

DOI: 10.5846/stxb201805301190

李明琦, 刘世梁, 武雪, 孙永秀, 侯笑云, 赵爽. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素分析. 生态学报, 2018, 38(24): - .
Li M Q, Liu S L, Wu X, Sun Y X, Hou X Y, Zhao S. Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素分析

李明琦, 刘世梁*, 武雪, 孙永秀, 侯笑云, 赵爽

北京师范大学环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 农田碳足迹研究对农田生态系统管理与农业可持续发展具有重要意义, 也可表征农田扩展的生态影响程度。利用县域尺度统计数据与空间分析, 对云南省农田生态系统近 30 年的碳足迹的时空演变进行研究。结果表明: 1985—2015 年期间, 云南省农田生态系统碳排放年均增幅为 13.9%, 化肥施用引起的碳排放贡献率最大, 为 56%, 2015 年的化肥单位面积碳排放达到 331.6 kg/hm²。云南省农田生态系统碳吸收年均增幅为 3.04%, 稻谷的碳吸收比例最大, 为 41%, 然而, 玉米的碳吸收的增幅最大, 为 8.76%。云南省农田生态系统存在碳生态盈余, 且碳足迹总体呈现增长趋势, 年均增长率为 16.8%, 单位面积碳足迹随年份增加不断增长。从空间上看, 云南省农田生态系统碳排放、碳吸收在空间上均呈东南高、西北低的分布格局, 而碳足迹在空间上呈现东西部高、中部低的分布格局, 三者的空间差异和变化幅度差异都较大。

关键词: 云南农田生态系统; 碳排放; 碳吸收; 碳足迹

Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province

LI Mingqi, LIU Shiliang*, WU Xue, SUN Yongxiu, HOU Xiaoyun, ZHAO Shuang¹

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The study of farmland carbon footprint is of great significance to farmland ecosystem management and sustainable agricultural development. It can also characterize the ecological effects of farmland expansion. Based on the county-scale statistical data and spatial analysis, we studied the temporal and spatial changes of the carbon footprint of the Yunnan farmland ecosystem over the past 30 years. The results showed that: during the period from 1985 to 2015, the average annual increase of carbon emissions from farmland ecosystems in Yunnan Province was 13.9%. The contribution of carbon emissions from chemical fertilizer was the largest, accounting for 56%. In 2015, the carbon emissions per unit area reached 331.6 kg/hm². The average annual increase rate of carbon absorption of farmland ecosystems in Yunnan Province was 3.04%. Rice had the largest proportion of carbon absorption, accounting for 41% of the total carbon absorption, whereas corn had the fastest growth rate of carbon absorption at 8.76%. There was a carbon surplus in farmland ecosystems in Yunnan Province. Furthermore, the overall carbon footprint showed a growing trend with the average annual growth rate of 16.8%, and the carbon footprint per unit area increased continuously. From the spatial point of view, the carbon emission and carbon absorption of farmland ecosystems in Yunnan Province had similar spatial distributions, which appeared more in the southeast and less in the northwest. However, the carbon footprint was spatially distributed more in the east and west and less in the middle. Their most obvious features were large regional differences and variation range.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAK19B06); 国家自然科学基金(41571173)

收稿日期: 2018-05-30; 修订日期: 2018-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiliangliu@bnu.edu.cn

Key Words: Yunnan farmland ecosystem; carbon emission; carbon absorption; carbon footprint

CO₂是温室气体的重要组成部分,减少 CO₂的排放对减轻全球变暖有明显作用,研究碳足迹对控制 CO₂排放有重要意义。“足迹”将人类生存活动与土地资源联系在了一起^[1],其概念最早是由加拿大生态学家 William Ree 教授提出,并再后来由其学生完善,同时定义了生态足迹。而在生态足迹的基础上,又有人提出了碳足迹,碳足迹是对人为干扰引起的 CO₂排放量的度量^[2],也可以反映人类活动的生态效应,因此对不同人类活动的碳排放进行量化是极具意义的。

目前,足迹的相关研究是生态经济学的热点^[3],特别是极具代表性的生态足迹、水足迹和碳足迹。在超量碳排放对社会生态系统造成较大负面影响的今天,碳足迹的相关研究越来越受到重视。目前对碳足迹的研究尺度多集中于产品、国家和城市^[4],如 Subramanian 等对中国大陆、香港和印度的购物袋碳足迹进行了研究^[5];María 等研究了阿根廷生产的蜂蜜的碳足迹^[6];Brown 等研究了美国的 100 个城市的碳足迹^[7];Aichele 等计算了日本京都的碳足迹^[8];黄雨生等人研究中国各省份碳足迹与碳承载力^[9];孙建卫等基于投入产出分析研究了中国碳排放足迹^[10]。对不同产业类型的碳足迹研究也较为广泛,比如赵荣钦等分析了中国不同产业空间的碳排放强度及碳足迹^[11];Aaron 等对塑料制造业的碳足迹进行了研究^[12];Elisabeth 等研究了通过互联网销售电影的碳足迹^[13];Samah 等对法国葡萄园碳足迹进行了跟踪研究^[14]。在农业生产的碳排放研究中,也有学者进行了探讨,黄祖辉等研究了浙江省农业碳足迹^[15];王占彪等人对华北平原作物生产碳足迹做了分析^[16];田志会等人基于京津冀一体化研究了农田碳足迹^[17];陈慧等人研究了江苏省县域农业温室气体排放特征及演变趋势^[18];张军伟等人研究了我国粮食生产碳排放^[19];崔朋飞等人研究了中国农业碳排放的动态变化及影响因素^[20]。

但总体而言,在国内外众多学者的研究之下,目前研究城市生态系统多于农田生态系统,而农田生态系统的研究中,研究尺度基本上集中于省级和地级市,对县级地区研究因为资料缺乏等原因,研究相对较少。

耕地是最主要的土地利用类型之一,农业也是国民经济的主体,要探究人类干扰对生态系统的影响,将农田生态系统作为研究对象是极为可靠的。同时,在全球的碳循环中,陆地生态系统占据了重要地位,而农田生态系统是陆地生态系统不可分割的一部分,因此,研究农田生态系统的碳足迹具有重要意义。综上,研究农田生态系统的碳足迹,对于量化人类活动对生态系统的影响以及实现农业可持续发展有重大意义。

云南省是一个农业大省,近年来其耕地面积断增长,2015 年云南有 78% 的人口在农村,有 25% 的国民生产总值来源于农业^[21],所以研究云南农田生态系统碳足迹对云南省的农业绿色发展有重要意义,目前在云南省,对于县域尺度的农田生态系统的碳足迹的时空变化仍未见报道。本文利用 ArcGIS 等空间分析,云南省为研究对象,通过对县级市农田生态系统的定量计算,分别对农业碳排放、碳吸收和碳足迹开展时空变化分析,为云南省未来农业发展方向和生态保护通过科学依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

云南省位于中国西南的边陲,地处低纬高原,地势北高南低,水平方向上纬度增加伴随了垂直方向上的海拔增高,因此其大部分地区的平均温度由北向南递增^[22]。云南省降水有明显的干湿季,湿季为 5—10 月,降水量约为全年的 85%,而干季为 11 月至次年 4 月,降水量只占 15%。

云南省总面积约 39 万 km²,占全国面积 4.11%,在全国各省级行政区中面积排名第 8。云南省由于气候变化较大,农田作物种类丰富,作物从一年一熟到两年三熟,农作物播种面积不断扩大。目前,全省耕地面积约 620.78 万 hm²,粮食播种面积约 446.36 万 hm²,其中稻谷播种面积为 68.36 万 hm²,小麦播种面积为 37.54 万 hm²,玉米播种面积为 171.77 万 hm²,豆类播种面积为 59.9 万 hm²,薯类播种面积为 68.56 万 hm²。

30 年来,云南省农田面积总体上呈扩张趋势,由 1985 年的 278 万 hm² 扩增至 2015 年的 621 万 hm²,增长

了两倍以上。根据中国农业统计资料^[23],云南省耕地面积在 1990—2000 年间突增,由 289 万 hm^2 增长到 642 万 hm^2 ;根据《中国统计年鉴》^[24],云南省耕地面积在 2007 年有所减少,为 607 万 hm^2 ,随后又开始缓慢增加。在这期间,云南省的农作物种类也产生了变化,农业种植整体上有从粮食作物向经济作物转变的趋势^[25],比如小麦、稻谷等种植面积有所减少,而橡胶等经济作物种植面积不断增加。随着农业科技的发展,化肥、机械的投入使用不断增加。云南化肥施用量由 1985 年的 40.3 万 t 增加到 2015 年的 231 万 t,增长了 4.7 倍,而同期全国的化肥施用量增长了 2.4 倍,说明云南省化肥施用的增长速率相对全国来说是非常快的。此外,农业机械总动力在 1985—2015 年期间增长了 6.6 倍,同期全国增长了 4.3 倍,云南农业机械总动力占全国比例由 1985 年的 2.10% 增长到 2015 年的 2.98%,均说明云南省农机的增长速率较全国而言是非常快的。

1.2 数据来源

研究数据来自云南省各市统计年鉴、《中国农村统计年鉴》^[26]和其他统计数据。对个别缺失数据按照历年的平均比例来计算。研究的时间跨度为 1985 年至 2015 年,时间间隔为 5 年。

2 研究方法

2.1 农田生态系统碳排放量估算方法

农田生产过程中会使用大量化肥、农药和其他生产工具,从而带来大量的碳排放,本研究选取化肥生产使用过程、农药生产使用过程、农膜生产使用过程、农业机械消耗燃料过程、农业灌溉过程作为农田生态系统碳排放来源,对其进行碳排放计算,计算公式^[10]如下:

$$E = E_f + E_p + E_m + E_e + E_i \quad (1)$$

式中: E 、 E_f 、 E_p 、 E_m 、 E_e 、 E_i 分别为农田碳排放总量(kg)、化肥施用、农药施用、农膜生产使用、农业机械应用、农业灌溉所引起的碳排放量(kg)^[27]。其中分项的计算公式如下。

$$E_f = G_f \times A \quad (2)$$

$$E_p = G_p \times B \quad (3)$$

$$E_m = G_m \times C \quad (4)$$

$$E_e = (A_e \times D) + (W_e \times F) \quad (5)$$

$$E_i = G_i \times G \quad (6)$$

式中, G_f 为化肥使用量(kg); G_p 为农药使用量(kg); G_m 为农膜使用量(kg); A_e 为农作物种植面积(hm^2); W_e 为农业机械总动力(kW); A_i 为灌溉面积(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,参考相关文献^[1]研究,确定数值如下:A=0.89 kg/kg;B=4.93 kg/kg;C=5.18 kg/kg;D=16.47 kg/ hm^2 ;F=0.18 kg/kW;G=266.48 kg/ hm^2 。

2.2 农田生态系统碳吸收量估算

为定量计算云南省不同农作物的碳吸收量,需要结合农作物产量、经济系数、根冠比、含碳量和水分子系数等指标,计算公式^[1]如下:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n [C_i \times K_i \times (1 - V_i) \times (1 + R_i)] / H_i \quad (7)$$

$$D = \frac{W}{A} = \sum_{i=1}^n W_i / A \quad (8)$$

式中,W 为区域农田生态系统碳储量(t),即碳吸收量; W_i 为第 i 类农作物的碳储量(t); C_i 为含碳率(%); K_i 为第 i 类农作物产量(t); V_i 为第 i 类农作物果实的水分系数(%); R_i 为第 i 类农作物的根冠比系数; H_i 为第 i 类农作物的经济系数(经济产量与生物产量的比值); n 为农作物种类数,本文取 $n=8$;D 为农田生态系统平均碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$);A 为区域耕地面积(hm^2)。中国主要农作物的 H、C、R、V 见表 1^[28-30]。

表 1 不同农作物的植被碳储量估算参数

Table 1 Vegetation carbon stock estimate parameters of different crops

作物种类 Crop type	经济系数 Economic coefficient	根冠比 Root /shoot ratio	含碳量 Carbon content /%	水分系数 Water coefficient/%
水稻 Rice	0.49	0.6	41.7	11.9
小麦 Wheat	0.36	0.4	47.1	11.7
玉米 Corn	0.46	0.16	46.4	12.2
大豆 Soybean	0.38	0.13	44.5	15
棉花 Cotton	0.28	0.12	45	11.5
油菜 Rape	0.23	0.04	44.7	11
薯类 Potatoes	0.68	0.18	43.3	77.1
花生 Peanut	0.36	0.72	45	15
烟草 Tobacco	0.43	0.32	45	15

2.3 农田生态系统碳足迹估算

碳足迹 (CEF, 单位: hm^2) 的计算公式^[1]为:

$$\text{CEF} = E/\text{NEP} \quad (9)$$

$$\text{NEP} = W/S \quad (10)$$

式中, E 为农田生态系统的碳排放总量 (kg); NEP 为 1 hm^2 的植被吸收的碳量, 即云南省农田生态系统单位面积碳吸收量^[31] (kg/hm^2); W 为农田生态系统中所有农作物的碳吸收量 (kg); S 为耕地面积 (hm^2)。CEF (hm^2) 即为云南省农田生态系统吸收其农田生态系统碳排放所需要的植被面积^[17]。

当某地区农田生态系统碳足迹大于区域耕地面积 (S , 单位: hm^2) 时, 说明存在碳生态赤字 (CED, 单位: hm^2); 反之, 若碳足迹小于区域耕地面积, 则为碳生态盈余 (CER, 单位: hm^2), 而其碳盈余量是区域耕地面积与农田生态系统碳足迹的差值^[17]。

$$\text{CED} = \text{CEF} - S (\text{CEF} \geq S) \quad (11)$$

$$\text{CER} = S - \text{CEF} (\text{CEF} \leq S) \quad (12)$$

2.4 数据处理

选取 1985、1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 年共 7 个年份的数据, 利用 Excel 和 ArcGIS 软件对上述的碳足迹模型进行分析。其中, 利用 Excel 软件对云南省农田生态系统的碳足迹进行数据处理分析; 借助 ArcGIS 软件绘制云南省农田生态系统碳排放、碳吸收和碳足迹的时空变化。

3 结果与分析

3.1 云南省农田生态系统碳排放特征

3.1.1 农田碳排放的时间变化

1985—2015 年, 云南省农田碳排放量呈逐年增长趋势。1985 年, 云南省农田碳排放总量为 68.3 万 t, 2015 年, 碳排放总量达到 352.6 万 t, 年平均增长率为 13.9%。1985 年农药和农膜使用量未统计, 所以这两项引起的碳排放量记为零。由图 1 可以看出, 云南省的化肥、机械和灌溉所引起的碳排放量由 1985 年的 35.9 万 t、6.7 万 t 和 25.7 万 t 增长到 2015 年的 205.9 万 t、12.4 万 t 和 46.8 万 t, 而农药和农膜所引起的碳排放两由 1990 年的 4.4 万 t 和 11.1 万 t 增长至 2015 年的 28.9 万 t 和 58.6 万 t。其中, 化肥使用带来的碳排放增长最大, 1985—2015 年期间年平均增长率为 15.8%。农药和农膜引起的碳排放量增长趋势较为明显, 其 1990—2015 年期间年均增长率分别为 22.2% 和 17.1%; 而机械和灌溉引起的碳排放量增长较为缓慢, 1985—2015 年期间年平均增长率分别为 2.8% 和 2.7%。

化肥碳排放占总碳排放量的比率最大, 其平均百分比为 56%, 接下来是灌溉碳排放和农膜碳排放, 其平均百分比分别为 18% 和 14%; 机械和农药碳排放占比最小, 平均百分比分别为 5% 和 7%。

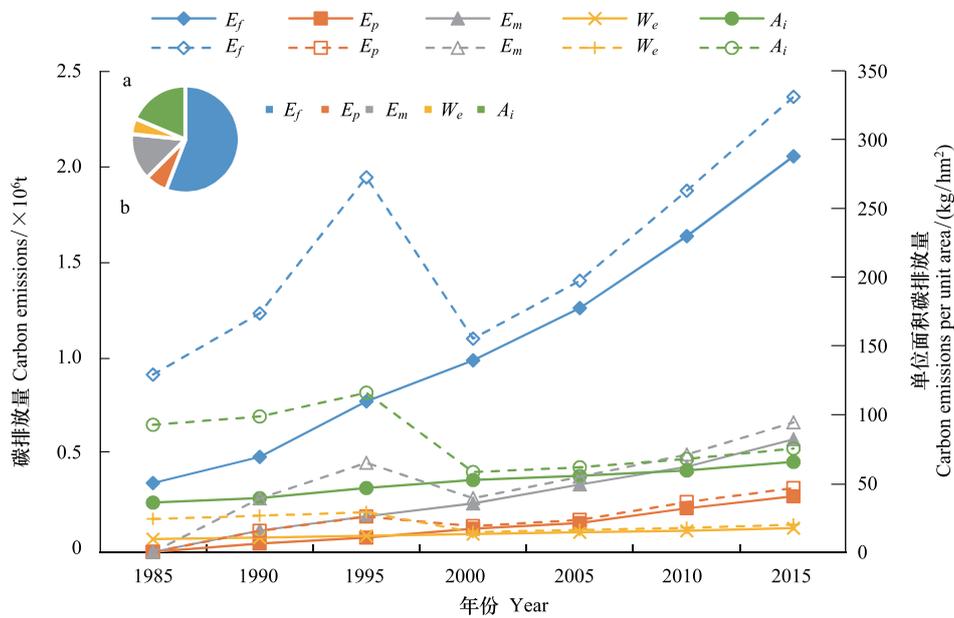


图1 云南省农田生态系统碳排放

Fig.1 Carbon emissions of farmland ecosystems in Yunnan Province

a, 云南省 1985—2015 年农田生态系统碳排放量和单位面积碳排放量,图中实线为碳排放量,虚线为单位面积碳排放量;b, 云南省农田生态系统碳排放的构成。 E_f :化肥, Fertilizer; E_p :农药, Pesticide; E_m :农膜, Plastic film; E_e :机械, Machinery; E_i :灌溉, Irrigation

由于云南省的耕地面积从 1985 年的 277.7 万 hm^2 增长到 2015 年的 620.9 万 hm^2 , 所以研究碳排放问题只看碳排放总量是不够的, 这里引入了单位面积碳排放的概念, 完善了碳排放的研究内容。由图 1 可知, 云南省农田单位面积碳排放总量呈先上升后下降再上升的趋势。其中, 单位面积化肥碳排放占主导地位, 其随时间变化趋势和农药、农膜一样, 都是先增长, 到 1995 年达到一个峰值, 该峰值分别为 272.9、25.8 kg/hm^2 和 64.9 kg/hm^2 , 然后下降, 从 2000 年开始又继续增长直到 2015 年达到最大值, 最大值分别为 331.6、46.5 kg/hm^2 和 94.4 kg/hm^2 。机械和灌溉的单位面积碳排放随时间变化趋势是增长—下降—增长, 首先增长在 1995 年到达最大值, 该最大值分别是 29.0 kg/hm^2 和 116.0 kg/hm^2 , 然后下降在 2000 年到达最小值, 该最小值分别是 14.6 kg/hm^2 和 58.2 kg/hm^2 , 之后继续缓慢增长, 并且, 1985—1995 年的单位面积碳排放均大于 2000—2015 年的单位面积碳排放。这说明 2000 年以后机械使用效率和灌溉效率明显提高。

3.1.2 农田碳排放的空间变化

由图 2 可以看出, 云南省农田碳排放总体呈现东南高、西北低的格局。其中丽江、思茅和宣威 3 个县平均碳排放量最大, 占碳排放总量的百分比分别是 4.17%、3.36% 和 3.20%; 而平均碳排放量最小的县是河口、贡山和德钦, 分别占碳排放总量的 0.12%、0.14% 和 0.14%。从时间来看, 碳排放量增长最快的县是思茅, 其年均增长了近五倍, 其次是丽江, 年均增长近三倍; 碳排放量增长最慢的县是江川, 其年均增长率约为 2.60%, 其次是玉溪, 年均增长率约为 2.63%。云南省碳排放量最大量和最小量之间相差近 50 倍, 而碳排放量增长最快和最慢的县之间也相差了近两百倍, 可以看出, 云南省农田碳排在时间和空间上都是分布不均的。

思茅区属于普洱市, 普洱市和丽江市都是服务业较发达的地区, 二者都是第三产业 GDP 占比最大, 普洱市早期农业、工业占 GDP 比重大致相等, 但近年来工业逐渐比重大于农业, 工业发展使得更多的化肥、农药、农膜投入农业生产, 所以其碳排放量增长快。丽江早期农业 GDP 占比较工业占比高, 随时间发展工业占 GDP 的比重超过了农业, 工业发展为农业生产提供了更多的化工产品, 使得其碳排放量增长较快。江川和玉溪同属玉溪市, 玉溪市工业较为发达, 第二产业占 GDP 比重达到一半以上, 然而农业发展相对落后, 多年来第一产业占 GDP 比重约为 10%, 故其碳排放量增长较慢。

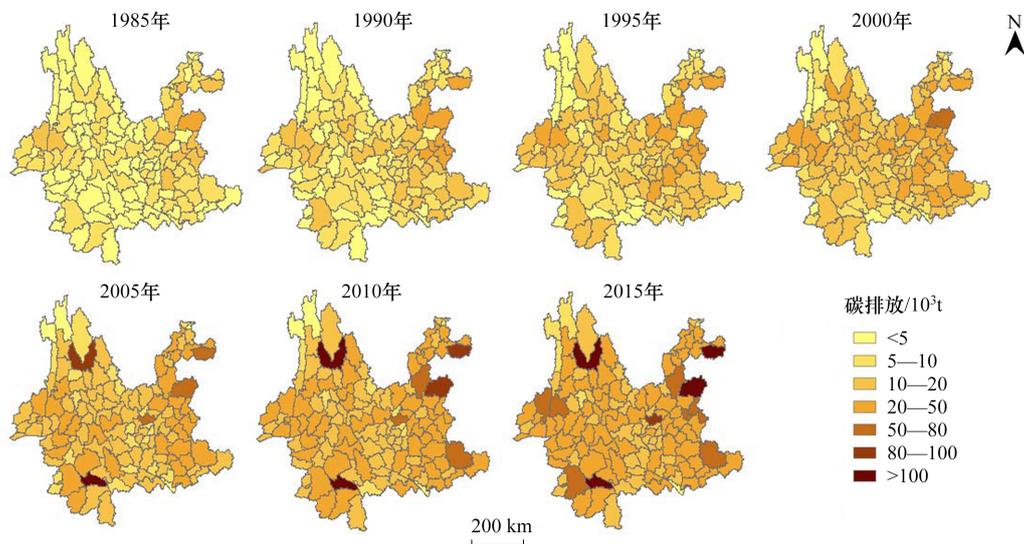


图2 云南省1985—2015年农田利用碳排放的空间变化

Fig.2 Spatial distribution of carbon emissions from farmland in Yunnan Province from 1985 to 2015

3.1.3 农田碳排放贡献比的空间变化

由图3可以看出,1985—2015年期间,云南省各州、市农田生态系统碳排放主要贡献源由灌溉转向化肥,1985年云南省西北、西南部地区碳排放主要由灌溉引起,比如怒江州、迪庆州、丽江市、普洱市、临沧市和西双版纳州,其他地区碳排放主要由化肥引起;到2015年,云南省全部地区的碳排放主要贡献都来源于化肥。农膜、农药对碳排放的贡献比例随时间增长而增大,在1990—1995年期间增长较为明显,特别是迪庆州和丽江市;在1995年之后,农药、农膜的比例变化幅度较小。农用机械引起的碳排放比例总体上呈逐年下降趋势,怒江州、丽江市和迪庆州表现的最为明显。2005年起,所有州、市的各种来源的碳排放占比在时间尺度上基本不变,在空间上各个州、市的各种碳排放源占比大致相同。总体来看,各州、市间碳排放贡献变化差异较小,各州、市间碳排放贡献比例差异也较小。

研究初期,云南省农田生态系统碳排放中灌溉占比较大,早期云南较为封闭,科技不太发达,化肥、农药和农膜获取不易,使用意识也不强。同时,因为各州、市的发展情况不同,其各种农田碳排放源的比例差异较大。而随时间变化,科技发展,对化肥、农药等的认识加强,投入使用变得较为普遍。在2005以后,各种碳排放源的比例在时间和空间都较为稳定,说明了云南省农业投入较为稳定,农业发展模式可能进入了瓶颈期。

3.2 云南省农田生态系统碳吸收及其影响因素分析

3.2.1 农田碳吸收的时间变化

从图4可以看出,云南省农田碳吸收总体上呈增长趋势,1985年云南省碳吸收总量为1062.3万t,而在2015年增长至2030.5万t,在1985—2015年期间年均增幅为3.04%。其中,玉米增长最为明显,在1985—2015年期间年均增长率为8.76%;其他作物碳吸收增长趋势较缓慢,但是稻谷碳吸收量略有下降。就曲线变化趋势而言,稻谷、小麦、薯类、油菜籽和烟叶都是先增长后下降,不同的是,小麦是增长到2000年再下降,稻谷和油菜籽是增长到2005年再下降,而薯类和烟叶是增长到2010年后再下降。从碳吸收占比来看,稻谷和玉米一直是碳吸收的主要来源。稻谷碳吸收量最大,约占碳吸收总量的41%;其次是玉米,占碳吸收总量的33%;小麦、豆类、烟叶和油菜籽分别占碳吸收总量的10%、6%、5%和3%,而薯类和花生均占碳吸收总量的1%。

在研究时间内,云南省不仅耕地面积发生巨大变化,而且各种农作物的播种面积也随之发生变化,所以,研究各种农作物的单位面积碳吸收十分有必要。从图4可以看出,研究区农作物单位面积碳吸收总体上有增

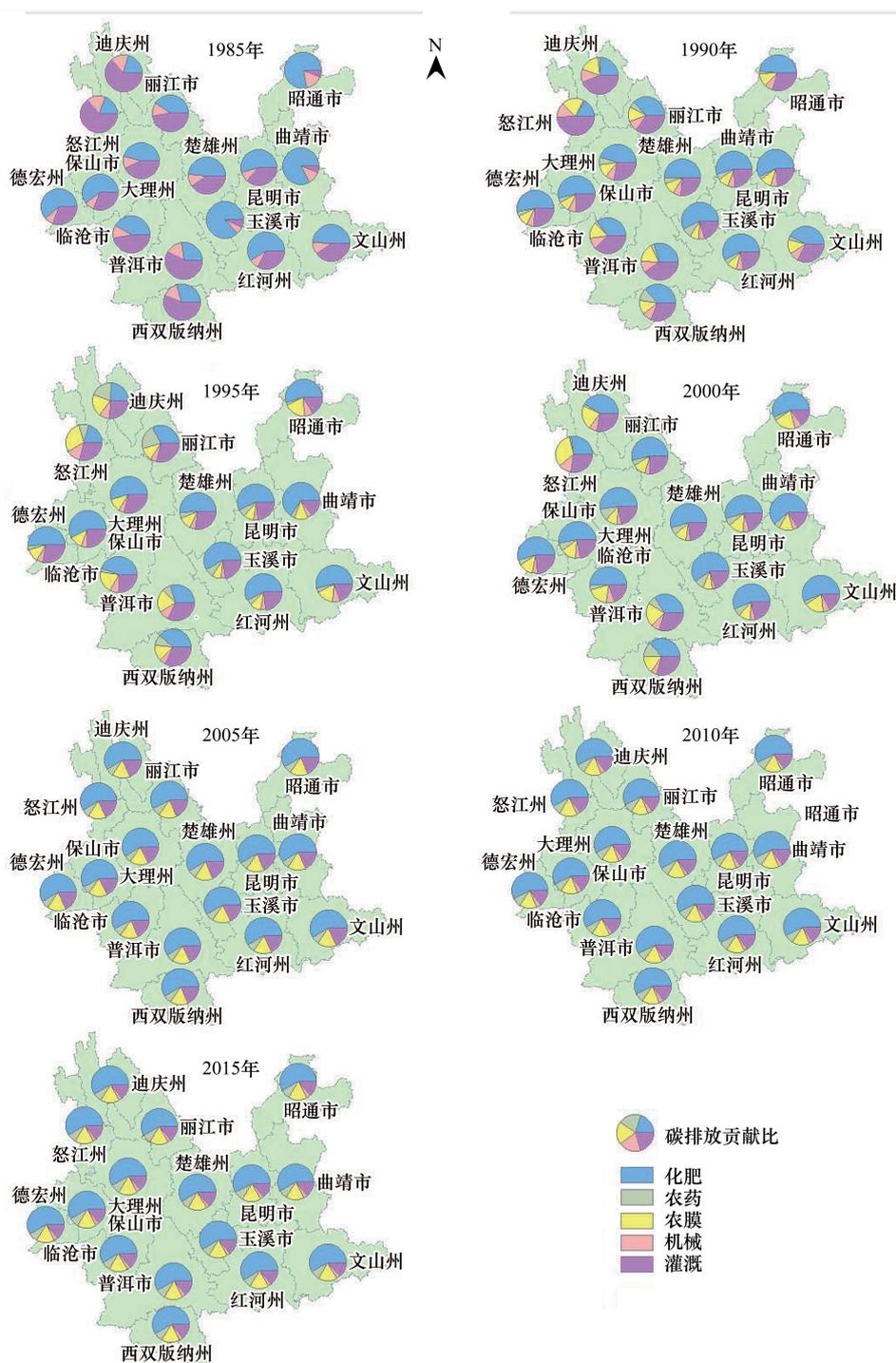


图3 云南省1985—2015年各州、市农田碳排放贡献比例图

Fig.3 The proportion of farmland carbon emissions in Yunnan Province from 1985 to 2015

长趋势。其中,玉米和花生的单位面积碳吸收呈逐年增长趋势,分别从1985年的 2.78 t/hm^2 和 1.99 t/hm^2 增长到2015年的 5.45 t/hm^2 和 3.03 t/hm^2 ;稻谷、小麦、豆类和油菜籽的单位面积碳吸收都是先增长,在2010年突然下降,在2015年又明显增长;薯类和烤烟在2010年之前均呈增长趋势,在2015年有较小程度的下降。可以看出,各种农作物单位面积碳吸收量均有增加,这说明农作物的产量有明显提高。云南省自2009年秋季开始发生了秋冬春三季连旱的现象,这对农作物的生产造成了巨大的影响,特别是对于稻谷、小麦等对水需求较大的作物,而2010年稻谷等作物产量大幅下降,致使其单位面积碳吸收突然下降,这与实际情况相符。

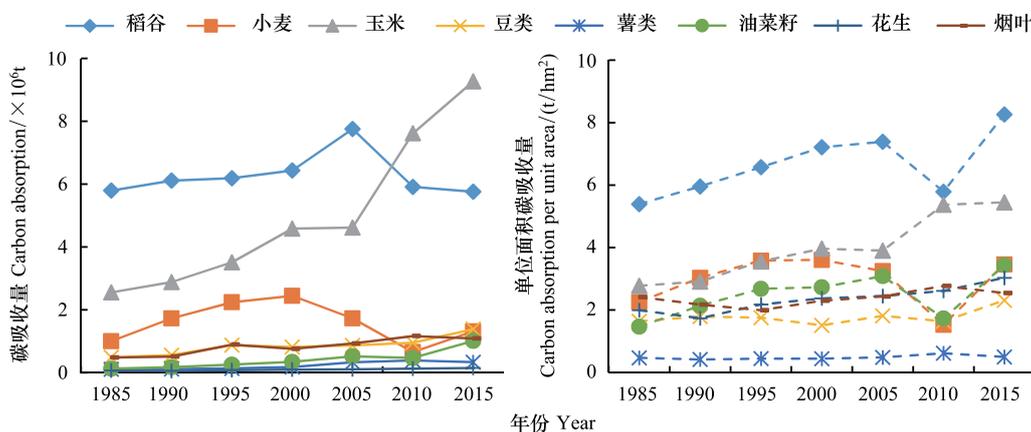


图4 云南省农田生态系统碳吸收

Fig.4 Carbon absorption of farmland ecosystems in Yunnan Province

1: 稻谷, Rice; 2: 小麦, Wheat; 3: 玉米, Corn; 4: 豆类, Soybean; 5: 薯类, Potatoes; 6: 油菜籽, Rape; 7: 花生, Peanut; 8: 烟叶, Tobacco

3.2.2 农田碳吸收的空间变化

就农田碳吸收的空间分布而言(图5),云南省农田碳吸收整体呈东南高、西北低的分布格局。其中,思茅、宣威和保山是碳吸收量最大的县,分别占碳吸收总量的3.41%、2.80%和2.49%。丽江碳排放量排第一,但其农作物产量却较低,碳吸收占比仅为1.08%。丽江碳排放主要是由化肥使用引起的,这说明丽江大量的化肥投入并没有带来明显的农作物产量增加,所以化肥使用过度。碳吸收占比较小的县是贡山、河口和德钦,占比分别为0.06%、0.13%和0.13%。从自然地理条件来看,思茅、宣威和保山海拔相对较低,地势相对较为平缓,水资源充沛,十分适合农作物生长;而贡山海拔相对较高,地势起伏较大,相对而言不太适宜发展农业。

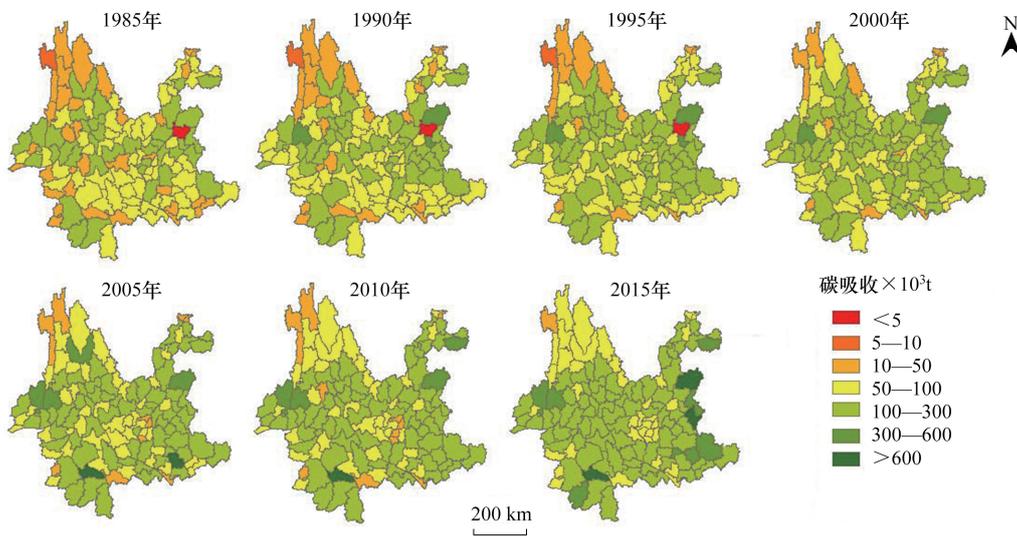


图5 云南省1985—2015年农田利用碳吸收的空间变化

Fig.5 Spatial distribution of carbon absorption of farmland ecosystem in Yunnan Province from 1985 to 2015

研究期间,云南省各县碳吸收量总体有增长趋势,碳吸收量增幅最大的县是思茅,年平均增长了1.3倍,见图5。在2000—2005年期间,思茅碳吸收量增长有一个突增,年平均增长了三倍,而在其年份区间,增长较为平稳。接下来碳吸收增幅较大的是福贡,但其年平均增长率仅为9.84%。碳吸收量增幅最小的县是华宁县,年平均增长率约为0.41%。然而,也有一些地区的碳吸收减少,如晋宁、丽江等,其年平均降幅分别为1.63%和1.32%。总体来看,云南省各县之间碳吸收量差异较大,而且各县间碳吸收涨幅也差异较大。

思茅碳排放量、碳吸收量均增幅最大,说明其农业增加投入使用的化肥、农药等促进了农业发展,确实有提高农作物产量。丽江却与此相反,增加的化肥施用并未对农作物提高产量取得较好的效果。福贡属于怒江州,其第一、第二产业占 GDP 比重变化与丽江相似,即工业发展逐步超越农业,可能是其工业发展促进了农业发展,提高了农作物产量。华宁县属于玉溪市,农业较不发达,所以碳吸收量增幅较慢。

3.2.3 农田碳吸收贡献比的空间变化

由图 6 可以看出,云南省各州、市农田生态系统碳吸收贡献中占主要地位的为稻谷、小麦和玉米,同时,占

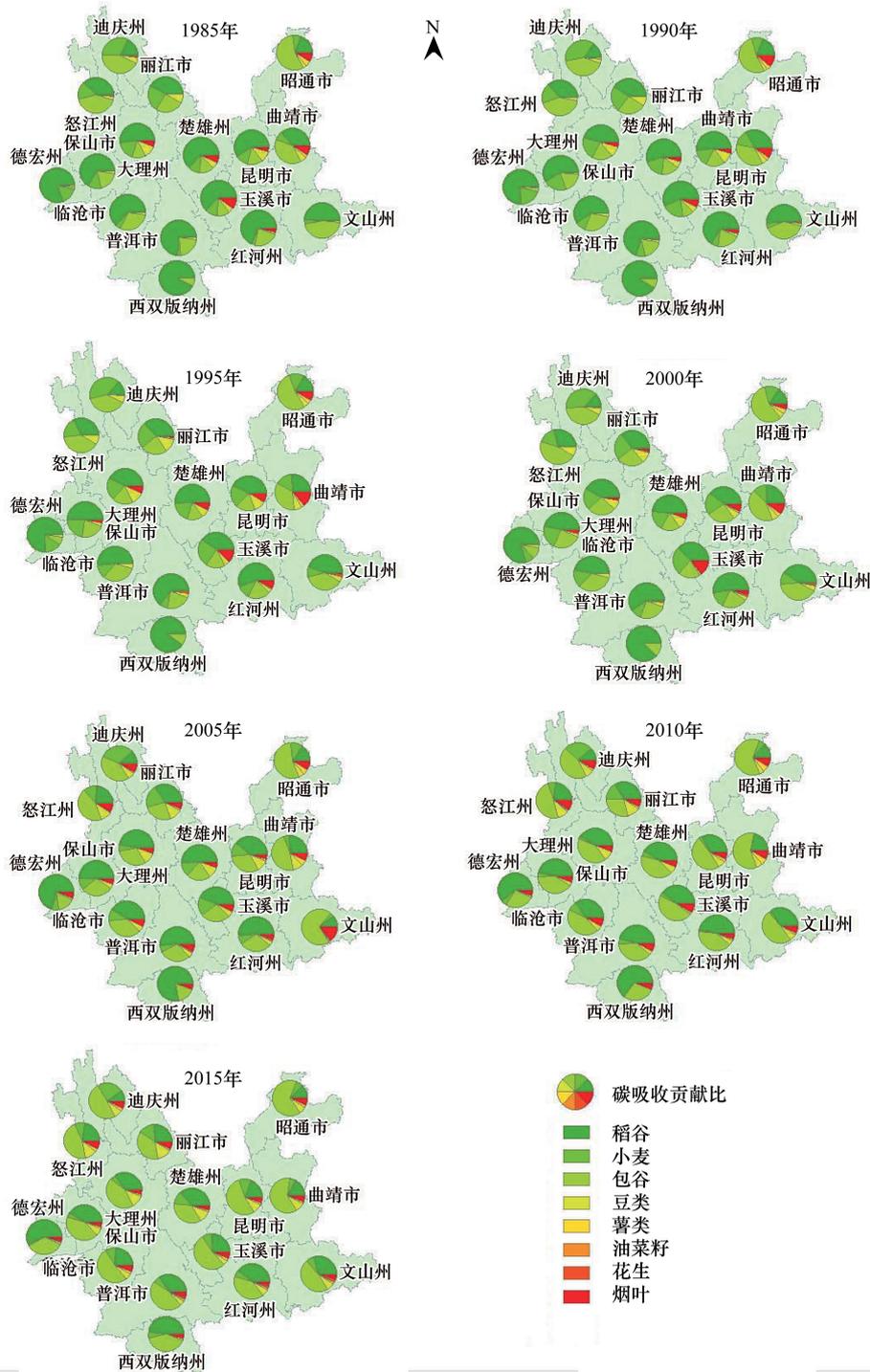


图 6 云南省 1985—2015 年各州、市农田碳吸收贡献比例图

Fig.6 Proportion of carbon absorption of farmland in Yunnan Province from 1985 to 2015

主导地位的由稻谷转变为玉米。文山州稻谷碳吸收比例在 2005 年有一个骤降,而在 2010 年又稍有回升,与此同时,其玉米碳吸收比例有一个高峰,并且稻谷和玉米的碳吸收贡献比之和基本同其他年份一致,说明在 2005 年文山州的稻谷和玉米的种植比例发生了较大的变化。各州、市稻谷碳吸收在总碳吸收中所占比例基本上呈逐年下降趋势,其中昆明市降幅最大,年平均降幅为 2.24%;而玉米占比基本上呈逐年上升趋势,其中德宏州最大,年平均增幅为 36.09%;小麦占比总体上呈先上升后下降的趋势,在 2000 年以前基本上呈上升趋势,2000 年以后呈下降趋势,最终各州、市的占比增减不一。

研究期间,稻谷、小麦和玉米的碳吸收贡献比例变化较大,说明各州、市的主要农作物种植结构发生了变化,这可能是由于科技的进步使得农作物的种植布局更加合理,也可能因为市场经济的波动使得农民改变农作物种植结构。

3.3 云南省农田生态系统碳足迹时空差异

3.3.1 农田生态系统碳足迹时间变化

由表 2 可以看出,云南省农田生态系统碳足迹呈增长趋势,在 1985—1995 年期间上升较缓,年平均增长率约为 6.56%;在 1995—2000 年期间有一个突增,年均增长率约为 32.04%;在 2000—2015 年期间增长相对平稳,年均增长率约为 2.68%。

在 1985—2015 年期间云南省农田生态系统均存在碳盈余现象,说明云南省农田生态系统的开发利用在其生态承载力范围之内,可以用于补偿其他行业的碳生态赤字。

单位面积碳足迹是碳足迹与耕地面积的比值,该值可以表示为每年消纳农田生态系统碳排放所需要的植被面积占耕地面积的比例。研究期间,云南省农田生态系统单位面积碳足迹呈增长趋势,说明随着化肥、农药、农膜、机械和灌溉的使用的增加,其农田生态系统的碳汇功能在下降。

表 2 云南省农田生态系统碳足迹与碳盈余

Table 2 Carbon footprint of farmland ecosystem and carbon surplus of Yunnan Province

年份 Year	耕地面积 Cultivated area/hm ²	碳足迹 Carbon footprint/hm ²	单位面积碳足迹 Carbon footprint per unit area/(hm ² /hm ²)	碳生态盈余 Carbon surplus/hm ²
1985	2776600	178517	0.0643	2598083
1990	2858400	235787	0.0825	2622613
1995	2889400	295610	0.1023	2593790
2000	6421600	769154	0.1198	5652446
2005	6421600	864973	0.1347	5556627
2010	6240100	1028416	0.1648	5211684
2015	6208540	1078042	0.1736	5130498

3.3.2 农田生态系统碳足迹空间变化

云南省碳足迹总体呈现东、西部高,中部低的空间格局。其中思茅、丽江和宣威的碳足迹最大,分别占云南省碳足迹总量的 7.00%、5.05%和 3.02%;碳足迹最小的县是河口、水富和德钦,分别占云南省碳足迹总量的 0.11%、0.13%和 0.15%。研究期间,除潞西外,各县碳足迹都呈上增长趋势。其中,思茅碳足迹增幅最大,年平均增幅 5 倍以上,陇川增幅最小,年平均增长率约为 1.30%;潞西年平均降幅为 1.43%。总体来看,云南省各县碳足迹差异较大,而且各县之间碳足迹随时间变化差异也较大。

3.3.3 农田碳足迹空间变化驱动力及空间关系分析

运用 SPSS 软件对碳足迹及其影响因素进行多元线性回归分析,将碳足迹(CEF,单位:千 hm²)作为因变量,将化肥施用量(G_f ,单位:万 t)、农药施用量(G_p ,单位:万 t)、农用塑料薄膜使用量(G_m ,单位:万 t)、农业机械总动力(W_e ,单位:万 kW)、有效灌溉面积(A_i ,单位:千 hm²)和农作物总产量(K,单位:万 t)作为自变量,建立多元线性回归模型,将云南省各州市的 1985—2015 年全部数据进行拟合,拟合所得的标准系数回归模型

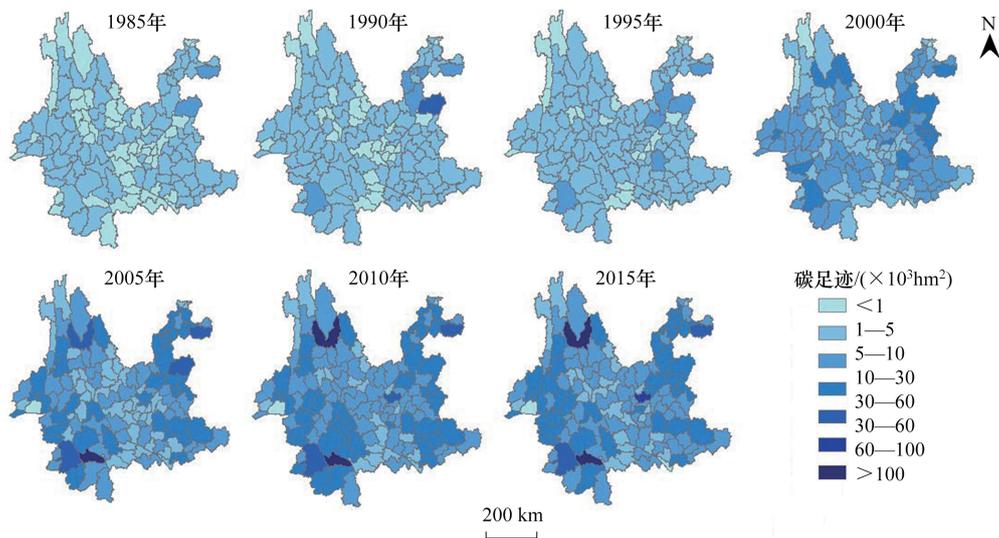


图7 云南省1985—2015年碳足迹空间变化

Fig.7 Carbon footprint spatial difference of farmland ecosystem in Yunnan Province from 1985 to 2015

如下;

$$CEF = 0.770 G_f + 0.054 G_p + 0.033 G_m + 0.021 W_e + 1.086 A_i - 1.090K \quad (R^2 = 0.727680) \quad (13)$$

可以看出,碳足迹与化肥施用量、农药施用量、农用塑料薄膜使用量、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。在碳足迹的所有相关因素中,农作物总产量的标准系数绝对值最大,说明农作物总产量对碳足迹的影响最大,并且是负向影响,即在其他因素不变的条件下,农作物总产量增加,碳足迹会减少。在对碳足迹起正向驱动作用的所有变量中,有效灌溉面积的驱动力最大,并且其标准系数与农作物总产量的标准系数值相近,这说明在一定条件下有效灌溉面积的增加基本上可以抵消农作物总产量增加引起的碳足迹减少。驱动力位于其次的是化肥施用量,其驱动力约为有效灌溉面积驱动力的71%。农药施用量、农用塑料薄膜使用量和农业机械总动力对碳足迹的驱动作用较小,三者驱动力之和约为化肥施用量的驱动力的14%,说明其对碳足迹的影响较小。

4 结论与讨论

1985—2015年期间,云南省农田生态系统碳排放随时间变化呈上升趋势,在空间上呈现东南高、西北低的分布格局。研究期间,碳排放年均增幅为13.9%。其中,对碳排放起主导作用的是化肥施用,并且,引起碳排放增加的主要原因是化肥施用量增加。在研究的各县市中,碳排放增幅最大的县是思茅,年均增长近五倍;增幅最小的县是江川,年均增幅为2.60%,说明云南省各县市碳排放及其涨幅存在较大差异。在碳排放空间变化差异的地区,推测是工业发展差异引起的,工业发展对农田碳排放有一定促进作用。云南省单位农田面积碳排放量逐年增加,其中化肥引起的单位农田面积碳排放占比最大,约为55%。在技术水平不断上升的过程中,人们对化肥、农药、农膜、机械和灌溉的投入使用不断增加,由此引起碳排放不断增加。同时,各地区对化肥、农药、农膜、机械和灌溉的投入使用比例趋于一致。

1985—2015年间,云南省农田生态系统碳吸收总体呈上升趋势,在空间上呈现东南高、西北低的分布格局。研究期间,碳吸收年均增幅为3.04%,碳吸收的主要贡献来自于稻谷、小麦和玉米。碳吸收增幅最大的县是思茅,年均增长1.3倍,碳吸收增幅最小的县是华宁县,年均增幅为0.41%,说明了云南省各县市碳吸收及其涨幅有极大差异。碳吸收的空间差异与工业发展也有关系,工业发展在一定程度上提高了作物产量,使碳吸收增加。研究区单位面积碳吸收总体上逐年增长,说明农作物产量逐年增加。

1985—2015年间,云南省农田生态系统碳足迹总体呈增长趋势,在空间上呈东西部高、中部低的格局。

研究期间,碳足迹年均增长率为16.8%。云南省耕地面积大于农田生态系统碳足迹,说明云南省农田生态系统存在碳生态盈余,并且随年份增加,碳生态盈余呈现先增长后缓慢下降的趋势。云南省农田生态系统单位面积碳足迹随年份增加而增加,说明云南省农田生态系统的碳汇功能在下降。云南省碳足迹增幅最大的县是思茅,年均增幅五倍以上;碳足迹增幅最小的县是陇川,年均增幅为1.30%;泸西的碳足迹减少。说明云南省各县市碳足迹及其变化趋势差异较大。

研究期间云南省农田生态系统碳吸收量远远大于碳排放量,说明云南省农田生态系统存在碳生态盈余,这与葛颖、林秀群等人^[32-33]研究结果相似。但是碳吸收量与前者的研究结果相差较大:一是因为碳吸收量计算公式不同,本研究在计算碳吸收量时考虑了农作物的根冠比系数,这与张鹏岩等^[1]的研究方法相同;二是因为计算碳吸收选取的农作物种类不同,因为数据获取有限,所以本研究中有几种农作物未作考虑。研究期间云南省农田生态系统碳排放量与碳吸收量逐年增长,这与梁青青等^[34]研究结果相似,但是碳排放总量和碳吸收总量的数值有一定的差距,主要是因为使用的公式以及系数值不同。

农田生态系统碳足迹受多种因素共同作用,包括农作物种类、土壤类型以及耕作方式等,所以不同区域、不同种植模式的碳足迹差异较大。本研究并没有进行实地考察,选取的各类系数直接参考其他研究,没有根据云南省实地情况加以修正,可能对研究结果造成一定误差。此外,云南省正大力发展高原特色现代农业^[35],是很多特色水果、蔬菜产品基地,而因为相关的系数缺乏,研究没有考虑这类特色农作物,这也使研究结果存在一定误差。土壤呼吸作用也是重要的碳源/汇,本研究没有加以考虑,造成了一定误差。在今后的农田生态系统碳足迹研究中,基于不同条件的碳足迹估算有待学者深入探讨。

通过对云南省农田生态系统碳足迹的时空分析,可以对云南省低碳农业发展提出以下建议:从减少碳排放的角度来看,首先应当控制化肥施用量,可以根据进一步研究找到最科学的化肥施用量;其次,要提高机械利用效率,大力提高农业科技创新能力^[35],使用更节能的机械与更清洁的能源^[2]。从增加碳吸收的角度来看,要重视科技发展,开发产量更高的农作物品种;加强农田基础设施建设,特别是水利建设,从而更好地建设高产农田^[1]。

参考文献 (References):

- [1] 张鹏岩,何坚坚,庞博,逯承鹏,秦明周,卢谦成. 农田生态系统碳足迹时空变化——以河南省为例. 应用生态学报, 2017, 28(9): 3050-3060.
- [2] 张婷,蔡海生,张学玲. 基于碳足迹的江西省农田生态系统碳源/汇时空差异. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 767-773.
- [3] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. 生态学报, 2015, 35(6): 1647-1659.
- [4] 杨传明. 碳足迹研究综述与展望. 管理现代化, 2015, 35(3): 127-129.
- [5] Muthu S S, Li Y, Hu J Y, Mok P Y. Carbon footprint of shopping (grocery) bags in China, Hong Kong and India. Atmospheric Environment, 2010, 45(2): 469-475.
- [6] Mujica M, Blanco G, Santalla E. Carbon footprint of honey produced in Argentina. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 50-60.
- [7] Brown M A, Southworth F, Sarzynski A. The geography of metropolitan carbon footprints. Policy and Society, 2009, 27(4): 285-304.
- [8] Aichele R, Felbermayr G. Kyoto and the carbon footprint of nations. Journal of Environmental Economics and Management, 2012, 63(3): 336-354.
- [9] 黄雨生,曲建升,刘莉娜. 中国各省份碳足迹与碳承载力差异研究. 生态经济, 2016, 32(6): 38-43.
- [10] 孙建卫,陈志刚,赵荣钦,黄贤金,赖力. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 28-34.
- [11] 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. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057.
- [12] Dormer A, Finn D P, Ward P, Cullen J. Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. Journal of Cleaner Production, 2013, 51: 133-141.
- [13] Hochschorner E, Dán G, Moberg Å. Carbon footprint of movie distribution via the internet: a Swedish case study. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 197-207.
- [14] Jradi S, Chameeva T B, Delhomme B, Jaegler A. Tracking carbon footprint in French vineyards: A DEA performance assessment. Journal of Cleaner Production, 2018, 192: 43-54.
- [15] 黄祖辉,米松华. 农业碳足迹研究——以浙江省为例. 农业经济问题, 2011, 32(11): 40-47, 111-111.

- [16] 王占彪,王猛,陈阜.华北平原作物生产碳足迹分析.中国农业科学,2015,48(1):83-92.
- [17] 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.农业资源与环境学报,2018,35(2):167-173.
- [18] 陈慧,付光辉,刘友兆.江苏省县域农业温室气体排放:时空差异与趋势演进.资源科学,2018,40(5):1084-1094.
- [19] 张军伟,张锦华,吴方卫.我国粮食生产的碳排放及减排路径分析.统计与决策,2018,(14):168-172.
- [20] 崔朋飞,朱先奇,李玮.中国农业碳排放的动态演进与影响因素分析.世界农业,2018,(4):127-134.
- [21] 云南省统计局.云南统计年鉴1986—2016.北京:中国统计出版社,1986-2016.
- [22] 戴丽.云南农业循环经济发展模式研究.云南民族大学学报:哲学社会科学版,2006,23(1):86-91.
- [23] 中华人民共和国农业部.中国农业统计资料1985—2015.北京:中国农业出版社,1986-2016.
- [24] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴1986—2016.北京:中国统计出版社,1986-2016.
- [25] 冯璐.农业生产结构由生存型向市场型的转型研究[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [26] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴1986—2016.北京:中国统计出版社,1986-2016.
- [27] 赵荣钦,刘英,丁明磊,焦士兴.河南省农田生态系统碳源/汇研究.河南农业科学,2010,(7):40-44.
- [28] 张福春,朱志辉.中国作物的收获指数.中国农业科学,1990,23(2):83-87.
- [29] 苗果园,尹钧,张云亭,张爱良.中国北方主要作物根系生长的研究.作物学报,1998,24(1):1-6.
- [30] 张剑,罗贵生,王小国,朱波.长江上游地区农作物碳储量估算及固碳潜力分析.西南农业学报,2009,22(2):402-408.
- [31] 沈体忠.天门市农田生态系统碳足迹的测度分析.长江大学学报:自科版,2017,14(14):62-68,5-5.
- [32] 葛颖.云南省农田生态系统净碳汇及其补偿机制研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [33] 林秀群,葛颖.中国西南地区农田生态系统碳源/汇时空差异研究.江苏农业学报,2016,32(5):1088-1093.
- [34] 梁青青.我国农业碳排放的空间差异实证研究——基于1996—2015年省际面板数据.农林经济管理学报,2018,17(2):159-168.
- [35] 云南省高原特色现代农业产业推进组办公室.云南省高原特色现代农业“十三五”产业发展规划.(2017-01)[2018-10-22].<https://wenku.baidu.com/view/c3bfc875ce84b9d528ea81c758f5f61fb73628b4.html>.