

广东省农田生态系统碳源汇效应时空分异及驱动因素

宾津佑^{1,2}, 唐小兵³

(1.广东海洋大学管理学院 广东 湛江 524088;

2.广东沿海经济带发展研究院, 广东 湛江 524088; 3.湖南省社会科学院, 湖南 长沙 410003)

摘要: [目的] 探究广东省农田生态系统碳源汇效应时空分异及驱动因素, 为广东省科学合理制定区域农业减排固碳措施提供参考。[方法] 采用参数估计法、GIS空间分析等方法定量评估2010—2020年广东省农田生态系统碳源汇效应时空演变规律, 并借助LMDI因素分解模型探究农田生态系统碳源汇效应空间分异的驱动因素。[结果] ①广东省农田生态系统碳源汇效应水平维持持续向好发展态势, 减排增汇效应逐渐凸显。具体表现为: 固碳总量呈波动上升态势, 稻谷、甘蔗、蔬菜为主要的碳汇作物; 碳排放得到有效控制, 减排效应日益显现, 稻田种植、农资投入为主要的碳源类型; 农田生态系统固碳量增长有效抵消了碳排放增长。②广东省农田生态系统碳源汇效应空间分异明显, 总体呈相对集聚分布态势, 湛江为主要的高碳源—高碳汇地区, 低碳源—低碳汇则主要分布在珠三角地区。③经济因素为农田生态系统碳汇提升的关键驱动因素, 结构因素表现出两面性且因地制宜, 效率因素、劳动力因素则表现为抑制作用。[结论] 广东省农田生态系统碳源汇效应水平稳中向好, 但区域分异明显, 应结合各地经济、结构、效率、劳动力等因素的驱动效应差异, 因地制宜制定农业减排固碳措施。

关键词: 农田生态系统; 碳源汇效应; LMDI; 广东省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0382-08

中图分类号: S181, X22

文献参数: 宾津佑, 唐小兵. 广东省农田生态系统碳源汇效应时空分异及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 382-389. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.043; Bin Jinyou, Tang Xiaobing. Spatio-temporal differentiation and driving factors of farmland ecosystem carbon source-sink effects in Guangdong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 382-389.

Spatio-temporal Differentiation and Driving Factors of Farmland Ecosystem Carbon Source-Sink Effects in Guangdong Province

Bin Jinyou^{1,2}, Tang Xiaobing³

(1. College of Management, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong

524088, China; 2. Guangdong Coastal Economic Belt Development Research Institute, Zhanjiang,

Guangdong 524088, China; 3. Hunan Academy of Social Sciences, Changsha, Hunan 410003, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal differentiation and driving factors of farmland ecosystem carbon source-sink effects in Guangdong Province were analyzed in order to provide a valuable reference for the scientific and rational formulation of regional agricultural carbon reduction and carbon sequestration measures in the region. [Methods] Quantitative assessment of the spatial-temporal distribution of carbon source-sink effects in farmland ecosystems in Guangdong Province from 2010 to 2020 was conducted by using the parameter estimation method and GIS spatial analysis. The driving factors of spatial differentiation of the carbon source-sink effect in farmland ecosystems were determined by using the LMDI factor decomposition model. [Results] ① The level of carbon source-sink effects in Guangdong Province farmland ecosystems continued to maintain a good, positive development trend, and the effects of reducing emissions and sequestering carbon gradually

收稿日期: 2023-03-03

修回日期: 2023-03-19

资助项目: 广东省哲学社会科学规划项目“广东沿海经济带海洋资源环境经济系统承载力及协调发展研究”(GD19YYJ03); 湖南省社会科学院(湖南省人民政府发展研究中心)哲学社会科学创新工程资助项目“数字乡村发展、农户种植决策与农业碳排放”(23ZFH20)

第一作者: 宾津佑(1992—), 女(汉族), 湖南省衡山县人, 硕士, 讲师, 主要从事区域经济与区域发展、农业资源与环境经济研究。Email: yours_bin@163.com.

通信作者: 唐小兵(1988—), 男(汉族), 湖南省长沙市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事人口、资源与环境经济研究。Email: xiaobing9129@163.com.

became prominent. Specifically, the total carbon sequestration fluctuated and increased, and rice, sugarcane, and vegetables were the main carbon sources. Carbon emissions were effectively controlled, and the effect of reducing emissions was becoming increasingly evident. Rice planting and agricultural inputs were the main carbon sources. Moreover, the growth of carbon sequestration in farmland ecosystems effectively offset the growth of carbon emissions. ② The spatial heterogeneity of carbon source-sink effects of farmland ecosystems was obvious, and the overall distribution was relatively clustered. Zhanjiang was the main high-carbon source-high-carbon sink area, while low-carbon source-low-carbon sink areas were mainly found in the Pearl River Delta region. ③ Economic factors were the key driving force causing increased carbon sequestration in farmland ecosystems, while structural factors exhibited inconsistent responses and varied with their locations. Efficiency factors and labor force factors, on the other hand, had a restraining effect. [Conclusion] The carbon source-sink effect of farmland ecosystems in Guangdong Province exhibited a continuous increasing trend overall, but there were significant regional differences. Therefore, measures to reduce emissions and sequester carbon in agriculture should be tailored to local conditions, taking into account the differences in the driving effects of economic, structural, efficiency, and labor force factors in each region.

Keywords: farmland ecosystem; carbon effect; logarithmic mean division index; Guangdong Province

农业既是全球气候变暖的“受害者”,也是全球温室气体的“施加者”,农业减排固碳刻不容缓。农田生态系统作为陆地生态系统碳循环最为活跃的组成部分,具备碳汇、碳源双重属性^[1-3]。一方面,田间作物通过光合作用吸收 CO₂ 提升固碳效应;另一方面,农业生产活动过程中排放大量 CO₂。农田生态系统作为陆地生态系统碳积蓄的主要载体,具有储碳量大,固碳周期短,与人类活动密切相关等特点。与此同时,人类通过改良田间管理、秸秆还田、轮耕休耕等措施,也可以有效增加农田生态系统碳储蓄量。因此,探究农田生态系统碳源汇效应时空分异及驱动因素,对于因地制宜制定农业减排固碳措施具有重要现实意义。

近年来,学者们针对于不同区域尺度农田生态系统碳源汇效应问题开展了系统研究,主要涉及碳源/汇定量测度^[4-7],碳足迹动态变化^[8-10],时空差异及影响因素等内容^[11-13]。碳源/汇定量测度方面,多采用学术界公认的核算系数进行测算,部分学者则通过借助仪器实地测量获取相关系数值,并衍生出不同测算体系。农田生态系统碳足迹研究方面,主要集中于碳足迹核算、评价模型、影响因素等。李明琦等^[14]指出云南省农田生态系统单位面积碳足迹随时间呈增长态势,碳汇功能则趋于下降;郭永奇^[15]、郝小雨^[16]分别指出河南省、黑龙江省农田生态系统碳足迹均处于碳生态盈余状态,且具备较好的生态屏障作用。关于农田生态系统碳汇/源时空差异及影响因素研究,多围绕自然禀赋差异、社会经济政策、田间管理措施等原因剖析农田生态系统碳源汇效应影响机理与减排路径。孙小祥等^[6]以江苏沿海地区为例,分析了农田

生态系统碳源/汇动态发展的区域差异;刘欣铭等^[17]以中国 31 个省(市、区)为研究对象,指出 2003—2016 年农田生态系统地均碳排放增长量最大的为广东省;许萍萍等^[8]指出 2001—2016 年江苏省农田生态系统以碳汇为主,化肥为影响碳排放的关键贡献因子;范大莎等^[18]运用空间探索性分析及地理加权回归模型测度了东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素;赵荣钦等^[19]指出中国沿海地区农业面积减少和农业投入增加是削弱农田生态系统碳汇功能的重要原因。此外,少数学者就不同耕作模式、灌溉方式下农田生态系统净碳汇差异进行了探究^[20-21]。

纵观已有研究,针对农田生态系统碳源汇效应问题多围绕单一碳源或碳汇视角展开,虽有学者就农田生态系统净碳效应研究开展了有益探索,但鲜少兼顾区域碳源、碳汇二重性,将碳汇/源纳入同一分析框架分析碳源汇效应与碳平衡区域差异;其次,碳源核算过程中多局限于农业生产物质消耗过程中农用物资要素投入消耗引发的碳排放,忽视与农业相关的种植业、畜牧业等农业活动过程中产生的温室气体排放;此外,经济发达沿海省份农田生态系统碳源汇效应的驱动因素研究鲜少涉及。2020 年广东省耕地面积只有 1.90×10^6 hm²,人均耕地面积仅 0.015 hm²,不足全国的 1/5,在耕地面积总量持续减少,低碳农业发展转型的双重压力下,探究农田生态系统碳源汇效应对于农业绿色低碳发展具有重要意义。鉴于此,为更加准确度量广东省农田生态系统碳源汇效应和碳平衡,本研究运用参数估计法、GIS 空间分析探究 2010—2020 年广东省农田生态系统碳源汇效应时空分异,探寻影响广东省农田生态系统关键碳排放源,并借助 LMDI 因素分解模型识别影响该地区农田生

态系统碳源汇效应时空差异的主要驱动因素,以期为挖掘区域碳减排潜力,完善低碳农业发展规划,落实区域固碳增汇政策等提供决策支撑。

1 研究区概况与数据来源

广东省地处中国大陆东南沿海地区,地貌类型多样,地势北高南低,北部以山地、丘陵为主,南部多为平原、台地。该区属亚热带季风气候,光照充足,水资源丰富,为全国重要的双季稻产区。2020年,广东省农作物播种面积 $445.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中粮食作物播种面积 $2.20 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占总播种面积的 49.52%,粮食总产量达 $1.27 \times 10^7 \text{ t}$ 。2020年,广东省农业总产值 3.77×10^{11} 元,占农林牧渔总产值的 47.7%。本文以广东省 21 个地级市为研究单元,数据主要来源于 2011—2021 年《广东农村统计年鉴》《广东统计年鉴》以及各地市统计年鉴、公报数据。行政区划矢量数据主要来源于全国地理信息资源目录服务系统 1:100 万公众版基础地理信息数据。

2 研究方法

2.1 农田生态系统碳源汇效应测算

(1) 农田生态系统碳汇测算。参照已有研究^[6,19,22-23],基于农作物净初级生产力对农田生态系统固碳量进行估算,结合广东省农作物生产实际,分别选取粮食作物(包括稻谷、小麦、早粮、薯类、大豆)、经济作物(包括甘蔗、花生、麻类、烟叶)以及瓜果蔬菜等主要作物测度广东省农田生态系统固碳水平,计算公式为:

$$C_{Ai} = \sum_{j=1}^i \left[\frac{a_{ij} \times P_{ij} \times d_{ij} \times (1+r_{ij})}{e_{ij}} \right] \quad (1)$$

式中: C_{Ai} 为区域*i*农田生态系统碳吸收总量; a_{ij} 为区域*i*第*j*种作物碳吸收率,碳吸收率系数主要参考赵荣钦等^[19]、孟成民等^[22]、谢永浩等^[23]相关文献; P_{ij} 为农作物的经济产量; d_{ij} 为干重比系数,即作物脱水后占总质量的比例; r_{ij} 为根冠比系数,即作物地下部分与地上部分生物量之比; e_{ij} 为各类农作物的经济系数,即各类农作物经济产量与生物产量之比。为突出地域性,本文涉及的干重比、根冠比、经济系数均参照广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)中农业活动部分提供的推荐值,各类农作物碳汇估算参数见表 1。

(2) 农田生态系统碳源测算。借鉴已有研究^[6-9],从以下 3 个方面对农田生态系统碳排放源进行核算:①农业生产过程中化肥、农膜、农药、灌溉、机械、翻耕等农用物资投入消耗产生的 CO_2 排放;

②稻田种植生长发育过程中引发的 CH_4 排放,广东省稻田甲烷排放源包括单季稻、双季早稻、双季晚稻 3 类;③牲畜养殖过程中肠道发酵、粪便管理所产生的 CH_4 , N_2O 排放,主要涉及非奶牛、奶牛、山羊、猪、家禽、兔等主要牲畜类型。计算公式为:

$$C_{Ei} = \sum_{i=1}^k E_i = \sum_{i=1}^k e_i \times \sigma_i \quad (2)$$

式中: C_{Ei} 为区域*i*农田生态系统碳排放总量; E_i 为区域*i*上述三大类碳源排放量; e_i 为区域*i*第*k*类碳源因子活动水平; σ_i 为第*k*类农田生态系统碳源因子排放系数。关于农田生态系统碳排放系数的确定,结合已有研究,农资投入有关碳排放系数主要参考谢永浩等^[23]、West 等^[24]、段华平等^[25]相关文献,稻田种植、牲畜养殖有关碳排放系数重点参照广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)中农业活动部分提供推荐值。各类碳排放系数见表 2。

表 1 广东省主要农作物类型及碳汇估算参数

Table 1 Main crop types and carbon sink estimation parameters in Guangdong Province

作物类型	主要作物种类	干重比	经济系数	根冠比	碳吸收率/%
粮食作物	稻谷	0.855	0.489	0.125	41.44
	小麦	0.870	0.434	0.166	48.53
	早粮	0.830	0.455	0.166	45.00
	薯类	0.450	0.667	0.050	42.26
	大豆	0.860	0.425	0.130	45.00
经济作物	甘蔗	0.320	0.750	0.260	45.00
	花生	0.90	0.556	0.200	45.00
	麻类	0.830	0.830	0.200	45.00
瓜果蔬菜	烟叶	0.830	0.830	0.200	45.00
	蔬菜	0.150	0.830	0.250	45.00
	瓜果	0.100	0.700	0.050	45.00

(3) 农田生态系统碳源汇效应测算。借鉴已有研究^[6-9,26],兼顾农业生产全过程产生的碳源、碳汇效应,考虑到固碳量与碳排放量的差值有正有负^[27],为便于后续区域间对比分析,故采用固碳量与碳排放量比值表征区域农田生态系统碳源汇效应水平。计算公式为:

$$C_{Li} = C_{Ai} / C_{Ei} \quad (3)$$

式中: C_{Li} 为区域*i*农田生态系统碳源汇效应水平;当 $C_{Li} > 1$ 时,农田生态系统碳源汇效应表现为碳汇;反之,当 $C_{Li} < 1$ 时,则表现为碳源;当 $C_{Li} = 1$ 时,表明农业碳汇与碳源基本实现平衡。此外,为方便对比、汇算,参照 2014 年 IPCC 第五次评估报告中增温潜势 100 年水平,统一将 C, CH_4 , N_2O 换算为 CO_2 当量,转换系数分别为 44/12, 28, 265。

表 2 广东省农田生态系统碳排放类型、排放因子与排放系数

Table 2 Carbon emission types, factors and coefficients of farmland ecosystem in Guangdong Province

碳源类型	碳源项目	温室气体类型	排放系数	单位	参考来源
农资投入	化肥	CO ₂	0.896	kg/kg	ORNL
	农膜	CO ₂	5.18	kg/kg	IREEA
	农药	CO ₂	4.934	kg/kg	ORNL
	灌溉	CO ₂	266.48	kg/hm ²	West 等 ^[24] 、段华平等 ^[25]
	机械	CO ₂	0.18	kg/kW	段华平等 ^[24]
	翻耕	CO ₂	312.6	kg/km ²	West 等 ^[23]
稻田种植	单季稻	CH ₄	236.7	kg/hm ²	广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)
	双季早稻	CH ₄	241	kg/hm ²	
	双季晚稻	CH ₄	273.2	kg/hm ²	
	间接排放	N ₂ O	大气沉降 0.01; 淋溶径流 0.0075	kg/kg	
牲畜养殖	非奶牛	CH ₄	肠道发酵 68.70; 粪便管理 4.72	kg/(ind·a)	广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)
		N ₂ O	粪便管理 0.805		
	奶牛	CH ₄	肠道发酵 92.23; 粪便管理 8.45		
		N ₂ O	粪便管理 1.71		
	山羊	CH ₄	肠道发酵 8.33; 粪便管理 0.31		
		N ₂ O	粪便管理 0.106		
	猪	CH ₄	肠道发酵 1; 粪便管理 5.85		
		N ₂ O	粪便管理 0.157		
	家禽	CH ₄	肠道发酵 0; 粪便管理 0.02		
		N ₂ O	粪便管理 0.007		
	兔	CH ₄	肠道发酵 0.254; 粪便管理 0.08		
		N ₂ O	粪便管理 0.02		

2.2 碳源汇效应的影响因素分析

为进一步探究广东省农田生态系统碳源汇效应时空差异的主要驱动因素,参照已有文献^[11,28-29],基于 Kaya 恒等式,采用 LMDI 因素分解法深入挖掘分析碳源汇效应水平空间分异的驱动机制与作用机理,其计算公式为:

$$C_{Li} = \frac{C_{Li}}{G_i} \times \frac{G_i}{T_i} \times \frac{T_i}{L_i} \times L_i \quad (4)$$

$$PI_i = C_{Li}/G_i; SI_i = G_i/T_i; EI_i = T_i/L_i \quad (5)$$

式中: C_{Li} 为区域*i*农田生态系统碳源汇效应水平; G_i 为农业生产总值; T_i 为农林牧渔总产值; L_i 为农业劳动力数量,表征劳动力因素; PI_i, SI_i, EI_i 分别表征区域*i*效率因素、结构因素以及经济因素引发的碳源汇效应。基于 LMDI 因素分解将恒等式进行变换,用上标字母 0, *t* 分别表示基期、末期年份对应的指标值,分解后公式为:

$$\begin{aligned} \Delta PI_i &= \sum \frac{C_{Li}^t - C_{Li}^0}{\ln C_{Li}^t - \ln C_{Li}^0} \ln \frac{PI_i^t}{PI_i^0}; \\ \Delta SI_i &= \sum \frac{C_{Li}^t - C_{Li}^0}{\ln C_{Li}^t - \ln C_{Li}^0} \ln \frac{SI_i^t}{SI_i^0}; \\ \Delta EI_i &= \sum \frac{C_{Li}^t - C_{Li}^0}{\ln C_{Li}^t - \ln C_{Li}^0} \ln \frac{EI_i^t}{EI_i^0}; \\ \Delta L_i &= \sum \frac{C_{Li}^t - C_{Li}^0}{\ln C_{Li}^t - \ln C_{Li}^0} \ln \frac{L_i^t}{L_i^0} \end{aligned} \quad (6)$$

总效应为:

$$\Delta C_{Li} = C_{Li}^t - C_{Li}^0 = \Delta PI_i + \Delta SI_i + \Delta EI_i + \Delta L_i \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 广东省农田生态系统碳源汇效应的时空分异特征

3.1.1 时序变化特征 由广东省农田生态系统碳源汇效应总体时序变化趋势可知(图 1),2010—2020 年广东省农田生态系统固碳总量经历了上升—下降—上升的波动变化趋势,由 2010 年的 6.17×10^7 t 增至 2016 年的 6.86×10^7 t,2016 年达到峰值后略有小幅下降,2017 年后逐步回升,2020 年增至 6.64×10^7 t,年均增速为 0.74%,表明碳汇效应总体有所强化。其次,研究期内碳排放总量由 2010 年的 3.80×10^7 t 减至 2020 年的 3.28×10^7 t,年均减少 1.47%,表明近年来农田生态系统碳排放得到有效控制,减排效应日益显现。最后,与固碳量、碳排量变化趋势不同,近 10 a 来农田生态系统碳源汇效应表现为碳汇,总体呈波动上升趋势,由 2010 年的 1.62 增至 2020 年的 2.02,年均增长 2.24%,表明农田生态系统固碳量增长有效抵消了碳排放增长。可见,广东省农田生态系统碳源汇效应水平维持持续向好发展态势,随着低碳农业发展进程加快,减排增汇效应愈发明显。

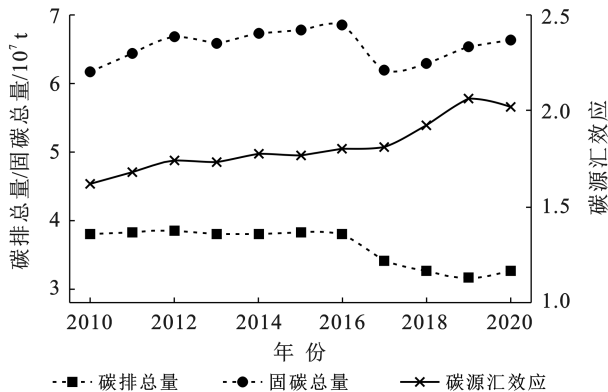


图 1 2010—2020 年广东省农田生态系统碳源汇效应时序变化

Fig.1 Time-series changes in carbon source and sink effects of farmland ecosystem in Guangdong Province from 2010 to 2020

从农田生态系统碳汇构成看(图 2a),粮食作物、经济作物、瓜果蔬菜在农田生态系统固碳总量中的年均贡献率分别为 56.46%,24.52%,19.02%。其中,粮食作物固碳量总体呈波动下降态势,年均减少 0.11%;经济作物、瓜果蔬菜固碳量则呈波动上升态势,年均增长 0.91%,3.11%。对比不同作物类型固碳量年均贡献率看,稻谷、甘蔗、蔬菜三大作物类型分别占农作物固碳总量的 49.28%,19.37%,18.56%,总占比达 87.22%,其中蔬菜固碳增量尤为明显,年均增长 2.4%。究其原因,广东地处东南沿海,水热资源丰富,适宜粮食和经济作物生长,近年来由于农业经济效益增加、种植结构调整、农业劳动力转移等因素影响,为满足居民日益增长的蔬菜需求,加之“菜篮子”

工程持续推进,广东省蔬菜种植产业发展迅速,蔬菜种植面积、产量大幅提升,对固碳效应的贡献不断增强。

从农田生态系统碳源构成看(图 2b),农资投入、稻田种植、牲畜养殖三大碳源在农田生态系统碳排放总量中的年均贡献率分别为 34.44%,37.50%,28.06%,可见稻田甲烷减排以及农资投入效率的提升将成为未来低碳农业发展的重点方向。其中,农资投入、稻田种植过程中引致的碳排放年均减少 0.88%,0.61%,与近年来稻田种植面积的缩减,使得农用物资消耗投入相应减少有关;牲畜养殖碳排放减少最为明显且占比最小,年均减少 3.35%,表明广东省在加快推进畜牧业养殖转型升级过程中有效提升了农业减排效应。不同碳源类型构成特征具体表现为:

(1) 农资投入碳源构成中化肥投入比例最大,年均贡献率为 63.54%,研究期内年均减少 0.76%;其次为农药投入,占农资投入碳源排放总量的 15.03%,引致的碳排放下降最为明显,年均减少 2.24%;翻耕、灌溉引致的碳排放总体变化不大,年均降幅分别仅为 0.29%,0.52%;农膜、机械等农用物资投入过程中引发的碳排放则略有增加,年均增长分别为 0.10%,0.88%。由此可见,近年来农资投入碳源排放减少主要源于化肥、农药等农用物资消耗过程中产生的 CO_2 的减少,受施肥方式、农业化学品投入强度的影响较大,而节水灌溉农业、耕作方式变革等能够田间管理措施的优化有效降低农田生态系统碳排放。此外,近年来由于设施农业、机械农业的推广和发展,农膜、机械投入引致的碳排放则有所增强。

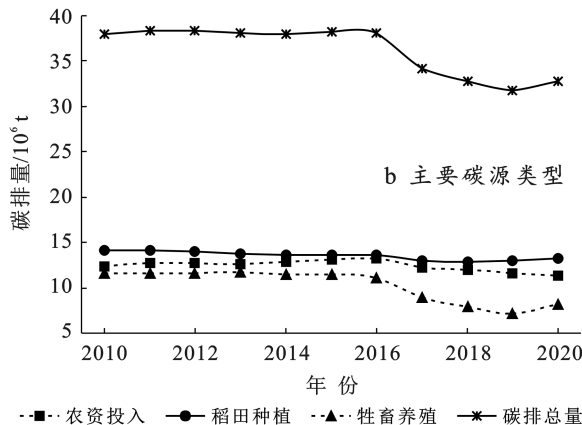
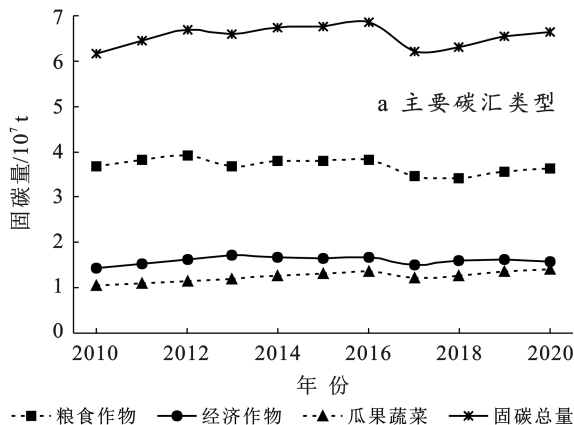


图 2 2010—2020 年广东省农田生态系统碳汇/源类型构成及其时序变化

Fig.2 Carbon sink/source composition and temporal changes of farmland ecosystem in Guangdong Province from 2010 to 2020

(2) 从稻田种植三大碳源构成看,双季晚稻种植引致的碳排放占比最高,年均贡献率达 55.76%,总体呈波动下降态势,年均减少 0.46%;双季稻早稻种植引致的碳排放占比次之,年均贡献率为 39.04%,碳排

放下趋势较为明显,年均降幅为 1.29%;仅单季稻种植引致的碳排放呈波动上升发展态势,年均增长 3.53%。这可能与广东省地处亚热带季风区有关,稻田种植制度以双季稻为主,稻田种植面积由 2010 年

的 $1.95 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 减少至 $1.83 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 年均减少 0.62%, 稻田种植引发的 CH_4 排放趋于减少, 这可能与近年来农业种植结构调整和农村劳动力转移有着密不可分的关系。

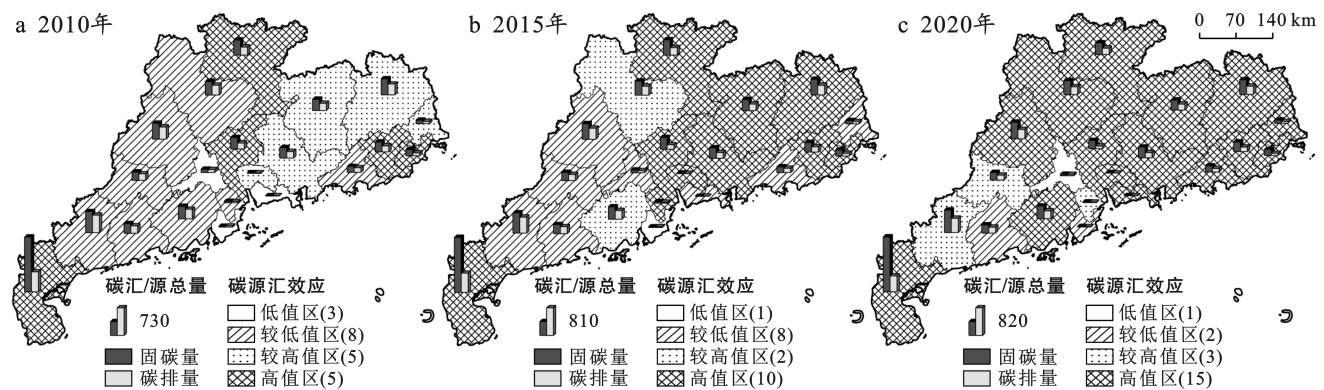
(3) 牲畜养殖碳源构成中, 肠道发酵过程中引致的 CH_4 排放呈先升后降态势, 由 2010 年的 $5.17 \times 10^6 \text{ t}$ 增至 2015 年的 $5.40 \times 10^6 \text{ t}$, 后降至 2020 年的 $3.10 \times 10^6 \text{ t}$, 研究期内年平均降幅达 4.91%; 粪便管理过程中引致的 CH_4 和 N_2O 排放总量由 2010 年的 $6.39 \times 10^6 \text{ t}$ 减至 2019 年的 $4.19 \times 10^6 \text{ t}$, 2020 年增至 $5.10 \times 10^6 \text{ t}$, 年均减少 2.24%。牲畜养殖碳排放构成中, 生猪养殖为主要碳源, 其次依次为非奶牛、奶牛、家禽、山羊、兔等养殖, 近年来禽畜养殖整治力度不断加强, 牲畜养殖数量有所减少, 一定程度上抑制了牲畜养殖的增碳效应。

3.1.2 空间分布格局 根据公式(3)计算广东省各地市农田生态系统碳源汇效应水平, 选取 2010, 2015, 2020 年 3 个代表年份, 将其划分为低值区($\text{CN} \leq 1.2$)、较低值区($1.2 < \text{CN} \leq 1.4$)、较高值区($1.4 < \text{CN} \leq 1.6$)、高值区($\text{CN} > 1.6$) 4 个等级, 由此生成广东省农田生态系统碳源汇效应空间分异格局演化图(图 3)。

通过对比广东省 4 大区域可知, 受制于各地市区域经济发展阶段、农业生产科学技术与资源环境禀赋差异等影响, 四大区域固碳、碳排总量总体呈: 西翼 > 粤北山区 > 珠三角 > 东翼的分布趋势。从各地市农

田生态系统碳源汇效应分布看, 湛江始终为广东省农田生态系统碳源、碳汇总量双高的主要分布区域, 湛江作为广东省农业大市, 农业产业规模位居全省前列, 在全省农业发展中发挥着“稳定器”作用, 农业经济依赖程度较高, 农业固碳量、碳排量均以绝对优势位居全省榜首; 深圳、珠海、中山、东莞等为典型固碳、碳排总量双低的分布区域, 该类型空间分布格局基本维持稳定, 这主要与该地区第一产业占比偏低有关。

从广东省农田生态系统碳源汇效应水平空间分布格局看(图 3), 广东省各地市农田生态系统碳源汇效应水平区域差异显著。其中, 高值区由 2010 年 5 个增加至 2020 年 15 个, 空间分布上由 2010 年斑块状镶嵌分布逐渐向西扩展呈连片分布, 近年来随着粤东、粤北地区农业生产方式转型, 农业生产技术水平提升, 促使农田生态系统碳汇水平有所上升, 较高值区、较低值区逐步向高值区演化; 较低值区分布则呈收缩状演变, 分布数量明显减少, 由原来 8 个区域减至 2020 年珠海、阳江 2 个地市; 较高值区分布区域变动较大, 由粤东逐步向西转移至粤西地区; 低值区由 2010 年深圳、佛山、珠海 3 个区域减至 2020 年仅佛山 1 个区域, 由于农作物碳汇难以有效吸纳并抵消农田生产过程中引发的温室气体排放, 导致该区域碳源汇效应水平总体偏低。总体来看, 研究期内碳源汇效应水平空间格局上集聚分布现象越发凸显, 各地市碳源汇效应水平随时间推移明显提升。



注: 本图源于全国地理信息资源目录服务系统 1: 100 万公众版(2021), 并利用基础地理信息数据(<https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W>)标准图幅提取矢量数据校准制作。

图 3 2010—2020 年广东省农田生态系统碳源汇效应时空分布演化

Fig.3 Spatial and temporal distribution of carbon source and sink effects of farmland ecosystem in Guangdong Province from 2010 to 2020

3.2 广东省农田生态系统碳源汇效应的驱动因素分析

基于 LMDI 因素分解模型对广东省农田生态系统碳源汇效应驱动因素进行分解, 结果见表 3。

经济因素是区域碳源汇效应水平提升的关键驱动因素。研究期内广东省各地市经济因素贡献值、增长率均值分别为 1.442, 155.21%, 且经济因素对碳源

汇效应水平的贡献率呈持续上升态势, 驱动效应不断增强。21 个地市与基期相比, 深圳的相对增幅最大, 高达 369.03%, 仅广州(75.04%)、佛山(86.26%)、东莞(52.53%)、中山(91.13%) 少于 100% 的碳源汇效应水平增量。究其原因, 经济水平欠发达地区为追求农业产出多采用粗放型、高投入的生产经营方式, 加

之减排意识相对薄弱,碳排放水平居高难下;而经济发达地区随着农业发展水平逐步提升,农业现代化进程持续推进,农业生产逐渐由传统向现代、由粗放向集约转型过渡,依靠技术创新推动农业绿色低碳转型发展,农业生产对于农用物资消耗的路径依赖逐渐减弱,农田生态系统碳源汇效应水平随之提升。

结构因素对区域碳源汇效应水平提升的驱动效应有正有负,作用方向因地而异。研究期内广东省各地市结构因素贡献值、增长率均值分别为 0.032, 1.97%,对于碳源汇效应水平的贡献率整体偏低。大部分地市虽保持相对平稳态势,但各地市结构因素的作用强度因地而异,一方面表现为减排增汇效应,即结构因素对广州、珠海、佛山等 10 个地市的碳汇效应增量有所强化;另一方面则表现为增排减汇作用,即结构因素一定程度上抑制了汕头、韶关、河源等 11 个地市碳汇效应水平的提升。具体来看,非农化程度较高的地市通过优化调整农业结构、健全完善农业产业体系、推动农业技术进步等措施,有效促进了农林牧渔协调发展和农业生产效率提升,传统农业高碳排放

发展方式逐渐被取代,区域碳源汇效应水平相对较高;而对于农业占比较高的地市而言,仍然较为依赖农药、化肥、农膜等高碳投入来获取农业产出和经济效益,碳汇增速明显低于碳排增速,碳源汇效应水平总体偏低。

效率因素、劳动力因素对区域碳源汇效应水平提升均存在显著的抑制作用。研究期内广东省各地市贡献值、变化率均值分别为 $-0.739(-34.60\%)$ 、 $-0.249(-15.17\%)$,即效率因素的抑制作用明显强于劳动力因素。因效率因素导致碳源汇效应损失率达 40% 以上的地市占据“半壁江山”,潮州碳源汇效应损失率高达 64.84%;因劳动力因素导致碳源汇效应损失率排前 4 位的依次为阳江(51.62%)、珠海(42.83%)、韶关(37.51%)、深圳(30.78%),引致的碳源汇效应损失率均在 30% 以上。推断主要与当前广东省大多数地市农业发展过程中更多依赖高投入—高消耗、高碳排—高碳汇的农业发展模式有关,且随着农业机械化的加速推进和农村劳动力的持续外流,劳动力对农业的刚性约束也逐渐弱化。

表 3 基于 LMDI 模型的广东省农田生态系统碳源汇效应影响因素分解结果(2010—2020 年)

Table 3 Decomposition results of influencing factors of carbon source and sink effects of farmland ecosystem in Guangdong Province based on LMDI model (2010—2020)

地市	效率因素		结构因素		经济因素		劳动力因素		总效应	
	贡献值	变化率/%	贡献值	变化率/%	贡献值	变化率/%	贡献值	变化率/%	贡献值	变化率/%
广州	-0.142	-3.72	0.105	5.00	1.456	75.04	-0.216	-8.83	1.203	67.48
深圳	-0.254	-41.00	-0.007	-1.85	1.476	369.03	-0.284	-30.78	0.931	295.40
珠海	0.071	2.30	0.029	-5.60	0.737	182.53	-0.376	-42.83	0.462	136.40
汕头	-0.909	-33.71	-0.013	-0.22	1.835	122.88	-0.294	-12.42	0.619	76.53
佛山	-0.948	-49.85	0.267	19.95	0.748	86.26	-0.010	-6.30	0.057	50.07
韶关	-1.170	-44.78	-0.355	-17.25	2.389	245.33	-0.890	-37.51	-0.026	145.78
河源	-1.073	-47.76	-0.110	-6.38	1.525	152.30	-0.232	-13.39	0.109	84.76
梅州	-0.801	-39.58	0.015	1.64	1.371	133.40	-0.311	-17.38	0.274	78.09
惠州	-1.042	-43.43	0.200	11.93	1.689	153.82	-0.348	-18.12	0.500	104.20
汕尾	-0.571	-33.55	-0.037	-2.68	1.420	173.24	-0.381	-24.55	0.431	112.45
东莞	-0.139	-0.42	0.789	41.09	1.040	52.53	0.273	7.73	1.962	100.93
中山	-0.197	-10.10	0.044	0.75	0.820	91.13	-0.380	-28.99	0.287	52.78
江门	-0.940	-47.53	-0.029	-0.06	1.411	152.75	-0.148	-7.72	0.294	97.45
阳江	-0.439	-28.41	-0.321	-21.71	1.770	285.53	-0.950	-51.62	0.059	183.80
湛江	-1.769	-44.42	0.126	4.72	2.364	113.64	-0.010	1.22	0.711	75.16
茂名	-0.860	-47.41	0.054	5.19	1.344	167.53	-0.150	-10.69	0.387	114.62
肇庆	-0.765	-41.04	-0.012	0.44	1.199	120.66	0.061	4.81	0.483	84.87
清远	-0.818	-42.09	-0.237	-13.04	1.840	223.18	-0.354	-19.13	0.431	148.92
潮州	-1.506	-64.86	0.380	30.82	1.178	117.64	0.290	22.93	0.342	106.54
揭阳	-0.589	-28.55	-0.137	-6.34	1.556	129.77	-0.374	-17.01	0.457	77.87
云浮	-0.666	-36.67	-0.082	-5.06	1.108	111.21	-0.141	-8.04	0.219	61.45
均值	-0.739	-34.60	0.032	1.97	1.442	155.21	-0.249	-15.17	0.485	107.41

4 结论

(1) 广东省农田生态系统碳汇效应和减排增汇

效应均随时间变化逐步提升。其中,固碳能力不断增强,主要碳汇作物为稻谷、甘蔗、蔬菜;碳排量则呈下降态势,碳源构成中占比由大到小依次为稻田种植、

农资投入、牲畜养殖。

(2) 广东省农田生态系统碳源汇效应水平区域差异显著,相对集聚的空间分布态势愈发明显。其中,湛江为主要的高碳源—高碳汇分布区,低高碳源—低碳汇则集中分布在珠三角地区。

(3) 经济因素对农田生态系统碳源汇效应的正向影响最为显著,结构因素具有两面性和异质性,效率因素、劳动力因素则具有一定抑制效果。

此外,限于研究数据局限性,本文主要以文献资料和统计数据为主,考虑地域差异影响,通过实地测量监测数据以精确量度不同土壤类型、作物种类、耕作方式、种植制度、管理措施等条件下农田生态系统碳源汇效应的影响,强化农田生态系统固碳增汇潜力情景预测、经济评价等将成为下一阶段深化研究的重点内容。

[参 考 文 献]

- [1] Kay S, Rega C, Moreno G, et al. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe [J]. *Land Use Policy*, 2019, 83: 581-593.
- [2] Fan Jianling, McConkey B G, Liang B C, et al. Increasing crop yields and root input make Canadian farmland a large carbon sink [J]. *Geoderma*, 2019, 336: 49-58.
- [3] 赵宁,周蕾,庄杰,等.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J].*生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [4] 谢婷,张慧,苗洁,等.湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析[J].*农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 839-848.
- [5] 谭美秋,崔耀平,马晓哲,等.河南省农田生态系统碳汇核算研究[J].*生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1129-1137.
- [6] 孙小祥,张华兵,于英鹏.江苏沿海地区农田生态系统碳源/汇时空变化及公平性研究[J].*中国农业资源与区划*, 2021, 42(10): 56-64.
- [7] 田志会,刘瑞涵.北京市农田生态系统碳汇及释氧功能年际变化研究[J].*生态经济*, 2016, 32(1): 68-71.
- [8] 许萍萍,赵言文,陈显明,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.
- [9] 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.
- [10] 张精,方培,魏锦达,等.基于碳足迹的安徽省农田生态系统碳源/汇时空差异[J].*福建农业学报*, 2021, 36(1): 78-90.
- [11] 王莉,刘莹莹,张亚慧,等.河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解[J].*环境科学学报*, 2022, 42(12): 410-422.
- [12] 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[J].*江苏农业学报*, 2016, 32(5): 1088-1093.
- [13] 王梁,赵杰,秦利,等.临沂市农田生态系统碳源/汇时空变化及其影响因素分析[J].*水土保持学报*, 2015, 29(2): 183-187.
- [14] 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.
- [15] 郭永奇.河南省农田生态系统碳源/碳汇及其碳足迹动态变化[J].*东北农业科学*, 2021, 46(6): 87-92.
- [16] 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.
- [17] 刘欣铭,孙丽,王康,等.中国省域农田生态系统碳排放时空差异及公平性研究[J].*湖南师范大学自然科学学报*, 2019, 42(2): 23-30.
- [18] 范大莎,杨旭,吴相利,等.东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素研究[J].*环境科学学报*, 2017, 37(7): 2797-2804.
- [19] 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.
- [20] 唐海明,李超,肖小平,等.不同耕作模式对双季稻田生态系统净碳汇效应及收益的影响[J].*生态环境学报*, 2020, 29(2): 215-222.
- [21] 刘晶晶,张阿凤,冯浩,等.不同灌溉量对小麦—玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J].*应用生态学报*, 2017, 28(1): 169-179.
- [22] 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, 41(8): 198-201.
- [23] 谢永浩,刘争.中国省域种植业碳汇量、碳排放量的时空分异及公平性研究[J].*世界农业*, 2022(2): 100-109.
- [24] 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 & Environment*, 2002, 91(1/2/3): 217-232.
- [25] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].*水土保持学报*, 2011, 25(5): 203-208.
- [26] 吴昊玥,何宇,黄瀚蛟,等.中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J].*中国人口·资源与环境*, 2021, 31(6): 113-123.
- [27] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].*自然资源学报*, 2013, 28(8): 1298-1309.
- [28] 丁宝根,赵玉,邓俊红.中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J].*中国农业资源与区划*, 2022, 43(5): 1-11.
- [29] 田云,张君.地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究[J].*华中农业大学学报(社会科学版)*, 2020(2): 78-87.