

河南省农田生态系统碳源/碳汇及其碳足迹动态变化

郭永奇

(南阳理工学院, 河南 南阳 473000)

摘要:为定量测算河南省农田生态系统的碳源/碳汇, 识别河南省农业发展过程中重要碳排放源, 推进河南绿色农业发展。本研究对2000~2017年河南省农田的碳吸收量、碳排放量及碳足迹进行测算, 并对其动态变化进行分析。结果发现: 河南省农田生态系统的碳吸收量明显高于碳排放量, 表明河南省农田生态系统具备较强的碳汇能力; 粮食作物对总碳吸收量贡献最大, 化肥是影响农业碳排放的最关键因子; 河南省农田生态系统处于碳生态盈余的状态, 且碳足迹较低, 碳足迹效益较高。

关键词:农田生态系统; 碳源; 碳汇; 碳足迹; 河南省

中图分类号: S181

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2021)06-0087-06

Dynamic Change of Carbon Source/Sink and Carbon Footprint of Farmland Ecosystem in Henan Province

GUO Yongqi

(Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China)

Abstract: In order to quantitatively measure the carbon source/sink of farmland ecosystem in Henan Province, identify the important carbon emission sources in the process of agricultural development in Henan Province, and promote the development of green agriculture in Henan Province. In this paper, the carbon absorption, emission and carbon footprint of farmland in Henan Province from 2000 to 2017 were measured and their dynamic changes were analyzed. The results showed that the carbon uptake of farmland ecosystem in Henan Province was significantly higher than that of carbon emissions, which indicated that the farmland ecosystem in Henan Province had a strong carbon sink capacity; food crops contributed the most to total carbon uptake, and chemical fertilizer was the key factor affecting agricultural carbon emissions; the farmland ecosystem in Henan Province was in the form of carbon ecological surplus. The carbon footprint is low and the benefit of carbon footprint is high.

Key words: Farmland ecosystem; Carbon source; Carbon sink; Carbon footprint; Henan Province

随着世界经济的发展和工业化进程的加快, 二氧化碳排放过多导致的温室效应已得到了全球各界人士的关注。根据IPCC 2014年发布的《政府间气候变化专门委员会第五次评估报告》显示, 甲烷(CH_4)已是全球排放量第二大的温室气体, 其浓度约超过工业化前水平的150%, 至少已上升到过去80万年以来前所未有的水平^[1]。根据中国2013年发布的《中国气候变化第二次国家信

息通报》显示, 甲烷已成为我国第二大温室气体, 占全国碳排放总量的12.49%, 其中农业生产活动所产生的甲烷占我国甲烷排放量的56.62%^[2], 而且农业碳排放量还保持着年均5%的速度持续增长^[3]。因此, 如何识别农业发展过程中重要碳排放源, 定量测算农田生态系统的碳源/碳汇问题逐渐成为国内外学者关注的热点问题。目前, 国外研究主要集中在对不同区域农田生态系统的碳源/碳汇的测算和分析等方面^[4]。国内对农田生态系统碳源/碳汇研究虽起步较晚, 却取得了一定成果。如周陶等^[5]、张婷等^[6]分别对重庆市和江西省的农田生态系统碳源/碳汇时空差异进行了分析。杨皓然等^[7]、王梁等^[8]运用相应的计算模型分别对潍坊市和山东省的农田生态系统碳源/碳汇进行研究。李甜甜等^[9]、许萍萍等^[10]分别对江苏省农田

收稿日期: 2019-12-14

基金项目: 2021年度河南省高校哲学社会科学智库研究项目(2021-ZKYJ-27); 河南省哲学社会科学规划年度项目(2021BJJ069); 河南省高等学校哲学社会科学应用研究重大项目(2022-YYZD-16)

作者简介: 郭永奇(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事区域经济建设研究。

生态系统碳源/碳汇的分布特征、影响因素进行了研究。随着对农田生态系统碳源/碳汇研究的深入,碳足迹的相关研究越来越受到重视。国外研究主要集中在农田生态系统的碳足迹评价^[11]、碳足迹的数学模型^[12]等方面。国内研究则主要集中在省级或地级市的碳足迹核算^[13]、碳足迹影响力和感应力^[14]、碳足迹影响因素^[15]等方面。

作为全国农业大省和国家粮食生产核心区,河南省肩负保障国家粮食安全的重任,其农业生产在全国具有举足轻重的地位。2018年河南省粮食产量达到1 329.8亿斤,位居全国第二位,确保了国家粮食安全战略在河南省的实施。然而,伴随着粮食产量和农业产值的不断攀升,各种新技术和农药、化肥、塑料薄膜等投入的不断增加,不仅大大增加了农业的碳排放,还对农田生态系统带来了巨大压力。为此,本研究在借鉴前人研究的基础上,对河南省农田生态系统碳源/碳汇以及碳足迹进行定量评估,以期为河南省制定农业碳减排政策、发展绿色农业和实施乡村振兴战略提供参考和借鉴。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本文中化肥、农药、农膜、农用柴油的使用量、农作物播种面积、农业灌溉面积以及粮食作物、

经济作物和园艺作物等各类农作物的经济产量等指标主要来源于《河南省统计年鉴》(2001~2018)《河南省农村统计年鉴》(2010~2018)。

1.2 研究方法

1.2.1 农田生态系统碳吸收估算方法

学界关于农田碳吸收量的测算方法主要有以下三种:(1)先测算出农作物单位面积碳吸收量,再乘以相应的农作物面积;(2)通过农作物的光合作用化学式来测算碳吸收量;(3)通过农作物的净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)测算碳吸收量。其中,国内外学者使用第三种方法最多,其测算结果也较为准确。本研究也采用该方法来测算河南省农田生态系统碳吸收量。

河南农田生态系统的主要农作物包括小麦、玉米、水稻、大豆、红薯、花生、油菜、芝麻、棉花、烟叶、甘蔗、蔬菜、瓜果等。根据河南省农作物生长周期和特征,在借鉴国内学者研究^[8,10,16]的基础上,建立河南省农田生态系统碳汇的估算模型:

$$C_a = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i \times (1 - W_i)}{E_i} \times C_i \dots\dots\dots (1)$$

式中: C_a 为农作物的碳吸收量(t); Y_i 为第*i*种农作物的经济产量(t); E_i 、 W_i 、 C_i 分别为第*i*种农作物的经济系数(经济产量与生物产量之比)、含水率、碳吸收率; n 为农作物的种类。农作物的 E_i 、 W_i 、 C_i 参考相关文献^[6,10,17],具体见表1。

表1 河南省主要农作物的经济系数(E_i)、含水率(W_i)、碳吸收率(C_i)

n	E_i	C_i	W_i	n	E_i	C_i	W_i
水稻	0.414 4	0.450 0	0.120 0	花生	0.450 0	0.430 0	0.100 0
小麦	0.485 3	0.400 0	0.120 0	油菜籽	0.450 0	0.250 0	0.100 0
玉米	0.470 9	0.400 0	0.130 0	芝麻	0.450 0	0.145 0	0.120 0
谷子	0.450 0	0.500 0	0.140 0	棉花	0.450 0	0.100 0	0.080 0
高粱	0.450 0	0.350 0	0.140 0	甘蔗	0.450 0	0.500 0	0.500 0
其他谷物	0.446 3	0.350 0	0.120 0	烟叶	0.450 0	0.550 0	0.160 0
豆类	0.450 0	0.350 0	0.130 0	蔬菜	0.450 0	0.650 0	0.900 0
薯类	0.422 6	0.650 0	0.700 0	瓜果类	0.090 0	0.700 0	0.900 0

1.2.2 农田生态系统碳排放源估算方法

农田生态系统碳排放主要包含农田生产过程投入碳排放和土壤呼吸碳排放两部分^[18]。按照学界通用的分类方法,本研究将河南省农田生态系统的碳源分为以下六个方面:(1)农业生产过程中投入化肥引起的碳排放;(2)农业生产过程中投入农药引起的碳排放;(3)农业生产过程中投入农膜引起的碳排放;(4)农业生产过程中农业

机械的投入所直接或间接消耗化石燃料(主要是农用柴油)产生的碳排放;(5)农业翻耕引起的有机碳流失形成的碳排放;(6)农业灌溉过程中电能利用间接耗费化石燃料形成的碳释放。

根据上述六个方面的碳源,河南省农田生态系统碳排放的估算模型如下:

$$E_t = \sum E_i = \sum T_i \times \delta_i \dots\dots\dots (2)$$

式中: E_t 为农业碳排放总量(t), E_i 为农业生

产中第*i*种投入品的碳排放量(*t*),*T_i*为农业生产中第*i*种农田投入品的使用量,*δ_i*为农业生产中第*i*种农田投入品的碳排放系数。具体系数参照李波^[19]归纳的中国农业碳排放系数和张鹏岩^[20]计算河南省农业的碳排放系数:化肥 0.86 kgC/kg,农药 4.93 kgC/kg,农膜 5.18 kgC/kg,柴油 0.59 kgC/kg,翻耕 312.60 kgC/hm²,农业灌溉 20.48 kgC/hm²。

1.2.3 农田生态系统碳足迹估算方法

碳足迹是在生态足迹理论上延伸出来的,用来度量人为干扰引起的CO₂排放量。本研究中的碳足迹估算依据段华平等^[13]、许萍萍等^[10]的计算方法,具体估算模型如下:

$$C_{ef} = \frac{E_t}{N_{ep}}, N_{ep} = \frac{C_a}{S} \dots\dots\dots (3)$$

式中:*C_{ef}*为农田生态系统碳足迹(hm²);*E_t*为农业碳排放总量(*t*);*N_{ep}*为农田生态系统单位面积的固碳(碳吸收)能力(*t*/hm²);*C_a*为农作物的碳吸收量(*t*);*S*为农作物种植面积(hm²)。

当区域农田生态系统碳足迹*C_{ef}*>*C_{ec}*,就会出现碳生态赤字*C_{ed}*;如果*C_{ef}*<*C_{ec}*,则表现为碳生态盈余*C_{er}*。

$$C_{ed} = C_{ef} - C_{ec} \quad (C_{ef} \geq C_{ec}) \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{er} = C_{ec} - C_{ef} \quad (C_{ef} < C_{ec}) \dots\dots\dots (5)$$

同时,为深入分析农田生态系统的碳足迹,本研究借鉴国内学者的研究成果^[18-19],引入碳足迹强度指标,该指标用来衡量区域农田生态系统的

碳足迹效益。具体计算公式如下:

$$C_{ief} = \frac{C_{ef}}{P} \dots\dots\dots (6)$$

式中:*C_{ief}*为碳足迹强度(hm²/万元);*C_{ef}*为农田生态系统碳足迹(hm²);*P*为区域种植业总产值。*C_{ief}*越低,表明农田生态系统的能源利用效率越高,其碳足迹效益就越高。

2 结果与分析

2.1 河南省农田生态系统碳吸收量动态分析

由表2可以看出,河南省农田生态系统碳吸收量总体呈现上升趋势,碳吸收总量从2000年的4 778.38万*t*增加到2017年的7 753.92万*t*,净增量为2 975.54万*t*,年均增长率为2.89%。农田生态系统2000~2017年的单位面积碳吸收量也呈现出整体上升趋势,从2000年的3.64 *t*/hm²增加到2017年的5.26 *t*/hm²,年均增长率为2.2%。这与近年来河南省出台一系列农业发展的相关政策有关,这些政策的实施提高了河南省土地集约利用效率,使农作物种植面积逐步扩大,从而提升了河南省农田生态系统的碳吸收量。具体来看,河南省农田生态系统碳吸收量和单位面积碳吸收量都在2003年出现下降,究其原因是2003年河南省遭受罕见的洪涝灾害,秋季农作物大幅减产,受灾面积3 148.08万亩,成灾面积2 547.57万亩,绝收面积857.44万亩,进而使秋粮总产量减产35.8%,油

表2 2000~2017年河南省主要农作物碳吸收量及碳吸收强度

年份	粮食作物(万 t)	经济作物(万 t)	园艺作物(万 t)	碳吸收总量(万 t)	单位面积碳吸收量(<i>t</i> /hm ²)
2000	2 979.90	372.79	1 425.68	4 778.38	3.64
2001	2 974.10	346.19	1 491.42	4 811.70	3.67
2002	3 072.86	384.33	1 645.85	5 103.04	3.82
2003	2 614.28	276.12	1 342.27	4 232.67	3.09
2004	3 128.05	361.39	1 636.60	5 126.04	3.71
2005	3 361.15	398.50	1 849.96	5 609.61	4.03
2006	3 787.30	413.59	2 024.07	6 224.96	4.45
2007	3 889.75	419.71	2 009.10	6 318.56	4.49
2008	3 975.59	437.86	2 024.57	6 438.02	4.54
2009	3 996.79	465.57	2 065.20	6 527.56	4.60
2010	4 150.18	457.27	2 144.10	6 751.54	4.71
2011	4 255.62	449.00	2 120.81	6 825.42	4.75
2012	4 385.57	471.25	2 166.88	7 023.70	4.88
2013	4 478.00	486.19	2 167.53	7 131.73	4.89
2014	4 566.86	473.92	2 131.54	7 172.32	4.87
2015	4 813.91	478.50	2 189.10	7 481.51	5.03
2016	4 835.50	488.64	2 300.80	7 624.93	5.12
2017	4 848.98	518.00	2 386.94	7 753.92	5.26

料总产量减产 26.3%,棉花总产量减产 50.8%,从而使碳吸收量减少。

从表 2 可以看出,粮食作物、经济作物和园艺作物碳吸收量也呈现出显著增加的趋势。粮食作物碳吸收量由 2000 年的 2 979.90 万 t 增长到 2017 年的 4 848.98 万 t,增加了 1 869.08 万 t,年均增长率为 2.91%;经济作物碳吸收量由 2000 年的 372.79 万 t 增长到 2017 年的 518.00 万 t,增加了 145.21 万 t,年均增长率为 1.95%;园艺作物碳吸收量由 2000 年的 1 425.68 万 t 增长到 2017 年的 2 386.94 万 t,增加了 961.26 万 t,年均增长率为 3.08%。从三类农作物的碳吸收量占比看,粮食作物的碳吸收量占碳吸收总量的比重明显高于经济作物和园艺作物,粮食作物的碳吸收量占比一直都在 60% 以上,园艺作物的碳吸收量占比一直都在 30% 以上,经济作物碳吸收量占比在 6%~7% 之间。究其原因,河南省肩负着全国粮食安全的重任,保证粮食安全是河南省农业发展最重要的政治任务,因此,研究期间粮食作物的种植面积在三类作物中一直是最高的;蔬菜在种植业中仅次于粮食作物,主要是因为种植蔬菜瓜果产量较大,再加上售价高、利润大,故此园艺作物近年来的种植面积也逐步增加,使其在三种作物中的碳吸收量位居第二;经济作物的种植面积变动较

大,如主要经济作物棉花的种植面积逐年减少,其产量由 2000 年的 70.38 万 t 减少至 2017 年的 4.4 万 t,正是由于经济作物的种植面积逐步减小,相应地使经济作物碳吸收量的占比在这三类作物中变低。

2.2 河南省农田生态系统碳排放动态分析

由表 3 可见,2000~2017 年河南省农田生态系统的碳排放量总体呈现出先增加再减少的态势。碳排放总量从 2000 年的 926.00 万 t 达到 2015 年最大值 1 309.45 万 t 后,开始呈现递减趋势。根据碳排放总量的变化趋势,将研究期间变化分为两个阶段,第一阶段是 2000~2015 年,为碳排放总量快速增长阶段。究其原因,河南省作为农业大省和国家粮食生产核心区,高度重视农业生产,使河南粮、棉、油等主要农产品均居全国前列,这背后也是因为各种农业生产的投入数量在日趋增加,使得碳排放呈现快速增大的趋势,年均增长率达 2.51%;第二阶段是 2016~2017 年,为碳排放总量减少阶段。从 2015 年开始国家为农业绿色发展提出化肥、农药等投入“一控两减三基本”的目标任务,河南省也出台了关于农业减排降碳相关政策,推广使用有机肥和生物、物理防治病虫害等,使得从 2016 年开始化肥、农药等投入得到控制,碳排放总量开始呈现下降趋势。

表 3 2000~2017 年河南省农田生态系统碳排放量和碳排放强度

年份	碳排放量(万 t)							碳排放强度 (t/hm ²)
	化肥	农药	农膜	柴油	翻耕	农业灌溉	总计	
2000	361.64	47.12	47.60	47.16	410.66	11.81	926.00	0.704 9
2001	379.71	48.60	48.74	49.49	410.37	11.92	948.83	0.722 8
2002	403.01	50.33	51.07	50.44	417.63	12.01	984.48	0.736 9
2003	402.20	48.70	51.18	50.14	427.77	11.98	991.97	0.724 9
2004	423.92	49.93	52.63	51.51	431.57	12.07	1 021.63	0.740 0
2005	445.39	51.86	56.15	53.28	435.22	12.16	1 054.07	0.757 1
2006	464.55	55.06	61.33	55.12	437.50	12.30	1 085.86	0.775 9
2007	489.70	58.22	65.58	57.14	440.39	12.39	1 123.41	0.797 4
2008	517.20	58.78	67.72	58.80	443.32	12.47	1 158.29	0.816 8
2009	540.40	59.90	73.25	61.76	443.79	12.58	1 191.68	0.839 4
2010	563.17	61.61	76.15	63.96	447.67	12.70	1 225.25	0.855 6
2011	579.12	63.53	78.53	65.85	449.31	12.88	1 249.21	0.869 1
2012	588.34	63.30	80.38	66.56	449.73	13.01	1 261.32	0.876 7
2013	598.60	64.17	86.92	67.21	455.97	12.42	1 285.30	0.881 2
2014	606.66	64.08	84.69	68.75	460.51	12.75	1 297.45	0.880 7
2015	615.55	63.53	83.92	67.98	465.14	13.33	1 309.45	0.880 0
2016	614.64	62.72	84.49	66.64	465.86	13.40	1 307.74	0.877 5
2017	607.48	59.56	81.48	64.51	460.54	13.47	1 287.04	0.873 6

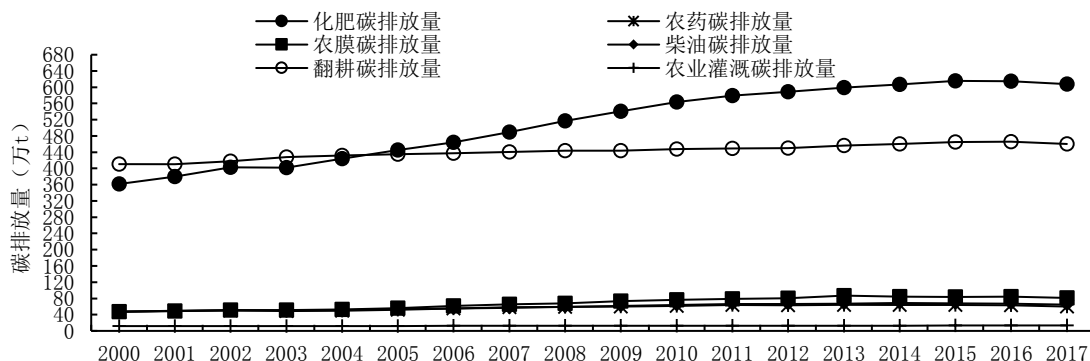


图1 2000~2017年河南省农田生态系统各类碳排放源碳排放情况

从图1可以看出,河南省化肥和农药产生的碳排放量总体和碳排放总量变化趋势一致,农膜、农用柴油、翻耕和灌溉产生的碳排放量总体上呈现出增加态势,但增幅不大,较为平稳。其中,化肥的碳排放量占农业总碳排放量比重较大,年均贡献率为44.12%,用化肥可以快速提高粮食产量,而由此带来的碳问题也十分严重。其余依次为翻耕、农膜、柴油、农药和灌溉,年均碳排放贡献率分别为38.76%、5.89%、5.14%、4.99%和1.10%。

2000~2017年河南省农田生态系统的碳排放强度也呈现出先增加后减少的态势。碳排放强度从2000年的0.70 t/hm²增加到2013年的0.88 t/hm²,随后开始缓慢降低到2017年的0.87 t/hm²。从单位

面积的碳排放看,化肥的单位面积碳排放量最高,由2000年的320.25 kg/hm²增加到2015年的481.25 kg/hm²,其后开始略微减少,远远超过发达国家公认的每公顷土地使用的化肥用量不得超过225 kg/hm²安全警戒线^[21],这也再次说明了在河南农业生产过程中,化肥施用强度很高,对碳排放的增加有着重要影响。

2.3 河南省农田生态系统碳足迹动态分析

从图2可以看出,2000~2017年河南省农田生态系统碳足迹呈现出先上升后下降的态势。2000年河南省的生态碳足迹为2.55×10⁶ hm²,到2003年达到最高值3.21×10⁶ hm²,随后开始呈现不断下降趋势,到2017年下降到2.45×10⁶ hm²。

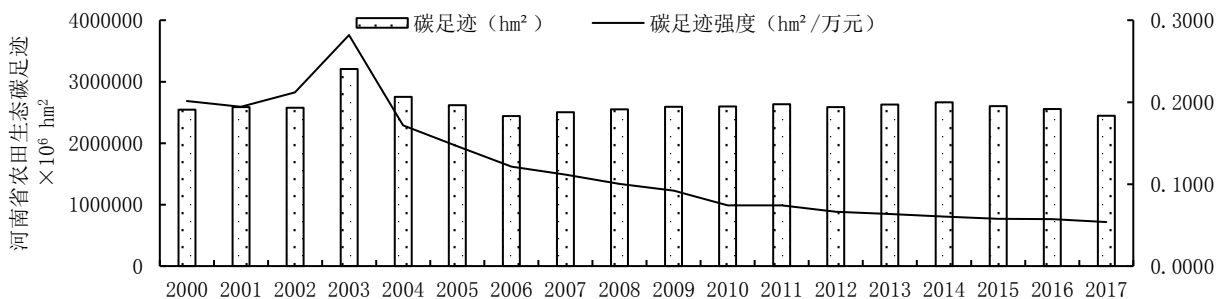


图2 2000~2017年河南省农田生态系统碳足迹及碳足迹强度变化

2000~2017年河南省碳足迹强度呈逐年下降的趋势,从2000年的0.20 hm²/万元降低到2017年的0.054 hm²/万元,年均递减率7.5%。2000~2017年均值为0.12 hm²/万元,说明河南省农田生态系统每增加1万元的产值就可以占用0.12 hm²的碳足迹。总体来看,河南省的碳足迹较低,表明其能源利用效率较高,碳足迹效益较高。

从农田生态系统碳足迹的赤字/盈余看,研究区域的生产性土地面积(耕地面积)均大于其同期的碳足迹,这表明研究区域对农田生态系统的开发与利用小于其生态系统承载力,表明河南省农田生态系统呈现碳生态盈余状态,其农田低碳化水平较高。

3 结论与建议

3.1 结论

本研究通过对2000~2017年河南省农田生态系统碳源/碳汇和碳足迹的测算并进行对比分析后得出以下结论:

(1)在碳吸收和碳排放总量上,河南省农田系统碳吸收总量呈现增长态势,由2000年的4 778.38万t增加到2017年的7 753.92万t,年均增长率为2.89%,碳排放总量呈先增后减的态势,碳排放总量从2000年的926.00万t升到2015年的最大值1 309.45万t后,开始呈现递减的趋势。研究期间的碳吸收总量均高于同期的碳排放总量,表明

河南省农田生态系统具备较强的碳汇能力。

(2)在碳吸收和碳排放强度上,河南省农田系统碳吸收强度在时间序列上呈增加趋势,从2000年的3.64 t/hm²增加到2017年的5.26 t/hm²,年均增长率为2.2%;碳排放强度先增加后减少,碳排放强度从2000年的0.70 t/hm²增加到2013年的0.88 t/hm²,随后开始缓慢降低到2017年0.873 6 t/hm²。随着河南省农业减排相关政策的推进和科技的进步,农业投入的绿色化,土地集约利用大大提高,这使得河南碳吸收量快速增长,也有效减少了农田生态系统的碳排放。

(3)在碳吸收和碳排放的碳源上,粮食作物、经济作物和园艺作物这三类农作物碳吸收量呈现出显著增长趋势。其中,粮食作物的碳吸收量明显高于园艺作物和经济作物,且对总碳吸收量贡献最大。化肥和农药产生的碳排放量总体和碳排放总量变化趋势一致,农膜、农用柴油、翻耕和灌溉产生的碳排放量总体上呈现出增加态势,但增幅不大,较为平稳。其中,化肥碳排放量对总碳排放量的贡献最大。

(4)在碳足迹上,2000~2017年河南省农田生态系统碳足迹呈现出先上升后下降的态势。18年间农田生态系统碳足迹平均占生态生产性土地面积(耕地面积)的34.4%,农田生态系统处于碳生态盈余的状态;研究期间河南省碳足迹强度呈逐年下降趋势,年均值为0.12 hm²/万元,碳足迹较低,碳足迹效益较高。

3.2 建议

本研究通过对河南省2000~2017年的农业(种植业)的碳吸收量和碳排放量进行了测算,结果表明研究区域的碳吸收量远远大于碳排放量,河南省农田生态系统存在碳生态盈余。针对上述结论,提出以下对策:首先应当控制化肥的投入,一方面倡导测土配方施肥,另一方面要加大推广使用有机肥的力度;其次推广使用具有节能与清洁能源功能的农业机械;三是要加强农业科技创新,培育和推广农作物新品种^[22],提升碳汇能力;四是加强农田及水利建设,保护高产稳产农田,改造中低产田。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: Impact, adaptation and vulnerability[M]. Cambridge: University Press, 2014: 12-18.
- [2] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2014: 67-71.
- [3] 冉光和, 王建洪, 王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J]. 农业经济问题, 2011, 32(2): 32-38.
- [4] Lal R, Bruce J P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect[J]. Environmental Science & Policy, 1999, 2(2): 177-185.
- [5] 周陶, 高明, 谢德体, 等. 重庆市农田系统碳源/汇特征及碳足迹分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 96-102.
- [6] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 767-773.
- [7] 杨皓然, 宋戈, 杨光, 等. 周春风. 潍坊市农田生态系统碳源(碳汇)及其碳足迹变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 82-88.
- [8] 王梁, 赵杰, 陈守越. 山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 133-141.
- [9] 李甜甜. 江苏省农田碳源、碳汇分布特征及影响因素分析[D]. 南昌: 江西财经大学, 2017.
- [10] 许萍萍, 赵言文, 陈颢明, 等. 江苏省农田生态系统碳源/汇、碳足迹动态变化[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 238-243.
- [11] Brown M. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment[J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 4856-4869.
- [12] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(1): 1-6.
- [13] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持通报, 2011(5): 203-208.
- [14] 黄廖, 祖强. 鄱阳湖生态经济区碳足迹计算与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(5): 257-260.
- [15] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 等. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8822-8834.
- [16] 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.
- [17] 秦子, 刘子琪, 曾庆亚, 等. 玉米秸秆还田对东北黑土土壤碳排放的影响研究[J]. 吉林农业科学, 2011(3): 37-38.
- [18] 金姝兰, 杨光灶, 朱子明. 江西土壤质量与低碳农业发展[J]. 吉林农业科学, 2011(1): 26-29.
- [19] 李波, 刘雪琪, 梅倩, 等. 湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 62-70.
- [20] 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.
- [21] 陈炜, 殷田园, 李红兵. 1997-2015年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 37-44.
- [22] 舒坤良, 杨宁, 孙旭, 等. 科技创新推进吉林省农业现代化的思路与对策[J]. 东北农业科学, 2018(6): 44-48.

(责任编辑:王丝语)