



近30年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究

董悦, 付梅臣, 陈乃鸽, 刘金兰

引用本文:

董悦,付梅臣,陈乃鸽,刘金兰. 近30年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1196–1207.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0617>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

京津冀潮白河区域土地利用变化对生态系统服务的影响

耿冰瑾, 曹银贵, 苏锐清, 刘施含, 冯喆

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 583–593 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0595>

西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应——以乌鲁木齐市为例

阿依吐尔逊·沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅·买买提, 陈前利, 冯彤

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 149–159 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0113>

低山丘陵区县域生态用地演变及生态服务价值响应

邢晓露, 郭岚, 杨梅焕, 张全文, 王益展

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 900–908 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0575>

滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展

栾兆擎, 闫丹丹, 薛媛媛, 史丹, 徐丹丹, 刘彬, 王立波, 安玉亭

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 469–476 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0124>

基于分层多元复合模型的广东省农田土壤有机碳高精度制图

任向宁, 王璐, 林赋英, 陈淑莹, 胡月明

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 967–979 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0504>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

董悦, 付梅臣, 陈乃鸽, 等. 近30年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1196–1207.

DONG Y, FU M C, CHEN N G, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values in Tangshan City over the past 30 years using geographic detection[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1196–1207.



开放科学 OSID

近30年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究

董悦¹, 付梅臣^{1*}, 陈乃鸽^{2,3}, 刘金兰⁴

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083)

摘要:为定量研究生态系统服务价值(ESV)空间分异演变及驱动因子耦合性作用。以沿海资源城市——唐山市为研究区域, 基于1990—2015年土地覆被变化数据, 在网格尺度下运用当量因子法、空间相关性分析和地理探测器探讨ESV空间演变特征。结果表明:从时间尺度看, 唐山市ESV呈先下降再上升的趋势, 近30年ESV共增加8.34亿元, 城镇化是其波动的主要原因; 耕地、林地和水域是ESV的主要组成部分, 研究期间水域ESV增加23.13亿元。从空间尺度来看, 唐山市ESV呈现中部低、南北高的空间分布特征, 中部矿区生态系统功能脆弱, 南部沿海湿地生态系统功能得到提高; ESV空间分布具有明显的正向空间聚集性和相关性。地理探测器结果表明:自然环境因子对ESV空间分异影响显著, 土地利用程度解释力在30%以上, 是空间分异的主要原因; 高程和坡度解释力在20%以上, 也发挥重要作用; 交互作用类型主要为双因子交互增强和非线性增强, 多因子交互作用相对单因子解释力明显增强。

关键词:生态系统服务价值; 空间相关性; 地理探测器; 唐山市

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)06-1196-12

doi: 10.13254/j.jare.2021.0617

Spatial differentiation of ecosystem service values in Tangshan City over the past 30 years using geographic detection

DONG Yue¹, FU Meichen^{1*}, CHEN Naige^{2,3}, LIU Jinlan⁴

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Land Reclamation and Ecological Reconstruction, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Conducting quantitative research on the spatial differentiation of ecosystem service value (ESV) and their driving factors is an effective way to achieve ecological and environmental balance. Taking the coastal resource city of Tangshan City as the study area and based on land cover change data from 1990 to 2015, the characteristics of the spatial evolution of ESV were explored at the grid scale using the equivalent factor method, spatial correlation, and geographic detector. The results showed that on a temporal scale, ESV in Tangshan City showed a decreasing and then increasing trend, with a total increase of 834 million yuan in the past 30 years; urbanization was the main reason for the fluctuation. Arable land, forest land, and watersheds were the main components of ESVs, and the value of watersheds increased by 2 313 million yuan during the study period. Spatially, ESV in Tangshan City had spatial distribution characteristics of low in the central and high in the northern and southern regions, respectively, with fragile ecosystem functions in the central mining area and improved ecosystem functions in the southern coastal wetlands. There was obvious positive aggregation and correlation in the spatial distribution of ESV. Geographic detectors showed that natural environmental factors significantly influenced the spatial differentiation of

收稿日期: 2021-09-13 录用日期: 2022-01-11

作者简介: 董悦(1997—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 从事国土空间规划研究。E-mail: dy18831567628@163.com

*通信作者: 付梅臣 E-mail: fumeichen@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971260)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41971260)

ESV, and the explanatory power of land use degree was above 30%, meaning that it was the main reason for the spatial differentiation. The explanatory powers of elevation and slope were above 20%, meaning they also played important roles. The interaction types were mainly two-factor interaction and nonlinear enhancement, and multi-factor interaction had significantly enhanced explanatory power relative to single factors.

Keywords: ecosystem service value; spatial correlation; geographic detector; Tangshan City

生态系统服务是指人类从生态系统特征、功能和过程中直接或间接获取的生态惠益,并提供了维持地球生命支持系统的资源和环境条件^[1]。从生态经济学来看,人类开发利用过程中只片面强调生态系统服务的直接使用价值,忽略了其外部衍生的生态效用^[2],使生态系统服务供给能力衰减,导致生态格局破碎、生物多样性丧失等问题突显。随着生态可持续机制的深入,生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)评估作为量化生态系统服务供给潜力和生态效用的重要手段^[3],可以为解决生态系统结构性损坏和功能性退化提供研究方法^[4]。目前生态系统服务价值评估主要集中于不同尺度(国家^[1]、省市县域^[5])、不同区域(流域^[6-8]、森林^[9]、黄土高原^[10])、不同角度(生态学^[4]、经济学^[11])和不同生态系统类型(湿地^[12]、海洋^[13]、冰川^[14])的价值评估,系统地探讨了生态系统服务功能变化、土地利用程度和景观格局变化,但相关研究大多以构建当量因子表进行静态评估^[15],对生态系统服务价值驱动机制缺少考虑。因此,结合驱动机制的生态系统服务价值评估可以更全面认识生态系统服务价值的演变特征及影响因子,为构建生态安全格局提供保障。

近年来,针对ESV影响因子的研究主要是选取评价指标建立评价体系,利用统计学及线性关系(主成分及相关性分析^[16]、回归模型^[17]、灰色关联度^[18])、分类探讨(Excel数据汇总^[12])等分析驱动因子,多数学者开展的驱动力研究并未验证变量之间相互作用强度,经过物理和数学公式获取的结果缺少因子空间关联性,忽视了内部复杂的耦合作用,无法揭示空间分异特征。地理探测器作为探索空间分异的统计学方法,揭示了自变量和因变量空间分布关系^[19],进一步解释了生态系统服务价值空间异质性、多因子交互作用机制。同理,对ESV评估进行地理探测,可通过控制影响价值变化的潜在因子,分析内部因子作用强度空间差异性。当前,地理探测器的应用研究中,其研究范围涉及空气质量驱动分析^[20]、空间分布格局研究^[21]、地质灾害研究^[22]等多方面,研究对象以省市、流域^[23]、农田等为主,而以沿海资源型城市为对象的研究较

少。万伦来等^[24]开展了资源型城市生态系统价值评估,为地区绿色矿业发展、生态屏障建设等提供了理论依据^[24]。

唐山市“十三五”规划中提出该市正处于资源型城市转型的关键阶段,生态优先、绿色发展是推动转型升级的重要抓手。同时,唐山市不断强化向海意识,以“蓝色思维”推动唐山沿海发展。在这个过程中产业转型伴随着剧烈的土地利用变化,对生态系统服务价值变化产生巨大影响,全面分析该变化有利于深入了解资源型城市转型中的生态系统服务价值空间分布格局变化。因此,本研究利用1990、2005、2010、2015年土地覆被变化数据,采用当量因子法、空间相关性系统分析了近30年唐山市生态系统服务价值的空间演变特征,并对生态系统服务价值驱动机制耦合性进行地理探测,从空间尺度和内部联动性对唐山市创建森林城市、矿区覆绿的生态建设提供有效建议。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

唐山市地处河北省东部,位于环渤海经济圈,地形由北向南呈梯形下降趋势,包括山地丘陵、沿海平原两大地貌区,总面积约为13 472 km²(图1)。山地丘陵区煤矿、铁矿蕴藏量丰富,为唐山的煤炭钢铁核心产业提供了大量原材料。沿海平原区分布着广阔的滩涂、潮沟、湿地和自然海岛,是多种海洋动物生存、活动及鸟类迁徙、栖息的重要场所。同时,海岸临港产业聚集,兴建了京唐港区、曹妃甸港区和丰南港区三大港口,吞吐量大,是唐山市产业转型的关键区域。

1.2 数据来源

本研究使用的唐山市土地覆被数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)解译的1990、2005、2010、2015年土地利用数据(图2)。其中1990、2005、2010年遥感解译主要使用了Landsat-TM/ETM遥感影像数据,2015年主要使用Landsat 8遥感影像数据,均按照中国土地利用/土地覆盖数据

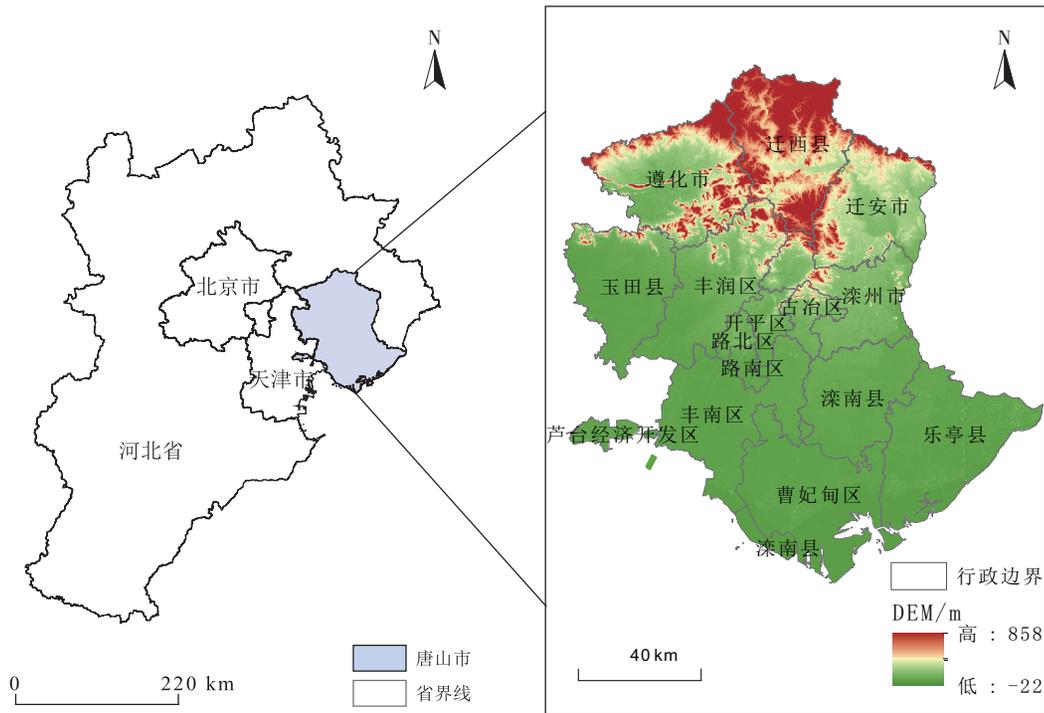


图1 唐山市范围及地理位置

Figure 1 Tangshan City scope and geographical location

分类系统进行一级分类,得到耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地和未利用地7种土地利用类型。粮食产量、播种面积和粮食价格数据来自1990、2005、2010、2015年的《唐山统计年鉴》和《中国农产品价格调查年鉴》。其余高程、降雨、气温、土壤侵蚀强度、归一化植被指数(NDVI)等数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心,采用自然间断点法对数据进行离散化处理,最终形成土地类型数据。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值

谢高地等^[25-26]提出1个当量因子为单位面积的农田生态系统每年每公顷主要粮食作物经济价值的1/7,以此为基础量化不同类型生态系统服务价值量,同时,根据谢高地等^[27]提出的区域农田生态系统生物量因子(河北省为1.02)修正生态系统服务经济价值,定量分析不同生态系统类型对生态系统服务的贡献程度。

根据唐山市1990、2005、2010、2015年的主要粮食作物产量、播种面积和粮食价格计算1个当量因子价值,主要粮食作物选取小麦、玉米和水稻。为减少经济发展水平对数据的影响,分别获取研究时点下小麦、玉米和水稻的单产和市场价格,进行均值计算后单产分别为5 317.56、6 069.21 kg·hm⁻²和8 800.39 kg·hm⁻²,

市场价格分别为1.89、1.74元·kg⁻¹和2.26元·kg⁻¹,计算得到一个价值当量的经济价值为1 694.84元·hm⁻²,再进行区域修正得到唐山市生态系统服务价值系数表(表1)。

根据唐山市1990、2005、2010、2015年主要粮食作物种植面积、产量、平均市场价格等数据,计算当量因子的经济价值。其计算公式为:

$$E = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^n \frac{a_j \times p_j \times q_j}{A} \quad (1)$$

$$P_i = K_i \times E \times Q \quad (2)$$

式中: E 为1 hm²农田粮食产量的经济价值,元·hm⁻²; j 为主要粮食作物种类; a_j 为第 j 种粮食作物的面积, hm²; p_j 为第 j 种粮食作物的平均市场价格,元·kg⁻¹; q_j 为第 j 种粮食作物的单产,kg·hm⁻²; A 为粮食作物种植面积, hm²; K_i 为第 i 种生态系统服务价值当量; Q 为农田生态系统生物量因子; P_i 为第 i 种生态系统服务价值系数,元·hm⁻²。

通过统计不同土地类型的总面积,结合表1可以分别获得不同生态系统服务价值量,最终得到研究区域总价值量。其计算公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^n S_i \times P_i \quad (3)$$

式中: ESV 为唐山市生态系统服务总价值,元; S_i 为第 i

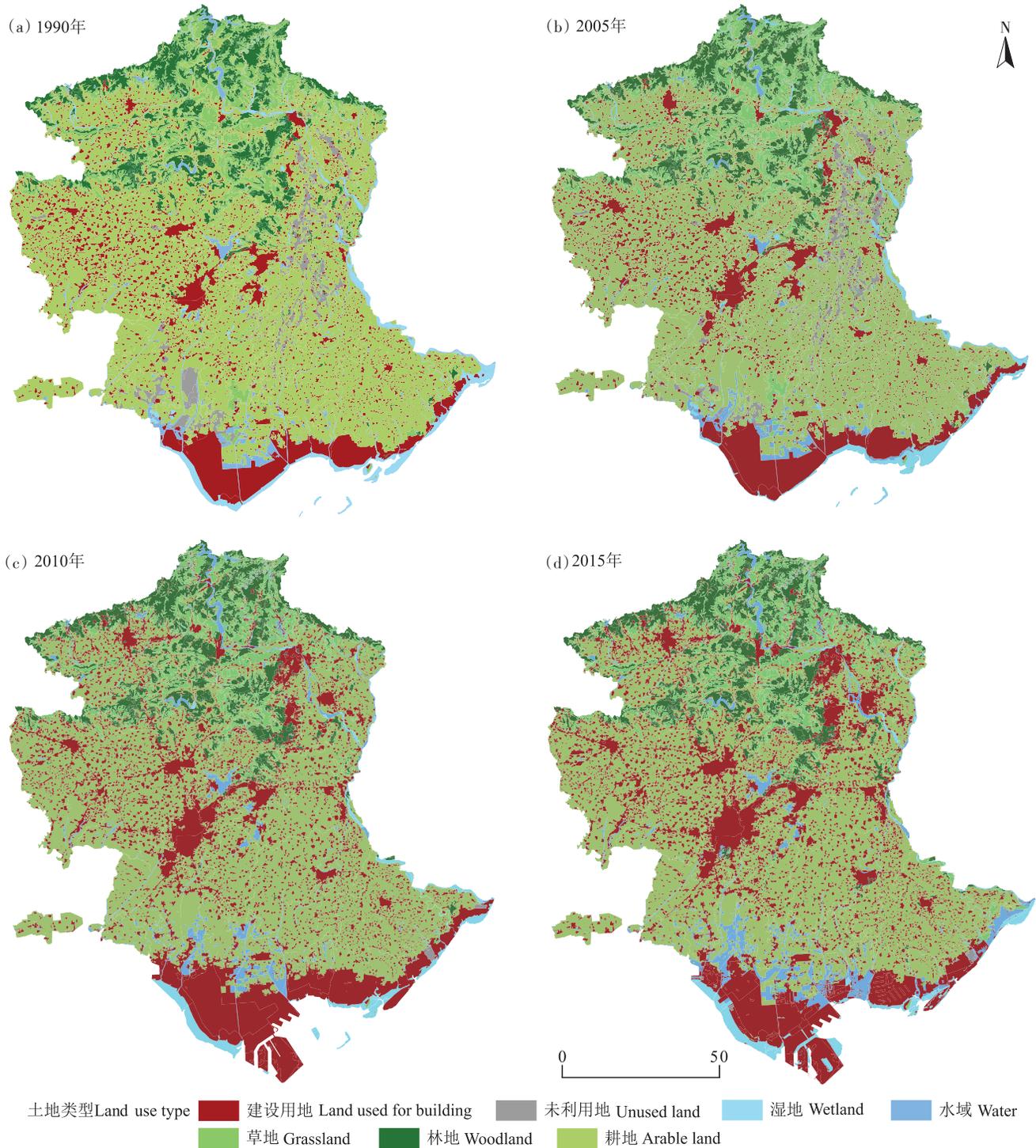


图2 唐山市土地利用现状

Figure 2 Current land use of Tangshan City

种土地利用类型面积, hm^2 。

1.3.2 网格尺度下生态系统服务价值

网格面状单元作为指标因子数据评价载体,可以进一步揭示区域空间价值变化特征。本研究在 ArcGIS 10.7 中运用 Create Fishnet 工具创建 $1.5\text{ km}\times 1.5\text{ km}$ 的网格样点,并将 ESV 赋值到网格矢量中,得到网格尺

度下 ESV 空间分布。

1.3.3 空间自相关

空间自相关是探究区域与邻域之间同一属性值的相关程度^[28],反映事物的空间集聚性。通过局部自相关 Moran's I 指数反映 ESV 空间聚集性, I 取值在 $[-1, 1]$, 指数越接近 -1 , 说明生态系统服务

表1 唐山市单位面积生态系统服务价值系数(元·hm⁻²·a⁻¹)

Table 1 Ecosystem service value coefficients per unit area in Tangshan City (yuan·hm⁻²·a⁻¹)

服务类型 Service type		林地	草地	耕地	湿地	水域	未利用地
一级类型 Type I	二级类型 Type II	Woodland	Grassland	Arable land	Wetland	Water	Unused land
供给服务	食物生产	559.30	728.78	1 694.84	610.14	898.27	33.90
	原材料	5 050.62	610.14	660.99	406.76	593.19	67.79
调节服务	气体调节	7 321.71	2 542.26	1 220.28	4 084.56	864.37	101.69
	气候调节	6 898.00	2 643.95	1 643.99	22 965.08	3 491.37	220.33
	水文调节	6 931.90	2 576.16	1 305.03	22 778.65	31 812.15	118.64
	废物处理	2 915.12	2 237.19	2 355.83	24 405.70	25 168.37	440.66
支持服务	保持土壤	6 813.26	3 796.44	2 491.41	3 372.73	694.88	288.12
	维持生物多样性	7 643.73	3 169.35	1 728.74	6 253.96	5 813.30	677.94
文化服务	提供美学景观	3 525.27	1 474.51	288.12	7 948.80	7 525.09	406.76
合计		47 658.91	19 778.78	13 389.23	92 826.38	76 860.99	2 355.83

价值分布越零散,分异性越大;指数接近0时,说明研究区域不存在空间相关性,分布随机;指数越接近1,说明空间正相关性越强,空间分布聚集。其计算公式为:

Moran's I=

$$n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \times (x_i - \bar{x}) \times (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

式中: x_i 、 x_j 分别为评价单元*i*、*j*的ESV,元; \bar{x} 为研究区ESV均值,元; w_{ij} 为空间权重; n 为评价单元数量。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[19]提出的探测驱动因子空间分异特性的统计学方法,揭示因子对某现象空间分布的影响^[29]。该方法通过*q*值来反映自变量对因变量空间分异的解释程度,*q*的值为[0,1]。*q*为0,表示自变量对因变量的空间分布无关系;*q*为1,表示自变量完全控制因变量的空间分布。该方法既可以探测单因子空间分异性,还可以判断多因子交互作用的强弱,公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N \times \sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \times \sigma_h^2 \quad (5)$$

式中:*q*为某一因子对唐山市ESV空间分布的解释程度; $h=1,2,\dots,L$,为次一级样本数; N_h 和*N*分别为层*h*和研究区的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为次一级和唐山市ESV的方差。

交互作用检验的是因子之间共同作用相对于单因子对ESV变化的影响^[30],交互因子关系如表2所示。

唐山市地形由北向南呈梯形下降趋势,由山地丘陵过渡到沿海平原,同时,人口聚集性高,产业布局明

显,考虑到对生态系统服务和功能变化有影响的自然环境因子和社会经济因子,结合数据的可获取性和易操作性,选取的影响因子包括:①自然环境因子:高程、坡度、降雨、气温、土壤侵蚀强度、NDVI、土地利用程度;②社会经济因子:地均GDP、人口密度、渔业产值。其中,自然环境因子可以直接影响ESV空间分布,本研究选取的地形、坡度是ESV空间格局形成的决定性因子;气温、降雨、NDVI等表征自然本底和植物群落生长情况;土壤侵蚀强度探测低山丘陵、采煤塌陷区生态脆弱性对ESV分布的影响;土地利用程度反映城镇化趋势,表征人为活动对ESV的干扰。社会经济因子通过内部发展生产力影响ESV空间分布,其中地均GDP、人口密度、渔业产值从区域发展和地区特色渔业反映社会经济活动。

2 结果与分析

2.1 唐山市生态系统服务价值

2.1.1 唐山市生态系统服务价值变化趋势

结合表1和公式(1)、(2)、(3)求得唐山市生态系

表2 地理探测器交互探测因子关系

Table 2 Tangshan City interaction detection factor relationship

因子关系 Factor relationship	交互类型 Interaction type
$q(A1 \cap A2) < \min[q(A1), q(A2)]$	非线性减弱
$\min[q(A1), q(A2)] < q(A1 \cap A2) < \max[q(A1), q(A2)]$	单因子 非线性减弱
$q(A1 \cap A2) > \max[q(A1), q(A2)]$	双因子增强
$q(A1 \cap A2) = q(A1) + q(A2)$	独立
$q(A1 \cap A2) > q(A1) + q(A2)$	非线性增强

统服务价值总量(图3),结果表明,1990—2015年唐山市ESV呈先下降再上升的变化趋势,总体增长8.34亿元,增长率为3.33%,其中,1990—2010年下降了8.96亿元,2010—2015年增加了17.30亿元。另外,不同土地类型的ESV变化差异较大。ESV的增加主要来自水域,1990—2015年水域ESV增加23.13亿元,增长率为81.60%。水域ESV的增加归因于沿海区域渔业、养殖业等特色农业的发展;同时港口码头等建设用地向旅游娱乐用地转移,其中包括唐山湾国际旅游岛项目开发。ESV的减少主要来自耕地和湿地,二者ESV分别减少7.74亿元和5.22亿元。

2.1.2 唐山市生态系统服务价值时空演变

将统计结果在自然间断点法分级的基础上进行均值化调整,按照生态系统服务价值划分为5个等级,分别为低价值区($0\sim 1.68\times 10^6$ 元)、较低价值区($1.68\times 10^6\sim 4.13\times 10^6$ 元)、中等价值区($4.13\times 10^6\sim 7.37\times 10^6$ 元)、较高价值区($7.37\times 10^6\sim 1.24\times 10^7$ 元)、高价值区($1.24\times 10^7\sim 2.09\times 10^7$ 元)(图4)。结果显示,不同年份唐山市ESV等级空间分布存在差异。1990年唐山市ESV高价值区主要分布在北部低山丘陵、东部滦河流域和南部海岸带,低值区主要分布于中部居民点和城镇区,煤矿、铁矿开采区贯穿其中;2005年,北部高价值区逐渐向四周发散,南部低值区增加,东南部高价值区增加。南部ESV下降是由于曹妃甸工业区加快建设,致使西南部的沿海区域河流和滩涂被占用,东南部ESV上升主要是由于乐亭县菩提岛和月坨岛周边滩涂增加;2010年,北部高价值区分布较为稳定,南部高价值区趋于集中,低值区持续增加,海岸带高价值区凸显。南部ESV集中是由于滦南县和丰南县发展渔业贝类

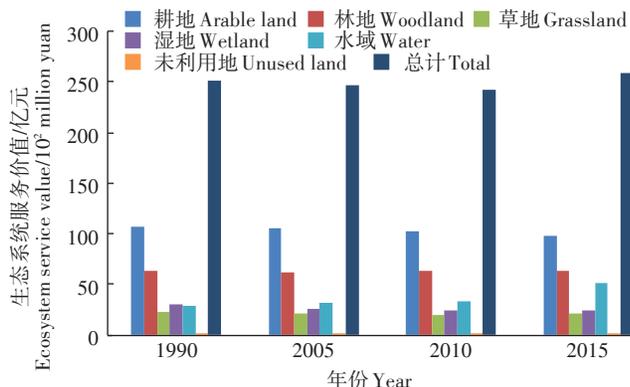


图3 1990—2015年唐山市生态系统服务价值总量变化

Figure 3 Changes in the total value of ecosystem services in Tangshan City from 1990 to 2015

等养殖业,ESV持续下降是由于临海港口运输业日趋成熟;发展到2015年,北部高值区无显著变化,南部高值区沿海岸线呈条带状,中部高值区增加。南部ESV上升是由于沿海沙滩、浴场等旅游潜力被挖掘,中部中高值区由点向外扩散,绿色矿业、地质环境治理和分区保护效果显著。

2.2 唐山市生态系统服务价值空间相关性

空间相关性测算结果显示,1990、2005、2010、2015年Moran's *I*指数分别为0.516、0.569、0.589、0.594,数值逐年增加,说明唐山市ESV具有明显的正向空间自相关性(图5)。

1990—2015年ESV聚集图(图6)显示,近30年唐山市北部高值聚集区分布稳定,中部低值聚集区趋于集中。其中高-高空间聚集类型有三处:①北部燕山地带,该区域以林地、草地为主;②中部开平区陡河水库区域附近的水域和林地;③南部带状海岸带区域,该区域以海滨旅游产业为主,同时水产养殖业和海岛建设日趋完善。低-低空间聚集类型主要集中于中部和南部盐田、港口区域,这些区域主要为建设用地。高-低、低-高空间聚集类型分布较少,高-低聚集区分散于中部,低-高聚集区零星分布于北部山脉附近。

2.3 唐山市生态系统服务价值驱动机制

2.3.1 单因子探测

从自然环境和社会经济两方面选取10个指标因子,以网格中心点提取重分类结果为地理探测器因变量,以高程(X1)、地均GDP(X2)、降雨(X3)、坡度(X4)、人口密度(X5)、土地利用程度(X6)、土壤侵蚀强度(X7)、气温(X8)、NDVI(X9)、渔业产值(X10)为自变量,通过对因子贡献率和多因子交互定量分析^[31],探索唐山市ESV空间分布的主导因子。

借助地理探测器的因子探测模块得到10个驱动因子对唐山市生态系统服务价值空间分异的贡献率,结果如表3所示。在自然环境因子和社会经济因子共同作用下各因子 q 值表现为土地利用程度(0.305 8)>高程(0.260 6)>坡度(0.204 5)>人口密度(0.186 3)>气温(0.184 7)>土壤侵蚀强度(0.147 1)>渔业产值(0.127 9)>地均GDP(0.096 6)>降雨(0.071 7)>NDVI(0.027 3)。可以看出,土地利用程度对ESV影响最强,其次是高程和坡度,地形地势对植物分布、植被覆盖度等多方面具有重要作用;人口密度数据也是影响ESV空间分布的重要因素,人口越聚集,生产生活活动越频繁,ESV受到的扰动越大;探测在10%以

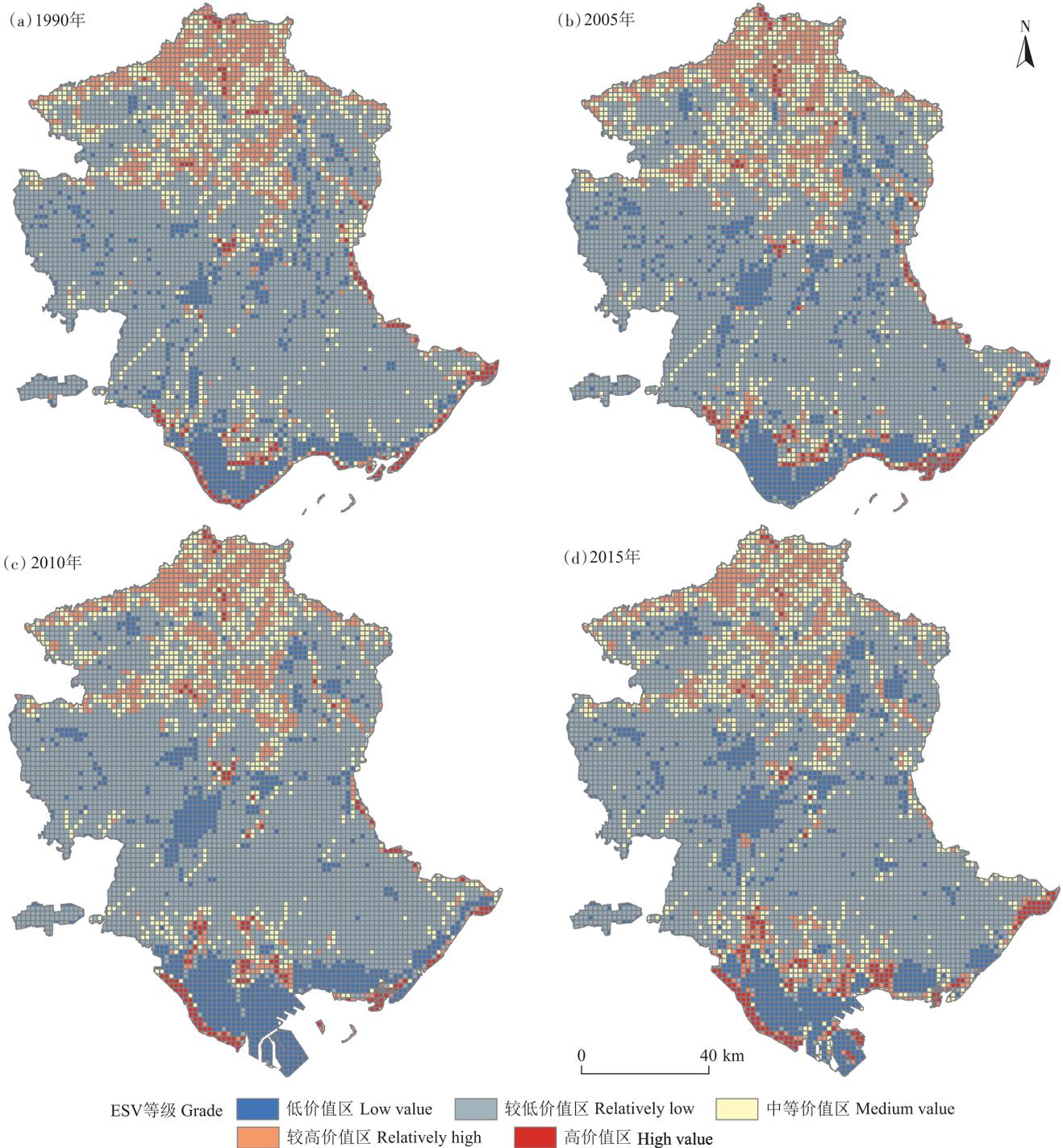


图4 1990—2015年唐山市ESV时空演变特征

Figure 4 Temporal and spatial evolution characteristics of ESV in Tangshan City from 1990 to 2015

上的因子还有气温、土壤侵蚀强度和渔业产值,唐山市北部为低山丘陵、中部多为采煤塌陷区,易发生水力侵蚀,对地表土壤、地质造成影响,渔业产值集中于乐亭县、丰南县、滦南县和曹妃甸区,对ESV也起到较为重要的影响;地均GDP、降雨和NDVI等因子的 q 值小于10%,表明其对ESV空间分异影响较小,但也起

到一定作用。

2.3.2 因子交互作用

各因子交互探测结果如表4所示,其中两两交互的类型主要为双因子交互增强和非线性增强,同时也说明多因子交互探测对生态系统服务价值空间分异的解释程度显著增加^[32]。

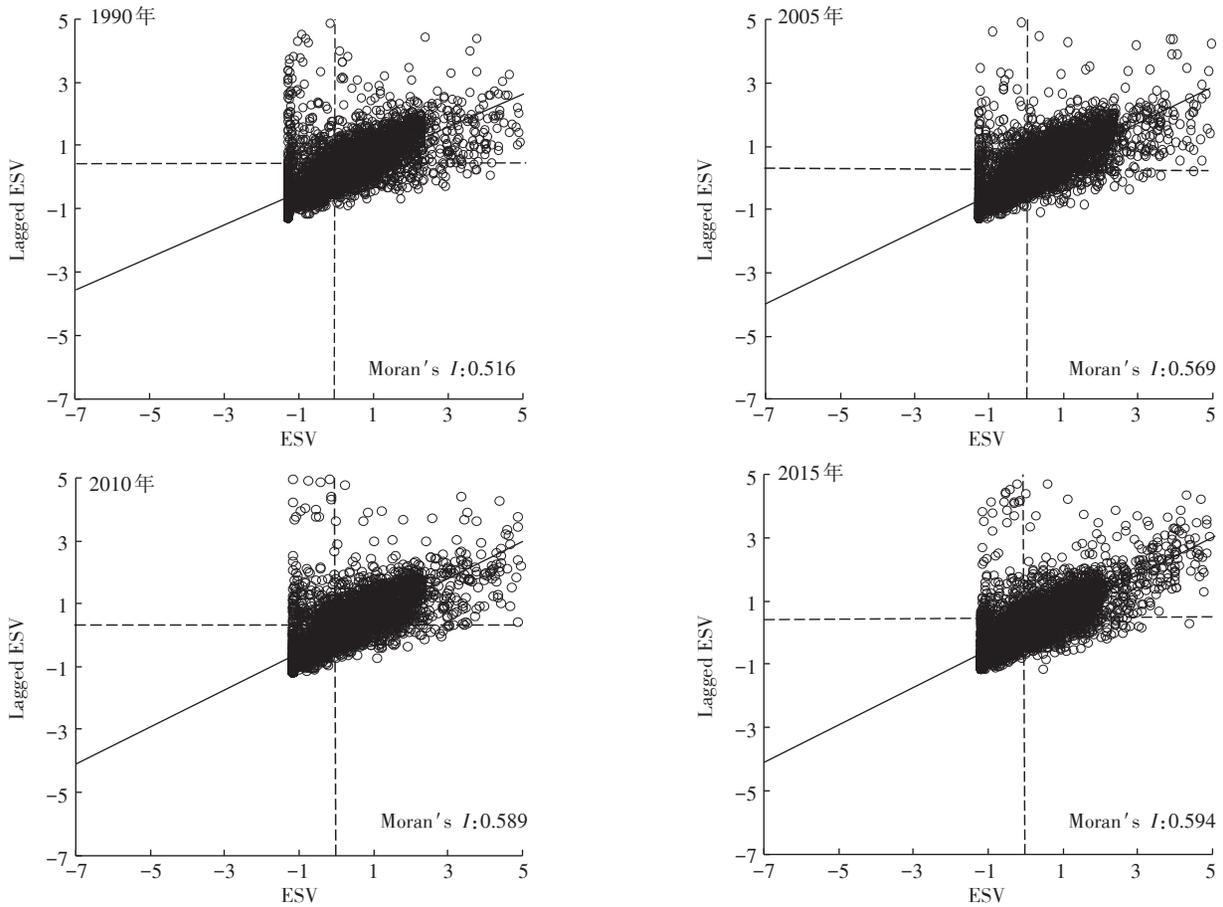


图5 唐山市生态系统服务价值 Moran's I 指数散点图

Figure 5 Scatter plot of Moran index of ecosystem service value in Tangshan City

表3 唐山市生态系统服务驱动因子分异结果

Table 3 Differentiation results of ecosystem service driving factor in Tangshan City

项目 Item	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
q 值	0.260 6	0.096 6	0.071 7	0.204 5	0.186 3	0.305 8	0.147 1	0.184 7	0.027 3	0.127 9
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表4 唐山市生态系统服务驱动因子交互探测结果

Table 4 Interactive detection results of ecosystem services driving factor in Tangshan City

驱动因子 Driving factor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
X1	0.260 6									
X2	0.312 7	0.096 6								
X3	0.289 4	0.229 5	0.071 7							
X4	0.274 5	0.271 0	0.244 6	0.204 5						
X5	0.346 3	0.216 8	0.308 5	0.324 5	0.186 3					
X6	0.446 7	0.365 5	0.360 2	0.423 1	0.447 0	0.305 8				
X7	0.271 0	0.242 6	0.187 4	0.235 7	0.300 2	0.382 7	0.147 1			
X8	0.269 1	0.263 7	0.285 4	0.249 3	0.297 1	0.407 0	0.225 5	0.184 7		
X9	0.286 0	0.151 8	0.153 4	0.243 5	0.241 7	0.440 0	0.185 1	0.220 8	0.027 3	
X10	0.290 7	0.225 6	0.167 9	0.261 7	0.274 7	0.389 5	0.220 5	0.262 7	0.205 3	0.127 9

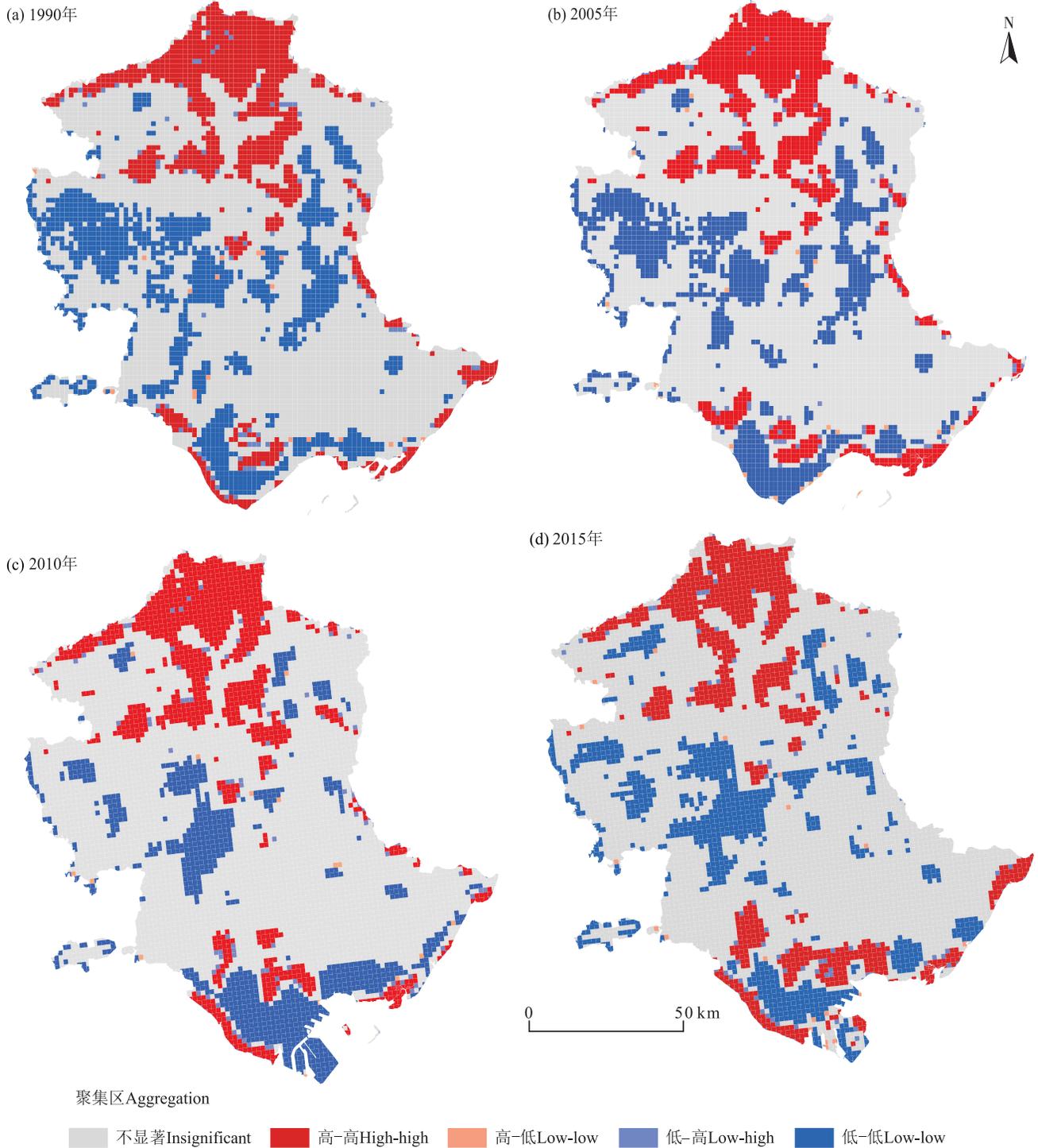


图6 唐山市生态系统服务价值聚集图

Figure 6 Aggregation map of Tangshan City ecosystem service value

其中土地利用程度 \cap 人口密度的交互作用对生态系统服务价值的影响最为显著, q 值约为 0.45; 其次, 对 ESV 变化解释程度在 40% 以上的还有土地利用程度 \cap 高程、土地利用程度 \cap 坡度、气温 \cap 土地利用程度、NDVI \cap 土地利用程度。其余因子交互程度虽然

低于 40%, 但多因子对 ESV 空间分异起到明显增强效果。考虑到不同因子之间的差异性 & 协同作用, 为规避生态风险、提高生态系统供给能力, 应发展和利用与之相平衡的多元调控手段^[33], 通过改变土地利用方式, 提高生态系统服务功能, 避免过度人为活动造成

生态系统负载。

3 讨论

本研究核算了唐山市1990—2015年生态系统服务价值。结果表明,在经济发展和生态建设要求下,唐山市生态系统服务价值波动主要受建设用地扩张、绿色矿山发展、沿海经济带建设等影响,表现出明显的空间分布差异,土地开发强度较低的北部低山丘陵、南部沿海区生态系统服务价值较高,而建设用地、矿区开采集中的中部生态系统服务价值普遍较低。这表明唐山市在注重生态、建设用地协调发展的同时,需结合矿区生态环境重建来推动绿色产业发展。

唐山市ESV具有明显的正向空间分布自相关性,聚集性强,主要是由于北部地区为低山丘陵,难以大规模开发建设,地类主要是林地和草地,同时开展生态修复和国土绿化建设成为唐山市重要的生态屏障。因此,唐山市有必要树立山青水绿、矿区植绿、湿地生态恢复、森林覆盖率提高等发展目标。

唐山市生态系统服务价值演变的影响因子中,渔业产值对唐山市生态系统服务价值变化具有重要影响,近30年渔业产值增加8.9倍,占第一产业增长贡献率的15.4%,说明沿海经济对唐山市生态文明建设起到推动作用。未来唐山市应继续以南部沿海港口建设和养殖业发展为重心,依托海洋发展建设滨海新城。

本研究以中国生态系统服务价值当量表为基础结合地区修正,在网格尺度和空间集聚性分析下,从微观和宏观相结合的角度展示研究区域ESV动态变化,细化不同生态系统之间的差异,为生态资产核算提供研究思路。此外,本研究基于地理探测器研究ESV内部复杂耦合性,揭示了不同影响因子对生态系统服务价值演变的影响程度。

谢高地^[4]对生态系统服务价值当量的核算方法得到广泛认可,引用地区修正保障了数据的合理性,但不同的修正基准和参数使得评估结果具有差异性。卢艳梅^[34]直接采用全国粮食价格评估得到唐山市1985—2008年生态系统服务价值为66.57亿~67.56亿元。而本研究采用唐山市粮食价格计算得到1990—2015年生态系统服务价值为250.56亿~258.90亿元,克服了区域经济发展造成的误差,具有更高的精确度。未来的研究应考虑用精度更高的卫星遥感数据细化分类^[35],依据生态系统动态变化、景观格局变化和地区

自然经济选取修正因素^[36]。目前,生态系统服务价值时空分异研究多基于统计变量进行回归分析,缺乏以空间因子为支撑的定量探讨,与传统研究体系相比,地理探测器对数据精度要求更高,具有明显的地域性特征。今后关于地理探测器的相关研究应着重选取具有地区特点和影响程度高的相关因子,统一数据离散化标准,提高数据可靠性。

4 结论

本研究探讨了1990—2015年唐山市生态系统服务价值空间演变特征,并定量分析了生态系统服务价值驱动力,得出以下结论:

(1)从时间尺度看,唐山市ESV呈现先下降后上升的趋势,由1990年的250.56亿元增长到2015年的258.90亿元,共增加8.34亿元;从变化特征来看,水域ESV随时间推移呈现增加趋势,耕地、湿地ESV出现小幅下降。其中,城镇经济建设、海港产业链条化发展导致ESV下降,海滨旅游业和养殖业规模化促使ESV上升。

(2)从空间尺度看,唐山市ESV高值区主要分布于北部低山丘陵和南部海岸带,中部低值区逐渐向四周侵占,高值区逐渐弱化,向海意识增强和产业升级转型是其格局转变的主要原因。ESV局部自相关Moran's *I*均大于0.5,具有明显的正向空间聚集性和自相关性,高-高聚集区主要分布于北部,变化趋势较稳定,低-低聚集区主要分布于中部,并逐渐集中,区域属性值相关程度高。

(3)唐山市ESV变化受到自然因子和经济因子共同作用,其中土地利用程度对ESV影响显著;其次是高程、坡度和人口密度数据,人类活动对ESV产生干扰;降雨、NDVI等影响较小。这证实了ESV空间演变是多因子协同作用的结果,并且多因子交互作用强度高于单因子解释程度。

参考文献:

- [1] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576. FU B J, ZHOU G Y, BAI Y F, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576.
- [2] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613. OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologi-*

- ca Sinica*, 1999, 19(5):607-613.
- [3] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [4] 谢高地. 生态系统服务价值的实现机制[J]. 环境保护, 2012(17): 16-18. XIE G D. The realization mechanism of ecosystem service value[J]. *Environmental Protection*, 2012(17): 16-18.
- [5] 吴会慧, 赵艳玲, 李素萃. 基于GEE的淮南市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 146-152. WU H H, ZHAO Y L, LI S C. Influence of land use change on ecosystem service value based on GEE in Huainan City[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(2): 146-152.
- [6] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 277-288. ZHANG P Y, GENG W L, YANG D, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 277-288.
- [7] 毋兆鹏, 张金燕, 王娟娟, 等. 精河流域绿洲土地利用及生态系统服务价值时空变化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(9): 1168-1175. WU Z P, ZHANG J Y, WANG J J, et al. Study on the spatio-temporal changes of oasis land use and ecosystem service value in Jinghe River basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(9): 1168-1175.
- [8] 张发, 玉素甫江·如素力, 艾尔肯·图尔逊. 基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5254-5265. ZHANG F, YUSUFUJIANG R, AIERKEN T. Spatio-temporal change of ecosystem service value in Bosten Lake watershed based on land use[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5254-5265.
- [9] PRIMMER E, VARUMO L, KRAUSE T, et al. Mapping Europe's institutional landscape for forest ecosystem service provision, innovations and governance[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 47: 101225.
- [10] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960. ZHANG K, LÜ Y H, FU B J, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 949-960.
- [11] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [12] 游惠明, 韩建亮, 潘德灼, 等. 泉州湾河口湿地生态系统服务价值的动态评价及驱动力分析[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4286-4292. YOU H M, HAN J L, PAN D Z, et al. Dynamic evaluation and driving forces of ecosystem services in Quanzhou Bay estuary wetland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4286-4292.
- [13] 郝林华, 何帅, 陈尚, 等. 海洋生态系统调节服务价值评估方法及应用——以温州市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4264-4278. HAO L H, HE S, CHEN S, et al. Evaluation method and application on regulating service value in marine ecosystem: Wenzhou City's practice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4264-4278.
- [14] 孙美平, 马维谦, 姚晓军, 等. 祁连山冰川服务价值评估及其时空特征[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 178-190. SUN M P, MA W Q, YAO X J, et al. Assessment and spatiotemporal characteristics of service value of glaciers in the Qilian Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 178-190.
- [15] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 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[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920. HUANG M Y, YUE W Z, FANG B, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [16] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8411-8421. ZHAO Z G, YU D, HAN C Y, et al. Ecosystem services value prediction and driving forces in the Poyang Lake eco-economic zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [17] 罗盛锋, 闫文德. 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3248-3259. LUO S F, YAN W D. Evolution and driving force analysis of ecosystem service values in Guangxi Beibu Gulf coastal areas, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3248-3259.
- [18] 王磊, 夏敏, 赖迪辉. 基于土地利用变化的天津市生态系统服务价值响应及驱动因子分析[J]. 科技管理研究, 2014, 34(23): 110-114. WANG L, XIA M, LAI D H. Response of ecosystem service value and driving factors based on land use changes in Tianjin[J]. *Science and Technology Management Research*, 2014, 34(23): 110-114.
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [20] PIMENTEL D, WILSON C, MCCULLUM C, et al. Economic and environmental benefits of biodiversity[J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 747-757.
- [21] 张华, 李明, 宋金岳, 等. 基于地理探测器的祁连山国家公园植被NDVI变化驱动因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2530-2540. ZHANG H, LI M, SONG J Y, et al. Analysis of driving factors of vegetation NDVI change in Qilian Mountain national park based on geographic detector[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2530-2540.
- [22] 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(4): 72-80. ZHANG R J, CHEN Y H, ZHANG X X, et al. Spatial-Temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal parameters: Based geographical detector[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(4): 72-80.
- [23] 孙丽蓉, 周冬梅, 岑国璋, 等. 基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1384-1395. SUN L R, ZHOU D M, CEN G Z, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River basin based on the geographic detector model[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(5): 1384-1395.
- [24] 万伦来, 杨峻, 周紫凡, 等. 煤炭资源型城市生态系统服务功能的

- 时空变化特征分析——来自2006—2015年安徽省淮南市的经验证据[J]. 环境科学学报, 2018, 38(8): 3322-3328. WAN L L, YANG J, ZHOU Z F, et al. Analysis on spatial-temporal change characteristics of ecosystem service function in coal resource-based cities: Empirical evidence from Huainan City of Anhui Province over 2006—2015[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(8): 3322-3328.
- [25] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [26] 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 G D, ZHANG C X, ZHANG L M, 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.
- [27] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13. XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10-13.
- [28] 夏铤, 王腾飞, 张京生, 等. 城市景观格局动态及空间自相关研究——以郑州白沙组团为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(9): 131-141. XIA H, WANG T F, ZHANG J S, et al. Study on the dynamic characteristics and spatial autocorrelation of land scape pattern of Baisha District in Zhengzhou[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(9): 131-141.
- [29] 王波, 杨太保. 1980—2018年银川市生态系统服务价值评价及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 552-564. WANG B, YANG T B. Value evaluation and driving force analysis of ecosystem services in Yinchuan City from 1980 to 2018[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 552-564.
- [30] 李理, 赵芳, 朱连奇, 等. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7568-7578. LI L, ZHAO F, ZHU L Q, et al. Geographical detection of ecosystem services trade-offs and their spatial variation mechanism in Qihe River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7568-7578.
- [31] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 等. 近20 a来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2790-2803. HUANG M Y, FANG B, YUE W Z, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values and its geographical detection in Chaohu basin during 1995—2017[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(11): 2790-2803.
- [32] 张泽, 丘海红, 胡宝清. 基于地理探测器的人口空间格局与自然因子关系研究——以桂西南喀斯特-北部湾海岸带为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(2): 39-47. ZHANG Z, QIU H H, HU B Q. Study on the relationship between spatial population pattern and natural factors based on geodetector: A case study of Karst-Beibu Gulf coastal zone in southwest Guangxi[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 44(2): 39-47.
- [33] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 等. 近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4492-4503. LÜ J X, JIANG W G, WANG W J, et al. Wetland landscape pattern change and its driving forces in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4492-4503.
- [34] 卢艳梅. 唐山市土地利用变化及其生态服务价值研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2011. LU Y M. Evaluating land use type change and ecosystem services in Tangshan City[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2011.
- [35] ZHAO B, KREUTER U, LI B, et al. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(2): 139-148.
- [36] SANNIGRAHI S, CHAKRABORTI S, JOSHI P K, et al. Ecosystem service value assessment of a natural reserve region for strengthening protection and conservation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244: 208-227.