华北平原不同轮作模式固碳减排模拟研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(1): 19–26
JIANG Y L, CHEN Z D, TI J S, et al. Simulation of soil carbon storage and greenhouse gas emission under different rotation systems in the North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(1): 19–26

[7] 曾昭海. 豆科作物与禾本科作物轮作研究进展及前景[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 57–61
ZENG Z H. Progress and perspective of legume-gramineae rotations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(1): 57–61

[8] FOX J E, GULLEDGE J, ENGELHAUPT E, et al. Pesticides reduce symbiotic efficiency of nitrogen-fixing rhizobia and host plants[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(24): 10282–10287

[9] DRURY C F, REYNOLDS W D, TAN C S, et al. Impacts of 49–51 years of fertilization and crop rotation on growing season nitrous oxide emissions, nitrogen uptake and corn yields[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2014, 94(3): 421–433

[10] GAN Y T, HAMEL C, O'DONOVAN J T, et al. Diversifying crop rotations with pulses enhances system productivity[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14625

[11] ZHANG K, ZHAO J, WANG X Q, et al. Estimates on nitrogen uptake in the subsequent wheat by above-ground and root residue and rhizodeposition of using peanut labeled with $^{15}N$ isotope on the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(3): 571–579

[12] BEHNKE G D, ZUBER S M, PITTELKOW C M, et al. Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 261: 62–70

[13] ZHAO J, YANG Y D, ZHANG K, et al. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2020, 245: 107659

[14] 段义忠, 张雄, 亢福仁, 等. 绿豆抗旱指标鉴选与评价[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 256–261
DUAN Y Z, ZHANG X, KANG F R, et al. Evaluation and selection of drought resistance of mung bean (*Vigna radiate* L.)[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 256–261

[15] 王上, 郑瑛, 杨国威, 等. 黑龙港低平原地区绿豆高产品种筛选[J]. 河北农业科学, 2019, 23(2): 79–85
WANG S, ZHENG Y, YANG G W, et al. Screening of high-yield mungbean varieties in Heilonggang Low Plain area[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2019, 23(2): 79–85

[16] GAN Y T, LIANG C, CHAI Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production[J]. Nature Communications, 2014, 5: 5012

[17] 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

[18] 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9): 93–98
SHI L G, CHEN F, KONG F L, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China Plain[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(9): 93–98

[19] 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 83–92
WANG Z B, WANG M, CHEN F. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(1): 83–92

[20] LIU K, JOHNSON E N, BLACKSHAW R E, et al. Improving the productivity and stability of oilseed cropping systems through crop diversification[J]. Field Crops Research, 2019, 237: 65–73

[21] 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

[22] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Tokyo, Japan: IGES, 2006

[23] 范保杰, 刘长友, 曹志敏, 等. 绿豆新品种冀绿 13 号选育及丰产稳产性分析[J]. 河北农业科学, 2017, 21(2): 92–95
FAN B J, LIU C Y, CAO Z M, et al. Breeding and productivity analysis of a new mung bean variety Jilv No.13[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2017, 21(2): 92–95

[24] GAO F, LI B, REN B Z, et al. Effects of residue management strategies on greenhouse gases and yield under double cropping of winter wheat and summer maize[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 1138–1146

[25] 王韵翔, 吴裕如, 王承, 等. 播期对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 45(5): 461–465
WANG Y X, WU Y R, WANG C, et al. Effects of sowing dates on the growth and yield for summer maize varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2019, 45(5): 461–465

[26] 于德花, 陈小芳, 毕云霞, 等. 种植密度对不同株型青贮玉米产量及相关性状的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(6): 1465–1471
YU D H, CHEN X F, BI Y X, et al. Effect of planting density on yield and related traits of silage maize with different plant types[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(6): 1465–1471

[27] 周琦, 张富仓, 李志军, 等. 施氮时期对夏玉米生长、干物质转运与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 76–82
ZHOU Q, ZHANG F C, LI Z J, et al. Effects of nitrogen application at different stages on growth, yield, and dry matter transportation of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 76–82

[28] 张兵, 李丹, 张宁. 黄淮海地区大豆主要种植模式及效益分析[J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 987–992
ZHANG B, LI D, ZHANG N. Soybean planting patterns and benefit analysis of Huang-Huai-Hai region[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 987–992

[29] 张晶, 史怡宁, 韩沁沁. 我国轮作休耕政策实施状况与优化研究[J]. 黑龙江农业科学, 2019, (6): 142–147
ZHANG J, SHI Y N, HAN Q Q. Implementation status and optimization research of China's crop rotation and fallow policy[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019, (6): 142–147

[30] 张凯. 华北平原禾豆复种水氮利用与氮转移研究——以小麦-花生复种为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
ZHANG K. Water/nitrogen utilization and nitrogen translocation of cereal-legume multi-cropping systems in the North China Plain: A case study on wheat-peanut double cropping[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017

[31] 李国祥. 2003 年以来中国农产品价格上涨分析[J]. 中国农村经济, 2011, (2): 11–21
LI G X. Analysis of the increase of Chinese agricultural product price since 2003[J]. Chinese Rural Economy, 2011, (2): 11–21

[32] 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

[33] HILLIER J, WHITTAKER C, DAILEY G, et al. Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales: Integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2009, 1(4): 267–281

[34] GRASSINI P, ESKRIDGE K M, CASSMAN K G. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2918

[35] GAN Y T, LIANG C, CAMPBELL C A, et al. 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

[36] LAL R. Carbon emission from farm operations[J]. Environment International, 2004, 30(7): 981–990

[37] CUI J X, SUI P, WRIGHT D L, et al. Carbon emission of maize-based cropping systems in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 300–308

[38] MEISTERLING K, SAMARAS C, SCHWEIZER V. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(2): 222–230

[39] 王钰乔, 赵鑫, 李可嘉, 等. 华北平原小麦生产的碳足迹变化动态的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(S2): 258–261
WANG Y Q, ZHAO X, LI K J, et al. Dynamics of carbon footprint for wheat production in the North China Plain[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(S2): 258–261

[40] 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, 2015, 153(3): 422–431

[41] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217–227

[42] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8375–8380

[43] 武玉环. 绿豆主产区农户生产决策行为研究——以吉林白城为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017
WU Y H. Behavior analysis of farmers production decision-making in main mung bean-producing areas——take Baicheng of Jilin Province as an example[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017

[44] 张丽华, 姚艳荣, 范保杰, 等. 不同基因型夏播绿豆田间耗水特性研究[J]. 河北农业科学, 2013, 17(5): 16–20
ZHANG L H, YAO Y R, FAN B J, et al. Study on the character of water deprivation of different genenal types summer sowing mung bean in field[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2013, 17(5): 16–20