

DOI: 10.5846/stxb201910172180

秦晓川,付碧宏.青岛都市圈生态系统服务-经济发展时空协调性分析及优化利用.生态学报,2020,40(22):8251-8264.

Qin X C, Fu B H. Spatio-temporal coordination between ecosystem services and economic development and its optimal utilization in Qingdao Metropolitan Region, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8251-8264.

青岛都市圈生态系统服务-经济发展时空协调性分析及优化利用

秦晓川^{1,2}, 付碧宏^{1,*}

1 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 城镇化进程伴随着生态用地流失与生态系统服务下降。对生态系统服务与经济发展间一致性的量化与分析,是厘清区域差异、优化空间布局、实现可持续发展的基础。基于青岛都市圈 1990—2017 年遥感数据与统计年鉴数据,使用当量因子法对生态系统服务价值(Ecosystem Service Value,简称ESV)进行货币化定量核算,进而构建生态系统服务与经济一致性指数,以探讨二者时空协调性特征,并通过驱动因子分析提出区域生态系统服务与经济平衡的优化改善建议。研究表明:受土地利用变化影响,青岛都市圈 2017 年总 ESV 较 1990 年下降 11.34 亿元。空间上,ESV 表现出北东—南西向展布的“高—低—高”分布格局。整体上,青岛都市圈生态系统服务和经济集聚表现出不协调,且不协调范围有所扩大;生态系统服务集聚高于经济集聚主要发生在青岛都市圈西北方向的城市,而经济集聚高于生态系统服务集聚的地区主要分布在东部沿海地带。驱动因子分析表明,ESV 减少主要受与城市中心距离的影响。因此,经济集聚高于生态系统服务集聚的地区应管控城镇用地低效蔓延并加强集约利用,同时对具备重要生态功能的要素实施保护;生态系统服务集聚高于经济集聚的地区应积极探索新形势下生态产品转化路径,以实现区域之间的生态与经济协同发展。

关键词: 生态系统服务价值; 经济发展; 土地利用类型; 优化利用; 青岛都市圈

Spatio-temporal coordination between ecosystem services and economic development and its optimal utilization in Qingdao Metropolitan Region, China

QIN Xiaochuan^{1,2}, FU Bihong^{1,*}

1 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Urbanization is accompanied by the loss of ecological land and the deterioration of ecosystem services. The quantification and analysis of the consistency between ecosystem services and economic development will provide information to clarify the regional differences, to optimize spatial layout and to achieve sustainable development. Based on the analyses of remote sensing images and statistical yearbook data in Qingdao Metropolitan Region (QDMR) from 1990 to 2017, the Ecosystem Service Value (ESV) was calculated through monetary quantitative accounting using the revised equivalent factor method. The consistent index of ecosystem services and economy was developed to explore their spatio-temporal coordination characteristics. Furthermore, we proposed how to realize a good balance between ecosystem services and economic development through analysis of various driving factors. Our results showed that the total ESV of QDMR in 2017 reduced by 1.134 billion RMB comparing with that in 1990 due to land use changes. Spatially, the distribution of ESV exhibited a “high-low-high” pattern along the northeast-southwest direction. Moreover, the concentration of ecosystem services and

基金项目: 中国科学院西部之光青年学者计划项目(2017-XBQNXZ-A-009,41372214); 自然资源部中国地质调查局二级项目(DD20190536)

收稿日期: 2019-10-17; **修订日期:** 2020-06-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fubh@radi.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

economy in QDMR displayed an inconsistency, the area of which had also been expanded. The cities in which the concentration of ecological services was greater than that of economic activities were mainly located in the northwestern part of QDMR, while the opposite situation primarily occurred across the coastal area in the eastern part of QDMR, where the concentration of economic activities was greater than that of ecological services. As indicated by the analysis of driving factors, the decline of ESV was largely attributed to the distance from the city center. Therefore, it is necessary to utilize the built-up land in a more intensive and efficient way, where the concentration of ecological services was greater than that of economic activities. Meantime, the significant ecological elements should strengthen protection. Finally, the new pathway to conversion of ecological products should be explored more vigorously under the new circumstances for the areas where the concentration of ecological services was greater than that of economic activities in order to ensure coordination between ecological and economic development across different regions.

Key Words: ecosystem service value; economic development; land use types; optimal utilization; Qingdao Metropolitan Region

生态系统服务是生态系统直接或间接贡献于人类福祉的产品和服务^[1]。20 世纪以来,高强度的人类活动对生态系统带来了巨大的冲击和破坏^[2],全球 60% 以上的生态系统服务产生明显的退化现象^[3]。随着生态环境问题的恶化,定量评估生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)已成为生态学、环境经济学和可持续发展领域越来越受关注的主题^[4]。生态系统服务量化的研究主要从三方面展开,分别是能值分析法、物质量评价法、价值量评价法^[5]。其中,价值量评价法基于生物量或土地利用的利益转移方法完成^[6],虽然在一定程度上缺乏对生态系统过程的关注^[7],但由于简化计算而被广泛使用。Costanza 等^[1]率先利用基本价值转移法对全球 ESV 进行了估算,为区域尺度 ESV 评估提供了参考方法^[8]。由于生态系统的复杂性与差异性^[9],价值当量在不同研究地区存在着差异性^[2]。谢高地等^[10-12]结合中国实际情况修订建立了当量因子表及动态评估方案,为国内 ESV 核算与演化研究提供了重要依据^[13],目前该评估方案仍在不断修订与完善中^[12]。近年来,随着遥感与 GIS 等空间信息技术的快速发展,国内外学者围绕全球^[14-15]、国家^[16-17]、区域^[18-19]等不同尺度,针对流域^[20-21]、绿地^[22-23]、城市群^[24-25]等不同研究对象,探究土地利用变化^[26-27]、经济发展^[28-29]、景观格局演变^[30-32]等对 ESV 的影响,并展开了广泛而深入的研究。

价值量评价法的优势除了计算直观易用,还在于其结果能引起人们对区域生态系统服务的重视,因为人们对货币值的感知更为明显^[5]。ESV 是区域生态系统服务的综合化与定量化^[33],将其表征于货币经济的核算方式,有助于比较生态系统保护与经济社会发展之间的关系。吴建寨等^[33]使用 ESV 与 GDP 数据构建了生态经济协调度指数,据此对区域生态经济发展的协调水平进行评价;王建华等^[34]在此基础上建立了 ICEE 指数,使其可以比较任意给定时间间隔的生态经济协调水平;谢高地等^[35]比较了 2010 年中国各地区 ESV 与 GDP 及人均 ESV、人均 GDP 的数值大小,研究发现中国在经济人口密集区域的 ESV 相对经济社会价值具有高度稀缺性;Li 等^[4]通过变异系数、泰尔指数描述了 ESV 和 GDP 的整体集中程度。前人的研究工作估算了区域生态与经济趋势差异,但仍难以阐明两者空间分布上是否协调一致。为度量城市生态系统保护与经济增长之间的平衡关系,有必要刻画、阐明区域生态系统服务与经济空间分布的差异特征。

作为中国海洋产业创新基地以及山东省高质量发展的核心引擎之一,青岛都市圈出现城镇建设用地快速增长、年降水量趋于减少、滨海岸线生态退化^[36]等现象,生态环境压力日趋严峻,成为观测与协同考量生态系统服务价值与社会经济发展变化的独特窗口。近年来,已有学者对山东省^[37-41]、山东半岛^[42-43]及青岛市^[44-47]、潍坊市^[48-49]的生态系统服务时空演变展开研究,但对 ESV 单位面积价值当量时空差异的考虑较为有限,且均未对生态系统服务与经济发展之间关系开展深入分析和研究。

因此,本文以青岛都市圈为研究区,基于 1990 年、2004 年、2017 年三期 Landsat 卫星遥感数据及经济统计数据,使用当量因子法对 ESV 进行核算,进而构建生态系统服务与经济一致性指数,以探讨其时空差异特征,并通过驱动因子分析,提出区域生态系统服务与经济平衡发展的优化建议,以期政策制定者提供参考依据。

1 研究区域与研究数据

1.1 研究区概况

青岛都市圈(118°10′—121°28′E, 35°35′—37°19′N) 位于中国沿海, 地处山东半岛南部, 东、南濒临黄海, 地势西南、东北两侧隆起。如图 1 所示, 青岛都市圈辖青岛、潍坊两个地级市以及烟台的莱阳和海阳两个县级市, 陆域面积为 $3.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2017 年, 青岛都市圈占山东省面积和人口约五分之一, GDP 产出占四分之一。青岛都市圈是承担山东乃至全国海洋战略的主要空间载体。

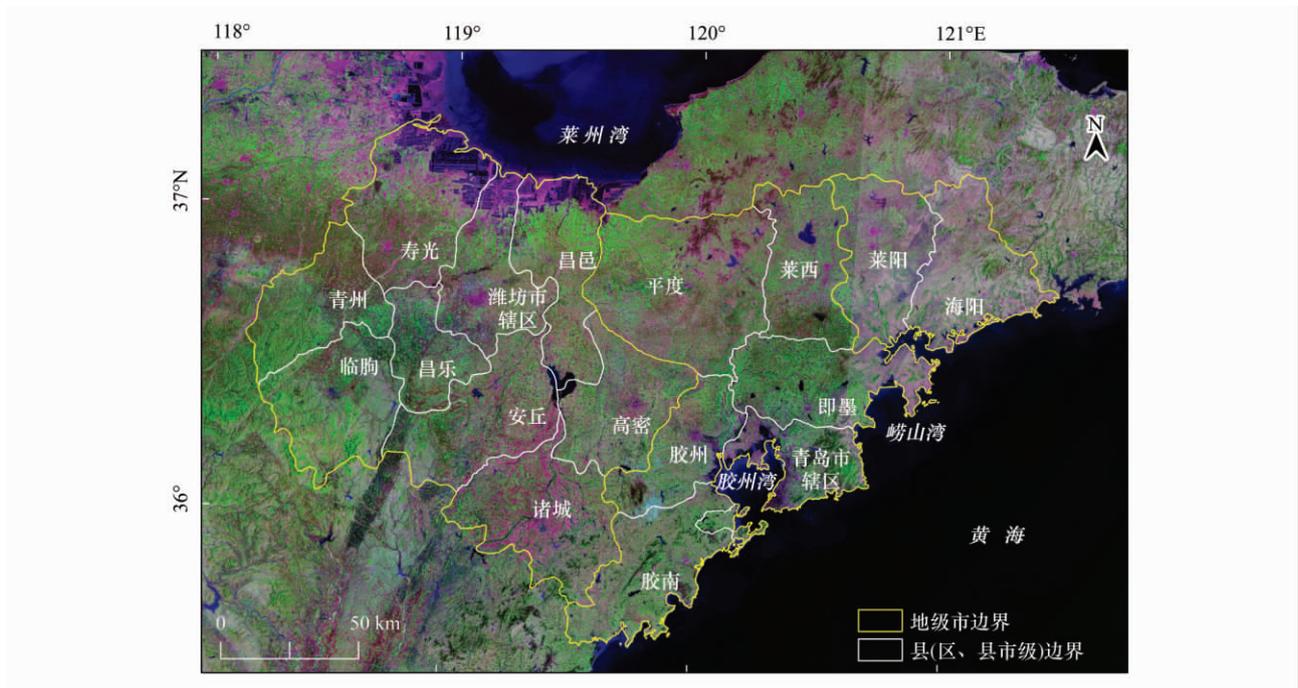


图 1 卫星遥感图像显示青岛都市圈的空间位置

Fig.1 Satellite images showing the location of the Qingdao Metropolitan Region

1.2 数据来源与预处理

本文基于青岛都市圈 1990 年、2004 年、2017 年的 Landsat TM/OLI 遥感影像数据(下载自 <https://glovis.usgs.gov>)。在 ArcGIS 10.2 与 ENVI 平台支持下, 对 3 期遥感影像数据进行定标、大气校正、拼接、裁剪等预处理。根据《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010-2007) 和青岛都市圈土地利用的结构特点, 使用随机森林算法对其进行分类, 将土地利用类型分为 6 种: 农田、林地、草地、水域、建设用地、未利用地, 结合 Google Earth 及野外实地调查验证, 其总体精度分别为 92.46%、94.20%、94.18%, Kappa 值分别为 0.89、0.92、0.92。研究区高程数据获取自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 交通路网数据获取自 OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>), 年均温、年降水量数据获取自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>); 经济社会统计数据来自相关年份的《山东省统计年鉴》、《青岛市统计年鉴》、《潍坊市统计年鉴》、《烟台市统计年鉴》、《中国农产品价格调查年鉴》等。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值系数修正

2.1.1 生态系统服务价值当量因子价值量修正

针对本文研究区, 结合播种面积、研究区主要作物产量和主要农作物相应的国家平均价格, 采用公式(1) 计算单位面积粮食生产服务的经济价值。

<http://www.ecologica.cn>

$$E_a = 1/7 \frac{\sum_k^n p_k q_k}{\sum_k^n m_k} \quad (1)$$

式中, E_a 为农田单位面积粮食生产服务价格(元/hm²), n 为作物数量, k 为作物类型, p_k 为全国平均价格(元/t), q_k 为第 k 种作物的产量(t), m_k 为第 k 种作物的播种面积(hm²)。

山东省主要农作物品种包括小麦、玉米和大豆,从山东省统计年鉴中获得其播种面积与产量,自《中国农业价格调查年鉴》获取其全国农产品集贸市场年度价格(根据价格指数,转换为2004年不变价),如表1所示。计算得到青岛都市圈的单位面积粮食生产服务经济价值,1990年为870.70元/hm²。2004年为1178.28元/hm²,2017年为1228.57元/hm²。

表1 青岛都市圈主要农作物产量、价格及播种面积

Table 1 Sowing area, grain yield and price of major crops in Qingdao metropolitan region

年份 Year	播种面积 Sowing area/(×10 ⁴ hm ²)			产量 Grain yield/(×10 ⁴ t)			价格 Price/(元/t)		
	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean
1990	414.72	240.52	44.83	1661.39	1252.08	77.18	662.08	452.97	1563.16
2004	310.57	245.50	24.12	1584.56	1499.15	71.67	1520.00	1400.00	3880.00
2017	408.39	400.01	11.95	2495.11	2662.15	32.13	1339.41	1005.88	3192.35

2.1.2 生态系统服务价值当量修正

参考《1:1 000 000 中国植被图集》,青岛都市圈植被以针叶林和灌草丛为主。据此结合谢高地等^[12]修订的中国单位面积生态服务价值当量,为青岛都市圈各土地利用类型的不同生态系统服务进行价值当量赋值(表2)。

表2 青岛都市圈单位面积生态系统服务价值当量

Table 2 Ecosystem service equivalent value per unit area of Qingdao metropolitan region

生态系统服务 Ecosystem service	土地利用类型 Land use type	土地利用类型 Land use type				
		农田 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water body	未利用地 Unused land
供给服务 Provisioning services	食物生产	0.85	0.22	0.38	0.8	0
	原料生产	0.4	0.52	0.56	0.23	0
	水资源供给	0.02	0.27	0.31	8.29	0
调节服务 Regulating services	气体调节	0.67	1.7	1.97	0.77	0.02
	气候调节	0.36	5.07	5.21	2.29	0
	净化环境	0.1	1.49	1.72	5.55	0.1
支持服务 Supporting services	水文调节	0.27	3.34	3.82	102.24	0.03
	土壤保持	1.03	2.06	2.4	0.93	0.02
	维持养分循环	0.12	0.16	0.18	0.07	0
文化服务 Cultural services	生物多样性	0.13	1.88	2.18	2.55	0.02
	美学景观	0.06	0.82	0.96	1.89	0.01

此外,针对区域生态系统服务功能及其价值量的空间异质性,考虑研究区实际情况与数据可获取程度,参考谢高地等^[12]和雷军成等^[50]、徐丽芬等^[51]引入时空调节因子对生态系统服务进行时空动态评估的方法,开展单元格尺度的修订。选取植被覆盖度指数作为生态系统食物生产、原料生产、气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观功能(水域及未利用地 NDVI 多为负值,故不参与修订)的修订指标,选取降水量作为生态系统水资源供给、水文调节服务功能的修订指标。通过公式(2)进行逐单元格修订。

$$E_{kj} = \frac{f_{kj}}{\bar{f}_j} \times F_{kj} \quad (2)$$

式中, E_{kj} 与 F_{kj} 分别为修订后、修订前第 k 单元格第 j 类生态系统服务功能的价值当量, f_{kj} 为第 k 单元格第 j 类生态系统服务功能上的修订指标值(植被覆盖度或降水量值), \bar{f}_j 为第 j 类生态系统服务修订指标的平均值。根据 NDVI 数据并借助线性像元二分模型获取植被覆盖度值^[52], 如公式(3)所示:

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{vegetable}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (3)$$

式中, f 为植被覆盖度, $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为裸土土地单元对应的 NDVI 值, $\text{NDVI}_{\text{vegetable}}$ 为全植被土地像元对应的 NDVI 值。

2.2 生态系统服务价值评估

基于前述修正后的单位面积生态系统服务价值当量, 以及 1 个标准单位生态系统服务价值当量因子的价值量, 通过公式(4) 计算研究区生态系统服务价值。

$$\text{ESV} = \sum_j \sum_k E_{kj} \times E_a \times A \quad (4)$$

式中, ESV 为研究区总生态系统服务价值(元), A 为研究区面积(hm^2)。

2.3 生态系统服务与经济发展的空间一致性

本文通过计算变异系数(Coefficient of Variation, CV) 与泰尔指数(Theil, T) 测度 ESV 与 GDP 各自的整体差异, 并通过构建生态系统服务与经济发展一致性模型以表征各个城市 ESV 与 GDP 之间的空间分布差异。

2.3.1 变异系数与泰尔指数计算

CV 是无量纲指标, 适用于具有不同单位或不同均值的数据集之间的比较, 本文使用 CV 描述青岛都市圈 ESV 和 GDP 各自的分散或集中程度, 由公式(5) 定义^[53]。

$$CV = \frac{1}{Y_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2}{n}} \quad (5)$$

式中, Y_0 为都市圈 ESV 或 GDP 的平均值, n 为城市数量, Y_i 为第 i 个城市 ESV 或 GDP 的值。CV 值越大, 代表地区生态系统服务差异或者经济发展差异越大。

泰尔指数是用于衡量经济不平等的统计量, 考虑到城市之间的差异, 本文使用面积作为加权来衡量城市之间的不平等, 由公式(6) 定义^[4]。

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{Y} \ln \frac{Y_i/Y}{S_i/S} \quad (6)$$

式中, n 为城市数量, Y_i 为第 i 个城市的 ESV 或 GDP 的值, Y 为都市圈 ESV 或 GDP 的总值, S_i 为第 i 个城市的面积, S 为都市圈的总面积。泰尔指数的值介于 0 与 1 之间, 数值越大代表研究区域生态系统服务或经济发展差异越大。

2.3.2 生态系统服务与经济发展一致性模型构建

为反映某一城市生态系统服务资源和经济发展的协调程度, 参考人口经济一致性指数^[54], 使用在整个区域内该城市的 ESV 占比与 GDP 占比的比值构建生态系统服务与经济发展一致性指数(Consistency of Ecosystem services and Economy, 简称 CEE), 来衡量生态系统服务与经济发展分布的时空差异, 由公式(7) 定义。

$$CEE_i = \frac{R_{ESV_i}}{R_{GDP_i}} = \frac{\frac{ESV_i}{\sum_{i=1}^n ESV_i}}{\frac{GDP_i}{\sum_{i=1}^n GDP_i}} \quad (7)$$

式中, CEE_i 与 R_{ESV_i} 、 R_{GDP_i} 分别是第 i 个城市的生态系统服务与经济发展一致性指数和生态系统服务集聚水平、经济集聚水平。

由于自然资源禀赋与社会经济发展要素之间的差异,生态系统服务与经济的空间分布并不是要求两者的集聚水平完全一致,但两者若存在较大的不协调,无疑代表着区域经济发展的落后情况或区域经济发展存在着潜在的生态危机。对于区域生态系统服务与经济发展而言,CEE 越偏离 1,表明该区域生态系统服务与经济分布协调性越差,反之,区域生态系统服务与经济发展协调性越好,区域生态系统服务与经济空间协调程度越高。参考人口经济一致性指数分类标准^[54-57],根据一致性指数数值大小将青岛都市圈生态系统服务与经济协调性程度分为 5 类,如表 3 所示。

表 3 生态系统服务与经济发展协调性分类

Table 3 Classification of coordination between ecosystem services and economic development

标准 Criteria	类型 Type	类别 Classification
$CEE^{(1)} \leq 0.50$	经济集聚高于生态系统服务集聚	经济集聚远高于生态系统服务集聚
$0.50 < CEE < 0.80$	经济集聚高于生态系统服务集聚	经济集聚略高于生态系统服务集聚
$0.80 \leq CEE < 1.20$	生态系统服务与经济集聚基本一致	生态系统服务与经济集聚基本一致
$1.20 \leq CEE < 2.0$	生态系统服务集聚高于经济集聚	生态系统服务集聚略高于经济集聚
$CEE \geq 2.0$	生态系统服务集聚高于经济集聚	生态系统服务集聚远高于经济集聚

(1) CEE(Consistency of Ecosystem services and Economy),指生态系统服务与经济发展一致性指数

2.4 地理探测器

地理探测器是用以探测变量空间分异性及其背后驱动力的统计学方法,通过计算 q 统计量以度量因子解释能力, q 值由表达式(8)定义。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \alpha_h^2}{N \alpha^2} \quad (8)$$

式中, h 是影响生态系统服务价值变化因素的分类, $h \in [1, L]$; N_h 和 α_h^2 分别是层 h 的单元数和方差; N 和 α^2 分别是全区的单元数和方差。 q 值域为 $[0, 1]$,表示自变量 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y ,即 q 值越大表示该因素的解释能力越强^[58]。本文利用地理探测器对 ESV 减少的原因进行驱动因素探究,从人文与自然两方面出发,人文因素包括距城市中心的距离、距乡镇中心的距离、距铁路的距离、距一级道路的距离,自然因素包括高程、坡度、年降水及年均温。通过 ArcGIS 中欧氏距离、克里金插值及自然间断法工具处理,选取研究区内 1000 个随机点,以 ESV 减少量为变量 Y ,以各个因素的类型作为变量 X ,使用地理探测器模型进行 q 值的计算。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

表 4 总结了 1990—2017 年青岛都市圈土地利用各类型占比的变化。从土地利用各类型面积及其变化情况来看,研究期间农田始终是研究区最主要的土地利用类型,其他 5 种土地利用类型共约占总面积的 20%;农田与水域先增加后减少,其中 1990—2004 年间水域面积增加 99.73%,2004—2017 年减少 28.57%;土地利用变化受到城镇化进程的影响,城镇用地面积增加,27 年间净增加 4078.89 km²;林地、草地、未利用地的用地规模均有所减少。

1990—2017年青岛都市圈各类用地类型的分布如图2所示。转换数量上,农田转出率15.96%,其中14.17%流向城镇用地。城镇用地的扩张主要通过占用其周边农田完成。转换模式上,农田流向城镇用地、林地流向农田、草地流向农田是土地利用类型转换的主要类型,分别占总面积的11.52%、4.93%、4.02%。空间分布上,西南、东北两侧山地地区集中出现林地和草地转换为农田的现象,农田转为水域主要发生在峡山湖、牟山水库、产芝水库等地;流向城镇用地的转换类型在胶州湾沿线低平地区的海积平原尤为集中,并聚集在青岛开发高新区、蓝色硅谷区、潍坊滨海新区等区域规划项目建设区。

表4 青岛都市圈土地利用各类型面积

Table 4 Area of different land use types of Qingdao metropolitan region

年份 Year	农田 Cropland		林地 Forestland		草地 Grassland	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%
1990	24496.25	81.25	2343.70	7.77	2263.68	7.51
2004	25866.00	85.80	881.45	2.92	1289.04	4.28
2017	23569.80	78.19	788.62	2.62	787.34	2.61
年份 Year	水域 Water body		城镇用地 Built-up land		未利用地 Unused land	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%
1990	369.23	1.22	317.23	1.05	360.50	1.20
2004	737.47	2.45	1178.49	3.91	195.03	0.65
2017	526.78	1.75	4396.12	14.58	76.69	0.25

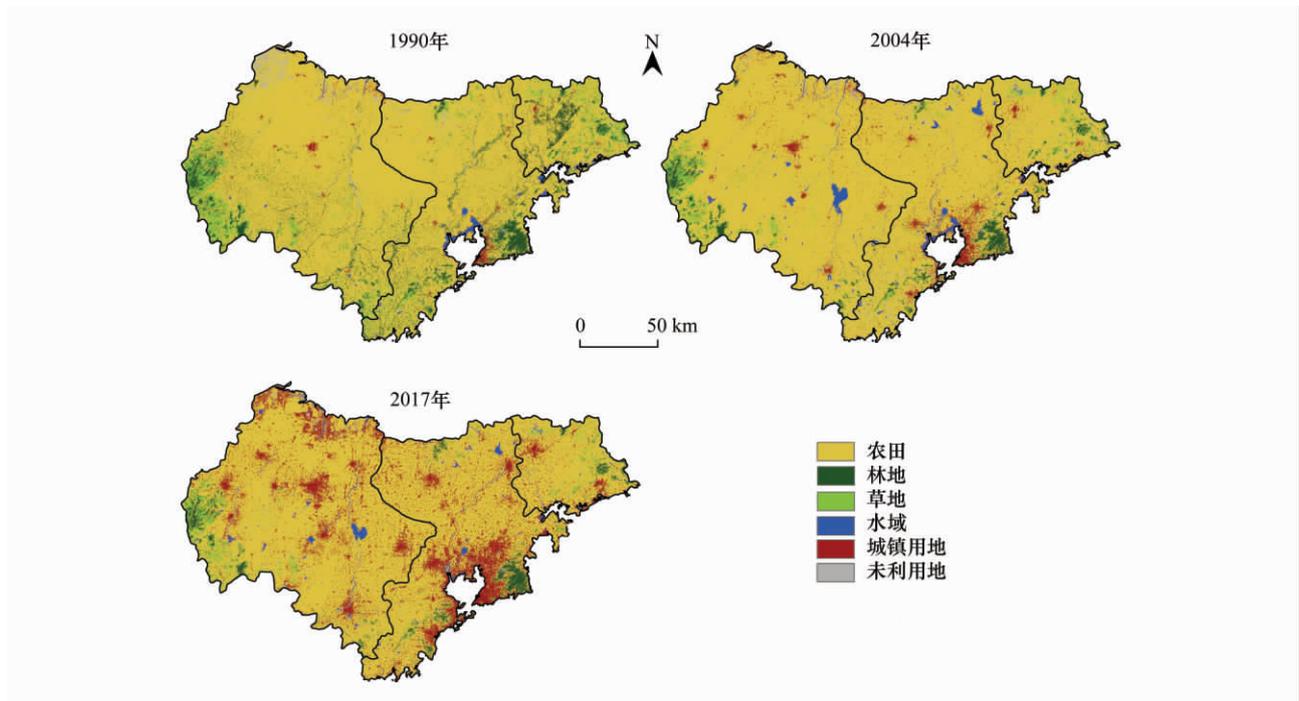


图2 青岛都市圈土地利用类型及其变化

Fig.2 Types of land use and their variations in Qingdao metropolitan region

3.2 生态系统服务价值变化

1990年,青岛都市圈的总ESV为239.31亿元,2004年为271.42亿元,2017年为227.97亿元;总体先增加后减少,1990—2004年ESV增长率为13.41%,2004—2017年下降率为16.01%。空间分布上(图3),青岛都

市圈各县域 ESV 呈现出西南和东北地区较高、中部区域较低的结构; 1990—2017 年间 ESV 减少的区域集中在研究区的西部与东部临海地区, 价值增加的区域则以河湖等水系增长区为主。

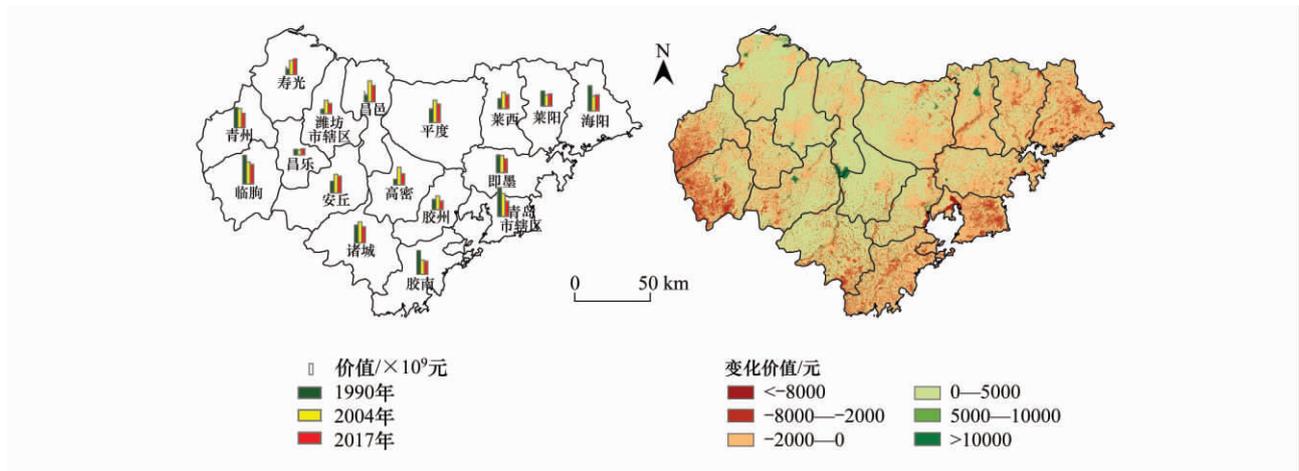


图3 生态系统服务价值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services value

由表 5 可知,在各土地利用类型中,农田 ESV 占比最大,其次是林地与水域。1990—2004 年间,得益于滩涂水域的保护和全省河道整改^[39],青岛都市圈水域面积有所增加,水域 ESV 上升幅度达 145.92%,在一定程度上弥补并减缓了其他生态用地流失的减损; 2004—2017 年间,城市建设用地扩张进程不断加快,增加了对农田的占用,且气候变化导致青岛都市圈年降水量存在减少趋势^[36],水域面积受到影响并减少 28.57%,致使总 ESV 下降。

表 5 青岛都市圈土地利用类型生态系统服务价值变化

Table 5 Ecosystem services value changes of different land use types of Qingdao metropolitan region

土地利用类型 Land use type	ESV/亿元			%			动态度 Dynamic degree/%		
	1990	2004	2017	1990	2004	2017	1990—2004	2004—2017	1990—2017
农田 Farmland	69.65	124.42	113.60	29.10	45.84	49.83	78.64	-8.70	63.11
林地 Forestland	71.33	25.02	17.52	29.81	9.22	7.69	-64.93	-29.95	-75.43
草地 Grassland	59.62	26.83	18.27	24.91	9.89	8.02	-54.99	-31.91	-69.35
水域 Water body	38.69	95.14	78.56	16.17	35.05	34.46	145.92	-17.43	103.06
未利用地 Unused land	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	-75.46	121.33	-45.68
合计 Total	239.31	271.42	227.97	100.00	100.00	100.00	13.42	-16.01	-4.74

青岛都市圈各项生态系统服务价值变化(表 6)表明,整体上,调节服务>供给服务>支持服务>文化服务。变化方面,1990—2004 年间,供给与调节服务 ESV 均上升,其原因是农田与水域的 ESV 在此期间有所上升; 2004—2017 年间,各项服务价值均有所下降。

3.3 生态系统服务与经济协调性分析

据统计,青岛都市圈 1990、2004、2017 年的 GDP 分别是 782.86、3627.50、17598.09 亿元,表明在此期间该区经济加速发展,其变化不同于 ESV 的变化。使用公式(5)(6)对以 ESV 为代表的生态系统服务差异、以 GDP 为代表的经济发展差异进行定量分析,结果如表 7 所示。

所有 GDP 的 CV 值均大于 ESV 的 CV 值,表明 GDP 的离散性大于 ESV 的离散性。ESV 与 GDP 的 CV 值随时间均有所下降,表明 ESV 和 GDP 的区域差异都在不断减小。结果显示,1990—2017 年间,青岛都市圈县域之间 GDP 差异程度大于 ESV 差异程度,且 ESV 与 GDP 各自的区域差异程度在研究期间均有所减小。

表 6 青岛都市圈生态系统各项服务价值变化

Table 6 Ecosystem services value changes of different services of Qingdao metropolitan region

生态系统服务类型 Ecosystem service type	ESV/亿元			%			动态度 Dynamic degree/%		
	1990	2004	2017	1990	2004	2017	1990—2004	2004—2017	1990—2017
供给服务 Provisioning services	60.16	79.12	70.77	25.14	29.15	31.04	31.53	-10.56	17.64
调节服务 Regulating services	110.28	128.64	102.37	46.08	47.39	44.91	16.64	-20.42	-7.17
支持服务 Supporting services	59.32	57.58	50.10	24.79	21.21	21.97	-2.94	-12.99	-15.55
合计 Total	9.55	6.08	4.73	3.99	2.24	2.08	-36.33	-22.14	-50.43

表 7 青岛都市圈生态系统服务价值与 GDP 的变异系数 CV 与 Theil 指数

Table 7 The Coefficient of Variance and Theil index of the ESV and GDP in Qingdao metropolitan region

指数 Index	1990	2004	2017	
变异系数 Coefficient of variation	ESV	0.5437	0.2721	0.2418
	GDP	1.3420	1.1150	0.8666
泰尔指数 Theil	ESV	0.1720	0.0403	0.0195
	GDP	0.6222	0.4849	0.4353

以面积比例加权的 T 值显示, GDP 的区域差异在研究期间减小, 此变化趋势与 GDP 的 CV 值结果一致。相比之下, ESV 的 Theil 指数值非常低, 表明 ESV 的区域差异较小。通过对比 GDP 与 ESV 的 Theil 指数值发现, 即使考虑到面积的影响, 青岛都市圈的经济差异仍远大于生态系统服务空间分布的差异。

计算得到的生态系统服务与经济一致性指数分布如图 4 所示。青岛都市圈生态系统服务与经济发展整体呈现出不协调, 其中, 生态系统服务集聚高于经济集聚的情况占据主导地位。空间分布上, 经济集聚高于生态系统服务集聚的地区多发生在东部沿海城市, 生态系统服务集聚高于经济集聚的情况集中于西北地区。时间序列上, 1990—2017 年间不协调范围有所扩大, 处于生态系统服务与经济发展相对协调水平的县级市数量由 5 下降为 0; 经济集聚高于生态系统服务集聚的地区由青岛市辖区与胶州展开扩张, 面积由 8.32% 上升至 25.39%; 生态系统服务集聚高于经济集聚的地区由东西两端城市逐渐向中心地区发生, 面积占比由 58.93% 上升至 74.61%。

1990 年, 青岛都市圈生态系统服务与经济发展相对协调的县级市有 5 个, 经济集聚高于生态系统服务集聚的情况发生在青岛市市辖区和胶州市; 得益于 1984 年被列为首批沿海开放城市, 青岛市集聚了山东半岛城市群的优质经济资本、人才技术优势, 实施市区东部开发战略、建立青岛保税区, 外贸经济发展迅猛; 而同期的潍坊和烟台的莱阳、海阳市由于区位优势不明显, 第三产业相对滞后, 经济发展较为落后。2004 年, 生态系统服务与经济发展相对协调的县级市数量下降到 3 个; 在此期间, 矿产经济的壮大为潍坊市吸引优化了城市发展条件, 故与 1990 年相比, 潍坊市辖区进入经济集聚高于生态系统服务集聚的类别。2017 年, 青岛都市圈没有评价类别属于生态系统服务与经济发展相对协调的县级市, 经济集聚高于生态系统服务集聚的城市面积占比上升至 25.39%, 生态系统服务集聚高于经济集聚的城市面积上升至 74.61%; 近年来青岛市实施新旧动能转换重大工程的速度不断加快, 经济保持健康发展, 由此经济集聚区集中出现在青岛市东部沿海地区; 潍坊滨海于 2010 年升级为国家级经济技术开发区, 其交通等基础配套设施不断完善, 经济得到进一步发展; 2015 年莱阳与海阳分别通过了五龙河口滨海湿地海洋特别保护区、万米沙滩国家级海洋特别保护区的规划, 推动了生物资源与生态系统保护, 故展现出生态系统服务集聚高于经济集聚的特征。

3.4 生态系统服务价值变化驱动因素探究

从土地利用的视角出发, 总 ESV 下降的主要原因是低生态价值用地对高生态价值用地的占用与取代。

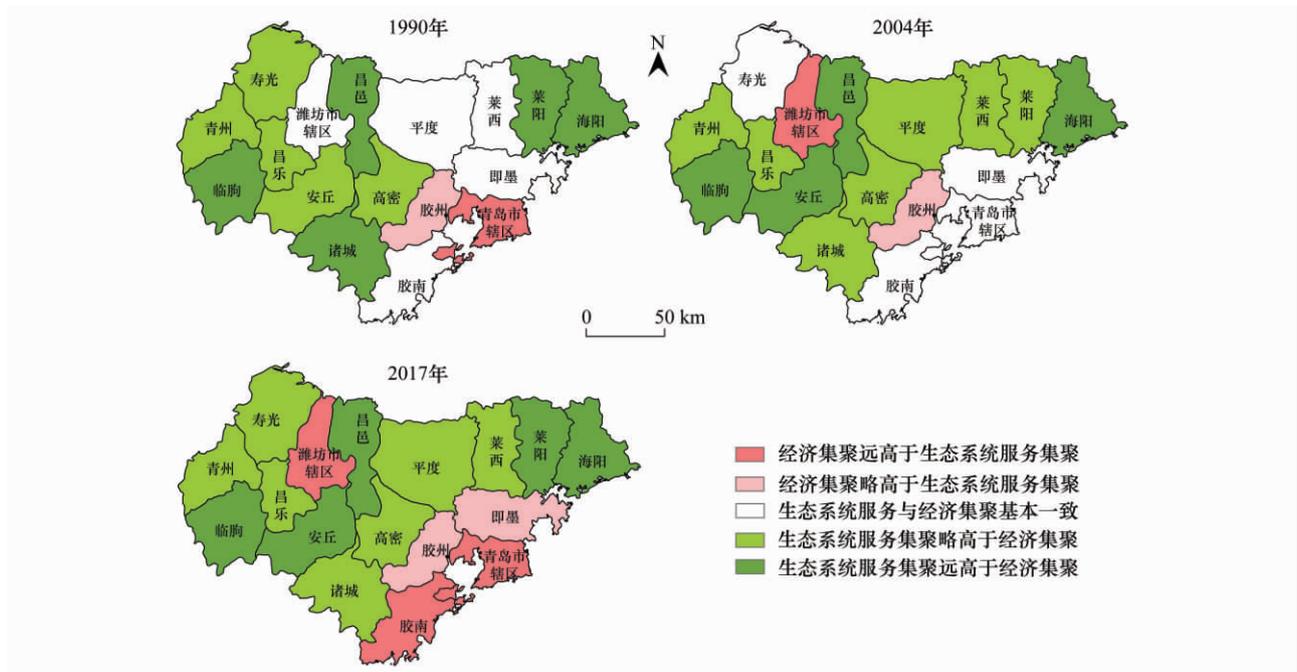


图4 青岛都市圈生态系统服务与经济协调性分布

Fig.4 Spatial distribution of coordination between ecosystem services and economic development of Qingdao metropolitan region

首先,城市扩张进程中城镇用地面积不断增长,1990—2017年期间,在青岛都市圈土地利用转换类型中占比最大的是农田流向城镇用地,占总面积的11.52%。城镇用地典型扩张区如青岛流亭国际机场周边地区(图5):1990年时流亭机场的西侧分布着养殖水面、北侧分布着农田;到2004年时流亭机场的西侧仍然还是养殖水面,但其北侧农田已经变为城镇建设用地;到了2017年时这两处区域大部分地区都成了城镇用地。其次,1990—2004年间,由于人口数量增长带来的粮食需求,以及滩涂水域保护和全省河道整改^[39],农田与水域面积出现了增加,这在一定程度上弥补了其他生态用地的流失影响。青岛都市圈2004年总ESV较1990年上升32.11亿元;而2017年较2004年而言,农田与水域面积分别减少8.87%与28.57%,致使2017年总ESV出现负增长;水域面积变化的典型区如潍坊市峡山湖(图5),遥感图像清楚地显示出峡山湖2004年较1990年水域面积出现明显增长,而2017年其面积减少势头有所遏制。

进一步利用地理探测器对ESV减少的原因进行驱动因素探究,计算结果如表8所示。可以看出,距城市中心的距离对ESV减少的解释能力最强,表明ESV减少受城市化影响较为明显。城市化进程促使城镇用地扩张占用其他用地,包括建设过程中对食物、原料、水资源、土壤等资源的消耗,以及废弃物、污染等的增加^[59],均会导致ESV的下降。

表8 青岛都市圈生态系统服务价值减少的驱动力 q 值Table 8 The value of determinant (q) about influential factors for decrease of ESV of Qingdao metropolitan region

	距城市中心的距离 Distance from city center	距乡镇中心的距离 Distance from town center	距铁路的距离 Distance from railway	距一级道路的距离 Distance from primary road
q	0.47536	0.22373	0.15079	0.10597
	高程 DEM	坡度 Slope	年降水量 Annual average precipitation	年均温 Annual average temperature
q	0.06136	0.00654	0.02566	0.02727

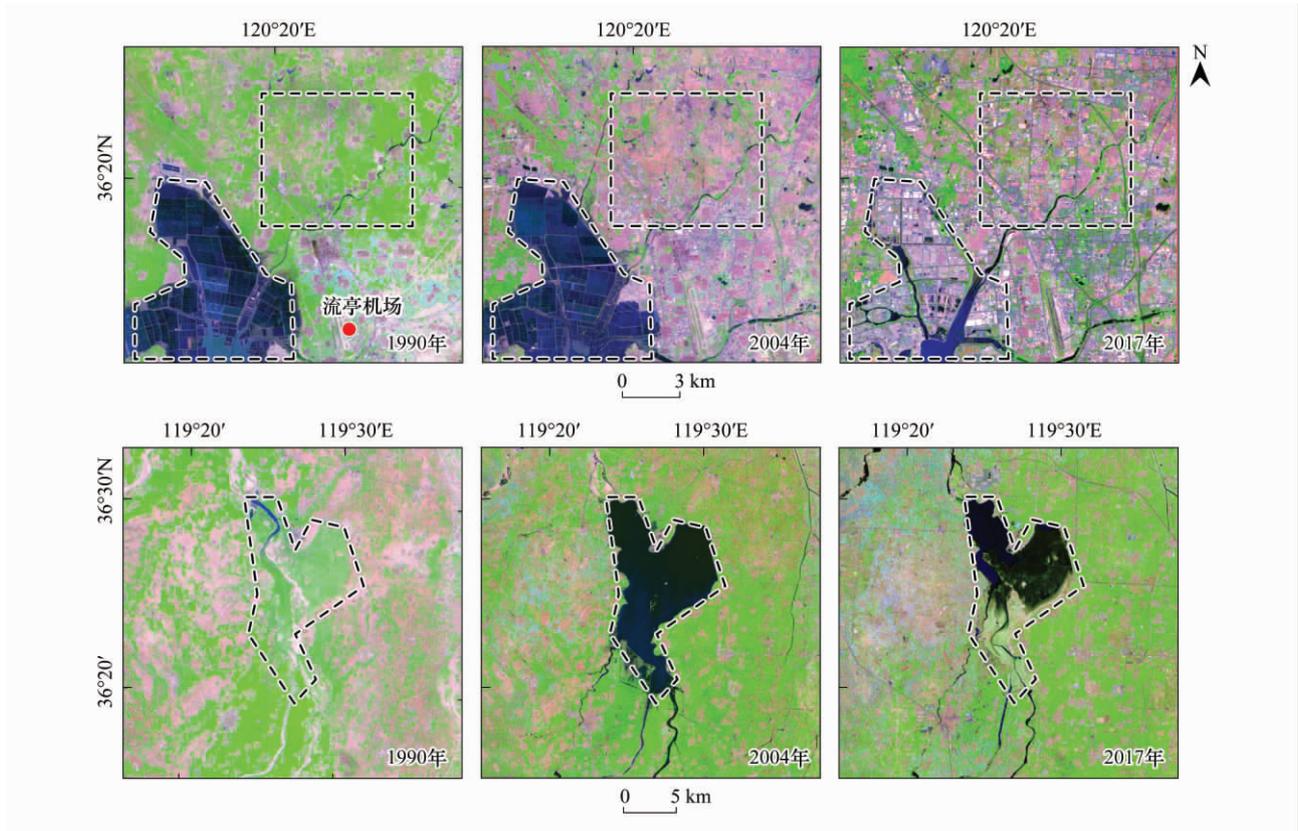


图5 遥感图像显示青岛都市圈的典型土地利用变化区

Fig.5 Remote sensing images showing the typical variations of land use of Qingdao metropolitan area

4 讨论与建议

生态系统服务价值的科学评估是生态资源合理配置和生态环境有效保护的前提^[25]。城市化快速发展伴随着生态用地流失、生态系统服务下降和环境健康风险^[60],对生态系统服务与经济发展空间协调性的分析是平衡区域差异、优化区域空间布局、实现公平发展与可持续发展的基础。本研究构建了生态系统服务与经济发展一致性指数,对青岛都市圈县级尺度各个城市的ESV与GDP空间协调性进行分析,可以为青岛都市圈的区域生态系统服务与经济发展空间布局优化方案提供重要基础数据,并为今后其他地区开展生态经济协调发展提供战略提供参考。

结果表明,生态系统服务和经济集聚整体呈现不平衡现象,其原因是青岛都市圈内部资源与要素分布不均衡,山区林地茂密处及河湖水系集中区域等生态资源丰富区具有高生态价值,但经济发展尚有进步空间;占据交通信息条件与人口资源等发展要素的发达区域,其生态价值占比又相对落后。而在青岛都市圈2017年总ESV较1990年下降11.34亿元的背景下,属于生态系统服务与经济发展不协调的类别的区域面积又进一步增加。基于以上背景,对生态系统服务与经济发展不协调区域提出优化发展建议。

分析表明,土地利用视角下,研究区ESV下降主要受到城镇化进程及高生态价值用地(如水域)流失的影响;驱动因子视角下,ESV减少受到距城市中心距离的影响最大。故对经济集聚高于生态系统服务集聚的区域做出如下优化建议:在土地资源管理过程中,应当高度重视土地利用类型转变对生态环境带来的影响,加强建设用地集约高效利用,严格管控城市的低效蔓延,减少由于城市中心辐射下建设用地占用其他用地而引起的ESV下降;建立合理的定向化生态补偿机制,为不同情况的区域做出针对性处理,完善区域生态修复治理的落实与保护。同时,按照“山水林田湖草是生命共同体”的系统理念,从“山水林田湖草”的生态全要素视角

出发,在查清山体、水域、森林、海洋和保护区等重要生态功能要素的基础上,识别并维护都市圈生态保护红线,并进行生态全要素系统治理工作,确定问题核心后“对症下药”,对具备重要生态功能的要素实施加强保护。

而生态系统服务集聚高于经济集聚的区域,应当借鉴经济发展良好区域的发展模式,坚持产业转型升级与推动高质量发展,多维度、综合全面地探究新型城市化发展道路;切实发挥生态系统服务集聚、生态质量良好的优势,积极探索具有区域特色的“绿水青山”城市化示范区,深度开拓新时代背景下绿色发展及现代化模式。另外,结果表明,青岛都市圈经济发展差异较生态系统服务差异更大,并且具有一定的城市群发展效应。对于生态系统服务集聚高于经济集聚的区域而言,其区位优势不显著,所具备的发展要素有所欠缺。因此,应当逐步实现内部核心区与副中心的职能划定与疏散,深化都市圈协同联动发展机制,全面挖掘各个区域的发展潜力,区域之间扬长补短,从而激发整个都市圈的协同高质量发展。

5 结论

本研究基于当量因子法对青岛都市圈 ESV 进行了货币化定量核算,构建了生态系统服务与经济一致性指数,探讨了生态系统服务与经济时空协调性特征及其优化利用,得出以下主要认识:

(1) 时间尺度上,青岛都市圈的总 ESV 出现先增后减,ESV 1990 年为 239.31 亿元,2004 年增加至 271.42 亿元,2017 年减至 227.97 亿元,与城镇化进程及农田与水域面积的先增后减有关;空间分布上,各县域 ESV 呈现出西南和东北侧较高、中间夹层区域较低的结构特征。

(2) 青岛都市圈生态系统服务和经济集聚表现出明显不协调性,且不协调范围在 1990—2017 年期间有所扩大。生态系统服务集聚高于经济集聚的情况主要分布于青岛都市圈西北方向的城市,而经济集聚高于生态系统服务集聚的地区主要出现在青岛都市圈东部沿海地带。

(3) 驱动因子分析表明 ESV 减少主要受到距城市中心的距离影响,建议在经济集聚高于生态系统服务集聚的地区加强城镇用地的集约化与高效利用,并从“山水林田湖草”的生态全要素视角出发,针对具备重要生态功能的要素加强保护。而对于生态系统服务集聚高于经济集聚的地区,应积极探索新时代背景下生态产品转化路径,且进一步深化联动机制,实现区域生态经济协同发展。

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. *Nature*, 1997, 387(6630): 253–260.
- [2] 赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素. *生态学报*, 2019, 39(4): 1426–1440.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005.
- [4] Li T H, Ding Y. Spatial disparity dynamics of ecosystem service values and GDP in Shaanxi Province, China in the last 30 years. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0174562.
- [5] 赵景柱, 徐亚骏, 肖寒, 赵同谦, 段光明. 基于可持续发展综合国力的生态系统服务评价研究——13 个国家生态系统服务价值的测算. *系统工程理论与实践*, 2003, 23(1): 121–127.
- [6] Richardson L, Loomis J, Kroeger T, Casey F. The role of benefit transfer in ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 2015, 115: 51–58.
- [7] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290–292.
- [8] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2005, 25(8): 2096–2102.
- [9] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. *Science of the Total Environment*, 2016, 545–546: 609–620.
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189–196.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 曾杰, 李江凤, 姚小薇. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 883–891.

- [14] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [15] Sannigrahi S, Bhatt S, Rahmat S, Paul S K, Sen S. Estimating global ecosystem service values and its response to land surface dynamics during 1995-2015. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223: 115-131.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Fan M, Chen L. Spatial characteristics of land uses and ecological compensations based on payment for ecosystem services model from 2000 to 2015 in Sichuan Province, China. *Ecological Informatics*, 2019, 50: 162-183.
- [19] Lu X, Shi Y Y, Chen C L, Yu M. Monitoring cropland transition and its impact on ecosystem services value in developed regions of China: a case study of Jiangsu Province. *Land Use Policy*, 2017, 69: 25-40.
- [20] 苏芳, 尚海洋, 张志强. 1980-2010年石羊河流域生态服务类型变化与分析. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 917-925.
- [21] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834.
- [22] Yang J, Guan Y Y, Xia J H, Jin C, Li X M. Spatiotemporal variation characteristics of green space ecosystem service value at urban fringes: A case study on Ganjingzi District in Dalian, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1453-1461.
- [23] 陈宏伟, 许晶, 刘娜, 洪娇娇, 齐淑艳, 袁昊. 沈阳市城区绿地生态系统服务价值的时空变化. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3391-3397.
- [24] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [25] 刘金雅, 汪东川, 张利辉, 汪翡翠, 胡炳旭, 陈俊合, 孙志超. 基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算. *生态学报*, 2018, 38(12): 4192-4204.
- [26] Wang Y H, Dai E F, Yin L, Ma L. Land use/land cover change and the effects on ecosystem services in the Hengduan Mountain region, China. *Ecosystem Services*, 2018, 34: 55-67.
- [27] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 王宽, 齐增湘, 李晖, 陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3787-3796.
- [28] Luo Q L, Zhang X L, Li Z G, Yang M, Lin Y H. The effects of china's ecological control line policy on ecosystem services: the case of Wuhan city. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 292-301.
- [29] Shifaw E, Sha J M, Li X M, Bao Z C, Zhou Z L. An insight into land-cover changes and their impacts on ecosystem services before and after the implementation of a comprehensive experimental zone plan in Pingtan island, China. *Land Use Policy*, 2019, 82: 631-642.
- [30] Yushanjiang A, Zhang F, Yu H Y, Kung H T. Quantifying the spatial correlations between landscape pattern and ecosystem service value: a case study in Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China. *Ecological Engineering*, 2018, 113: 94-104.
- [31] 邹月, 周忠学. 西安市景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2629-2639.
- [32] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [33] 吴建寨, 李波, 张新时. 生态系统服务价值变化在生态经济协调发展评价中的应用. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2554-2558.
- [34] 王建华, 田景汉, 李小雁, 马育军, 伊万娟. 青藏高原青海湖流域环境与经济协调性评价(英文). *地理学报*, 2011, 21(5): 949-960.
- [35] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [36] 刘效龙. 新时代诉求与问题导向下的都市圈发展战略研究——以青岛都市圈为例. *特区经济*, 2019, (2): 15-19.
- [37] 王女杰, 刘建, 吴大千, 高胜, 王仁卿. 基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例. *生态学报*, 2010, 30(23): 6646-6653.
- [38] 王敏. 山东近海生态系统服务价值评估研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [39] 邸向红, 侯西勇, 徐新良, 吴莉. 山东省生态系统服务价值时空特征研究. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(6): 116-120.
- [40] 尹登玉, 张全景, 翟腾腾. 山东省土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 134-143.
- [41] 冯媛. 基于生态系统服务价值的山东省耕地生态补偿标准量化研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
- [42] 李兆杨. 山东半岛中心城市群土地利用变化土地生态服务价值影响评价. *绿色科技*, 2016, (24): 132-136.
- [43] 刘帅帅. 山东半岛黄蓝经济区生态系统服务功能价值评估. 济南: 山东师范大学, 2018.
- [44] 刘晶. 青岛近海岛屿生态系统服务功能及其价值研究——以灵山岛为例. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [45] 张绪良, 徐宗军, 张朝晖, 谷东起, 王立华. 青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值. *生态学报*, 2011, 31(9): 2576-2584.
- [46] 杨玲, 孔范龙, 郗敏, 李悦, 王森. 基于 Meta 分析的青岛市湿地生态系统服务价值评估. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 1038-1046.

- [47] 李秋雨, 马荣贞, 闫胜文, 刘加珍. 青岛市城市生态系统服务价值评估. 安徽农学通报, 2019, 25(10): 114-117.
- [48] 肖滋民, 王立华, 郝亮, 吴丽云. 潍坊市城市绿地生态系统环境净化服务价值研究. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3929-3933.
- [49] 王辉, 许学工. 潍坊市北部咸/卤水区土地利用及其生态系统服务价值变化分析研究. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 157-163.
- [50] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2019, 39(9): 3089-3099.
- [51] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [52] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [53] Williamson J G. Regional inequality and the process of national development: a description of the patterns. *Economic Development and Cultural Change*, 1965, 13(4): 1-84.
- [54] 封志明, 刘晓娜. 中国人口分布与经济发展空间一致性研究. 人口与经济, 2013, (2): 3-11.
- [55] 关靖云, 瓦哈甫·哈力克. 新疆人口分布与经济发展不一致性时空演变分析. 地域研究与开发, 2016, 35(1): 76-81.
- [56] 郎明辰, 马胜春. 西北地区人口与经济的非一致性探析. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2019, 28(3): 76-83.
- [57] 许蔚蔚. 江苏省人口与经济空间演进及一致性研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [58] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [59] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 唐建军. 近30年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应. 生态学报, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [60] 陈利顶, 景永才, 孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4101-4108.