

## 黄河下游城市济南区域景观生态风险时空演变分析

尹德洁<sup>1</sup>,侯冰钰<sup>1</sup>,赵 悅<sup>1</sup>,吴亚伟<sup>1</sup>,王冬薇<sup>1</sup>,祝遵凌<sup>2\*</sup>

(1. 山东建筑大学,山东 济南 250101;2. 南京林业大学,江苏 南京 210000)

**摘要:**为探究黄河下游城市生态风险变化以及城市建设对黄河沿岸风险变化的影响,以黄河下游城市济南区域为研究区,根据2000、2010、2020年影像数据,采用生态风险指数与空间分析法,分析黄河下游城市济南区域的生态风险时空演变特征。结果表明,1)2000—2020年,研究区景观类型演变较明显,其中,耕地、林地和草地面积呈减少趋势,且景观优势度降低;建筑用地面积为持续增加,景观优势度提高;水体表现为先减后增,破碎度和分离度先增加后减少。2)2000—2020年黄河下游城市济南区域景观生态风险整体呈下降趋势,低、较低和中风险区的面积显著增加,较高和高风险区面积逐渐减少。空间分布上,黄河沿岸生态等级向南北纵向依次递减,但在城市边缘部分依然生态风险较高。3)研究区生态风险等级的转换类型多样,整体以高等级向低等级转化为主,前10 a减小速率大于后10 a,但在2010—2020年高生态风险有所增加。总之,黄河下游城市济南区域景观生态风险等级逐渐下降,城市有序扩张对降低风险等级具有积极影响,但未利用地的开发会增加景观生态风险,建议在维持现有城市景观生态建设的同时,继续降低人为干扰,注重景观资源的合理开发,实现可持续发展。

**关键词:**景观格局;景观生态风险;时空演变;济南区域;黄河下游

**中图分类号:**S731.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2023)06-0228-08

Analysis on Spatiotemporal Evolution of Landscape Ecological Risk in the Jinan Region of the Lower Reaches of the Yellow River Cities

YIN De-jie<sup>1</sup>, HOU Bing-yu<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, WU Ya-wei<sup>1</sup>, WANG Dong-wei<sup>1</sup>, ZHU Zun-ling<sup>2\*</sup>

(1. Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

**Abstract:** The paper took the Jinan region along the Yellow River as the study area and analyzed the spatial and temporal evolution characteristics of ecological risk in the Jinan region of the lower reaches of Yellow River cities based on the image data in 2000, 2010 and 2020, with the method of ecological risk index and spatial analysis to explore the ecological risk changes in the Jinan region along the Yellow River and the role and influence of urban area construction on the Yellow River corridor. The results showed that 1) during the period from 2000 to 2020, the landscape types in the study area evolved obviously, in which the areas of cultivated land, woodland and grassland showed a decreasing trend, and the landscape dominance decreased. The construction land area continued to increase, and the landscape dominance was improved. The water body first decreased and then increased; the area of water bodies decreased and then increased, with fragmentation and separation increasing and then decreasing. 2) The landscape ecological risk in the last 20 years along the Jinan region of the Yellow River, the landscape ecological risk as a whole tended to decline, with the area of low, lower and medium risk areas increased significantly and the area of high and higher risk gradually decreased. In terms of spatial distribution, the ecological level along the Yellow River de-

收稿日期:2023-03-11 修回日期:2023-05-17

基金项目:国家社科基金艺术学项目(22BG110);山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QE304)。

第一作者:尹德洁,博士,副教授。研究方向:风景园林规划与设计、园林植物应用与园林生态。E-mail: YINDEJIE103@163.com

\*通信作者:祝遵凌,博士,教授,博士生导师。研究方向:园林植物栽培理论与实践、园林植物应用等。E-mail: zhuzunling@njfu.edu.cn

creased in the north-south direction, but the ecological risk was still higher in the urban fringe. 3) The transformation of ecological risk levels in the study area was of various types, and the transformation from high to low level was the main one. In general, the decrease rate in the first 10 years was greater than that in the last 10 years, but the high ecological risk increased from 2010 to 2020. In a word, the landscape ecological risk level of cities in the lower reaches of the Yellow River and Jinan region was gradually declining, and the orderly expansion of cities had a positive impact on reducing the risk level. It is suggested that while maintaining the existing urban landscape ecological construction, we should continue to reduce human interference and put emphasis on the rational development of landscape resources to achieve sustainable development.

**Key words:** landscape pattern; landscape ecological; spatiotemporal evolution; Jinan Region; lower reaches of the Yellow River

土地资源是生态系统的重要组成部分,在“人口-资源-环境-发展”这一系统中占据主导地位,因此任何土地资源发生变动都会对人类社会生产、生活造成直接或间接的影响<sup>[1]</sup>。基于土地利用变化进行生态风险评估可以有效判断现有外部因素对生态造成的不利影响<sup>[2-3]</sup>。传统意义上的生态风险评价主要是评价人类活动或自然灾害产生负面影响的概率和作用<sup>[4]</sup>,而景观生态风险评价是对生态风险评价的拓展和补充,其主要强调由于自然或人类活动对区域景观类型造成干扰后,对区域生态环境可能产生的一系列不利后果。其基本原理是综合地理学、生态学及环境学等多学科领域,构建相关模型对区域内的生态环境进行评价、分析和预测,进而为生态环境的风险管理提供科学理论基础<sup>[5]</sup>。近年来,国内外学者对景观生态风险相关研究进行了一系列的探索并取得大量成果。在研究方法上,国外学者侧重于综合多种风险源结合相关模型进行研究,如:贝叶斯网络模型<sup>[6]</sup>、生态足迹模型<sup>[7]</sup>、SD 模型<sup>[8]</sup>等。而国内常见的评价方法主要分为两种,基于景观格局指数构建模型法<sup>[9]</sup>和基于风险“源—汇”法<sup>[10]</sup>。对比已有方法,景观格局指数构建模型法的优势是能够快速识别景观生态风险空间分布特征。在研究尺度上,主要集中于水系流域<sup>[11-12]</sup>、自然保护区<sup>[13-14]</sup>、省级区域<sup>[15]</sup>等方面,研究尺度主要偏重大尺度,从整体上分析生态效应,但对中小尺度的区域关注度较低。

黄河流域对于我国是重要的生态涵养地,同时还是连接环渤海和西北内陆的重要生态廊道,对于维护我国生态安全具有极其重要的作用<sup>[16]</sup>。同样,学者们对黄河流域生态风险评估亦进行了研究,如:刘希朝等<sup>[17]</sup>从不同的网格尺度分析黄河流域整体的生态风险时空特征;许学工等<sup>[18]</sup>对黄河三角洲湿地区域生态风险进行分级评价,并提出风险管理对策。然而,探究流域内典型跨河城市景观生态风险

演变特征的研究较少。

济南作为黄河流域下游中心城市,为贯彻黄河流域高质量发展,在近几年城市规划建设中,济南市突出打造黄河风貌带,但其沿岸生态风险状况如何不得而知,因此,探究其景观生态风险演变对保护黄河沿岸济南段生态环境具有参考价值。基于此,本研究以典型跨河城市济南为研究区,考虑土地利用演变对景观生态风险评价具有密切的相关性,对区域内细部风险进行分析,选取划分风险小区的方法,计算基础景观格局指数,并构建景观生态风险评价模型,探究该区域的景观生态风险时空演变特征,研究结果能够为黄河流域下游生态保护、资源可持续利用及构建生态风险预警机制提供相关参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

济南市(116°11'—117°44'E, 36°01'—37°32'N)位于山东省中部,地处黄河下游(图 1),地势南高北低,黄河位于济南市的北部,黄河从平阴县旧县清河门进入济南境内,沿市境西部逶迤东北穿过济南,流经市境总长 183 km<sup>[19]</sup>。济南属于温带大陆性气候,年平均气温 13.6 ℃,年平均降雨量 718.4 mm,汛期主要集中在 6—9 月,降雨充沛雨热同季。研究区对应 2019 年行政区划调整后的济南市域范围,辖 10 区 2 县,总面积为 10 223.36 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

数据从地理空间数据云提供的 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 的 2000、2010、2020 年 3 期遥感数据。根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)标准,划分 6 类用地类型(耕地、林地、水体、建设用地、草地和未利用地)。运用 ENVI 5.3 软件对图像辐射定标、大气校正、波段融合以及图像镶嵌、裁剪和拼接等数据预处理。分类评价精度均在 85%以上,精度结果满足本文相关研究所需。选取

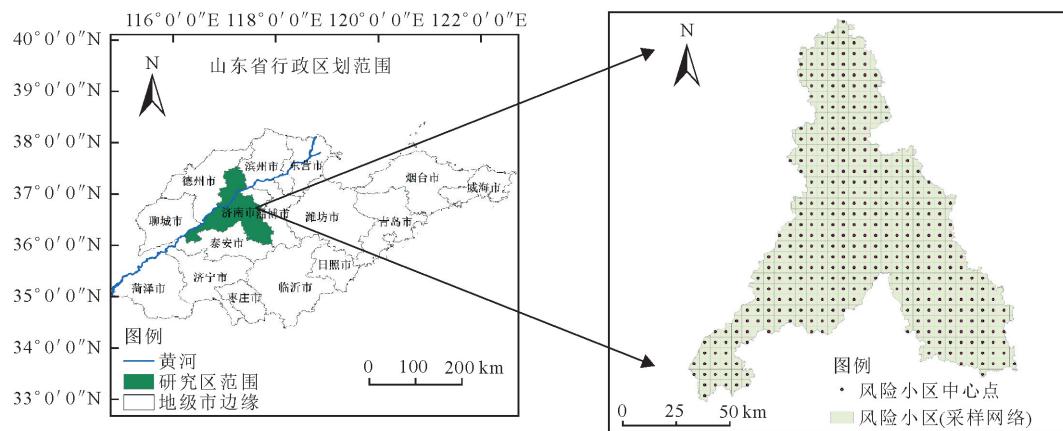


图1 行政区划及风险小区

Fig. 1 Administrative division and risk area map

耕地、林地等6种景观类型作为风险受体,利用GIS软件结合相关模型,得到研究区生态风险空间分布图,进行生态风险等级评价。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 风险小区划分** 为深入探究研究区内部空间异质性特征,提高风险评价精度,本文采用划分风险小区的方法进行探究。根据景观生态学相关理论,应按照研究区景观平均斑块面积的2~5倍划分生态风险小区的大小<sup>[20]</sup>。因此,本研究综合考虑研究区特征、评价单元精度等<sup>[21]</sup>,确定5 km×5 km为最佳评价单元。借助ArcGIS10.6软件对研究区进行生态风险小区的划分<sup>[20]</sup>,基于5 km×5 km的风险小区采用等间距系统采样法进行划分,划分为499个风险小区(图1)。结合相关模型公式分别计算各样方内景观生态风险指数,采用插值分析分方法进行景观生态风险空间分析。

### 1.3.2 构建景观生态风险指数模型 区域生态系

统的内外部因素影响着风险值的大小<sup>[21]</sup>,景观格局指数能高度凝练景观格局的信息,并且可以反映其空间格局变化以及结构特征<sup>[22]</sup>。将景观格局与景观生态风险相联系,能反映不同景观类型所受到的干扰程度。依据相关原理和方法,选取脆弱度指数 $F_i$ 、损失度指数 $R_i$ 、景观干扰度指数 $S_i$ 构建评价模型,其中景观干扰度指数 $S_i$ 是由景观破碎度 $C_i$ 、分离度 $N_i$ 和景观优势度 $D_i$ 计算得出。具体模型公式如下

$$E_{RI} = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A_k} R_i \quad (1)$$

式中: $E_{RI}$ 为所计算的景观生态风险指数; $A_i$ 为风险小区内景观类型*i*的面积; $A_k$ 为风险小区的面积; $N$ 为风险小区内各类型的斑块数量;*i*为景观类型种类个数。

构建生态风险指数的景观指数计算公式及参数含义见表1。

表1 景观生态风险评价模型的计算方法

Table 1 The calculation method of landscape ecological risk assessment model

名称	计算公式	参数含义及生态意义
景观损失度指数 $R_i$	$R_i = S_i F_i$ (2)	$S_i$ 为景观干扰度指数; $F_i$ 为景观脆弱度指数
景观脆弱度指数 $F_i$	由正反切归一化获得	参考前人研究 <sup>[26]</sup> 和研究区特点,脆弱度赋值分别为未利用地6、水体5、耕地4、草地3、林地2、建设用地1;通过正反切归一化得到景观类型的脆弱度指数依次为0.8440、0.7048、0.7951、0.0360、0.5000、0.8948
景观干扰度指数 $S_i$	$S_i = aC_i + bN_i + cD_i$ (3)	$a$ 、 $b$ 、 $c$ 为各指标权重, $a+b+c=1$ ,根据研究区特点参考文献研究成果 <sup>[5,19]</sup> ,对 $C_i$ 、 $N_i$ 、 $D_i$ 进行赋值,分别为0.5、0.3、0.2
景观优势度指数 $D_i$	$D_i = \frac{P_i + M_i + 2L_i}{4}$ (4)	$P_i$ 为斑块类型面积与区域总面积之比; $L_i$ 为第 <i>i</i> 种景观类型风险小区数量与风险小区总数之比; $M_i$ 为景观类型斑块数量与总斑块数量之比
景观分离度指数 $N_i$	$N_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_i}{A}} A$ (5)	$n_i$ 为第 <i>i</i> 种景观斑块数; $A$ 为研究区景观总面积; $A_i$ 为第 <i>i</i> 种景观总面积
景观破碎度指数 $C_i$	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$ (6)	$n_i$ 为第 <i>i</i> 种景观斑块数; $A_i$ 为第 <i>i</i> 种景观总面积

### 1.3.3 景观生态风险空间分析方法 景观生态风险空间分析方法是研究变量空间异质性的有效手段<sup>[5]</sup>,借助半方差变异函数结合各风险小区生态风

险指数进行最优拟合,采用普通克里金插值法(Ordinary Kriging)进行空间插值。其计算公式如下

$$r(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (7)$$

式中: $h$ 为样本间距; $n(h)$ 为当抽样间距为 $h$ 时的样点对总数; $Z$ 是某景观类型属性的随机变量; $x_i$ 为空间位置; $Z(x_i + h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别为在变量 $x_i + h$ 和 $x_i$ 点取的值。

## 2 结果与分析

### 2.1 景观格局指数时序演变

通过ArcGIS10.6和Fragstats 4.2软件,得到黄河下游济南区域2000—2020年景观格局分布图(图2)及景观格局指数表(表2)。

由表2可知,耕地、林地和草地的斑块面积均单调递减,其中耕地减少最多,2000—2020年减少了63 582.93 hm<sup>2</sup>,但其始终是研究区内的优势景观类型,优势度指数最大。建设用地的斑块面积逐渐增

加,但2000—2010年斑块数量的增加幅度明显大于2010—2020年,破碎度和损失度指数先减少后增加,主要是由于前10 a济南加快城镇化建设,以黄河沿岸城区为中心,在横、纵向上建立沿济青、济郑和济盐3条城镇产业轴,建设用地面积在两个轴线上急剧增加;而后10 a济南集约化发展,严格控制建设用地的规模,集聚程度增强,城市规模从分散到集中蔓延式扩展,人类活动干扰较强导致破碎度增大,引起损失度略有上升。水体面积先减后增,斑块数量持续增加,这可能受人类活动影响较大,前10 a割裂了水体景观斑块,后10 a随着人们生态保护意识的增强,黄河沿岸区域的流域治理初显成效,水体的破碎度和分离度逐渐减小。此外,未利用地分离度值和损失度值始终较高,原因是未利用地斑块面积占比最小,空间分布分散,易受人类活动干扰有关,导致破碎度持续增加。

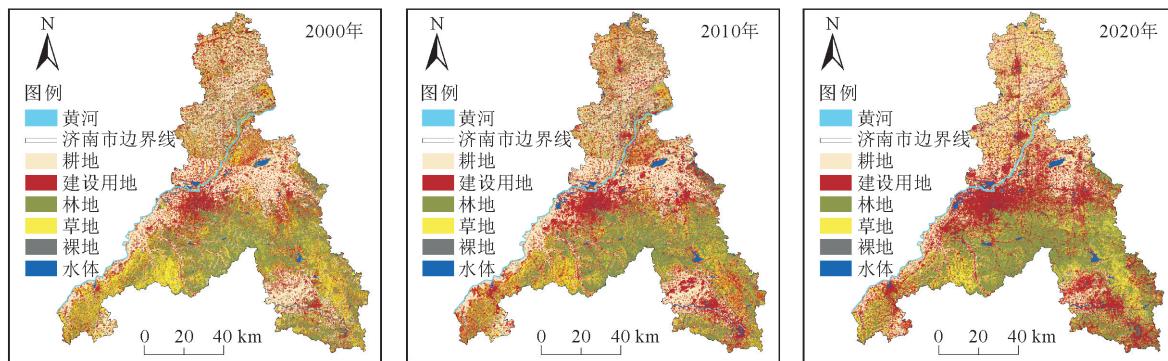


图2 2000、2010、2020年济南区域景观分布

Fig. 2 Landscape types distribution of Jinan Section in 2000, 2010 and 2020

表2 研究区各景观格局指数

Table 2 The index of landscape pattern in the study area

景观类型	年份	斑块面积(CA)/hm <sup>2</sup>	斑块数/个	破碎度(C <sub>i</sub> )	分离度(N <sub>i</sub> )	优势度(D <sub>i</sub> )	干扰度(S <sub>i</sub> )	脆弱度(F <sub>i</sub> )	损失度(R <sub>i</sub> )
耕地	2000	632 593.35	279	0.000 5	0.013 7	0.658 8	0.136 1	0.844 0	0.114 9
	2010	581 610.78	466	0.000 9	0.019 3	0.651 5	0.136 5	0.844 0	0.115 2
	2020	569 010.42	3 086	0.000 9	0.020 1	0.648 0	0.136 1	0.844 0	0.114 9
林地	2000	135 205.56	1 153	0.009 3	0.132 3	0.421 3	0.128 6	0.704 8	0.090 6
	2010	130 136.67	907	0.007 6	0.122 1	0.344 7	0.109 4	0.704 8	0.077 1
	2020	130 043.16	14 524	0.007 6	0.122 1	0.343 8	0.109 2	0.704 8	0.077 0
草地	2000	104 654.16	1 372	0.013 3	0.180 0	0.408 0	0.142 2	0.795 2	0.113 1
	2010	83 590.38	1 154	0.014 0	0.207 1	0.328 0	0.134 7	0.795 2	0.107 1
	2020	83 481.3	16 780	0.014 1	0.207 7	0.329 2	0.135 2	0.795 2	0.107 5
水体	2000	24 253.74	618	0.026 5	0.528 5	0.361 4	0.244 1	0.036 0	0.008 8
	2010	24 018.3	632	0.027 3	0.539 0	0.346 6	0.244 7	0.036 0	0.008 8
	2020	24 594.39	884	0.026 7	0.526 8	0.347 9	0.241 0	0.036 0	0.008 7
建设用地	2000	117 957.51	4 315	0.036 6	0.281 5	0.628 7	0.228 5	0.500 0	0.114 2
	2010	201 105.99	4 723	0.023 6	0.173 3	0.676 1	0.199 0	0.500 0	0.099 5
	2020	213 588.36	4 516	0.022 0	0.162 3	0.678 1	0.195 3	0.500 0	0.097 7
未利用地	2000	7 264.08	227	0.031 1	1.046 1	0.095 9	0.348 6	0.894 9	0.311 9
	2010	1 478.79	63	0.052 7	3.018 7	0.048 8	0.941 8	0.894 9	0.842 7
	2020	1 223.28	1 358	0.061 3	3.578 4	0.047 7	1.113 7	0.894 9	0.996 6

## 2.2 景观生态风险时空分异

根据研究区实际情况采用自然断点法,划分为5个风险等级:低生态风险区( $0.098 < ERI \leq 0.103$ )、较低生态风险区( $0.104 < ERI \leq 0.108$ )、中等生态风险区( $0.109 < ERI \leq 0.113$ )、较高生态风险区( $0.114 < ERI \leq 0.135$ )、高生态风险区( $ERI > 0.135$ ),生态等级越高表明人类活动干扰越强,景观破碎度越大。

对研究区内499个风险小区的生态风险等级的面积占比进行统计得出(图3),2000年处于较高生态风险和高生态风险等级,面积占比分别为45.53%和16.11%,2010年和2020年以中风险和较高风险为主,面积占比分别为31.29%、32.40%和33.30%、25.37%,研究期间,低、较低和中等风险面积占比不断增加,较高和高风险面积占比逐渐减少,其中低风险区面积占比提高了18.06%,高风险区面积占比减少14.31%,这与近些年随着经济社会的发展同时,济南注重对生态环境的保护与改造有关。截至2021年,济南公园绿地500米服务半径覆盖率提升至81.1%,生态绿地建设较好,使得高风险逐渐转换为低生态风险区域。

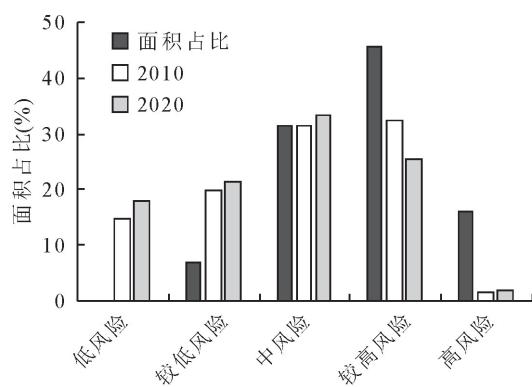


图3 2000—2020年生态风险等级面积动态变化

Fig. 3 Dynamic change of ecological risk level area from 2000 to 2020

对各等级风险区的动态变化进行统计(表3)以及通过ArcGIS10.6空间分布分析得到济南区段生态风险等级图(图4)。由表3、图4可知,2000年济南区段较低风险区集中在黄河沿岸天桥区和槐荫区北部,此区域内分布连片的林地和耕地,且人类活动较弱,人为干扰较小,生态系统趋于稳定。中生态风险区分布于黄河两岸区域和南部山区,并且风险等级空间分布呈现与黄河走势相似的条状分布形式,主要由于沿岸存在地上二级悬河,土地利用转换缓慢,景观破碎度和分离度较低;南部山区则因其分布着大量的山体和丘陵,生态用地集中,所以受人类活动干扰后的损失度较低,生态风险相对较低。高生

态风险区主要分布于黄河北岸济阳区、商河县西南部和平阴县东南部,此区域内地势平坦,农村居民点分布过于零散,土地资源开发力度较大,景观类型在耕地与建设用地间不断变换,破碎度和分离度较高,使得生态风险值较高。

与2000年相比,2010年研究区内低生态风险面积变化最大,主要分布于槐荫区、天桥区、历下区以及南部山区,较低生态风险主要在低生态风险边缘环绕分布。中生态风险在黄河两岸的历城区、章丘区和长清区显著增加,这表明在经济发展的同时,济南黄河两岸注重生态建设,提高了生态稳定性,生态风险有所降低。高生态风险面积大幅减少,以9.07%的速度减少了1493.52 km<sup>2</sup>,在空间变动上以黄河北岸济阳区和商河县最为突出,主要因为此区域内耕地和建设用作为主要的景观基质,分布形式开始聚集化,农村居民点迁并整理,集中到中心社区,其破碎度和分离度较小,生态风险值减小。

2020年研究区内低、较低、中和高生态风险均有所增加,而较高生态风险成为向各等级转换的唯一来源,一方面与政府加大生态建设和生态环境保护的力度有关;一方面与较高生态风险区具有不稳定性,易受人类活动干扰有关。高风险区主要分布于平阴县,且在平阴县济光高速南北沿线方向上新增明显,主要由于此区域内土地类型主要由未利用地转化为耕地,增加了未利用地分离度和破碎度,使得生态风险值升高。

## 2.3 景观生态风险转换分析

为了更好地展现各生态等级之间的变化和转化情况,运用ArcGIS10.6空间叠加将研究区3期生态风险等级分布图,得到2000—2010、2010—2020年生态风险等级转移表(表4、表5)。

由表4、表5可得,2000—2010年,低风险区向高风险区转移的面积为239.6 km<sup>2</sup>,占研究区总面积2.34%;2010—2020年,低风险区向高风险区转移的面积为447.6 km<sup>2</sup>,占研究区总面积4.38%。相比2000—2010年面积呈上升趋势,这是由于随着人们对于土地资源的需求不断增加,在基本农田的保护情景下,人们更注重挖掘未利用地的潜力,加大其开发力度,使得高生态风险有所增加。

2000—2010年,高风险区向低风险区转移的面积为7348.36 km<sup>2</sup>,占比为71.88%;2010—2020年,高风险区向低风险区转移的面积为1774.92 km<sup>2</sup>,占比为17.36%。相比2000—2010年转移速率显著减小,主要由于城市化进程持续推进,建设用地整体发展趋于饱和,斑块扩张较为规则,使得转移速率减慢。

表3 2000—2020年各等级景观生态风险面积动态变化

Table 3 Dynamic changes of landscape ecological risk area at all levels from 2000 to 2020

风险等级	2000—2010年		2010—2020年	
	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度(%)	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度(%)
低生态风险区	1 523.76	19 047.00	322.56	2.12
较低生态风险区	1 318.52	18.44	160.84	0.79
中生态风险区	-6.12	-0.02	205.00	0.64
较高生态风险区	-1 342.64	-2.88	-718.36	-2.17
高生态风险区	-1 493.52	-9.07	29.96	1.95

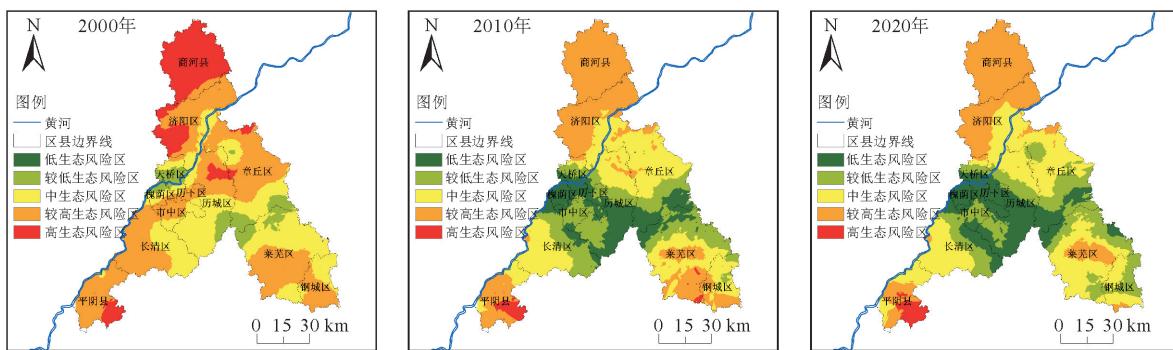


图4 2000—2020年济南区域景观生态风险空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of landscape ecological risk in Jinan from 2000 to 2020

表4 2000—2010年各等级生态风险转移

Table 4 The transfer of ecological risks at different levels from 2000 to 2010

km<sup>2</sup>

年份	风险等级	2010年					
		低	较低	中	较高	高	
2000年	低	0.76	0.04	0	0	0	0.8
	较低	581.80	124.12	9.08	0	0.04	715.04
	中	787.64	1 459.72	768.72	172.80	16.32	3 205.20
	较高	154.36	449.68	2 363.96	1 645.52	41.32	4 654.84
	高	0	0	57.32	1 493.88	96.28	1 647.48
总计		1 524.56	2 033.56	3 199.08	3 312.20	153.96	10 223.36

表5 2010—2020年各等级生态风险转移

Table 5 The transfer of ecological risks at different levels from 2010 to 2020

km<sup>2</sup>

年份	风险等级	2020年					
		低	较低	中	较高	高	
2010年	低	1 363.56	154.40	6.60	0	0	1 524.56
	较低	483.52	1 439.56	110.48	0	0	2 033.56
	中	0	480.92	2 600.68	117.48	0	3 199.08
	较高	0	119.04	662.76	2 471.76	58.64	3 312.20
	高	0.04	0.48	23.56	4.60	125.28	153.96
总计		1 847.12	2 194.40	3 404.08	2 593.84	183.92	10 223.36

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

耕地始终是研究区的优势景观类型;建设用地的面积不断增加,空间呈集聚式扩散,优势度不断增强;水体面积先减少后增加,分离度和破碎度先增加

后减少。林地、草地和未利用地的面积不断减少,破碎度持续增加。

景观生态风险的生态等级在空间分布上呈现以黄河为轴,向南北两岸逐步降低,且高风险区主要分布在北岸和南岸的东西两端,而黄河济南区段中部区域生态风险相对较小。2000年以较高生态风险

和高生态风险为主,2010年和2020年以中风险和较高风险为主。

研究期间,前10 a 高风险区向低风险区转移面积占研究区总面积 71.88%,后 10 a 占比为 17.36%,有所减缓。研究认为各生态风险之间的转化与城镇化发展、人类活动干扰以及生态保护等相关政策息息相关,中生态风险地区具有不稳定性,易向低或者高等级转换。

### 3.2 讨论

研究区在 2000—2010 年建设用地面积在空间上朝东北、西南、正东、西北方向集聚式扩展,耕地、林地和草地面积明显减少,这与张琳琳等<sup>[23]</sup> 在 1996—2009 年对济南市城市空间格局的变化分析结果相一致,2000—2010 年的景观生态风险降低,与李承航等研究结果分析相符<sup>[24]</sup>,同时反映出建筑用地的有序扩张对提高生态环境稳定性、降低景观生态风险具有积极影响。研究区在 2010—2020 年,人口持续增长,在基本农田保护情境下,人们注重开发利用未利用地,导致未利用地面积减少,未利用地脆弱度较大,易受人类活动干扰,使生态风险有所上升,这也与王恩等<sup>[25]</sup> 的研究结果相互验证,人口密度对降低景观生态风险具有消极影响。

此外,本研究仍存在不足,研究仅对生态风险时空分异特征进行分析,缺少对未来景观生态风险变化的预测,未来需进一步研究完善。

### 参考文献:

- [1] 黄钰清,李晓尧,于强,等.1995—2018 年黄河流域土地利用变化及驱动力分析[J].西北林学院学报,2022,37(6):113-121.
- [2] HUANG Y Q,LI X Y,YU Q,*et al.* An analysis of land use change and driving forces in the Yellow River basin from 1995 to 2018[J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37(6):113-121. (in Chinese)
- [3] 王俊俊,弓弼.西咸新区景观格局演变及其生态风险分析[J].西北林学院学报,2019,34(2):250-256.
- [4] WANG J J,GONG B. Evolution of landscape pattern and ecological risk in Xixian New Area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(2):250-256. (in Chinese)
- [5] 陈媛媛,雷鸣,王泽远,等.基于 Sentinel 卫星影像的土地利用类型提取:以丽水市莲都区为例[J].森林工程,2022,38(2):54-61.
- [6] CHEN Y Y,LEI M,WANG Z Y,*et al.* Extraction of land use types based on sentinel images-a case study of Liandu district, Lishui[J]. Forest Engineering,2022,38(2):54-61. (in Chinese)
- [7] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
- [8] PENG J,DANG W X,LIU Y X,*et al.* Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(4):664-677. (in Chinese)
- [9] 李婷,王志芳,高伟明.基于景观格局的河北省月岛生态风险评价[J].海洋湖沼通报,2021,43(6):169-178.
- [10] LI T,WANG Z F,GAO W M. Ecological risk assessment of Yuedao in Hebei Province based on landscape pattern[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2021,43(6):169-178. (in Chinese)
- [11] AYRE K K,LANDIS W G. A bayesian approach to landscape ecological risk assessment applied to the upper grande ronde watershed,oregon[J]. Human & Ecological Risk Assessment An International Journal,2012,18(4-6):946-970.
- [12] WIEDMANN T,BARRETT J. A review of the ecological footprint indicator—perceptions and methods[J]. Sustainability,2010,2(6):1645-1693.
- [13] JIMMO A,ISBISTER K M,LAMB E G,*et al.* Linking herbicide dissipation to soil ecological risk along transmission rights-of-way in the Yukon Territory,Canada[J]. Journal of Environmental Quality,2018,47(6):778-783.
- [14] 王洁,摆万奇,田国行.青藏高原景观生态风险的时空特征[J].资源科学,2020,42(9):1739-1749.
- [15] WANG J,BAI W Q,TIAN G X. Spatiotemporal characteristics of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau[J]. Resources Science,2020,42(9):1739-1749. (in Chinese)
- [16] 田雅楠,张梦晗,许荡飞,等.基于“源-汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建[J].生态学报,2019,39(7):2311-2321.
- [17] TIAN Y N,ZHANG M H,XU D F,*et al.* Landscape ecological security patterns in an ecological city, based on source-sink theory[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(7):2311-2321. (in Chinese)
- [18] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].生态学报,2020,40(18):6472-6485.
- [19] KANG Z W,ZHANG Z Y,WEI H,*et al.* Landscape ecological risk assessment of Manas River basin based on land use change[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(18):6472-6485. (in Chinese)
- [20] 张月,张飞,周梅,等.干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J].应用生态学报,2016,27(1):233-242.
- [21] ZHANG Y,ZHANG F,ZHOU M,*et al.* Spatial and temporal assessment of landscape ecological risk in inland Aybi Lake area in arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(1):233-242. (in Chinese)
- [22] 于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107.
- [23] YU H,LIU X L,ZHAO T M,*et al.* Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountain National Park based on landscape pattern[J]. Ecological Science,2022,41(2):99-107. (in Chinese)
- [24] 盛书薇,董斌,李鑫,等.升金湖国家自然保护区土地利用生态风险评价[J].水土保持通报,2015,35(3):305-310.
- [25] SHENG S W,DONG B,LI X,*et al.* Assessment of land use ecological risk in Shengjinhu National Nature Reserve[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(3):305-310. (in Chinese)
- [26] 李少玲,谢苗苗,李汉廷,等.资源型城市景观生态风险的时空分异:以乌海市为例[J].地学前缘,2021,28(4):100-109.

- LI S L,XIE M M,LI H T,*et al.* Spatial-temporal differentiation of ecological risks in resource-based urban landscapes:a case study of Wuhai city[J]. Earth Science Frontiers,2021,28(4):100-109. (in Chinese)
- [16] 王金南.黄河流域生态保护和高质量发展战略思考[J].环境保护,2020,48(Supp. 1):18-21.
- WANG J N. Ecological protection and high-quality development strategy thinking in the Yellow River Basin[J]. Environmental Protection,2020,48(Supp. 1):18-21. (in Chinese)
- [17] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(4):265-274.
- LIU X Z,LI X S,JIANG D M. Landscape pattern and ecological risk assessment of the Yellow River Basin based on land use change[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(4):265-274. (in Chinese)
- [18] 许学工,林辉平,付在毅,等.黄河三角洲湿地地区生态风险评价[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(1):111-120.
- XUE X G,LIN H P,FU Z Y,*et al.* Regional ecological risk assessment of wetlands in the Yellow River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(1):111-120. (in Chinese)
- [19] 尹德洁,侯冰钰,王冬薇,等.近20年来黄河沿岸济南区段缓冲带景观格局梯度分析[J].中国城市林业,2022,20(3):14-21.
- YIN D J,HOU B Y,WANG D W,*et al.* Gradient analysis of landscape pattern of buffer zone in Jinan section along the Yellow River in the past 20 years[J]. Journal of Chinese Urban Forestry,2022,20(3):14-21. (in Chinese)
- [20] 贾艳艳,唐晓岚,刘振威,等.长江沿岸芜湖区段景观生态风险时空演变分析[J].中南林业科技大学学报,2019,39(11):78-87.
- JIA Y Y,TANG X L,LIU Z W,*et al.* Spatial-temporal evolution analysis of landscape ecological risks in Wuhu section along the Yangtze River[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2019,39(11):78-87. (in Chinese)
- [21] 潘竟虎,刘晓.疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.
- PAN J H,LIU X. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(3):791-799. (in Chinese)
- [22] 钱佳洋,秦富仓,王迪海,等.1998—2018年永寿县景观格局变化及驱动力分析[J].西北林学院学报,2020,35(6):279-286.
- QIAN J Y,QING F C,WANG H D,*et al.* Change and driving force of landscape pattern in Yongshou County during 1998—2018[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(6):279-286.
- [23] 张琳琳,孔繁花,尹海伟,等.基于景观空间指标与移动窗口的济南城市空间格局变化[J].生态学杂志,2010,29(8):1591-1598.
- ZHANG L L,KONG F H,YIN H W,*et al.* Changes of Jinan urban spatial pattern based on landscape spatial indicators and moving windows[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(8):1591-1598. (in Chinese)
- [24] 李承航,张文春,林楠,等.基于土地利用变化的沈阳市景观生态风险评价及驱动力分析[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2022,53(4):383-393.
- LI C H,ZHANG W C,LIN N,*et al.* Landscape ecological risk assessment and driving force analysis of Shenyang based on land use change[J]. Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition,2022,53(4):383-393. (in Chinese)
- [25] 王恩,李新举.城镇化背景下济南市土地利用变化驱动机制分析[J].中国人口资源与环境,2017,27(S2):151-155.
- WANG K,LI X J. Analysis of the driving mechanism of land use change in Jinan under the background of urbanization[J]. China Population,Resources and Environment,2017,27(S2):151-155. (in Chinese)