

DOI: 10.5846/stxb202110062753

王丹,荆延德,韩善梅,高明秀.基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析.生态学报, 2022, 42(23): 9604-9614.

Wang D, Jing Y D, Han S M, Gao M X. Spatio-temporal relationship of land-use carbon emission and ecosystem service value in Nansi Lake Basin based upon a grid square. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9604-9614.

基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析

王 丹^{1,2}, 荆延德^{1,2,*}, 韩善梅^{1,2}, 高明秀^{3,4}

1 曲阜师范大学地理与旅游学院, 日照 276826

2 日照市国土空间规划与生态建设重点实验室, 日照 276826

3 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

4 土壤资源高效利用国家工程实验室, 泰安 271018

摘要:社会发展引起的土地利用变化对生态系统服务和碳排放有显著影响,探讨碳排放与生态系统服务价值(ESV)的时空关联规律,对促进区域低碳绿色发展提供重要的理论和实践借鉴。为揭示土地利用变化下碳排放与 ESV 的时空关系,以南四湖流域为研究对象,利用 2000—2018 年 5 期土地利用数据,采用土地转移矩阵和空间自相关等方法,并引入了碳源、碳汇、净碳排放量、碳排放强度和 ESV 强度作为研究变量,探索了 ESV 和碳排放的时空演变特征及其空间关联规律。研究表明:19 年内流域内各地类间发生了程度不同的转移,其中耕地和建设用地是变化最大的类型;ESV 随土地间的相互转化而波动变化,但整体上是增加的,水体面积的增加是导致其增加的决定性原因。ESV 强度呈现“东高、西低,湖区不变”的分布特点,这与土地利用方式有关,受自然和社会等多因素影响;流域的碳汇量要远低于碳源量,净碳排放量呈稳定增长态势,其中建设用地的碳排放起着主导作用,因此建设用地在碳减排方面具有较大潜力。碳排放强度在研究期间发生了明显的时空变化,最大值从 21.61 t/hm² 增长到 101.42 t/hm²,增长了 4.69 倍,工业化和城镇化是其增长的驱动因素;碳排放强度和 ESV 强度具有空间负相关性,局部聚集现象明显,以高低聚集区为主转变为以低低聚集区为主,与地类面积和建设用地的碳排放系数有关;低高聚集区的范围和分布变化不大。总之,该流域在整体上面临着 ESV 和碳排放增加的趋势,根据它们之间的空间关联性,流域应采取有效措施来防止碳排放快速增长对周围区域生态环境带来负面影响,并构建生态良好的循环系统,以实现流域低碳经济。

关键词:土地利用碳排放;生态系统服务价值;空间自相关;南四湖流域

Spatio-temporal relationship of land-use carbon emission and ecosystem service value in Nansi Lake Basin based upon a grid square

WANG Dan^{1,2}, JING Yande^{1,2,*}, HAN Shanmei^{1,2}, GAO Mingxiu^{3,4}

1 School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China

2 Rizhao Key Laboratory of Territory Spatial Planning and Ecological Construction, Rizhao 276826, China

3 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

4 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Tai'an 271018, China

Abstract: Land-use change caused by social development significantly affects ecosystem services and carbon emissions. Exploring the spatio-temporal correlation between carbon emissions and ecosystem service value (ESV) can provide important theoretical and practical significance for promoting regional low-carbon and green development. To reveal the

基金项目:教育部人文社会科学研究面上项目(15YJAZH027)

收稿日期:2021-10-06; 网络出版日期:2022-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jingyande@163.com

spatio-temporal relationship between carbon emissions and ESV under land-use change, this study took Nansi Lake Basin as the research object and adopted land transfer matrix and spatial autocorrelation methods based on land-use data of five periods from 2000 to 2018. Carbon sources, carbon sinks, net carbon emissions, carbon emission intensity, and ESV intensity were introduced as research variables. The spatio-temporal evolution characteristics and spatial correlation of ESV and carbon emissions were explored. The results showed that the changes of different land-use types in the basin occurred in different degrees during the 19 years, and changes of the cultivated land and construction land were the most significant. The ESV fluctuated with the transformation of land, but it increased on the whole, and the increase of water area was the decisive reason for its increase. The distribution of ESV intensity was “high in the east and low in the west, and remained unchanged in the lake area”, which was related to land use patterns and influenced by natural and social factors. The carbon sink of the basin was much lower than the carbon source, and the net carbon emissions increased steadily, among which the carbon emissions of construction land played a leading role, so the construction land had great potential for carbon emission reduction. The maximum carbon emission intensity increased from 21.61 t/hm² to 101.42 t/hm², an increase of 4.69 times. Industrialization and urbanization were the driving factors of carbon emission intensity growth. There was a negatively spatial correlation between carbon emission intensity and ESV intensity. The local aggregation phenomenon was obvious, from high-low cluster to low-low cluster, which was related to land type area and carbon emission coefficient of construction land. The range and distribution of low-high cluster areas did not change much. In conclusion, the basin as a whole is facing the trend of the increasing ESV and carbon emissions. According to the spatial correlation between carbon emission intensity and ESV intensity, effective measures should be taken to prevent the negative impact of the rapid growth of carbon emission on the surrounding regional ecological environment, and to build a good ecological circulation system, so as to realize the low carbon economy of the basin.

Key Words: land-use carbon emission; ecosystem service value; spatial autocorrelation; Nansi Lake Basin

生态系统服务定义为:由生态系统提供的,人类从中收获的福祉和利益^[1]。通常使用经济价值来评价生态系统服务,以确定我们从自然中获得的利益,使不同区域具备可比性。在全球变暖的现状下,碳减排已经变为一个全球性的紧要话题^[2]。两者因土地利用类型与陆地表面特征和功能而有很大区别。经济发展通过频繁改变土地利用方式间接影响陆地生态系统和人为的碳排放。土地利用变化对碳排放不只是简单的线性关系,而是更为深远的影响。同时土地利用方式的改变也极大地影响了自然生态系统,从而影响了它们所提供的服务。因此土地利用变化不仅影响着碳排放的空间分布、范围和强度,而且还通过改变生物多样性、区域资源和生态系统类型的空间分布间接影响 ESV^[3]。随着工业化的快速发展,中国成为全球碳排放量最高的国家^[4]。特别是 1950—2005 年因土地利用变化引起的累积碳排放量为 106×10⁸ t,是同期世界土地利用变化碳排放量的 12%^[5]。为了减缓碳排放和全球变暖,中国制定了不同的环境政策并采取了有效措施^[6]。特别是,2020 年习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了碳达峰、碳中和的目标。2021 年国家林草局为落实这一决定提出“十四五”期间将扎实开展林业和草原碳汇行动,提升林草生态系统碳汇能力。因此,在碳减排政策和改善生态环境的双重背景下,研究两者间的空间关系模式,对解决社会发展过程中既要保持经济增长,又要兼顾生态环境这一难题有重大意义。

自 20 世纪 90 年代开始,一方面,国内外学者围绕土地利用碳排放问题从国家^[7]、省域^[8-9]、城市^[10]、区域^[11-12]等不同尺度对碳排放与经济增长的脱钩效应分析^[13-15]、单一地类碳排放机理剖析^[16-17]、影响因素^[7,18-19]、变化规律^[10,20]、效率^[21]、地类变化与碳源/汇的关系^[11]、碳排放空间差异与关联^[22]等角度展开了大量的研究。另一方面,在评估土地利用变化造成 ESV 波动方面,学者们还进行了许多研究^[23-26],如 ESV 和土地利用的时空变化特征^[27-28]、相互作用关系^[25,29-30]等。综上可知,以往都是从不同角度和尺度对两者单独开展了研究,但是关于土地利用碳排放和 ESV 之间空间关系的研究较少^[31-32],并且南四湖流域还未开展

土地利用碳排放的相关研究。

南四湖流域位于鲁南经济圈,是我国北方最大的淡水湖泊,肩负重要粮食生产的重任,同时在京杭大运河和国家战略性工程中发挥重要作用。未来如何推动流域内各县市在经济持续发展的前提下,实现节能减排、保护生态环境是值得思考的问题。鉴于此,本文以南四湖流域为例,利用土地利用数据和统计资料,对2000—2018年间的土地利用转移中碳排放量和ESV的时空演变开展研究,并基于格网对碳排放强度和生态系统服务强度进行空间关联分析,以期为流域提出碳减排政策,建立低碳土地利用结构,努力改善生态环境总体质量,从而走向绿色低碳发展的道路提供支撑。

1 研究区概况

南四湖流域处于中国东部淮河流域的北部,涉及山东、江苏两省5市,面积约 $3.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。地处鲁中南山区西侧的山前冲击洪积平原,中、西部为平坦的平原,东部为山地丘陵地形。海拔在-42—630 m之间,绝大部分地区低于70 m。耕地分布广泛,占全区面积的68.5%以上。自21世纪以来由于城镇化进程的推进,流域国内生产总值由 1174.91×10^8 元变为 12078.12×10^8 元,翻了9.28倍;建设用地面积从 4635.15 km^2 增长到 6035.81 km^2 ,增长了30.22%。近年来,该区受社会发展的直接影响,土地利用方式剧烈变化,能源消耗需求增加,对当地的生态和碳排放系统带来一系列问题。同时由于其所处地理位置及其作用,各级政府和相关部门都十分重视生态保护,启动了《南四湖流域水污染综合整治三年行动方案(2021—2023年)》等一系列工作,以防止环境恶化。

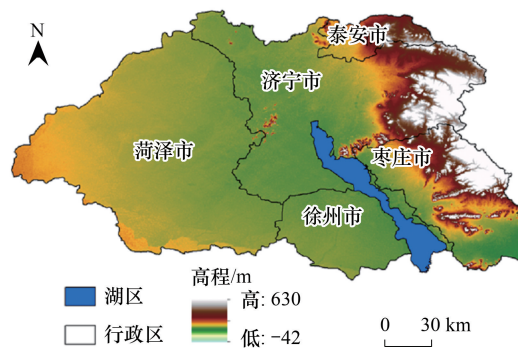


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本文使用地理国情监测云平台的2000—2015年的土地利用数据,其分辨率为30 m。2018年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,是通过人工目视解译Landsat 8遥感影像获得的。依据中科院土地利用分类标准,将研究区的地类分为6个一级类型,依次为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地。能源消耗和社会经济数据分别来源于对应年份的《中国能源统计年鉴》、《统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》等统计资料。利用网格法按照 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 大小的网格对研究区进行划分,共得到1387个评价单元。由于数据可获取性,本文中2000—2018年南四湖流域能源消耗数据,根据研究区内各区县GDP与所在省份GDP的比值来进行推算。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用类型转移矩阵

土地利用转移矩阵以二维矩阵的形式反映19年间各用地类型的数量转移情况,清楚掌握用地类型在2000年的流动方向及2018年的来源构成。其公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为土地面积; n 为6; i, j 分别为2000年与2018年的地类序号。

2.2.2 碳排放量的估算

研究区碳排放量计算:即各用地类型的面积和相应的碳排放系数相乘再求和。碳排放计算公式为:

$$E_k = \sum e_i = \sum S_i \times \delta_i \quad (2)$$

式中: E_k 表示直接碳排放量; e_i 表示各用地类型的碳排放量; S_i 和 δ_i 分别表示用地类型 i 的面积和碳排放系数,参考相关文献^[33—34]和研究区的现实情况确定各用地类型的碳排放系数,见表1所示。

表1 用地类型碳排放系数

Table 1 Carbon emissions coefficient of land-use type

土地用地类型 Land-use type	碳排放系数/(t/hm ²) Carbon emission factor	参考来源 Reference source	土地用地类型 Land-use type	碳排放系数/(t/hm ²) Carbon emission factor	参考来源 Reference source
耕地 Cultivated land	0.422	李颖等 ^[35]	水体 Water	-0.253	段晓南等 ^[36]
林地 Forest land	-0.644	方精云等 ^[33]	未利用地 Unutilized land	-0.005	赖力等 ^[37]
草地 Grassland	-0.022	方精云等 ^[33]			

基于2000—2018年南四湖流域化石能源消耗量计算建设用地碳排量,然后除以其面积得到建设用地碳排放强度。建设用地碳排放量的计算采取间接估算法,结合《中国能源统计年鉴》和2006年IPCC《国家温室气体排放清单指南》(表2)^[38],通过各种能源的消耗量和碳排放系数估算得到。

表2 各类能源折标准煤系数和碳排放系数

Table 2 Standard coal coefficient and carbon emission coefficient of different energy sources

能源类型 Energy types	折标准煤系数 Standard coal coefficient	碳排放系数 Carbon emission coefficient	能源类型 Energy types	折标准煤系数 Standard coal coefficient	碳排放系数 Carbon emission coefficient
原煤 Raw coal	0.7143	0.7559	柴油 Diesel oil	1.4571	0.5921
焦炭 Hard coke	0.9714	0.8550	燃料油 Fuel oil	1.4286	0.6185
天然气 Natural gas	1.2143	0.4483	煤油 Kerosene	1.4714	0.5714
原油 Crude oil	1.4286	0.5857	电力 Electricity	0.4040	0.7935
汽油 Gasoline	1.4714	0.5538			

建设用地碳排放计算公式:

$$E_{\eta} = \sum e_i = \sum E_i \times \mu_i \times \varepsilon_i \quad (3)$$

式中, E_{η} 为建设用地碳排放量; e_i 为能源 i 消耗产生的碳排放量; E_i 为能源 i 的消耗量; μ_i 为能源 i 消耗量转换为标准煤的系数; ε_i 为能源 i 的碳排放系数。

土地利用碳排放强度由格网内各用地类型的面积和碳排放系数决定,即碳排放强度越大说明单元格网的碳排放量越大。计算公式如下:

$$C_{RI} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i P_i}{S} \quad (4)$$

式中, C_{RI} 为土地利用碳排放强度; S_i 和 P_i 分别为格网内用地类型 i 的面积和碳排放系数; S 为格网总面积。

2.2.3 生态系统服务价值

参照谢高地等^[39—40]的研究,1个生态系统服务价值当量的价值量由每公顷农田年平均自然粮食产量的经济价值 $1/7$ ^[40—41]来确定,已广泛在流域^[39—40]等尺度开展深入研究。为避免各年份和不同省份粮食价格的差异对价值计算的影响,本文仅以山东省2018年小麦、玉米和稻谷3种主要农作物的播种面积、单产和粮食价格为基础数据,计算出南四湖流域ESV的单位当量为2085.53元,其计算模型如下:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i P_i q_i}{M} \quad (5)$$

式中, E_a 为南四湖流域 ESV 当量因子的经济量; n 为 3; p_i 为农作物 i 在山东省的价格; q_i 为农作物 i 单产; m_i 为农作物 i 面积; M 为农作物总面积。

由于我国疆域辽阔,各地的生态系统各具特点,为降低直接使用 2015 年谢高地完善的“单位面积生态系统服务价值当量表”^[39]产生的误差,本文参考研究区已有研究^[42]和现实情况修正了各地类的生态系统服务价值系数(表 3),其中不考虑建设用地的 ESV。

表 3 南四湖流域各地类生态系统服务价值系数/(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Table 3 Ecosystem service value coefficients of different land-use types in the Nansi Lake Basin

土地利用类型 Land-use type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
生态系统服务价值系数 ESV coefficients	8362.97	41079.71	25158.43	261963.31	0	10848.92

生态系统服务价值:

$$V_{ESj} = \sum_{i=1}^n A_{ij} \times C_i \quad (6)$$

$$V_{ES} = \sum_{j=1}^m V_{ESj} \quad (7)$$

生态系统服务价值强度:

$$\bar{V}_{ESj} = \frac{V_{ESj}}{S} \quad (8)$$

式中, A_{ij} 为网格 j 中地类 i 的面积; C_i 为地类 j 的价值系数; S 为网格面积; n 为 6 种土地利用类型, m 为 1387。

2.2.4 双变量空间自相关性分析

我们使用双变量 Moran's I 研究了碳排放强度与 ESV 强度之间的空间聚类 and 离散。本文使用了两种类型的双变量 Moran's I , 即全局双变量 Moran's I 和局部双变量 Moran's I 。全局双变量 Moran's I 研究了整个区域内碳排放强度与 ESV 强度之间是否存在以及空间相关性程度, 而局部双变量 Moran's I 则在具体的空间格网上显示空间相关性。计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (9)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (10)$$

式中, I 和 I_i 分别为碳排放强度与 ESV 强度的全局和局部双变量 Moran's I 。 n 是空间网格单位的总数。 w_{ij} 一个 $n \times n$ 空间权矩阵, x_i 和 x_j 为单元网格 i 和 j 的属性值, $\bar{x}$ 是属性值的均值, S^2 为方差。双变量 LISA 集聚图可视化局部空间相关性。它说明了特定位置的碳排放强度值与相邻位置的 ESV 强度值在一定显著性水平上的关系。双变量 LISA 生成的 4 个象限代表了 4 种类型的局部空间自相关。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

如表 4 所示, 2000—2018 年南四湖流域各土地利用类型间均进行了复杂的转移, 发生转移的总面积为 4468.86 km^2 , 是流域总面积的 14.10%。耕地对转移面积的贡献最大, 为 2579.12 km^2 , 其中有 2084.55 km^2 变为建设用地, 占比 80.82%, 15.72% 的转出量转为水体, 虽占比较低, 但转出面积大, 为 405.40 km^2 ; 其次是建设用地, 转出量为 854.38 km^2 , 95.87% 的土地转为耕地; 其它大部分地类的转出量转为耕地。出现此情况的原因

是流域经济快速发展促使城镇外围的耕地被大量占用,但为保证粮食安全,故改变其它生态用地的使用方式,从而确保耕地总量,之后又由于实施“两退三还”(退耕、退池、还林、还湿、还湖)工程和居民点整治等原因导致土地转换复杂且多样。建设用地是转入最多的土地类型,转入 2255.05 km²,其次是转入面积为 1581.84 km²的耕地。其他地类均发生转入转出,情况各异。

表 4 南四湖流域土地利用转移情况
Table 4 Land-use transfer in the Nansi Lake Basin

时期 Period	类型 Type	项目 Items	2018						
			耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land	转出 Transfer out
2000	耕地	面积/km ²	20173.58	9.61	47.08	405.40	2084.55	32.48	2579.12
		转出率/%		0.37	1.83	15.72	80.82	1.26	100.00
	林地	面积/km ²	226.61	528.60	10.70	12.37	41.78	0.47	291.92
		转出率/%	77.63		3.67	4.24	14.31	0.16	100.00
	草地	面积/km ²	328.68	6.62	1257.52	33.37	86.29	3.05	458.01
		转出率/%	71.76	1.45		7.29	18.84	0.67	100.00
	水体	面积/km ²	166.48	3.99	1.26	1447.03	23.90	19.64	215.26
		转出率/%	77.34	1.86	0.58		11.10	9.12	100.00
	建设用地	面积/km ²	819.07	3.23	7.31	22.19	3780.74	2.57	854.38
		转出率/%	95.87	0.38	0.86	2.60		0.30	100.00
	未利用地	面积/km ²	41.01	3.54	3.95	3.15	18.53	61.92	70.17
		转出率/%	58.44	5.04	5.62	4.49	26.40		100.00

3.2 土地利用碳排放分析

3.2.1 南四湖流域 2000—2018 年土地利用碳排放测算与分析

研究区土地利用碳排放量的改变受地类和土地利用程度的影响。本节主要以各地类的碳排放量、碳源/汇和净碳排放量等指标测算南四湖流域土地利用碳排放,分析 2000—2018 年间各指标的动态变化特征。利用上述计算公式和相关收集数据计算南四湖流域在研究期间的相应碳排放指标,结果见表 5。

通过计算可知,南四湖流域的净碳排放量表现为碳排放(表 5)。2000—2018 年碳排放能力显现稳定增长趋势,由 1262.51×10^4 t 增长至 6438.41×10^4 t,年均增长率为 22.78%,变化趋势与碳源量相似。其中,建设用地碳排放量增长迅速,从 2000 年的 1176.36×10^4 t 增长至 2018 年的 6355.35×10^4 t,但增长量具有“先快速,后放缓”的特点,这是由于流域内城镇化水平得到大幅度提高,伴随着大量的能源消耗和建设用地增加,之后由于能源结构的优化和节能减排的实施;耕地的碳排放量由于本身面积的减少呈现缓慢下降的趋势,由 2000 年的 96.02×10^4 t 下降至 2018 年的 91.81×10^4 t,年均下降率为 0.24%。碳汇量在 19 年间呈现先增加后减小并趋于稳定的态势。其中林地和草地的碳吸收量在 2005 年后出现下降,水体基本保持不变,未利用地波动较为明显,呈先减少后增加的特点。

从碳源/汇构成上分析,碳源方面,建设用地的碳排放是最主要碳源,占总碳源量的 92.45%—98.58%,并呈逐年增长态势。同时耕地作为碳源之一,碳排放贡献率低,但面积占比高。地均建设用地碳排放量表示各年建设用地的碳排放强度以及区域的能源消费结构,自 2000 年以来表现为快速增长趋势,各年的地均建设用地碳排放量依次为 25.38、62.16、80.28、96.02、105.29 t/hm²,其中 2018 是 2000 年的 4.15 倍,因此建设用地在碳减排方面具有较大潜力;碳汇方面,林地和水体对碳吸收的贡献率相当,两者之和占总碳汇的 96.11%以上,说明林地和水体具有重要的碳汇能力,而在流域内两者占总面积的 5.89%—8%,凸显了其重要的碳吸收能力,另外草地和未利用地的碳吸收量较小。由于碳源量与碳汇量相差悬殊,因此该流域今后的工作重心是碳源的控制与碳汇的增加。

表 5 南四湖流域土地利用碳排放量核算结果

Table 5 Calculation results of carbon emissions from land use in the Nansi Lake Basin

年份 Years	耕地 Cultivated land/10 ⁴ t	林地 Forest land/10 ⁴ t	草地 Grassland/t	水体 Water/10 ⁴ t	建设用地 Construction land/10 ⁴ t	未利用地 Unutilized land/t	碳源 Carbon source/10 ⁴ t	碳汇 Carbon sink /10 ⁴ t	净碳排放量 Net carbon emissions/ 10 ⁴ t
2000	96.02	-5.28	-3774.28	-4.21	1176.36	-66.05	1272.38	-9.87	1262.51
2005	94.76	-5.29	-3720.97	-4.44	3019.28	-68.85	3114.04	-10.11	3103.93
2010	94.20	-3.60	-2924.95	-4.45	4549.22	-41.20	4643.42	-8.35	4635.07
2015	93.42	-3.49	-2917.12	-4.45	5639.59	-41.19	5733.01	-8.23	5724.78
2018	91.81	-3.58	-2921.19	-4.87	6355.35	-60.06	6447.15	-8.74	6438.41

3.2.2 土地利用碳排放强度的时空特征

由于流域内地类结构和发展水平的差异,因此为了具有可比性以及直观地分析土地利用碳排放量的变化情况,故本文利用碳排放强度指标,依次分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ 5 个区间(见图 2)。19 年间南四湖流域碳排放强度时空变化明显,其特点如下:流域碳排放强度低值多分布于东部,整体上呈现增加的特点,碳排放强度最大值从 2000 年的 21.61 t/hm² 增长到 2018 年的 101.42 t/hm²,增长了 4.69 倍。落在Ⅰ区间的格网数逐年减少,尤其是 2000—2005 年间减少了 78.3%,出现了向Ⅱ区间转移的现象,而同时南四湖湖区始终属于Ⅰ区间;落在Ⅱ区间的格网呈现先增加后减少的特征,2010 年以来土地利用类型主要为林地和草地的东部和南四湖湖区的周边稳定的处于该区间;Ⅲ区间的格网数的增长率最高,在 2018 年占总格网数的 46.36%,绝大部分与耕地的分布范围相吻合;Ⅳ和Ⅴ区间的格网从无到有并逐年增加,呈团块状,主要集中在人类活动活跃的建设用地。

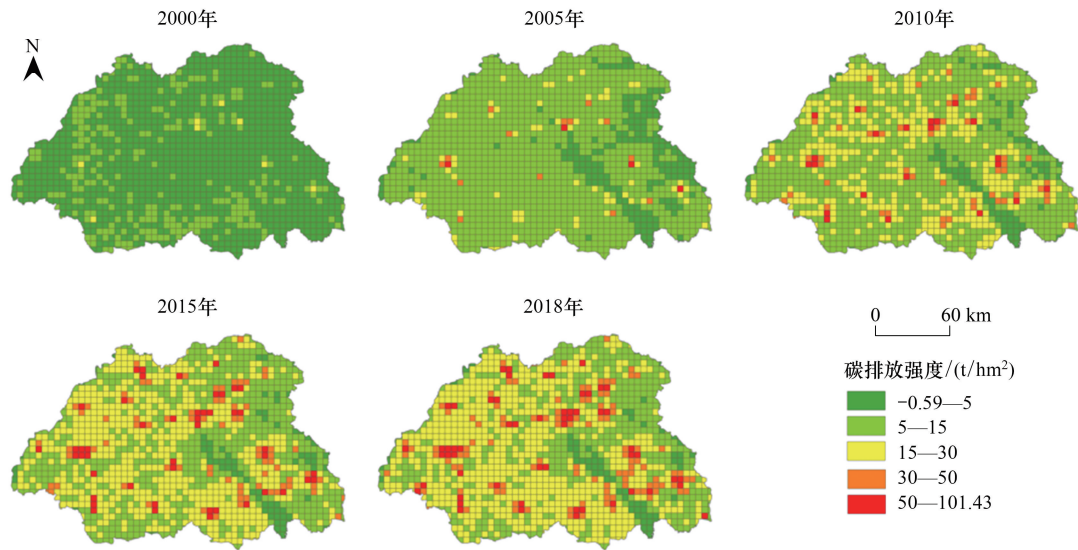


图 2 2000—2018 年土地利用碳排放强度空间演变

Fig.2 Spatial patterns of carbon emission intensity on land use during 2000—2018

3.3 生态系统服务价值的时空演变

2000—2018 年南四湖流域生态系统服务总价值呈波动变化,总体上呈增加趋势,总价值 704.07×10⁸ 元增加到 743.37×10⁸ 元,增加了 5.58%(表 6)。从各地类的 ESV 来看,耕地和水体是总 ESV 的贡献主体,依次占 24%和 61%以上。19 年间水体的 ESV 占比稳定增长,由 61.85%到 67.79%;而耕地的 ESV 占比逐年下降,由 27.03%到 24.48%;其它地类的 ESV 总体上呈下降态势。从土地利用构成中得到,19 年间建设用地的面积大

幅度扩张,林地、耕地、草地和未利用地均发生不同程度的减少,而水体面积的增加,反而使总 ESV 增加 29.30×10^8 元,说明水体的 ESV 强度最高,具有极其重要的生态地位,同时各地类间的相互转换是导致研究期间内总 ESV 波动变化的关键原因。

表 6 2000—2018 年南四湖流域各土地利用类型 ESV 统计

Table 6 Statistics of ESV of each land-use type in the Nansi Lake Basin during 2000—2018

年份 Years	类型 Type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land	合计 Total
2000	价值/ 10^8 元	190.28	33.71	43.16	435.48	0.00	1.43	704.07
	价值占比/%	27.03	4.79	6.13	61.85	0.00	0.20	100.00
2005	价值/ 10^8 元	187.80	33.75	42.55	459.87	0.00	1.49	725.46
	价值占比/%	25.89	4.65	5.87	63.39	0.00	0.21	100.00
2010	价值/ 10^8 元	186.67	22.97	33.45	460.95	0.00	0.89	704.94
	价值占比/%	26.48	3.26	4.74	65.39	0.00	0.13	100.00
2015	价值/ 10^8 元	185.14	22.23	33.36	460.62	0.00	0.89	702.25
	价值占比/%	26.36	3.17	4.75	65.59	0.00	0.13	100.00
2018	价值/ 10^8 元	181.94	22.82	33.41	503.89	0.00	1.30	743.37
	价值占比/%	24.48	3.07	4.49	67.79	0.00	0.18	100.00

为了直观地分析流域 ESV 的空间分布特征,同时避免流域边缘面积的影响,本节利用 ESV 强度表示各格网,并对其重分类依次分为 I、II、III、IV 4 个区间(见图 3)。南四湖流域的 ESV 强度具有明显的空间差异,西部地区的 ESV 强度整体高于东部地区。其中,处于 I 区间的 ESV 强度的分布范围广,其格网占总格网的 72.45% 以上,主要由于耕地的空间分布相对均一且占比高;处于 IV 区间的格网占总格网的 4% 左右,土地利用类型为水体,主要分布在南四湖湖区。与其他年份相比,2018 年处于 I 区间的格网变少,出现向 II 区间转变的现象,同时 II 区间的分布范围主要位于流域的东部,集中分布着草地和林地;IV 区间的分布范围由原先的条带状出现断裂;III 区间的分布范围变化不明显。

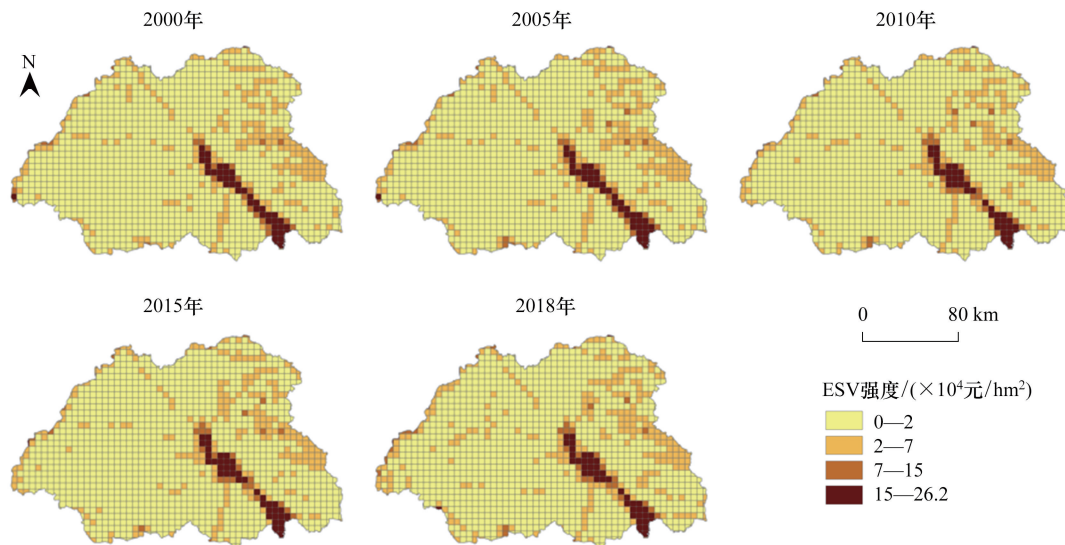


图 3 2000—2018 年南四湖流域生态系统服务价值时空变化

Fig.3 Spatio-temporal changes of ecosystem service value in Nansi Lake Basin during 2000—2018

3.4 碳排放强度和 ESV 强度的关系

为了深入地了解碳排放强度与 ESV 强度的相互交互作用,首先利用 SPSS 软件得到 2000—2018 年两者的相关系数依次为-0.453、-0.413、-0.347、-0.335 和-0.341;然后借助空间自相关揭示两者的空间关联规律(表 7),各年份的 Moran's *I* 均为负,*P* 值小于 0.001,表明研究区内土地利用碳排放强度与 ESV 强度之间具有空间负相关性,即随着碳排放强度的增强,ESV 强度呈下降的态势,并且 Moran's *I* 具有逐年下降的特点,表现出整体较为分散、小范围聚集的空间布局格局。

表 7 2000—2018 年南四湖流域双变量全局 Moran's *I* 统计表
Table 7 Bivariate global Moran's *I* statistic of Nansi Lake Basin during 2000—2018

年份 Years	Moran's <i>I</i>	<i>P</i>	<i>z</i>	年份 Years	Moran's <i>I</i>	<i>P</i>	<i>z</i>
2000	-0.2780	<0.001	-25.4105	2015	-0.2089	<0.001	-19.7546
2005	-0.2581	<0.001	-23.7017	2018	-0.2057	<0.001	-19.1981
2010	-0.2144	<0.001	-19.9452				

通过 LISA 集聚图可以看出(图 4),2000—2018 年间,低高聚集区稳定地分布在南四湖湖区,表示该区碳排放强度低值与 ESV 强度高值形成集聚现象;2000 和 2005 年的高低聚集区集中分布在耕地面积占比高,建设用地点状零散分布的西部和北部,而在 2005 年之后出现了大面积向低低聚集区转变的现象,高低聚集区与呈片状分布的主要城镇用地相吻合,主要是由于 2005—2010 年间地类之间的变化剧烈,总转移面积为 3581.62 km²,其中有 1687.82 km² 的其他类型土地转化为建设用地,说明在该时间段流域的城镇化水平得到快速发展,能源消耗增加,导致局部地区的碳排放强度发生大幅度的上升;虽然建设用地和耕地的价值系数低且都属于碳源,但是前者的碳排放系数要远高于耕地,从而使耕地面积占比高的格网与周围的低 ESV 强度形成集聚现象;低低聚集区在 2000—2005 年零散分布且变化不大,之后分布范围扩大,主要分布在西部和北部,地类为具有面积优势的耕地;高高聚集区呈零星分布,这是由于周围是水体,属于碳汇。

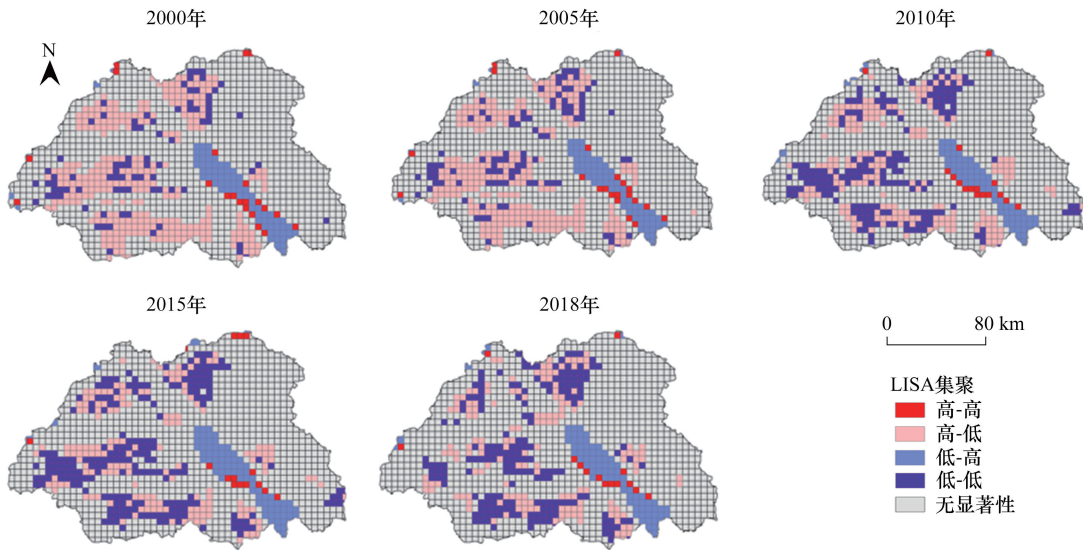


图 4 2000—2018 年双变量空间联系的局部指标(LISA)集聚图
Fig.4 Bivariate local indicators of spatial association(LISA) cluster graph during 2000—2018

4 讨论

以往的研究大多集中在独立的行政单元(如县、市等)的经济和社会等方面的碳排放效应分析^[7—9,18]。本

文将跨越行政区的流域作为一个研究整体,基于格网探究因土地利用变化引起的碳排放和 ESV 以及两者的空间聚集规律。研究发现流域的建设用地面积和净碳排放量在这 19 年内呈增长的趋势,与 Chen 等^[43]以成渝城市群为研究区、李玉玲等^[14]以陕西省为研究区的的结果一致,说明土地利用的改变是影响碳排放量和碳源/汇格局的关键原因,不当的土地开发会影响碳平衡;同时与中原城市群^[31]的空间关系一样,碳排放强度与 ESV 强度之间具有空间负相关性,碳排放强度对 ESV 强度有空间溢出效应。结合研究结果,通过在流域内实施能源消费结构的升级、提高利用效率、引进低碳生产技术、防范耕地被滥用和提高建设用地集约度,可以实现碳排放的降低和有效保护生态系统。

尽管本研究展示了 19 年间碳排放和 ESV 的时空特征,但仍存在一些潜在的局限性需进一步改进。首先,本文忽略了空间异质性,只是借鉴前人研究和资料得到各地类地碳排放/吸收系数^[44],如耕地碳排放受种植作物种类、土壤的性质和耕作特点等多种因素的影响而有所差异。本文与国内绝大部分研究类似将耕地视为碳源,而马涛^[45]的研究表明上海的农业活动表现为碳汇。各能源碳排放系数参考了 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南,这可能并不完全适用于研究区。因此,今后根据区域的实际情况科学合理地确定碳排放系数,或者形成统一的测算方法;其次,本文使用了高精度的土地利用数据,但基于 5 km×5 km 网格对流域进行划分。由于生态和地理过程伴随着复杂的尺度效应^[46],不同的尺度研究的侧重点不同。因此未来有必要从多尺度探究碳排放强度与 ESV 强度关系特征;最后,由于受数据收集的限制,本文通过 GDP 占比推算流域的能源消耗,同时没有将工业生产、生活和废弃物排放加入建设用地的碳排放核算中,所以计算结果有误差,但不影响区域碳排放的时空分析。因此,今后需要寻找全面且受数据限制小的计算方法。

5 结论

(1) 研究区具有面积优势的地类是耕地和建设用地,分别占总面积的 68.5% 和 14.5% 以上。在 19 年内各地类之间进行了不同程度的转移,其中耕地和建设用地是变化量最大的类型。产生该变化的原因与城镇化、人类生产生活和退耕还湖等相关政策有关。

(2) 19 年内流域的总价值随地类之间的转化呈波动变化,整体上是增加,水体面积的增加是导致其的决定性原因。通过 ESV 强度图可知,东部的 ESV 强度明显高于西部,同时Ⅲ、Ⅳ区间分布在南四湖湖区,Ⅱ区间分布在海拔较高的东部,这与地类、价值系数和地形有关。

(3) 南四湖流域的净碳排放量表现为碳排放,且稳定增长。其中,碳源量要远大于碳汇量,地均建设用地碳排放量 19 年间增长了 4.15 倍,这与经济社会发展有密切的关联。通过碳排放强度的时空演变分析可知,Ⅰ区间的格网转变为Ⅱ和Ⅲ区间的格网,后者的分布范围迅速扩张,同时Ⅳ和Ⅴ区间的格网从无到有且逐年增加,与主要建制镇的位置相吻合。整体上呈现东部高、西部低的特点,与 ESV 强度的空间分布有一定的关联。

(4) 对南四湖流域土地利用碳排放强度和 ESV 强度进行数量和空间统计分析,得知两者具有负相关性,且通过了 P 值检验。19 年内两者的空间关联规律发生较大的变化。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, Zhao R Q, Zhang M, Wu C Y. Land use, total carbon emissions change and low carbon land management in Coastal Jiangsu, China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 77-86.
- [3] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the County level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [4] He Q S, Zeng C, Xie P, Liu Y L, Zhang M K. An assessment of forest biomass carbon storage and ecological compensation based on surface area: a case study of Hubei Province, China. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 392-400.
- [5] He Q S, Tan S K, Xie P, Liu Y L, Li J. Re-assessing vegetation carbon storage and emissions from land use change in China using surface area. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(4): 601-613.
- [6] Wu J X, Wu Y R, Guo X M, Cheong T S. Convergence of carbon dioxide emissions in Chinese cities: a continuous dynamic distribution approach.

- Energy Policy, 2016, 91: 207-219.
- [7] 王珧, 张永强, 田媛, 王荣. 我国粮食主产区农业碳排放影响因素及空间溢出性. 南方农业学报, 2019, 50(7): 1632-1639.
- [8] 杨国清, 朱文锐, 文雅, 林英昌. 20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究. 生态环境学报, 2019, 28(2): 332-340.
- [9] 王喜, 鲁丰先, 秦耀辰, 孙艳芳. 河南省碳源碳汇的时空变化研究. 地理科学进展, 2016, 35(8): 941-951.
- [10] 周嘉, 杨琳, 董美娜, 姜丽丽, 王颖, 臧淑英. 基于土地利用的哈尔滨市 2004—2012 年碳排放强度变化分析. 地理科学, 2015, 35(3): 322-327.
- [11] 郝凤明, 梁文涓, 牛明芬, 王娇月. 辽宁中部城镇密集区土地利用变化的碳排放及低碳调控对策. 应用生态学报, 2016, 27(2): 577-584.
- [12] Xu Q, Dong Y X, Yang R. Urbanization impact on carbon emissions in the Pearl River Delta region: Kuznets curve relationships. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 514-523.
- [13] 刘洁, 梁红梅, 曾业隆, 秦伟山, 李孟伟, 荆肇睿. 基于投入视角的山东省农地利用碳排放与经济发展脱钩研究. 水土保持通报, 2016, 36(4): 303-308.
- [14] 李玉玲, 李世平, 祁静静. 陕西省土地利用碳排放影响因素及脱钩效应分析. 水土保持研究, 2018, 25(1): 382-390.
- [15] 丁宝根, 杨树旺, 赵玉, 易松. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究. 中国土地科学, 2019, 33(12): 45-54.
- [16] 洪凯, 朱子玉. 珠三角农地利用中的碳排放时空特征及影响因素——基于 1996—2014 年数据. 湖南农业大学学报: 社会科学版, 2017, 18(1): 70-76.
- [17] 马海良, 丁元卿, 庞庆华. 武汉市湖泊水域利用转变及其碳排放影响. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 369-375.
- [18] 候勃, 岳文泽, 王腾飞. 中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素——以上海市为例. 经济地理, 2020, 40(9): 82-90.
- [19] Dong F, Yu B L, Hadachin T, Dai Y J, Wang Y, Zhang S N, Long R Y. Drivers of carbon emission intensity change in China. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 187-201.
- [20] 阿依吐尔逊·沙木西, 艾力西尔·亚力坤, 刘晓曼, 蔡博峰, 陈前利, 冯彤, 菊春燕, 李松, 张飞云. 乌鲁木齐土地利用碳排放强度时空演变研究. 中国农业资源与区划, 2020, 41(2): 139-146.
- [21] 张苗, 甘臣林, 陈银蓉. 基于 SBM 模型的土地集约利用碳排放效率分析与低碳优化. 中国土地科学, 2016, 30(3): 37-45.
- [22] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [23] 冉玉菊, 雷冬梅, 刘林, 高丽萍. 滇中城市群 2000—2020 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 水土保持通报, 2021, 41(4): 310-322, 2.
- [24] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 肖建设, 扎西拉旦, 颜玉倩, 陈国茜, 史飞飞. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [25] 曹君, 张正栋, 崔峰艳, 陈宋佳, 杨阳, 匡腾飞, 陈裕婵. 1996—2015 年纽约湾区生态系统服务对景观格局变化的响应. 世界地理研究, 2021, 30(4): 826-838.
- [26] 刘莹, 耿文亮, 邵静文, 周志民, 张鹏岩. “三生空间”视角下土地利用变化与生态系统服务价值响应——以黄河下游地区为例. 地域研究与开发, 2021, 40(4): 129-135.
- [27] 王大菊, 卫海燕, 贺敏, 辜清, 马明国, 李晶. 基于土地利用的三峡库区生态系统服务价值时空格局分析. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1): 90-100.
- [28] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. Science of the Total Environment, 2017, 576: 705-719.
- [29] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [30] Arowolo A O, Deng X Z, Olatunji O A, Obayelu A E. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria. Science of the Total Environment, 2018, 636: 597-609.
- [31] 王伯阳. 土地利用碳排放与生态系统服务价值空间关系研究. 中国水运: 下半月, 2021, 21(4): 77-78.
- [32] 汤峰, 殷彦玲, 张蓬涛, 白宁. 基于土地利用变化的高阳县生态系统服务价值和碳排放风险研究. 水土保持研究, 2019, 26(4): 265-271.
- [33] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007(6): 804-812.
- [34] 蓝家程, 傅瓦利, 袁波, 张婷, 彭景涛. 重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析. 水土保持学报, 2012, 26(1): 146-150, 155.
- [35] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 102-107.
- [36] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469.
- [37] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 赵登辉. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏省经济为例. 生态学报, 2006, 26(4): 1285-1292.
- [38] 荆肇睿, 王金满. 山东省土地利用碳足迹与经济增长脱钩关系分析. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 310-314.
- [39] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [40] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 郑度. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. 山地学报, 2003, 21(1): 50-55.
- [41] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [42] 蒋斋, 孙小银, 刘飞, 单瑞峰, 樊玉娜, 丛文翠. 1975—2015 年南四湖自然保护区生态系统服务价值时空变化分析. 生态科学, 2019, 38(3): 201-210.
- [43] Chen Y Z, Lu H W, Li J, Xia J. Effects of land use cover change on carbon emissions and ecosystem services in Chengyu urban agglomeration, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(8): 1197-1215.
- [44] 景勇, 左玲丽, 彭文甫. 四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析: 以绵阳市为例. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 172-185.
- [45] 马涛. 上海农业碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析. 农业环境与发展, 2011, 28(5): 38-41.
- [46] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. 地理学报, 2011, 66(12): 1618-1630.