

# 秦巴山地景观生态风险的时空分异

陈全通, 殷浩然, 李艳红, 董庆栋, 张平平, 朱连奇

(河南大学 地理与环境学院, 河南 开封 475004)

**摘要:** [目的] 科学评估秦巴山地景观生态风险, 为区域内生态安全建设和可持续发展提供科学依据。[方法] 以秦巴山地 2000—2020 年 3 期地表覆被数据为基础, 应用空间分析法和地形分布指数法, 定量地分析秦巴山地景观生态风险的时空特征, 以及其在各地形梯度上的动态变化。[结果] ① 秦巴山地景观生态风险整体偏低, 空间差异特征显著, 且存在着明显的空间集聚效应, 呈东西两侧跟中间高, 南北低的空间分布格局。② 2000—2020 年, 秦巴山地景观生态风险呈下降趋势, 低生态风险区明显扩张, 高生态风险区显著缩小。③ 高生态风险多集中分布于海拔高、地形复杂或海拔低、地形平坦地区, 低生态风险在中等地形梯度地区呈优势分布。[结论] 秦巴山地景观生态风险整体呈下降趋势, 表明区域内生态环境质量有所提升; 秦巴山地景观生态风险的空间分布格局受地形影响较大, 且相对稳定。

**关键词:** 景观生态风险; 秦巴山地; 时空分异; 地形梯度

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)03-0239-08

**中图分类号:** X826, F301.2

**文献参数:** 陈全通, 殷浩然, 李艳红, 等. 秦巴山地景观生态风险的时空分异[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 239-246. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.031; Chen Quantong, Yin Haoran, Li Yanhong, et al. Spatial and temporal differentiation of landscape ecological risk in Qinling-Daba Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 239-246.

## Spatial and Temporal Differentiation of Landscape Ecological Risk in Qinling-Daba Mountains

Chen Quantong, Yin Haoran, Li Yanhong, Dong Qingdong, Zhang Pingping, Zhu Lianqi

(College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng, He'nan 475004, China)

**Abstract:** [Objective] The landscape ecological risk of the Qinling-Daba Mountains was scientifically assessed in order to provide a scientific basis for ecological security construction and for sustainable development in the region. [Methods] The spatial analysis method and the topographic distribution index method were used with land surface cover data for the Qinling-Daba Mountains from 2000 to 2020 to quantitatively analyze the temporal and spatial characteristics of the Qinling-Daba Mountains landscape ecological risk, and its dynamic changes on geographical terrain gradients. [Results] ① The overall ecological risk of the Qinling-Daba Mountains landscape was low, with significant spatial differences. There was an obvious spatial agglomeration effect, presenting a spatial distribution pattern of east and west sides, high in the middle, and low in the north and south. ② From 2000 to 2020, the ecological risk of the Qinling-Daba Mountains landscapes showed a downward trend, with low ecological risk areas expanding significantly, and high ecological risk areas shrinking significantly. ③ High ecological risk values were mostly concentrated in areas with high altitude, complex terrain, or low altitude and flat terrain. Low ecological risk values were predominantly located in areas with medium terrain gradients. [Conclusion] The overall landscape ecological risk in the Qinling-Daba Mountains showed a downward trend, indicating that the quality of the ecological environment in the region had improved. The distribution pattern of landscape ecological risk in the Qinling-Daba Mountains was greatly affected by topography and was relatively stable.

**Keywords:** landscape ecological risk; Qinling-Daba Mountains; spatial-temporal distribution; terrain gradient

收稿日期: 2021-11-11

修回日期: 2021-12-10

资助项目: 国家科技基础资源调查专项“中国南北过渡带综合科学考察”(2017FY100902)

第一作者: 陈全通(1996—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与景观生态。Email: 1075416987@qq.com.

通信作者: 朱连奇(1963—), 男(汉族), 河南省郸城县人, 博士, 教授, 主要从事山地地理环境及资源开发利用方面的研究。Email: lqzhu@henu.edu.cn.

在全球变化背景下,人类活动日益频繁,景观格局变化随之加剧,原本脆弱的生态环境面临着更加严峻的生态安全问题<sup>[1]</sup>,对区域景观格局与生态系统的健康以及人类的可持续发展产生了一定的威胁<sup>[2]</sup>。景观生态风险是指自然或人为因素影响下景观格局与生态过程相互作用,可能产生的不利影响<sup>[3]</sup>。景观生态风险可以直观地反映人类活动、自然环境变化对区域内生态环境产生不利作用的可能性和危害程度<sup>[4]</sup>,其研究极其注重景观生态风险的时空异质性和空间尺度效应<sup>[5]</sup>。因此,景观生态风险常被用于揭示区域景观生态风险时空动态变化规律,进而为区域景观生态风险防范和景观格局优化管理提供理论支持。目前,以土地利用/覆被变化为诱因的景观生态风险评价成为近年来的热门研究课题<sup>[6]</sup>,被广泛应用于流域<sup>[7-9]</sup>、湖泊区<sup>[10]</sup>、海岸带<sup>[11]</sup>和高原<sup>[12]</sup>等自然地理单元,以及矿区<sup>[13]</sup>、行政区<sup>[14]</sup>等人文地理单元的景观生态风险评价研究。相较于人类活动频繁地域,在中尺度上,对地形复杂多样、生态环境脆弱的山地的景观生态风险评价研究却相对薄弱。

地形作为土地利用格局分布的重要驱动因子之一,可以通过形成小气候和干扰机制影响景观格局分布<sup>[15]</sup>,景观生态风险格局也会相应地呈现一定的规律性<sup>[16]</sup>。当前,结合地形因子,探究景观生态风险与地形之间的关系已然成为一种趋势。国内外学者就海拔、坡度等单一地形因子对景观生态风险格局的影响进行了研究<sup>[17-18]</sup>,也有学者利用地形分布指数和地形梯度探索地形梯度对景观生态风险格局变化的影响<sup>[15]</sup>。相较而言,前者研究具有一定的局限性,后者更能综合地反映地形梯度对景观生态风险空间分布及其格局变化的影响。

秦巴山地作为一个典型的山地生态系统,地形起伏较大,自然资源丰富多样,南北气候、植被差异显著,是中国生态环境的脆弱区<sup>[19]</sup>,国家重要的生态屏障,担负着国家生态安全保障的重任<sup>[20]</sup>。近年来,受自然环境因素和人类活动干扰影响,秦巴山地景观格局发生显著改变<sup>[21]</sup>,对秦巴山地生态环境保护和可持续发展产生了一定的威胁。鉴于此,本文以 2000,2010,2020 年秦巴山地地表覆被数据为基础,构建景观生态风险评价模型,探索研究区景观生态风险的时空分异特性和空间关联性,同时结合地形梯度特征揭示地形对景观生态风险分布格局的影响,以期对秦巴山地景观格局优化提供重要决策支持,同时为保障秦巴山地生态安全和生态环境保护提供科学参考。

## 1 研究区概况

秦巴山地位于中国中部,作为过渡地带东接平原西承青藏高原。跨越河南、陕西、甘肃、四川、湖北、重庆等 6 个省市,面积约  $3.00 \times 10^5 \text{ km}^2$  (图 1)。研究区主要由秦岭(南北坡),大巴山(南北坡)和西秦岭 3 部分组成<sup>[22]</sup>,地势呈东低西高、南北高中间低,地形地貌复杂多样。一方面,该区域处于暖温带和亚热带过渡地带,气候存在明显的南北差异性,成为典型的南北过渡带;另一方面,该区域由于地理环境复杂,造就了丰富且类型多样的生物资源,成为生物多样性保护地。秦巴山地景观格局空间分异显著,土地利用类型以林地为主,耕地和草地次之,建设用地零星分布贯穿其中。

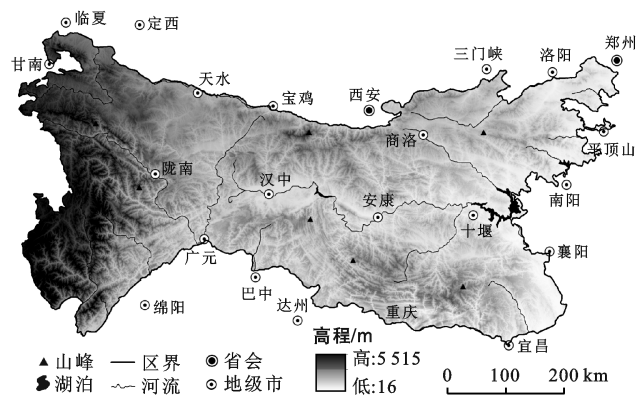


图 1 秦巴山地地理位置及其地形示意图

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

2000,2010,2020 年 3 期地表覆被数据来源于 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com/>),采用分块下载方式获取数据,利用 ArcGIS 10.2 软件进行拼接、裁剪得到秦巴山地地表覆被数据。根据研究需要,将各景观类型重分类处理为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地<sup>[23]</sup>。DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。上述数据空间分辨率均为 30 m,由于研究区域较大,为方便数据处理和比较分析,统一为 90 m。

### 2.2 研究方法

2.2.1 生态风险小区划分 为合理划分景观生态风险评价小区以及空间化显示秦巴山地景观生态风险指数,结合前人研究<sup>[24]</sup>,综合考虑研究区采样与计算量,本研究采用等间距抽样系统采样以  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的单元格将研究区划分为 3 346 个景观生态风险评价小区。

2.2.2 景观生态风险指数构建 秦巴山地作为完整的山地生态系统,景观格局变化对其内部生态系统稳定性有极大影响,而景观格局指数作为景观格局信息浓缩的载体可以充分反映景观格局特征。因此,依据景观生态学方法,选取景观损失度指数和各景观类型面积共同构建景观生态风险指数,以探究秦巴山地景观生态风险空间分异及格局变化情况。

(1) 景观干扰度指数  $E_i$ 。景观干扰度指数  $E_i$  能够反映不同景观类型受到干扰程度的强弱<sup>[25]</sup>。参照相关研究,选取景观破碎度、分离度、优势度指数,构建不同景观类型的景观干扰度指数  $E_i$ ,其公式为<sup>[7]</sup>:

$$E_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (1)$$

式中: $C_i$ ,  $N_i$ ,  $D_i$  分别代表景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数。 $a, b, c$  为相应景观指数的权重,且  $a + b + c = 1$ ,结合已有研究和研究区实际状况,对各景观指数的权重赋值如下: $a = 0.5, b = 0.3, c = 0.2$ <sup>[9]</sup>。

(2) 景观脆弱度指数  $F_i$ 。 $F_i$  为景观类型  $i$  的脆弱度指数,表示某一景观类型在受到外界干扰时的敏感性和易碎性<sup>[11]</sup>。根据前人研究<sup>[9,26]</sup>,并结合研究区实际情况,对各景观类型脆弱性进行赋值处理:未利用地 6,水域 5,耕地 4,草地 3,林地 2,建设用地 1。最后使用  $Z$ -Scores 标准化方法进行归一化处理,得到各自的  $F_i$  值,依次为<sup>[27]</sup>:0.285 7,0.238 1,0.190 5,0.142 9,0.095 2,0.047 6。

(3) 景观生态风险指数  $ERI_i$ 。景观生态风险指数可以反映各风险小区生态风险的相对大小<sup>[8]</sup>,其公式为:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^N \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i \quad (2)$$

$$R_i = E_i \times F_i \quad (3)$$

式中: $ERI_k$  为第  $k$  个风险小区的景观生态风险指数; $N$  表示景观类型的数量; $A_{ki}$  为第  $k$  个风险小区中景观类型  $i$  的面积; $A_k$  为第  $k$  个风险小区的面积; $R_i$  表示景观类型  $i$  的损失度指数,反映了各景观类型受到外界干扰的损失程度<sup>[18]</sup>。将各风险小区的景观生态风险值依次赋予至渔网中心点,再使用普通克里金插值法实现景观生态风险值的空间化表达。

2.2.3 空间自相关分析 空间自相关分析能够定量地描述某一要素的属性值与其邻近要素的属性值之间的空间相关性,包括全局空间自相关和局部空间自相关两种<sup>[8]</sup>。本文采用 Moran's  $I$  指数来分析秦巴山地景观生态风险值总体的空间关联和差异程度<sup>[24]</sup>,用 LISA 指数来检测秦巴山地一个风险小区

的景观生态风险值与相邻单元是否存在相关性或者相似性<sup>[12]</sup>。Moran's  $I$  值与 LISA 指数计算均在软件 GeoDa 中完成。

#### 2.2.4 地形梯度

(1) 地形位指数。研究区内多山地丘陵,地形因子特征复杂多样,因此选取可综合反映研究区海拔与坡度特征<sup>[28]</sup>的地形位指数来完整地表达研究区生态风险空间分布。其中,海拔越高,坡度越大,地形位指数越大,反之亦然,海拔高坡度小,坡度大海拔低则处在其中间。其公式为:

$$TNI = \lg \left[ \left( \frac{E}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left( \frac{S}{\bar{S}} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中: $TNI$  为地形位指数; $E$  为各风险小区平均海拔; $\bar{E}$  为研究区平均海拔; $S$  为各风险小区平均坡度; $\bar{S}$  为研究区平均坡度。

(2) 地形分布指数。为避免不同等级景观生态风险面积对其在不同地形梯度等级出现频率的影响<sup>[29]</sup>,采用地形分布指数来描述不同地形梯度上的景观生态风险分布状况。其公式为:

$$P_{ie} = \frac{(S_{ie}/S_i)}{(S_e/S)} \quad (5)$$

式中: $P_{ie}$  为地形分布指数; $S_{ie}$  为第  $i$  类景观生态风险在第  $e$  类地形梯度内的面积; $S_i$  为第  $i$  类景观生态风险总面积; $S_e$  为第  $e$  类地形梯度总面积; $S$  为研究区总面积。 $P_{ie}$  值越大,表明某一等级景观生态风险出现频率越高,当  $P_{ie} > 1$  时,表示第  $i$  类景观生态风险在地形梯度  $e$  上处于优势分布。

## 3 结果与分析

### 3.1 景观生态风险空间格局特征

为便于 3 期数据结果比较分析,以 2020 年生态风险值为基准,利用自然断点法将 3 期生态风险值数据按照以下标准划分为 5 个等级:低生态风险 ( $ERI < 0.132 8$ ),较低生态风险 ( $0.132 8 \leq ERI \leq 0.227 9$ ),中等生态风险 ( $0.227 9 < ERI \leq 0.380 8$ ),较高生态风险 ( $0.604 0 < ERI \leq 1.079 3$ ),高生态风险 ( $ERI > 1.079 3$ ),得到秦巴山地 3 期景观生态风险的空间分布图(图 2),并统计各等级面积比例(表 1)。由图 2 可知,秦巴山地景观生态风险空间差异特征显著,整体呈东西两侧跟中间高,南北低的分布格局,局部表现为中心高四周低的环形放射状的分布特征。以 2020 年为例,低生态风险区在天水东南部和陇南南部至商洛西部、甘南东南部至绵阳中部、广元东北部至襄阳西南部均呈连续状分布,伏牛山区也有大片分布,以上区域均以干扰度和脆弱性程度低的林地为

主,自然保护区密布,地形复杂多样,人口分布少,人为干扰度极低,使得低生态风险区呈优势分布。较低生态风险区多分布于低生态风险区外围,在陇南、商洛、广元北部延伸至十堰西部、甘南中部至天水南部、阿坝和豫西地区局部集中分布,以上区域多以林地为主、耕地和草地交错分布,且各景观类型分布格局基本稳定,人类活动强度相对较弱,因此,生态风险相应较低。中等生态风险区在汉中中部至安康中部、天水南部至陇南中部、商洛至郑州西部、阿坝、商洛和南阳局部均有明显分布,以上区域大多以耕地为主,林地、草地和建设用地交错分布,景观破碎化明显,城镇集中,人口密集,经济较为发达,人类活动强度增大,致使生态风险相对较高。较高生态风险区在十堰和南阳交界、汉滨区、临夏和甘南交界,以及阿坝局部集中分布,以上区域草地集中分布,耕地、林地、水域交错分布,景观破碎化严重,分离度较高,导致生态系统不稳定,生态风险相应较高。高生态风险区在红原、黑水和松潘交界地带、松潘、平武和九寨沟交界地带、碌曲、理县、丹江口和淅川集中分布,研究区西部边缘地带集中分布干扰度和脆弱性程度高的草地,且草地跟耕地交错分布,未利用地也集中分布,生态环境极其脆弱;在丹江口和淅川集中分布干扰度和脆弱性程度的水域,生态环境极其脆弱,导致生态风险偏高。

### 3.2 景观生态风险时空变化特征

3.2.1 景观生态风险等级变化分析 2000—2020年,秦巴山地景观生态风险平均值由原来的 0.208 9 下降至 0.180 0,景观生态风险持续下降。分析表 1 可知,低生态风险区面积显著增加,占比增长 5.55%,2000—2010年,变化量最大,增加了 19 001.77 km<sup>2</sup>;较低生态风险区面积呈持续上升趋势,但增长相对较少,仅为 0.34%;与此同时,高生态风险区面积呈持续减少趋势,占比下降 3.80%,2000—2010年,变化量最大,减少了 6 969.13 km<sup>2</sup>;中等和较高生态风险区面积均呈先减后增的趋势,整体下降 1.86%,1.23%。整体而言,低生态风险区明显扩张,高生态风险区显著缩小,表明秦巴山地生态系统越来越稳定,环境质量逐渐提升。

由表 2 可知,2000—2020年,秦巴山地景观生态风险多以相邻生态风险等级间的转移为主,尤其是低、较低与中等生态风险区之间的相互转化最为明显。其中,生态风险等级上升的区域面积为 11 071.98 km<sup>2</sup>,占总面积的 3.62%,生态风险等级下降的区域面积为 49 595.20 km<sup>2</sup>,占总面积的 16.22%,且以高向较低、中等向较低、较低向低生态风险转化为主。生态风险等级显著下降,表明研究期间内,政府实施退耕还林、封

山育林等一系列生态保护工程效果显著,促使生态环境质量逐渐提高,进而使得生态风险降低;但在水土流失和草地退化严重区域,生态风险仍在继续上升。

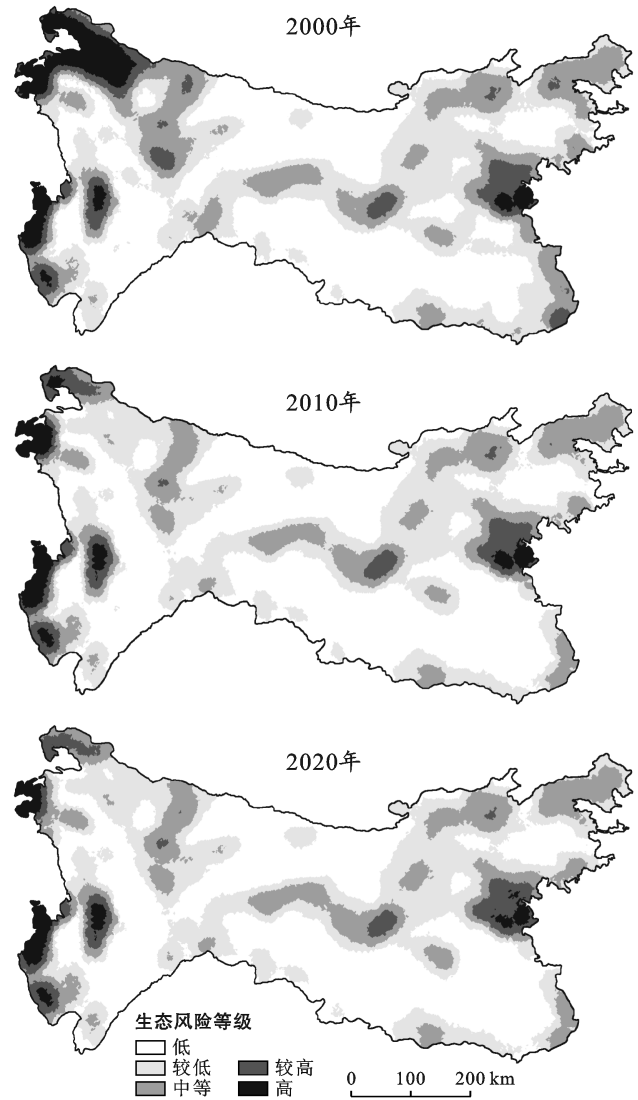


图 2 秦巴山地 3 期景观生态风险空间分布

3.2.2 景观生态风险空间变化分析 由图 3 可知,2000—2020年,研究区内生态风险区多数处于稳定状态,局部区域变化显著,且改善区域面积明显多于恶化区域。其中,改善区域主要位于临夏、甘南、定西和陇南与研究区东南部的十堰、襄阳和宜昌,多表现为连片分布。其原因如下:①甘肃省 1999 年开始实施封山育林、植树造林、退耕还林等措施,森林资源面积逐渐增加,水土流失状况得到有效控制,生态环境明显改善,生态风险相应降低。②湖北省 2001 年开始实施的退耕造林和荒山荒地造林,移民扶贫搬迁工程,同样使得森林植被快速恢复,并带动森林旅游业的发展,景观连通性增强,景观脆弱度降低,生态风险随之降低。恶化区域多分布于研究区的中东部与西

部边缘地区,且较为分散,呈环状分布。研究区西部边缘地区由于地势高,地形起伏大,易发生山体滑坡、泥石流等地质灾害,水土流失严重,草地取代林地,导致景观脆弱度增强,景观破碎度增加,生态风险相应升高。③人口快速增长,畜牧业发展迅速,过度畜牧,加之本身脆弱的自然环境,草地退化,也会导致生态

风险升高。而在研究区中东部,随着经济社会发展,人口快速增长,城市化进程加快,为满足日常生产、生活需要,城镇扩建,不得不对原有林地、耕地进行破坏。④在部分贫困山区,土地生产力低,为造田而加大破坏森林力度,从而加剧了景观破碎化程度,景观连通性变差,生态环境不断恶化,生态风险随之升高。

表 1 秦巴山地 2000—2020 年景观生态风险等级面积及比例

生态风险等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
低生态风险	123 940.39	40.53	142 942.16	46.74	140 919.71	46.08
较低生态风险	93 236.42	30.49	93 785.70	30.67	94 282.96	30.83
中等生态风险	55 535.54	18.16	47 174.67	15.43	49 854.20	16.30
较高生态风险	17 808.99	5.82	13 587.95	4.44	14 028.16	4.59
高生态风险	15 300.86	5.00	8 331.73	2.72	6 737.16	2.20

表 2 秦巴山地 2000—2020 年景观生态风险面积转移矩阵

生态风险等级	2000 年面积					合计
	低生态风险	较低生态风险	中等生态风险	较高生态风险	高生态风险	
低生态风险	119 674.16	4 266.23	0	0	0	123 940.39
较低生态风险	18 955.00	69 684.10	4 597.32	0	0	93 236.42
中等生态风险	1 110.07	13 188.01	39 958.98	1 278.48	0	55 535.54
较高生态风险	222.37	2 668.25	3 957.84	10 030.58	929.95	17 808.99
高生态风险	958.10	4 476.37	1 340.06	2 719.13	5 796.27	15 300.86
合计	140 919.71	94 282.96	49 854.20	14 028.16	6 737.16	305 822.21

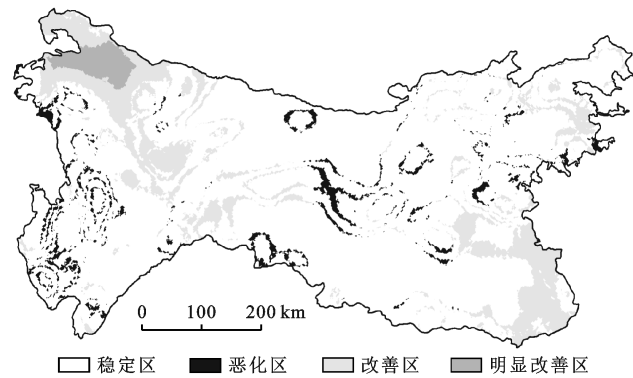


图 3 2000—2020 年秦巴山地景观生态风险变化

### 3.3 景观生态风险空间自相关分析

运用 Geoda 软件对 3 期景观生态风险指数数据进行相关性分析得到秦巴山地 2000, 2010, 2020 年的全局 Moran's  $I$  值, 分别为 0.616 0, 0.585 1, 0.585 8。3 期 Moran's  $I$  值均为正值, 表明秦巴山地景观生态风险的空间分布存在显著的正相关性, 并非随机分布, 即景观生态风险值高的区域, 临近区域值也高; 反之亦然。2000—2020 年, Moran's  $I$  值先减少后增加, 说明在时间序列上, 秦巴山地景观生态风险空间自相关性和空间趋同性均有所下降。

由局部空间自相关集聚图(图 4)可知, 2000—

2020 年秦巴山地景观生态风险空间分布均以低—低和高—高聚集为主, 且与同期的景观生态风险空间分布格局高度一致。低值聚集区连绵分布于天水至商洛西部、汉中和安康北部、汉中南部至襄阳西部, 表明以上区域生态风险水平低, 相邻区域生态风险水平也低, 这可能与区域内林地密布, 植被覆盖度高, 人类活动较少, 生态系统趋于稳定有关。高值聚集区主要分布于研究区西部边缘地区和东部的丹江口区域, 表明以上区域生态风险水平高, 相邻区域生态风险水平也高, 以上区域主要是由于各景观类型交错分布, 景观破碎化严重, 且水域和草地集中分布, 生态环境脆弱, 生态风险值相对偏高。

### 3.4 地形梯度对景观生态风险的影响

在宏观地貌格局的控制下, 秦巴山地景观生态风险的空间分布具有一定的规律性。高生态风险多集中分布于海拔高、地形复杂或海拔低、地形平坦地区, 低生态风险在中等地形梯度地区呈优势分布。海拔高、地形复杂地区景观类型是草地与裸地, 景观损失度和脆弱度较高, 由于特殊的地理环境, 水土流失、滑坡、泥石流等地质灾害频繁发生, 生态环境脆弱, 此外, 人类活动以畜牧为主, 过度放牧易导致草场退化, 因此, 生态风险较高; 海拔低、地形平坦地区景观类型

多为水域、建设用地和耕地,且各景观类型交错分布,相应地城镇扩张和农业生产等人类活动频繁,景观干扰度和破碎度随之提升,生态风险也会偏高。中等地形梯度地区多集中分布林地,或多为自然保护区,其次,由于海拔偏高,地形起伏大,交通可达性差,人类活动干扰度弱,生态系统稳定,生态风险较低。

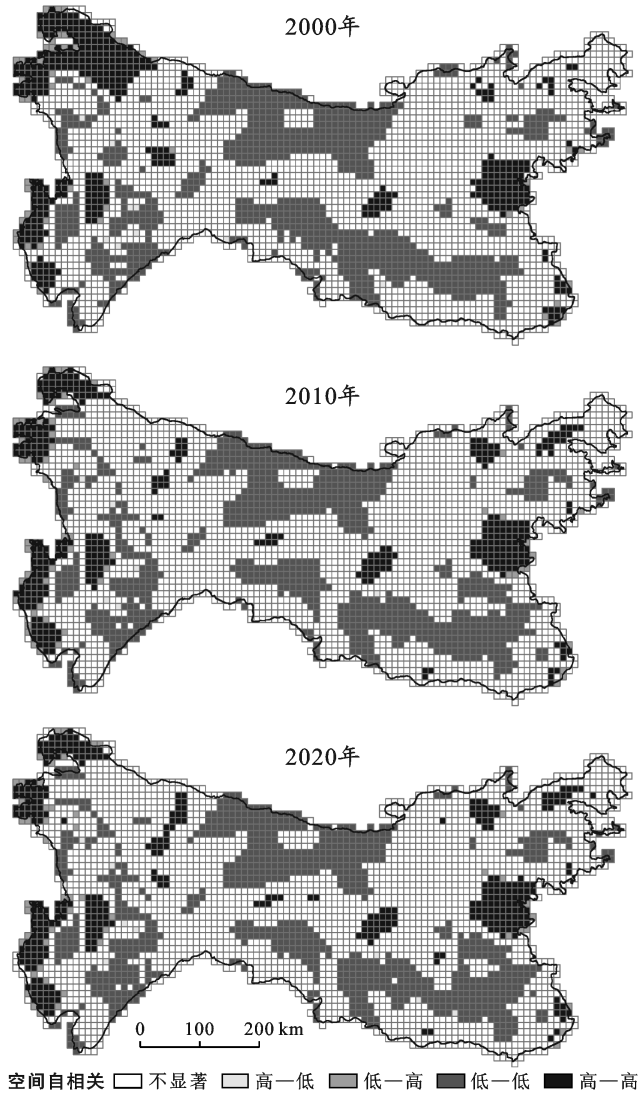


图 4 秦巴山地景观生态风险局部空间自相关特征

为进一步分析景观生态风险与地形梯度的关系,将地形分布指数(0~1)以 0.2 为一个间隔等间距划分为 5 个等级(I, II, III, IV, V),并结合景观生态风险值等级,统计各景观生态风险等级在各地形梯度上的分布特征(表 3)。近 20 a 来,高生态风险区在第 I 级和第 V 级地形梯度中占主导地位,且分布指数呈现明显的增长趋势,在第 IV 级地形梯度优势消失;较高生态风险区在第 I 级和第 II 级以及第 V 级地形梯度中占主导地位,在第 II 级与第 V 级梯度上有增长趋势,但在第 I 级梯度上呈减小趋势;中等生态风险区

在第 I 级和第 II 级地形梯度中占主导地位,且分布指数呈减小趋势;较低生态风险区在第 II 级和第 III 级地形梯度中占主导地位,略微有减小趋势,开始在第 I 级地形梯度出现;低生态风险区在第 IV 级地形梯度中占主导地位,略微有减小趋势。这表明在第 I 级地形梯度区域,由于人口数量增加,城镇扩建,产业活动发展,建筑用地景观连通性增强,脆弱度减小,使得区域内生态风险指数降低,中等和较高生态风险区优势减弱;在第 II 级地形梯度区域,丹江口水库水域面积逐渐增大,景观脆弱度和破碎度均升高,导致较高生态风险区优势分布增加,研究区东南部由于退耕造林,生态环境逐渐好转,致使生态风险降低,较低和中等生态风险区优势分布相对减弱;在第 III 级地形梯度区域,随着社会经济的快速发展,汉江流域低平地区已经不能满足人类发展需要,人类活动开始向中高山区扩散,打破了原有稳定的景观格局,加剧了景观破碎化程度,生态风险恶化,较低生态风险区向更高地形梯度移动;在第 IV 级地形梯度区域,林地是其优势景观,植被覆盖度高,加之该区域自然保护区众多,且该区域多为贫困山区,经济发展落后,对自然环境破坏较小,景观格局无明显变化,生态系统稳定,生态风险最低;在第 V 级地形梯度区域,受自然条件影响,易于发生地质灾害,生态环境质量较差,导致林草用地互换,高生态风险区优势逐渐增加。整体而言,各生态风险等级在地形梯度上的分布趋势基本稳定,说明地形在一定程度上可以影响景观生态风险格局的分布,这也是山地区域景观生态风险的一种特性。

表 3 2000—2020 年秦巴山地各生态风险等级的地形位分布指数

地形位梯度 (分布指数)	年份	各等级生态风险指数				
		低	较低	中等	较高	高
I (0~0.2)	2000	—	—	3.27	1.97	1.27
	2010	—	—	3.22	1.43	2.29
	2020	—	1.04	2.92	1.60	2.39
II (0.2~0.4)	2000	—	1.20	2.39	2.12	—
	2010	—	1.06	2.31	2.60	—
	2020	—	1.02	2.20	2.76	—
III (0.4~0.6)	2000	—	1.41	—	—	—
	2010	—	1.27	—	—	—
	2020	—	1.27	—	—	—
IV (0.6~0.8)	2000	1.56	—	—	—	1.84
	2010	1.47	—	—	—	—
	2020	1.48	—	—	—	—
V (0.8~1.0)	2000	—	—	—	1.91	2.31
	2010	—	—	1.04	2.66	3.99
	2020	—	—	1.14	2.68	4.14

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

秦巴山地整体景观生态风险偏低且稳定,这与该区域地形环境密切相关。地形因素一定程度上能够决定土地利用的方向与方式,为景观格局的形成提供基础,影响景观结构,进而影响景观生态风险空间格局分布与变化。秦巴山地作为一个完整的山地生态系统,在地形起伏较小的中高山区,由于交通不畅,人为干扰较小,原始森林植被保存完好,在部分低山区,为促进经济发展,人工林地、果园遍布,林地成为区域的优势景观,为区域低、较低生态风险区连绵分布奠定了基础<sup>[30]</sup>。在西部高海拔、坡度大的高山区,干扰度高、脆弱性程度高的草地连片分布,又加上地形起伏度大,地质灾害频繁发生,水土流失严重<sup>[31]</sup>,常出现林地和草地相互转换和草地退化的现象<sup>[21]</sup>,加剧了景观破碎化和分离度程度,因此,该区域景观生态风险整体较高。在地形平坦的盆地区域,耕地与建设用地、水域集中分布,各景观类型交错分布,分离度高,景观连通性弱,破碎化严重,地形平坦利于道路修建,交通通达度高,人类活动频繁,导致区域内生态风险偏高<sup>[26,32]</sup>。此外,地形条件在一定程度上可以限制人类活动,减少人类对原有生态环境的破坏,自然生态系统受到较小干扰,这也是研究区大部分区域生态风险处于稳定状态的原因<sup>[33]</sup>。在山区,地形高差和起伏能够决定人口分布和经济发展的空间格局<sup>[34]</sup>,进一步影响人类活动强度,促使景观格局发生不同程度改变,进而影响景观生态风险格局。

景观生态风险格局及其变化是自然、人类活动与景观格局综合作用的结果。人类活动能在短时间内改变区域环境,2000—2010年由于退耕还林、植树造林,以及生态环境综合治理等生态保护工程的实施,区域植被覆盖快速增加,土地利用类型相应发生巨大变化,景观连通性逐渐增强,生态环境质量显著提升,使得研究区西北部和东南部景观生态风险呈明显改善趋势。设立自然保护区、森林公园、地质公园等自然保护地<sup>[35]</sup>,使得自然生态系统得到妥善保护,发展稳定,进而稳固较低的景观生态风险格局。随着社会经济的发展,人口的快速增长,人类对土地开发利用强度逐渐增大。如为满足住房和日常生活需要,多会以毁坏耕地或者林地作为代价,不断进行城镇扩张、道路建设,以及不合理的农业生产活动等,导致景观分离度加剧、破碎化严重,加之建设用地增加会导致周边景观生态风险增加,造成生态风险增加的态势<sup>[26,30]</sup>。生态旅游业的发展对生态环境保护也起到

一定积极作用,对于原生林的保护的同时,有效地提升了土地利用水平,生态风险相应降低。整体而言,秦巴山地景观生态风险格局分布特征主要受自然因素控制,而局部区域生态风险变化则是自然环境与人类活动共同作用的结果。

在未来对秦巴山地的生态建设过程中,要严守生态保护红线,加强对自然山林的保护,严格把控自然保护区建设,保障水源安全;预防泥石流、崩塌等地质灾害发生,减少水土流失;合理调整农林用地,适度发展农业生产,协调好农业发展与退耕还林、还草政策的关系;合理规划城镇用地,统筹规划,与自然协调发展。

秦巴山地景观生态风险的分布格局与变化同时受人类活动与自然环境的综合作用。本研究基于秦巴山地地表覆被数据,仅从宏观层次探讨研究区近20 a来景观生态风险特征、变化过程以及地形梯度对其分布的影响,未从人地关系视角,采用更加综合的方法探讨人类活动对景观生态风险影响。在未来对秦巴山地景观生态风险的研究中,将综合自然和人文因素分析景观生态风险特征,以期更好地服务秦巴山地生态安全建设。

### 4.2 结论

(1) 秦巴山地景观生态风险整体偏低,空间差异特征显著,且存在着明显的空间集聚效应。低和较低生态风险区连续分布于研究区的南北两侧,中等、较高和高生态风险区零星分布于研究区的东部、中部和西部边缘地带。

(2) 2000—2020年,秦巴山地景观生态风险持续下降,其中,低生态风险区明显扩张,高生态风险区显著缩小,说明退耕还林、封山育林等一系列生态保护工程取得良好成绩,生态环境质量正在逐渐提高。

(3) 秦巴山地景观生态风险分布格局与地形梯度密切相关,局部区域生态风险变化则是自然环境与人类活动共同作用的结果。高生态风险多集中分布于海拔高、地形复杂或海拔低、地形平坦地区,低生态风险在中等地形梯度地区呈优势分布。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 蒋艳灵,刘春腊,周长青,等.中国生态城市理论研究现状与实践问题思考[J].地理研究,2015,34(12):2222-2237.
- [2] 侯鹏,王桥,申文明,等.生态系统综合评估研究进展:内涵、框架与挑战[J].地理研究,2015,34(10):1809-1823.
- [3] 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.
- [4] 王飞,叶长盛,华吉庆,等.南昌市城镇空间扩展与景观生态风险的耦合关系[J].生态学报,2019,39(4):

- 1248-1262.
- [5] Wang Beibei, Ding Mingjun, Li Shicheng, et al. Assessment of landscape ecological risk for a cross-border basin: A case study of the Koshi River basin, Central Himalayas [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106621.
- [6] Paukert C P, Pitts K L, Whittier J B, et al. Development and assessment of a landscape-scale ecological threat index for the Lower Colorado River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 304-310.
- [7] 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.
- [8] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5952-5960.
- [9] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2041-2048.
- [10] 熊鹰, 汪敏, 袁海平, 等. 洞庭湖区景观生态风险评价及其时空演化[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(7): 1292-1301.
- [11] 陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 975-986.
- [12] 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.
- [13] 吴健生, 乔娜, 彭建, 等. 露天矿区景观生态风险空间分异[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3816-3824.
- [14] 田鹏, 李加林, 史小丽, 等. 浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2697-2706.
- [15] Xue Lianqing, Zhu Boli, Wu Yiping, et al. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River Basin based on terrain gradients [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 283-293.
- [16] 胡金龙, 周志翔, 滕明君, 等. 基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估: 以漓江流域为例[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 2003-2012.
- [17] Andraski B J, Jackson W A, Welborn T L, et al. Soil, plant, and terrain effects on natural perchlorate distribution in a desert landscape [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(3): 980-994.
- [18] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3729-3740.
- [19] Yin Haoran, Chen Chaonan, Dong Qingdong, et al. Analysis of spatial heterogeneity and influencing factors of ecological environment quality in China's North-South transitional zone [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(4): 2236.
- [20] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 305-311.
- [21] 张静, 任志远. 秦巴山区土地利用时空格局及地形梯度效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 250-257.
- [22] 赵芳, 张久阳, 刘思远, 等. 秦巴山地 NPP 及对气候变化响应的多维地带性与暖温带—热带界线[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 57-68.
- [23] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J]. *资源科学*, 2011, 33(6): 1195-1203.
- [24] 叶长盛, 冯艳芬. 基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 224-232.
- [25] 许妍, 高俊峰, 赵家虎, 等. 流域生态风险评价研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 284-292.
- [26] 杜军, 赵胜朝, 邱士可, 等. 2000—2015 年豫西黄土丘陵区土地利用变化及景观生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 279-284.
- [27] 李思佳. 山西省泽州县土地利用生态风险评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [28] 李京京, 吕哲敏, 石小平, 等. 基于地形梯度的汾河流域土地利用时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 230-236.
- [29] 董顺舟, 赵宇鸾, 李秀彬. 基于地形梯度的高原山地区土地利用格局时空特征: 以贵州省盘县为例[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 213-222.
- [30] 李小燕, 柳书俊, 王志杰. 南水北调中线汉中市水源地景观生态风险评价与特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 181-187.
- [31] 巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 2153-2160.
- [32] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1280-1290.
- [33] 刘迪, 陈海, 耿甜伟, 等. 基于地貌分区的陕西省区域生态风险时空演变[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 243-254.
- [34] 敬博, 李同昇, 温伯清, 等. 基于地形因素的秦巴山区人口—经济空间格局及其影响机制研究[J]. *地理科学*, 2020, 40(5): 793-803.
- [35] 余付勤, 张百平, 王晶, 等. 国外大尺度生态廊道保护进展与秦岭国家公园建设[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2478-2490.