

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.008; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.008.

黄玺铭, 陈勇, 李森, 等. 基于“格局-服务-灾害”的生态脆弱区综合生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):330-340, 350.

Huang Ximing, Chen Yong, Li Sen, et al. Comprehensive ecological risk assessment in ecologically fragile regions based on “pattern-service-disaster” framework[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):330-340, 350.

# 基于“格局-服务-灾害”的生态脆弱区 综合生态风险评价

黄玺铭<sup>1</sup>, 陈勇<sup>1</sup>, 李森<sup>2</sup>, 李蒙龙<sup>1</sup>, 钟浩强<sup>1</sup>

(1. 浙江科技大学 土木与建筑工程学院, 杭州 310023;

2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 揭示生态脆弱地区生态风险的时空分异规律, 为生态脆弱区生态管理与实现可持续发展目标提供科学依据。[方法] 基于“格局-服务-灾害”框架提出了一种新的生态风险评价方法, 强调景观格局(系统结构)、生态系统服务(系统功能)与自然灾害(外部扰动)三者的协同作用, 以宁夏盐池县为例, 构建了三元视角下综合生态风险评价模型。[结果] (1) 景观格局风险最初因草原恢复政策而下降, 但随后因城市化驱动的景观破碎化而略有增加。(2) 生态系统服务风险显著降低, 从2000年的高风险主导转变为2023年的低风险主导。(3) 自然灾害风险表现出局部波动, 高风险区域集中在易发生旱涝转换的南部黄土丘陵地区。(4) 综合生态风险指数从0.5314降至0.4603, 85.85%的地区生态风险水平较23年前有所下降。空间上, 高风险区集中在西北荒漠化草原和南部黄土丘陵地区, 低风险区主要为生态环境重点治理、自然保护区广布的中部和东部地区。[结论] 盐池县生态风险在23年间有较大幅度的降低。充分考虑生态脆弱区生态系统结构、功能与外部扰动下的综合生态风险评价模型能够较为全面地反映其特殊地域性的生态风险动态。

**关键词:** 生态风险; 景观格局; 生态系统服务; 自然灾害; 时空分异; 生态脆弱区; 盐池县

中图分类号: X821; P901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0330-11

## Comprehensive ecological risk assessment in ecologically fragile regions based on “pattern-service-disaster” framework

Huang Ximing<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>1</sup>, Li Sen<sup>2</sup>, Li Menglong<sup>1</sup>, Zhong Haoqiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology,

Hangzhou 310023, China; 2. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid

Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal differentiation of ecological risks in ecologically fragile regions, providing a scientific basis for ecological management and the realization of sustainable development goals in these regions. [Methods] A new ecological risk assessment method based on the “pattern-service-disaster” framework was proposed, emphasizing the synergy among landscape patterns (system structure), ecosystem services (system function), and natural disasters (external disturbances). Using Yanchi County in Ningxia as a case study, a comprehensive ecological risk assessment model from a ternary perspective was constructed. [Results] (1) Landscape pattern risk initially decreased due to grassland restoration policies, but later slightly increased due to urbanization-driven landscape fragmentation. (2) Ecosystem service risk decreased significantly, shifting from high-risk dominance in 2000 to low-risk dominance in 2023. (3) Natural disaster risk

收稿日期: 2025-03-28

修回日期: 2025-04-14

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(23YJC790007); 中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项(B类先导专项)(XDB0720401)

第一作者: 黄玺铭(2001—), 男, 浙江乐清人, 硕士研究生, 研究方向为区域生态经济。E-mail: 212402833016@zust.edu.cn

通信作者: 陈勇(1985—), 男, 山东邹城人, 博士, 副研究员, 主要从事生态经济与区域规划研究。E-mail: chen Yong@zust.edu.cn

http://stbcyj.paperonice.org

exhibited localized fluctuations, with high-risk areas concentrated in the southern loess hilly region prone to drought-flood transitions. (4) The comprehensive ecological risk index decreased from 0.531 4 to 0.460 3, with 85.85% of the study area showing reduced ecological risk levels compared to those 23 years ago. Spatially, high-risk areas were concentrated in the northwestern desertified grasslands and southern loess hilly areas, while low-risk areas were mainly located in the central and eastern regions benefiting from intensive ecological restoration and nature reserves. [Conclusion] Yanchi County has achieved a significant reduction in ecological risk over the past 23 years. The comprehensive ecological risk assessment model that fully considers the ecosystem structure, functions, and external disturbances in ecologically fragile regions can more comprehensively reflect the region-specific dynamics of ecological risk.

**Keywords:** ecological risk; landscape pattern; ecosystem services; natural disasters; spatiotemporal differentiation; ecologically fragile regions; Yanchi County

区域生态风险评价作为衡量特定区域内由单一或复合压力因子引发的、已存在或持续发生的生态系统负面效应的研究手段<sup>[1-2]</sup>,是生态系统保护与监测的重要方式。20世纪90年代,美国环保局提出了生态风险评价研究的基本范式,即问题制定、分析和风险表征<sup>[2]</sup>。此后生态风险评估体系开始突破生物毒理学研究范畴,将水文环境、气候变化、生态系统服务等纳入评估对象<sup>[3]</sup>。这种转变体现了风险评价从微观化学污染向区域环境整体性研究的跨越,强调对生态系统各要素间复杂关联的综合性考量。由于地域范围和时空尺度的扩大,其涉及的风险源和风险受体必然不能用微观尺度的风险因子作为评价终点。在此背景下,以区域为研究尺度、以地理学和宏观生态学理论为切入点的生态风险评价逐渐兴起并成为该领域的研究热点<sup>[4]</sup>。

与传统生态风险评价相比,区域生态风险评价强调综合性与空间异质性<sup>[5]</sup>,其核心在于整合大尺度环境下的多压力源、多风险受体及复杂交互过程<sup>[6]</sup>,进而揭示生态风险的空间分布与演化规律。在全球各区域面临人类活动造成压力的同时,生态系统服务能力退化、自然灾害频发等问题交织叠加。有学者将区域生态风险定义为自然灾害、人类活动与景观脆弱性的综合表征<sup>[7]</sup>。其中,土地利用变化是反映区域尺度人类活动与自然因素对生态系统干扰程度的直接外在表现形式之一<sup>[8]</sup>,这方面的研究侧重于评估以景观镶嵌体相对于其最优格局所偏离的程度而可能引发的风险效应<sup>[9]</sup>,主要研究领域为流域<sup>[10]</sup>、人类活动剧烈的城市或沿海地区<sup>[11]</sup>、自然保护区等<sup>[12]</sup>生态敏感地区;景观脆弱性近年来常用生态系统服务进行量化<sup>[13]</sup>,其有效关联了景观格局与生态过程,并以物质量或货币形式展现人类直接或间接地从生态系统结构、功能和过程中获得的各种收益<sup>[14]</sup>,能够从景观与服务功能的状态表征生态风险程度;与自

然灾害相关的风险评估近年来则主要围绕洪涝<sup>[15]</sup>、地质<sup>[16]</sup>、干旱等<sup>[17]</sup>,除了采用传统风险评价中利用遥感反演的指标叠加法,一些学者则通过源汇景观模型<sup>[18]</sup>、生态水文模型等<sup>[19]</sup>探究生态过程对自然灾害的调控作用。

宁夏盐池县隶属我国北方农牧交错带,是典型的生态脆弱区<sup>[20]</sup>,该地特殊的自然本底条件与剧烈的人地交互作用使之成为人地耦合系统研究的焦点区域。20多年来,盐池县虽通过实施退耕还林、禁牧封育等生态政策实现了沙漠化的逆转,但其生态环境仍具有突出的脆弱性与敏感性特征。作为黄河流域生态屏障的关键节点,其生态系统面临三重风险压力:一是历史遗留的荒漠化问题,虽经生态工程治理实现局部逆转,但生态脆弱本底未根本改变;二是人类活动导致的生态空间挤压,景观连通性降低<sup>[8]</sup>;三是其特殊地质结构与气候条件加剧“旱涝急转”灾害链的发生。这些问题的交织使得现有生态风险评价模型难以支撑生态脆弱区生态风险精准管理决策,主要表现为分析维度的单一以及对不同地域评估方法的机械套用,缺乏对区域差异性与系统性的全面考量。因此,本研究为突破以往研究的局限,通过强调景观格局、生态系统服务、自然灾害三者的相互作用关系,建立多源数据驱动的盐池县区域生态风险三元协同评价框架,以期对盐池县乃至我国实现联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)中“陆地生态”(SDG15)与“气候行动”(SDG13)目标的协同推进提供研究思路。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

盐池县位于中国宁夏回族自治区东部(106°35′—107°41′E, 37°04′—38°09′N),处于陕、甘、宁、蒙四省区七县交界地带,北接毛乌素沙漠南沿,南依黄土高

原北麓。该地区日照充足,干旱少雨,年均温 $8.3^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量 $300\text{ mm}$ ,呈现出显著的大陆性气候特征,是中国北方典型的干旱半干旱生态过渡带。地形地貌上呈现明显的阶梯式分布:南部黄土丘陵区海拔 $1\ 600\sim 1\ 800\text{ m}$ ,沟壑纵横;北部鄂尔多斯台地缓坡丘陵海拔降至 $1\ 400\sim 1\ 600\text{ m}$ ,地势趋于平缓开阔。境内分布有草原、荒漠、湿地等多元生态系统,2022年森林覆盖率已达 $27.36\%$ ,草原综合植被盖度 $58.5\%$ ,分布有哈巴湖国家级自然保护区等生态景区。作为黄河流域生态屏障的重要组成部分,盐池县曾面临严重荒漠化威胁,在二十多年的持续治理下,沙化土地治

理面积已超过 $1\ 300\text{ km}^2$ ,实现“人进沙退”的生态逆转。根据《盐池县国土空间总体规划(2021—2035年)》,盐池县将构建以哈巴湖国家级自然保护区为生态核心的中部、北部防风治沙带及西北部荒漠草原风沙治理区和南部黄土丘陵水土流失治理廊道,统筹全域生态空间格局,实现生态空间可持续发展。

## 1.2 数据来源

本文研究的盐池县综合生态风险主要来源于景观格局、生态系统服务能力、自然灾害3个风险子系统,采用的数据主要是与这三元系统相关的土地覆被、地形、植被、气候、社会等数据(表1)。

表1 数据基本信息

Table 1 Basic information of data

数据名称	年份	空间分辨率	数据来源
行政边界	2015	—	资源环境科学数据平台( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
土地覆被	2000—2023	30 m	国家科技资源共享服务平台( <a href="https://www.nesdc.org.cn/">https://www.nesdc.org.cn/</a> )
归一化植被指数	2000—2023	30 m	国家科技资源共享服务平台( <a href="https://www.nesdc.org.cn/">https://www.nesdc.org.cn/</a> )
太阳辐射	2000—2023	$0.008^{\circ}$	国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )
月均气温	2000—2023	$0.008^{\circ}$	国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )
月均降水	2000—2023	$0.008^{\circ}$	国家科技资源共享服务平台( <a href="https://www.nesdc.org.cn/">https://www.nesdc.org.cn/</a> )
植被健康指数	2003—2022	$0.008^{\circ}$	国家科技资源共享服务平台( <a href="https://www.nesdc.org.cn/">https://www.nesdc.org.cn/</a> )
高程	2020	30 m	资源环境科学数据平台( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
城乡居民区分布	2000—2020	100 m	Zenodo 数据平台( <a href="https://zenodo.org/">https://zenodo.org/</a> )
道路网	1995、2012、2015—2023	—	资源环境科学数据平台( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> ) 开放街道地图( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )

## 2 研究方法

### 2.1 理论框架

生态脆弱地区人地耦合系统存在先天的复杂性与脆弱性特征<sup>[21]</sup>,其生态风险的产生及演化是生态系统结构、功能与外部扰动相互作用的结果。其中,景观格局作为生态系统结构在空间上的表征,能够对特定生态功能或过程产生影响。景观的异质性程度、要素空间分布格局及层级嵌套关系体现了土地利用对生态环境的驱动效应。各种生态功能与过程在不同尺度景观上作用可能产生不利后果<sup>[4]</sup>,反映出由生态系统自身结构所产生的风险压力。生态系统服务是生态系统功能满足人类需求与偏好的一种表现<sup>[22]</sup>,固碳释氧、水土保持、水源涵养、防风固沙等关键服务因子的分配方式能够反映系统的功能状态。在以往研究中,生态系统服务的完整性与强度越高,表示其抵御风险的能力也越强<sup>[13]</sup>。自然灾害是在无人为活动介入的自然环境条件下发生的外部干扰<sup>[23]</sup>。作为生态系统结构变化与功能演替的外部扰动因子,自然灾

害级联、并发等效应的扩展会给自然生态系统带来沉重的压力<sup>[24]</sup>,导致生态格局破坏与服务功能衰减。特别是在生态脆弱区,生态系统本身承载力较低,灾害扰动的作用更为显著与剧烈,放大了生态风险效应,甚至可能导致生态系统不可逆的退化。

“格局-服务-灾害”三者构成一个相互作用、相互反馈的系统逻辑关系。首先,景观格局决定生态系统服务的供应与维持,是服务功能实现的前提与基础,而生态系统服务则可能由于人类对功能的需求而反作用于景观格局,导致结构发生调整;其次,灾害扰动对格局与服务具有破坏性干扰作用,可改变原有生态结构与功能,甚至触发系统失稳;最后,景观格局与生态系统服务则在一定程度上可调节和缓解灾害影响,二者共同决定生态系统的抗干扰能力。因此,本研究针对生态脆弱区特殊地域性的生态系统特征,以“格局-服务-灾害”为主线,选取多种景观格局指数、生态系统关键服务功能和典型自然灾害构建综合生态风险评价指标体系与概念模型(图1),以期全面反映生态脆弱区生态风险在多重压力下的响应特征与动态。

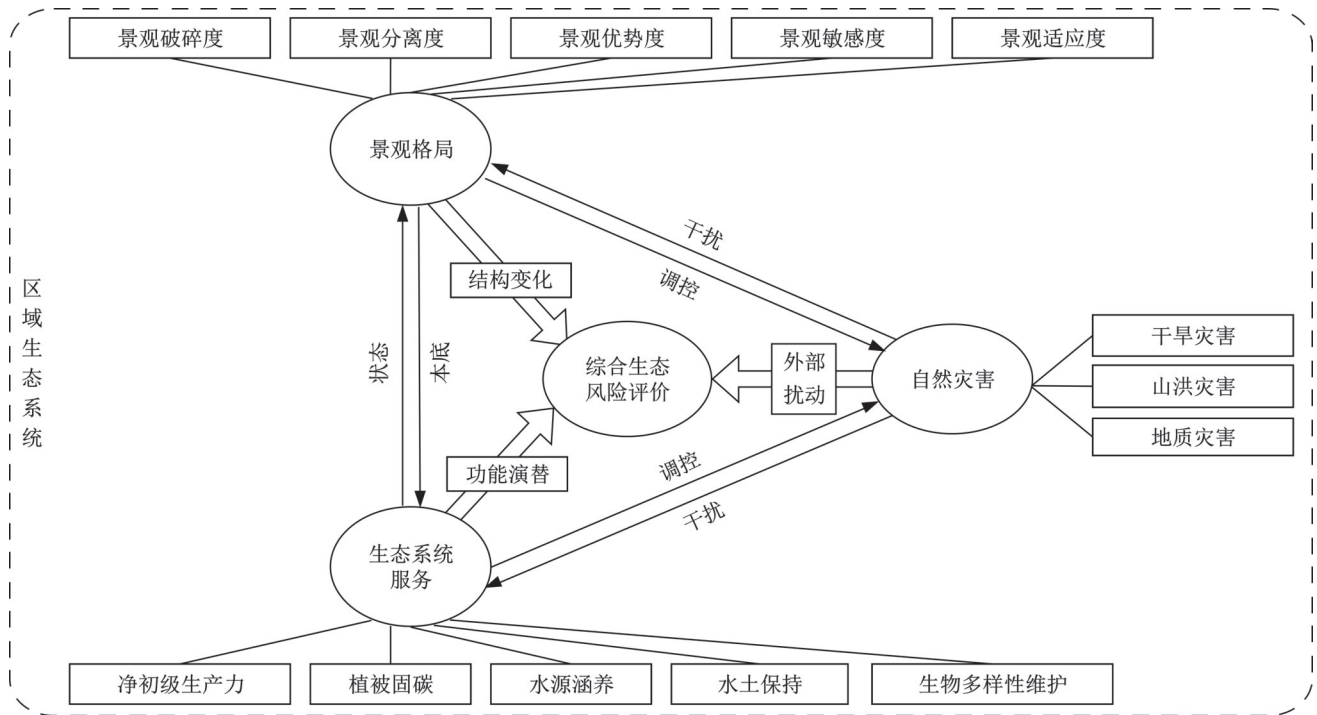


图 1 基于“格局-服务-灾害”的综合生态风险概念模型

Fig. 1 Conceptual model of comprehensive ecological risk based on “pattern-service-disaster” framework

2.2 评价方法

2.2.1 景观格局风险评价子系统 为实现生态风险的空间可视化以表征其时空异质性,依据前人研究和景观生态学原理<sup>[25-26]</sup>,将研究区划分为826个边长3 km×3 km的网格单元,并以每个格网的中心点作为该评价单元内各指标的均值。

本研究以景观干扰度和景观脆弱度来计算区域景观格局风险。相关评价模型如下:

$$LRI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{k,i}}{A_k} \times (E_i + F_i) \quad (1)$$

式中:LRI<sub>k</sub>为第k个风险评价单元的景观格局风险指数;A<sub>k,i</sub>为第i类景观的面积;A<sub>k</sub>为该风险评价单元的面积;E<sub>i</sub>为景观干扰度指数;F<sub>i</sub>为景观脆弱度指数。

(1) 景观干扰度。

$$E_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (2)$$

式中:各指数含义与赋值参考前人研究成果<sup>[26]</sup>。

(2) 景观脆弱度。景观脆弱度指数摒弃以往人为赋值得到的生境脆弱度,通过景观敏感度指数、景观适应度指数的改进算法得来。

$$F_i = LSI_i \times (1 - LAI_i) \quad (3)$$

式中:LSI<sub>i</sub>为景观敏感度指数,由景观易损度指数与景观干扰度指数相乘得到;LAI<sub>i</sub>为景观适应度指数,由Fragstats移动窗格法分别运算斑块丰富密度指数、香农多样性指数、香农均匀度指数再相乘得到。

2.2.2 生态系统服务风险评价子系统 由于盐池县观测站点较少、实测数据较为缺乏,故本文基于NPP

定量指标法模拟了盐池县所提供的主要生态系统服务能力。该方法尤其适用于大范围空间尺度、长时间跨度且历史地理基础数据稀缺的生态系统服务空间量化研究。

首先通过CASA模型计算30 m精度NPP,并基于NPP的植被固碳、水源涵养、水土保持、生物多样性维护等功能衡量生态系统服务能力指数。最后将生态系统服务能力指数作为负向指标进行归一化以表征生态系统服务风险。具体算法详见相关文献<sup>[13,27]</sup>。

2.2.3 自然灾害风险评价子系统 盐池县的主要自然灾害有干旱、山洪、霜冻、冰雹等。干旱灾害是中国西北地区典型的自然灾害,山洪灾害是引发盐池县山体滑坡、崩塌、泥石流等一系列地质灾害的气象因素,二者都是对盐池县及其周边区域生态系统威胁较大的风险源,故本研究通过综合干旱灾害风险与山洪灾害风险来表征盐池县主要自然灾害的风险水平。

(1) 干旱灾害风险评价。采用植被健康指数(Vegetation Health Index, VHI)反映盐池县年度干旱程度。取研究年份前五年干旱指数的平均值来构建干旱等级模型;取土地覆被类型在干旱胁迫下的脆弱程度来表征旱灾脆弱度。参考前人研究成果<sup>[5]</sup>对脆弱度指数进行赋值。

$$D_k = T_k \times V_k \quad (4)$$

式中:T<sub>k</sub>为干旱等级;V<sub>k</sub>为评价单元土地覆被在干旱胁迫下的脆弱度;D<sub>k</sub>为干旱灾害风险。

(2) 山洪灾害风险评价。取研究年份前五年7

月、8月份平均降雨来构建极端降水概率模型以表征洪灾危险度;采用地形因子、农村居民区距离和路网密度来构建洪灾暴露度。具体计算公式如下:

$$M_k = E_k \times H_k \quad (5)$$

$$E_k = 0.4W_k + 0.3Y_k + 0.3Z_k \quad (6)$$

式中: $M_k$ 为山洪灾害风险; $E_k$ 为洪灾暴露度; $H_k$ 为洪灾危险度; $W_k$ 为地形影响因子; $Y_k$ 为农村居民区距离; $Z_k$ 为路网密度;三者对于山洪灾害暴露程度的影响均为正向。

2.2.4 区域生态风险综合评价 采用层次分析法对各风险子系统进行权重赋值,通过构建判断矩阵,分别赋予盐池县景观格局风险、生态系统服务风险、自然灾害风险的权重为0.4,0.4,0.2。

$$R_{ERI} = 0.4R_{pattern} + 0.4R_{services} + 0.2R_{disasters} \quad (7)$$

式中: $R_{ERI}$ 表示生态风险综合生态风险程度值; $R_{pattern}$ 表示景观格局风险程度值; $R_{services}$ 表示生态系统服务风险值; $R_{disasters}$ 表示自然灾害风险值。

### 3 结果与分析

为直观表征生态风险的空间分布格局,以各风险评价单元的中心点作为空间点要素,运用克里金插值法得到研究区生态风险空间可视化图集。将不同年份的插值结果按相同阈值人为划分为4级以更直观地表征生态风险的时空分异特征,得到研究区各子系统风险等级面积占比(表2)与风险时空分布,以保证不同年份间生态风险等级具有可比性。

表2 区域生态风险综合评价结果

Table 2 Comprehensive evaluation results of regional ecological risk

目标层	年份	低风险区		较低风险区		较高风险区		高风险区	
		面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
景观格局风险	2000	481.03	7.36	2100.30	32.11	2498.87	38.21	1459.81	22.32
	2005	1133.21	17.33	2835.14	43.35	1759.47	26.90	812.20	12.42
	2010	1539.43	23.54	3047.60	46.60	1346.19	20.58	606.80	9.28
	2015	1189.39	18.19	2968.40	45.39	1628.46	24.90	753.77	11.53
	2020	1221.96	18.69	2710.29	41.45	1671.56	25.56	935.02	14.30
	2023	1112.72	17.02	2680.23	41.00	1713.94	26.22	1030.80	15.77
生态系统服务风险	2000	48.53	0.74	156.69	2.39	2747.79	41.95	3597.45	54.92
	2005	129.11	1.97	1072.34	16.37	4352.58	66.45	996.45	15.21
	2010	1798.28	27.45	2293.07	35.01	2156.27	32.92	302.85	4.62
	2015	530.71	8.10	2487.01	37.97	3384.19	51.66	148.55	2.27
	2020	2558.37	39.06	2239.89	34.19	1594.33	24.34	157.89	2.41
	2023	1710.36	26.11	3085.47	47.10	1486.45	22.69	268.19	4.09
自然灾害风险	2000	2897.60	44.23	2741.24	41.85	814.03	12.43	97.61	1.49
	2005	3641.54	55.59	2015.53	30.77	789.60	12.05	103.80	1.58
	2010	3230.78	49.32	1967.82	30.04	762.47	11.64	589.40	9.00
	2015	3693.76	56.39	1655.28	25.27	797.37	12.17	404.07	6.17
	2020	1778.21	27.15	3373.79	51.50	868.58	13.26	529.89	8.09
	2023	3603.31	55.01	1559.44	23.81	1243.71	18.99	144.02	2.20
综合生态风险	2000	149.02	2.28	607.66	9.28	3122.75	47.67	2671.04	40.78
	2005	791.52	12.08	2875.47	43.90	2473.56	37.76	409.93	6.26
	2010	3000.74	45.81	2506.57	38.27	1008.14	15.39	35.02	0.53
	2015	1117.13	17.05	3190.25	48.70	2157.57	32.94	85.53	1.31
	2020	3080.26	47.02	2396.40	36.58	1015.05	15.50	58.76	0.90
	2023	3123.42	47.68	2220.23	33.89	1113.10	16.99	93.72	1.43

#### 3.1 景观格局风险时空演变分析

从表2、图2可知,2000—2023年期间盐池县景观格局低风险区与较低风险区面积占比先增长、后略有减小,其中较低风险区自2005年后持续保持最大面积

占比,成为研究区主导性风险等级类型;较高风险区与高风险区面积占比先大幅度减小,后略有回升,综合来看研究期间景观格局风险呈现下降趋势。

在时间变化上,2000—2023年盐池县景观格局

风险整体呈现先下降、后略微上升的趋势,全域风险指数在 2010 年达到最低,这一变化表明禁牧、退耕还林等生态保护政策的实施对盐池县生态环境有较大幅度的改善。林草地面积扩张、耕地面积收缩导致的土地完整性与稳定性提升,进而使得各景观格局指数都有不同程度的下降是这一时期最显著的变

化特征;2010 年后景观生态风险呈现缓慢上升趋势,整体趋向于破碎化和复杂化,造成这一变化的主要原因是盐池县城镇化进程的推进,建设用地规模的增加和各类开发建设活动使得生态空间受到侵占,造成景观连通性降低与景观破碎度增加,人为胁迫风险升高。

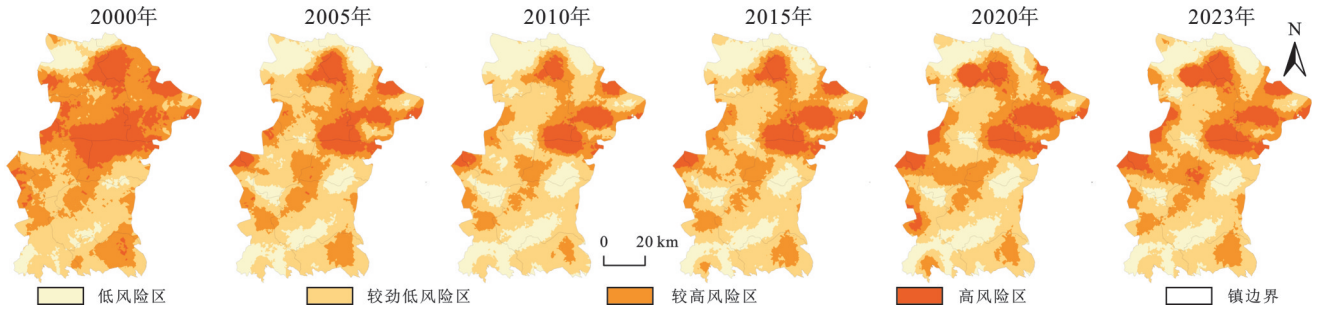


图 2 盐池县 2000—2023 年景观格局风险等级空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of landscape pattern risk levels in Yanchi County (2000—2023)

在空间分布上,景观格局风险大致呈现县域中部、北部地区高、南部地区较低的空间格局。风险高值区主要集中于青山乡、王乐井乡、高沙窝镇和花马池镇,其中高沙窝镇与花马池镇以建设用地、耕地为主,生态型景观面积小、人类建设与开发活动频繁,近年来除城镇化发展带来的人口压力与工业污染外,大面积光伏发电项目也影响着自然生态系统本底,这些都加重了人类活动对景观格局的干扰强度。其余高值区土地类型以沙地等未利用地为主,这类区域虽大多位于乡镇域边缘地带,远离城镇、经济发展水平落后,但由于其自然本底及早期人为破坏等原因,生态系统的韧性较差,生态风险

程度较高;风险低值区则主要分布于县域北部与南部地区,该区域土地类型以灌木林、疏林地和草地为主,人类活动强度低,生态系统稳定性与整体性较高。

### 3.2 生态系统服务风险时空演变分析

2000—2023 年期间盐池县生态系统服务风险各等级面积占比变化显著(图 3),低风险区与较低风险区面积占比先大幅度增长,后波动增长,2010 年后研究区总体以低等级风险为主;较高风险区与高风险区面积占比先大幅度下降,后波动下降,高风险区从 2000 年的 54.92% 下降至 2023 年的 4.09%,转出面积为所有风险等级类型中最大。

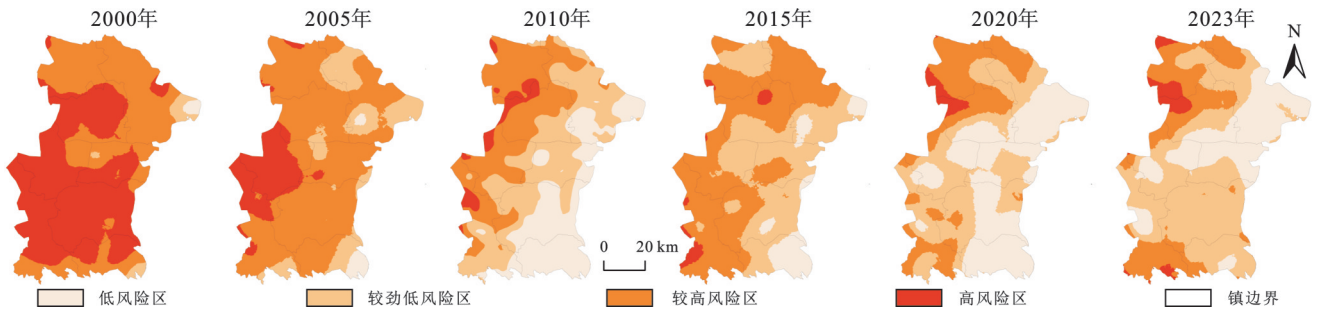


图 3 盐池县 2000—2023 年生态系统服务风险等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ecosystem service risk levels in Yanchi County (2000—2023)

在时间变化上,盐池县生态系统服务风险整体呈下降趋势,具体表现为先稳步下降、后波动下降的态势。2000—2010 年期间县域全境范围内风险都呈降低趋势,典型区域为青山乡、大水坑镇和麻黄山乡等,这表明盐池县自 2002 年禁牧等生态政策实施以来植被得到极大恢复,草原牧区生态建设工程成效显著,生态系统植被固碳、水源涵养、水土保持、生物多样性维护等服务功能与供给能力显著增强;2010—2023 年期间风险具体表现为上升、下降、再上升的波动性态势,但整体风险以及高风险区面积较 2010 年

仍有所减少,这一时空变化特征是盐池县经济发展加速、生态保护措施实施与生态系统自我调节机制共同作用的结果。总体而言,研究期间内盐池县生态系统服务风险大幅下降,风险等级结构已实现高风险主导向低风险主导的转化。

在空间分布上,生态系统服务风险整体大致呈现出西部高、东部低的格局,具有显著的空间异质性。风险高值区近 23 年变化较为明显,近年来主要分布在县域西北部的高沙窝镇、王乐井乡与西南部的惠安堡镇。尽管过去已实施较为严格的禁牧政

策,但受先天资源禀赋、人为干扰等影响,该区域至今仍面临着土地沙化的潜在威胁,植被覆盖度和单位面积生物量较低,生态系统稳定性差、自我恢复能力弱,导致其所能提供的生态系统服务与供给能力低下;风险低值区则主要分布在具有重要生态功能和水土流失重点治理的区域,如哈巴湖国家级自然保护区、沙边子国家沙漠公园等重要水土保持与防风固沙区,该片区自然条件较为优越,区域综合植被覆盖度高,生态系统展现出较强的稳定性、抗干扰能力与自我调节恢复能力。

### 3.3 自然灾害风险时空演变分析

在时间变化上,2000—2023年期间盐池县自然灾害风险波动变化,整体以低风险与较低风险等级为主。具体表现为研究期间内低风险区面积增加,较低风险区面积减小,高风险与较高风险略微增加的态势。这可能是由于23年间盐池县的生态修复政策使得部分区域发生自然灾害的风险概率降低与损失减小,同时土地利用强度的提升、农村居民点的增加与道路网的延伸趋势放大了人口与财产在灾害易

发区的空间集聚,导致由山洪引发的滑坡、泥石流等灾害的风险损失提升。

在空间分布上,自然灾害风险具有显著的空间集聚性,具体表现为县域南部高、北部低的空间格局。风险高值区主要分布在麻黄山乡、大水坑镇等,典型地区为麻黄山乡,其地处黄土高原丘陵区北部,境内沟壑纵横、梯田广布且降雨时空分布不均,易引发“旱涝急转”的复合灾害,给农牧民生产生活造成极大影响。由于其受人类活动、极端气象等多种风险源综合作用,区域内生态系统受到较大的负面影响,故其受自然灾害胁迫下的生态风险程度最高;低值区主要分布在冯记沟乡、青山乡、高沙窝镇等地,一方面,该类地区远离耕地与城镇用地,人类开发与建设活动较少,遭遇自然灾害所受到的风险损失小;另一方面,该类地区地势较为低平,植被覆盖度良好,通过构建干旱与防汛响应机制、人工湖等水利基础设施网络进行水文循环调节,显著提升了区域水资源时空分配效能,从而在灾害链抑制层面形成多维度预防体系,潜在在自然灾害风险较低(图4)。

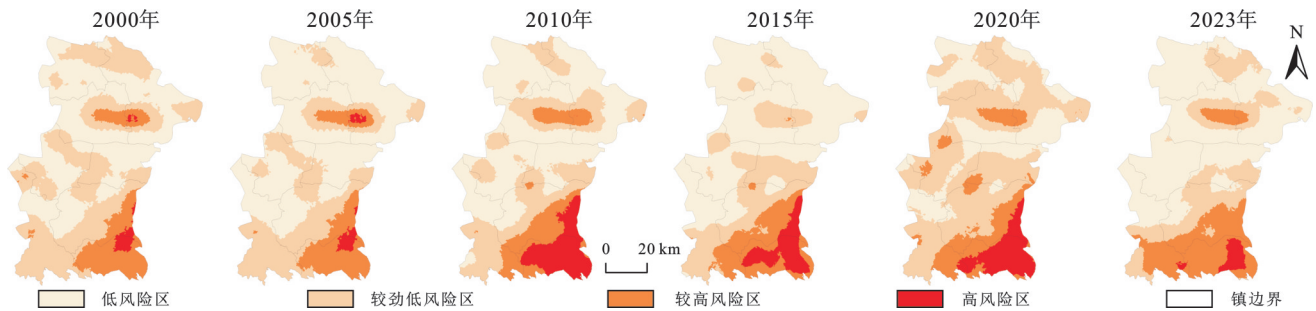


图4 盐池县2000—2023年自然灾害风险等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of natural disaster risk levels in Yanchi County (2000—2023)

### 3.4 综合生态风险时空演变分析

对景观格局风险、生态系统服务风险、自然灾害风险3个生态风险子系统进行赋权运算,得到研究区综合生态风险评价结果。

3.4.1 时间变化特征 2000—2023年期间盐池县综合生态风险等级占比变化显著,整体呈现先逐步下降、后波动变化的趋势,全域风险指数由0.5314下降至0.4603。其中,高生态风险区占比的变化最为显著,由2000年的40.78%下降至2023年的1.43%,已成为盐池县占比最低的生态风险等级类型;较高生态风险区占比大幅度降低,从2000年的47.67%下降至2023年的16.99%;较低生态风险区占比变化幅度较大,从2000年的9.28%上升至2023年的33.89%;低生态风险区从2000年的2.28%上升至2023年的47.68%,与高生态风险区占比不断降低的趋势相互呼应。

3.4.2 空间变化特征 从图5可以看出,盐池县综合生态风险整体呈现西北部、南部地区高,中部、东部地

区低的空间分布特征。其中高值区主要位于惠安堡镇、麻黄山乡、王乐井乡和高沙窝镇。一方面,该类地区土地覆被类型多为建设用地、耕地和裸地,建设用地扩张、人口和工业产业集聚化程度加大导致的区域内生境破碎化,使得景观格局风险较高;另一方面,先天不足的自然本底与农牧业粗放的土地利用模式导致区域内生态服务功能和韧性较差,抵御风险的能力较弱。多重驱动因素的叠加效应使得该区域生态系统可能遭受到的干扰更剧烈,区域整体生态风险处于较高水平。

低值区主要位于花马池镇、青山乡、冯记沟乡等地区,受生态政策影响,近年来自然保护区广泛建立,境内拥有丰富的林草地资源,植被覆盖率高,因此内部生态系统结构相对稳定,景观多样性较丰富。典型区域为盐池县政府驻地花马池镇,在城镇建设用地扩张的背景下仍能维持较低综合生态风险等级,反映了其通过空间规划约束城镇开发边界、生态修复工程提升系统韧性、特色产业选择降低环境负

荷的发展策略在政策扶持、技术支撑和民众参与的协同作用下,能够有效维系经济发展与生态保护的

动态平衡。因此各子系统胁迫下的生态风险值均较低,综合生态风险等级低。

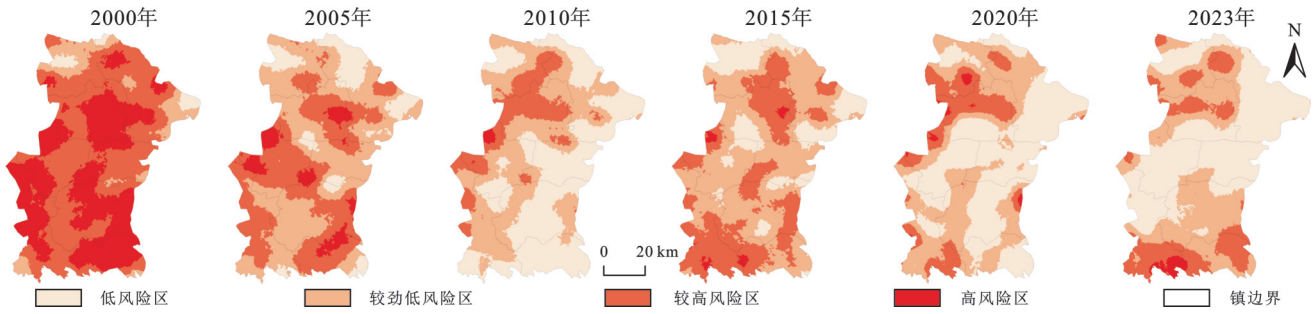


图 5 盐池县 2000—2023 年综合生态风险等级空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of comprehensive ecological risk levels in Yanchi County (2000—2023)

3.4.3 整体时空演变特征 为进一步揭示盐池县综合生态风险等级的时空变化特征,本研究统计了 2000—2023 年各等级综合生态风险的转移面积(表 3),并对生态风险等级变化幅度与空间分布格局进行可视化(图 6)。

生态环境质量有所好转,综合生态风险不断降低。具体来说,2000 年县域范围内除北部和东部部分地区生态风险等级较低外,高风险和较高风险占据研究区大部分地区,表明禁牧等生态政策实施前人类不合理的经济活动已造成严重的生态风险效应,使得土地荒漠化、生态系统服务能力低下,综合生态风险值最高;截至 2010 年,综合生态风险逐渐下降,此后较低风险和低风险开始占据县域大部分地区,并逐渐形成北部、南部风险较高,东部、中部风险较低的空间格局。

盐池县近 23 年生态风险格局演变显著,风险等级动态变化面积达 5 773.01 km<sup>2</sup>,占全域面积的 88.13%。风险等级转移特征表现为低、较低风险区呈现净增加趋势,转入规模显著高于转出量;而较高、高风险区则呈现显著缩减态势。这表明盐池县

表 3 盐池县 2000—2023 年综合生态风险转移矩阵

Table 3 Transfer matrix of comprehensive ecological risk in Yanchi County (2000—2023)

km<sup>2</sup>

综合生态风险等级	2023 年				转出面积
	低风险区	较低低风险区	较高低风险区	高风险区	
低风险区		0.45			0.45
较低低风险区	407.03		65.65		472.68
2000 年 较高低风险区	1613.62	942.64		83.15	2639.41
高风险区	954.19	1142.15	564.12		2660.46
转入面积	2974.85	2085.25	629.77	83.15	5773.01

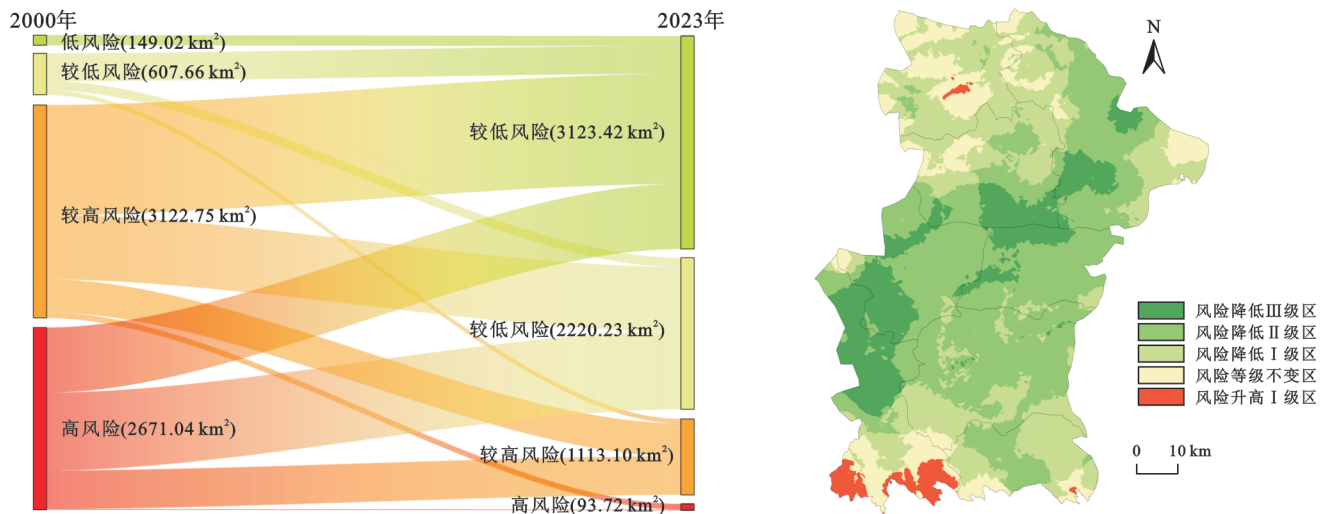


图 6 盐池县 2000—2023 年综合生态风险等级转移

Fig. 6 Transfer of comprehensive ecological risk levels in Yanchi County (2000—2023)

其中,低生态风险区净变化量以占总变化量的 51.52% 位居第一,其显著的净转入特征与高风险区的大量转出相对应;较低风险区的转出以流向低风险区为主,占总变化量的 15.3%;较高生态风险区主要往低生态风险区与较低生态风险区进行迁移,净转出量为 2 555.81 km<sup>2</sup>;高风险区净变化量次于低风险区,占总变化量的 44.64%,但其转出面积最大,为 2 660.46 km<sup>2</sup>,其中 42.93% 流入较低风险区,35.87% 流入低风险区,21.2% 流入较高风险区。综合生态风险等级在县域中部地区多有跳跃两个及以上风险等级进行转移的概率。

研究区 23 年间风险等级下降区面积为 5 623.75 km<sup>2</sup>,占比为 85.85%。其中,较高风险区流入低风险区的面积占转入总面积的比例最大,为 28.69%;风险等级下降二级的面积占研究区总面积的比例最大,为 42.07%。这表明在经历禁牧、生态文明建设等生态政策的约束与修复后,境内大部分地区生态系统服务功能逐渐恢复与发展,并且人类开发与建设活动并未超出这一承载限度。区域内原有粗放式的用地模式逐步向绿色高效的用地模式转变,生态环境质量较 2000 年有了较大程度的改善,有力促进了县域内大部分地区由高等级生态风险向低等级生态风险的转化。虽然其间也曾发生生态风险的波动变化,但在城镇化发展与生态保护政策的交互影响下,区域生态系统仍朝着可持续、健康的方向发展。

风险等级升高区面积为 149.25 km<sup>2</sup>,占比为 2.28%,所占面积小且等级仅升高一级,主要集中在研究区西南部的惠安堡镇南端。一方面,该区域作为宁夏与甘肃省级行政区的交界地带,行政区划与自然地理之间的割裂导致生态治理的连续性更容易被人为忽略,跨区域生态问题责任归属可能较为模糊,执法力量不足、环境治理步调不协调,滋生偷牧、偷排等违法活动的概率增加,给生态系统带来更大的压力;另一方面,该区域旱地广布,过度开垦和不合理的耕作模式加剧了土地的荒漠化,使得植被覆盖度降低,生态服务功能减弱,且在遭遇极端强降水天气时更易引发山洪、泥石流等自然灾害,生态风险上升。

风险等级不变区面积为 777.48 km<sup>2</sup>,占比为 11.87%,多分布于研究区的北部与南部地区。一方面,该类型区域可能同时存在能够使得生态风险程度加剧与减轻的因素,局部的生态修复掩盖了邻近区域的退化趋势,二者相互抵消导致总体风险未发生显著变化;另一方面,有研究表明生态恢复工程虽然提高了区域植被覆盖度,但对生态脆弱性的改善作用可能有限<sup>[28]</sup>或具有滞后性,且受制于农业转型程度、土地

开发利用惯性等区域社会经济条件因素,导致生态风险等级未发生显著变化。

## 4 讨论

### 4.1 与已有研究的比较

在以往的生态风险研究中,学者们或依赖景观格局指数的静态堆砌<sup>[26]</sup>,或侧重评估单一灾害事件的易发性<sup>[16]</sup>,或单以生态系统服务的损失量表征流域生态风险<sup>[29]</sup>,鲜有学者在厘清生态系统结构、功能与外部扰动之间相互关系的基础之上,基于景观格局、生态系统服务、自然灾害三元视角进行区域生态风险综合评价。本研究针对典型生态脆弱区生态风险胁迫特点,选取对当地自然环境和人类生产生活具有较高影响的风险因子,构建了适用于西北干旱半干旱生态脆弱区的综合生态风险模型。相对于此前盐池县景观生态风险评价中仅基于土地利用数据计算景观格局指数的方式<sup>[8]</sup>,能更有效地区分同一土地覆被类型下生态风险的差异性,在制定相应对策时更容易采取具有针对性的风险降低措施。例如本文考虑到研究区内大部分地区人口较少、城镇建设用地占比低等特点,弱化了反映当地经济发展状况的指标,将研究重点聚焦于自然生态系统;在自然灾害子系统中通过考量干旱与山洪灾害表征以往研究较为忽视的生态脆弱区多种主导灾害风险的级联与并发效应;在景观格局子系统中增加了适应度、敏感度来改进景观脆弱度指数;在生态系统服务子系统通过净初级生产力作为定量衡量区域生态服务功能的基础数据弥补实测数据缺失的问题。以上方法的调整使得本研究对生态脆弱区生态风险的评估更具有针对性和适用性。

从研究结果来看,本文与前人黄土高原生态风险<sup>[9]</sup>、生态恢复程度等<sup>[30]</sup>研究得出的结论相符。同时,根据《盐池县国土空间总体规划(2021—2035年)》,县域西北部和南部风险高值区分别被纳入荒漠草原风沙治理区和黄土丘陵水土流失治理区,中部、东部风险低值区被纳入哈巴湖国家级自然保护区,这与本研究呈现的盐池县生态风险空间分布格局相对应。由此可见,本文提出的生态风险理论框架与模型能够较为客观地反映盐池县生态系统特征与生态风险强度的时空分异规律,能够为我国北方生态脆弱区生态风险的防控与管理提供科学依据。

### 4.2 局限性与未来展望

本研究虽然涵盖了对盐池县生态风险具有较高影响的风险因子,但仍存在一定的不足之处。首先,本次研究的侧重点偏向自然环境因素之间的相互作用,在社会经济方面仅涉及到居民点、道路网等较为

宏观的指标,未能有效表征生态与社会经济的耦合效应。未来应着重从社会、生态等多个维度建立起更具适用性的评价体系以应对区域内部不同地域类型的差异化特征,比如对于农村地区可以丰富对村民生产生活影响较大的农业指标,对于快速城镇化地区可以增加社会经济压力方面的指标等。其次,本研究由于时间跨度较大且位于我国经济发展较为薄弱的西部地区,受早期数据采集技术限制,存在相关历史地理信息缺失等问题。再次,本文主要参照千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)报告中的支持和调节服务进行生态系统服务评估,对其余服务功能的指标涉及较少,未来可增加游憩、美学等能够表征文化和供给服务功能的指标体系来提高生态系统服务量化的准确性与全面性。

此外,虽然本研究尝试将生态风险解构为景观格局、生态系统服务、自然灾害三元风险子系统,但对于不同子系统之间的相互作用和影响机制未进行深入探究,评价过程中各子系统风险权重的设置仍具有较大的主观性和不确定性,今后还需深入探究不同风险类型之间的驱动因素、风险管控与建设分区、生态政策实施效果量化评估等方面的研究,并结合国土空间规划优化土地利用布局和生态修复侧重点,完善区域土地空间开发与生态风险宏观调控机制,为盐池县国土空间生态修复规划、灾害风险防控及跨区域生态补偿机制设计提供实证支持。

## 5 结论

(1) 研究区景观格局风险等级以较低风险为主,风险等级以2010年为转折点,整体呈现先下降后略微上升的趋势。空间上呈现中部与北部高、南部较低的空间格局,风险指数由高到低依次为北部和中部未利用地景观、城乡建设用地景观、东南部耕地景观、西南部草地景观、北部林地和草地景观。

(2) 研究区生态系统服务风险大幅度降低,具体表现为先稳步下降后波动下降的趋势,低风险与较低风险区面积逐渐扩大,高风险与较高风险区面积逐渐缩小,风险等级结构已由高风险主导转向低风险主导;空间分布23年间变化显著,大致呈现西部高、东部低的格局。

(3) 研究区自然灾害风险等级以低风险、较低风险为主,空间上呈现南部高、北部低的分布格局,空间集聚性显著;23年间风险等级波动变化,整体趋势为略微上升。

(4) 研究区综合生态风险时空变化显著,以2010年为时间节点,整体表现为先稳步下降,后波动变化

的趋势,全域风险指数由2000年的0.5314下降至2023年的0.4603,风险等级变化面积共达5773.01 km<sup>2</sup>,表明盐池县生态风险水平有较大幅度的降低;空间上呈现西北部、南部高,中部、东部低的分布格局,高风险区集中在西北荒漠化草原和南部易受侵蚀地区,低风险区主要为生态环境重点治理、自然保护区广布的中部和东部地区。

### 参考文献(References):

- [1] 陈辉,刘劲松,曹宇,等.生态风险评价研究进展[J].生态学报,2006,26(5):1558-1566.  
Chen H, Liu J S, Cao Y, et al. Progresses of ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [2] Norton S B, Rodier D J, van der Schalie W H, et al. A framework for ecological risk assessment at the EPA[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, 11(12):1663-1672.
- [3] 余欣,余瑞林,孙松峰,等.基于CiteSpace的生态风险评价研究进展[J].生态学报,2022,42(24):10338-10351.  
Yu X, Yu R L, Sun S F, et al. Research progress of ecological risk assessment based on CiteSpace[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10338-10351.
- [4] 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.  
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.
- [5] 林梦婧,石龙宇,陈丁楷,等.区域综合生态风险评价框架:以雄安新区为例[J].生态学报,2023,43(18):7566-7584.  
Lin M J, Shi L Y, Chen D K, et al. A regional ecological risk assessment framework: case study of Xiong'an New Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7566-7584.
- [6] Landis W G, Wieggers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2007, 13(1):25-38.
- [7] Li S K, He W X, Wang L, et al. Optimization of landscape pattern in China Luojiang Xiaoxi basin based on landscape ecological risk assessment[J]. Ecological Indicators, 2023, 146:109887.
- [8] 程静,王鹏,陈红翔,等.半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测:以宁夏盐池县为例[J].干旱区地理,2022,45(5):1637-1648.  
Cheng J, Wang P, Chen H X, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions: a case of Yanchi County in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1637-1648.
- [9] 景培清,张东海,艾泽民,等.基于格局-过程生态适应性循环三维框架的自然景观生态风险评价:以黄土高原为例[J].生态学报,2021,41(17):7026-7036.

- Jing P Q, Zhang D H, Ai Z M, et al. Natural landscape ecological risk assessment based on the three-dimensional framework of pattern-process ecological adaptability cycle: a case in Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17):7026-7036.
- [10] Wang J, Wang J M, Zhang J N. Optimization of landscape ecological risk assessment method and ecological management zoning considering resilience[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 376:124586.
- [11] 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(20):7312-7325.  
Xu F J, Lü X. Ecological risk pattern based on land use changes in Jiangsu coastal areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20):7312-7325.
- [12] Wang H, Liu X M, Zhao C Y, et al. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National nature reserve in Gansu Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124:107454.
- [13] 刘珍环, 张国杰, 付凤杰. 基于景观格局—服务的景观生态风险评价: 以广州市为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(10):3295-3302.  
Liu Z H, Zhang G J, Fu F J. Assessing landscape ecological risk based on landscape pattern and services in Guangzhou during 1990—2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10):3295-3302.
- [14] Zheng L, Liu H, Huang Y F, et al. Assessment and analysis of ecosystem services value along the Yangtze River under the background of the Yangtze River protection strategy [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(4):553-568.
- [15] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. *水资源保护*, 2024, 40(4):36-47.  
Lu X C, Xu Z X, Li Y K, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4):36-47.
- [16] 潘网生, 赵恬茵, 李鑫, 等. 基于多元自适应回归样条的黄土区滑坡敏感性评价[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6):271-280.  
Pan W S, Zhao T Y, Li X, et al. Susceptibility assessment of landslide in the loess region based on multivariate adaptive regression spline[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6):271-280.
- [17] 丛士翔, 王融融, 常文静, 等. 基于标准化降水指数(SPI)的宁夏中部干旱带旱灾危险性时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4):223-232.  
Cong S X, Wang R R, Chang W J, et al. Characteristics of spatial and temporal evolution of drought hazard in the middle arid zone of Ningxia based on standardized precipitation index (SPI) [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4):223-232.
- [18] 闫思嘉, 晁云舒, 潘辉, 等. 基于“源-汇”景观的永春县雨洪过程动态分析与风险评估[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):286-292.  
Yan S J, Chao Y S, Pan H, et al. Process dynamic analysis and risk assessment of rainfall and flood in Yongchun County based on the source-sink landscape [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):286-292.
- [19] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 贺莉, 等. 黄河中游生态水文模型及洪旱灾害风险评估[J]. *地理学报*, 2023, 78(7):1666-1676.  
Tang Q H, Xu X M, He L, et al. Development of an eco-hydrological model for flood and drought risk assessment under a changing environment in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7):1666-1676.
- [20] 陈勇, 周立华, 王伟伟, 等. 典型沙漠化逆转区人地系统脆弱性及其障碍因子[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(4):63-70.  
Chen Y, Zhou L H, Wang W W, et al. Man-land system vulnerability and obstacles in a typical desertification reversion area [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(4):63-70.
- [21] 杨悦, 员学锋, 马超群, 等. 生态脆弱区生态系统服务与乡村发展水平耦合关系: 以陕西省神木市为例[J/OL]. *生态学杂志*, 2025:1-12. (2025-01-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20250114.0952.006.html>.  
Yang Y, Yun X F, Ma C Q, et al. Coupled relationship between ecosystem services and rural development level in ecologically fragile areas: a case study of Shenmu City, Shaanxi Province [J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025:1-12. (2025-01-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20250114.0952.006.html>.
- [22] 冯剑丰, 李宇, 朱琳. 生态系统功能与生态系统服务的概念辨析[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4):1599-1603.  
Feng J F, Li Y, Zhu L. Discrimination of concepts of ecosystem functions and ecosystem services[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4):1599-1603.
- [23] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2000, 20(4):581-586.  
Chen L D, Fu B J. Ecological significance, characteristics and types of disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4):581-586.
- [24] Xu M L, Matsushima H. Multi-dimensional landscape ecological risk assessment and its drivers in coastal areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908:168183.
- [25] 聂艳, 李怡敏, 李鑫, 等. 耦合风险概率与生态损失的襄十随神区域生态风险评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(4):870-881.  
Nie Y, Li Y M, Li X, et al. Ecological risk assessment in 'Xiangyang-Shiyan-Suizhou-Shennongjia' based on risk probability and ecological loss model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(4):870-881.