



秦彦凯,凌凡舒,闫广志,等. 山东省农田生态系统碳足迹时空变化分析[J]. 黑龙江农业科学,2026(2):55-62.

山东省农田生态系统碳足迹时空变化分析

秦彦凯¹,凌凡舒²,闫广志³,郭建业²,李培宗⁴,谭兆丰⁵,石绍滨²,葛新成²

(1. 临沂市兰山区枣园镇农业和财经服务中心,山东 临沂 276000; 2. 临沂市农业技术推广中心,山东 临沂 276000; 3. 费县农业技术推广中心,山东 临沂 276000; 4. 莒南县农村经营管理服务中心,山东 临沂 276000; 5. 临沂农业发展集团有限公司,山东 临沂 276000)

摘要:为促进山东省低碳农业和农田生态系统的良性可持续发展,以山东省主要农田投入、产出及耕地面积等有关统计资料为基础,对农田生态系统碳排放量、碳吸收量及碳足迹进行测算,并对其时空变化进行分析。结果表明,从时间上看,山东省农田生态系统碳吸收量由2014年的6 207.35万t增长至2023年的6 609.26万t,其中粮食作物碳吸收量占比最高;碳排放量由2014年的757.94万t下降至2023年的591.01万t,其中化肥在所有碳排放途径中占比最大;碳足迹由2014年的93.05万hm²下降至2023年的58.48万hm²,单位面积碳足迹从2014年的0.12 hm²·hm⁻²下降至2023年的0.09 hm²·hm⁻²。从空间上看,2023年潍坊市、临沂市、烟台市碳足迹较高,淄博市碳足迹最低;烟台市和威海市单位面积碳足迹相对较高,菏泽市单位面积碳足迹最小。研究期内山东省农田生态系统的碳吸收量明显高于碳排放量,农作物具有良好的固碳能力,碳足迹均小于同期耕地面积,农田生态系统呈现碳生态盈余状态。

关键词:农田生态系统;碳排放;碳吸收;碳足迹;可持续发展

全球气候变暖导致了一系列的环境问题,成为全社会关注的焦点。农业是重要的温室气体排放源,中国作为世界上重要的农业大国,彰显了大国担当,积极参与降碳减排,明确提出力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的“双碳”目标。农田生态系统具备碳排放和碳吸收的双重功能,在碳循环中扮演重要角色,是研究降碳减排的重要方向^[1-4]。通过对农田生态系统碳足迹进行测算,可以掌握农作物碳足迹分布以及在农业生产过程中的碳排放情况,对推动低碳农业发展和实现“双碳”目标具有重要意义^[5-8]。

碳足迹核算是农业碳排放的定量评价,开展农作物碳足迹测算能够为低碳农业发展提供技术支撑^[9]。农田生态系统碳足迹的问题已经逐渐成为众多学者关注的热点和前沿领域,现有文献对于碳足迹的研究主要集中在碳足迹的构成和测算、碳足迹时空分布、碳足迹影响因素等方面,为农作物种植减排增产提供了有益的参考^[10-14]。目前对于碳足迹测算研究的主要方法有生命周期法和投入产出法两种^[15]。张传红等^[16]采用生命周期评价法构建农作物生产碳足迹评估模型,对

江苏省农作物全生命周期过程中碳排放情况进行分析,结果表明,1990—2019年江苏省农作物单位产量碳足迹整体上表现出下降趋势,单位面积碳足迹整体上表现出上升趋势。叶文伟等^[17]以海南岛为研究区域,从县域尺度对农田生态系统碳足迹时空变化进行分析,结果表明,1999—2018年海南岛农田生态系统碳足迹呈持续增长趋势。杨璐等^[18]基于新疆小麦、玉米和棉花的种植面积、产量和农资生产投入量等数据,核算新疆3种主要农作物的生产碳足迹,结果表明,新疆棉花年均单位面积碳足迹和单位产量碳足迹均为最高。吴海燕等^[19]基于油菜投入产出数据,测算了我国15个油菜种植省份碳足迹数据,结果表明,我国油菜温室气体排放总量、单位产量碳足迹、单位面积碳足迹均呈现增长趋势。

山东省作为中国重要的农业大省,农业生产水平不断提高,在农业生产过程中碳排放问题一直制约着农业的可持续发展。2023年山东省农业农村厅和山东省发展和改革委员会研究制定了《山东省农业农村减排固碳实施方案》,提出加快构建生态系统碳汇提升技术体系,协同推进温

收稿日期:2025-11-23

基金项目:山东省生态农业产业技术体系项目(SDAIT-30-12)。

第一作者:秦彦凯(1982—),女,学士,高级农艺师,从事农业生态研究。E-mail: zaogoutou2006@126.com。

通信作者:葛新成(1991—),男,博士,高级农艺师,从事农业生态研究。E-mail: staryye@163.com。

室气体减排,提高农业农村绿色低碳发展水平。为探索山东省农田生态系统低碳化发展现状,本研究基于山东省统计年鉴数据,以农业生产投入及农作物产量为研究对象,深度剖析山东省 2014—2023 年农田生态系统碳吸收、碳排放和碳足迹的时空变化趋势,以期为山东省发展低碳农业、优化种植结构、促进农田生态系统良性发展提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区域

山东省位于中国东部沿海、黄河下游,耕地面积 654 万 hm^2 ,气候类型为温带半湿润季风气候,年平均气温 $11\sim 14\text{ }^\circ\text{C}$ 。全省日照资源充足,年平均日照时数 2 290~2 890 h,年平均降水量 550~950 mm,降水集中,雨热同季,是我国重要的粮食作物、油料作物和蔬菜瓜果种植基地。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据来源于《山东省统计年鉴》,包含农作物播种面积和经济产量、化肥施用

量、农药施用量、农膜和农用柴油用量、农作物机耕面积等指标。

1.3 研究方法

在对农田生态系统碳吸收进行测算时,根据农作物种植特点,选择小麦、玉米、水稻、谷子、高粱、大豆、薯类、花生、油菜籽、芝麻、棉花、烟草、蔬菜、瓜果 14 种农作物。农田生态系统碳排放的测算,考虑农用地所产生的碳排放,选择化肥、农药、农膜、农业机械和灌溉作为碳排放途径,并对不同类型的化肥进行细化计算。

1.3.1 农田生态系统碳吸收 农田生态系统碳吸收量(C_i)是指农作物从播种到成熟这段时间内的碳吸收量,测算方法详见公式(1)。

$$C_{ii} = C_{fi} \times Y_i \times (1 - W_i) / H_i \quad (1)$$

式中, C_{ii} 、 C_{fi} 、 Y_i 、 W_i 、 H_i 分别是 i 农作物全生育期的碳吸收量、碳吸收率、经济产量、含水率和经济系数。不同农作物的碳吸收率(C_f)和经济系数(H)取值见表 1^[20]。

表 1 不同农作物的碳吸收率(C_f)、含水率(W)和经济系数(H)

作物类型	作物名称	碳吸收率(C_f)	含水率(W)	经济系数(H)	作物类型	作物名称	碳吸收率(C_f)	含水率(W)	经济系数(H)	
粮食作物	小麦	0.40	0.12	0.49	经济作物	花生	0.42	0.10	0.45	
	玉米	0.40	0.13	0.47		油菜籽	0.25	0.10	0.45	
	水稻	0.45	0.12	0.41		芝麻	0.15	0.12	0.45	
	谷子	0.50	0.14	0.45		棉花	0.10	0.08	0.45	
	高粱	0.35	0.14	0.45		烟草	0.55	0.16	0.45	
	大豆	0.35	0.13	0.45		园艺作物	蔬菜	0.65	0.90	0.45
	薯类	0.65	0.70	0.042		瓜果	0.70	0.90	0.09	

1.3.2 农田生态系统碳排放 农田生态系统碳排放量(E_i)的主要来源有以下 6 种,测算方法详见公式(2)~公式(8)。

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

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

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

$$E_j = G_j \times T_j \quad (5)$$

$$E_q = G_q \times T_q \quad (6)$$

$$E_r = G_r \times T_r \quad (7)$$

$$E_t = E_f + E_p + E_m + E_j + E_q + E_r \quad (8)$$

式中, E_f 、 E_p 、 E_m 、 E_j 、 E_q 、 E_r 分别为化肥(包含氮肥、磷肥、钾肥和复合肥)、农药、农膜、农业机械、灌溉、农用地的碳排放量; G_f 、 G_p 、 G_m 、 G_j 、 G_q 、 G_r 分别为化肥、农药、农膜使用量,农业机械总动

力,灌溉面积,农作物种植面积; T_f 、 T_p 、 T_m 、 T_j 、 T_q 、 T_r 分别为化肥、农药、农膜、农业机械、灌溉、农作物种植的碳排放系数见表 2^[21]。

表 2 农田生态系统投入物质碳排放系数

项目	碳排放系数
氮肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.74
磷肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.17
钾肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.12
复合肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.38
农药/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	4.93
农膜/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	5.18
农业机械总动力/ $(\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1})$	0.18
灌溉/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	266.48
农作物种植面积/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	16.47

1.3.3 农田生态系统碳足迹 农田生态系统碳足迹(CEF)为农田生态系统能够吸收生产性投入要素所需要的生产性耕地面积,单位为 hm^2 。测算方法详见公式(9)~公式(10)。

$$CEF = E_i / NEP \quad (9)$$

$$NEP = C_i / S \quad (10)$$

式中, E_i 为农田生态系统碳排放总量; NEP 为作物固碳能力; C_i 为农田生态系统碳吸收总量; S 为耕地面积。耕地面积大于农田生态系统碳足迹时为碳生态盈余,相反为碳生态赤字。

2 结果与分析

2.1 山东省农田生态系统碳吸收量分析

2.1.1 年际间的碳吸收量 从山东省农田不同作物的碳吸收在时间上的变化来看,2014—2023年山东省农田生态系统碳吸收量总体呈现波动上升趋势(图1)。山东省农田生态系统碳吸收量由2014年的6207.35万t增长至2023年的6609.26万t,增长了401.91万t,增长幅度为6.47%;粮食作物碳吸收量由2014年的3317.44万t增长至2023年的4115.48万t,增长了798.04万t,增长幅度为24.06%;经济作物碳吸收量由2014年的307.05万t减少至2023年的247.53万t,减少了59.52万t,减少幅度为19.38%;园艺作物碳吸收量由2014年的2582.86万t减少至2023年的2246.25万t,减少336.61万t,减少幅度为13.03%。研究期内粮食作物碳吸收量占比最高,为53.44%~63.00%,园艺作物碳吸收量占比次之,为33.02%~42.02%,经济作物碳吸收量占比最低,为3.74%~4.95%。

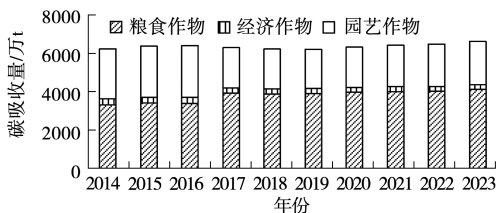


图1 2014—2023年山东省农田生态系统碳吸收量时间变化

2.1.2 主要作物的碳吸收量 研究期内山东省农田生态系统2023年碳吸收量达到最高值,为6609.26万t,2019年碳吸收量最少,为6195.71万t(表3)。玉米的碳吸收量增长最多,由2014年的1472.22万t增长至2023年的2006.60万t,增

长了534.38万t,增长幅度为36.30%;小麦的碳吸收量增长次之,由2014年的1626.27万t增长至2023年的1920.74万t,增长了294.47万t,增长幅度为18.11%。瓜果碳吸收量减少最多,由2014年的1142.22万t减少至2023年的906.90万t,减少了235.32万t,减少幅度为20.60%;蔬菜碳吸收量减少次之,由2014年的1440.65万t减少至2023年的1339.35万t,减少了101.30万t,减少幅度为7.03%。从山东省农田生态系统各农作物碳吸收量占比来看,小麦、玉米、蔬菜和瓜果的种植面积与产量远高于其他农作物,所以这4种农作物的碳吸收量也远超其他农作物。研究期内小麦、玉米、蔬菜和瓜果4种农作物碳吸收量占比从2014年的91.53%增长至2023年的93.41%,其中小麦碳吸收量占比为26.20%~29.61%,玉米碳吸收量占比为23.72%~31.41%,蔬菜碳吸收量占比为18.72%~23.39%,瓜果碳吸收量占比为13.60%~18.62%。

2.2 山东省农田生态系统碳排放量分析

山东省农田生态系统2014—2023年碳排放总量呈现持续下降趋势,碳排放量由2014年的757.94万t下降至2023年的591.01万t,下降了166.93万t,下降幅度为22.02%(表4)。在该研究期内,氮肥的碳排放量下降最多,从2014年的268.68万t下降至2023年的164.85万t,下降了103.83万t,降幅为38.64%;磷肥的碳排放下降幅度最大,碳排放量从2014年的7.96万t下降至2023年的4.88万t,降幅为38.69%;有效灌溉的碳排放量增长最多,从2014年的135.42万t增长至2023年的139.68万t,增长了4.26万t,增幅为3.14%。

从山东省农田生态系统各投入物质碳排放的占比来看,化肥在碳排放途径中占比最大且呈现下降趋势,占比从2014年的48.40%下降至2023年的42.38%;其中氮肥在碳排放途径中占比呈现下降趋势,占比从2014年的35.45%下降至2023年的27.89%;复合肥在碳排放途径中占比呈现增长趋势,占比从2014年的11.23%增长至2023年的13.10%;磷肥和钾肥的碳排放占比呈现下降趋势且占比较低,两者合计占比不足2%。农膜的碳排放占比次之且呈现增长趋势,占比从2014年的20.86%增长至2023年的22.04%。

表 3 2014—2023 年山东省主要农作物碳吸收量

年份	碳吸收量/万 t													合计	
	小麦	玉米	水稻	谷子	高粱	大豆	薯类	花生	油菜籽	芝麻	棉花	烟草	蔬菜		瓜果
2014	1626.27	1472.22	97.57	5.70	1.05	24.84	89.79	284.91	1.22	0.03	13.60	7.28	1440.65	1142.22	6207.35
2015	1685.72	1518.54	91.85	5.10	1.00	23.57	80.72	274.69	1.22	0.03	10.98	6.44	1483.86	1178.81	6362.54
2016	1684.28	1528.94	85.07	5.46	0.88	24.17	72.96	276.54	1.15	0.04	11.20	6.78	1491.68	1187.58	6376.73
2017	1792.41	1971.13	87.06	9.71	0.73	21.74	37.82	269.63	1.06	0.02	4.23	5.85	1174.88	899.67	6275.94
2018	1775.58	1930.41	95.22	11.23	0.71	29.32	39.12	263.74	1.09	0.02	4.44	4.75	1183.30	867.23	6206.14
2019	1833.93	1878.11	97.24	11.92	0.46	35.42	46.37	244.90	1.13	0.03	4.01	4.50	1181.72	855.97	6195.71
2020	1845.38	1921.70	95.40	11.43	0.48	37.55	52.95	246.51	1.10	0.04	3.74	4.85	1218.35	862.62	6302.11
2021	1894.09	1917.35	94.15	11.55	0.46	36.21	50.64	242.37	1.20	0.05	2.87	4.83	1271.27	870.08	6397.08
2022	1897.35	1947.64	87.49	10.90	0.43	39.31	51.08	232.28	1.15	0.05	2.96	5.04	1306.61	878.47	6460.78
2023	1920.74	2006.60	83.18	11.28	0.40	43.28	49.99	238.06	1.17	0.07	2.57	5.66	1339.35	906.90	6609.26

表 4 2014—2023 年山东省农田生态系统碳排放量

年份	碳排放量/万 t										合计
	氮肥	磷肥	钾肥	复合肥	农药	农膜	农作物种植	农业机械	有效灌溉		
2014	268.68	7.96	5.05	85.13	77.08	158.08	18.18	2.36	135.42		757.94
2015	262.76	7.94	4.85	85.35	74.44	156.22	18.16	2.40	136.62		748.75
2016	254.11	7.77	4.77	85.23	73.28	154.34	18.07	1.76	137.53		736.87
2017	242.14	7.47	4.61	82.76	69.35	148.72	18.29	1.83	138.33		713.49
2018	227.37	6.95	4.29	80.73	64.03	143.45	18.24	1.88	139.53		686.48
2019	207.36	6.26	3.97	78.20	59.33	138.36	18.01	1.92	140.47		653.88
2020	198.24	6.00	3.83	75.70	56.36	137.61	17.93	1.97	141.06		638.72
2021	181.88	5.34	3.57	77.90	53.36	134.51	18.03	2.01	142.02		618.63
2022	170.83	5.06	3.38	78.15	51.75	131.48	18.06	2.08	138.05		598.83
2023	164.85	4.88	3.27	77.45	50.31	130.28	18.12	2.16	139.68		591.01

2.3 山东省农田生态系统碳足迹时间演化

如表 5 所示,山东省农田生态系统 2014—2023 年碳足迹呈现不断下降趋势,由 2014 年的 93.05 万 hm^2 下降至 2023 年的 58.48 万 hm^2 ,减少了 34.57 万 hm^2 ,降幅为 37.15%。农作物固碳能力呈现波动上升趋势,由 2014 年的 8.15 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长至 2023 年的 10.11 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。农田生态系统碳足迹均小于同期耕地面积,表明山东省的农田生态系统呈现碳生态盈余状态。农田生态系统碳足迹在同期耕地面积中的占比呈现不断下降趋势,

占比从 2014 年的 12.21% 下降至 2023 年的 8.94%; 单位面积碳足迹同样呈现不断下降趋势,从 2014 年的 0.12 $\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ 下降至 2023 年的 0.09 $\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

通过对山东省农田生态系统碳足迹与耕地面积的对比,2014—2023 年碳足迹均小于同期耕地面积,表明山东省的农田生态系统呈现碳生态盈余状态。研究期内山东省农田生态系统碳生态盈余整体呈波动下降态势,总体减少了 73.56 万 hm^2 ,降幅 11.00%。其中 2020 年碳生态盈余最高,为 680.50 万 hm^2 ,2021 年最低,为 578.97 万 hm^2 。

表 5 2014—2023 年山东省农田生态系统碳足迹

年份	碳吸收量/ 万 t	碳排放量/ 万 t	固碳能力/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳足迹/ 万 hm^2	耕地面积/ 万 hm^2	碳生态盈余/ 万 hm^2	单位面积碳足迹/ ($\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$)
2014	6207.35	757.94	8.15	93.05	762.06	669.01	0.12
2015	6362.54	748.75	8.36	89.57	761.10	671.53	0.12
2016	6376.73	736.87	8.38	87.90	760.70	672.79	0.12
2017	6275.94	713.49	8.27	86.29	758.98	672.69	0.11
2018	6206.14	686.48	8.20	83.76	757.25	673.49	0.11
2019	6195.71	653.88	8.18	79.92	757.25	677.33	0.11
2020	6302.11	638.72	8.32	76.75	757.25	680.50	0.10
2021	6397.08	618.63	9.98	61.98	640.95	578.97	0.10
2022	6460.78	598.83	10.07	59.46	641.49	582.03	0.09
2023	6609.26	591.01	10.11	58.48	653.93	595.45	0.09

2.4 山东省农田生态系统碳足迹空间差异

山东省各地级市 2023 年农田生态系统碳吸收量、碳排放量、农作物固碳能力、碳足迹、单位面积碳足迹均存在较大差异(表 6)。碳吸收方面,菏泽市碳吸收量最大,为 1 007.88 万 t,占山东省碳吸收总量的 15.25%;威海市碳吸收量最小,为 97.51 万 t,占比为 1.48%。碳排放方面,潍坊市、菏泽市碳排放量较多,分别为 77.85 万和 71.31 万 t,分别占山东省碳排放总量的 13.17% 和 12.07%;日照市、东营市、淄博市碳排放量较少,分别为 12.00 万、13.17 万和 13.75 万 t,占比分别为 2.03%、2.23% 和 2.33%。农作物固碳能力方面,菏泽市农作物固碳能力最高,为 12.96 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;威海市

农作物固碳能力最低,为 5.89 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。碳足迹方面,潍坊市、临沂市、烟台市碳足迹较高,淄博市碳足迹最低。潍坊市碳足迹最高,为 7.06 万 hm^2 ,占比 12.08%;临沂市碳足迹为 6.15 万 hm^2 ,占比 10.51%;烟台市碳足迹为 6.09 万 hm^2 ,占比 10.41%。淄博市碳足迹最低,为 1.51 万 hm^2 ,占比 2.58%。单位面积碳足迹方面,烟台市最高,为 0.17 $\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$;威海市次之,为 0.15 $\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$;菏泽市单位面积碳足迹最低,为 0.07 $\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ 。山东省各地级市 2023 年农田生态系统碳生态盈余不同,菏泽市碳生态盈余最高,为 72.24 万 hm^2 ;威海市、淄博市碳生态盈余较低,分别为 14.08 万和 14.71 万 hm^2 。

表 6 2023 年山东省农田生态系统碳足迹

地级市	碳吸收量/ 万 t	碳排放量/ 万 t	固碳能力/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳足迹/ 万 hm^2	耕地面积/ 万 hm^2	碳生态盈余/ 万 hm^2	单位面积碳足迹/ ($\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$)
济南市	372.38	28.32	10.73	2.64	34.71	32.07	0.08
青岛市	387.52	33.50	8.89	3.77	43.58	39.81	0.09
淄博市	147.50	13.75	9.09	1.51	16.23	14.71	0.09
枣庄市	238.29	23.85	11.63	2.05	20.49	18.44	0.10

表6(续)

地级市	碳吸收量/ 万 t	碳排放量/ 万 t	固碳能力/ ($t \cdot hm^{-2}$)	碳足迹/ 万 hm^2	耕地面积/ 万 hm^2	碳生态盈余/ 万 hm^2	单位面积碳足迹/ ($hm^2 \cdot hm^{-2}$)
东营市	138.65	13.17	6.24	2.11	22.22	20.11	0.09
烟台市	232.17	39.55	6.50	6.09	35.73	29.64	0.17
潍坊市	738.29	77.85	11.02	7.06	66.98	59.91	0.11
济宁市	571.33	47.40	11.04	4.29	51.76	47.47	0.08
泰安市	303.36	24.92	10.31	2.42	29.41	26.99	0.08
威海市	97.51	14.56	5.89	2.47	16.56	14.08	0.15
日照市	108.92	12.00	6.00	2.00	18.16	16.16	0.11
临沂市	575.00	55.55	9.04	6.15	63.62	57.47	0.10
德州市	689.62	52.52	10.75	4.89	64.17	59.29	0.08
聊城市	642.22	54.56	12.19	4.48	52.69	48.21	0.08
滨州市	358.61	28.19	8.99	3.14	39.89	36.75	0.08
菏泽市	1007.88	71.31	12.96	5.50	77.74	72.24	0.07
合计	6609.26	591.01	10.11	58.48	653.93	595.45	0.09

3 讨论

本研究的2014—2023年山东省农田生态系统14种农作物中,小麦、玉米、谷子、大豆、芝麻5种农作物碳吸收量增加,水稻、高粱、薯类、花生、油菜籽、棉花、烟草、蔬菜、瓜果9种农作物碳吸收量减少,这主要与农作物的播种面积变化有关。2014—2023年山东省小麦、玉米、谷子、大豆、芝麻5种农作物播种面积分别增加26.86万,75.46万,1.37万,8.29万和0.06万 hm^2 ,碳吸收量分别增加294.48万,534.39万,5.58万,18.44万和0.04万t。同期水稻、高粱、薯类、花生、油菜籽、棉花、烟草、蔬菜、瓜果9种农作物播种面积分别减少2.14万,0.28万,13.12万,14.20万,0.07万,49.64万,0.73万,28.35万和7.01万 hm^2 ,碳吸收量分别减少14.39万,0.65万,39.79万,46.86万,0.06万,11.02万,1.62万,101.30万和235.32万t。

农作物在播种、翻耕、灌溉和收获等环节中的机械燃油消耗和化肥、农药等农业生产投入品的生产运输都会不同程度地产生大量的碳排放。高投入带来高产量的同时也造成了高排放,发展以降碳增汇为目标的低碳农业是适应气候变化、实现农业可持续发展的必然选择^[22-23]。2014—2023年山东省碳排放量总体呈持续下降趋势,这

主要是因为山东省推广使用有机肥等农业政策使化肥、农药等投入品施用量降低。2014—2023年山东省化肥施用量减少了113.29万t,降幅为24.20%;其中氮肥、磷肥、钾肥施用量分别减少59.67万,18.66万和14.80万t。2014—2023年山东省农药施用量减少5.43万t,降幅为34.73%;农膜使用量减少5.37万t,降幅为17.58%。因此,农业生产在保证农作物产量的前提下,需进一步减少化肥和农药施用,强化农田水利基础设施建设,优化灌溉排水措施。

农业生产技术水平、方式的差异是造成不同区域间农作物碳足迹差异的重要原因,农业生产投入越高,农作物固碳能力越低,碳足迹越高^[24]。潍坊市农业生产投入最高,2023年碳排放量达到77.85万t,碳足迹也最高,为7.06万 hm^2 。菏泽市和临沂市2023年碳排放同样较多,分别为71.31万和55.55万t,菏泽市碳排放量高于临沂市15.76万t。但同期菏泽市和临沂市农作物固碳能力分别为12.96和9.04 $t \cdot hm^{-2}$,碳足迹分别为5.50万和6.15万 hm^2 ,临沂市因农作物固碳能力低,所以碳足迹更高。为了助力粮食安全和生态保护双重目标的实现,要在“双碳”目标的指导下,积极推进农田固碳减排措施。合理控制氮肥等化肥用量,增加生物有机肥的投入,推进秸

秆还田、免耕等保护性耕作措施,提高土壤肥力,以实现粮食增产和农田生态系统固碳增汇。

4 结论

山东省农田生态系统的碳吸收在研究期内总体呈现波动上升趋势,农田生态系统碳吸收量由2014年的6 207.35万t增长至2023年的6 609.26万t。农作物固碳能力呈现波动上升趋势,由2014年的 $8.15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长至2023年的 $10.11\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。农田生态系统碳排放量从2014年的757.94万t下降至2023年的591.01万t。化肥在所有碳排放途径中占比最大且呈现下降趋势,占比从2014年的48.40%下降至2023年的42.38%。

山东省农田生态系统碳足迹由2014年的93.05万 hm^2 下降至2023年的58.48万 hm^2 。研究期内农田生态系统碳生态盈余整体呈波动下降态势,总体减少了73.56万 hm^2 ,其中2020年碳生态盈余最高,为680.50万 hm^2 ,2021年碳生态盈余最低,为578.97万 hm^2 。2023年菏泽市农田生态系统碳生态盈余最高,为72.24万 hm^2 ;威海市、淄博市碳生态盈余较低,分别为14.08万和14.71万 hm^2 。

参考文献:

- [1] 严燕,季国军,胡乃娟,等.长江下游稻田不同种植制度的碳足迹分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(7):1462-1473.
- [2] 韩欣怡,韩雪,李廷亮,等.中国马铃薯分省碳足迹核算与减排策略研究:基于生命周期评价法[J].中国农业资源与区划,2024(1):11-19.
- [3] 戴林秀,徐强,彭翔,等.稻渔共作模式碳足迹评价及减排对策分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(9):1971-1980.
- [4] 马海波,朱强.基于生命周期评价的我国稻米碳足迹核算[J].干旱区资源与环境,2023,37(6):11-19.
- [5] 薛秀峰,张仕超,张煊赞,等.近24年三峡水库库尾重庆市江津区耕地利用碳汇及碳足迹变化[J].中国农业资源与区划,2024,45(1):139-149.
- [6] HUO Y W, MI G H, ZHU M Y, et al. Carbon footprint of farming practices in farmland ecosystems on the North and Northeast China Plains[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120378.
- [7] TI J S, ZHENG Y, DUAN W D, et al. Carbon footprint of tobacco production in China through Life-cycle-assessment: regional compositions, spatiotemporal changes and driving factors[J]. Ecological Indicators, 2024, 165: 112216.
- [8] 朱向梅,王子莎.中国碳足迹广度空间关联格局及影响因素研究[J].调研世界,2021(5):38-48.
- [9] 张明洁,张京红,李文韬,等.中国农作物碳足迹核算研究概述[J].中国农业资源与区划,2023,44(5):148-154.
- [10] 王楚凡,牛俊.西北地区主要粮食作物种植的水、碳足迹及布局优化[J].中国农业科学,2024,57(6):1137-1152.
- [11] 张瑛,顾嘉怡,王琛,等.2011—2020年长江中下游地区主要粮食作物生产碳足迹[J].应用生态学报,2023,34(12):3364-3372.
- [12] 宁静,杨楠,杜国明,等.区域农田生态系统碳足迹时空演变研究:以黑龙江省为例[J].中国农业大学学报,2023,28(6):98-112.
- [13] 郝小雨.黑龙江省30年来农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化[J].黑龙江农业科学,2021(8):97-104.
- [14] 张惠云,秦丽杰,贾利.吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征[J].浙江农业学报,2021,33(6):974-983.
- [15] GIUSTI G, GALO N R, TÓFFANO PEREIRA R P, et al. Assessing the impact of drought on carbon footprint of soybean production from the life cycle perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425: 138843.
- [16] 张传红,韩露,谢佳男,等.江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究[J].南京信息工程大学学报,2022,14(1):110-119.
- [17] 叶文伟,王城城,赵从举,等.近20年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):114-126.
- [18] 杨璐,乐凯迪,张立杰.“双碳”目标下新疆主要农作物生产碳足迹[J].应用生态学报,2025,36(4):1147-1158.
- [19] 吴海燕,仇欢欢,周倩.基于生命周期评价法的我国油菜碳足迹核算与时空变化分析[J].南方农业学报,2025,56(4):1341-1350.
- [20] 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.
- [21] 付伟,徐媛媛,王福利,等.中国省域农田生态系统碳足迹时空演变分析[J].生态经济,2024,40(1):88-94.
- [22] 胡永浩,张昆扬,胡南燕,等.中国农业碳排放测算研究综述[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):163-176.
- [23] 吴洋斌,黄伟斌,陈家乐,等.中国棉花生产碳排放核算与碳达峰预测[J].农业环境科学学报,2023,42(3):692-704.
- [24] 魏玲,吴路华,杨东妮,等.中国农田生态系统碳源汇时空动态特征及其影响机制[J].生态学报,2025,45(15):7277-7296.

Temporal and Spatial Evolution of Carbon Footprint of Farmland Ecosystems in Shandong Province

QIN Yankai¹, LING Fanshu², YAN Guangzhi³, GUO Jianye², LI Peizong⁴, TAN Zhaofeng⁵, SHI Shaobin², GE Xincheng²

(1. Agriculture and Finance Service Center of Zaoyuan Town, Lanshan District, Linyi City, Linyi 276000, China; 2. Linyi Agricultural Technology Promotion Center, Linyi 276000, China; 3. Feixian Agricultural Technology Promotion Center, Linyi 276000, China; 4. Junan Rural Management Service Center, Linyi 276000, China; 5. Linyi Agricultural Development Grou Co., Ltd., Linyi 276000, China)

Abstract: In order to promote the sound and sustainable development of low-carbon agriculture and farmland ecosystems in Shandong Province, this study was based on statistical data on the input, output, and cultivated land area of major farmland in Shandong Province. It calculates the carbon emissions, carbon absorption, and carbon footprint of farmland ecosystems and analyzes their spatiotemporal changes. The results showed that in terms of time, the carbon absorption of agricultural ecosystems in Shandong Province increased from 62.073 5 million tons in 2014 to 66.092 6 million tons in 2023, with grain crops accounting for the highest proportion of carbon absorption. The carbon emissions have decreased from 7.579 4 million tons in 2014 to 5.910 1 million tons in 2023, with fertilizers accounting for the largest proportion of all carbon emission pathways. The carbon footprint decreased from 930 500 hectares in 2014 to 584 800 hectares in 2023, and the carbon footprint per unit area decreased from 0.12 ha·ha⁻¹ in 2014 to 0.09 ha·ha⁻¹ in 2023. From a spatial perspective, Weifang City, Linyi City, and Yantai City will had higher carbon footprints in 2023, while Zibo City will had the lowest carbon footprint. Yantai City and Weihai City had relatively high carbon footprints per unit area, while Heze City had the smallest carbon footprint per unit area. During the research period, the carbon absorption of the agricultural ecosystem in Shandong Province was significantly higher than the carbon emissions, and crops had good carbon sequestration capacity. The carbon footprint was smaller than the cultivated land area during the same period, and the agricultural ecosystem showed a carbon ecological surplus state.

Keywords: farmland ecosystem; carbon emission; carbon absorption; carbon footprint; sustainable development

(上接第 45 页)

“industry-enriching county” strategy, the planting scale of black fungus has been continuously expanded. However, the occurrence of diseases and insect pests of local black fungus has been frequent and increasingly severe year by year, affecting the yield and quality of black fungus and restricting industrial development. To identify the species of diseases and insect pests of black fungus in Zhangxian County, this survey collected disease samples during the growth period of black fungus bags and pest samples during the fruiting period, followed by DNA extraction, PCR amplification, and gene sequence identification and analysis. A total of 6 pathogenic species causing diseases and 8 pest species of black fungus in Zhangxian County were accurately identified. The fungal diseases were determined as *Trichoderma pleuroticola*, *Penicillium commune*, *Penicillium crustosum* and *Trichoderma citrinoviride*. The bacterial diseases were *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis* and *Enterobacter hormaechei*. The insect pests included *Bradysia impatiens*, *Lycoriella ingenua*, *Symplecta hybrida*, *Coboldia fuscipes*, *Stitopleurus minutus*, an undetermined species of Cecidomyiidae (Cecidomyiidae sp.), and an undetermined species of Sciaridae (Sciaridae sp.) and an undetermined species of Anthicidae (Anthicidae sp.). The dominant pests in the survey area, namely *Bradysia impatiens*, *Lycoriella ingenua*, and an undetermined species of Cecidomyiidae. These pests are the first to be reported in local research.

Keywords: *Auricularia auricula judae*; PCR amplification; fungal diseases; bacterial diseases; insect pests