

DOI: 10.5846/stxb201809061899

李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Li J H, Gao M X. Spatiotemporal evolution and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性

李俊翰^{1,2,3}, 高明秀^{1,2,*}

1 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

2 土壤资源高效利用国家工程实验室, 泰安 271018

3 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081

摘要: 本文以山东省滨州市为研究对象, 利用 2000、2005、2010 年和 2015 年 4 期遥感影像数据划分土地利用类型, 基于 3 km × 3 km 评价小区格网化重采样, 核算生态系统服务价值和生态风险指数, 分析二者动态变化特征及时、空关联性。结果表明: (1) 2000—2015 年滨州市生态系统服务价值总量由 168.06 × 10⁸ 元持续增长到 205.30 × 10⁸ 元, 生态风险指数呈现缓慢降低趋势, 总体下降 5.86%, 区域生态安全问题有所改善; (2) 单位面积生态系统服务价值和生态风险指数具有较强的正向等级相关性, 并存在一定的正向空间关联性; (3) 生态系统服务价值变化相对于生态风险指数具有一定的滞后性, 高等级生态风险区域的生态系统服务价值存在极大的减小变化的可能性。研究有助于为区域生态安全格局建设和环境保护政策的制定提供参考。

关键词: 生态系统服务; 生态风险; 灰色综合关联度; 空间自相关

Spatiotemporal evolution and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou

LI Junhan^{1,2,3}, GAO Mingxiu^{1,2,*}

1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Taian 271018, China

3 College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: This study in Binzhou city of Shandong Province classified land use types by using remote sensing image data for 2000, 2005, 2010 and 2015, with a grid re-sampling size of 3 km × 3 km in the study area. The ecosystem service value and ecological risk index were calculated and evaluated, and their dynamic changes and spatiotemporal correlations were analysed. The results showed that, (1) from 2000 to 2015, the total value of ecosystem services in Binzhou City continued to increase from 168.06 × 10⁸ yuan to 205.30 × 10⁸ yuan, and the ecological risk index showed a slowly decreasing trend, with an overall decline of 5.86%. Therefore, regional ecological security had improved, (2) the ecosystem service value per unit area and the ecological risk index were strongly positively correlated although with some positive spatial correlation and (3) the change of ecosystem service value lagged behind the ecological risk index to a certain extent, and there was a strong possibility of reducing the change of ecosystem service value in high-level ecological risk areas. This study will help to provide a baseline reference for the construction of regional ecological security patterns and the formulation of environmental protection policies.

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2017CXGC0301); 山东省高校“双一流”奖补资金项目 (SYL2017XTTD02)

收稿日期: 2018-09-06; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mxgao@sdau.edu.cn

Key Words: ecosystem services; ecological risk; synthetic degree of grey incidence; spatial autocorrelation

人口扩张与经济发展促使人类对地表空间占用范围和自然资源的开采力度不断增大,人类活动迅速而剧烈地改变着原始自然环境与生态系统,不可避免地造成大气、土壤和水资源的污染和破坏,反向影响人类自身福祉^[1-3]。为了寻求高质量的生活品质和可持续的人类社会发展,人们愈发关注自身生活环境状况,人居环境、生态环境质量与安全的相关研究成为热点^[4-5]。

生态系统服务评价和生态风险评价是生态环境评价的重要类型,与生态安全评价关系十分密切^[6-7]。生态系统服务是人类从生态系统中获得的各种惠益,包括有形的物质产品供给与无形的服务提供两方面^[8-9]。生态系统服务功能是实现生态系统安全的基本保证,从正面表征生态安全状况。生态风险是生态系统及其组分对外部干扰作出退化反映的可能性,指一定区域内具有不确定性的事故或灾害对生态系统的结构和功能可能产生的不利影响^[10-11]。生态风险评价是对生态环境状况未来发展变化的预判,是风险控制的前提,从反面表征区域生态安全状况^[12]。现阶段,对于二者的评价已由相对独立逐步走向融合,特别是基于生态系统服务的生态风险评价逐渐成为新的热点和研究方向^[13-14]。曹祺文等^[15]提出了基于生态系统服务的景观生态风险评价(ESRISK)框架,阐述了实施途径与优势。Tian Dong 等^[16]也建立了类似的风险评估框架,基于甘孜地区土壤保持服务和防沙服务动态变化,评估生态风险及其变化,提高了对生态系统变化、生态系统服务和生态风险之间关系的认识。刘世梁等^[17]将生态系统服务功能的提升作为生态风险评价的重要内容,提出了基于土地整治全过程分析的生态风险识别、评价与管控思路。Jiangfu Liao 等^[18]将重要生态系统服务区作为风险受体,对厦门市城市综合生态风险进行综合评价和预测。宋科等^[19]通过将生态系统服务价值的量化与生态风险分析的数学模型相结合,建立了生态风险分析的 EVR 模型,量化研究生态系统风险,并以浙江省舟山市为例验证了这种方法的可行性。由此可见,生态系统服务和生态风险评价的融合明显地表现为将生态系统服务引入到生态风险评价中,以提高生态风险评价的全面性和时效性^[13,20]。

然而当前的研究中针对同一时期同一区域生态系统服务价值评估和生态风险评价的空间分布关系与相互作用机理研究较少。莫宏伟等^[21-22]对农牧交错区榆林市和风沙过渡区神木县,宫继萍等^[23]对黑河中游民乐县进行了土地生态系统服务价值评价和生态风险评价,但仅仅讨论了各自的空间分布和动态变化,缺乏对二者之间相互关系的深入探讨。鉴于此,该文以滨州市为研究区,核算 2000—2015 年生态系统服务价值和景观生态风险指数,从现状价值和潜在风险、正面和反面多角度描述区域生态环境现状及变化趋势,旨在基于生态系统服务价值和生态风险评价,探讨生态系统服务价值和生态风险指数在数量变化、空间分布和时序变化等方面的相互关联性,为构建区域生态安全格局,保护区域生态安全,实现可持续发展提供参考。

1 研究区概况

滨州市(36°41′—38°16′ N, 117°15′—118°37′ E)位于山东省北部,黄河三角洲腹地,地处黄河三角洲高效生态经济区、山东半岛蓝色经济区和环渤海经济圈、济南省会城市群经济圈“两区两圈”叠加地带,辖区总面积 9600 km²,是黄河三角洲区域内最大的行政区。全境地势南高北低,主要分为低山丘陵和黄河冲积平原两大地形区,自然坡降比 1/4000—1/8000。滨州市属温带大陆性季风气候,夏热多雨,冬冷且长,四季分明,多年平均降水量 575.4 mm。受历史海陆变迁和地下水位高、矿化度大等因素影响,土壤盐渍化现象严重,境内盐碱地广泛分布。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

选取 2000(ETM+)、2005(TM)、2010(TM)和 2015(OIL)年 4—6 月间的遥感影像数据(来自地理空间数据云平台 <http://www.gscloud.cn>),利用 ENVI5.2 软件采用面向对象法进行土地利用分类,并基于 2015 年影

像进行空间配准。参考全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系和土地利用现状分类标准(GB/T 21010-2007),结合滨州市的自然环境与土地利用特征,划分为耕地、林地、建设用地、水域、盐田和未利用地等6种类型。分类后参考天地图和滨州市土地利用现状图等资料进行图像分类后处理,提高分类精度。每期分类结果随机选取1000个样点与实际调查地类进行精度验证,总体精度为82.82%、85.93%、86.97%和93.79%,Kappa系数为0.76、0.80、0.82和0.91,符合研究要求。

利用ArcGIS10.2软件,采用3km×3km的单元网格对滨州市景观格局类型进行格网化重采样,最终形成1158个评价小区(图1)。基于评价小区计算生态系统服务价值和生态风险指数,并赋值于评价小区中心点,进行空间插值,分析空间格局分布特征。

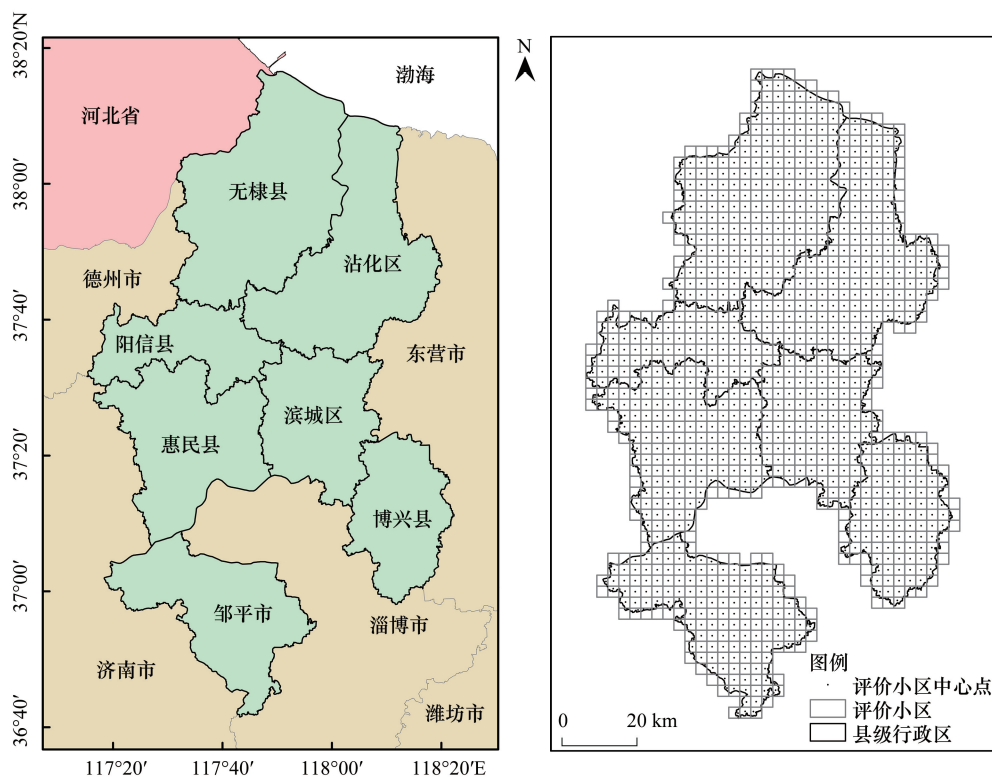


图1 滨州市行政区及评价小区划分

Fig.1 The evaluation cell on administrative area map of Binzhou city

2.2 生态系统服务价值核算

基于谢高地等^[24]提出的生态系统服务价值化方法,定义1hm²面积农田生态系统粮食生产的净利润作为1个标准当量因子的生态系统服务价值量(标准当量)。本区域内耕地为旱地,主要种植小麦和玉米;林地以枣园、桑园等果园和针阔叶混交林为主;未利用地则为盐碱地和滩涂;盐田在区域东北沿海集中分布,多进行统一的生产、利用管理。本研究尺度较小,区域自然地理特征较为统一,农业耕作和养殖方法相同,区域各生态系统内部属性近似,可以应用当量赋值的方法进行服务价值核算。参考文献^[25-26]并结合研究区实际状况进行标准当量的系数修订,修正模型如下:

$$V_i = (Sw_i \times Pw_i \times yw_i + Sc_i \times Pc_i \times yc_i + Sr_i \times Pr_i \times yr_i) \times e_i \times f_i$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

其中: V 是研究期内滨州市标准当量(元/hm²); V_i 是第*i*年的滨州市标准当量(元/hm²); n 为研究期年

份; Sw_i 、 Sc_i 和 Sr_i 分别是第 i 年滨州市小麦、玉米和稻谷的播种面积占三种作物播种总面积的百分比; Pw_i 、 Pc_i 和 Pr_i 是第 i 年三种作物的全国平均净利润; yw_i 、 yc_i 和 yr_i 是第 i 年的单产修正系数; e_i 和 f_i 是第 i 年的经济修和肥力修正系数。具体修正系数值计算公式如下:

$$yw_i = \frac{Yw_i'}{Yw_i} \quad yc_i = \frac{Yc_i'}{Yc_i} \quad yr_i = \frac{Yr_i'}{Yr_i}$$

$$e_i = \alpha e_i \times \beta e_i = \frac{GDP_i'}{GDP_i} \times \frac{\sum_{i=1}^n GDP_i'}{n GDP_i'}$$

$$f_i = \mu f_i \times \rho f_i$$

参考曾杰等^[27]的相关研究,单产修正值为滨州小麦、玉米和稻谷的平均单产值与当年全国单产值的比值。参考杨凤海等^[25]的相关研究, αe_i 是滨州人均地区生产总值与当年人均国内生产总值的比值, βe_i 是研究期内历年滨州人均地区生产总值平均值与第 i 年滨州人均地区生产总值的比值。 μf_i 是化肥修正系数,即滨州市平均单位面积农用化肥施用量(折纯量)与当年全国三种粮食作物平均施肥量(折纯量)的比值; ρf_i 是土壤生产力修正值,滨州市土壤生产力指数与全国平均土壤生产力指数的比值,参考孙振宇等^[28]的研究结论,滨州市所处北方平原区土壤生产力指数为0.198,高于全国平均水平0.175,比值为1.13。

基础数据来自历年中国统计年鉴、山东统计年鉴、滨州统计年鉴和全国农产品成本收益资料汇编,相关数据经过基础数据计算得到。最终得到2000—2015年滨州市的标准价值当量因子平均值为1853.63元/hm²,作为研究期内滨州市标准当量基准值。

依据滨州市的实际情况,参考谢高地等^[24]的研究成果,对各生态系统的服务价值系数进行修正:耕地对应旱地,林地对应阔叶林,建设用地为0,水域按水系和湿地1:1的比例计算,未利用地按裸地和草甸1:3的比例计算,盐田按建设用地、荒漠和冰川积雪3:4:3的比例计算。滨州市生态系统单位面积生态服务价值如表1所示。

表1 2000—2015年滨州市生态系统单位面积生态服务价值/(元/hm²)

Table 1 The values per unit area of ecosystem services in Binzhou city

一级类型 first category	二级类型 Secondary category	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	建设用地 Built-up land	水域 Water	未利用地 Unused land	盐田 saltern
供给服务 Provisioning services	食物生产	1575.59	537.55	0	1214.13	305.85	7.41
	原料生产	741.45	1223.40	0	676.57	458.77	22.24
	水资源供给	37.07	630.23	0	10083.75	250.24	1215.98
调节服务 Regulating services	气体调节	1241.93	4022.38	0	2474.60	1594.12	181.66
	气候调节	667.31	12048.60	0	5458.94	4198.47	374.43
	净化环境	185.36	3577.51	0	8480.36	1436.56	318.82
	水文调节	500.48	8786.21	0	117214.29	3086.29	4120.62
支持服务 Support services	土壤保持	1909.24	4912.12	0	3002.88	1941.68	96.39
	维持养分循环	222.44	370.73	0	231.70	152.92	7.41
	生物多样性	240.97	4467.25	0	9657.41	1774.85	94.54
文化服务 Cultural services	美学景观	111.22	1964.85	0	6135.52	783.16	87.12

2.3 景观生态风险指数核算

参考前人的研究成果^[29-31],基于土地利用类型面积比重构建景观生态风险指数,定量描述评价小区的生态风险大小。

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i$$

$$R_i = E_i \times F_i$$

$$E_i = aC_i + bN_i + cD_i$$

其中, ERI_k 为第 k 个样方的景观生态风险指数, A_{ki} 为样方内 i 类景观面积, A_k 为 k 样方内景观总面积, R_i 为 i 类景观损失度指数, E_i 为干扰度指数, F_i 为脆弱度指数, C_i 为破碎度指数, N_i 为分离度指数, D_i 为优势度指数。 a 、 b 、 c 为计算景观干扰度指数 E_i 的指标权重, 参考前人研究^[31-33], 分别赋值 0.5、0.3 和 0.2。景观脆弱度指景观类型抵抗外部干扰能力的大小, 依据各类型的转出动态度排序, 确定研究区景观类型的脆弱性排序, 从高到低依次为: 未利用地>林地>水域>耕地>盐田>建设用地, 进行归一化处理后得到各景观类型的脆弱度指数 F_i , 分别为 0.2857、0.2381、0.1905、0.1429、0.0952 和 0.0476。

2.4 灰色关联分析模型

灰色关联分析是依据序列曲线几何形状的相似程度来判断不同序列之间的联系是否紧密, 灰色关联度是定量化描述各因素之间发展趋势相似或相异程度, 适合动态的历程分析^[34]。设序列 X_0, X_j 长度相同, 且初始值不为 0, 则两序列的灰色综合关联度为:

$$\rho_{0i} = \theta \varepsilon_{0i} + (1 - \theta) r_{0i} \quad \theta \in [0, 1]$$

其中, ρ_{0i} 为两序列的灰色综合关联度, ε_{0i} 和 r_{0i} 为两序列的灰色绝对关联度和灰色相对关联度。一般地, 取值 $\theta=0.5$, θ 取值越大越能体现绝对量之间的关系, θ 取值越小越能体现变化速率之间的关系。相关指标应用灰色系统理论建模软件 (GSTA V7.0) 计算得到。

2.5 双变量空间自相关模型

空间自相关模型能够反映某种因素在空间位置的相关程度, 分为全局空间自相关和局部空间自相关^[35]。为了探究生态系统服务和生态风险的空间相关特征, 采用双变量空间分析模型^[36-38], 利用全局自相关系数 Moran's I 指数反映整体空间关联和差异状况, 计算公式如下:

$$I_{sr} = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \left(\frac{y_{i,s} - \bar{y}_s}{\sigma_s} \right) \left(\frac{y_{i,r} - \bar{y}_r}{\sigma_r} \right)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

式中: I_{sr} 为单位面积生态系统服务价值 s 和生态风险指数 r 的双变量全局自相关系数; $y_{i,s}$ 和 $y_{i,r}$ 为第 i 个评价小区单位面积生态系统服务价值和生态风险指数, σ_s 和 σ_r 为方差。

为了全面具体地反映研究区各部分之间的空间关联性, 采用 LISA 进行局部空间自相关分析, 以表述局部集聚和离散效应。依据空间分布关系划分为高高集聚 (H-H)、高低集聚 (H-L)、低高集聚 (L-H) 和低低集聚 (L-L) 四个集聚类型区。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值特征分析

2000—2015 年滨州市生态系统服务价值核算结果和结构变化情况见表 2。2000—2015 年滨州市生态系统服务价值总量由 168.06×10^8 元持续增长到 205.30×10^8 元, 年均增长率 1.34%; 单位面积生态系统服务价值由 18553.00 元/hm² 增长到 22663.34 元/hm²。从研究区土地利用结构来看, 各土地利用类型生态系统服务价值比例大小为水域>耕地>林地>未利用地>盐田>建设用地; 耕地和未利用地生态系统服务价值持续减少, 年均变化率分别为 -0.93% 和 -7.04%, 林地、盐田和水域生态系统服务价值持续增加, 年均变化率为 6.49%、4.81% 和 2.06%, 并且所有土地利用类型生态系统服务价值增减速率逐渐降低, 趋于平缓。从生态系统服务价值结构功能来看, 单项生态服务价值比例大小依次为调节服务>支持服务>供给服务>文化服务; 研究期间, 各单项服务价值呈现持续增加趋势, 年均变化率大小依次是调节服务 (1.69%)>文化服务 (1.61%)>支持服务 (0.57%)>供给服务 (0.38%), 但是增长速率逐渐降低。

表 2 2000—2015 年滨州市生态系统服务价值结构变化表
Table 2 The changes of ecosystem service values structure in Binzhou from 2000 to 2015

地类/类型	生态系统服务价值 10 ⁸ 元					2000—2005 年		2005—2010 年		2010—2015 年		2000—2015 年	
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	年均 占比%	变化量	年均变 化率%	变化量	年均变 化率%	变化量	年均变 化率%	变化量	年均变 化率%
耕地 Cultivated land	43.25	41.5	39.95	37.61	21.58	-1.75	-0.82	-1.55	-0.76	-2.34	-1.20	-5.64	-0.93
林地 Forestland	13.53	28.12	32.37	34.76	14.06	14.59	15.76	4.25	2.86	2.39	1.43	21.23	6.49
水域 Water	90.04	102.69	120.77	122.23	57.11	12.65	2.66	18.08	3.30	1.46	0.24	32.19	2.06
建设用地 Built-up land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
未利用地 Unused land	19.11	7.73	5.78	6.39	5.38	-11.38	-16.56	-1.95	-5.65	0.61	2.03	-12.72	-7.04
盐田 saltern	2.13	3.94	4	4.31	1.87	1.81	13.09	0.06	0.30	0.31	1.50	2.18	4.81
供给服务 Provisioning services	22.66	23.45	24.4	24	12.49	0.79	0.69	0.95	0.80	-0.40	-0.33	1.34	0.38
调节服务 Regulating services	111.18	124.64	140.4	142.99	68.19	13.46	2.31	15.76	2.41	2.59	0.37	31.81	1.69
支持服务 Support services	28.64	29.72	31.14	31.21	15.94	1.08	0.74	1.42	0.94	0.07	0.04	2.57	0.57
文化服务 Cultural services	5.58	6.18	6.93	7.09	3.39	0.60	2.06	0.75	2.32	0.16	0.46	1.51	1.61
总价值 Total value	168.06	183.98	202.87	205.3	100.00	15.92	1.83	18.89	1.97	2.43	0.24	37.24	1.34

通过计算评价小区单位面积生态系统服务价值,赋值于评价小区中心点,基于 ArcGIS 平台普通克里格方法进行空间插值,采用几何间隔分类,结合研究区实际状况,划分为低 $[0, 8500)$ 、较低 $[8500, 10000)$ 、中 $[10000, 17000)$ 、较高 $[17000, 45000)$ 、高 $[45000, \infty)$ 共 5 个等级,形成 4 期单位面积生态系统服务价值空间格局分布图(图 2)。滨州市单位面积生态系统服务价值主要以中和较高两个等级为主,面积平均占比为 37.58%和 35.54%;中和较低等级面积比例逐渐减少,高、较高和低级面积比例逐渐升高,但所有等级的面积变化速率都逐渐降低;北部平原、西南部丘陵岗地和南部黄河两岸区域单位面积生态系统服务价值较高,主要为高级和较高等级分布区域,中部为中等等级分布区,西部和南部主要是较低和低级分布区域。

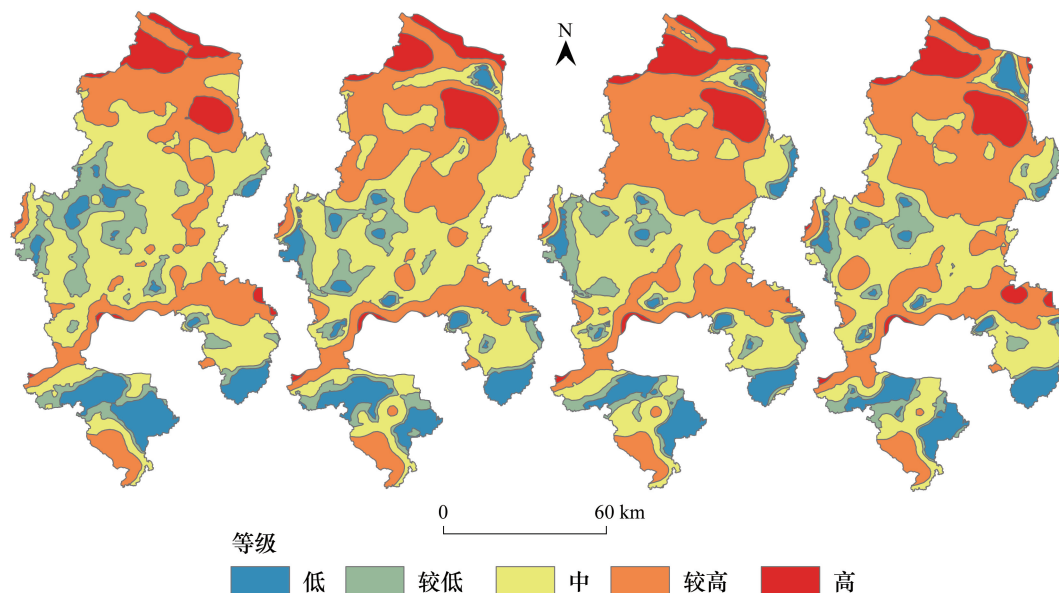


图 2 2000—2015 年滨州市单位面积生态系统服务价值空间格局

Fig.2 The spatial pattern of per unit area ecosystem service values in Binzhou from 2000 to 2015

3.2 生态风险特征分析

滨州市生态风险评价结果见图 3 和图 4。研究期间滨州市生态风险指数呈现缓慢降低的变化趋势。2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年滨州市生态风险指数值分别为 0.0222、0.0215、0.0215 和 0.0209,总体下降 5.86%,整体生态安全状况有所改善。从土地利用类型来看,耕地和未利用地生态风险指数值逐渐降低,研究期间共减少 14.67%和 33.91%,促使研究区生态安全状况得到一定程度改善。建设用地、林地、水域和盐田生态风险指数值呈现逐渐增加趋势,但增加速率逐渐降低,其中水域生态风险指数值增加最多,为 46.40%,林地增加最少,为 26.88%。

通过计算评价小区生态风险指数,采用几何间隔分类,结合研究区实际状况,划分为无 $[0, 0.0120)$ 、弱 $[0.0120, 0.0180)$ 、低 $[0.0180, 0.0220)$ 、中 $[0.0220, 0.0370)$ 、高 $[0.0370, \infty)$ 共 5 个生态风险等级。从滨州市 4 期生态风险指数空间插值(图 3)可以看出,滨州市生态风险等级呈现出总体连片、局部集聚的分布特征。研究期内主要以中生态风险和弱生态风险为主,期末面积占比达到 34.90%和 35.92%;高生态风险和无生态风险分布面积较小,期末占比仅为 2.00%和 4.53%。无生态风险区在研究区东北部集中分布,并且在此区域逐渐扩张;弱生态风险区在研究区中部偏西、西南部和东南部连片分布,少部分分布在无生态风险区外围;低生态风险区主要分布在滨州中部,并呈现面积逐渐减少的变化趋势,主要向中生态风险等级转化;中生态风险区主要分布在滨州市北部和黄河沿岸附近区域,但北部分布区面积逐渐扩大,黄河附近分布区域面积逐渐减小,向低生态风险等级转变;高生态风险区在研究期初主要分布于东北部沿海地区和西南部长白山山区,东北分布区逐渐向无生态风险等级转化并逐渐消失,西南部分布区面积逐渐减小,但依然是高生态风险区,同时滨州市中部逐渐形成高生态风险集聚区。

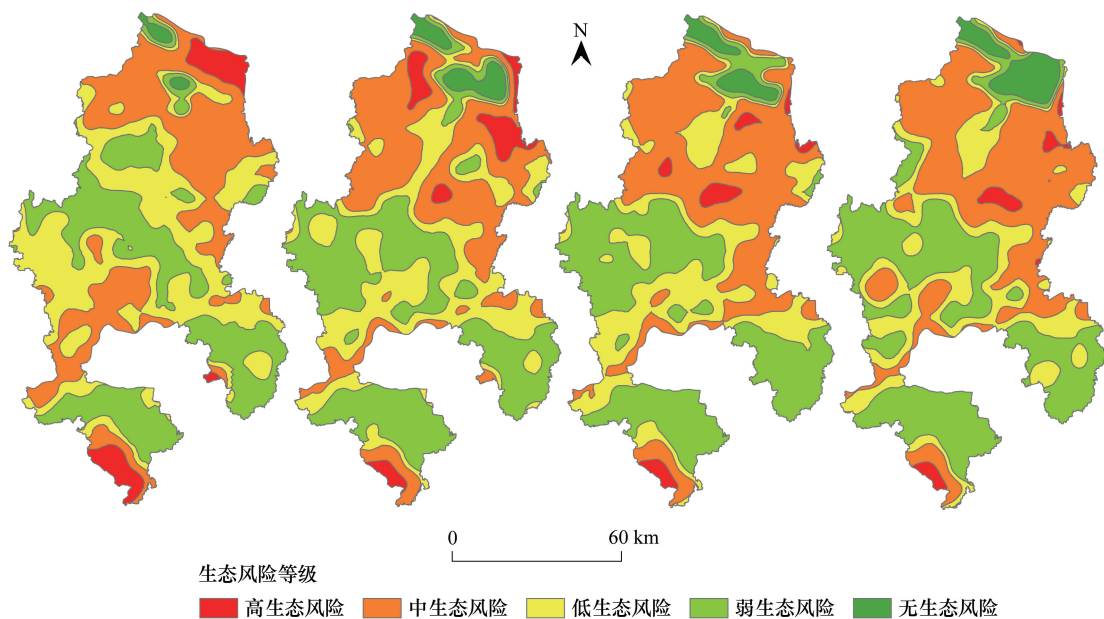


图3 2000—2015年滨州市生态风险空间分布格局

Fig.3 The spatial pattern of ecological risk in Binzhou city from 2000 to 2015

如图4所示,滨州市各生态风险等级转入和转出变化总量均呈现逐渐减少趋势,总体生态风险等级变化状况逐渐趋于稳定状态。研究期间,低生态风险等级转出面积最多,共转出 366790.91hm^2 ,占转出总面积的 42.78%;中生态风险等级转入面积最多,共转入 274953.98hm^2 ,占转入总面积的 32.07%;无生态风险是转出和转入面积最小的生态风险等级,共转出 7181.92hm^2 ,转入 40773.47hm^2 ,占转出、转入总面积的 0.84%和 4.76%。从转化速率来看,转出面积平均变化率大小依次为高生态风险(65.73%) > 低生态风险(44.88%) > 中生态风险(27.77%) > 弱生态风险(19.84%) > 无生态风险(10.42%),转入面积平均变化率大小依次为高生态风险(53.23%) > 无生态风险(44.49%) > 低生态风险(37.14%) > 中生态风险(31.24%) > 弱生态风险(24.41%)。总体而言,研究期内滨州市生态风险等级动态变化表现为转入强度高于转出强度的特征,2005年以前等级变化较为活跃,等级间转化活动明显,2005年之后转化活动逐渐趋于缓和,并且变化强度逐步稳定。

3.3 生态系统服务和生态风险的关联性分析

3.3.1 数量相关关系

分别基于4个时期1158个评价小区的单位面积生态系统服务价值和生态风险指数值绘制散点图,并计算相关系数,进行函数拟合。如图5所示,数据点逐渐呈现出类似三角形的分布格局,单位面积生态系统服务价值和生态风险指数没有表现出明显的函数变化关系,仅在一定程度上表现为类似正相关关系,即生态风险指数值增大,单位面积生态系统服务价值也增大。基于SPSS软件进行Kolmogorov-Smirnov正态性检验,单位面积生态系统服务价值和生态风险指数两个变量都不服从正态分布,故不能采用Pearson相关分析,选用Spearman相关分析两变量间的相关关系。4个时期Spearman相关系数分别为0.743、0.772、0.736和0.757($P < 0.01$),表明单位面积生态系统服务价值和生态风险指数具有较强的正向等级相关性。选取线性、对数、倒数、二次、三次、复合、幂、S、指数和Logistic共10个函数模型进行函数关系拟合,计算拟合确定系数 R^2 ,得到2000、2005、2010和2015年 R^2 值范围分别为0.156—0.389,0.183—0.414,0.174—0.383和0.083—0.420,函数拟合程度较差,说明二者没有明显的函数关系。

基于网格分析为基础,选取评价小区单位面积生态系统服务价值、单位面积供给服务价值、单位面积调节服务价值、单位面积支持服务价值和单位面积文化服务价值等5个指标与各样方生态风险指数值进行灰色关

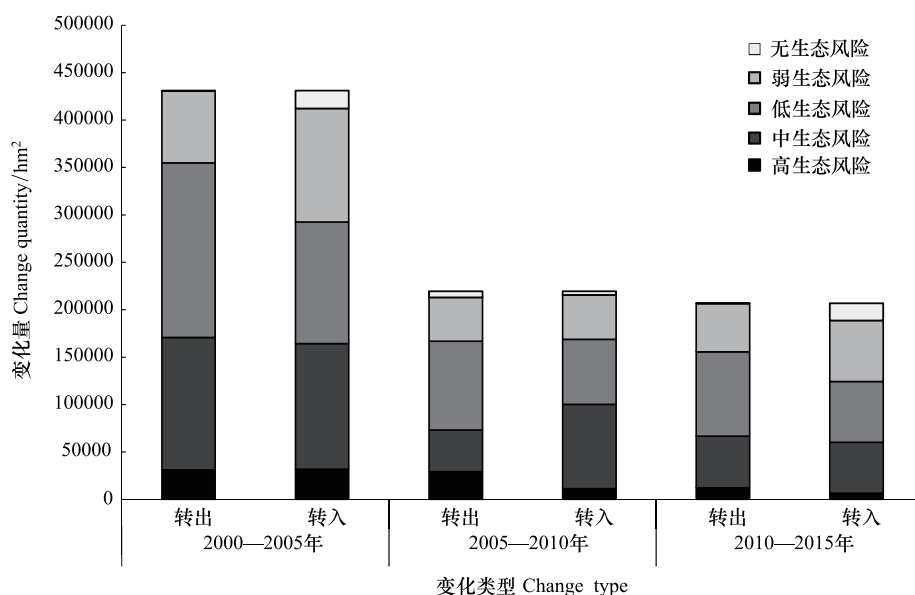


图 4 2000—2015 年生态风险等级转入转出情况

Fig.4 The situation of ecological risk grade transformation in Binzhou from 2000 to 2015

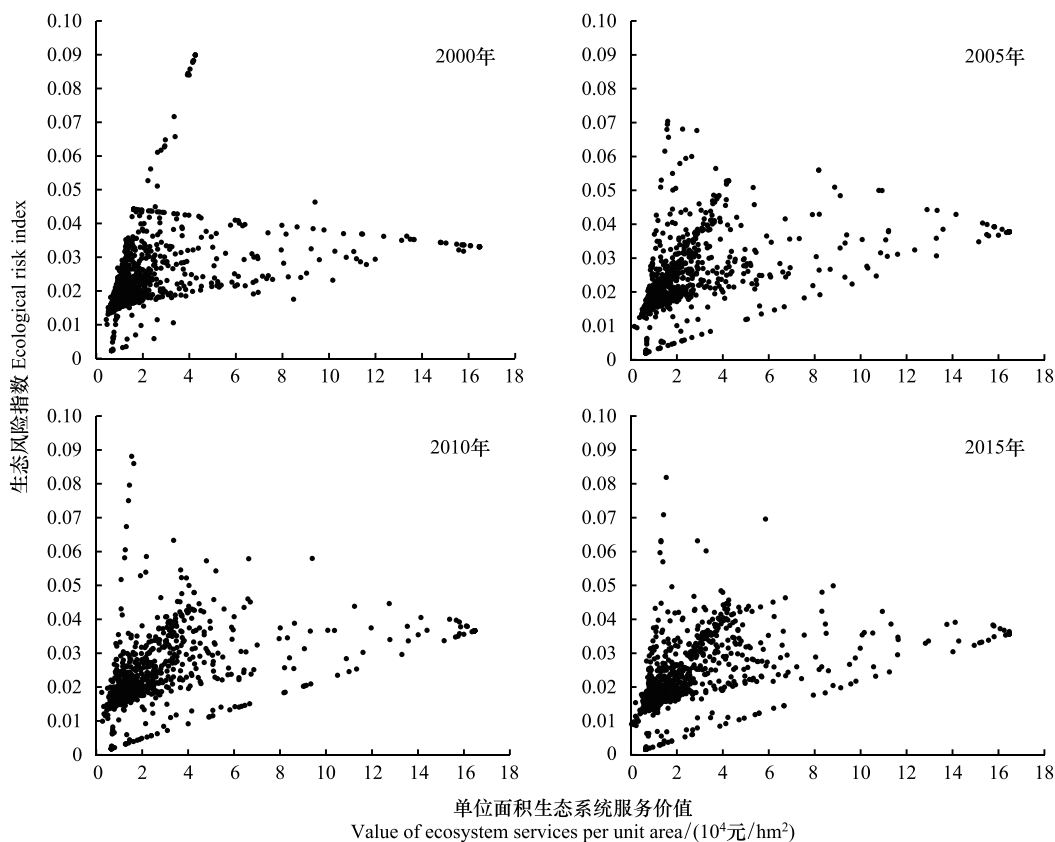


图 5 2000—2015 年单位面积生态系统服务价值-生态风险指数散点图

Fig.5 The Scatter plot of unit area ecosystem service values and ecological risk index from 2000 to 2015

联分析,选取 $\theta=0.5$ 为基准值,计算灰色关联度。随后扩大和缩小 θ 取值,分析绝对量和变化速率的关系,仅选取 $\theta=0.3$ 、 0.5 和 0.7 时的灰色综合关联度计算结果进行展示(表 3)。在取值范围内,不同 θ 取值的灰色综

合关联度变化趋势相同,表明在绝对量关系和变化速率关系中各生态系统服务功能与生态风险指数的关联性基本一致。2000 年单位面积供给价值与生态风险指数值的综合关联度最低,表明滨州市生态系统供给功能变化对区域生态风险变化的关联性最小;单位面积文化价值在 4 个功能价值中与生态风险指数值的综合关联度最高,表明滨州市生态系统供给功能变化对区域生态风险变化的关联性最大;单位面积生态系统服务价值与生态风险指数值的综合关联度最高,表明生态系统服务功能的综合作用对区域生态风险的影响作用大于各单项功能的影响作用。2005 年之后,单位面积供给价值与生态风险指数值的综合关联度最高,高于单位面积生态系统服务价值与生态风险指数值的综合关联度,表明供给功能变化相比于生态系统综合服务功能变化更能体现生态风险的变化状况;单位面积文化价值与生态风险指数值的综合关联度最低,文化功能对生态风险的影响保持低水平状态。

表 3 2000—2015 年滨州市生态系统服务功能与生态风险指数灰色综合关联度

Table 3 The synthetic degree of grey incidence between unit area ecosystem service values and ecological risk index in Binzhou from 2000 to 2015

服务类型价值 Value of service category	$\theta = 0.3$				$\theta = 0.5$				$\theta = 0.7$			
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
单位面积服务价值 Unit area values of ecosystem services	0.8363	0.7382	0.6447	0.6627	0.7402	0.6701	0.6034	0.6162	0.6441	0.6021	0.5620	0.5697
单位面积供给价值 Unit area values of provisioning services	0.6643	0.8001	0.7286	0.7694	0.6180	0.7145	0.6634	0.6925	0.5718	0.6288	0.5981	0.6156
单位面积调节价值 Unit area values of regulating services	0.7857	0.7182	0.6325	0.6545	0.7041	0.6559	0.5946	0.6104	0.6224	0.5935	0.5568	0.5662
单位面积支持价值 Unit area values of support services	0.7930	0.7466	0.6611	0.6527	0.7093	0.6762	0.6151	0.6091	0.6257	0.6058	0.5691	0.5655
单位面积文化价值 Unit area values of cultural services	0.7502	0.6926	0.6239	0.6343	0.6789	0.6377	0.5886	0.5960	0.6075	0.5825	0.5533	0.5577

3.3.2 双变量空间自相关

采用双变量空间自相关模型,分析滨州市生态系统服务(单位面积生态系统服务价值)和生态风险(生态风险指数)的空间关联特征。结果表明(图 6),2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年全球 Moran's I 指数($p = 0.05$)分别为 0.283、0.305、0.269 和 0.285,表明生态系统服务与生态风险之间存在一定的正向空间关联性。从各分类服务价值来看,2000—2015 年,支持服务价值和文化服务价值与生态风险指数的空间相关性高于综合服务价值与生态风险指数的空间相关性,供给服务价值和调节服务价值与生态风险指数的空间相关性则低于综合服务价值与生态风险指数的空间相关性;供给服务价值、文化服务价值与生态风险指数的全局 Moran's I 指数变化趋势与综合服务价值的变化趋势相一致,调节

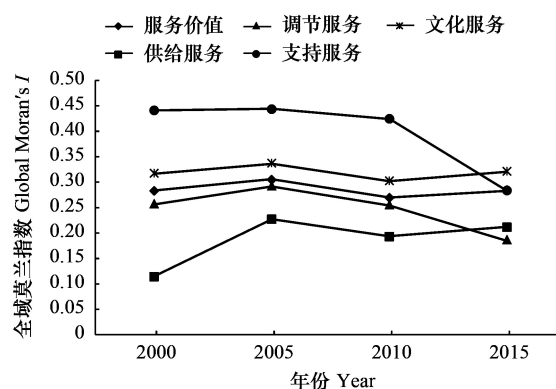


图 6 2000—2015 年单位面积生态系统服务价值与生态风险指数的全局 Moran's I 指数 ($P < 0.05$)

Fig. 6 The global Moran's I of unit area ecosystem service values and ecological risk index from 2000 to 2015 ($P < 0.05$)

服务价值、支持服务价值与生态风险指数的全局 Moran's I 指数变化趋势一致;2000 年、2005 年和 2010 年支持服务成为区域主导服务,服务价值与生态风险的空间相关性主要反映其价值与生态风险的空间相关,2015

年文化服务成为区域主导服务,空间相关主要反映区域文化服务价值与生态风险指数的空间相关性。

局部空间自相关 LISA 分析结果如图 7 所示,生态系统服务与生态风险局部关联性显著区域主要分布在北部无棣县、沾化区和南部邹平市,分为高价值—高风险(HH)、高价值—低风险(HL)、低价值—高风险(LH)、低价值—低风险(LL)和不显著(NS)5 种模式。

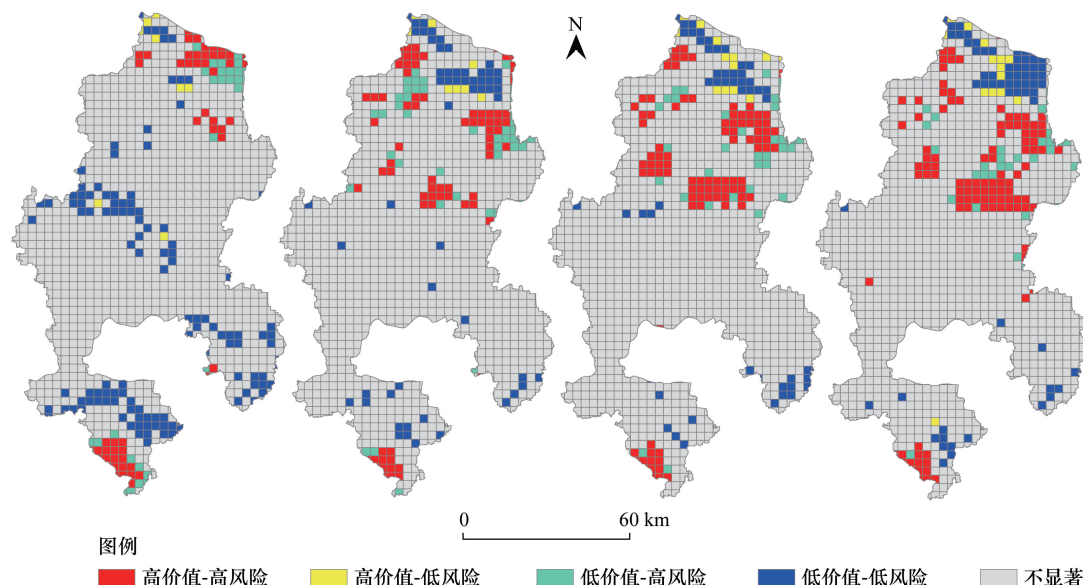


图 7 2000—2015 年单位面积生态系统服务价值与生态风险指数空间自相关

Fig.7 The Spatial autocorrelation between unit area ecosystem service values and ecological risk index in Binzhou from 2000 to 2015

高价值—高风险区:指单位面积生态系统服务价值高,并且生态风险等级高的区域。主要分布在滨州市西北部无棣县、东北部沾化区和西南部邹平县。北部集聚区主要集中于水域和未利用地交接处,水域能提供高价值的生态系统服务,却面临面积不断减小、向未利用地转化的高生态风险;西南集聚区以山区林地为主,是滨州南部生态系统服务供给中心,却因地表相对破碎、坡度较大,极易发生滑坡、泥石流等自然灾害。随着无棣县和沾化区推广冬枣种植,县域内枣林面积逐步增加,促使北部集聚区逐渐向南迁移,面积不断增加;南部则因山地开发,修建梯田,降低了生态系统服务价值和生态风险,集聚区面积逐渐减小并趋于稳定。

高价值—低风险区:指单位面积生态系统服务价值较高,但是生态风险较低的区域。研究期初主要分布在低价值—低风险区周边的水域和林地区域,后逐渐集中于北部盐田周边的水域分布区。相对于盐田,水域拥有更高的生态系统服务供给能力,但受气候的影响作用十分明显,极易向未利用地转化,是最有可能发生生态风险快速增高的区域。

低价值—高风险区:指单位面积生态系统服务价值较低,但是生态风险较高的区域。主要分布在高价值—高风险区的周边区域,即水域和林地周边的耕地区域。受高价值地类集聚效应及自身所处地类性质影响,所能提供的生态系统服务价值相对较低;受区域相对干旱的自然条件,在土壤盐渍化作用影响下,极易向荒地等未利用地转变,潜在生态风险较高。

低价值—低风险区:指单位面积生态系统服务价值低,生态风险低的区域。研究期初主要分布在无棣、阳信、邹平、博兴和滨城,北部集聚区以未利用地为主,其余集聚区以连片分布的耕地为主。研究期间,北部集聚区面积逐渐扩大,集聚地类向盐田转变,并趋于稳定;其余部分集聚区面积快速减小,并向建设用地集中。此类型集聚区主要分布在人为因素干扰强度大的区域,所提供的生态系统服务主要以人类最直接的需求为主,人类活动对区域生态环境的改造,使其处于相对长期稳定状态,生态风险较低。

不显著区:指单位面积生态系统服务价值与生态风险指数集聚关系不显著的区域。占比研究区面积的 80.71—84.10%,主要地类为成片分布的耕地和建设用地,生态系统服务价值和生态风险指数分布都较为平

均,不存在明显的高值中心和低值中心。

3.3.3 时间相关关系

基于 1158 个评价小区单位面积生态系统服务价值和生态风险指数值,将各评价小区 2000 年生态风险指数值与 2000—2005 年单位面积生态系统服务价值变化结果叠加,2005 年生态风险指数值与 2005—2010 年单位面积生态系统服务价值变化结果叠加,2010 年生态风险指数值与 2010—2015 年单位面积生态系统服务价值变化结果叠加,统计评价小区数目,探究各时段期初生态风险强度对期内生态系统服务价值变化的影响,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,期初为高、中和低生态风险等级的评价小区,在 3 个研究时间段内单位面积生态系统服务价值表现为减少的数目都要高于表现为增加的数目,3 个时段总计的生态系统服务价值增加数目占比分别为 51.20%、50.57%和 51.55%,都达到对应生态风险等级评价小区数量的一半以上;弱生态风险等级的评价小区单位面积生态系统服务价值变化主要表现为增加,占有弱生态风险小区的 47.01%;无生态风险等级的评价小区单位面积生态系统服务价值变化主要表现为不变和增加,分别占比 41.48%和 38.51%。总体来说,高等级生态风险区域预示着未来该区域生态系统服务价值最可能呈现减小趋势,低等级生态风险区域在未来生态系统服务价值往往表现为保持稳定或增加的变化趋势。

表 4 2000—2015 年滨州市生态风险强度对生态系统服务价值变化的影响

Table 4 The impact of ecological risk intensity on ecosystem service values changes in Binzhou from 2000 to 2015

期初生态风险等级 Initial ecological risk grade	2000—2005 年			2005—2010 年			2010—2015 年			总计 Total		
	增加	不变	减少	增加	不变	减少	增加	不变	减少	增加	不变	减少
高生态风险 High ecological risk	31	4	53	37	18	59	33	19	37	101	41	149
中生态风险 Intermediate ecological risk	146	13	153	84	20	151	114	54	137	344	87	441
低生态风险 Low ecological risk	136	9	139	85	20	154	75	49	105	296	78	398
弱生态风险 Weak ecological risk	218	40	190	234	92	152	208	150	120	660	282	462
无生态风险 No ecological risk	6	7	13	22	23	7	24	26	7	52	56	27

4 结论与讨论

(1) 2000—2015 年滨州市生态系统服务价值总量保持持续增长,由 168.06×10^8 元持续增长到 205.30×10^8 元,但增长速率逐渐降低并趋于平缓,年平均增长率 1.34%;生态风险指数值持续降低,研究期间总共下降 5.86%,总体生态风险等级逐渐趋于稳定;区域生态安全状况总体有所改善。

(2) 在格网尺度,滨州市单位面积生态系统服务价值和生态风险指数具有较强的正向等级相关性,但没有明显的函数关系;单位面积供给服务价值与生态风险指数灰色综合关联度最高,同步变化程度较高,表明供给服务变化对该区域生态风险指数变化的影响作用较大。

(3) 滨州市单位面积生态系统服务价值与生态风险指数之间存在一定的正向空间关联性。2000—2015 年,高价值—高风险区和高价值—低风险区面积不断增加,低价值—高风险区和低价值—低风险区面积逐渐减少;生态风险指数对生态系统服务价值变化具有一定的预示作用,高等级生态风险区域的生态系统服务价值存在极大的减小变化的可能性。邹平、无棣和沾化是高价值—高风险区的主要集聚区,成为全市生态系统服务的主要供给区和生态风险高危区。生态系统服务价值的不断提高表明生态环境的不断改善,较高的生态风险指数则揭示了生态系统结构和功能损伤的可能性,因此要特别注重此类区域的环境保护和生态安全建设的质量。

生态系统服务价值评价和生态风险评价的综合运用,能更好地将人类福祉与生态环境变化相联系,更好地反映区域社会发展所引起的生态环境改变情况,评价区域可持续发展现状及潜力,为区域生态环境保护和风险管理提供决策支持。由于该文进行的生态系统服务价值和生态风险指数核算都是基于区域土地利用类型(景观类型)结构所进行的,是两个结果之间的相互作用分析,尚不能很好地描述和反映生态系统服务与生态风险评价直接的内在联系;对二者相互关系的确定更多地是从相关性角度出发,对区域主导服务的识别和各单项服务与生态风险的权衡、协调研究只进行了初步尝试,在研究的广度和深度上还有较大空间。探讨生态系统服务与生态风险的内在机理,特别是利用不同的方法对二者进行服务价值和风险指数核算,从而进行有区分度的数量、空间相关性分析;构建生态系统服务-生态风险评价框架,提高二者综合评价对生态安全保护的有效性和时效性;理清生态系统服务和生态风险相互影响、作用和变化关系,特别是明辨单一生态系统服务对区域生态服务和风险的作用效果,应当作为下一步研究的重点和方向。

参考文献 (References):

- [1] Yi L, Chen J S, Jin Z F, Quan Y M, Han P P, Guan S J, Jiang X L. Impacts of human activities on coastal ecological environment during the rapid urbanization process in Shenzhen, China. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 154: 121-132.
- [2] Baffoe G, Matsuda H. A perception based estimation of the ecological impacts of livelihood activities: The case of rural Ghana. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 424-433.
- [3] Xia S X, Liu Y, Yu X B, Fu B J. Challenges in coupling LTER with environmental assessments: An insight from potential and reality of the Chinese Ecological Research Network in servicing environment assessments. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1302-1313.
- [4] 马仁锋, 张文忠, 余建辉, 王岱, 谌丽. 中国地理学人居环境研究回顾与展望. *地理科学*, 2014, 34(12): 1470-1479.
- [5] 孙东琪, 张京祥, 朱传耿, 胡毅, 周亮. 中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析. *地理学报*, 2012, 67(12): 1599-1610.
- [6] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于 Citespace 的计量分析. *生态学报*, 2014, 34(13): 3693-3703.
- [7] Tian J Y, Gang G S. Research on regional ecological security assessment. *Energy Procedia*, 2012, 16: 1180-1186.
- [8] Daily G C. *Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press, 1997.
- [9] 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. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [10] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [11] Gong J, Yang J X, Tang W W. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14192-14215.
- [12] Piet G J, Knights A M, Jongbloed R H, Tamis J E, de Vries P, Robinson L A. Ecological risk assessments to guide decision-making: Methodology matters. *Environmental Science & Policy*, 2017, 68: 1-9.
- [13] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [14] 祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 王保盛, 唐立娜. 基于 Citespace 软件的生态风险知识图谱分析. *生态学报*, 2018, 38(12): 4504-4515.
- [15] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 吴健生. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK. *地理学报*, 2018, 73(5): 843-855.
- [16] Dong T, Xu W H, Zheng H, Xiao Y, Kong L Q, Ouyang Z Y. A framework for regional ecological risk warning based on ecosystem service approach: A case study in Ganzi, China. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2699.
- [17] 刘世梁, 侯笑云, 张月秋, 尹艺洁, 王军. 基于生态系统服务的土地整治生态风险评价与管控建议. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(3): 193-200.
- [18] Liao J F, Jia Y Q, Tang L N, Huang Q L, Wang Y Y, Huang N, Hua L Z. Assessment of urbanization-induced ecological risks in an area with significant ecosystem services based on land use/cover change scenarios. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(5): 448-457.
- [19] 宋科, 赵晟, 桂峰, 蔡惠文, 吴常文. 基于生态系统服务能值价值的生态风险分析方法及应用研究. *环境保护前沿*, 2011, 1(2): 13-19.
- [20] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R, Donguy G, Emmanuel E. Ecological risk assessment of urban and industrial systems: A review. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(24): 5162-5176.
- [21] 莫宏伟, 任志远, 李振国. 陕北榆林市土地生态价值及生态风险动态分析. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 189-192, 197-197.
- [22] 莫宏伟, 任志远. 风沙过渡区土地生态价值及生态风险动态研究——以陕北神木县为例. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 357-362.
- [23] 宫继萍, 石培基, 杨雪梅. 黑河中游土地生态价值及生态风险动态研究——以甘肃省民乐县为例. *土壤*, 2012, 44(5): 846-852.
- [24] 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.

- [25] 杨凤海, 赵烨荣, 宋佳佳, 赫轩, 刘岩, 曹彬. 齐齐哈尔市土地生态系统服务价值时空变化研究. 中国农业大学学报, 2018, 23(2): 105-114.
- [26] 葛堃, 卢新海. 基于土地利用总体规划的生态损益研究——以武汉市为例. 湖北社会科学, 2018, (2): 68-73.
- [27] 曾杰, 李江风, 姚小微. 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.
- [28] 孙振宁, 谢云, 段兴武. 生产力指数模型 PI 在北方土壤生产力评价中的应用. 自然资源学报, 2009, 24(4): 708-717.
- [29] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 高彦净. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2041-2048.
- [30] 许凤娇, 吕晓. 基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险格局. 生态学报, 2018, 38(20): 7312-7325.
- [31] Lin Y Y, Hu X S, Zheng X X, Hou X Y, Zhang Z X, Zhou X N, Qiu R Z, Lin J G. Spatial variations in the relationships between road network and landscape ecological risks in the highest forest coverage region of China. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 392-403.
- [32] Liu D D, Qu R J, Zhao C H, Liu A P, Deng X Z. Landscape ecological risk assessment in Yellow River Delta. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2012, 10(2): 970-972.
- [33] Mo W B, Wang Y, Zhang Y X, Zhuang D F. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk in a megacity, China: A case study of Beijing. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1000-1011.
- [34] 刘思峰, 谢乃明, Forrest J. 基于相似性和接近性视角的新型灰色关联分析模型. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 881-887.
- [35] 谢雄军, 何红渠. 基于空间面板计量的产业集聚与省域经济增长关系研究. 财经理论与实践, 2014, 35(2): 116-121.
- [36] Souris M, Bichaud L. Statistical methods for bivariate spatial analysis in marked points. Examples in spatial epidemiology. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 2011, 2(4): 227-234.
- [37] Cheng Z H. The spatial correlation and interaction between manufacturing agglomeration and environmental pollution. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 1024-1032.
- [38] 敖荣军, 梅琳, 梁鸽, 李家成. 湖北省县域人口迁入与工业集聚的空间关联性研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 514-522.