

江苏省农田生态系统净碳汇时空演变特征

翁翎燕^{1, 4} 李伟霄² 张梅³ 谈俊忠⁴¹

(1. 南京旅游职业学院旅游管理学院, 江苏 南京 211100;

2. 南京大学金陵学院, 江苏 南京 210089;

3. 南京财经大学经济学院, 江苏 南京 210023;

4. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 定量研究区域农田生态系统净碳汇的空间结构及其时空变化特征对挖掘农田生态系统的多重功能, 合理制定区域适宜的农业减排政策具有重要意义。在测算 2005~2019 年江苏省农田生态系统净碳汇的基础上, 采用标准差椭圆、空间自相关、探索性时空数据分析等方法, 对江苏省农田生态系统净碳汇的时空演变特征进行研究。结果表明: (1) 江苏省农田生态系统净碳汇呈现“西北—东南”的空间分布格局, 且在收缩中趋于集聚化, 净碳汇重心总体上朝西北方向移动; (2) 江苏省农田生态系统净碳汇在全局上存在显著的空间正相关, 局部则呈现较为稳定的“北高南低”的空间集聚特征; (3) 江苏省农田生态系统净碳汇局部空间格局的动态演化差异明显, 局部空间结构和空间依赖方向上均表现出较强的稳定性。相比较而言, 苏中地区较苏南、苏北地区具有更加动态的局部空间结构, 而盐城市区、启东市及泰州市区在空间依赖方向上具有较大的波动性; (4) 农田生态系统净碳汇的局部空间关联格局较为稳定, 局部空间联动性较弱, 空间集聚性表现出较高的路径锁定特征。

【关键词】: 农田生态系统 净碳汇 时空演变 LISA 时间路径 江苏省

【中图分类号】: F205 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1584-11

工业革命以来, 化石能源利用、土地利用变化等所带来的碳排放被认为是导致全球变暖的最主要原因^[1]。碳排放因与人类生产生活、社会经济发展密切相关而受到世界各国的高度关注, 碳循环研究也成为当前全球变化研究的前沿和热点问题^[2]。

农田生态系统是半自然半人工的生态系统, 具有集中提供农产品的生产功能^[3]。农田生产排放的碳占全球人为碳排放的 10%~12%^[4, 5], 农田生态系统碳储量占全球陆地碳储量的 10%以上^[6], 是大气中重要的碳源和碳汇^[7]。作为陆地生态系统的重要组成部分, 农田生态系统具有气候调节、水土保持、水源涵养、生物多样性保护等多方面重要的生态功能^[8]。在我国农业现代化、低碳化的发展趋势下, 定量研究农田生态系统碳源、碳汇的结构特征和时空变化机理是研究区域碳循环机理的首要前提^[9], 同时对制定区

¹作者简介: 翁翎燕(1985~), 女, 副教授, 主要研究方向为资源环境与可持续发展. E-mail: wly__flying@126.com; 张梅 E-mail: zmmay@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801201); 江苏省高校自然科学基金项目(17KJB420001); 江西省高校哲学社会科学研究一般项目(2021SJA0785)

域合理的农业减排政策，挖掘农田生态系统生产和生态等的多重功能，实现农田生态系统的可持续发展有重要意义。

目前农田生态系统碳循环领域的研究取得了丰硕的成果，研究内容涵盖农田生态系统碳源、碳汇测算及时空比较^[10, 11]、农田生态系统碳足迹核算^[12, 13]、驱动机理分析^[14, 15]、碳排放公平性^[16, 17]、减排路径及政策应对^[18]等方面，研究侧重于农田生态系统碳源、碳汇测算体系的建立及驱动因素的分析上。近年来，从时间、空间视角分析农田生态系统碳源、碳汇的阶段性特征和区域差异逐步引起了关注^[19, 20]。然而，现有的成果多是将农田生态系统碳源、碳汇分别测算并分析，对净碳汇的研究较少，而净碳汇研究对于农业生产减排增汇及农业低碳化发展有重要作用^[19]；在研究尺度上，主要集中于国家、区域、省际、地级市等较大空间尺度层面，对直接承担农田节能减排任务的县级单元的研究并不多见；在研究内容上，更多地关注农田生态系统碳源、碳汇的时间变化特征，对区域内部农田生态系统净碳汇空间联系及其动态演化的研究相对不足。

江苏省耕地占全省土地面积的 42%以上，江苏省农业在全国占有重要地位。“十三五”以来，江苏省加快低碳农业发展转型升级，以构建“功能布局合理、资源利用集约、农耕文化传承、农村环境良好”的农业生态文明新格局为目标^[21]，这对江苏省低碳农业发展提出了新要求。本研究在 2005~2019 年江苏省 60 个县域单元农田生态系统净碳汇测算的基础上，采用标准差椭圆、空间自相关、探索性时空数据分析等分析方法量化县域间的相互关系，探究江苏省县域农田生态系统净碳汇的空间格局及其演变特征，全面揭示净碳汇的时空性、异质性，为江苏省制定区域差别化的农业碳减排政策，实现低碳农业目标提供理论依据，也为完善农田生态系统碳循环研究提供新思路。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与处理

研究中计算碳排放、碳吸收所利用的数据来源于 2006~2020 年《江苏省农村统计年鉴》。江苏省县级行政区划矢量数据来源于国家测绘局基础地理信息中心，以 2012 年江苏省县级行政区划为基准，运用 ArcGIS10.2 软件进行归并处理，将各地级市的市辖区作为一个县域单元，所辖其他县市单独作为一个单元，最终得到 60 个县域作为研究单元。

1.2 研究方法

1.2.1 碳吸收估算

本研究选取江苏省 9 种主要作物进行碳吸收估算，作物全生育期内光合作用的碳吸收量 $C_{吸收}(t)$ 计算公式为^[22]：

$$C_{吸收} = \sum_{i=1}^n C_d = \sum_{i=1}^n [Q_i \times C_i \times (1 - W_i) \times (1 + R_i)] / H_i \tag{1}$$

式中： i 为第 i 种作物类型； C_d 为第 i 种作物全生育期对碳的吸收量(t)； Q_i 为作物 i 经济产量(t)； C_i 、 W_i 、 R_i 、 H_i 分别为作物 i 的碳吸收率、经济产量部分的含水率、根冠比、经济系数，%。根据李克让^[23]、韩召迎等^[24]、谷家川等^[25]的研究成果确定碳吸收相关系数(表 1)。

表 1 碳吸收估算相关系数

作物名称	碳吸收率	经济系数	含水率	根冠比
------	------	------	-----	-----

稻谷	0.414	0.450	0.120	0.600
小麦	0.485	0.400	0.120	0.393
玉米	0.471	0.400	0.130	0.156
大豆	0.450	0.350	0.130	0.129
薯类	0.423	0.700	0.700	0.175
棉花	0.450	0.100	0.080	0.122
油菜籽	0.450	0.250	0.100	0.040
花生	0.450	0.430	0.100	0.720
蔬菜	0.450	0.650	0.900	—

注：薯类、花生为冠根比；蔬菜的根冠比不做考虑。

1.2.2 碳排放估算

(1) 农田投入碳排放

根据 IPCC (2006) 国家温室气体排放清单，农田生态系统碳排放的主要来源是化肥、农药、农膜、农业灌溉、农用柴油、农田翻耕等。本研究主要考虑 6 种途径的碳排放，计算公式为：

$$E_{投入} = \sum E_i = T_i \times \delta_i \tag{2}$$

式中：E_{投入}为区域农田利用的碳排放总量(t)；T_i为各类农业碳源的使用量(t)；δ_i为各类碳源的碳排放系数，根据相关学者的研究成果^[26, 27]确定各种农田投入所对应的碳排放系数分别见表 2。

表 2 各类农田投入的碳排放系数

农田投入	排放系数 δ	参考来源
化肥	0.8956kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农药	4.9341kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农膜	5.18kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
农业灌溉	25kg/hm ²	Dubey 等 ^[28]
农用柴油	0.5927kg/kg	IPCC (2006)
农田翻耕	312.6kg/hm ²	中国农业大学生物与技术学院

秸秆	1.247t/t	王革华 ^[29]
----	----------	---------------------

(2) 秸秆焚烧碳排放

$$E_{\text{焚烧}} = Q_i \times N_i \times F \times P \times \alpha_i \tag{3}$$

式中：E_{焚烧}为秸秆焚烧的碳排放总量(t)；Q_i为作物 i 经济产量(t)；N_i为作物 i 的谷草比；F 为秸秆露天焚烧比例，%；α_i为秸秆焚烧碳排放系数。根据杜江等^[30]、苏继峰等^[31]的研究整理得到作物谷草比和秸秆焚烧碳排放系数(表 3)。根据刘甜^[32]、苏继峰等^[31]的研究整理得到江苏省各市的秸秆焚烧比例，分别是：南京，16.5%；无锡，14.5%；徐州，17.5%；常州，19.5%；苏州，11%；南通，22.5%；连云港，22%；淮安，19.5%；盐城，22%；扬州，29.5%；镇江，19.5%；泰州，23%；宿迁，18%。

表 3 作物谷草比和秸秆焚烧碳排放系数

作物名称	谷草比	碳排放系数
稻谷	1.24	1.11
小麦	1.41	1.47
玉米	1.00	1.35
大豆	1.52	1.58
薯类	0.53	1.58
棉花	3.35	1.35
油菜籽	2.98	1.58
花生	1.26	1.58
蔬菜	1.00	1.58

(3) 粮食消费碳排放

江苏省是产粮大省，主要粮食品种小麦和水稻已经实现自给，剩余稻麦在当地储存或售往外省，可视为当年系统内的碳积蓄。农作物通过光合作用固定的碳，转化为人类的粮食被食用后，当年即通过各种形式重新排放到大气中^[6]。根据中国居民膳食营养宝塔、中国食物与营养发展纲要，以人均粮食消费量 400kg·a⁻¹为标准，根据曹志宏等^[33]的食物碳排放强度系数(1kg 粮食=0.27kgCO₂)，估算江苏省各县级单元每年消费的粮食中的碳排放。

(4) 农田土壤呼吸碳排放

农田土壤呼吸作用具有很强的时空异质性，受土壤温湿度、作物生理状况、田间管理措施等因素的共同影响^[34]，因此，目前农田土壤呼吸碳排放研究结果差异较大^[35]。江苏省主要农作物是水稻和小麦，主要参考郑聚锋等^[36]、米迎宾等^[37]、寇太记等^[38]、

李洁静等^[39]的研究,将农田土壤年均碳呼吸量大致取值为 $0.710\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

1.2.3 净碳汇估算

$$C_{\text{净}} = C_{\text{吸收}} - E_{\text{投入}} - E_{\text{焚烧}} - E_{\text{消费}} - E_{\text{呼吸}} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{净}}$ 为区域农田生态系统净碳汇 (t); $E_{\text{消费}}$ 为粮食消费碳排放量 (t); $E_{\text{呼吸}}$ 为农田土壤呼吸碳排放量 (t)。

1.2.4 标准差椭圆

本研究以农田生态系统净碳汇指标作为权重,利用加权标准差椭圆来揭示江苏省县域农田生态系统净碳汇在空间上的趋向性和主导性方向分布。选择标准差数 1 (默认值) 作为可表达范围,约涵盖了 68% 的农田生态系统净碳汇质心。其原理和详细计算过程参考文献[40, 41]。

1.2.5 空间自相关

采用全局空间自相关指数 (Global Moran' sI) 和局部空间自相关指数 (Local Moran' sI) 来定量研究江苏省县域农田生态系统净碳汇的空间关联特点。全局空间自相关指数用于测度净碳汇整体空间集聚特征,局部空间自相关指数用于测度净碳汇的空间集聚程度,分析是否存在高值集聚或低值集聚。两个指数的基本内涵和具体计算方法参考文献[42]。

1.2.6 探索性时空数据分析方法

Rey 等^[43]在原有的侧重于空间维度的探索性空间数据分析 (ESDA) 中加入了时间维度,提出了探索性时空数据分析 (ESTDA),实现了区域地理要素的时空交互融合。采用 ESTDA 框架中的 LISA 时间路径来分析江苏省县域农田生态系统净碳汇的时空动态规律,采用 LISA 时空跃迁来揭示江苏省各相邻县域间农田生态系统净碳汇空间关联类型随时间的转移情况。时空跃迁情况分为 I、II、III 和 IV 四种类型,分别表示随着时间的推移,仅本县域发生跃迁;仅相邻县域发生跃迁;本县域与相邻县域均发生跃迁;本县域及相邻县域均未发生跃迁。两者的原理和计算公式参见文献[44, 45]。

2 农田生态系统净碳汇时空演变特征分析

2.1 空间格局总体特征

采用标准差椭圆反映江苏省县域农田生态系统净碳汇空间格局的总体情况。2005~2019 年,江苏省县域农田生态系统净碳汇重心变化不大,在 $119.31^{\circ} \text{E} \sim 119.57^{\circ} \text{E}$, $32.99^{\circ} \text{N} \sim 33.25^{\circ} \text{N}$ 之间变动,主要位于宝应县境内 (2007 年位于高邮市)。重心移动路径经历了“东南 (2005~2007 年)—西北 (2007~2008 年)—东北 (2008~2011 年)—西北 (2011~2016 年)—东南 (2016~2017 年)—西北 (2017~2019 年)”的变化,总体上呈振荡式朝西北方向移动的趋势 (图 1)。

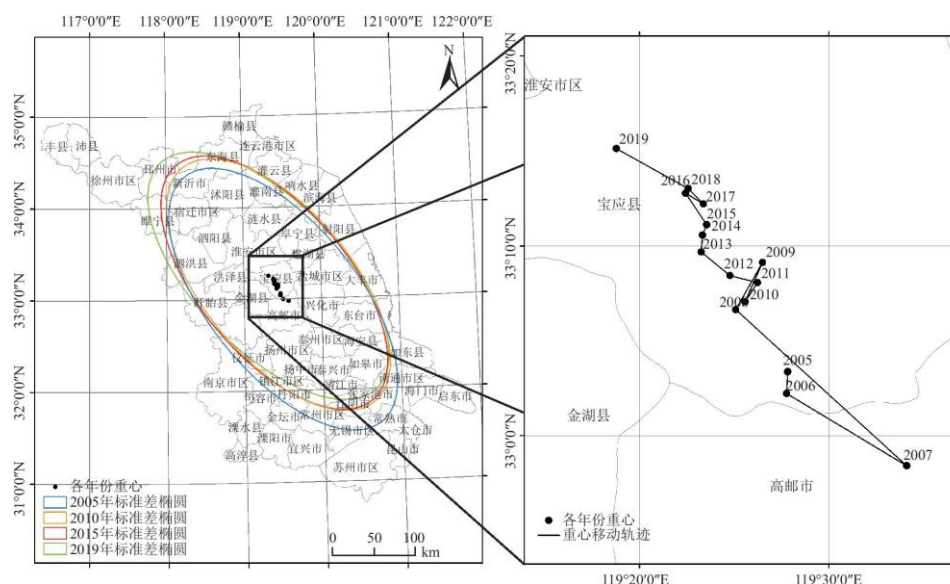


图 1 2005~2019 年江苏省县域农田生态系统净碳汇重心移动

研究时段内, 标准差椭圆转角 θ 在波动过程中逐渐变小, 由 2005 年的 140.98° 变为 2019 年的 136.07° , 表明近 15a 来江苏省县域农田生态系统净碳汇呈现“西北—东南”的空间分布格局。研究时段内, 标准差椭圆的长轴和短轴长度均在波动中缩短, 15a 间分别缩短了 1015.48 和 900.91m, 说明 2005~2019 年间江苏省县域农田生态系统净碳汇在西北—东南方向(长轴方向)和东北—西南方向(短轴方向)均呈现出不同程度的收缩, 且长轴方向的收缩趋势更为显著。在长轴和短轴的共同作用下, 2019 年的标准差椭圆面积比 2005 年下降了 1.55%。上述特征综合反映出研究时段内江苏省县域农田生态系统净碳汇的空间格局在收缩中趋于集聚化(表 4)。

2.2 局部空间关联格局

2005~2019 年, 江苏省农田生态系统净碳汇的 GlobalMoran' sI 值均为正值, 除 2007 年 GlobalMoran' sI 值在 10%水平上显著外, 其余年份均通过了 5%水平的显著性检验, 表明江苏省县域农田生态系统净碳汇存在正的空间自相关性。2005~2019 年, GlobalMoran' sI 值波动上升, 由 2005 年的 0.183 上升至 2019 年的 0.528, 说明农田生态系统净碳汇相似区域的空间集聚性逐渐增强(图 2), 这与前述标准差椭圆分析得到的结果吻合。

表 4 2005~2019 年江苏省县域农田生态系统净碳汇标准差椭圆参数

年份	X 轴坐标(E/ $^\circ$)	Y 轴坐标(N/ $^\circ$)	长轴(km)	短轴(km)	转角 θ ($^\circ$)
2005	119.46	33.06	189.77	90.16	140.98
2006	119.46	33.04	190.43	90.61	140.44
2007	119.57	32.97	187.11	91.47	141.20
2008	119.42	33.11	188.58	89.72	139.77
2009	119.44	33.15	182.86	89.66	140.38
2010	119.43	33.12	188.56	89.70	139.54

2011	119.44	33.13	184.43	89.64	140.10
2012	119.41	33.14	184.94	89.57	140.22
2013	119.39	33.16	184.45	89.18	140.04
2014	119.39	33.18	185.01	89.74	140.03
2015	119.39	33.19	183.00	88.55	139.66
2016	119.37	33.21	181.59	88.75	138.98
2017	119.39	33.20	180.45	88.78	138.99
2018	119.38	33.22	180.28	88.59	138.73
2019	119.31	33.25	188.75	89.26	136.07

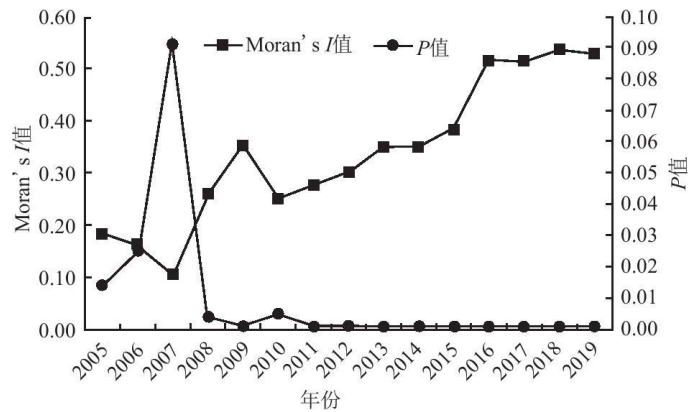


图 2 2005~2019 年江苏省县域农田生态系统净碳汇全局 Moran' sI 指数

为进一步揭示江苏省县域农田生态系统净碳汇的局部空间关联类型，选取 2005 年、2010 年、2015 年及 2019 年作为研究截面，根据 Local Moran' sI 值的散点分布情况，利用 ArcGIS10.2 绘制江苏省县域农田生态系统净碳汇 LISA 集聚图(图 3)，并将 60 个县域的空间集聚类型分为 4 类：(1)HH 集聚区，县域及相邻县域农田生态系统净碳汇均高于平均值；(2)HL 集聚区，县域自身农田生态系统净碳汇高于平均值，但其相邻县域低于平均值；(3)LH 集聚区，县域自身农田生态系统净碳汇低于平均值，但其相邻县域高于平均值；(4)LL 集聚区，县域及其周边地区农田生态系统净碳汇均低于平均值。

从总体上看，江苏省县域农田生态系统净碳汇表现出显著的“北高南低”的空间集聚特征，以 HH 集聚区和 LL 集聚区为主导，占县域总数的 70%以上(图 3)。HH 集聚区主要保持在苏中、苏北各县域，LL 集聚区主要分布在苏南各县域，而 HL 集聚区和 LH 集聚区呈随机分布状态，局部空间关联格局相对较稳定。从局部空间格局的演变来看，HH 集聚区占比由 2005 年的 35%增加到 2019 年的 45%，空间分布范围扩大，且更趋于向北集聚。就 LL 集聚区而言，2005 年的数量与 2019 年的相同，但分布更趋集中，空间集聚性增强，主要分布在苏南各县域及海门市、启东市。HL 集聚区和 LH 集聚区的数量均减少了 3 个，至 2019 年，HL 集聚区分布于 HH 集聚区与 LL 集聚区之间的过渡地带，而 LH 集聚区总体上仍呈随机分布状态，但在灌南、响水、涟水 3 个县形成一个小规模的集聚区。

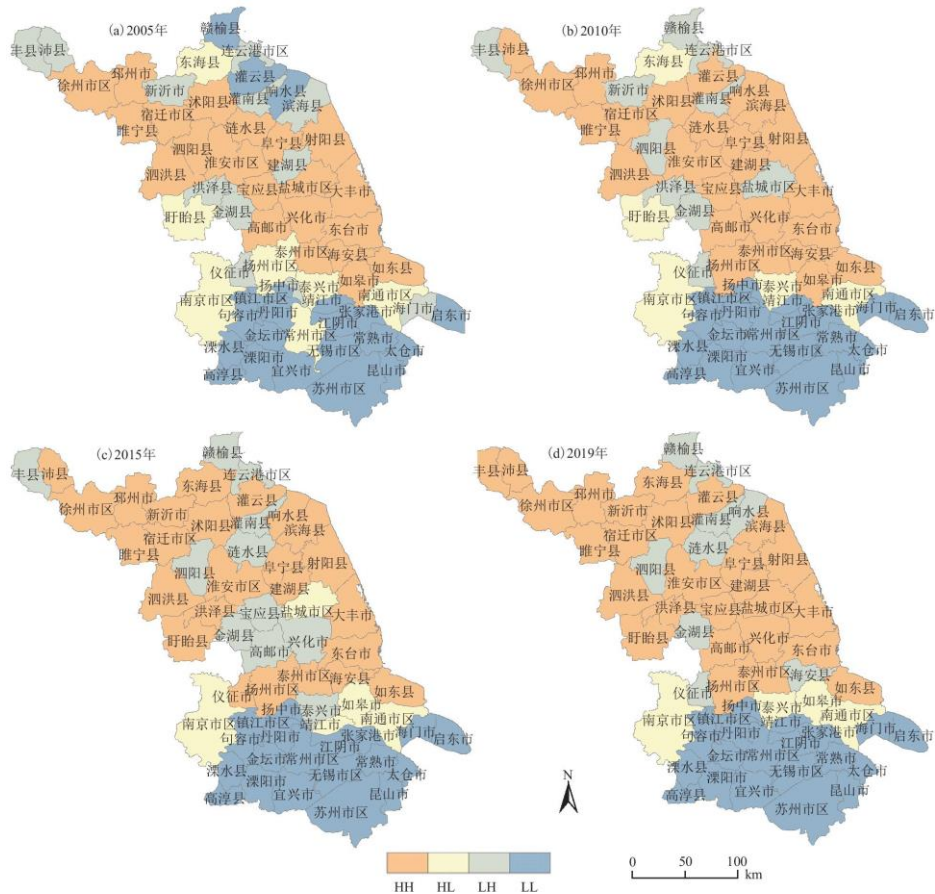


图 3 2005~2019 年江苏省县域农田生态系统净碳汇 LISA 集聚图

2.3 局部空间关联格局动态演化

LISA 时间路径分析可进一步反映江苏省县域农田生态系统净碳汇局部空间结构的动态性及空间依赖方向的波动性。计算 LISA 时间路径的相对长度，利用 ArcGIS10.2 软件以自然断点法和手动分类法 1 进行可视化表达(图 4)。LISA 时间路径相对长度小于 1 的县域有 35 个，占总数的 58.33%，表明江苏省县域农田生态系统净碳汇局部空间结构整体较为稳定。相对长度表现为苏中地区最长，苏北地区其次，苏南地区最短的分布特征，表明以泰州、扬州为代表的苏中地区具有较为强烈的空间结构动态性，以镇江、无锡、常州为代表的苏南地区以及以宿迁、连云港为代表的苏北地区的空间结构则较为稳定。其中，兴化市(3.53)、泰州市区(2.75)、如东县(2.14)3 个县域的 LISA 时间路径相对长度大于 2，是移动相对长度最长的县域；句容市(0.23)、宜兴市(0.30)、丹阳市(0.30)是相对长度最短的县域，相对长度均小于 0.50。

同样，利用 ArcGIS10.2 软件以自然断点法来对 LISA 时间路径弯曲度进行分级表达。江苏省县域农田生态系统净碳汇时间路径弯曲度呈现由中部向外围递减的趋势，且弯曲度均大于 1，表明江苏省县域农田生态系统净碳汇变化过程表现出较强的空间依赖性。弯曲度最大的 3 个县域依次为盐城市区(149.02)、启东市(69.24)、泰州市区(54.61)，表明这些县域在空间依赖方向上具有最大的波动性，农田生态系统净碳汇表现出非常动态的空间变迁过程。弯曲度最小的县域依次为无锡市区(1.14)、苏州市区(1.41)、常州市区(1.43)，表明这些县域的空间依赖方向具有最大的稳定性，县域农田生态系统净碳汇水平也保持相对稳定。

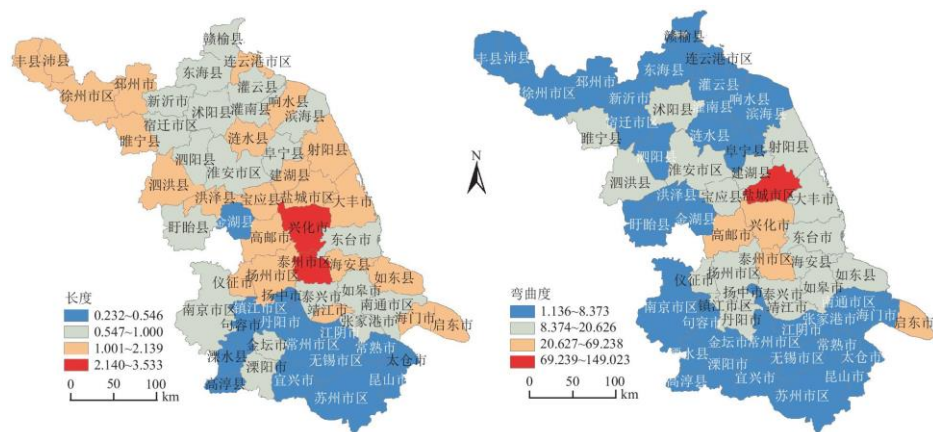


图 4 LISA 时间路径长度及弯曲度的空间分布

2.4 局部空间关联格局时空转移

采用 Rey 等提出的时空跃迁方法揭示江苏省县域间农田生态系统净碳汇局部空间关联类型的转移特征(表 5)。由表 5 可知, 2005~2019 年间, 江苏省县域农田生态系统净碳汇时空类别间迁移较少, LH→HH、HL→HH 为迁移概率最大的两种类型, 分别为 0.50、0.43, 发生迁移的县域数仅为 9 个, 而其余类型间转移概率较低, 尤其在 HH 与 LL、LH 与 HL、HL 与 LH 之间基本没有发生转移, 说明不可能发生县域与相邻县域农田生态系统净碳汇同时发生变化的情况, 县域自身因素对农田生态系统净碳汇类型的改变起决定性的作用。根据 Rey 划分出的 4 种空间跃迁类型, 2005~2019 年间, 江苏省县域农田生态系统净碳汇时空跃迁类型为 IV 型的发生概率为 68.33%, 即未发生时空跃迁的类型占大多数, 说明江苏省县域农田生态系统净碳汇局部空间联动性较弱, 缺乏共同向 HH 集聚区跃迁的动力, 空间集聚性表现出较高的路径锁定特征。

表 5 江苏省县域农田生态系统净碳汇时空跃迁矩阵

t/t+1	HH	LH	LL	HL	类型	比例	n
HH	IV (0.81)	I (0.14)	III (0.00)	II (0.05)	I	0.17	10
LH	I (0.50)	IV (0.33)	II (0.17)	III (0.00)	II	0.13	8
LL	III (0.05)	II (0.10)	IV (0.85)	I (0.00)	III	0.02	1
HL	II (0.43)	III (0.00)	I (0.14)	IV (0.43)	IV	0.68	41

3 研究结论与政策建议

3.1 研究结论

基于农田生态系统净碳汇的测算, 采用标准差椭圆、空间自相关、探索性时空数据分析等方法, 对江苏省县域农田生态系统净碳汇空间格局及其时空动态进行研究, 结果表明:

(1) 2005~2019 年, 江苏省县域农田生态系统净碳汇重心主要位于宝应县境内, 呈现“东南-西北-东北-西北-东南-西北”

的变化趋势,总体上向西北方向移动。标准差椭圆的分析表明,江苏省县域农田生态系统净碳汇呈现“西北—东南”的空间分布格局,且在收缩中趋于集聚化。

(2)2005~2019年,江苏省县域农田生态系统净碳汇呈现显著的空间正相关,具有明显的空间集聚特征,集聚程度在波动中逐渐增强。从局部视角看,江苏省县域农田生态系统净碳汇呈现较为稳定的“北高南低”的空间集聚特征,HH集聚区主要分布在苏中、苏北各县域,LL集聚区主要分布在苏南各县域,不同集聚类型区域的空间规模和县域数量随时间变化出现了小幅波动。

(3)2005~2019年,江苏省县域农田生态系统净碳汇局部空间关联格局的动态演化差异明显。LISA时间路径移动长度较大的区域主要分布在苏中部分县域,总体上呈现苏中>苏北>苏南的趋势,表明苏中地区具有更加动态的局部空间结构,苏南、苏北地区局部空间结构较稳定。LISA时间路径弯曲度呈现由中部向外围递减的趋势,盐城市区、启东市及泰州市区在空间依赖方向上具有最大的波动性,苏锡常三市市区的空间依赖方向最稳定。

(4)2005~2019年,江苏省县域农田生态系统净碳汇LISA时空跃迁类型间较少发生转移,表明江苏省县域农田生态系统净碳汇的局部空间关联格局较为稳定,大部分县域局部空间联动性较弱,缺乏共同向HH集聚区跃迁的动力,空间集聚性表现出较高的路径锁定特征,县域自身因素对农田生态系统净碳汇类型的改变起决定性的作用。

3.2 政策建议

结合江苏省农田生态系统净碳汇时空演变特征的分析,对江苏省低碳农业的发展提出如下政策建议:

大力普及低碳农业理念。低碳时代的到来给农业现代化发展带来了新的挑战,江苏省必须坚持可持续发展的理念,促进农业发展从“传统”向“低碳”的转变。要通过多种渠道广泛开展低碳农业理念、政策法规的宣传教育,引导群众树立新的发展观、资源观和生态价值观,让群众充分认识到保护生态环境,减少各类气体排放,增强土壤的固碳能力,均属于最有效最现实的低碳农业形式。

积极推广农业生态化发展。一是大力推进农药、化肥使用量的零增长行动,增施有机肥,推进秸秆等农业废弃物的综合利用;二是强化科技支撑,因地制宜推广节肥节药节膜、节水节能节地的绿色生产技术,探索生态种植模式。同时,要培养专业的农业科技人员,加强农业科学研究,加大农作物品种改良技术研发,提高农用物资利用效率以及资源循环利用效率。

制定区域差异化的农业管理政策。对于农田生态系统净碳汇水平较高的苏北地区,未来在推进城镇化进程的同时应进一步加强耕地保护与基本农田建设,农业生产中强化科技创新,加大资金投入,着力提高资源、能源利用效率,提升农业生产功能^[46],逐步发展低碳农业。农田生态系统净碳汇水平较低,具有较强时空稳定性的苏南地区,应进一步落实耕地占补平衡政策,保障耕地的数量和质量,同时,应转变现代农业发展思路,大力发展休闲农业、生态农业等现代化农业,发挥自身经济实力强的优势,实现低碳农业发展,从而提高农田生态系统净碳汇水平。对于农田生态系统净碳汇增长活力较强但持续带动作用较弱的苏中地区,应加大土地整治,推进农业结构调整,因地制宜发展特色生态农业、绿色产品,在保持良好的农业生态环境基础上,提升该地区经济效益水平,构筑联通江苏省农田生态系统净碳汇南北一体化的网络通道。

参考文献:

[1]方精云,朱江玲,王少鹏,等.全球变暖、碳排放及不确定性[J].中国科学:地球学,2011,41(10):1385-1395.

[2]于贵瑞,方华军,伏玉玲,等.区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展[J].生态学报,2011,31(19):5449-5459.

-
- [3]谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6):645-651.
- [4]DAVIS S J,CALDEIRA K.Consumption-based accounting of CO₂ emissions[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(12):5687-5692.
- [5]IPCC.Climate Change 2014:Mitigation of climate change[M].Cambridge:Cambridge University Press,2014.
- [6]尹钰莹, 郝晋珉, 牛灵安, 等. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5):918-928.
- [7]中国科学院可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展战略研究报告——探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8]刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例[J]. 地理研究, 2015, 34(4):691-700.
- [9]杨皓然, 宋戈, 杨光, 等. 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.
- [10]HAXELTINE, A, PRENTICE I C. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4):693-709.
- [11]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.
- [12]刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 等. 中国农作物生产碳足迹及其空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8):2577-2587.
- [13]AICHELE R, FELBERMAYR G. Kyoto and the carbon footprint of nations[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2012, 63(3):336-354.
- [14]李博, 张文忠, 余建辉. 碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(9):150-157.
- [15]GOMIERO T, PAOLETTI M G, PIMENTEL D. Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2008, 27(4):239-254.
- [16]KIM B, NEFF R. Measurement and communication of greenhouse gas emissions from U.S. food consumption via carbon calculators[J]. Ecological Economics, 2009, 69(1):186-196.
- [17]田云, 张俊飏. 中国省级区域农业碳排放公平性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11):36-44.
- [18]孙芳, 林而达. 中国农业温室气体减排交易的机遇与挑战[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(1):54-59.

-
- [19] 吕斯涵, 张小平. 山东省农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2):227-234.
- [20] 陈罗焯, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4):596-607.
- [21] 杜华章. 江苏省低碳农业发展水平综合评价[J]. 山西农业大学学报(社会科学版), 2017, 16(2):44-51.
- [22] 翁翎燕, 朱振宇, 韩许高, 等. 江苏省农田植被净碳汇时空格局分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6):233-241.
- [23] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [24] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析——以江苏省为例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):1034-1041.
- [25] 谷家川, 查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12):1507-1513.
- [26] 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(1):217-232.
- [27] 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(社会科学版), 2011, 11(1):59-63.
- [28] DUBEY A, LAL R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4):332-350.
- [29] 王革华. 农村能源建设对减排 SO₂ 和 CO₂ 贡献分析方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1):169-172.
- [30] 杜江, 罗珺, 王锐, 等. 粮食主产区种植业碳功能测算与时空变化规律研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10):1242-1251.
- [31] 苏继峰. 秸秆焚烧对南京及周边地区空气质量的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [32] 刘甜, 苏世伟, 朱文. 基于 Boston 矩阵的江苏省秸秆焚烧压力—状态—响应评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4):466-472.
- [33] 曹志宏, 郝晋珉, 邢红萍. 中国居民食物消费碳排放时空演变趋势及其驱动机制分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(1):91-99.
- [34] 吴丹娜, 江洪, 张金梦. 农田生态系统土壤呼吸作用的研究进展[J]. 北方园艺, 2015(6):178-182.
- [35] 肖玲, 赵先贵, 栾建伟. 甘肃省 2000-2009 年碳循环研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(5):122-125, 130.
- [36] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4):485-494.

-
- [37]米迎宾, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同管理措施对滨海盐渍农田土壤 CO₂ 排放及碳平衡的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3):546-552.
- [38]寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 冬小麦旺盛生长期 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1111-1116.
- [39]李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 等. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7):1664-1670.
- [40]高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展, 2016, 35(6):747-757.
- [41]赵璐, 赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J]. 地理科学, 2014, 34(8):979-986.
- [42]杨强, 李丽, 王运动, 等. 1935-2010 年中国人口分布空间格局及其演变特征[J]. 地理研究, 2016, 35(8):1547-1560.
- [43]REY S J, JANIKAS M V. STARS:Space-time analysis of regional systems.Geographical Analysis, 2006, 38(1):67-86.
- [44]黄睿, 王坤, 黄震方, 等. 绩效视角下区域旅游发展格局的时空动态及耦合关系——以泛长江三角洲为例[J]. 地理研究, 2018, 37(5):995-1008.
- [45]李建豹, 黄贤金, 孟浩, 等. “十二五”时期中国碳排放强度累积目标完成率分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8):1655-1664.
- [46]胡乃娟, 史航, 朱利群. 不同麦秸还田方式对周年稻麦轮作农田碳足迹的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2775-2783.

注释:

1 LISA 时间路径长度大于 1, 长度越大, 表明县域农田生态系统净碳汇具有更加动态的局部空间结构, 反之, 局部空间结构较为稳定. 因此, 在自然断点法的基础上, 结合手动分类法将 LISA 时间路径长度以 1 为分界点进行分级表达.