青岛市碳排放与生态系统服务价值的时空关系变化

王 甜[1,2,3], 李金奎[4], 宁永香[1,2,3], 赵光辉[1,2,3], 陈胜华[1,2,3]

(1.山西工程技术学院 地球科学与工程系, 山西 阳泉 045000; 2.生态修复及环境遥感技术创新中心, 山西 阳泉 045000; 3.矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 阳泉 045000; 4.山西二建集团有限公司 第八工程公司, 山西 太原 030000)

摘 要: [目的]分析港口城市土地利用变化过程中,碳排放与生态系统服务价值(ESV)时空关系的演变规律,助力区域国土空间规划、生态文明建设及绿色可持续发展。[方法]基于1990—2024年5期青岛市土地利用分类数据,整合能源消费指标,综合运用IPCC碳排放系数法、ESV当量因子法、双变量空间自相关模型等方法,分析土地利用变化过程中青岛市碳排放与ESV时空关系的变化规律。[结果]①1990—2024年间青岛市土地利用发生了较大变化。建设用地增加1 478.13 km^2,主要由耕地转化而来。林地先减少后增加,水域呈动态变化,草地和未利用地减少。②青岛市整体属于碳源,净碳排放呈动态变化。研究期间增加18.25×10^6 t,高值区域位于胶州湾周围经济发达地区,低值区域位于其四周。③ESV动态变化整体呈下降趋势。研究期间共计减少8.52×10^8元。ESV值胶州湾湿地、莱西市产芝水库等地高,周围低。④青岛市土地利用碳排放与ESV是更为复杂和动态的空间相关关系。负相关呈增加趋势,局部集聚现象显著。高低聚集区主要位于胶州湾北部和东部。[结论]加大对林地、草地等碳汇地类的保护力度及生态修复,控制城市扩张速度,合理调整产业结构,以促进青岛市实现碳中和与保障生态安全。

关键词: 土地利用碳排放; 生态系统服务价值; 时空关系; 双变量空间自相关模型; 山东省青岛市

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0297-13 **中图分类号:** X171.1, X321

文献参数: 王甜, 李金奎, 宁永香, 等.青岛市碳排放与生态系统服务价值的时空关系变化[J].水土保持通报, 2026, 46(4): 297-309. Wang Tian, Li Jinkui, Ning Yongxiang, et al. Spatiotemporal changes in relationship between carbon emissions and ecosystem service values in Qingdao City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 297-309.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.017 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.017**

Spatiotemporal changes in relationship between carbon emissions and ecosystem service values in Qingdao City

Wang Tian[1,2,3], Li Jinkui[4], Ning Yongxiang[1,2,3], Zhao Guanghui[1,2,3], Chen Shenghua[1,2,3]

(1.*Department of Earth Science and Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi* 045000, *China*; 2.*Innovation Center for Ecological Restoration and Environmental Remote Sensing Technology, Yangquan, Shanxi* 045000, *China*; 3.*The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Yangquan, Shanxi* 045000, *China*; 4.*Eighth Engineering Company, Shanxi No.2 Construction Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi* 030000, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution of the relationship between carbon emissions and ecosystem service value (ESV) during land use changes in port cities was analyzed in order to support regional territorial spatial planning, ecological civilization construction, and green sustainable development. [Methods] Based on five phases of land use classification data of Qingdao City from 1990 to 2024, combined with energy consumption indicators, this study analyzed the spatiotemporal relationship between carbon emissions and ESV during land use

收稿日期: 2026-01-02 **修回日期:** 2026-02-15 **采用日期:** 2026-02-23

资助项目: 山西省地质勘查建设与发展专项资金项目"遥感与GIS支持下的山西矿山生态环境监测与评价技术研究"(2023-011); 山西省青年项目"采煤对山西岩溶河流水-气界面碳通量影响研究"(202503021212277)

第一作者: 王甜(1994—),女(汉族),山西省吕梁市人,硕士,助教,主要从事海岸带遥感方面的研究。Email:1476373100@qq.com。

通信作者: 陈胜华(1971—),女(汉族),山西省阳泉市人,博士,教授,主要从事土地复垦与矿区生态重建等方面的研究。Email:379646483@qq.com。

change using the IPCC carbon emission coefficient method, the ESV equivalent factor method, and the bivariate spatial autocorrelation model. [Results] ① Substantial land use changes occurred in Qingdao City. Construction land increased by 1 478.13 km^2 during 1990—2024, which was mainly converted from cultivated land. Forestland first decreased and then increased, water areas showed dynamic changes, and grassland and unused land decreased. ② Qingdao City was overall a net carbon source. Net carbon emissions exhibited dynamic changes, increasing by 18.25×10^6 t. High-value zones were concentrated in the economically developed areas around Jiaozhou Bay, while low-value zones were distributed in the surrounding regions. ③ ESV changed dynamically, exhibiting an overall downward trend, with a total decrease of 8.52×10^8 yuan during 1990—2024. High ESV values were observed in areas such as the Jiaozhou Bay wetland and the Chanzhi Reservoir in Laixi City, while lower values were found in the surrounding areas. ④ The spatial correlation between land use carbon emissions and ESV in Qingdao City was complex and dynamic. The negative correlation showed an increasing trend, with significant local spatial clustering. High-low clustering zones were mainly distributed in the northern and eastern parts of Jiaozhou Bay. [Conclusion] It is necessary to strengthen the protection and ecological restoration of carbon sink land types such as forestland and grassland, control the speed of urban expansion, and appropriately adjust the industrial structure to promote carbon neutrality and ensure ecological security in Qingdao City.

Keywords: land use carbon emissions; ecosystem service value; spatiotemporal relationship; bivariate spatial autocorrelation model; Qingdao City, Shandong Province

土地是人类赖以生存的物质基础,港口城市多位于生态环境脆弱的海岸带区域[1]。随着港口城市扩张以及人类活动影响,其土地利用发生重大变化。而土地利用的转变会使碳排放与生态系统服务价值(ESV)发生变化[2]。土地利用变化会加剧温室效应[3],降低ESV[4]。研究土地利用变化过程中,碳排放与ESV时空关系变化规律,对城市绿色低碳发展及生态环境安全具有重要意义。

从20世纪90年代开始,国内外学者对土地利用变化对碳排放及生态环境效应的影响进行了大量研究。土地利用碳排放方面,学者从国家[5-6]、城市[7-8]及流域等[9-10]不同角度对碳排放核算、时空演变、预测、影响因素、效应效益以及经济脱钩效应等进行了大量研究。张璐爽等[11]综合运用碳排放系数法和能源消费核算法对京津冀地区碳排放进行计算和空间演变特征分析,同时对未来土地利用碳排放趋势进行模拟预测;刘冠权等[12]对青岛市碳排放量驱动因素进行研究,同时对碳排放和能源强度与经济增长的脱钩关系进行分析;初丽霞等[13]采用碳排放系数法测算黄河流域农业碳排放,并分析其与农业经济发展水平的关系和影响因素。土地利用变化对ESV影响方面,多集中于时空变化、影响因素、生态效应以及情景模拟与预测[14-16]。陈小璇等[17]对青岛市土地利用变化及对生态系统服务的影响进行了研究;刘涛等[14]基于土地利用分类数据,结合PLUS模型和当量因子法对榆林市生态系统服务价值进行了评估和预测。关于碳排放与ESV时空关系,学者多从城市群或流域尺度展开研究。例如陈慧灵等[18]和高熳佳等[19]分别对黄河流域和山西省土地利用碳排放与ESV间的时空关系进行研究。虽然中国学者关于青岛市土地利用碳排放与ESV的研究较多,但关于二者间时空关系的研究目前尚存空白,且较少学者建立1 km网格精细化研究土地利用碳排放与ESV的时空关系。本研究建立1 km网格对二者时空相关性进行研究,并可视化显示结果。研究青岛市土地利用碳排放与ESV相关性,有助于揭示快速城市化过程中,人类活动对生态环境的时空影响特征,可为青岛市政府制定以生态环境保护为导向的国土空间规划及城市发展政策提供一定的理论依据。

青岛市作为中国重要的国际性港口城市、海洋经济示范区及生态安全屏障,承担着推动黄河流域生态保护和高质量发展以及深化中日韩区域经济合作的重要使命,其发展模式对全国沿海港口城市优化城市发展规划具有重要意义。然而,快速城市化扩张及港口发展造成土地利用发生变化,生态环境破坏,海岸带资源过度开发以及陆海统筹矛盾突出等问题。因此,本文基于1990—2024年5期青岛市土地利用分类数据,整合能源消费指标,综合运用IPCC碳排放系数法、ESV当量因子法以及双变量空间自相关模型,研究土地利用变化过程中碳排放与ESV时空关系变化规律,以期推动青岛市国土空间结构与布局优化,提升公众生态意识,助力生态保护与经济社会协调发展,同时为青岛市绿色低碳发展及生态文明建设提供一定的理论依据。

1　研究区概况

青岛市(119°30′—121°00′E,35°35′—37°09′N)地处山东半岛南部,东、南濒临黄海,属温带季风气候,是典型的海滨丘陵城市,地势东高西低,南北两侧隆起,中间低凹,青岛港已发展为国际枢纽海港,下辖7区3市。全市总面积约为1.13×10^4 km^2,海域面积约1.17×10^4 km^2,海岸线总长为882.92 km,湿地面积234.65 km^2。

截至2024年末,常住人口1.04×10^7人,地区生产总值1.67×10^{12}元,以第二、三产业结构为主,其中第三产业占比居首位。原油和原煤为能源消费的主要来源,原油消耗量呈增加趋势,为建设用地碳排放的重要来源。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

本文所用青岛市土地利用分类数据由杨杰、黄昕团队基于Landsat遥感影像,采用随机森林分类法制作,空间分辨率为30 m。根据研究区实际情况,将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地6种类型。

2.2　研究方法

2.2.1　土地利用类型转移矩阵

土地利用类型转移矩阵源自马尔科夫模型[20],可以精确定量描述区域内各土地利用类型在特定时间段内面积以及相互转移情况[21]。计算公式如下:

$$Z_{ij}=\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,Z_{ij}为土地利用类型面积(hm^2);$n=6$,i,j为转移前后土地利用类型。

2.2.2　土地利用碳排放估算方法

土地利用碳排放分为直接碳排放和间接碳排放。直接碳排放指耕地、林地、草地、水域和未利用地直接参与生产形成的碳排放[22],参考已有研究成果[6,20-23],直接碳排放系数分别为0.497 0,−0.646 5,−0.021 0,−0.252 5,−0.005 1 t/hm^2。青岛市耕地主要类型为水浇地和旱地,两者分别约占50%,水浇地碳排放系数高于旱地。考虑到青岛市耕地分布较广,且较为分散,以及各年份参数统一等实际情况,选择耕地碳排放系数较高值作为青岛市耕地最终碳排放系数。计算公式如下:

$$C_D=\sum_{i=1}^{5}K_i\times S_i \tag{2}$$

式中:i为土地利用类型,C_D为土地利用直接碳排放量(10^4 t),K_i为第i种地类的土地碳排放系数(t/hm^2),S_i为第i种地类的面积(hm^2),正数代表该地类为碳源,负数为碳汇。

建设用地碳排放属于间接碳排放,可以通过区域化石能源消耗量进行间接估算[24]。本文参考《青岛市统计年鉴》《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)[25]、2019年IPCC修订的《国家温室气体排放清单指南》[26]和单孟文等[7]学者的研究成果,利用青岛市各类能源消耗量间接计算建设用地碳排放量。各类能源标准煤折算系数和碳排放系数如表1所示。由于1990年《青岛市统计年鉴》无炼厂干气和原煤消耗量统计数据,故用煤炭消耗量代替原煤消耗量,建设用地碳排放量计算公式如下所示:

$$C_I=\sum_{m=1}^{11}Q_m\times\alpha_m\times\beta_m \tag{3}$$

式中:C_I为土地利用间接碳排放量(10^4 t);Q_m为第m种能源的消耗量(kg);α_m为第m种能源的标准煤折算系数(kg/kg);β_m为第m种能源的碳排放系数(kg/kg)。

2.2.3　生态系统服务价值

生态系统服务价值(ESV)最初由Daily提出,之后全球学者展开大量研究[14-17,27-28]。参考谢高地等[29]2015年制定的中国陆地生态系统服务价值当量因子,使用当量因子代表生态系统服务价值,其数值等于每年每1 hm^{2}耕地粮食产值的1/7[30]。基于《青岛市统计年鉴》,计算得出1990—2024年青岛市平均粮食单产为6 039.42 kg/hm^2。通过国家粮食和物资储备局公布的2024年山东省粮食平均收购价格周报,计算得出2024年青岛市粮食平均收购价格为2.36元/kg,最终计算得出青岛市生态系统服务价值的一个当量因子为2 036.15元/hm^2。

结合青岛市各地类实际情况,草地单位面积生态系统服务价值当量由草原、灌木丛、草甸系数分别为0.9,0.06,0.04计算得出;耕地、林地、未利用地和水域分别选取旱地、针阔混交、荒漠、水系作为单位面积生态系统服务价值当量。青岛市生态系统服务价值如表2所示。

青岛市ESV计算公式如下:

$$\mathrm{ESV}=\sum_{i=1}^{6}A_k\times\mathrm{VC}_k \tag{4}$$

$$\mathrm{ESV}_f=\sum_{i=1}^{6}A_k\times\mathrm{VC}_{fk} \tag{5}$$

式中：i为土地利用类型，ESV表示青岛市生态系统服务总价值（元）；A_k表示地类k面积（hm^2），VC_k表示地类k的单位面积生态系统服务价值系数；ESV_f为第f项ESV（元），VC_{fk}为地类k的第f项ESV系数。

表1 能源消费碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficients of energy consumption

能源种类	标准煤折算系数/（kg·kg^{-1}）（以标准煤计）	碳排放系数/（kg·kg^{-1}）（以C/标准煤计）	能源种类	标准煤折算系数（以标准煤计）	碳排放系数/（kg·kg^{-1}）（以标准煤计）
原煤	0.714 3	0.755 9	燃料油	1.428 6(kg/kg)	0.618 5
焦炭	0.971 4	0.855 0	液化石油气	1.714 3(kg/kg)	0.504 2
原油	1.428 6	0.585 7	炼厂干气	1.571 4(kg/kg)	0.460 2
汽油	1.471 4	0.553 8	热 力	0.034 12(kg/MJ)	0.260 0
煤油	1.471 4	0.571 4	电 力	0.122 9〔kg/(kW·h)〕	2.525 5
柴油	1.457 1	0.592 1			

表2 青岛市1990—2024年各类土地生态系统服务价值

Table 2 Ecosystem service value coefficients of various land types in Qingdao City (1990—2024)

服务类型	指 标	生态系统服务价值/(元·hm^2·a^{-1})					
		耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地
供给服务	食品生产	1 730.73	631.21	247.60	1 628.92	0	0
	原料生产	814.46	1 445.67	351.85	468.31	0	0
	水资源供给	40.72	753.38	199.14	16 879.68	0	0
调节服务	气体调节	1 364.22	4 784.95	1 268.11	1 567.84	0	40.72
	气候调节	733.01	14 314.13	3 338.06	4 662.78	0	0
	净化环境	203.62	4 051.94	1 097.89	11 300.63	0	203.62
	水文调节	549.76	7 146.89	2 442.57	208 175.98	0	61.08
支持服务	土壤保持	2 097.23	5 823.39	1 542.59	1 893.62	0	40.72
	维持养分循环	244.34	447.95	122.58	142.53	0	0
	生物多样性	264.70	5 293.99	1 395.98	5 192.18	0	40.72
文化服务	美学景观	122.17	2 321.21	621.03	3 848.32	0	20.36

2.2.4 双变量空间自相关

基于GeoDa软件，利用双变量空间自相关模型，采用全局双变量莫兰指数、局部双变量莫兰指数以及双变量LISA图对局部空间相关性进行可视化，以此探讨青岛市土地利用碳排放与ESV间的空间相关关系。模型计算公式如下：

$$I=\frac{\sum_{l=1}^{e}\sum_{h=1}^{e}W_{lh}\left(x_l-\bar{x}\right)\left(x_h-\bar{x}\right)}{S^2\sum_{l=1}^{e}\sum_{h=1}^{e}W_{lh}} \tag{6}$$

$$I_p=\frac{\left(x_l-\bar{x}\right)\sum_{h=1}^{e}W_{lh}\left(x_l-\bar{x}\right)}{S^2} \tag{7}$$

式中：I和I_p分别为全局双变量莫兰指数和局部双变量莫兰指数；e为所有网格单元的数量；W_{lh}为$e\times e$的空间权重矩阵；x_l和x_h分别表示第l个网格和第h个网格的属性值；$\bar{x}$和S^2分别表示研究对象属性值的整体平均数和样本方差。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

分析表3和表4可知，青岛市土地总面积为1.10×10^4 km^2，耕地为主导类型，各时期占比均达到60%以上，其次是建设用地和林地。各年份耕地、建设用地和林地面积之和分别占总面积的96.29%，96.49%，96.65%，98.06%，97.49%，且占比不断增加，草地、水域及未利用地占比较小。建设用地增加最为明显，耕地一直处于减少状态，林地先减少后增加，总体呈增加趋势，水域呈动态变化，草地和未利用地减少较为明显。

①青岛市建设用地面积由1 599.48 km^2增加为3 077.61 km^2，主要来源为耕地。各时段内耕地转化为建设用地面积分别为434.78，502.28，412.42，116.60 km^2，水域转化为建设用地的面积先增加后减

少。2000年76.23 km²水域转化为建设用地,此外还有草地、林地和未利用地。但与耕地和水域相比,转化面积较小。②耕地共减少1 402.22 km²,主要转化为建设用地,转化速度先增大后减小。2000—2010年转化面积达到502.28 km²。此外还有林地和水域,转化为草地和未利用地的数量较少。③林地面积1990—2000年略有减少,主要转化为耕地,2000年后不断增加,主要由耕地转化而来。④该时期耕地转林地面积大于林地转耕地面积;水域面积呈动态变化,各时期水域与耕地和建设用地间相互转入与转出数量不同。⑤草地主要转化为耕地。⑥未利用地主要被开发为建设用地。

表3　青岛市1990—2024年土地利用面积变化

Table 3　Land use area changes in Qingdao City (1990—2024)

年份	项目	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
1990	面积/km²	8 466.33	483.05	161.33	240.18	4.97	1 599.48
	占比/%	77.28	4.41	1.47	2.19	0.05	14.60
2000	面积/km²	8 068.01	481.47	86.71	295.19	3.86	2 020.09
	占比/%	73.65	4.40	0.79	2.70	0.04	18.44
2010	面积/km²	7 586.78	472.81	50.64	311.96	4.31	2 528.84
	占比/%	69.25	4.32	0.46	2.85	0.04	23.08
2020	面积/km²	7 251.67	509.06	29.09	181.40	2.45	2 981.67
	占比/%	66.19	4.65	0.27	1.66	0.02	27.22
2024	面积/km²	7 064.11	539.04	25.08	248.10	1.39	3 077.61
	占比/%	64.48	4.92	0.23	2.27	0.01	28.09

1990年青岛市建设用地主要位于研究区中东部,其余各区市零星分布。受青岛市地形因素限制、港口带动及城市发展政策等因素影响,城市扩张迅速,位于海岸带区域的城市先沿海岸线呈条带状延伸,后由沿海向内陆扩张。其中黄岛区最为明显,而内陆城市平度市、莱西市等主要以近似圆形由中心向外扩张,导致耕地被大面积侵占。耕地主要分布在平度市、胶州市、莱西市等地,面积占比较大,一定程度上保障粮食安全与农产品供给,同时有利于维护生态系统平衡。然而伴随青岛市快速城市化扩张,青岛港口北部和东部大面积耕地转化为建设用地。林地面积增加与青岛市“退耕还林”政策的实施密切相关,表明青岛市在维护森林生态系统方面成效较为显著。水域1990—2010年呈增加趋势。这与青岛市兴建棘洪滩水库、崂山水库扩建密切相关。2010年之后减少,主要与青岛市大规模填海扩建港口,修建胶州湾大桥及海底隧道等导致海岸带沿岸湿地、滩涂等减少相关。2020年后又开始增加,与国家出台“最严围海令”,系统性恢复胶州湾等地湿地及河道生态治理等密切相关。草地和未利用地均呈减少趋势,在一定程度上表明青岛市加大对土地的开发力度,城市发展迅速,同时在此过程中忽视对草地生态系统的保护,易加剧城市热岛效应,影响本地生物多样性。整体呈现建设用地和林地以转入为主,耕地、草地和未利用地以转出为主,水域动态变化。总之,如何进一步平衡青岛市城市扩张、经济社会发展、农产品种植以及生态环境保护,仍然是青岛市城市发展的重要任务。

3.2　土地利用碳排放分析

分析表5可知,1990—2024年青岛市整体处于碳排放状态,并非碳吸收状态。净碳排放量动态变化,整体由1990年的3.55×10^6 t增加为2024年的2.18×10^7 t,涨幅显著。其中建设用地碳排放量增加最为迅速,年均增速为5.39×10^5 t/a,各时期均占青岛市总碳排放量的88.26%以上。耕地碳排放量呈下降趋势,林地和水域碳吸收量动态变化,整体呈增加趋势。草地和未利用地碳吸收量较小,呈下降趋势。总之,青岛市林地和水域整体呈增加趋势,碳吸收量增加。此外由于城市快速扩张导致草地和未利用地减少,引起碳吸收量减少,但整体碳吸收量增加。然而伴随青岛市快速扩张,建设用地增加明显,主要以侵占耕地为主,建设用地为碳排放的主要贡献者,加之能源消耗增加,直接导致整体碳排放量上升。

建设用地为青岛市碳排放的主要来源,占总碳排放量的88.26%以上,碳排放量呈动态变化。其次为耕地,占比1.51%～11.74%,碳排放量逐渐减少。耕地为青岛市土地利用首要类型,面积占比最大,但碳排放量占比明显低于建设用地。2024年建设用地

单位碳排放量达到7 000 t/km²。碳汇方面,林地和水域二者面积之和仅占青岛市6.31%～7.19%,但碳汇占总碳汇的99.09%以上,表明林地和水域具有重要的碳吸收能力;草地和未利用地碳吸收量较小,逐年稳定下降。碳排放总量与碳吸收总量差值逐年增加。总之,合理控制建设用地扩张速度,加大对林地和水域的保护力度和生态修复有助于青岛市减少净碳排放量。

表4 青岛市1990—2024年土地利用类型转移矩阵

Table 4 Land use type transition matrix of Qingdao City (1990—2024)

转移年份	转移面积/km²					
	土地利用类型	草 地	耕 地	建设用地	林 地	水 域	未利用地
1990—2000	草 地	66.96	31.89	18.08	35.21	3.34	1.47
	耕 地	10.85	7 981.35	434.78	30.44	41.95	0.07
	建设用地	0.32	18.99	1 500.02	0.69	47.47	0.02
	林 地	4.60	59.29	3.58	418.24	0.03	0
	水 域	0.01	5.05	33.80	0.03	200.38	0.18
	未利用地	0.23	0.36	1.74	0	0.40	1.97
2000—2010	草 地	37.39	25.92	9.11	8.70	0.43	1.42
	耕 地	6.95	7 499.69	502.28	35.58	52.09	0.27
	建设用地	0.20	22.79	1 912.40	0.81	55.87	0.07
	林 地	2.68	47.37	4.19	430.32	0.05	0
	水 域	0.26	15.95	76.23	0.02	200.67	0.39
	未利用地	0.11	0.44	0.88	0	0.26	2.00
2010—2020	草 地	19.79	19.20	3.47	4.82	0.21	0.12
	耕 地	5.52	7 105.19	412.42	78.66	10.29	0.03
	建设用地	0.10	21.56	2 469.36	0.99	13.29	0.03
	林 地	1.25	45.90	2.01	426.22	0.04	0
	水 域	0.02	82.41	70.99	0.30	154.85	0.79
	未利用地	0.31	1.07	1.17	0	0.27	1.33
2020—2024	草 地	19.13	5.31	0.23	2.28	0.02	0.02
	耕 地	3.45	7 046.64	116.60	47.61	61.02	0.01
	建设用地	0.05	11.44	2 929.06	0.80	18.44	0.02
	林 地	0.50	19.27	0.68	490.52	0.05	0
	水 域	0	2.98	9.37	0.04	166.54	0.09
	未利用地	0.22	0.31	0.45	0	0.18	1.13

青岛市土地利用类型分布状况如图1所示。为全面分析并可视化青岛市土地利用碳排放时空变化特征,本文基于ArcGIS软件通过创建1 km×1 km网格,计算各网格土地利用碳排放,并通过插值功能计算土地利用净碳排放量。结合研究区实际情况将青岛市净碳排放分为5个等级,最终得出青岛市土地利用净碳排放量时空分布图(图2)。1990—2024年青岛市土地利用碳排放时空变化显著,整体净碳排放相对较低。净碳排放整体呈增加趋势,34 a间扩大为原来的6.15倍。1990年整体以较低区为主,随着1990—2000年大量较低区转移为中值区,导致2000年中值区域增加,主要位于胶州湾西部。高值区随时间变化最为明显,于2010年出现。整体呈块状集聚分布,主要位于胶州湾周围经济发达的地区,少数位于平度市和莱西市,低值和较低区域位于四周。2020年碳排放高值区域大幅减小为较高区域,2024年少量较高区域转化为高值区域。

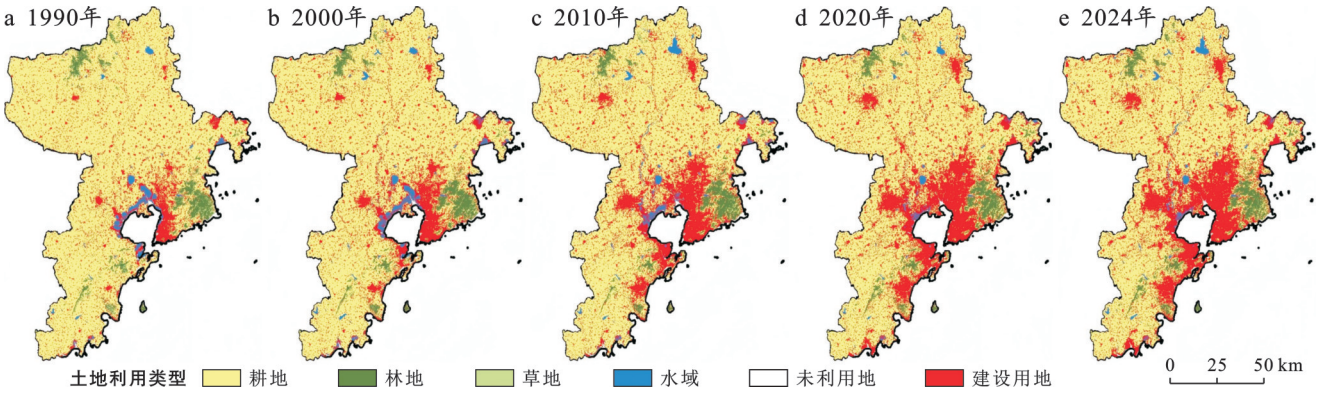
分析图1和图2可知,青岛市碳排放较高区域和高值区域扩张与建设用地增加密不可分。建设用地主要来源于耕地,水域次之;耕地稳定转出,主要转化为建设用地,林地和水域次之。总之,青岛市净碳排放量增加的主要原因为城市化快速扩张导致建设用地迅速增加,来源主要为耕地和水域。此外,加大对未利用地的开发力度以及忽视对草地的保护也是碳排放量上升的重要原因。2010年后净碳排放明显下降,与青岛市政府制定的"低碳发展规划"相关。例如,优化产业结

构和交通结构,关闭老城区高碳排放工业企业、发展绿色清洁能源、精细化管理碳排放。2020年后又略有增高,主要原因为疫情结束后,经济反弹,相关基础设施及西海岸新区、上合示范区等建设用地扩张带动高碳建筑材料使用量的增加,同时青岛市消耗煤炭、电力、热力也呈增加趋势。“碳达峰”并不是“瞬间尖峰”。青岛市作为国际性港口大城市,碳排放在短期内受多种因素影响,会出现小幅上下波动。

表 5　青岛市 1990—2024 年土地利用碳排放量

Table 5　Carbon emissions from land use in Qingdao City (1990—2024)　　单位:10^4 t

年份	碳源			碳汇					净碳排放量
	建设用地	耕地	碳排放总量	林地	草地	水域	未利用地	碳吸收总量	
1990	316.205 1	42.077 7	358.282 7	3.122 9	0.033 9	0.606 5	0.000 3	3.763 5	354.519 2
2000	712.693 5	40.098 0	752.791 5	3.112 7	0.018 2	0.745 4	0.000 2	3.876 5	748.915 1
2010	2 452.320 6	37.706 3	2 490.026 9	3.056 7	0.010 6	0.787 7	0.000 2	3.855 3	2 486.171 6
2020	1 962.720 4	36.040 8	1 998.761 2	3.291 1	0.006 1	0.458 0	0.000 1	3.755 3	1 995.005 8
2024	2 148.643 9	35.108 6	2 183.752 6	3.484 9	0.005 3	0.626 5	0.000 1	4.116 7	2 179.635 9



注:地图基于自然资源部标准地图(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/)。原审图号为GS(2024)0650)的标准地图制作。底图无修改。下同。

图 1　青岛市 1990—2024 年土地利用类型分布

Fig.1　Distribution of land use types of Qingdao City (1990—2024)

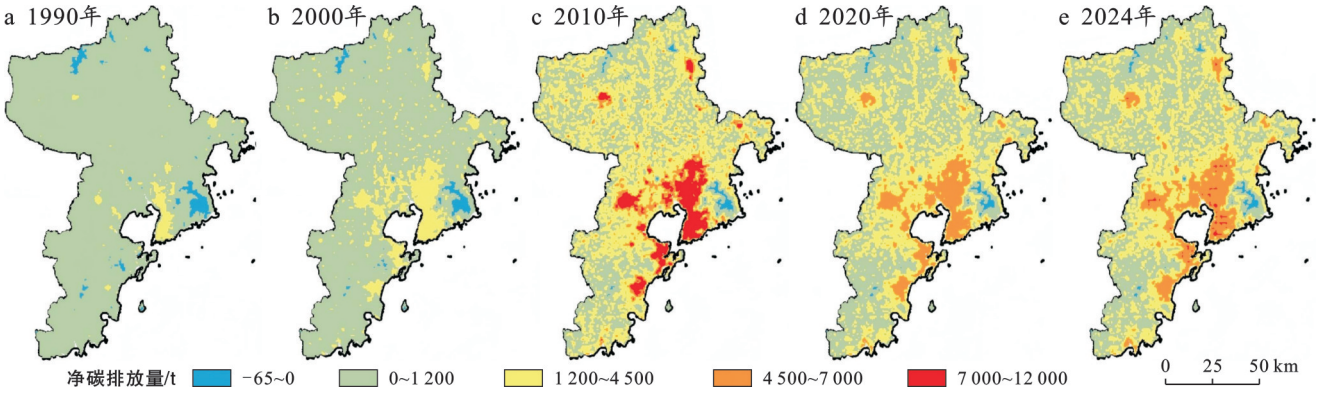


图 2　青岛市 1990—2024 年土地利用净碳排放量时空分布

Fig.2　Spatiotemporal distribution of net carbon emissions from land use in Qingdao City (1990—2024)

3.3　生态系统服务价值时空演变分析

根据表 2 及青岛市各地类面积计算出的各地类生态系统服务价值如表 6 所示。分析表 6 可知,34 a 间青岛市总 ESV 呈动态变化,整体呈减少趋势,共减少 8.52×10^8 元。

ESV 构成中,耕地和水域占据主导地位,二者所提供的 ESV 较为接近,年均 ESV 贡献率均超过总量的 80%,水域面积相较耕地明显较少,表明水域具有重要的生态系统服务价值;其次为林地和草地,林地 ESV 增加 2.63×10^8 元,而未利用地 ESV 占比很小,变化微小。

1990—2024 年青岛市总 ESV 降低,其主要原因为:①快速城市化发展,建设用地面积增加迅速,使得耕地和草地等地类不同程度减少,而建设用地无生态价值,因而削弱总 ESV 的增加;②相关法规和政策《青岛市耕地保护激励办法》及相关区市细则。

《青岛市全面建立林长制的实施意见》《青岛市大沽河管理办法》、《青岛市国土空间总体规划(2021—2035年)》、《青岛市国土空间生态修复规划(2021—2035年)》等使得耕地与林地、耕地与水域存在不同程度的相互转化,三者总面积呈减少趋势。林地和水域ESV整体虽呈增加趋势,但由于青岛快速城市化扩张侵占大面积耕地以及草地等地类,未能弥补耕地等地类减少所造成的生态价值损失;③青岛港口扩建及修建流亭国际机场,大面积侵占水域,造成水域ESV降低,进而影响整体ESV增加。

表6 青岛市1990—2024年各地类生态系统服务价值

Table 6 Ecosystem service values of various land use types in Qingdao City (1990—2024)

年份	类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
1990	价值(亿元)	69.13	22.71	2.04	61.43	0	0.002 0	155.31
	贡献率/%	44.51	14.62	1.31	39.55	0	0.001 3	100.00
2000	价值(亿元)	65.88	22.64	1.09	75.50	0	0.001 6	165.11
	贡献率/%	39.90	13.71	0.66	45.73	0	0.001 0	100.00
2010	价值(亿元)	61.95	22.23	0.64	79.79	0	0.001 8	164.60
	贡献率/%	37.63	13.50	0.39	48.47	0	0.001 1	100.00
2020	价值(亿元)	59.21	23.93	0.37	46.40	0	0.001 0	129.91
	贡献率/%	45.58	18.42	0.28	35.71	0	0.000 8	100.00
2024	价值(亿元)	57.68	25.34	0.32	63.46	0	0.000 6	146.79
	贡献率/%	39.29	17.26	0.22	43.23	0	0.000 4	100.00

分析表7可知,水文调节对青岛市总ESV贡献率最高,达到35%以上;其次为土壤保持,ESV值超18.56×10^8元;食品生产、气体调节、气候调节这3者的ESV值较为接近,ESV贡献率保持在8%以上;维持养分循环的ESV贡献率一直最低,保持在1%左右。各年度水资源供给与水文调节生态系统服务类型所提供的ESV整体呈上升趋势,涨幅较小;食品生产、气体调节、土壤保持等生态服务类型对应的ESV则表现为下降趋势。其中土壤保持ESV下降最为明显,降低了2.81×10^8元。其余生态系统服务类型ESV值下降幅度较小。

青岛市独特的自然地理条件以及气候,造就水资源、湿地种类丰富,可以有效促进水分循环和碳循环,加之青岛市加强对水资源的保护力度和长期、系统地制定生态修复措施,效果较为显著,故水文调节和土壤保持ESV值较高,水资源供给与水文调节ESV呈增加趋势;维持养分循环的ESV一直较低的原因与其在生态系统服务短期内成效不直观和显著有关。食品生产、气体调节ESV下降主要与青岛市快速城市化发展侵占大面积耕地以及草地等地类有关;土壤保持ESV值下降较为明显的原因与青岛地形起伏较大,地表物质易被冲刷,部分地区土壤层较薄、城市扩张侵占植被、化肥农药使用较多以及生态修复工程覆盖面不全等因素关系密切。

表7 青岛市1990—2024年单项生态系统服务功能价值

Table 7 Values of individual ecosystem service functions in Qingdao City (1990—2024) 单位:10^8元

生态系统服务类型		ESV值				
		1990年	2000年	2010年	2020年	2024年
供给服务	食品生产	15.39	14.77	13.95	13.17	12.98
	原料生产	7.76	7.44	7.03	6.74	6.66
	水资源供给	4.79	5.69	5.94	3.75	4.89
调节服务	气体调节	14.44	13.88	13.17	12.65	12.64
	气候调节	14.78	14.47	13.95	13.55	14.13
	净化环境	6.57	7.03	7.04	5.62	6.45
	水文调节	58.50	69.54	72.62	45.46	59.45
支持服务	土壤保持	21.27	20.42	19.33	18.56	18.46
	维持养分循环	2.34	2.24	2.12	2.03	2.01
	生物多样性	6.27	6.34	6.20	5.60	6.05
文化服务	美学景观	3.18	3.29	3.26	2.78	3.08
合 计		155.31	165.11	164.60	129.91	146.79

本文基于ArcGIS 10.8软件创建1 km×1 km网格,计算各网格中的ESV,并通过插值功能计算青岛市ESV,结合研究区实际情况将青岛市ESV分为5个等级。青岛市ESV时空分布如图3所示。1990—2024年青岛市ESV在空间分布上表现出明显的差异性,整体以低值区域为主,主要由于耕地广泛分布。较低区域呈块状聚集分布,主要位于平度市、崂

山区以及黄岛区的林地;中值区域和较高区域微小,且分布较为分散;高值区域占比较小,34 a间动态变化,主要位于胶州湾西北部湿地、河流以及莱西市产芝水库,分布相对集中,与青岛市水域分布一致。

总之,青岛市总ESV动态变化,1990—2000年增加,主要由于青岛市低值区域向较低区域转移所致(图3);而2000—2020年总ESV呈下降趋势,主要由于青岛市快速城市化扩张侵占大量耕地及胶州湾水域(图1)。

此外,建设用地的逐年增长也会导致低值区域的增加;2024年总ESV增加主要得益于青岛市"退耕还林"以及相关生态修复政策的实施,导致青岛市林地和水域面积增加,但相较耕地面积减少量明显较小,故总ESV整体呈下降趋势。

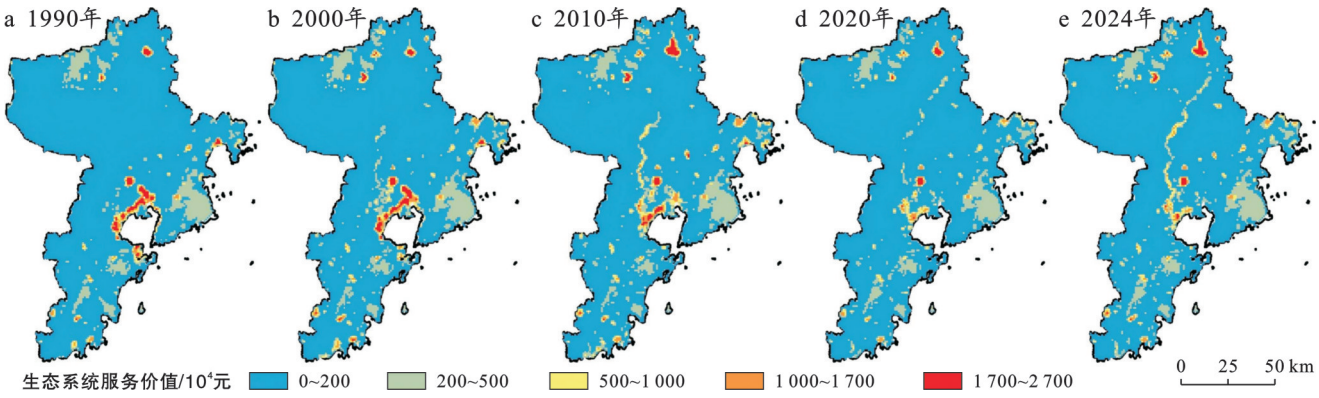


图3　青岛市1990—2024年生态系统服务价值时空分布

Fig.3　Spatiotemporal distribution of ecosystem service values in Qingdao City (1990—2024)

3.4　土地利用碳排放与ESV相关性分析

本文通过创建1 km×1 km网格对青岛市土地利用碳排放与ESV相关性进行分析,利用双变量空间自相关分析模型计算得出全局莫兰指数分别为:−0.378,0.001,−0.035,−0.085,−0.095,表明青岛市土地利用碳排放与ESV并非单纯的负相关,而是更为复杂和动态的空间相关关系。

1990年、2010—2024年均为负值,p值均小于0.001,且z得分均小于0(表8)。这表明青岛市土地利用碳排放与ESV间存在空间负相关。即生态系统服务价值的高值区域与碳排放的低值区域相关联,生态系统服务价值的低值区域与碳排放的高值区域相关联。然而2000年打破负相关,全局莫兰指数变为正值,且p值大于0.001。青岛市碳排放与ESV不存在显著的空间自相关。2010年后全局莫兰指数又变为负值,负相关性逐渐增强,表明青岛市土地利用碳排放与ESV呈空间负相关为主导模式,但强度较1990年减弱。

表8　青岛市1990—2024年土地利用碳排放与ESV空间相关性

Table 8　Spatial correlation between land use carbon emissions and ESV in Qingdao City (1990—2024)

参数	1990年	2000年	2010年	2020年	2024年
Moran's I	−0.378	0.001	−0.035	−0.085	−0.095
p值	0.001	0.388	0.001	0.001	0.001
z值	−103.391 9	0.306 9	−10.030 5	−23.782 1	−26.687 7

分析图4可知,青岛市局部集聚现象显著。①低-高(碳排放低-ESV高)聚集区占比较高,主要位于胶州湾沿岸、平度市、莱西市、崂山区以及黄岛区,分布较分散。这表明水域和林地具有较好的固碳能力和高ESV。②高-低聚集区呈增加趋势,1990年分布较少,主要集中于胶州湾北部,2000年后主要位于胶州湾北部和东部,与建设用地扩张方向相同。这表明建设用地为高碳排放低ESV地类。③高-高聚集区分布较少,主要位于胶州湾西北部以及即墨区东部,与周围湿地等地类可以提供高生态系统服务价值相关。该区域建设用地与湿地交错分布,在保持高ESV的前提下,碳排放仍然较高。④低-低聚集区1990年主要位于胶州湾东部,分布较为聚集,2000年后分布逐渐分散。主要位于耕地边缘,生态环境较差,城市发展水平较低,碳排放量不高。

1990年青岛市老工业区主要沿胶州湾海岸线向北延伸,集中在狭小的空间内,但生产总值占据核心地位,碳排放强度非常高。加之建设用地与崂山、胶

州湾湿地以及大型林地等空间相距较远，故 1990 年碳排放与 ESV 呈现较强负相关，高-低聚集区较少。1990 年后青岛市实施城市空间与产业战略重构——“西迁东移”，同时进行产业升级与能源结构调整，加之“九五”计划的强约束、国有企业改革以及亚洲金融危机等，青岛市打破碳排放与 ESV 空间负相关。然而随着青岛市建设用地的快速扩张，能源消耗增加，导致碳排放量增加。耕地、草地等地类被侵占，ESV 整体呈减少趋势。建设用地碳排放系数明显高于耕地。即使建设用地占比较少的网格，碳排放强度也较高，ESV 较小，故高-低聚集区呈增加趋势。2000 年后碳排放与 ESV 空间负相关性增强。

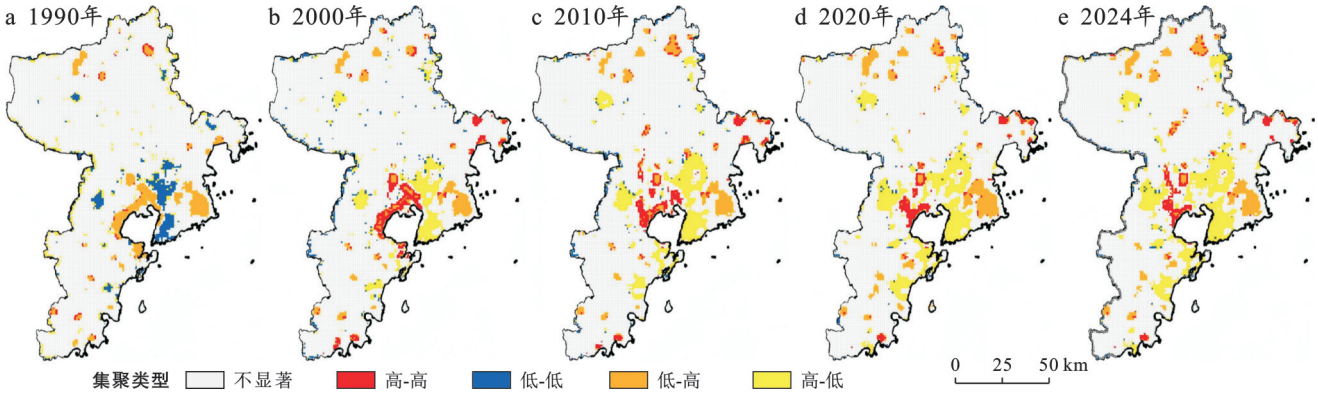


图 4 青岛市 1990—2024 年土地利用碳排放与 ESV 时空集聚分布

Fig.4 Spatiotemporal clustering distribution of land use carbon emissions and ESV in Qingdao City (1990—2024)

4 讨 论

本文基于青岛市 1990—2024 年土地利用分类数据，分析碳排放与 ESV 时空关系演变特征，结论如下。①耕地为主要地类，建设用地持续扩张，主要侵占耕地，与陈小璇等得出的耕地呈下降趋势，建设用地呈上升趋势一致[17]。青岛为中国重要港口城市，依托胶州湾港口群及外向型经济，城镇化发展迅速，城市扩张明显，为典型“港城融合”的土地变化模式，与内陆城市扩张特征存在明显差异。②净碳排放整体上升，“环湾高，四周低”，高值区主要位于胶州湾周围经济发达的地区，低值区域位于四周，与单孟文等的土地利用净碳排放总体呈增长态势，呈“中间高，四周低”的格局一致[7]，主要与港口工业、临港物流、中心城区建筑密集及交通驱动等相关。青岛市净碳排放呈动态变化，符合“碳达峰”并非“瞬时尖峰”而是动态变化理论。③ESV 整体下降，凸显陆海生态压力，与 Xu Shaojie、陈小璇等研究得出的 ESV 呈下降趋势一致[16-17]。青岛山地丘陵占比高，海岸线长，湿地与林地生态敏感，建设用地侵占耕地、滨海围填及生态用地减少等共同导致 ESV 下降。④碳排放与 ESV 整体呈空间负相关，与谢贤健、武新姣、付帅等研究得出的碳排放强度与 ESV 强度间具有空间负相关性的结论一致[20-21,23]。2000 年受耕地保护、生态退耕、胶州湾治理等政策的影响，负相关被打破呈微弱正相关。此后随城市快速扩张，负相关性逐渐增强，表明国土空间政策、生态修复可显著扭转地类-碳-生态的耦合关系，对青岛落实生态保护具有重要意义。

本文在分析青岛市碳排放与 ESV 时空关系时，存在一定不足。首先，选用碳排放系数、ESV 测算虽然借鉴相关学者的研究成果，但未充分考虑空间异质性。例如，受林地种类、耕地类型、建设用地用途等因素的影响，未纳入胶州湾湿地、滩涂等地类的碳汇与 ESV 贡献。今后需对不同区域进行系数选择及 ESV 测算，以提高精度。其次，创建 1 km 网格对碳排放与 ESV 相关性进行分析，未充分考虑二者在其他尺度的时空关系，未来可从多个尺度出发，进行多维度分析与研究。

未来青岛市需以陆海统筹、港城协同发展为导向，优化土地利用模式，严格控制胶州湾与滨海城镇扩张速度以及化石能源消耗，加大对碳汇和高 ESV 地类如林地、水域等的保护力度，多尺度协同生态环境治理，助力青岛市逐步实现区域绿色低碳可持续发展。

5 结 论

（1）青岛市耕地为首要土地利用类型，建设用地扩张明显，以侵占耕地为主，林地总体增加，水域呈现动态变化，草地和未利用地逐年减少。建设用地和林地以转入为主，耕地、草地和未利用地以转出为主，水域动态变化。

(2)青岛市净碳排放动态变化,整体呈增加趋势,由1990年的3.55×10^6 t增加为2024年的2.18×10^7 t。1990年整体以较低区为主,2000年中值区增加,主要由较低区转化而来。2010年出现碳排放高值区,整体呈块状集聚分布,主要位于胶州湾周围经济发达的地区,低值和较低区域位于四周。2020年碳排放高值区域明显减少。

(3)青岛市ESV动态变化,整体呈下降趋势,共计减少8.52×10^8元。耕地和水域占据主导地位,林地和草地次之。水文调节对青岛市总ESV贡献率最高,土壤保持次之。各年度水资源供给与水文调节所提供的ESV整体呈上升趋势,食品生产、气体调节、土壤保持等呈下降趋势。ESV整体以低值区域为主,较低区域呈块状聚集分布,中值区域和较高区域面积微小,且分布较为分散,高值区域占比较小,与青岛市水域分布一致。

(4)1 km网格尺度下,青岛市土地利用碳排放与ESV并非单纯的负相关,而是更为复杂和动态的空间相关关系。1990年为较强负相关,2000年打破负相关呈微弱正相关;随后负相关增强。区域内局部集聚现象显著。低-高聚集区占比较高,与林地和水域低碳排高ESV有关;高-低聚集区呈增加趋势,主要位于胶州湾北部和东部,与建设用地扩张方向相同,高-高聚集区分布较少,低-低聚集区分布逐渐分散。

参考文献(References)

[1] 王恒.海上丝绸之路沿线港口城市扩张遥感分析研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2018.
Wang Heng. A analysis study of port city expansion along the maritime silk road by remote sensing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences),2018.

[2] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. Progress in Geography,2014,33(4):441-446.

[3] 戚琦,王玲,陈俊辰,等.武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用[J].地理科学,2024,44(6):953-963.
Qi Qi, Wang Ling, Chen Junchen, et al. Interaction between rapid urban expansion and ecosystem service value trade-off/synergy in Wuhan City [J]. Scientia Geographica Sinica,2024,44(6):953-963.

[4] 付超,于贵瑞,方华军,等.中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响[J].地理科学进展,2012,31(1):88-96.
Fu Chao, Yu Guirui, Fang Huajun, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon balance of China [J]. Progress in Geography, 2012,31(1):88-96.

[5] 刘靖,毋冰龙,王红雷,等.不同碳排放情景下中国土地利用变化的空间分异与动态分析[J].水土保持通报,2025,45(4):233-243.
Liu Jing, Wu Binglong, Wang Honglei, et al. Spatial differentiation and dynamic analysis of land use change in China under different carbon emission scenarios [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 233-243.

[6] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].经济地理,2015,35(3): 154-162.
Sun He, Liang Hongmei, Chang Xueli, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China [J]. Economic Geography, 2015,35(3):154-162.

[7] 单孟文,李婷,王映然,等.2000—2020年青岛市区域碳排放时空演变特征及影响因素[J].水土保持通报,2024,44(3):367-378.
Shan Mengwen, Li Ting, Wang Yingran, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of regional carbon emission in Qingdao City during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):367-378.

[8] He Jiali, Liu Xiangfei, Wang Xuetong, et al. Spatiotemporal evolution of territorial spaces and its effect on carbon emissions in Qingdao City, China [J]. Land, 2024,13(10):1717.

[9] 古甜甜,刘严松,胡薇,等.涪江流域土地利用碳排放时空演变及其影响因素[J].四川环境,2025,44(5):97-109.
Gu Tiantian, Liu Yansong, Hu Wei, et al. Spatiotemporal evolution of carbon emission from each land use type in Fujiang River basin and its influence factors [J]. Sichuan Environment, 2025,44(5):97-109.

[10] 孙恬,高依晴,王琳琳,等.洞庭湖区土地利用碳排放时空演变及影响因素[J].环境污染与防治,2025,47(6):150-158.
Sun Tian, Gao Yiqing, Wang Linlin, et al. Spatial and temporal evolution and influencing factors of carbon emission from land use in Dongting Lake area [J]. Environmental Pollution and Control, 2025,47(6):150-158.

[11] 张璐爽,靖常峰,武书钊,等.京津冀地区土地利用碳排放空间相关性演变及情景预测[J].测绘科学,2025,50(10):142-151.
Zhang Lushuang, Jing Changfeng, Wu Shuzhao, et al. Evolution of spatial correlation and scenario prediction of land use carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Science of Surveying and Mapping, 2025,50(10):142-151.

[12] 刘冠权,杨雨霖,朱文晶.基于LMDI模型和Tapio的城市碳排放驱动因素和脱钩状态研究[J].南宁师范大学学报(自然科学版),2023,40(3):87-94.
Liu Guanquan, Yang Yulin, Zhu Wenjing. Driving factors and decoupling state of urban carbon emission based on LMDI model and tapio: A case study of Qingdao City [J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition),2023,40(3):87-94.

[13] 初丽霞,王文燕.黄河流域农业碳排放脱钩效应及影响因素研究[J].生态经济,2026,42(1):67-75.
Chu Lixia, Wang Wenyan. Study on the decoupling effect and influencing factors of agricultural carbon emission in the Yellow River basin [J]. Ecological Economy, 2026,42(1):67-75.

[14] 刘涛,张海朋,杨孟豪.黄河流域资源型城市生态系统服务价值评估及多情景预测[J].环境监测管理与技术,2025,37(6):44-51.
Liu Tao, Zhang Haipeng, Yang Menghao. Assessment and multi-scenario prediction of ecosystem service value in resource-based cities in the Yellow River basin [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2025,37(6):44-51.

[15] 刘志飞,罗昕怡,刘安妮,等.长江中游城市群生态系统服务价值时空变化及其驱动因素[J].经济地理,2025,45(11):213-222.
Liu Zhifei, Luo Xinyi, Liu Anni, et al. Spatiotemporal changes of ecosystem service value and its driving factors in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2025, 45(11):213-222.

[16] Xu Shaojie, Wang Kaiyong, Wang Fuyuan. Monitoring changes and multi-scenario simulations of land use and ecosystem service values in coastal cities: A case study of Qingdao, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2025,197(2):173.

[17] 陈小璇,隋玉正.青岛市土地利用与生态系统服务价值的演变[J].青岛理工大学学报,2020,41(1): 69-74.
Chen Xiaoxuan, Sui Yuzheng. Evolution of land use and of ecosystem service value in Qingdao City [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2020, 41(1):69-74.

[18] 陈慧灵,蒋莉莎,王振波.黄河流域土地利用碳排放与生态系统服务价值时空耦合及影响因素[J].环境科学,2025,46(6):3536-3545.
Chen Huiling, Jiang Lisha, Wang Zhenbo. Spatial temporal coupling and influencing factors of land-use carbon emissions and ecosystem service value in the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2025,46(6): 3536-3545.

[19] 高熳佳,崔佳.基于LUCC的山西省碳排放和生态系统服务价值时空关系[J].环境科学,2025,46(6):3546-3555.
Gao Manjia, Cui Jia. Spatiotemporal relationship between carbon emissions and ecosystem service value in Shanxi Province based on land use change [J]. Environmental Science, 2025,46(6):3546-3555.

[20] 谢贤健,黄安.基于LUCC的四川省碳排放和生态系统服务价值时空关系[J].长江流域资源与环境,2025,34(10):2352-2365.
Xie Xianjian, Huang An. Spatial-temporal relationships of carbon emissions and ecosystem service values in Sichuan Province based on LUCC [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025,34(10):2352-2365.

[21] 武新姣,袁金国,赵锋,等.滹沱河流域碳排放与生态系统服务价值时空关系[J].环境科学,2025,46(11): 7197-7207.
Wu Xinjiao, Yuan Jinguo, Zhao Feng, et al. Spatiotemporal relationship between carbon emissions and ecosystem service value in Hutuo River basin[J].Environmental Science, 2025,46(11): 7197-7207.

[22] 章磊.安徽省土地利用碳排放时空演变及影响因素研究[D].合肥:安徽农业大学,2024.
Zhang Lei. Spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions from land use in Anhui Province [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024.

[23] 付帅,徐炳先,彭雨欣,等.基于土地利用的鄱阳湖流域碳排放与生态系统服务价值时空耦合关系分析[J].水土保持研究,2025,32(3):321-331.
Fu Shuai, Xu Bingxian, Peng Yuxin, et al.Analysis of spatiotemporal coupling relationship between carbon emission and ecosystem service value in Poyang Lake basin based on land use[J].Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(3):321-331.

[24] 刘畅,苏筠,黎玲玲.中国县域能源消费碳排放估算及其空间分布[J].环境污染与防治,2020,42(1):113-119.
Liu Chang, Su Yun, Li Lingling. The estimation and spatial distribution of the carbon emissions of county units in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(1):113-119.

[25] 陈海红,李鹏程,王中航.GB/T 2589—2020《综合能耗计算通则》国家标准解读[J].标准科学,2021(12): 107-111.
Chen Haihong, Li Pengcheng, Wang Zhonghang. Interpretation of National Standard GB/T 2589—2020, General rules for calculation of the comprehensive energy consumption [J]. Standard Science, 2021 (12): 107-111.

[26] 蔡博峰,朱松丽,于胜民,等.《IPCC2006年国家温室气体清单指南(2019修订版)》解读[J].环境工程,2019,

37(8):1-11.
Cai Bofeng, Zhu Songli, Yu Shengmin, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [J]. Environmental Engineering, 2019,37(8):1-11.
[27] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2): 189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa , et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):189-196.
[28] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.
[29] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.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[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8):1243-1254.
[30] 李缘缘,魏伟,周俊菊,等.中国土地利用碳排放变化及协调分区[J].环境科学,2023,44(3):1267-1276.
Li Yuanyuan, Wei Wei, Zhou Junju, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China [J]. Environmental Science, 2023,44(3):1267-1276.

(上接第 285 页)

[28] 汪梦甜.低分子量有机酸及腐殖酸对煤矸石理化性质的影响[D].安徽 芜湖:安徽师范大学,2018.
Wang Mengtian. The effect of low molecular weight organic acid and humic acid on the physical and chemical properties of coal gangue [D]. Wuhu, Anhui: Anhui Normal University, 2018.
[29] 张乃于,闫双堆,李娟,等.低分子量有机酸对土壤磷组分影响的Meta分析[J].植物营养与肥料学报,2019,25(12):2076-2083.
Zhang Naiyu, Yan Shuangdui, Li Juan, et al. Meta-analysis on the effects of low molecular weight organic acids on increasing availability of soil phosphorus [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(12): 2076-2083.
[30] 赵轻舟,王艳芬,崔骁勇,等.草地土壤微生物多样性影响因素研究进展[J].生态科学,2018,37(3):204-212.
Zhao Qingzhou, Wang Yanfen, Cui Xiaoyong, et al. Research progress of the influence factors of soil microbial diversity in grassland [J]. Ecological Science, 2018,37(3):204-212.

(上接第 296 页)

[27] 谭炯锐,查同刚,张志强,等.土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响[J].生态环境学报,2009,18(6):2308-2315.
Tan Jiongrui, Zha Tonggang, Zhang Zhiqiang, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in a poplar plantation in Daxing District, Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6):2308-2315.
[28] 唐夫凯,崔明,卢琦,等.喀斯特峡谷不同植被类型土壤的呼吸及其温度敏感性[J].水土保持通报,2016,36(1):61-68.
Tang Fukai, Cui Ming, Lu Qi, et al. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different vegetation types in typical Karst gorge area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(1):61-68.
[29] 郭明,康蒙,仲强,等.浙江天童森林退化和受损对土壤呼吸的影响[J].华东师范大学学报(自然科学版),2011(4):53-60.
Guo Ming, Kang Meng, Zhong Qiang, et al. Impacts of forest degradation and damage on soil respiration in the Tiantong region, Zhejiang Province [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011(4):53-60.
[30] 赵慧丽,栗忠飞,张曦,等.纳帕海流域不同植被类型土壤呼吸动态及其影响因子分析[J].生态环境学报,2016,25(2):217-222.
Zhao Huili, Li Zhongfei, Zhang Xi, et al. Soil respiration and impact factor of the different vegetation types on Napa Lake basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016,25(2):217-222.