

DOI: 10.20103/j.stxb.202308271844

席磊,冯益明,戚翌,曹晓明,丁杰,崔梦淳.基于综合评价指数的塔里木盆地荒漠化风险评估.生态学报,2025,45(3):1126-1136.

Xi L, Feng Y M, Qi Z, Cao X M, Ding J, Cui M C. Risk assessment of desertification in Tarim Basin based on Comprehensive Evaluation Index. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1126-1136.

基于综合评价指数的塔里木盆地荒漠化风险评估

席磊^{1,2,3}, 冯益明^{1,2,3,*}, 戚翌^{1,2,3}, 曹晓明^{1,2,3}, 丁杰^{1,2,3}, 崔梦淳^{1,2,3}

1 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

2 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

3 荒漠生态系统与全球变化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100091

摘要:荒漠化是当今人类所面临的区域性生态环境威胁之一,其发生常伴随林地生产力下降、土地资源丧失、生物多样性丧失、土壤固碳能力减弱等一系列生态环境退化问题,进而导致土地力低下。环塔里木盆地作为荒漠化问题突出的生态脆弱区,易受到自然因素和人为因素的双重影响,及时准确地监测并评估荒漠化风险是防治荒漠化的基础和前提。单一的评估方法在荒漠化风险评估中均有一定的局限性,主客观结合法可以提升荒漠化风险评估精度。研究基于“三因子”理论,通过建立包括气候条件、人类活动、荒漠化监测现状等 3 类 16 个指标评价体系,利用主客观结合的熵组合权重法构建了荒漠化风险综合评价指数(Comprehensive Evaluation Index, CEI),并对环塔里木盆地的荒漠化风险进行评估。结果显示:(1)三因子权重分析显示:暴露性因子权重最高,脆弱性因子权重最低;(2)环塔里木盆地西部地区的荒漠化危险性小于东部地区,危险性、脆弱性和暴露性较高的区域集中在绿洲外围,原生荒漠区危险性较低,绿洲边缘地区较易发生荒漠化;(3)环塔里木盆地区域的荒漠化风险主要呈现为极低风险,高风险和极高风险区呈狭长、零稀分布,主要分布在绿洲边缘和居民点工矿用地,原生荒漠区的荒漠化风险较低。高风险以及极高风险区仅占总体面积的 3.0%;(4)基于地理探测器探究环塔里木盆地区域内人类活动和环境因素对荒漠化风险程度空间分异的影响结果显示:单因素分析方法显示土地利用类型(0.68)是主要的驱动因素;双因素交互分析方法显示各因素之间主要以非线性增强为主。影响最大的组合为:土地利用类型 \cap 载畜量(0.78)和耕地面积 \cap 载畜量(0.78),荒漠化风险程度主要受人为因素影响。合理的土地利用规划、禁止随意丢荒和耕地扩张以期实现耕地的集约高效经营,是荒漠化防治的有效策略之一。研究利于准确把握区域荒漠化风险各程度的空间分布状况,分析其影响因素和机制,为区域开展有效的荒漠化防治措施提供科学依据。

关键词:荒漠化;风险评估;环塔里木盆地;综合评价指数;驱动因素

Risk assessment of desertification in Tarim Basin based on Comprehensive Evaluation Index

XI Lei^{1,2,3}, FENG Yiming^{1,2,3,*}, QI Zhao^{1,2,3}, CAO Xiaoming^{1,2,3}, DING Jie^{1,2,3}, CUI Mengchun^{1,2,3}

1 Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Desert Ecosystem and Global Change, Beijing 100091, China

Abstract: Desertification is one of the regional ecological threats facing humanity today, and its occurrence is often accompanied by a series of ecological and environmental degradation issues, such as declining productivity of forested land, loss of land resources, loss of biodiversity, and weakening of the soil's carbon sequestration capacity, which in turn leads to reduced land fertility. As an ecologically fragile area with prominent desertification problems, the Tarim Basin is susceptible

基金项目:第三次新疆综合科学考察课题(2021xjkk0304)

收稿日期:2023-08-27; 网络出版日期:2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengym@caf.ac.cn

to both natural and anthropogenic factors, and it is the basis and prerequisite to monitor and assess desertification risks accurately for combating desertification. However, the single assessment method has certain limitations in desertification risk assessment, and the combination of subjective and objective methods can improve the accuracy of desertification risk assessment. This study established 16 index evaluation systems, including climate conditions, human activities and desertification monitoring status based on the “three-factor” theory, and constructed a Comprehensive Evaluation Index (CEI) of desertification risk by using the entropy-weight method combining subjective and objective factors, then the risk of desertification around Tarim Basin was evaluated. The results showed that: (1) Three-factor weight analysis showed that the exposure factor had the highest weight and the vulnerability factor had the lowest weight. (2) The western area around the Tarim Basin had lower desertification risk than the eastern area. The areas with higher risk, vulnerability and exposure were concentrated in the periphery of the oasis, and the risk of primary desert areas was lower, and the desertification edge area was more likely to occur. (3) The desertification risk in the area around the Tarim Basin was mainly very low risk. The high-risk areas were narrow, long, and sparsely distributed, mainly at the edge of oases and industrial and mining areas of residential areas. The desertification risk in primary desert areas was relatively low, and high-risk and extremely high-risk areas accounted for only 3.0% of the total area. (4) The results of exploring the effects of human activities and environmental factors on the spatial differentiation of the degree of desertification risk in the Ring-Tarim Basin region based on GeoDetector showed that: Single factor analysis method showed that land use type (0.68) was the main driving factor. The most influential variable combinations are: land use type \cap livestock rate (0.78) and cropland area \cap livestock rate (0.78), and the degree of desertification risk is mainly influenced by human factors. Human factors mainly influenced the degree of desertification risk. Rational land-use planning, along with the prohibition of arbitrary abandonment and expansion of arable land to achieve intensive and efficient management, is one of the effective strategies for desertification control. Our research accurately identifies the spatial distribution of regional desertification risks, analyzes their influencing factors and mechanisms, and effectively provides a scientific basis for regional desertification prevention and control measures.

Key Words: desertification; risk assessment; Tarim Basin; comprehensive evaluation index; driving factors

荒漠化是指干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化现象,主要表现为植被覆盖度降低、土壤肥力下降、风沙活动加剧等现象^[1]。荒漠化既是全球性的生态环境问题,也是我国面临的重大生态安全挑战之一^[2]。荒漠化的形成和发展受到自然因素和人为因素的共同影响,其中气候变化^[3]、土地利用变化^[4]、人口增长和社会经济活动等^[5]均是主要的驱动因素。荒漠化对生态系统服务功能、粮食安全、水资源保障、生物多样性和人类福祉等方面都有一定的负面影响^[6],因此,及时准确地监测和评估荒漠化的程度和风险是防治荒漠化的基础和前提。

荒漠化风险评估是指根据荒漠化现状及发生概率和后果,对荒漠化的危害程度进行定量或定性的分析,以指导荒漠化的防治和应对措施^[7]。荒漠化风险评估的方法主要有专家打分法^[8]、植被指数法^[9-10]、模糊综合评价法^[11]、灰色关联分析法^[11]、熵权法^[12]、遥感与GIS技术等^[5]。其中,专家打分法适用于数据缺乏或不可靠的情况,操作简单、易实施。但易受专家数量、质量和观点差异等因素的影响,主观性较强^[8, 13]。植被指数法能够利用遥感数据的时空连续性和覆盖范围,高效快速的进行大面积荒漠化风险评估。但受遥感数据质量、分辨率和大气校正等因素的影响,存在一定的不确定性,难以反映荒漠化的深层次原因和机理^[9-10]。模糊综合评价法和专家打分法有一定的相似性,但在评价体系构架前需要进行一致性检验和敏感性分析,合适的评价体系和隶属函数对精度也有一定的影响^[11, 14]。灰色关联分析法能处理不需要假设数据分布形式、样本小、随机性大和信息质量差的数据,可以减少主观因素对评价结果的影响。但容易忽略原始数据中的一些重要信息,且选择不同的相关系数公式、分辨率系数和权重向量也会对其造成影响^[15]。熵权法主要是考虑各因素的客观重要性,对数据客观性及评价指标的选取要求较高^[12, 16]。综上所述,单一的评价方法在荒漠化风

险评估均有一定的局限性,提出一种主观结合客观的方法对于荒漠化风险评估有着重要意义。本研究选择的荒漠化风险综合评价指数方法是一种主客观结合的风险评估方法,其基本原理是通过构建荒漠化风险评价指标体系,使用熵组合法对各个指标进行加权综合,得到一个反映荒漠化风险程度的综合评价指数,再根据其数值的大小使用最优分割法确定阈值,将研究区域划分为不同的风险等级。

塔里木盆地属世界第一大内陆盆地,环塔里木盆地作为生态敏感区,有着重要的生态、社会与经济意义。研究区包裹着塔克拉玛干沙漠,其生态环境十分脆弱,受到自然因素和人为因素的双重影响,荒漠化问题突出^[3,6]。因此,本研究通过建立包括气候条件、人类活动、荒漠化监测现状、土地和植被等一系列因素的主客观相结合的荒漠化风险综合评价指数(CEI),对环塔里木盆地的荒漠化风险进行评估,揭示其各程度的空间分布状况,分析其影响因素和机制,研究结果对制定有效的荒漠化防治对策具有一定现实意义。

1 研究区与数据概况

1.1 研究区概况

研究区选择位于新疆维吾尔自治区南部的环塔里木盆地。本区北部接壤天山,东北部和西南部分别为阿尔金山和昆仑山^[3]。研究区海拔总体较为平缓,仅边缘接壤山脉区域海拔较高。经纬度范围为 $74^{\circ}18'53''$ — $91^{\circ}24'15''E$, $35^{\circ}59'24''$ — $42^{\circ}1'34''N$ 。地处大陆性干旱气候区,平均气温 $10.7^{\circ}C$,年温差和日温差均较大,天气炎热干燥,降水稀少(年均 17.4 — $42.8mm$),蒸散发强度大(1800 — $2900mm$)^[17]。同时,特殊的气候、独特的下垫面条件和人类不合理的资源开发,使得该区域成为中国沙尘暴天气频发地之一,荒漠化更易发生^[18]。研究主要考虑分析荒漠化区域,总面积为 $3.294 \times 10^7 hm^2$ 。研究区位置图如图 1 所示。

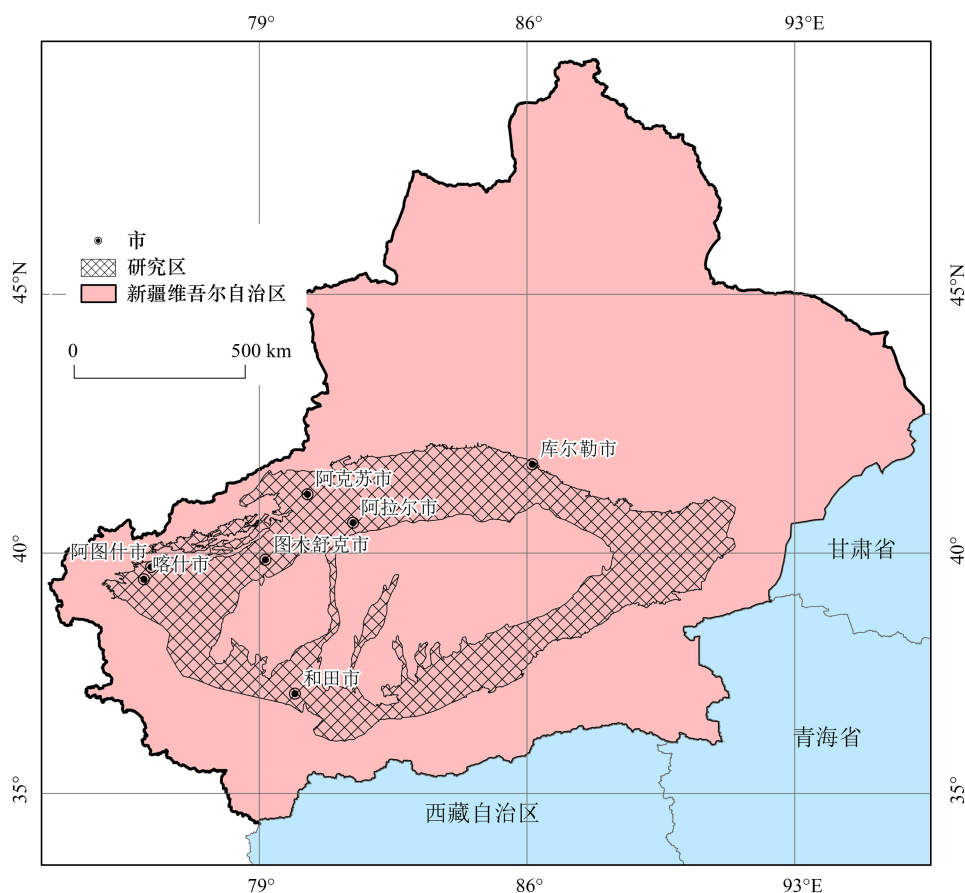


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据源概况

根据荒漠化风险概念框架,结合研究区自然、社会等现状,遵循科学、可靠性等原则,从危险性、脆弱性、暴露性三个层面总计选取 16 个评价指标。构建用于评价荒漠化风险程度的荒漠化风险综合评价指数(CEI)。气温、降水、蒸散发和风速数据均来源于中国科学院地理科学与资源研究所生成的中国气象要素月度空间插值数据集^[19]。该数据集是基于 Anusplin 软件插值生成,本研究基于月度数据求算年度均值数据作为年度数据。荒漠化程度数据是通过将归一化后的两大类 6 个遥感指数(包括 FVC、MSAVI、Albedo、LST、TGSi 和 TVDI)按权重构建线性拟合的荒漠化综合指数,最后建立基于荒漠化综合指数(Desertification Composite Index,DCI)的荒漠化程度分级系统得到的。植被覆盖度数据来源于中国科学数据平台提供的 1990—2021 年环塔里木盆地植被覆盖度(FVC)时空数据集^[20]。土壤类型和植被类型来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的中国土壤类型空间分布数据(1:400 万)和中国 1:100 万植被类型空间分布数据。人口密度数据来自于美国宇航局社会经济数据和应用中心(Socioeconomic Data And Applications Center,SEDAC)。数据版本为全球人口密度数据第四版。空间分辨率为 1km。其余指标均通过中国科学院地理科学与资源研究所公布的中国多时期土地利用/土地覆盖遥感监测数据库和新疆统计年鉴计算得到^[21]。所有栅格数据均重采样为 1km×1km,所有矢量数据均通过按照 1km×1km 的网格进行空间叠加并加权计算后,转换成栅格数据。各指标及数据来源说明如表 1 所示:

表 1 环塔里木盆地荒漠化风险综合评价指数体系

Table 1 CEI system of desertification risk in Ring Tarim Basin

目标层 Target layer	因子 Factors	次级因子 Secondary factors	指标层 Indicator layers	变量名称 Variable name	数据来源 Data sources	分辨率 Resolutions	
荒漠化风险综合评价指数 Comprehensive evaluation index of desertification risk	危险性	气候因子	气温	TEM	气象数据成果	1km	
			降水	PRE	气象数据成果	1km	
			蒸散发	EVP	气象数据成果	1km	
			风速	WIN	气象数据成果	1km	
		荒漠化现状 人为因子	荒漠化程度	DCI	DCI 识别结果	30m	
			开垦率	KKL	土地利用数据	30m	
			载畜量	ZXL	统计年鉴等	-	
			工矿用地面积	GKYD	土地利用数据	30m	
	暴露性	土地面积	居民点面积	JMD	土地利用数据	30m	
			草地面积	CD	土地利用数据	30m	
			耕地面积	GD	土地利用数据	30m	
			人口因子	人口密度	POP	产品数据	1km
		脆弱性	土地因子	土地利用类型	LUCC	土地利用数据	1km
				土壤类型	SOIL	产品数据	1km
			植被因子	植被覆盖度	FVC	产品数据	30m
				植被类型	VEG	产品数据	1km

CEI:综合评价指数 Comprehensive evaluation index;TEM:气温 Temperature;PRE:降水 Precipitation;EVP:蒸散发 Evapotranspiration;WIN:风速 Wind speed;DCI:荒漠化综合指数 Desertification composite index;KKL:开垦率 Reclamation rate;ZXL:载畜量 Livestock rate;GKYD:工矿用地面积 Industrial and mining land area;JMD:居民点面积 Residential area;CD:草地面积 Grassland area;GD:耕地面积 Cropland area;POP:人口密度 Population density;LUCC:土地利用类型 Land use and land-cover change;SOIL:土壤类型 Soil type;FVC:植被覆盖度 Fraction vegetation coverage;VEG:植被类型 Vegetation type

2 研究方法

2.1 荒漠化风险评估框架

自然灾害风险是指自然变异超过一定阈值时发生的概率及其对社会经济造成的损失大小^[7]。目前,灾害风险形成机制的理论研究主要有“二因子说”、“三因子说”和“四因子说”^[22]。“二因子说”认为风险是致灾因子危险性和承灾体脆弱性的函数,用事件发生的概率和后果的乘积来表达。“三因子说”在“二因子说”

的基础上,引入了区域暴露性作为影响风险的另一个因素,用危险性、脆弱性和暴露性的交集来表达风险。该理论认为风险的表达式应为风险(R)=危险性(H) \cap 脆弱性(V) \cap 暴露性(E),能够综合考虑各要素之间的协调性和适应性^[7]。“四因子说”则进一步考虑了防灾减灾能力对风险的影响,用危险性、脆弱性、暴露性和应对能力的综合作用来表达风险。但其需要大量的数据和信息来支撑风险评估,而这些数据和信息往往难以获取或完整性较差。因此,本研究采用稳健的“三因子说”为理论基础,对环塔里木盆地荒漠化风险进行评估。研究路线图如图 2:

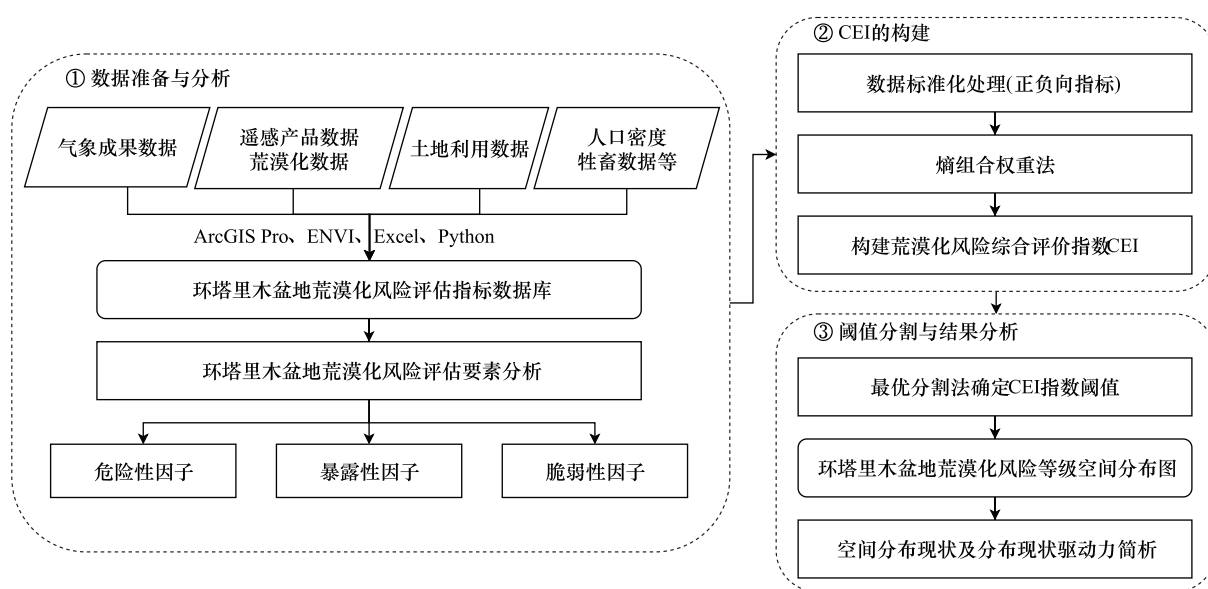


图 2 研究路线图

Fig.2 Research flowchart

CEI:综合评价指数 Comprehensive evaluation index

2.2 因子计算与数据标准化处理

在构建荒漠化风险综合评价指数 CEI 之前,需要对各指标进行标准化处理^[23]。标准化处理可以消除指标之间因不同维度和单位而失去合理性与公平性,使正负向指标统一量纲,避免影响评价结果。其中,对于正、负向指标,不同标准化公式如下所示:

$$Y_{ik} = \frac{\max X_{ik} - X_{ik}}{\max X_{ik} - \min X_{ik}} \quad \text{正向指标} \quad (1)$$

$$Y_{ik} = \frac{X_{ik} - \min X_{ik}}{\max X_{ik} - \min X_{ik}} \quad \text{负向指标} \quad (2)$$

式中, Y_{ik} 为 X_{ik} 的标准化值, X_{ik} 为第 i 个指标的第 k 个值。

2.3 评估因子权重的确定

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种综合定性和定量分析的多目标决策方法,它将复杂的决策问题视为一个系统,通过分解问题为不同层次和指标,并对每一层次的因素进行成对比较,建立判断矩阵,求解最大特征值对应的特征向量,经一致性检验后,得到各指标的权重。然而,单一的 AHP 具有较强的主观性,不能充分反映实际情况^[7]。熵权法主要考虑的是数据本身的客观性,评价指标的熵值与该指标所提供的信息量呈反比,即熵值越小,信息量较大,该指标的权重也应较大。信息熵理论可用于评价各指标的有序性和效用性。基于此,熵组合法是将主客观性相结合,利用最小相对信息熵值确定组合权重。该方法在本研究中用于获取危险性、暴露性和脆弱性对于荒漠化风险的贡献率确定。公式如下所示:

$$W_i = \frac{(W_{1i} W_{2i})^{0.5}}{\sum_{i=1}^m (W_{1i}, W_{2i})^{0.5}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中, W_i 为 i 指标的综合权重; W_{1i} 为 i 指标的主观权重; W_{2i} 为 i 指标的客观权重。

2.4 荒漠化风险评估体系的建立

以往研究中环境敏感性区指数 (Environmental Sensitive Areas Index, ESAI) 被用于黄土高原的荒漠化风险评估^[24], 但 ESAI 作为单一的敏感性指标, 并不能反映荒漠化风险的多维性和复杂性。荒漠化风险需要综合考虑多维影响因素, 以及各因素之间的相互关系和作用效应。另外, 有学者通过结合气候变化和人类活动, 构建了一个新的全球荒漠化脆弱性指数 (Global Desertification Vulnerability Index, GDVI), 并进行全球荒漠化风险等级划分^[25], 但不同地区的荒漠化过程不同, 需要根据具体的地理、气候、生态和社会等综合条件进行调整和优化。本研究建立的荒漠化风险综合评价指数 (CEI) 在考虑气候和人类活动的前提下加入了荒漠化监测现状、土地和植被等总计 3 类 16 个指标因子。研究基于“三因子”理论, 利用熵组合权重法计算得到危险性、暴露性和脆弱性因子的权重值, 构建了客观与主观相结合的荒漠化风险综合评价指数, 基于构建的荒漠化风险综合评价指数, 实现了环塔里木盆地荒漠化风险评估与分析。CEI 构建公式为:

$$CEI = H \times w_h \times E \times w_e \times V \times w_v \quad (4)$$

式中, CEI 为荒漠化风险综合评价指数, H 、 E 和 V 分别为危险性、暴露性和脆弱性因子值, w_h 、 w_e 和 w_v 分别为 3 个风险因子的权重值, 可表征各风险因子对荒漠化风险的相对重要性。

3 结果与分析

3.1 各因子权重占比

研究利用熵权法计算 3 类因子中对应指标的信息熵值和信息效用值, 得到 16 个指标的权重如表 2 所示。由表 2 可得, 信息效用值和权重占比最大的指标为开垦率, 最小的指标为蒸散发。再根据 3 类因子分别汇总熵权法得到的权重, 构建基于 APH 分析法的荒漠化风险三因子判断矩阵 (表 3)。

表 2 荒漠化风险综合评价指数各指标熵权法

Table 2 Entropy weight method for each index of desertification risk CEI

变量名称 Variable name	信息熵值 e Information entropy value e	信息效用值 d Information utility value d	权重/% Weighting
TEM	0.997	0.003	0.132
PRE	0.965	0.035	1.459
EVP	0.998	0.002	0.095
WIN	0.994	0.006	0.234
DCI	0.991	0.009	0.361
KKL	0.488	0.512	21.579
ZXL	0.735	0.265	11.183
GKYD	0.542	0.458	19.291
JMD	0.748	0.252	10.617
CD	0.748	0.252	10.617
GD	0.819	0.181	7.614
POP	0.781	0.219	9.206
LUCC	0.907	0.093	3.900
SOIL	0.987	0.013	0.536
FVC	0.94	0.06	2.521
VEG	0.984	0.016	0.655

CEI: 综合评价指数 Comprehensive evaluation index; TEM: 气温 Temperature; PRE: 降水 Precipitation; EVP: 蒸散发 Evapotranspiration; WIN: 风速 Wind speed; DCI: 荒漠化综合指数 Desertification composite index; KKL: 开垦率 Reclamation rate; ZXL: 载畜量 Livestock rate; GKVD: 工矿用地面积 Industrial and mining land area; JMD: 居民点面积 Residential area; CD: 草地面积 Grassland area; GD: 耕地面积 Cropland area; POP: 人口密度 Population density; LUCC: 土地利用类型 Land use and land-cover change; SOIL: 土壤类型 Soil type; FVC: 植被覆盖度 Fraction vegetation coverage; VEG: 植被类型 Vegetation type

表 3 环塔里木盆地荒漠化风险三因子判断矩阵

Table 3 Three-factor judgment matrix of desertification risk in Ring Tarim Basin

因子 Factors	危险性 Hazard	暴露性 Exposure	脆弱性 Vulnerability	因子 Factors	危险性 Hazard	暴露性 Exposure	脆弱性 Vulnerability
危险性 Hazard	1	1	7	脆弱性 Vulnerability	0.143	0.111	1
暴露性 Exposure	1	1	9				

对结果进行一致性检验(表 4、表 5),计算结果显示,最大特征根为 3.007,根据 RI 表查到对应的 RI 值为 0.525,因此 $CR = CI/RI = 0.007 < 0.1$,通过一次性检验。最终计算结果显示,危险性因子的权重为 45.07%,暴露性因子的权重为 49.009%,脆弱性因子的权重为 5.921%(表 6)。三大因子中权重占比最大的是暴露性因子,最小的是脆弱性因子,危险性和暴露性的权重相差不大。同时,表 6 显示气温、降水等自然因素在荒漠化风险评估中的权重小于开垦率、载畜量等人为因素的权重。

表 4 层次分析法一致性检验结果

Table 4 Consistency test results of analytic hierarchy process (AHP)

最大特征根 Maximum characteristic root	CI 值 CI value	RI 值 RI value	CR 值 CR value	一致性检验结果 Consistency test results
3.007	0.004	0.525	0.007	通过

CI:一致性指标 Consistency index;RI:随机一致性指标 Random consistency index;CR:一致性比率 Consistent ratio

表 5 基于 AHP 层次分析结果汇总表

Table 5 based on AHP results summary table

因子 Factors	特征向量 Eigenvectors	权重值 Weighting values/%	最大特征根 Maximum characteristic root	CI 值 CI value
危险性 Hazard	1.913	45.070	3.007	0.004
暴露性 Exposure	2.08	49.009		
脆弱性 Vulnerability	0.251	5.921		

CI:一致性指标 Consistency index

表 6 荒漠化风险综合评价指数各指标权重汇总表

Table 6 Summary table of each index weight of desertification risk CEI

目标层 Target layer	因子 Factors	次级因子 Secondary factors	指标层 Indicator layers	变量名称 Variable name	熵权法 Entropy method	均值权重 Mean weights/%	AHP 权重 AHP weights/%
荒漠化风险综合评价指数 Comprehensive evaluation index of desertification risk	危险性	气候因子	气温	TEM	0.132	7.217	45.070
			降水	PRE	1.459		
			蒸散发	EVP	0.095		
			风速	WIN	0.234		
			荒漠化现状	荒漠化程度	DCI		
	暴露性	土地面积	人为因子	开垦率	KKL	21.579	
			载畜量	ZXL	11.183		
			工矿用地面积	GKYD	19.291		
			居民点面积	JMD	10.617		
			草地面积	CD	10.617	9.146	
	脆弱性	土地因子	耕地面积	GD	7.614		
			人口因子	人口密度	POP	9.206	
			土地利用类型	LUCC	3.900	1.903	
			土壤类型	SOIL	0.536		
			植被因子	植被覆盖度	FVC	2.521	
		植被类型	VEG	0.655			

CEI:综合评价指数 Comprehensive evaluation index;TEM:气温 Temperature;PRE:降水 Precipitation;EVP:蒸散发 Evapotranspiration;WIN:风速 Wind speed;DCI:荒漠化综合指数 Desertification composite index;KKL:开垦率 Reclamation rate;ZXL:载畜量 Livestock rate;GKYD:工矿用地面积 Industrial and mining land area;JMD:居民点面积 Residential area;CD:草地面积 Grassland area;GD:耕地面积 Cropland area;POP:人口密度 Population density;LUCC:土地利用类型 Land use and land-cover change;SOIL:土壤类型 Soil type;FVC:植被覆盖度 Fraction vegetation coverage;VEG:植被类型 Vegetation type

3.2 三因子空间分布特征

基于熵权法计算的权重对危险性、暴露性和脆弱性因子空间分布进行研究,结果如图 3 所示。三因子的空间分布采用分位数法以相同的观测频率显示。由图 3 可知,环塔里木盆地西部地区的危险性小于东部,危险性较高区域主要分布在东部罗布泊周围和整个研究区的绿洲外围,绿洲边缘地区易受荒漠化影响。研究区总体暴露性较小,高暴露性地区主要位于整个研究区内的主要绿洲区,其余原生荒漠区较之绿洲区的暴露性程度更低。暴露性越高的地区,荒漠化风险程度也随之增加。图 3 显示出研究区生态脆弱性程度较高,且脆弱性程度高值地区主要位于荒漠绿洲交接的生态脆弱区,脆弱性程度低值地区主要为东部的原生荒漠区和塔克拉玛干沙漠边缘的原生荒漠区。

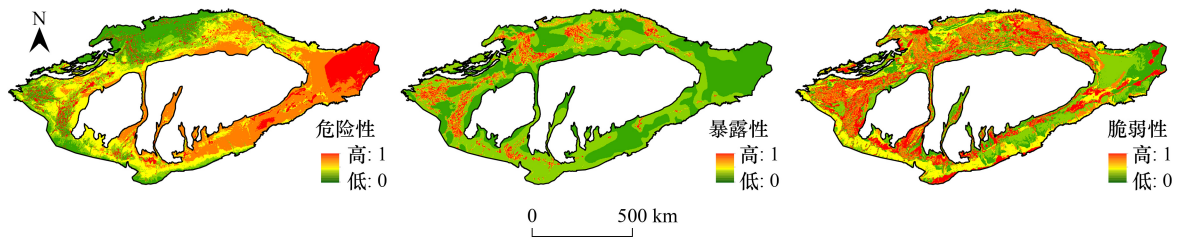


图 3 环塔里木盆地 2021 年荒漠化风险三因子空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the three factors of desertification risk in Ring-Tarim Basin 2021

3.3 环塔地区荒漠化风险等级空间分布

研究基于构建的综合评价指数 CEI 对环塔区域进行荒漠化风险评估。荒漠化风险等级空间分布总体呈现:西北部高于东南部,西部和北部绿洲以中、高风险为主;极高风险地块多为零稀分布,主要位于易受荒漠化侵蚀的绿洲边缘地区;东部和南部地区的原生荒漠区面积较大,荒漠化风险等级主要为极低风险,高风险和极高风险在该区域呈狭长、零稀分布,与绿洲呈相同空间分布^[26]。综上所述,荒漠化高风险以及极高风险区主要为绿洲边缘及居民点工矿用地区域,原生荒漠区荒漠化风险等级均较低。

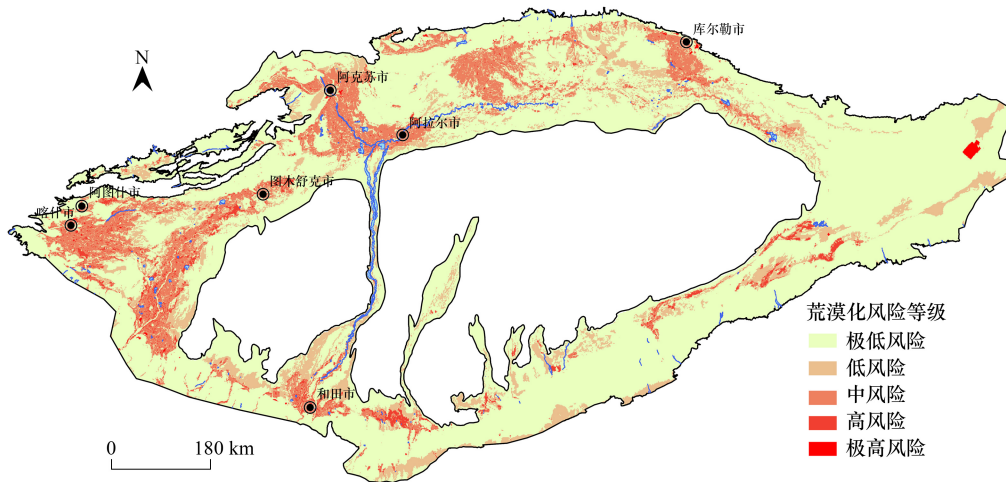


图 4 环塔里木盆地 2021 年荒漠化风险等级空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of desertification risk level Ring Tarim Basin in 2021

3.4 环塔地区荒漠化风险驱动因素分析

为探究环塔里木盆地区域内人类活动和环境因素对荒漠化风险程度空间分异的影响,研究将构建 CEI 的 16 个自然与人为因素指标作为输入因子,基于地理探测器,对各因子进行分析^[27],得到单因子影响的解释力

q 值柱状图(图 5),荒漠化风险空间分异各因子的解释力排序中,最大解释力因子为土地利用类型(0.68),最小解释力因子为蒸散发(0.01)。大于均值解释力(0.22)的因子有 6 个,其中与人类活动相关的因子有土地利用类型(LUCC)、耕地面积(GD)和开垦率(KKL),总解释力为 0.94;与自然环境因素相关的因子有荒漠化综合指数(DCI)、植被覆盖度(FVC)和植被类型(VEG),总解释力为 0.28。综上,对荒漠化风险程度空间分异影响较大的单因子为土地利用类型,且荒漠化风险程度主要受人类活动影响^[28]。

研究基于交互探测器对环塔里木盆地荒漠化风险各影响因子间的交互作用进行分析,结果如图 6 所示。在双因子的交互作用下会加强对荒漠化风险综合评价指数的解释力,各因子之间主要以非线性增强为主。双因子之间交互作用对荒漠化风险程度影响最大的组合为:土地利用类型 \cap 载畜量(0.78)和耕地面积 \cap 载畜量(0.78)。土地利用类型与其他所有因子交互解释力均大于等于 0.68,耕地与其他所有因子的交互解释力均大于等于 0.60,其余因子交互作用对荒漠化风险综合评价指数的解释力均小于等于 0.51。综上所述,土地利用类型是影响环塔里木盆地荒漠化风险程度及空间分布的重要驱动因子^[6]。绿洲城市化的发展与耕地的扩张^[17],导致原生植被相对减少,加重了研究区内部分区域的生态压力^[27, 29]。若想对环塔里木盆地区域荒漠化风险程度及趋势进行遏制,首先应确保土地利用类型的合理规划,禁止随意丢荒和耕地扩张,实现耕地的集约高效经营,制定合理有效的荒漠化防治措施^[27]。

4 论

考虑到研究结果的有效性,本研究与王玉竹等^[22, 30]在 2020 年的研究结果进行了对比,如图 7。在荒漠化风险等级面积占比的总体趋势上,二者均显示出相同的趋势和规律。极低风险等级是研究区的主要荒漠化风险等级,高风险和极高风险区仅占总体面积的 3.0%。尽管二者研究结果趋势相同,但在具体数值上存在细微差异,主要是因为研究区总体面积的差异。

从因子选择的角度来看,研究涵盖了影响荒漠化风险的诸多因子,如气候、土壤、植被、土地利用类型和人口密度等,但部分因子可能对本区来说相关性较弱,如风速、土壤类型或植被类型等,这些因子可能对主要受人类活动影响的环塔里木盆地荒漠化风险区影响不显著。因此,选择更具体、更符合当地情境的因子可能更合适,环塔里木盆地区域水资源匮乏,可考虑增加地下水位、灌溉强度、盐渍化程度等方面因子。这些因子可以反映研究区水文条件和人为诱导的变化,可进一步提高荒漠化风险评估精度^[31, 32]。

从方法选择的角度来看,研究采用主客观权重相结合的方式构建了 CEI,可以平衡不同加权方法的优缺点。但采用三因素的线性组合来计算 CEI,可能无法捕捉到它们之间的非线性交互和反馈,例如,高暴露度可能会放大或减弱高危险度或脆弱性对荒漠化风险的影响,后期研究可以考虑增加系统的适应能力和弹性^[32, 33],也可以考虑使用非线性组合或模糊逻辑方法来构建新的荒漠化综合评价指数,以此更好地反映荒漠化风险的复杂性和不确定性^[32]。

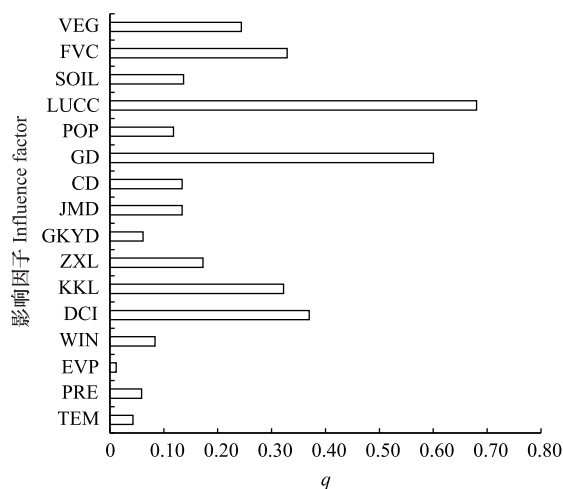


图 5 环塔里木盆地荒漠化风险空间分异驱动因子解释力
Fig.5 Explanatory power statistics of driving factors of desertification risk of spatial differentiation in Ring Tarim Basin
CEI: 综合评价指数 Comprehensive evaluation index; TEM: 气温 Temperature; PRE: 降水 Precipitation; EVP: 蒸散发 Evapotranspiration; WIN: 风速 Wind speed; DCI: 荒漠化综合指数 Desertification composite index; KKL: 开垦率 Reclamation rate; ZXL: 载畜量 Livestock rate; GKVD: 工矿用地面积 Industrial and mining land area; JMD: 居民点面积 Residential area; CD: 草地面积 Grassland area; GD: 耕地面积 Cropland area; POP: 人口密度 Population density; LUCC: 土地利用类型 Land use and land-cover change; SOIL: 土壤类型 Soil type; FVC: 植被覆盖度 Fraction vegetation coverage; VEG: 植被类型 Vegetation type

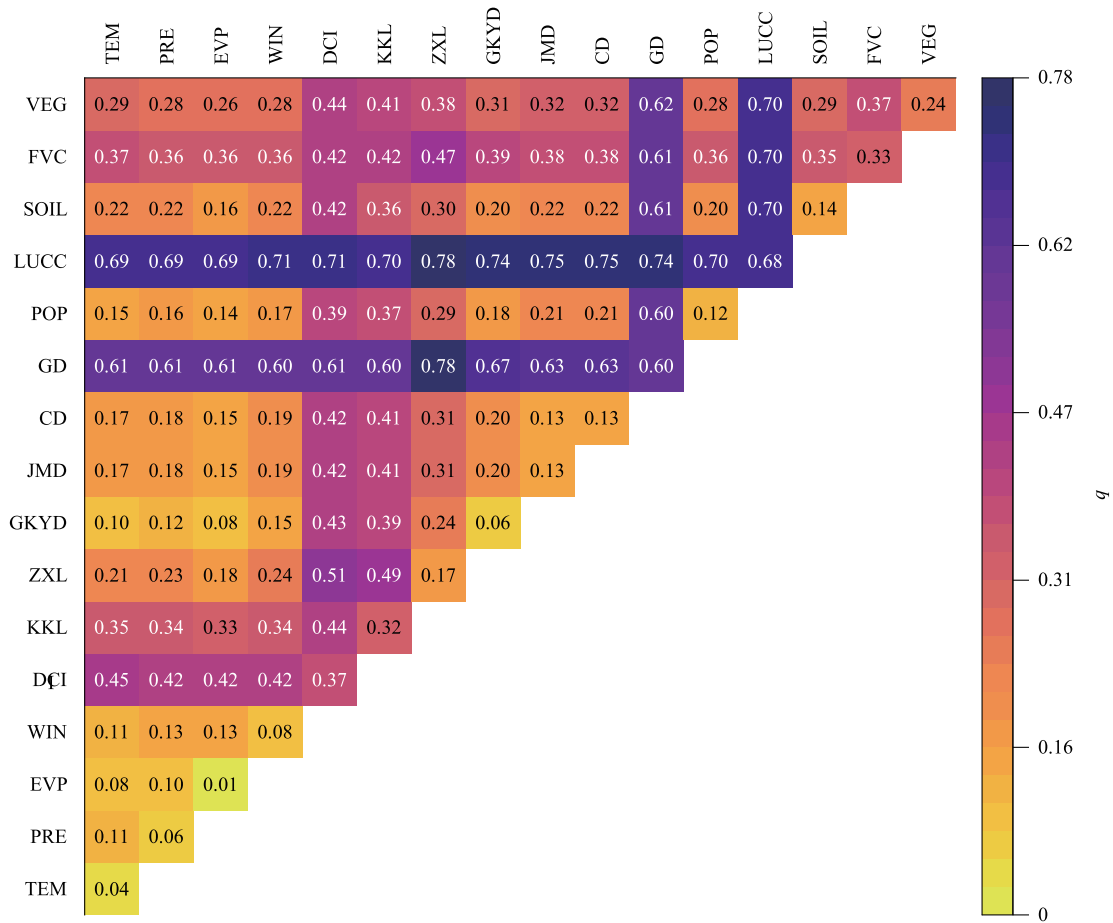


图 6 环塔里木盆地荒漠化风险各驱动因素交互探测解释力热力图

Fig.6 Interactive detection of driving factors of desertification risk in Ring Tarim Basin to explain the force heat map

CEI:综合评价指数 Comprehensive evaluation index;TEM:气温 Temperature;PRE:降水 Precipitation;EVP:蒸散发 Evapotranspiration;WIN:风速 Wind speed;DCI:荒漠化综合指数 Desertification composite index;KKL:开垦率 Reclamation rate;ZXL:载畜量 Livestock rate;GKYD:工矿用地面积 Industrial and mining land area;JMD:居民点面积 Residential area;CD:草地面积 Grassland area;GD:耕地面积 Cropland area;POP:人口密度 Population density;LUCC:土地利用类型 Land use and land-cover change;SOIL:土壤类型 Soil type;FVC:植被覆盖度 Fraction vegetation coverage;VEG:植被类型 Vegetation type

5 结论

研究基于“三因子”理论,运用熵组合权重法计算危险性、暴露性和脆弱性因子的权重值,构建了主观和客观相结合的荒漠化风险综合评价指数(CEI)。通过CEI实现了对环塔里木盆地地区荒漠化风险的监测和评估。结果显示:在三大因子中,暴露性因子权重最高,脆弱性因子权重最低,而开垦率、载畜量等人为因素在荒漠化风险评估中的权重远大于气温、降水等自然因素;环塔里木盆地西部地区的危险性小于东部地区,危险性、脆弱性和暴露性较高的区域集中在绿洲的外围,绿洲边缘地区易受荒漠化影响;环塔里木盆地区域的荒漠化风险主要呈现极低风险,高风险和极高风险多呈狭长、零稀分布,主要分布在绿洲边缘和居民点工矿用地

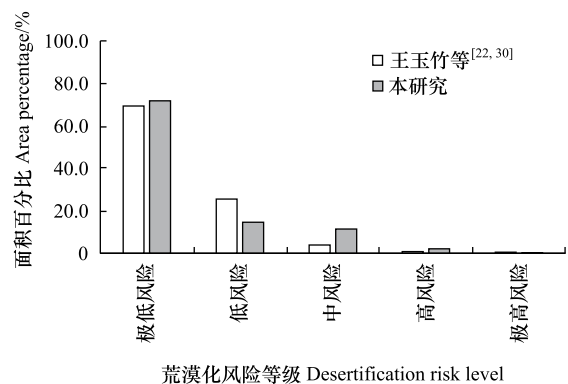


图 7 环塔里木盆地荒漠化风险各等级面积占比

Fig.7 The proportion of each grade area of desertification risk in Ring Tarim Basin

区,原生荒漠区的荒漠化风险较低。

对研究区荒漠化风险驱动因素进行分析,在各因子单因素解释力分析中,土地利用类型(0.68)是主要的驱动因素。在双因素交互分析中,各因素之间主要以非线性增强为主。对荒漠化风险程度影响最大的组合为:土地利用类型 \cap 载畜量(0.78)和耕地面积 \cap 载畜量(0.78)。荒漠化风险程度主要受人为因素影响,合理的土地利用规划与集约高效经营的耕地是荒漠化防治的有效策略之一。

参考文献(References):

- [1] 王涛,朱震达.我国沙漠化研究的若干问题——1.沙漠化的概念及其内涵.中国沙漠,2003,23(3):209-214.
- [2] 王海,王连喜,杨祖祥,李琪.荒漠化遥感监测与评估的应用研究动态.灾害学,2017,32(4):153-161.
- [3] 王非,毋兆鹏,汪洋,焦伟,陈亚宁.基于RS和GIS的塔里木盆地荒漠化动态监测.生态学杂志,2017,36(4):1029-1037.
- [4] Sena A, Ebi K. When land is under pressure health is under stress. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 18(1):136.
- [5] 李亚云,杨秀春,朱晓华,徐斌.遥感技术在中国土地荒漠化监测中的应用进展.地理科学进展,2009,28(1):55-62.
- [6] Yu X, Lei J Q, Gao X. An over review of desertification in Xinjiang, Northwest China. Journal of Arid Land, 2022, 14(11):1181-1195.
- [7] 李雨薇,刘静,银山,包玉海.锡林郭勒草原荒漠化灾害风险动态评价.东北师大学报:自然科学版,2019,51(3):143-151.
- [8] Kadri C B, Nasrallah Y. GIS-based AHP technique for assessment of desertification in western Highlands of Algeria. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 2023, 7(2):18.
- [9] Salako G, Adebayo A, Sawyerr H, Badmos B, Adio A, Jambo U M. Modis derived vegetation and aridity indices account for spatial variation in desertification risk index in dry environment. International Journal of Ecology & Development, 2021, 36:46-63.
- [10] Mushtak T J. Desertification Risk Monitoring for North Shaanxi Province, China, Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Journal of Earth Science, 2002, 13(1):58-66, 94.
- [11] 杜静.生态风险评价的数学模型及应用研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [12] Pishyar S, Khosravi H, Tavili A, Malekian A, Sabourirad S. A combined AHP- and TOPSIS-based approach in the assessment of desertification disaster risk. Environmental Modeling & Assessment, 2020, 25(2):219-229.
- [13] 赵焕臣.层次分析法:一种简易的新决策方法.北京:科学出版社,1986.
- [14] Wang Y F, Zhang J Q, Guo E L, Sun Z Y. Fuzzy comprehensive evaluation-based disaster risk assessment of desertification in Horqin Sand Land, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(2):1703-1725.
- [15] Zhang H H, Peng Y, Tian G D, Wang D Q, Xie P P. Green material selection for sustainability: a hybrid MCDM approach. PLoS One, 2017, 12(5):e0177578.
- [16] Chen P Y. On the diversity-based weighting method for risk assessment and decision-making about natural hazards. Entropy: Basel, Switzerland, 2019, 21(3):269.
- [17] Hou Y F, Chen Y N, Li Z, Li Y P, Sun F, Zhang S, Wang C, Feng M Q. Land use dynamic changes in an arid inland river basin based on multi-scenario simulation. Remote Sensing, 2022, 14(12):2797.
- [18] 徐海量,陈亚宁.塔里木盆地风沙灾害危险性评价.自然灾害学报,2003,12(2):35-39.
- [19] 徐新良.中国气象要素月度空间插值数据集.北京:资源环境科学数据注册与出版系统,2022.
- [20] 冯益明,乔琨,冯世昂,席磊,戚翌,兰岚.1990—2021年环塔里木盆地植被覆盖度(FVC)时空数据集.中国科学数据(中英文网络版),2023,8(2):312-319.
- [21] 徐新良,刘纪远,张树文,李仁东,颜长珍,吴世新.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUC).资源环境科学数据注册与出版系统,2018. [2023-08-27]. <https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54>.
- [22] 王玉竹,闫浩文,王小平.新疆风沙灾害风险评估.中国沙漠,2020,40(6):13-21.
- [23] Jiang L L, Bao A M, Jiapaer G, Guo H, Zheng G X, Gafforov K, Kurban A, De Maeyer P. Monitoring land sensitivity to desertification in Central Asia: Convergence or divergence? Science of the Total Environment, 2019, 658:669-683.
- [24] 张建香,张多勇,刘万锋,胡爱萍,王东,胡剑桥.基于ESAI的黄土高原荒漠化风险评估.水土保持通报,2017,37(2):339-344,封3.
- [25] Huang J P, Zhang G L, Zhang Y T, Guan X D, Wei Y, Guo R X. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. Land Degradation & Development, 2020, 31(11):1380-1391.
- [26] 孙帆,王弋,陈亚宁.塔里木盆地荒漠-绿洲过渡带动态变化及其影响因素.生态学杂志,2020,39(10):3397-3407.
- [27] 郑佳翔,孙桂丽,苏香玲,冉亚军,郑旭.阿克苏地区荒漠化变化趋势及其驱动因素.水土保持通报,2022,42(4):278-285.
- [28] 布买日也木·买买提.环塔里木盆地绿洲城市空间过程与重心转移特征[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [29] 郑佳翔.2009—2019年阿克苏地区荒漠化时空演变特征及驱动因子分析[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [30] 王玉竹.新疆地区风沙灾害潜在风险性评估及其时空格局[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [31] Shihab T H, Al-hameedawi A N. Desertification hazard zonation in central Iraq using multi-criteria evaluation and GIS. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48(3):397-409.
- [32] Du Z Q, Xu X M, Zhang H, Wu Z T, Liu Y. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk. PLoS One, 2016, 11(3):e0151331.
- [33] Afzali S F, Khanamani A, Maskooni E K, Berndtsson R. Quantitative assessment of environmental sensitivity to desertification using the modified MEDALUS model in a semiarid area. Sustainability, 2021, 13(14):7817.