

Calculation of Farmland Ecosystem Carbon Footprint and Analysis of Influencing Factors at County Level in Plateau Mountainous Area

—Taking Luliang County as an Example

Xinyu Duan¹, Mingcan Luo^{2*}, Guolan Chen², Jiancheng Chen³

¹Financial Planning Office, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

²Green Development Research Institute, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

³Department of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing

Email: 1030108090@qq.com, *399909876@qq.com

Received: Jul. 5th, 2020; accepted: Jul. 28th, 2020; published: Aug. 4th, 2020

Abstract

In order to explore the low-carbon agriculture development approach in plateau mountainous area, this paper taking a typical plateau mountain county—Luliang county as the research object, based on the statistical data of 2014-2018, the carbon emission, carbon absorption and carbon footprint of its farmland ecosystem are estimated, and the factors affecting the carbon footprint are analyzed. The results show that: (1) carbon emissions and carbon sink of farmland ecosystem in 11 townships (towns and overseas Chinese management region) had obvious differences in Luliang County; Damogu Town was the most carbon emission township with 53.39 thousand tons in the five-year cumulative carbon emissions; the smallest was Chinese management region with 6.53 thousand tons; and Sancha River Town was the most carbon sink town with 234.53 thousand tons in the five-year cumulative carbon sink, the smallest was overseas Chinese management region with 18.58 thousand tons; (2) Damogu Town was the most carbon footprint town with 4611.19 hm² in the five-year total, and the smallest was overseas Chinese management region with 1006.23 hm²; (3) there was a positive correlation between carbon sink and following factors, namely the application amount of chemical fertilizers, the amount of pesticides, the use of agricultural membranes, the agricultural mechanical power in total and effective irrigation area, and a negative correlation to the total crop yield; (4) to reduce the carbon footprint of its farmland ecosystem, for Luliang County, following measures need to be taken, adjustment of the agricultural industrial structure, reduction of the use of agricultural chemicals such as chemical fertilizers, increase of the input of agricultural infrastructure and improvement of the yield and quality of crops.

*通讯作者。

Keywords

Plateau Mountainous Area, Farmland, Carbon Footprint, Luliang County

高原山区县域农田生态系统碳足迹计算及影响因素分析

——以陆良县为例

段昕好¹, 罗明灿^{2*}, 陈国兰², 陈建成³

¹西南林业大学计财处, 云南 昆明

²西南林业大学绿色发展研究院, 云南 昆明

³北京林业大学经济管理学院, 北京

Email: 1030108090@qq.com, *399909876@qq.com

收稿日期: 2020年7月5日; 录用日期: 2020年7月28日; 发布日期: 2020年8月4日

摘要

为探索高原落后山区的低碳农业发展途径, 本文选择典型高原山区县陆良县为研究对象, 以2014~2018年统计数据为基础, 对其农田生态系统碳排放、碳吸收和碳足迹进行估算, 并进行了影响碳足迹的因素分析。结果表明: (1) 陆良县11个乡镇(镇、华侨管理区)的农田生态系统碳排放量和碳吸收量存在着明显差异, 碳排放量最多的大莫古镇5年累计碳排放量53.39千t, 最小的华侨管理区只有6.53千t。碳吸收最多的三岔河镇5年累计碳吸收量234.53千t, 最小的华侨管理区只有18.58千t; (2) 碳足迹最多的大莫古镇五年累计为4611.19 hm², 最小的华侨管理区只有1006.23 hm²; (3) 碳足迹与化肥施用量、农药施用量、农膜使用量、农业机械总动力和有效灌溉面积呈正相关, 与农作物总产量呈负相关; (4) 要减小其农田生态系统的碳足迹, 陆良县需要采取调整农业产业结构、减少化肥等农用化学品的使用量、加大农业基础设施的投入和提高农作物产量与品质等措施。

关键词

高原山区, 农田, 碳足迹, 陆良县

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 气候变化及其引起气候变暖影响因素是全球环境变化的热点研究问题之一。碳循环、碳排放、碳足迹、低碳农村发展等研究成为当前国内外学术界研究的热点[1] [2] [3] [4]。碳足迹是对人为干扰引起

的 CO₂ 排放量的度量,同时也可以反映人类活动的生态效应,因此作为衡量人类活动碳排放的有效方法,“碳足迹”越来越成为关注的焦点。美国加州环保署委托伯克利大学设计了碳足迹计算器[5],我国一些学者也从不同角度对中国碳足迹进行了研究,他们从碳足迹理论与核算方法、碳足迹与环境治理、碳足迹改善等方面开展了碳足迹研究的有益探索,取得了可观的研究成果[6] [7] [8] [9]。农业作为人类活动与自然交织频繁行业,日益成为世界上碳排放增长的主要来源之一。中国是农业大国,农田生态系统碳排放是农业碳排放的重要部分,日益成为影响中国农业可持续发展的限制因素。综观当前我国碳足迹的研究中,城镇碳足迹的研究已经处于一个相对成熟的阶段,而对于农村地区而言,针对农村生产、生活碳足迹的研究还尚显缺乏。研究内容也多以大尺度的区域以及能源消费视角的产业碳足迹等为主。对西部高原欠发达山区的小微尺度的农业碳足迹研究相对较少。本文选取云南省高原山区的陆良县作为研究对象,研究其农田生态系统碳足迹及碳足迹影响因素,旨在为该县调整农业结构、发展低碳农业,实现农业可持续发展提供积极的参考。

2. 研究区概况

陆良县地处云南省东部,全县总面积 1989.47 平方千米,坝区面积 771.99 平方千米,占总面积的 38.80%,四面环山,中间是开阔平坦的湖积盆地,是云南省第一大高原平坝。平坝区平均海拔 1800 米左右,全县海拔在 1640~2690 米之间。全县辖中枢纽镇、马街镇、三岔河镇、板桥镇、芳华镇、召夸镇、大莫古镇、小百户镇、活水乡、龙海乡共 10 个乡镇和 1 个华侨管理区。

陆良县是以农业为支柱产业的高原山区县,农耕地开发程度较高,素有“滇中粮仓”的美誉。2019 年,完成农林牧渔总产值 113.88 亿元,全年农村经济总收入达 111.6 亿元;农村常住居民人均可支配收入 16266 元,农民人均生活消费支出 10105 元。

3. 研究方法数据来源

3.1. 碳足迹估算

3.1.1. 农田生态系统碳足迹边界确定

本文估算农田生态系统碳足迹的边界确定为:碳排放包括化肥施用、农药施用、农膜使用、农机使用、农田灌溉,碳吸收包括水稻、玉米、烤烟、蔬菜等农作物的碳吸收。

3.1.2. 农田生态系统碳排放量估算方法

本文分别选取化肥施用、农药施用、农膜使用、农业机械应用以及农业灌溉过程中的碳排放作为农田生态系统碳排放来源,对其进行碳排放计算。测算公式为:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (1)$$

式 2-1 中: E 、 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 分别为农田碳排放总量(kg),以及化肥施用、农药施用、农膜使用、农业机械应用、农业灌溉所引起的碳排放量(kg),其中分项的计算公式(1-1 至 1-4)如下:

$$E_1 = G_1 \times a \quad (1-1)$$

$$E_2 = G_2 \times b \quad (1-2)$$

$$E_3 = G_3 \times c \quad (1-3)$$

$$E_4 = (A_4 \times d) + (W_4 \times f) \quad (1-4)$$

$$E_5 = A_5 \times g \quad (1-5)$$

式中： $G_1, G_2, G_3, A_4, W_4, A_5$ 分别为化肥施用量(kg)，农药施用量(kg)，农膜使用量(kg)，农作物种植面积(hm^2)，农业机械总动力(kW)以及灌溉面积(hm^2)。 a, b, c, d, f, g 分别为化肥、农药、农膜、农作物、农业机械和灌溉的碳排放系数。其中化肥、农药、农膜、农作物、农业机械和灌溉的碳排放系数借用国内学者的研究成果，分别确定为： $a = 0.89 \text{ kg/kg}$ ； $b = 4.93 \text{ kg/kg}$ ； $c = 5.18 \text{ kg/kg}$ ； $d = 16.47 \text{ kg/hm}^2$ ； $f = 0.18 \text{ kg/kW}$ ； $g = 266.48 \text{ kg/hm}^2$ 。

3.1.3. 农田生态系统碳吸收量估算方法

结合各类农作物的产量、果实水分系数、根冠比系数以及经济系数等指标，对农田生态系统的碳吸收量进行估算。测算公式为：

$$W = \sum_{i=1}^n w_i = \sum_{i=1}^n (1 + R_i) \times (1 - V_i) \times K_i \times C_i / H_i \quad (2)$$

$$D = W/A = \sum_{i=1}^n W_i / A_i \quad (3)$$

式中： W ——区域农田生态系统碳吸收量(kg)； W_i ——第 i 类农作物的碳吸收量(kg)； n ——农作物的种类数，本文取 $n = 4$ ，分别测算水稻、玉米、烟叶以及蔬菜的碳吸收量。 R_i ——第 i 类农作物的根冠比系数； V_i ——第 i 类农作物果实的水分系数； K_i ——第 i 类农作物产量(kg)； C_i ——第 i 类农作物碳含量比重； H_i ——第 i 类农作物的经济系数(经济产量与生物产量的比值)； D ——为农田生态系统平均碳吸收强度(kg/hm^2)； A ——区域耕地面积(hm^2)。测算区域内主要农作物的根冠比系数，果实水分系数，含碳率及经济系数参照国内学者的研究成果[10]，见表 1。

Table 1. Estimation parameters of carbon absorption for different crops
表 1. 不同农作物的碳吸收估算参数

作物种类	含碳量(%)	果实水分系数(%)	根冠比系数	经济系数
水稻	41.70%	11.90%	0.6	0.49
玉米	46.40%	12.20%	0.16	0.46
烟叶	45%	15%	0.32	0.43
蔬菜	44.70%	90%	0.3	0.49

3.1.4. 农田生态系统碳足迹估算

碳足迹(C_E ，单位： hm^2)的计算公式为：

$$C_E = E/N_E \quad (4)$$

$$N_E = W/S \quad (5)$$

式中： C_E (hm^2)——吸收农田生态系统碳排放量所需要的植被面积， E ——农田生态系统的碳排放总量(kg)； N_E ——农田生态系统单位面积碳吸收量(kg/hm^2)； W ——农田生态系统中所有农作物的碳吸收量(kg)； S ——耕地面积(hm^2)。

当区域的耕地面积与其农田生态系统碳足迹相减差值为负数时，说明存在碳生态赤字(C_{ED} ，单位： hm^2)，农田生态系统的开发和利用不在其生态承载力范围之内；反之则是碳生态盈余(C_{ER} ，单位： hm^2)。测算公式为：

$$C_{ED} = C_E - S (C_E \geq S) \quad (6)$$

$$C_{ER} = S - C_E (C_E \leq S) \quad (7)$$

3.2. 影响因素分析方法

本文运用皮尔森相关分析对农田生态系统碳足迹及其因素的影响性进行判别。分析方法为：

(1) 农田生态系统碳足迹(C_E , 单位: hm^2)作为因变量, 分别将化肥施用量(G_1 , 单位: 千 t)、农药施用量(G_2 , 单位: 千 t)、农膜使用量(G_3 , 单位: 千 t)、农业机械总动力(W_4 , 单位: 千 kW)、农田有效灌溉面积(A_5 , 单位: 千 hm^2)和农作物总产量(K , 单位: 千 t)作为自变量。

(2) 假设碳足迹与各因素(因变量)之间以及各因素相互之间不存在相关性, 计算检验统计量的观测值和概率 P 值, 若显著性概率 P 值小于给定的显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则应拒绝原假设, 认为两总体之间存在显著的线性相关性; 反之若显著性概率 P 值大于给定的显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则应接受原假设, 认为两总体之间不存在显著的线性相关性。

(3) 计算陆良县碳足迹相关因素的简单相关数矩阵, 判别自变量和因变量之间是否存在显性的线性相关性。若存在, 则进一步进行线性回归。

(4) 判别分析因变量对自变量影响的相关性。

3.3. 数据来源

研究数据主要来源于 2014 年~2018 年《陆良县统计年鉴》, 包括陆良县 11 个乡镇、华侨管理区) 水稻、玉米、烟叶、蔬菜 4 种主要农作物的播种面积、总产量、全县农业生产中化肥、农药等农资投入品的总量, 各乡镇灌溉面积、耕地面积等数据。

4. 结果与分析

4.1. 农田生态系统碳排放量及特征

依据公式(1)及公式(1-1 至 1-5)和确定的碳排放系数, 计算陆良县及 11 个乡镇、华侨管理区) 2014~2018 年度的碳排放量, 见表 2, 表 3。

从表 2 可知, 2014 年~2018 年陆良县农田生态系统碳排放量总体呈逐年增长趋势, 从 2014 年的 68.49 千 t 增长至 2017 年的 78.57 千 t, 2018 年较 2017 年有所下降, 年碳排放总量为 71.63 千 t。化肥施用、农药施用、农膜使用、农业机械应用及农业灌溉引起的碳排放量皆与碳排放总量的变化趋势相同。

Table 2. Luliang County's carbon emissions from farmland ecosystems from 2014 to 2018 (unit: 10^3 t)

表 2. 陆良县 2014 年~2018 年农田生态系统碳排放量(单位: 10^3 t)

年份	化肥碳排放量	农药碳排放量	农膜碳排放量	农业机械应用碳排放量	农业灌溉碳排放量	总碳排放量
2014 年	35.83 (52.32%)	6.27 (9.16%)	18.47 (26.96%)	1.26 (1.85%)	6.66 (9.72%)	68.49 (100%)
2015 年	39.31 (53.46%)	6.45 (8.77%)	19.68 (26.76%)	1.29 (1.76%)	6.80 (9.25%)	73.55 (100%)
2016 年	42.51 (54.81%)	6.94 (8.94%)	19.94 (25.71%)	1.30 (1.67%)	6.88 (8.86%)	77.56 (100%)
2017 年	42.81 (54.49%)	6.73 (8.57%)	20.82 (26.50%)	1.33 (1.69%)	6.88 (8.75%)	78.57 (100%)
2018 年	37.78 (52.74%)	6.07 (8.48%)	19.48 (27.20%)	1.31 (1.83%)	6.98 (9.75%)	71.63 (100%)
合计	198.24 (53.61%)	32.46 (8.78%)	98.39 (26.61%)	6.49 (1.76%)	34.20 (9.24%)	369.79 (100%)

注: 表中括号内数据为碳排放量占比。

Table 3. Luliang County's cumulative carbon emissions (unit: 10^3 t) and carbon intensity (unit: kg/hm^2) of farmland ecosystems in various townships (towns, overseas Chinese management areas) from 2014 to 2018**表 3.** 陆良县 2014~2018 年各乡(镇、华侨管理区)累计农田生态系统碳排放量(单位: 10^3 t)及碳强度(单位: kg/hm^2)

单位	中枢镇	马街镇	三岔河镇	板桥镇	芳华镇	召夸镇	大莫古镇	小百户镇	活水乡	龙海乡	华侨管理区
累计碳排放量	10.25	25.54	37.02	46.16	49.72	39.85	53.39	38.41	30.66	32.26	6.53
碳排放强度	1350.95	1064.22	1858.79	2597.90	5465.43	3117.16	3631.18	2825.52	3503.97	3825.13	2293.80

从表 3 可知, 陆良县 11 个乡(镇、华侨管理区) 2014~2018 年累计农田生态系统碳排放量地区差异较为明显。最多的大莫古镇 5 年累计碳排放量 53.39 千 t, 占全县碳排放总量的 14.44%, 最小的华侨管理区只有 6.53 千 t, 两者相差 46.86 千 t, 前者是后者的 8.18 倍。其碳排放量的次序依次为大莫古镇 > 芳华镇 > 板桥镇 > 召夸镇 > 小百户镇 > 三岔河镇 > 龙海乡 > 活水乡 > 马街镇 > 中枢镇 > 华侨管理区。因陆良县各乡镇耕地面积差异显著, 为了进一步分析各乡镇的碳排放量, 论文测算了各乡镇年平均碳排放强度。从各乡镇的平均碳排放强度看, 各乡镇年均碳排放强度差异明显, 年均碳排放强度最高的是芳华镇, 其年均碳排放强度为 $5465.43 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 最低的是马街镇, 其年均碳排放强度为 $1064.22 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 前者是后者的 5.14 倍。年平均碳排放强度依次为: 芳华镇 > 龙海乡 > 大莫古 > 活水乡 > 召夸镇 > 小百户镇 > 板桥镇 > 华侨管理区 > 三岔河 > 中枢镇 > 马街镇。从各乡镇年平均碳排放强度看, 山区、半山区乡镇的碳排放强度高于坝区乡镇, 其主要原因为: 山区、半山区乡镇受自然环境、经济发展水平等因素的限制, 农业发展方式多以传统农业为主, 对化肥、农药及农膜等农资用品的使用效率较低, 受自然环境的限制农田有效灌溉面积较少, 农业机械应用较少, 致使山区、半山区乡镇碳排放强度较高。而坝区乡镇农业现代化水平相对较高, 设施农业、半设施农业应用广泛, 因地制宜合理使用化肥、农药等, 农业机械化水平也相对较高。

4.2. 农田生态系统碳吸收量及特征

按照陆良县 11 个乡镇水稻、玉米、烟叶、蔬菜 4 种主要农作物 2014 年~2018 年产量和不同农作物的碳吸收估算参数(表 1), 采用农田生态系统碳吸收量估算公式(2)和(3), 计算陆良县及 11 个乡(镇、华侨管理区)农田生态系统 2014~2018 年碳吸收量, 见表 4, 表 5。

Table 4. Luliang County's carbon absorption of farmland ecosystem from 2014 to 2018 (unit: 10^3 t)**表 4.** 陆良县 2014 年~2018 年农田生态系统碳吸收量(单位: 10^3 t)

年份	水稻碳吸收量	玉米碳吸收量	烟叶碳吸收量	蔬菜碳吸收量	总碳吸收量
2014 年	125.18 (39.92%)	117.94 (37.62%)	29.85 (9.52%)	40.57 (12.94%)	313.54 (100%)
2015 年	87.54 (28.82%)	142.35 (46.87%)	28.1 (9.25%)	45.73 (15.06%)	303.72 (100%)
2016 年	91.06 (29.22%)	143.29 (45.98%)	27.51 (8.83%)	49.8 (15.98%)	311.66 (100%)
2017 年	90.33 (29.26%)	134.28 (43.49%)	28.19 (9.13%)	55.93 (18.12%)	308.73 (100%)
2018 年	69.19 (25.48%)	124.63 (45.90%)	23.19 (8.54%)	54.54 (20.08%)	271.55 (100%)
合计	463.30 (30.70%)	662.49 (43.90%)	136.84 (9.07%)	246.57 (16.34%)	1509.20 (100%)

表中括号内数据为碳排放量占比。

Table 5. Cumulative farmland ecosystem carbon sinks (unit: 10^3 t) and carbon sink intensity (unit: kg/hm^2) of various townships (towns, overseas Chinese management areas) from 2014 to 2018 in Luliang County**表 5.** 陆良县 2014~2018 年各乡(镇、华侨管理区)累计农田生态系统碳汇量(单位: 10^3 t)及碳汇强度(单位: kg/hm^2)

单位	中枢镇	马街镇	三岔河镇	板桥镇	芳华镇	召夸镇	大莫古镇	小百户镇	活水乡	龙海乡	华侨管理区
累计碳吸收量	62.19	155.61	234.53	196.01	140.12	119.5	171.38	152.13	163.84	95.31	18.58
碳汇强度	1350.95	1064.22	1858.79	2597.90	5464.43	3117.16	3631.18	2825.52	3503.97	3825.13	2293.8

从表 4 可见, 2014 年~2018 年陆良县农田生态系统碳吸收量总体呈现逐年减少的趋势。从 2014 年的 313.54 千 t 下降至 2018 年碳吸收总量下降至 271.55 千 t。从各类农作物 2014 年~2018 年碳吸收总量变化来看, 水稻的碳吸收量下降明显, 从 2014 年 125.18 千 t, 下降至 2018 年 69.19 千 t, 这与陆良县水田面积逐年减少的事实相符。玉米的碳吸收量缓慢增长后有所下降, 蔬菜的碳吸收量呈现逐年增长的趋势, 这与陆良县着力打造蔬菜供给大县蔬菜种植面积逐年增长相符, 烟叶的碳吸收量变化波动较小。

从碳吸收量的结构来看, 2014 年~2018 年陆良县农田生态系统中玉米的碳吸收量最大, 5 年累计碳吸收量为 662.49 千 t, 占累计碳吸收总量的 43.90%; 其次是水稻, 5 年累计碳吸收量为 463.30 千 t, 占累计碳吸收总量的 30.70%, 再次分别是蔬菜和烟叶, 5 年累计碳吸收量分别为 246.57 千 t 及 136.84 千 t, 占累计碳吸收总量的 16.34% 及 9.06%。

从表 5 可见, 陆良县 11 个乡(镇、华侨管理区) 2014~2018 年累计农田生态系统碳吸收量地区差异较为明显。最多的三岔河镇 5 年累计碳吸收量 234.53 千 t, 占全县累计碳吸收总量的 15.54%, 最小的华侨管理区只有 18.58 千 t, 两者相差 215.95 千 t, 前者是后者的 12.62 倍。其碳排放量的次序依次为: 三岔河镇 > 板桥镇 > 大莫古镇 > 活水乡 > 马街镇 > 小百户镇 > 芳华镇 > 召夸镇 > 龙海乡 > 中枢镇 > 华侨管理区。因陆良县各乡镇耕地面积差异显著, 为了进一步分析各乡镇的碳吸收量, 论文测算了各乡镇年平均碳吸收强度。从各乡镇的平均碳吸收强度看, 年均碳吸收强度最高的是活水乡, 其年均碳吸收强度为 $18724.02 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 最低的是马街镇, 其年均碳排放强度为 $6485.28 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 前者是后者的 2.89 倍。年平均碳排排放强度依次为: 活水乡 > 芳华镇 > 三岔河镇 > 大莫古镇 > 龙海乡 > 小百户镇 > 板桥镇 > 召夸镇 > 中枢镇 > 华侨管理区 > 马街镇。从各乡镇年平均碳吸收强度看, 碳吸收的强度与各乡镇的农作物种植结构相关, 以水稻、玉米等粮食作物为主的乡镇碳吸收强度较大, 以蔬菜、烤烟等经济作物种植为主的乡镇碳吸收强度相对较小。

4.3. 碳足迹特征

根据表 2~表 5 的计算结果, 结合碳足迹计算公式(4)至(7)以及收集整理的陆良县 2014 年~2018 年各乡镇耕地面积, 计算得到陆良县 2014 年~2018 年农田生态系统碳足迹、单位面积碳足迹以及碳生态盈余差值, 见表 6 和表 7。

从表 6 可知, 2014 年~2018 年期间陆良县农田生态系统碳足迹总体呈逐年增长趋势, 从 2014 年 6090.11 hm^2 增长至 2018 年的 7359.86 hm^2 。在 2014 年~2018 年期间陆良县农田生态系统碳盈余量皆为正数, 说明陆良县对农田生态系统的开发及利用, 尚在其生态承载力范围之内, 这部分碳盈余量可以用于弥补工业等其他产业碳赤字。单位面积碳足迹是碳足迹与耕地面积的比值, 该指标是指吸纳农田生态系统年碳排放量所需要的植被面积占总耕地面积的比重。2014 年~2018 年陆良县农田生态系统单位面积碳足迹总体呈增长趋势, 说明随着化肥等农资用品的大量使用, 以及农业机械、农业灌溉的大量应用, 农田生态系统的碳汇功能正在逐年下降。单位农业 GDP 碳足迹是碳足迹与农业 GDP 的比值, 2014 年~2018

年陆良县农田生态系统单位农业 GDP 碳足迹呈逐年上升而后逐年下降趋势,说明陆良县每单位农业 GDP 所产生的 CO₂ 排放量随着经济的增长先上升后下降,能源利用效率随着经济增长在逐步提高,陆良县农业经济的增长在 2016 年后并未引起农田生态系统 CO₂ 的大量排放。

Table 6. Luliang County carbon footprint of farmland ecosystems from 2014 to 2018 (unit: hm²)
表 6. 陆良县 2014 年~2018 年农田生态系统碳足迹(单位: hm²)

年份	耕地面积	碳足迹	单位面积碳足迹	碳生态盈余	单位农业 GDP 碳足迹 (公顷/亿元)
2014 年	27879	6090.11	0.22	21788.89	141.50
2015 年	27897	6755.12	0.24	21141.88	153.41
2016 年	27898	6942.23	0.25	20955.77	159.88
2017 年	27901	7100.36	0.25	20800.64	132.05
2018 年	27899	7359.86	0.26	20539.14	130.92

Table 7. Cumulative carbon footprint and annual average carbon footprint per unit area of farmland ecosystems in various townships (towns and overseas Chinese management areas) from 2014 to 2018 in Luliang County (unit: hm²)

表 7. 陆良县 2014~2018 年各乡镇、华侨管理区农田生态系统累计碳足迹及单位面积年均碳足迹(单位: hm²)

单位	中枢镇	马街镇	三岔河镇	板桥镇	芳华镇	召夸镇	大莫古镇	小百户镇	活水乡	龙海乡	华侨管理区
累计碳足迹	1252.27	4229.88	3163.44	4008.26	4251.97	4611.19	3237.71	3171.94	1705.44	2883.89	1006.23
年均碳足迹	0.17	0.17	0.16	0.24	0.36	0.33	0.31	0.26	0.19	0.34	0.35

从表 7 可知,陆良县 11 个乡镇、华侨管理区) 2014~2018 年累计碳足迹地区差异较为明显。最多的大莫古镇五年累计为 4611.19 hm²,最小的华侨管理区只有 1006.23 hm²,两者相差 3604.96 hm²,前者是后者的 4.58 倍。其碳足迹的次序依次为大莫古镇 > 召夸镇 > 板桥镇 > 马街镇 > 小百户镇 > 芳华镇 > 三岔河镇 > 龙海乡 > 活水乡 > 中枢镇 > 华侨管理区。因陆良县各乡镇耕地面积差异显著,为了进一步分析各乡镇的碳足迹现状,论文测算了各乡镇单位面积年平均碳足迹。从各乡镇的平均碳足迹看,各乡镇年平均碳足迹差异不明显,年平均碳足迹最高的乡镇是芳华镇 0.36 hm²,最低的是三岔河镇 0.16 hm²。碳足迹较高的乡镇说明其农田生态系统的碳汇能力增速低于碳排放量的增速。相关影响因素将运用 SPSS 软件再做下一步探究。

4.4. 碳足迹影响因素分析

从表 8 可知,自变量化肥施用量、农药施用量、农膜使用量、农业机械总动力、有效灌溉面积、农作物产量与因变量(碳足迹)存在着显著相关关系。

将所有自变量与碳足迹(因变量),建立多元线性回归模型,对实验收集数据进行拟合。拟合所得的标准系数回归模型为:

$$C_E = 0.614G_1 + 0.140G_2 + 0.060G_3 + 0.323W_4 + 0.077A_4 - 0.050K \quad (R^2 = 0.610)$$

从回归模型可以看出,进行拟合优度检验后,因方程中存在多个解释变量,故参考调整后的判定系数($R^2 = 0.610$),说明化肥使用量、农药施用量、农膜使用量、农业机械总动力、有效灌溉面积和农作物

总产量这五个自变量解释了 61.0%的碳排放量的变化。碳足迹与化肥施用量、农药施用量、农膜使用、农业机械总动力和有效灌溉面积呈正相关，与农作物总产量呈负相关。在所有正向相关因素中，化肥使用量的标准系数绝对值最大(0.614)，说明化肥施用量对碳足迹的影响最大，即在其他因素不变的条件下，化肥施用量增加，碳足迹会增加，影响力次序依次为化肥施用量 > 农业机械应用 > 农药施用量 > 农膜使用量 > 有效灌溉面积。农作物总产量对碳足迹起到负向驱动作用，即在其他因素不变的条件下，农作物产量增加，碳足迹会减少。

Table 8. Multiple linear regression analysis on carbon footprint of farmland ecosystem in Luliang County
表 8. 陆良县农田生态系统碳足迹多元线性回归分析结果

模型	标准化系数	显著性
化肥施用量	0.614	0.000
农药施用量	0.140	0.000
农膜使用量	0.060	0.000
农业机械总动力	0.323	0.002
有效灌溉面积	0.077	0.001
农作物产量	-0.050	0.000

5. 结论

(1) 陆良县 11 个乡镇(镇、华侨管理区)的农田生态系统碳排放量、碳吸收量与碳足迹区域差异明显。碳排放量最多的大莫古镇 5 年累计碳排放量 53.39 千 t，占全县碳排放总量的 14.44%，最小的华侨管理区只有 6.53 千 t，两者相差 46.86 千 t，前者是后者的 8.18 倍。年均碳排放强度最高的是芳华镇，其年均碳排放强度为 5465.43 kg/hm²；最低的是马街镇，其年均碳排放强度为 1064.22 kg/hm²，前者是后者的 5.14 倍。山区、半山区乡镇的碳排放强度高于坝区乡镇；碳吸收最多的三岔河镇 5 年累计碳吸收量 234.53 千 t，占全县累计碳吸收总量的 15.54%，最小的华侨管理区只有 18.58 千 t，两者相差 215.95 千 t，前者是后者的 12.62 倍。年均碳吸收强度最高的是活水乡，其年均碳吸收强度为 18724.02 kg/hm²；最低的是马街镇，其年均碳排放强度为 6485.28 kg/hm²，前者是后者的 2.89 倍。年均碳吸收强度与各乡镇农作物结构息息相关。碳足迹最多的大莫古镇五年累计为 4611.19 hm²，最小的华侨管理区只有 1006.23 hm²，两者相差 3604.96 hm²，前者是后者的 4.58 倍。年平均碳足迹最高的乡镇是芳华镇 0.36 hm²，最低的是三岔河镇 0.16 hm²。

(2) 碳足迹与化肥施用量、农药施用量、农膜使用量、农业机械总动力和有效灌溉面积呈正相关，与农作物总产量呈负相关。

(3) 陆良县目前还主要是以传统农业为主，靠农业的投入获得农业产量，农业是该县的重要经济来源。社会经济发展相较于发达县域还处于落后的状态，要减小其农业生态系统的碳足迹，首先需要调整农业产业结构，促进传统农业向现代生态农业的转化；其次是增施有机肥，减少化肥、农药等农用化学品的使用量；最后要加大农业基础设施的投入，选育优良农作物品种，提高产量和品质，增强其碳汇能力。

基金项目

国家社科基金“基于生态工程参与的贫困人口创业驱动机理与实现路径研究”(18BGL052)；云南省哲学社会科学重大项目“云南省绿色发展路径研究”(ZDZB201707)。

参考文献

- [1] 刘静暖, 于畅, 孙亚男. 低碳农业经济理论与实现模式探索[J]. 经济纵横, 2012(6): 64-67.
- [2] 田云. 中国低碳农业发展: 生产效率、空间差异与影响因素研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [3] 杨传明. 碳足迹研究综述与展望[J]. 管理现代化, 2015, 35(3): 127-129.
- [4] Dubey, A. and Lal, R. (2009) Carbon Footprint and Sustainability of Agricultural Production Systems in Punjab, India and Ohio, USA. *Journal of Crop Improvement*, **23**, 332-350. <https://doi.org/10.1080/15427520902969906>
- [5] 王微等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-79.
- [6] 沈体忠. 天门市农田生态系统碳足迹的测度分析[J]. 长江大学学报: 自科版, 2017, 14(14): 62-68.
- [7] 张鹏岩, 何坚坚, 庞博, 等. 农田生态系统碳足迹时空变化——以河南省为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 3050-3060.
- [8] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 28-34.
- [9] 田志会, 刘瑞涵. 基于京津冀一体化的农田生态系统碳足迹年际变化规律研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 167-173.
- [10] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究[J]. 河南农业科学, 2010(7): 40-44.