

山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析

王梁¹ 赵杰^{1,2} 陈守越¹

(1. 临沂大学 资源环境学院, 山东 临沂 276000;

2. 山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要 依据 2002—2013 年山东省 17 地市农业投入、播种面积以及作物产量等统计数据,对全省各地市农田生态系统进行碳源、碳汇估算,从中分析其变化规律,并探讨造成碳源、碳汇时空变化的影响因素。结果表明:山东省农田系统具备较强的碳汇能力,碳吸收量明显高于碳排放量,两者的总量之比为 4.32 : 1;碳吸收量和碳汇量呈增加趋势,碳排放量和碳足迹呈降低趋势;农田生态系统表现出较大的碳生态盈余,碳足迹占同期耕地面积的比值呈现降低趋势,2002 年为 27.71%,2013 年为 20.96%;17 地市之间单位面积碳汇量和单位面积碳足迹存在明显差异,2013 年单位面积碳汇量最高的为德州市(6.20 t/hm²)、最低为威海市(3.02 t/hm²),单位面积碳足迹最高的威海市为 0.26 hm²/hm²、最低的泰安市为 0.08 hm²/hm²。

关键词 农田生态系统;碳源;碳汇;碳足迹

中图分类号 K 901

文章编号 1007-4333(2016)07-0133-09

文献标志码 A

Analysis of ecosystem carbon sources/sinks and carbon footprint in farmland ecosystem of Shandong Province

WANG Liang¹, ZHAO Jie^{1,2}, CHEN Shou-yue¹

(1. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, China;

2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract According to the statistical data (agricultural investments, crops areas and crops output) of 17 cities from 2002 to 2013 in Shandong Province, the farmland ecosystem carbon and carbon sinks and its changing rules of entire province was estimated and the influencing factors which caused carbon sources and carbon sinks' spatial and temporal changing were explored. The results show that: Agricultural system in Shandong Province holds a powerful carbon sink capacity, the amount of carbon sequestrations is significantly higher than that of carbon emissions, and the rate of the total amount between them is 4.32 : 1; The amount of carbon sequestration and carbon sinks is apparently displaying an increasing tendency, the amount of carbon emissions and carbon footprint shows a decreasing tendency; The farmland ecosystem displays a promising carbon ecological surplus, while the ratio between footprint area and farmland area is dropping, which was 27.71% in 2002 and 20.96% in 2013; There are obvious differences among the 17 cities on per unit area of carbon sinks and carbon footprint. In 2013, the highest amount of per unit area carbon sinks is Dezhou City (6.20 t/hm²); the lowest is Weihai City (3.02 t/hm²). The highest per unit area of carbon footprint is Weihai City (0.26 hm²/hm²), the lowest is Tai'an City (0.08 hm²/hm²).

Keywords farmland ecosystem; carbon source; carbon sink; carbon footprint

农田生态系统作为自然经人工干预而形成的半自然生态系统,既是重要的碳源也是重要的碳汇。一方面,农业活动作为重要的碳排放源,CO₂ 及

CH₄ 的排放量分别占大气中温室气体排放量的 21%~25% 和 57%^[2];另一方面,全球农田生态系统作为巨大的碳储存库,碳储存量占全球碳储存量

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2015DL002); 临沂市科技惠民计划(2015HM004); 国家星火计划(2015GA740064)

第一作者: 王梁,硕士生导师,博士,主要从事农业生态学研究, E-mail: wangliang.cn@163.com

的10%左右,约为170 Pg (1 Pg=10⁹ t)^[3]。全球耕地总固碳潜力达到0.75~1.0 Pg/a,未来50~100 a 农田土壤可固定碳40~80 Pg^[4-5];我国农田生态系统中农业活动的固碳潜力可达182.10 Tg/a (1 Tg=10⁶ t)^[6]。通过计算、分析农田系统碳源碳汇,有助于掌握农田系统在陆地碳循环中的地位,同时对于促进农田固碳减排,推动农业可持续发展具有积极意义^[7]。目前,我国对农田系统碳源碳汇的研究,局限于沿海地区、上海市、广东省、福建省、河北省、江苏省、重庆市等少数省市^[7-13],其研究成果在计算碳排放量时没有考虑土地翻耕、农用柴油等因素,在计算碳吸收量时也未能将各类作物含水率以及蔬菜作物等纳入计算范围,对计算碳源、碳汇的精确性有一定影响。

碳足迹是指由某种活动(或者某种产品生命周期内累积的)直接或间接引起的CO₂排放量的度量。随着大气中CO₂浓度的持续提升,全球气候变暖趋势明显,碳足迹作为一种新的研究方法,成为国内外生态学研究领域的新热点^[14-15]。国外研究主要进行碳足迹的计算和评价,进而提出减少碳足迹的对策和建议以及建立碳足迹的数学模型并进行分析^[16-17];国内学者对碳足迹概念及核算、碳排放及产业碳足迹核算、土地变化及人均碳足迹测算、碳足迹影响及改善对策等方面进行了相关研究^[7,18-21],但较少涉及农田生态系统碳循环领域。在农田生态系统领域开展碳足迹研究,对我国发展低碳农业,保障农业可持续发展具有重要理论价值及实际意义。

因此,本研究以中国农业大省山东省为研究对象,定量分析2002—2013年山东省农田生态系统碳排放量、碳吸收量与碳足迹的变化特征及其影响因素,以期为调整农业产业结构、促进农田生态系统固碳减排、减轻碳足迹和保障农业可持续发展提供科学依据。

1 区域概况与研究方法

1.1 区域概况

山东省地处北纬34°22.9′~38°24.01′、东经114°47.5′~122°42.3′之间,全境东西最宽约为700 km,南北最长约为420 km,总面积约为15.71万km²。中部地区以山地丘陵地形为主,东部半岛地区以波状丘陵为主,西部以及北部地区主要属于平原地形,平原约占55%,山地丘陵约占30%。属暖温带季风性气候类型,表现出夏季高温多雨,冬季

寒冷干燥的气候特征。年平均降水量一般在550~950 mm之间,其中约有65%集中于夏季。年平均气温11~14℃,光照时数年均2 290~2 890 h。

山东省作为农业大省,农业增加值长期稳居全国第一。农作物种类较多,主要有小麦、玉米、水稻、花生、蔬菜等。本研究以山东省为例,通过对农业活动导致的碳排放量和农作物碳吸收量的测算,分析农田生态系统碳源、碳汇的时空分布情况,并对其影响因素进行探讨。

1.2 数据来源

2002—2013年山东省17地市主要农作物播种面积、耕地面积、农作物产量以及历年化肥使用量、农药使用量、农业机械总动力和农田灌溉面积等数据,均来源于2003—2014年的《山东省农业统计年报》和《山东省统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 碳源汇概念界定

联合国气候变化框架公约(UNFCCC)指出,“碳源”是指向大气中排放温室气体、气溶胶或者有排放温室气体前兆的过程或活动,“碳汇”是指移除大气中温室气体的任一过程、活动或机制^[22]。农田生态系统是一个受人为控制的开放系统,包括生态过程、技术过程及经济过程,构成农田生产过程的生态系统、技术系统和经济系统^[8,9]。本研究在估测山东省农田生态系统碳源、碳汇时,以农田生产的技术系统为边界,将农田中农用化学品使用、农业机械使用、农业生产燃料动力、土壤翻耕、农田灌溉作为主要的碳排放途径,将农田作物全生育期碳吸收作为碳吸收的主要途径。

1.3.2 碳足迹概念界定

碳足迹概念在国际上已被广泛应用,由于各国学者对其内涵的理解程度不同,导致计算结果存在较大的差异。碳足迹的定义主要有两种:第一种是指由于某种活动(或某种产品生命周期内累积的)直接或者间接引起的CO₂排放量或温室气体转化的CO₂等价物排放量;第二种定义是指吸收化石燃料燃烧排放的CO₂所需要的生产性土地面积。前者指的是碳排放量,后者是指碳排放的占地面积。本研究为便于进行区域性生态承载力的比较以及与其他生态足迹组分的合并,采用后一种定义。

1.3.3 碳排放量估算方法

农田生态系统中农业投入碳排放的主要来源是化肥、农药、农膜、农业机械、农业灌溉以及农田翻耕

等。本研究将碳排放的估算公式定义为：

$$E_t = E_f + E_p + E_m + E_e + E_i + E_s + E_g \quad (1)$$

式中： E_t 为碳排放总量，t； E_f 、 E_p 、 E_m 分别为使用化肥、农药、农膜在生产和使用过程中所导致的碳排放量，t； E_e 为农业机械运输使用电能直接或者间接产生的碳排放量，t； E_i 为农业灌溉过程中间接耗费化石能源所导致的碳排放量，t； E_s 为农业机械运输使用柴油直接或者间接产生的碳排放量，t； E_g 为农田翻耕破坏土壤有机碳库导致的碳排放量，t。

各种碳排放源碳排放的计算公式如下：

$$E_f = G_i \times A_i \quad (2)$$

式中： G_i 为 i 类化肥的使用量，t，主要包括氮肥、磷肥、钾肥和复合肥四类肥料； A_i 是为化肥类型转化系数，4 类肥料的转化系数分别为 1 740. 00、165. 09、120. 28 以及 380. 97 g/kg。

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

式中： G_p 为农药的使用量，kg； B 为农药转化系数 (4. 934 1 kg/kg)。

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

式中： G_m 为农膜的使用量； C 为农膜施用转化系数 (5. 18 kg/kg)。

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

式中： A_e 为农作物的种植面积， hm^2 ； D 为农田耕作转化系数 (16. 47 kg/ hm^2)； W_e 为农业机械总动力，kW； F 为农业用电转化系数 (0. 18 kg/kW)。

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

式中： A_i 为农田有效灌溉面积， hm^2 ； G 为农田灌溉转化系数 (266. 48 kg/ hm^2)。

$$E_s = G_s \times J \quad (7)$$

式中： G_s 为农业机械柴油的耗用量，t； J 为柴油消耗的转化系数 (0. 592 7 kg/kg)。

$$E_g = S_i \times H \quad (8)$$

式中： S_i 为农作物播种面积， hm^2 ； H 为农田翻耕转化系数 (312. 6 kg/ hm^2)。

农药、磷肥、钾肥和柴油的碳排放系数引自于 West 等^[23] 的研究成果；氮肥的碳排放系数引自于逯非等^[24] 的研究成果；农膜等的碳排放系数引自于田云等的研究成果^[25]。公式的编写根据孟成民等^[10]、段华平等^[26]、周陶等^[7] 的研究成果修订得到。

1.3.4 碳吸收量估算方法

农田生态系统中农作物全生育期对碳的吸收量估算采用谢鸿宇等^[27] 的方法，计算方法如下：

$$C_t = \sum_i C_d = \sum_i C_f D_w = \sum_i C_f Y_w (1 - \omega_i) / H_i \quad (9)$$

式中： C_t 是为区域作物碳吸收总量； i 为农作物的种类； C_d 为 i 类农作物全生育期对碳的吸收量； C_f 是为 i 类作物光合作用合成单位重量干物质所需要吸收的碳，即作物的碳吸收率； D_w 为 i 类作物总生物量； Y_w 为 i 类作物的经济产量； H_i 为 i 类作物的经济系数。相关数据如表 1 所示^[13,28]。

表 1 我国主要农作物和经济系数、含水率和碳吸收率

Table 1 Main crop and economic coefficient, water cut and carbon uptake rate in China

作物 Crop	经济系数 Economic coefficient	含水率 Moisture content	碳吸收率 Carbon absorption rate
小麦 Wheat	0.40	0.12	0.485 3
玉米 Maize	0.40	0.13	0.470 9
水稻 Rice	0.45	0.12	0.414 4
高粱 Sorghum	0.35	0.13	0.450 0
谷子 Millet	0.40	0.14	0.450 0
豆类 Beans	0.35	0.13	0.450 0
薯类 Tubers	0.70	0.70	0.422 6
棉花 Cotton	0.10	0.08	0.450 0
花生 Peanut	0.43	0.10	0.450 0
蔬菜 Vegetables	0.65	0.90	0.450 0

1.3.5 碳汇估算方法

$$N_c = C_t - E_t \quad (10)$$

$$N_u = N_c / S_i \quad (11)$$

式中： N_c 为农田生态系统的净碳吸收量，t； C_t 指农作物全生育期的碳吸收量，t； E_t 指农业投入带来的碳排放量，t； N_u 为单位播种面积碳汇量，t/ hm^2 ； S_i 为农作物播种面积， hm^2 。

1.3.6 碳足迹估算方法

本研究碳足迹估算采取段华平等^[26] 的研究方法，计算公式为：

$$C_{EF} = E_t / N_{EP} \quad (12)$$

$$N_{EP} = C_t / S \quad (13)$$

式中： C_{EF} 为农田生态系统碳足迹， hm^2 ； E_t 为农田投入碳排放总量，t； N_{EP} 为农田生态系统单位面积的碳吸收能力，即每公顷农田 1 年的碳吸收量，t/ hm^2 ；

C_i 为区域农田生态系统中所有农作物全生育期碳吸收总量, t; S 为耕地面积, hm^2 。

将区域农田生态系统碳足迹和该区域生态承载力(耕地面积)进行比较, 如果前者高于后者, 那么将出现生态赤字; 反之表现为碳生态盈余, 计算公式为:

$$C_{ED} = C_{EF} - C_{EC} (C_{EF} > C_{EC}) \quad (14)$$

$$C_{ER} = C_{EC} - C_{EF} (C_{EF} < C_{EC}) \quad (15)$$

式中: C_{ED} 为碳生态赤字; C_{ER} 为碳生态盈余; C_{EC} 为生态承载力(耕地面积)。

2 结果与分析

2.1 山东省农田系统碳排放变化分析

表 2 示出 2002—2013 年山东省主要碳排放途径, 可见, 2002—2013 年山东省农田生态系统碳排放整体呈先增后减的变化特征。碳排放总量自 2002 年 1 226.06 万 t 增加到 2007 年的 1 284.67 万 t, 增长了 58.61 万 t, 年平均增速为 0.94%, 单位播种面积碳排放量由 2002 年的 1.11 t/hm^2 上升到 2007 年的 1.20 t/hm^2 , 上升了 0.09 t/hm^2 , 年平均增长率为 1.57%, 这主要与化肥、农药、农膜等农业生产资料投入的持续增加以及农业机械化水平的提高有关。2007—2013 年期间, 山东

省农田系统碳排放总量呈现出减少的趋势, 从 2007 年的 1 284.67 万 t 减少到 2013 年的 1 217.08 万 t, 下降了 67.59 万 t, 年平均增速为 -0.90%, 单位播种面积碳排放量由 2007 年的 1.20 t/hm^2 下降到 2013 年的 1.11 t/hm^2 , 减少了 0.09 t/hm^2 , 年平均增长率为 -1.29%。这表明山东省积极调整农业结构, 在固碳减排上取得了一定的成效。

通过分析山东省 2002—2013 年农田生态系统七种主要的碳排放途径(表 2), 结果表明: 化肥施用产生的碳排放占整个碳排放过程的比例最大, 达到 31.85%, 但是随着年份的推进, 该比例呈现出减少的趋势, 至 2013 年降至 30.65%; 2013 年山东省化肥施用强度为 430.61 kg/hm^2 , 远高于发达国家公认的安全警戒线 225 kg/hm^2 ; 土壤翻耕和农膜使用的碳源排放量分别占总排放量的 27.38% 和 13.45%, 其余途径碳源碳排放量占总排放量的 27.32%。化肥、农药、农膜引起的碳排放量呈现出先增后减的变化趋势, 前期增加是由于农民为提高农作物产量而加大对相关农资的施用, 后期减少是因为山东省近年来大力倡导发展无公害农业、绿色农业、有机农业的结果。农业机械、农田灌溉导致碳排放量呈现逐步上涨的趋势, 这表明山东省农业机械化水平的提高。

表 2 2002—2013 年山东省主要碳排放途径碳排放量

Table 2 Comparison of major carbon emissions in Shandong province from 2002 to 2013

10^4 t

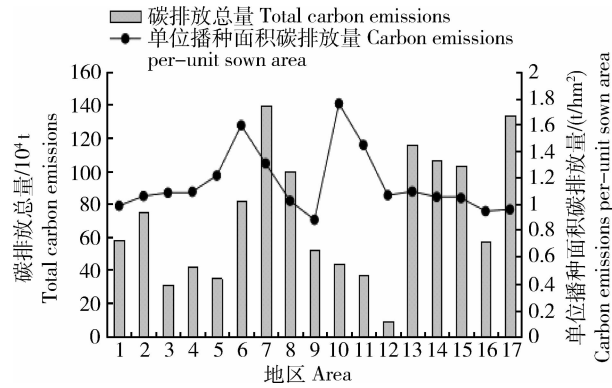
年份 Year	化肥 Chemical fertilizer	农药 Farm chemical	农膜 Agricultural film	农机 Farm machinery	灌溉 Irrigation	柴油 Diesel	翻耕 Tillage	合计 Total
2002	400.86	80.77	151.36	19.66	127.84	100.22	345.35	1 226.06
2003	389.67	84.32	158.35	19.43	126.87	102.06	340.27	1 220.97
2004	399.70	75.94	169.49	19.32	127.03	99.35	336.86	1 227.69
2005	411.97	76.77	171.77	19.34	127.64	111.09	335.61	1 254.19
2006	424.51	84.52	177.93	19.39	128.40	114.07	335.35	1 284.17
2007	427.74	81.76	176.74	19.45	128.89	114.85	335.24	1 284.67
2008	388.68	85.61	166.43	19.59	129.69	108.26	336.48	1 234.74
2009	381.19	83.39	162.55	19.75	130.49	106.22	336.93	1 220.52
2010	379.23	81.36	167.31	19.91	132.05	110.61	338.18	1 228.65
2011	373.36	81.31	164.88	20.07	132.89	109.79	339.65	1 221.95
2012	376.40	79.93	164.78	20.13	132.89	106.43	339.70	1 220.26
2013	373.00	78.16	165.09	20.37	133.83	103.51	343.12	1 217.08

图 1 是 2013 年山东省各市碳排放总量及单位播种面积碳排放量对比图, 由此可以看出山东省各

地市碳排放总量和单位播种面积碳排放量的区域差异较大。排放总量最大的是潍坊市(139.59 万 t),

碳排放总量最小的是莱芜市(9.19 万 t);2013 年碳排放总量中,潍坊市、菏泽市、临沂市、德州市、聊城市位居前五位,占全省碳排放量的比例接近 50%。这主要是由这五市农作物播种面积大,农业化学品的投入以及资源能源消耗总量较大引起的。

单位播种面积碳排放量前三位的城市依次为威海市、烟台市和日照市,分别达到 1.76、1.59、1.44 t/hm²。后三名分别是泰安市、菏泽市、济南市,依次是 0.88、0.96、0.98 t/hm²,这体现出山东省各地市在农业发展方向、发展特色和发展水平上的差异。



1. 济南市 Jinan City; 2. 青岛市 Qingdao City; 3. 淄博市 Zibo City; 4. 枣庄市 Zaozhuang City; 5. 东营市 Dongying City; 6. 烟台市 Yantai City; 7. 潍坊市 Weifang City; 8. 济宁市 Jining City; 9. 泰安市 Taian City; 10. 威海市 Weihai City; 11. 日照市 Rizhao City; 12. 莱芜市 Laiwu City; 13. 临沂市 Linyi City; 14. 德州市 Dezhou City; 15. 聊城市 Liaocheng City; 16. 滨州市 Binzhou City; 17. 菏泽市 Heze City. 下图同, the same below.

图 1 2013 年山东省各市碳排放总量及单位播种面积碳排放量对比

Fig. 1 Comparison of total carbon emissions and carbon emissions per-unit sown area in Shandong Province of 2013

2.2 山东省农田系统碳吸收变化分析

分析 2002—2013 年山东省主要农作物生育期碳吸收量的对比(表 3)发现:自 2002 年开始山东省农田生态系统碳吸收总量呈现出逐年上升的趋势,由 2002 年的 4 423.97 万 t 上升到 2013 年的 5 805.44 万 t,增长了 1 381.47 万 t,年平均增长率为 2.50%;单位播种面积碳吸收量自 2002 年起同样呈现逐年上涨的趋势,由 2002 年的 4.00 t/hm² 上涨到 2013 年的 5.29 t/hm²,上升了 1.29 t/hm²,年平均增长率为 2.57%,这主要是由于山东省加大对粮食生产的扶持力度、推动惠农政策实施,保障粮食播种面积以及粮食单产水平提高,使得在总体农作物播种面积下降的情况下,农田生态系统碳汇能力还可稳步提升。

进一步分析 2002—2013 年山东省各类主要农作物全生育期碳吸收量的变化(表 3),结果表明小麦和玉米的碳吸收量远远高于其他农作物,分别占碳吸收量的 38.32%和 33.88%,并且自 2002 年起,

表 3 2002—2013 年山东省主要农作物生育期碳吸收量

Table 3 Carbon uptake of major crops in Shandong Province from 2002 to 2013

10⁴ t

年份 Year	小麦 Wheat	玉米 Maize	水稻 Rice	高粱 Sorghum	谷子 Millet	豆类 Beans	薯类 Tubers	棉花 Cotton	花生 Peanut	蔬菜 Vegetables	合计 Total
2002	1 651.73	1 347.89	88.62	7.21	12.62	85.29	40.19	298.91	314.44	577.06	4 423.97
2003	1 670.92	1 445.18	63.12	7.14	12.44	91.85	50.32	363.00	334.95	604.33	4 643.25
2004	1 691.77	1 535.44	73.41	6.47	11.71	84.78	44.54	454.45	344.06	615.02	4 861.64
2005	1 922.35	1 777.42	77.63	5.49	10.33	75.97	36.06	350.37	338.98	595.87	5 190.48
2006	2 017.65	1 803.92	86.39	5.59	9.00	73.17	37.88	423.56	334.37	575.26	5 366.79
2007	2 130.59	1 860.45	89.26	2.54	4.58	47.25	31.96	414.37	306.62	577.55	5 465.17
2008	2 171.82	1 933.10	89.48	2.46	4.37	46.60	32.41	430.81	317.49	597.81	5 626.36
2009	2 185.82	1 968.01	90.78	2.34	4.30	46.67	33.75	381.38	311.65	618.73	5 643.42
2010	2 197.88	1 978.84	86.41	1.73	5.19	45.60	34.29	299.78	319.33	625.21	5 594.26
2011	2 246.27	2 026.57	84.25	1.73	5.64	48.15	34.07	324.82	318.90	635.60	5 726.02
2012	2 326.96	2 042.79	83.78	1.77	5.70	44.58	33.65	289.18	328.38	649.80	5 806.58
2013	2 368.92	2 014.76	83.98	1.67	5.44	44.82	34.53	257.09	325.58	668.64	5 805.44

二者碳吸收量呈现出快速增长的趋势,11年来,分别增长了717.19和666.87万t,年均增长率依次为3.33%和3.72%。这主要是由于国家和省政府不断出台粮食安全政策鼓励、加大农业基础设施建设,补贴农户种粮导致农作物单位面积产量得到快速提高引起的。农作物碳吸收量较大的作物还有蔬菜、棉花和花生,分别占11.44%、6.68%以及6.07%。由于豆类种植面积的呈现逐年减少的趋势,豆类作物产生的碳吸收量由2002年的85.29万t下降至2013年的44.82万t,年均增长率为-5.68%。

山东省各地市碳吸收总量和单位播种面积碳吸收量的区域差异较为明显(图2)。总体分布特点为沿海地区低于内陆地区,德州市、菏泽市、潍坊市、聊城市和济宁市占据碳吸收总量的前五名,以上五市合计超过全省碳吸收量的50%。碳吸收总量的区域差异主要与各地市农作物种植面积以及农作物总产量的不同有关。而位居单位播种面积前三位的地市分别为德州市、泰安市、淄博市,分别达到7.26、6.14、5.83 t/hm²,后三名依次是莱芜市、东营市和威海市,分别为4.12、4.31、4.78 t/hm²,这是与各地市农作物单位面积产量的高低有关。

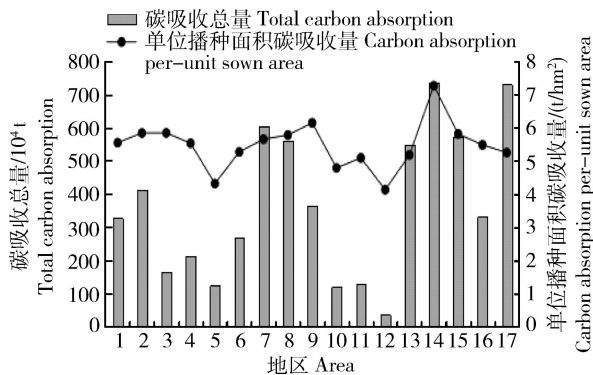


图2 2013年山东省各市碳吸收总量及单位播种面积碳吸收量对比

Fig. 2 Comparison of total carbon absorption and unit sown area in Shandong Province in 2013

2.3 山东省农田系统碳汇分析

将山东省农田系统碳吸收量和碳排放的数据进行比较,得到如下结果(图3):碳吸收量远远大于碳排放量(11年碳排放总量和碳吸收总量分别14 840.95万t和64 153.38万t,两者之比为1:4.32,其中2013年碳吸收量为碳排放量的4.77倍),碳汇量呈现逐年上涨的趋势,由2002年的

3 197.91万t上涨至2013年的4 588.36万t,年均增长率为3.34%;单位播种面积碳汇量由2002年的2.89 t/hm²上涨至2013年的4.18 t/hm²,年均增长率为3.41%。农业生产技术的提高、惠农政策的有效实施、农作物单产的稳步增加,碳吸收强度的增长明显快于碳吸收强度的增长导致山东省农田生态系统碳汇增长迅速且具备较强的碳汇能力。

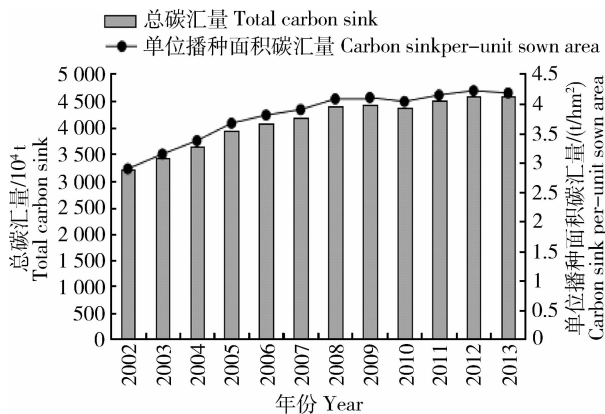


图3 2002—2013年山东省总碳汇量及单位播种面积碳汇量变化趋势

Fig. 3 The total carbon sink and the change trend in Shandong Province from 2002 to 2013

将2013年山东省各地市农田生态系统碳吸收量和碳排放的数据进行比较,得到如下结果(图4):碳汇量最大的地区为德州市(628.40万t),最小的地区为莱芜市(26.20万t),两地相差23.98倍,这主要与农作物种植面积的大小有关。由于各地市农作物播种面积的巨大差异,有必要分析一下单位播种面积碳汇量,2013年单位播种面积碳汇量前3名

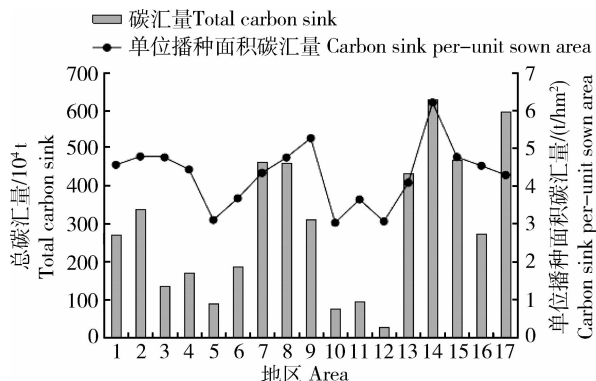


图4 2013年山东省各市总碳汇量及单位播种面积碳汇量对比

Fig. 4 The comparison of total carbon sink and carbon sink in Shandong Province in 2013

依次是德州市、泰安市、聊城市，分别为 6.20、5.26、4.76 t/hm²；单位播种面积碳汇量后 3 名分别是威海市、莱芜市、东营市，依次为 3.02、3.06、3.09 t/hm²。结果表明山东省各地市的碳汇量差异较为明显，莱芜市、东营市、威海市等碳汇能力较差的地市亟需优化农业产业结构，改善农田耕作条件，保障粮食作物种植面积，提高作物单产，增强农田系统碳汇能力。

2.4 山东省农田系统碳足迹分析

表 4 反映了 2002—2013 年山东省主要农作物生育期碳足迹的对比情况，由表可知，山东省农田生态系统碳足迹呈现递减趋势，2002 年为 195.94 万 hm²，2013 年为 160.08 万 hm²，下降了 35.86 万 hm²，

农田生态系统碳足迹占同期生产性土地面积(耕地)的比值呈现降低趋势，由 2002 年的 27.71% 降至 2013 年的 20.96%，即农田生产排放的 CO₂ 需要全省约 1/5 的耕地来消纳，同时意味着山东省农田系统处于碳盈余状态，这对于补充山东省工业发展、社会生活的碳生态赤字具有积极意义，2013 年达到 603.49 万 hm²。山东省农田生态系统单位播种面积碳足迹趋向于逐年降低的趋势，2002 年为 0.177 4 hm²/hm²，2013 年为 0.145 8 hm²/hm²，表明山东省农田生态系统的碳库功能在提高。

从区域差异上来看(图 5)，各地市间差异明显，碳足迹最大的是潍坊市 18.11 万 hm²，最小的是莱

表 4 2002—2013 年山东省主要农作物生育期碳足迹对比

Table 4 Comparison of carbon footprint of main crops in Shandong Province from 2002 to 2013

年份 Year	碳足迹/10 ⁴ hm ² Carbon footprint	碳生态盈余/10 ⁴ hm ² Carbon surplus	碳足迹占耕地比例/% Proportion of carbon footprint of sown area	单位播种面积碳足迹/ (hm ² /hm ²) Carbon footprint of per-unit sown area
2002	195.94	511.06	27.71	0.18
2003	182.78	512.31	26.30	0.17
2004	174.44	516.35	25.25	0.16
2005	166.28	521.87	24.16	0.15
2006	164.03	521.49	23.93	0.15
2007	160.97	523.82	23.51	0.15
2008	164.83	586.25	21.95	0.15
2009	162.44	588.64	21.63	0.15
2010	164.96	586.12	21.96	0.15
2011	160.28	590.79	21.34	0.15
2012	160.46	603.10	21.02	0.15
2013	160.08	603.49	20.96	0.15

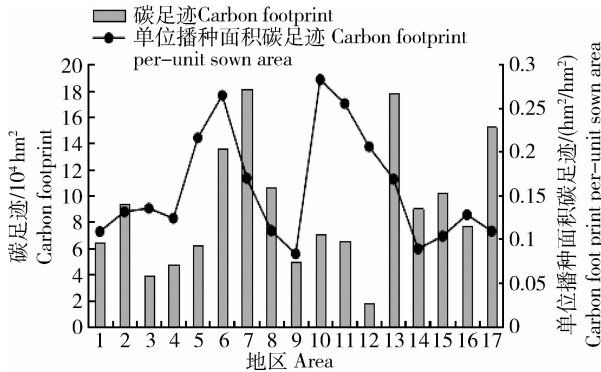


图 5 2013 年山东省各市碳足迹及单位播种面积碳足迹差异

Fig. 5 The differences of carbon footprint of carbon footprint and carbon footprint per-unit sown area in Shandong Province in 2013

芜市 1.77 万 hm²，两者相差高达 10.11 倍。由于山东省各地市耕地面积和播种面积存在较大差异，因此有必要研究单位面积碳足迹，2013 年单位播种面积前三名依次为威海市、烟台市、日照市，分别达到 0.28、0.26、0.25 hm²/hm²，后三名分别为泰安市、德州市、聊城市，依次为 0.08、0.09、0.10 hm²/hm²，单位播种面积碳足迹差异较大，第一名威海市的单位播种面积碳足迹是最后一名泰安市的 3.40 倍。

3 讨论与结论

通过对山东省农田生态系统碳排放量和碳吸收量的计算分析，能够看出碳吸收量明显高于碳排放量，表明山东省农田生态系统具备较强的固碳能力，与周陶等^[7]、赵荣钦等^[8]、祁兴芬等^[28]的研究成果

相似。但是,本研究得出农田碳足迹呈逐年下降的趋势与段华平等^[26]、韩召迎等^[13]的研究结果相悖,分析造成上述结果差异的原因,是对碳源、碳汇以及碳足迹的概念界定以及计算公式的差异所致。例如本研究在碳排放的计算过程中考虑土壤翻耕以及柴油的使用,两者产生的排放量巨大,使得农田碳排放量明显高于段华平等^[26]的测算结果;在碳吸收的计算过程中考虑各类作物的含水量,使得农作物的碳吸收量明显低于周陶等^[7]的研究结果。

然而,本研究以统计资料为依据,计算农田系统中主要农业生产活动造成的碳排放和主要农作物种类的碳吸收,并未把全部农业生产活动和所有农作物种类计算在内,势必影响研究结果的精确性;并且在碳吸收量的计算中,农作物的生物产量由经济产量推算而来,会使最终结果与实际存在一定的误差;此外由于国内缺乏农田碳排放清单的研究,本研究参照国外相关文献选取碳排放转化系数,在山东省农田系统中的不一定具适用性;再者,本研究未进行有关土壤碳固定、作物和土壤呼吸碳排放量计算的实验监测,也会降低估算精度。因此,针对上述4类不确定性因素,需要进行更为深入细致的研究,找出符合本地区的碳排放系数推算、作物经济系数测定、土壤碳固定测算、农作物及土壤呼吸速率测算和不同管理方式的碳足迹效应比较研究等,以期为区域碳排放清单提供更加精确的数据资料。

本研究通过构建农田系统碳源、碳汇和碳足迹模型,计算山东省及其各地市农田生态系统碳排放、碳吸收、碳汇和碳足迹,分析结果,得出以下结论:山东省农田系统具备较强的碳汇能力,碳吸收量明显高于碳排放量;碳吸收量及碳汇量呈现出增加的趋势,碳排放量以及碳足迹呈现出降低的趋势;碳足迹与生产性土地面积相比较小,农田生态系统表现出较大的碳生态盈余,可为本地区工业发展和社会生活碳生态赤字提供绿色屏障,对于保护环境、促进生态建设具有重要意义;各地市之间碳汇能力和碳足迹存在较大的空间差异性,但各地市均具备碳汇能力且皆呈现不同程度的碳生态盈余。

参 考 文 献

[1] 张婷,蔡海生,王晓明. 土地利用变化的碳排放机理及效应研究综述[J]. 江西师范大学学报,2013,37(1):110-114
Zhang T, Cai H S, Wang X M. Summarization of the effects of

land use changes on carbon emission[J]. *Journal of Jiangxi Normal University*, 2013, 37(1):110-114 (in Chinese)

[2] 林而达. 气候变化与农业可持续发展[M]. 北京, 北京出版社, 2001
Lin E D. *Climate Change and the Sustainable Development of Agriculture*[M]. Beijing: Beijing Press, 2001

[3] Paustian K, Andren O, Janzen H. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emission[J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(4):230-244.

[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, 2:177-185.

[5] Lal R. Carbon sequestration in dryland[J]. *Annual Arid Zone*, 2000, 39(1):1-10.

[6] 韩冰, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状与潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2):612-619
Hang B, Wang X K, Lu F, Duan X N, Ouyang Z Y. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2):612-619 (in Chinese)

[7] 周陶, 高明, 谢德体, 魏朝富. 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, 2014, 36(1):96
Zhou T, Gao M, Xie D T, Wei C F. Research on carbon source/sink and carbon footprint of cropland ecosystem in Chongqing [J]. *Journal of Southwest University*, 2014, 36(1):96 (in Chinese)

[8] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2):1-6
Zhao R Q, Qing M Z. Temporospatial variation of partial carbon source/sink of farmland ecosystem in coastal china[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2):1-6 (in Chinese)

[9] 钱晓雍. 上海农田生态系统碳源汇时空格局及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7):1460-1467
Qian X Y. Spatial-temporal variation and impact factor of carbon source and sink of farmland ecosystem in Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1460-1467 (in Chinese)

[10] 孟成民, 刘清, 王建武. 广东省农田生态系统碳源汇时空差异[J]. 广东农业科学, 2014, (8):198-199
Meng C M, Liu Q, Wang J W. Temporospatial variation analysis on carbon source/sink of farmland ecosystem in Guangdong[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, (8):188-199 (in Chinese)

[11] 李艳春, 王成己, 叶菁, 王义祥, 黄毅斌. 福建省农田生态系统碳源/汇时空变化及其影响因素分析[J]. 福建农业学报, 2014, 29(11):1098-1103
Li Y C, Wang C J, Ye J, Wang Y X, Huang Y B. Spatial-temporal variation and impact factor of carbon source and sink of farmland ecosystem in Fujian [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(11):1098-1103 (in Chinese)

[12] 袁再建, 张京京, 付亚男. 河北省农田生态系统碳源/汇时空变

- 化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 206-210
- Yuan Z J, Zhang J J, Fu Y N. Temporal and spatial variation and influence factors of carbon source and sink of farmland ecosystem in Hebei Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 206-210 (in Chinese)
- [13] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 吴悠, 周治国. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析—以江苏省为案例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 1034-1041
- Han Z Y, Meng Y L, Xu J, Wu Y, Zhou Z G. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem-taking Jiangsu Province as a case[J]. *Journal of Jiangxi Normal University*, 2012, 31(5): 1034-1041 (in Chinese)
- [14] East A J. Vegetable industry carbon footprint scoping study discussion paper 1: What is a carbon footprint? An overview of definitions and methodologies [R]. Sydney: Horticulture Australia Limited, 2008
- [15] Weidema B P, Thrane M, Christensen P. Carbon footprint: A catalyst for life cycle assessment [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(1): 3-6
- [16] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis [J]. *Environment Science & Technology*, 2009, 43(16): 6414-6420
- [17] Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4856-4869
- [18] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济, 2011, (4): 76-79
- Ji J P, Ma X M. Review of carbon footprint: Definitions and accounting methods[J]. *Ecological Economy*, 2011, (4): 76-79 (in Chinese)
- [19] 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[J]. 地理学报, 2010, 65(9): 1148-1155
- Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1148-1155 (in Chinese)
- [20] 张约翰, 张平宇. 长吉一体化区域碳排放足迹及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 89-95
- Zhang Y H, Zhang P Y. The carbon footprint and impact factors in regional integration of Changchun and Jilin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(9): 89-95 (in Chinese)
- [21] 韩艳莉, 陈克龙, 陈英玉. 1999—2008年青海省碳足迹动态变化研究[J]. 生态经济, 2011(2): 54-60
- Han Y L, Chen K L, Chen Y Y. Study on dynamic change of carbon footprint of Qinghai in the years from 1999 to 2008[J]. *Ecological Economy*, 2011(2): 54-60 (in Chinese)
- [22] FAO. Carbon sequestration options under the clean development mechanism to address and degradation[Z]. Rome, FAO, 2000.
- [23] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 217-232
- [24] 逯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 段晓男, 郑华. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2239-2250
- Lu F, Wang X K, H B, Chen Y Y, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239-2250 (in Chinese)
- [25] 田云, 李波, 张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究[J]. 中国地质大学学报, 2011, 11(1): 59-63
- Tian Y, Li B, Zhang J B. Research on stage characteristics and factor decomposition of agricultural land carbon emission in China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2011, 11(1): 59-63 (in Chinese)
- [26] 段华平, 张悦, 赵建波, 卞新民. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208
- Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, Bian X M. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in china[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208 (in Chinese)
- [27] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 胡安焱. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735
- Xie H Y, Chen X S, Lin K R, Hu A Y. The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1729-1735 (in Chinese)
- [28] 祁兴芬. 德州市区域农田生态系统碳足迹变化分析[J]. 扬州大学学报, 2013, 34(2): 65-66
- Qi X F. Analysis of carbon footprint of farmland ecosystem in Dezhou City[J]. *Journal of Yangzhou University*, 2013, 34(2): 65-66 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东