DOI: 10.20103/j.stxb.202209192681

王锦宇, 关颖慧, 吴秀芹.喀斯特断陷盆地景观生态风险演变及其地形分异.生态学报,2023,43(19):8167-8180.

Wang J Y, Guan Y H, Wu X Q.Evolution of landscape ecological risk and its topographic differentiation in Karst Fault Basin.Acta Ecologica Sinica,2023,43(19):8167-8180.

喀斯特断陷盆地景观生态风险演变及其地形分异

王锦宇[1], 关颖慧[1,2,*], 吴秀芹[1,2]

1 北京林业大学水土保持学院, 云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083

2 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要:景观生态风险评价是构建区域生态安全格局的关键途径。以喀斯特断陷盆地为研究对象,从自然、社会、景观格局三个维度选取 11 个评价因子构建景观生态风险评价指标体系,通过空间主成分分析的方法评价研究区 2000—2020 年的景观生态风险时空演变格局,并基于地形位指数系统揭示喀斯特断陷盆地景观生态风险与地形的关系。结果表明:(1)2000—2020 年,喀斯特断陷盆地的景观生态风险水平整体呈下降趋势,生态环境整体好转。(2)景观生态风险的变化呈现出较强的时空异质性,南部更甚。2000 和 2005 年,研究区高、较高景观生态风险区主要分布于研究区北部和南部部分地区;2010 年及其以后,高风险区面积显著减少,低风险区面积显著增加,但南部个别区县的风险水平未明显改善。(3)20 年间,除建设用地外,不同土地利用类型的生态风险水平均显著降低。到 2020 年,耕地、林地、草地均主要分布在风险水平较低的区域,而建设用地在高风险区的面积仍高达 43.43%。(4)景观生态风险在不同地形位梯度的变化随时间推移有显著差异。研究初期,各风险区对地形的选择性较强,低、较低风险区在中、低地形位区间的分布优势较强,高风险区倾向分布在高地形位区间;随时间推移,不同等级风险区对地形的选择性减弱,地形对景观生态风险的影响逐渐减小,人类活动对景观生态风险的影响日益凸显。

关键词:喀斯特断陷盆地;空间主成分分析;景观生态风险;地形

Evolution of landscape ecological risk and its topographic differentiation in Karst Fault Basin

WANG Jinyu[1], GUAN Yinghui[1,2,*], WU Xiuqin[1,2]

1 *School of Soil and Water Conservation, Jianshui Research Station, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

2 *Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing* 100083, *China*

Abstract: Under the dual background of the acceleration of urbanization and the requirement of sustainable development, people are paying more and more attention to regionally ecological security. In this context, landscape ecological risk assessment could evaluate the regionally ecological environment from the perspective of landscape pattern and ecology, and it is a crucial way to construct regionally ecological security pattern. Previous attempts to evaluate landscape ecological risk mainly focused on land use and the calculation of landscape index, overlooking the impact of topography. The Karst Fault Basin is located in the middle and upper reaches of the Pearl River and the Yangtze River, with complex topography and fragile ecological environment. Here, taking the Karst Faulted Basin as the research object, we selected 11 evaluation factors from three dimensions of nature, society and landscape pattern to construct an evaluation index system of landscape ecological risk. The factors′ weights were determined by spatially principal component analysis (SPCA) and mathematical statistics, and the spatio-temporal evolution pattern of landscape ecological risk in the study area from 2000 to 2020 was evaluated. Furthermore, based on terrain niche index derived from Digital Elevation Model (DEM), the topographic

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF1302900, 2016YFC0502504)

收稿日期:2022-09-19; **网络出版日期**:2023-05-15

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gyhdem@ bjfu.edu.cn

distribution indices of each ecological risk grade in the study area from 2000 to 2020 were calculated, and the relationship between landscape ecological risk and topography in the Karst Faulted Basin was systematically revealed. The results showed that: (1) from 2000 to 2020, the landscape ecological risk level of the Karst Faulted Basin presented a downward trend, and the overall level of ecological environment improved. The change of landscape ecological risk demonstrated strongly spatial and temporal heterogeneity. In 2000 and 2005, the landscape ecological risks in the study area were mainly medium, relatively high and high, and concentrated in the north and some parts of southern study area. After 2010, the area of high risk region decreased significantly, while the area of low risk region increased significantly. However, the landscape ecological risk level of some southern districts and counties showed a trend of rising instead of decreasing. (2) The landscape ecological risk levels of different land use types decreased significantly except for construction land in past 20 years. In 2020, the cultivated land, forest land and grassland were mainly distributed in areas of low and relatively low risk level, while the area of construction land in high risk regions was still as high as 43.43%. (3) The changes of landscape ecological risk in different topographic gradients presented significant differences over time. At the early stage of the study period, all risk areas had strong terrain selectivity. Low and relatively low risk regions were mainly distributed in the middle and low terrain intervals, and high risk areas tended to be distributed in the high terrain intervals. As time went by, the topographic selectivity of different risk regions declined, indicating that the impact of terrain on landscape ecological risk gradually decreased, and the influences of human activities on landscape ecological risk became increasingly obvious. Our analysis can provide a reliable scientific basis for optimization of landscape pattern, ecological protection decision and further development and construction of the Karst Fault Basin.

Key Words: Karst Faulted Basin; spatial principal component analysis; landscape ecological risk; topography

景观生态风险是指在自然或人为因素影响下景观格局与生态过程耦合可能产生的不利后果[1]。在城市化进程快速推进和生态保护日趋重要的双重背景下,景观生态风险评价能够从景观格局和生态学视角评估区域的生态环境状况,为区域的生态保护决策以及进一步开发建设提供可靠的科学依据。

近年来,国内外学者从景观格局演变[2—4]、景观生态过程[5—6]等多方面针对不同区域、选用不同方法进行了景观生态风险评价[7]。研究尺度涉及行政区[8]、城市群[9]、流域[10—13]、生态脆弱区以及自然保护区[14]等多个层级。研究方法基本可以划分为两类:一是早期的基于风险源汇的景观生态风险评价,即将景观类型分为促进生态过程发展的“源”和延缓生态过程发展的“汇”[15],在设定的评价目标单元中计算生态风险;二是基于景观格局的评价方法,即基于景观生态学的理论,通过景观镶嵌体评价生态风险强弱,该方法广泛应用于土地利用变化驱动下的生态风险评价[1]。关于景观生态风险评价的研究多集中在类型和景观水平上的景观格局指数计算,对于自然条件和土地利用模式较为复杂的地区代表性有限,尤其是地形对景观生态风险的影响缺少关注;且现有研究多为静态的景观格局分析,忽略了景观尺度上生态系统的动态演变过程[1]。总的来说,目前关于景观生态风险评价并无统一标准,不同区域甚至同一区域不同学者的评价方法均有差异。喀斯特断陷盆地位于珠江、长江中上游,隶属国家“两屏三带”中的黄土高原—川滇生态屏障,是石漠化综合治理重要类型区之一。断陷盆地石漠化区独特的盆-山共存结构使得周边山地高出盆地 500—1000m,且其自然降水与岩溶高原、峰丛洼地、岩溶槽谷等其他石漠化类型区存在显著差异,气候干热,水资源矛盾更为突出,加上该区石漠化治理起步晚、投入少,石漠化治理难度相对更大,生态环境更加脆弱[16—17]。这一特殊的自然本底条件和不合理的土地利用方式使得喀斯特断陷盆地的景观生态风险难以通过景观格局指数直接衡量,如何构建适用于喀斯特断陷盆地的景观生态风险评价指标体系是亟待解决的关键问题。

鉴于此,本文以西南喀斯特断陷盆地为研究对象,从自然、社会、景观格局 3 个维度选取 11 个评价因子构建景观生态风险评价指标体系,采取空间主成分分析的方法确定指标权重,评价研究区 2000—2020 年的景观生态风险动态演变,并通过地形位指数和地形分布指数,系统揭示喀斯特断陷盆地景观生态风险与地形的关

系。研究结果可为喀斯特断陷盆地土地利用管理、生态保护与修复提供科学依据。

1　研究区概况

喀斯特断陷盆地主要分布在滇东-攀西一带,是青藏高原隆升产生的断裂活动所引起的断块差异沉陷及侵蚀和溶蚀作用共同形成的山间盆地[18]。研究区包括云南、四川、贵州 3 省交界处的 43 个区县,面积达 11.04 万 km^2,位于东经 100°03′—105°10′和北纬 22°39′—29°10′,具体见图 1。该区属亚热带季风气候,干湿分明,季节性干旱严重,降水多集中在 5—10 月。喀斯特断陷盆地特殊的地质构造体系和强烈的构造运动导致该区形成了盆-山共存的地质分异构造,盆地平面形态近似封闭的椭圆形,盆地内地形平坦,四周为断块山地,为岩溶流域的主要补给区,洼地底部多有落水洞、竖井分布,可利用的耕地资源和水资源均有限。相对于喀斯特峰丛洼地、高原和槽谷等岩溶地貌区,断陷盆地的地形起伏大,海拔悬殊,气候垂直分带明显,盆地周边山区石漠化严重,植被立地条件较差,群落稳定性和生态系统多样性不高[19]。

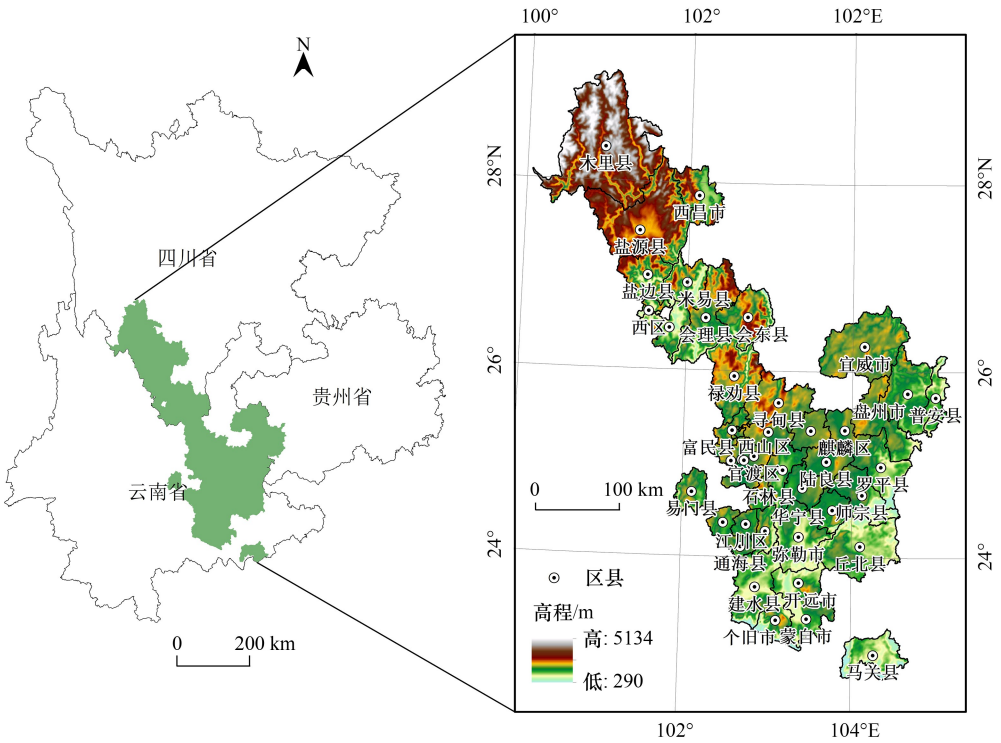


图 1　喀斯特断陷盆地地理位置

Fig.1　The geographical location of Karst Faulted Basin

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

研究所用数据包括土地利用数据、DEM 数据、降水量数据、土壤可蚀性因子(k 值)数据、NDVI 数据、其他基础地理信息数据及社会经济统计数据。①土地利用数据:来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),空间分辨率为 30m,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地共 6 个一级地类以及水田、旱地等 25 个二级地类。该数据集土地利用类型综合评价精度达到 90%以上,在相关研究中得到了广泛应用。②DEM 数据:来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),空间分辨率为 30m。③降水量数据:来源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)的逐月气象站点数据。④土壤可蚀性因子 k:来自第一次全国水利普查水土保持情况普查土壤可蚀性因子成果栅格数据,空间分辨率为 30m。⑤NDVI 数据:来自

于美国航空航天局(NASA)提供的 MOD13A3 数据集(https://modis.gsfc.nasa.gov/),空间分辨率为 1km,时间分辨率为 1 个月,采用最大值合成法由月数据合成年数据。⑥其他基础地理信息数据:包括居民点数据等,来源于全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/),比例尺为 1:100 万,为 shp 格式文件。⑦社会经济统计数据:来源于各省市统计年鉴。为研究方便,本研究中数据坐标系统均统一为 Krasovsky_1940_Albers 投影坐标系,栅格数据分辨率统一为 1km。

2.2 研究方法

2.2.1 景观生态风险评价

(1)生态风险评价因子选取。本文结合喀斯特断陷盆地生境的复杂性和多样性,考虑到指标的可获得性,并参考前人研究[20—22],从自然、社会、景观格局 3 个维度选取了高程、坡度、降水量、土壤可蚀性、距居民点距离、距工矿用地距离、人口密度、香农均匀度指数(SHEI)、蔓延度指数(CONTAG)、地表覆被类型、植被覆盖指数共 11 个评价因子构建景观生态风险评价指标体系(表 1)。其中,距居民点距离的栅格数据通过 ArcGIS 软件中的距离计算工具得到;香农均匀度指数和蔓延度指数基于土地利用数据,在 Fragstats 软件中使用移动窗口法得出;植被覆盖指数由年 NDVI 最大值表示。各个指标的分级依据详见表内,1—5 级分别表示低风险、较低风险、中风险、较高风险和高风险。

表 1 景观生态风险评价指标及分级标准

Table 1 Landscape ecological risk assessment index and classification standard

指标类型 Indicator type	评价因子 Factor	分级标准 Classification standard					参考依据 Reference standard
		1 级 Level 1	2 级 Level 2	3 级 Level 3	4 级 Level 4	5 级 Level 5	
自然 Nature	高程/m	<1000	1000—2000	2000—3500	3500—5000	>5000	[23—25]
	坡度/(°)	<8	8—15	15—25	25—30	>30	[26]
	降水量/mm	>1000	800—1000	600—800	400—600	<400	[27]
	土壤可蚀性因子/($t\ hm^2\ h\ hm^{-2}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)	<0.007	0.007—0.014	0.014—0.021	0.021—0.028	>0.028	研究区情况
社会 Society	距居民点距离/m	>2500	1500—2500	1000—1500	500—1000	<500	[28—29]
	距工矿用地距离/m	>2500	1500—2500	1000—1500	500—1000	<500	[28—29]
	人口密度/(人/km^2)	<100	100—300	300—500	500—1000	>1000	[30]
景观格局	香农均匀度指数	>0.8	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	<0.2	[20]
Landscape pattern	蔓延度指数/%	>60	40—60	25—40	10—25	0—10	[20]
	地表覆被类型	有林地、灌木林、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、湖泊、水库坑塘	水田、中覆盖度草地、河渠	旱地、低覆盖度草地、滩地、沼泽地	永久性冰川雪地	城镇用地、农村居民点、其他建设用地、沙地、裸土地、裸岩石质地	[21]
	植被覆盖指数	0.8—1	0.72—0.80	0.65—0.72	0.45—0.65	0—0.45	[20]

(2)空间主成分分析(Spatial principal components, SPCA)。该方法是将输入的多个波段数据变换到一个新的空间中,对原始空间轴进行旋转而成的新的多元属性空间[31]。本文将空间主成分分析的方法引入景观生态风险评价中,通过空间主成分分析得出空间载荷图、各个成分的贡献率和累计贡献率,将累计贡献率超过 90%的成分确定为有统计学意义的主成分[32],再根据特征值、载荷矩阵等利用数理统计方法计算每个因子的权重,然后通过 ArcGIS 地图代数工具将各因子进行加权叠加,得到最终的景观生态风险评价结果[20]。具体数学表达式如下[29]:

$$E = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} (a_{ij} F_{ij}) \quad (2)$$

式中,E 表示景观生态风险评价结果;a_{ij}表示第 i 个栅格对应的第 j 个主成分;F_{ij}表示第 j 个主成分的特征贡献率。

2.2.2　地形位指数和地形分布指数计算

鉴于喀斯特断陷盆地地形地貌复杂,对当地景观生态风险影响较大[33],故引入地形位指数和地形分布指数,对研究区地形和景观生态风险的关系进行深入探讨。

(1)地形位指数。综合考虑坡度和高程两个最能表征地形因素的因子。公式如下[34—35]:

$$T=\lg\left[\left(\frac{E}{\bar{E}}+1\right)\times\left(\frac{S}{\bar{S}}+1\right)\right] \tag{3}$$

式中,T 为地形位指数;E 和 S 分别为研究区任意栅格单元的高程和坡度,$\bar{E}$ 和 $\bar{S}$ 分别为研究区的高程平均值和坡度平均值。高程和坡度值越大,其地形位指数越大,反之则越小。

(2)地形分布指数。用来研究地形因素对景观生态风险的影响,可以简化为不同地形位梯度上生态风险的分布频率[36]。为了消除地形位梯度与景观生态风险等级面积之间的量纲差异,本研究引入地形分布指数,探究不同地形位梯度下各景观生态风险等级区的分布特征。公式如下[34]:

$$P=\left(\frac{S_{ie}}{S_i}\right)\Big/\left(\frac{S_e}{S}\right) \tag{4}$$

式中,P 为地形分布指数;S_{ie}为第 e 级地形位内第 i 种景观生态风险等级区的面积;S_i为第 i 种景观生态风险等级区的总面积;S_e为第 e 级地形位梯度的总面积,本研究将地形位指数分为 10 个梯度;S 为研究区总面积。当 $P>1$ 时,表明该风险等级区在该地形位梯度上的分布比例大于该风险等级区占研究区总面积的比例,所以将 $P>1$ 的区间设定为该风险等级区的优势区间。地形分布指数曲线越平缓,表明某种风险等级对地形差异的适应性越大;反之,表明某种风险等级区对地形具有较强的选择性[37]。

3　结果与分析

3.1　景观生态风险演变格局

3.1.1　评价因子风险分析

随时间推移,部分评价因子的空间格局会发生变化,但高程、坡度、土壤可蚀性因子、距居民点距离短期内基本不会发生变化(图 2)。高程、坡度因子的风险水平呈现“北高南低”的空间分布格局;土壤可蚀性因子中,高、较高风险等级区主要分布于研究区北部;降水量因子的风险等级大致呈现中部低、南北高的空间格局。距居民点距离因子的生态风险等级呈现以居民点为中心,向外围依次降低的趋势;20 年间工矿用地面积明显扩张,距工矿用地距离因子风险较高的区域面积也逐渐增加;人口密度也显著增长,北部风险等级较南部低;均匀度指数和蔓延度指数因子的风险分布状况较为接近,高风险区均分布在研究区北部和南部;地表覆被类型因子中、低和较低风险区面积占比较大;植被覆盖指数因子的风险等级在 2000 年和 2005 年以较低风险为主,之后风险等级明显降低。

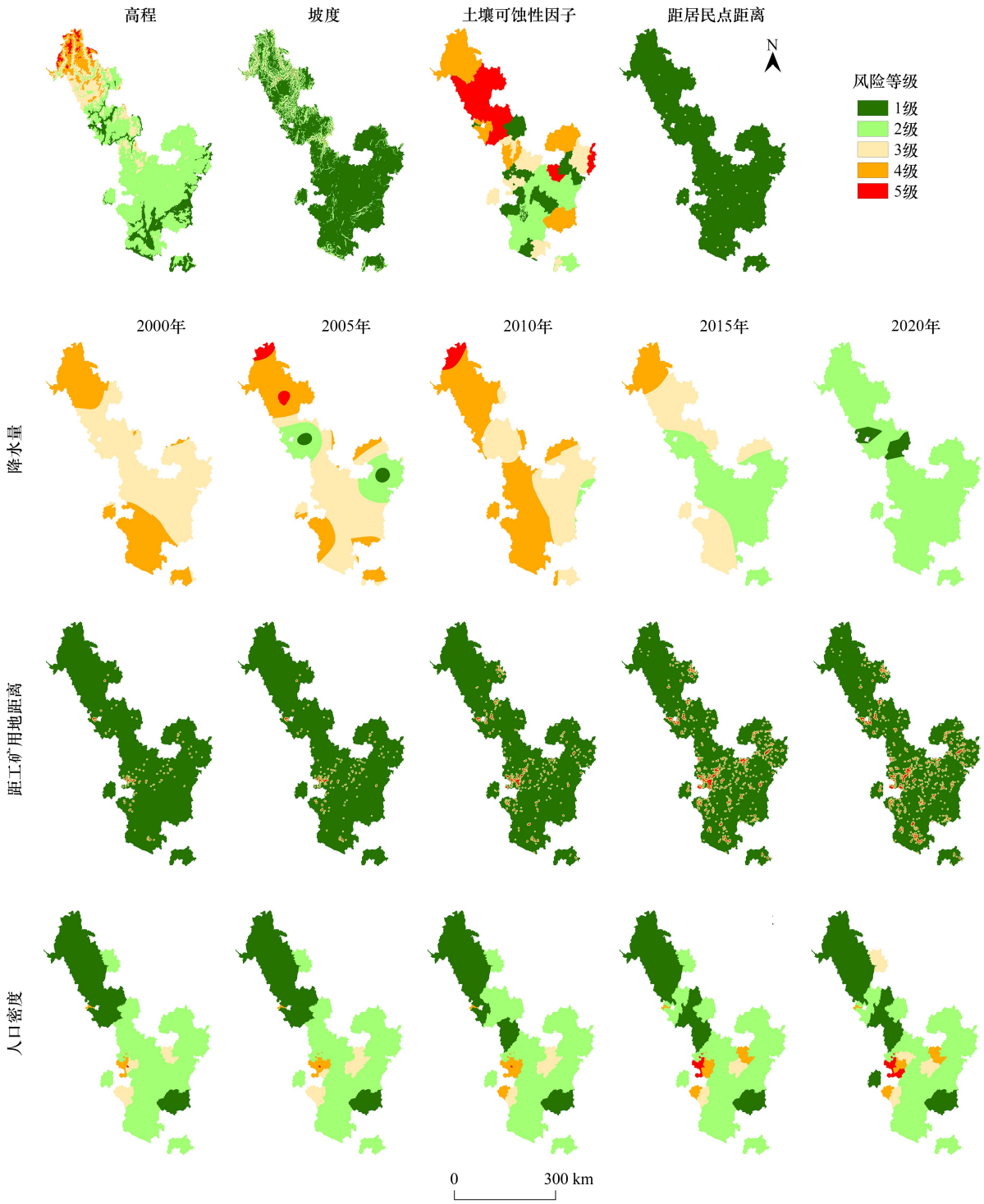
3.1.2　景观生态风险评价结果

利用空间主成分分析和数理统计方法计算出各期评价因子权重,基于 ArcGIS 计算得出 2000—2020 年的景观生态风险评价结果,采用自然断点法将其分为 5 级[11,38—39]:低风险区(<1.91)、较低风险区(1.91—2.25)、中风险区(2.25—2.62)、较高风险区(2.62—3.07)、高风险区(>3.07)(图 3),并得出各风险等级区对应的面积(图 4)。空间上,研究区整体呈现“北高南低”的分布格局,2010 年前,高、较高风险区集中位于研究区北部即木里县、盐源县、西昌市等市县,这些地区多为山地,高程和坡度较高,土壤可蚀性高。同时,研究区南部如昆明市西山区、官渡区、五华区及曲靖市的麒麟区等,这些地区人口密集、人类活动强度大,建设用地占比高,植被覆盖度低,导致景观生态风险处于较高水平。2010 年后,风险等级较高的区域明显减少,但南部个别区县的风险等级无明显变化甚至有不降反升的态势,尤其是上述昆明市、曲靖市城区。总的来看,随时间推移,喀斯特断陷盆地的景观生态风险水平整体呈下降趋势。低、较低风险区面积分别由 2000 年的 6521.45km^2、21891.18km^{2}增加到 2020 年的 20472.17km^2、30475.4km^2,增加了 213.92%、39.21%;中风险区和较

高风险区面积变化不大;高风险区的面积呈显著下降趋势,由 2000 年的 23409.96km^{2}下降到 2020 年的 5167.31km^2,面积降幅为 353.04%。以上结果反映出研究区整体生态安全水平逐步改善,生态状况整体好转。

3.2 景观生态风险地类分布

基于 ArcGIS 统计工具得到 2000—2020 年研究区不同地类在各景观生态风险等级区的面积及比例(表 2)。可以看出,耕地在低风险区的面积占比由 2000 年的 7.42%提高到 2020 年的 21.67%,较高和高风险区的面积有所下降。林地在 2000 年整体生态风险水平较高,较高和高风险区的面积占比总计为 53.31%;随着时间的推移,分布在高风险区的林地面积显著减少,到2020年其占比仅为1.78%,林地的生态安全水平逐步提



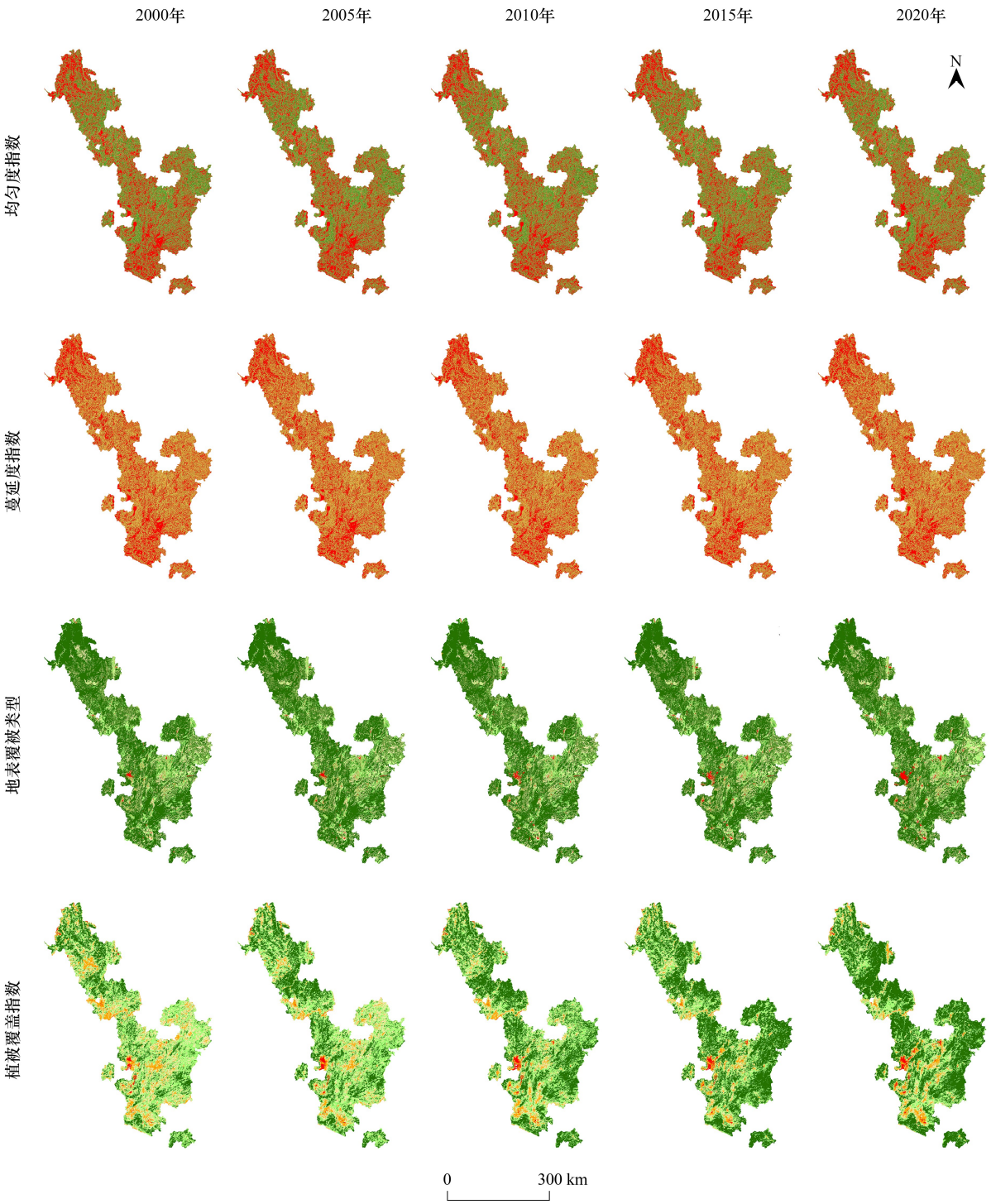


图 2　喀斯特断陷盆地各评价因子风险等级空间分布

Fig.2　Spatial distribution of risk grades of evaluatuion factors in Karst Faulted Basin

升。草地在低风险区的面积占比由 2000 年的 6.7%提高到 2020 年的 21.84%,在高风险区的面积占比由 17.74%下降到 5.43%。2000—2020 年水域在高风险区的面积占比由 35.21%下降到 14.85%。建设用地在高风险区的面积不断增大,2020 年占比高达 43.43%,生态安全水平有所下降。未利用地在 2000 年主要分布在较高风险和高风险区,占比高达 69.24%,2020 年其主要分布在中风险、较高风险和较低风险区,风险水平明

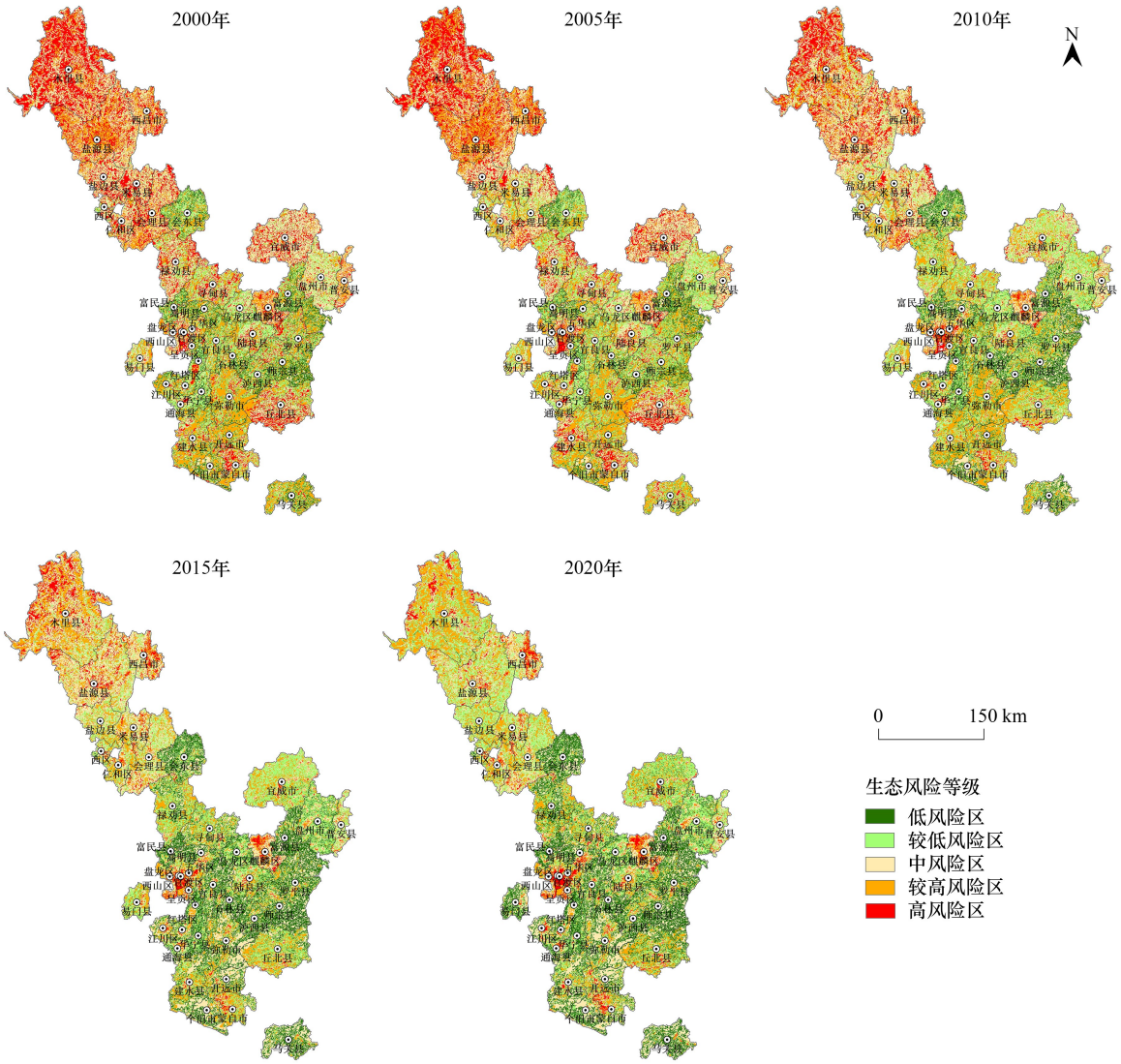


图 3 2000—2020 年喀斯特断陷盆地景观生态风险等级图

Fig.3 Landscape ecological risk level in Karst Fault Basin from 2000 to 2020

显降低。

综上,除建设用地外,其余用地的生态风险等级都呈现出显著降低的态势,说明该地区的生态修复已见成效,生态环境持续改善。

3.3 景观生态风险地形梯度分析

由坡度和高程数据,根据公式(3)计算出研究区的地形位指数,为反映各景观生态风险等级的优势地形区间,采用自然断点法将地形位指数分为 10 个梯度(图 5)。由地形位指数的定义可知,高程和坡度越大,地形位指数的梯度越高。并根据公式(4)将研究区地形位指数分别与 2000、2005、2010、2015、2020 年的景观生态风险等级分布图叠加,计算研究区 2000—2020 年各生态风险等级在不同地形位梯度上的分布指数(图 6),以

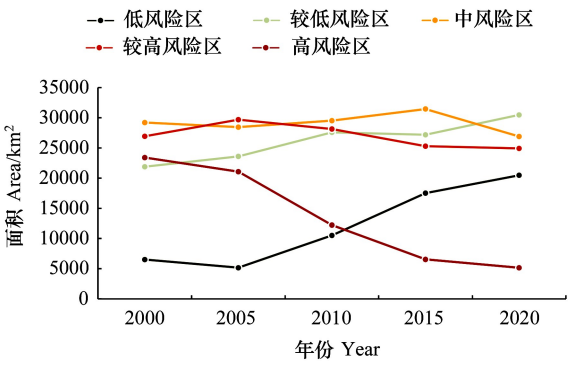


图 4 2000—2020 年喀斯特断陷盆地各生态风险等级区面积

Fig.4 The area of ecological risk level in Karst Fault Basin from 2000 to 2020

揭示各生态风险等级分布与地形之间的关系。

表 2　2000—2020 年喀斯特断陷盆地各地类的生态风险面积及比例

Table 2　Ecological risk area and proportion of various land use types in Karst Fault Basin from 2000 to 2020

年份 Year	风险等级 Risk level	耕地 Cultivated land		林地 Woodland		草地 Grassland		水域 Water area		建设用地 Construction land		未利用地 Unused land	
		面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
2000	低风险	3124.99	7.42	3177.17	5.79	1900.24	6.70	30.32	2.80	30.67	2.57	2.12	1.85
	较低风险	11865.39	28.16	9075.32	16.53	6434.73	22.70	181.21	16.73	274.64	23.00	8.11	7.08
	中风险	14398.10	34.17	13386.64	24.38	8261.28	29.14	245.02	22.62	380.75	31.89	25.03	21.85
	较高风险	8174.20	19.40	14895.20	27.13	6725.23	23.72	245.37	22.65	276.75	23.18	37.37	32.62
	高风险	4569.04	10.84	14378.71	26.18	5030.17	17.74	381.46	35.21	231.27	19.37	41.95	36.62
2005	低风险	1293.86	5.79	2327.88	4.24	1505.03	5.33	16.22	1.44	23.97	1.89	6.70	5.69
	较低风险	6466.81	28.93	10276.10	18.72	6468.92	22.89	144.55	12.82	250.31	19.77	10.22	8.68
	中风险	6675.16	29.87	12916.34	23.53	8209.46	29.05	265.47	23.55	370.53	29.27	24.68	20.96
	较高风险	4845.79	21.68	16767.23	30.55	7432.09	26.30	277.46	24.61	325.76	25.73	36.31	30.84
	高风险	3067.88	13.73	12601.16	22.96	4643.42	16.43	423.76	37.59	295.44	23.34	39.84	33.83
2010	低风险	2616.27	11.66	4707.94	8.58	3085.16	11.09	42.31	3.73	48.65	3.06	9.52	8.94
	较低风险	7239.60	32.25	11982.79	21.83	7874.18	28.32	179.80	15.87	280.28	17.62	12.69	11.92
	中风险	6271.14	27.94	14306.79	26.07	8221.09	29.56	276.05	24.37	417.42	26.24	28.56	26.82
	较高风险	4461.16	19.87	16791.21	30.59	6085.00	21.88	363.13	32.06	411.42	25.86	33.49	31.46
	高风险	1858.99	8.28	7099.99	12.94	2543.64	9.15	271.46	23.97	433.28	27.23	22.21	20.86
2015	低风险	4322.96	19.40	7830.11	14.29	5193.75	18.75	79.32	6.40	83.55	4.45	13.40	12.62
	较低风险	6931.11	31.10	12064.23	22.01	7692.27	27.78	212.94	17.18	268.64	14.32	14.10	13.29
	中风险	5703.19	25.59	16731.27	30.53	8239.42	29.75	307.42	24.81	438.57	23.38	30.67	28.90
	较高风险	3938.33	17.67	15623.56	28.51	4737.20	17.11	450.21	36.33	523.18	27.89	32.43	30.56
	高风险	1388.34	6.23	2557.39	4.67	1831.49	6.61	189.32	15.28	561.96	29.96	15.51	14.62
2020	低风险	4775.63	21.67	9300.24	17.27	6183.01	21.84	130.09	9.65	68.04	2.97	13.40	12.71
	较低风险	7123.25	32.33	13829.80	25.68	8971.32	31.69	261.59	19.40	271.46	11.84	17.63	16.72
	中风险	4904.66	22.26	14266.96	26.49	6947.68	24.54	333.51	24.73	425.17	18.55	32.43	30.77
	较高风险	3770.51	17.11	15503.35	28.79	4673.74	16.51	423.06	31.37	532.00	23.21	27.50	26.09
	高风险	1460.96	6.63	957.88	1.78	1537.82	5.43	200.25	14.85	995.60	43.43	14.45	13.71

从图 6 可以看出,低风险区地形分布指数在不同地形位梯度上呈现先小幅增加后明显下降的趋势,表明低风险区对地形具有一定的选择性,1—5 地形位梯度的地形分布指数大于 1,说明低风险区在低、中地形位区间具有分布优势。2000—2015 年较低风险区地形分布指数在 1—4 地形位区间具有微弱的分布优势,而 2020 年则在 5—9 地形位区间分布优势更大,表明较低风险区随时间变化逐渐向中、高地形位区间移动。与较低风险区相反,6—9 地形位区间是 2000—2015 年中风险区分布的优势区间,而 2—7 区间是 2015—2020 年分布的优势区间,即随时间变化中风险区在低地形位区间的优势加强。2000—2010 年较高风险区地形分布指数在不同地形位梯度上分布相对均匀,2015—2020 年则呈现先小幅减小后明显增加的态势,说明较高风险区对地形的选择性增大,且倾向分布在高地形位区间。高风险区地形分布指数在不同地形位梯度上整体表现为先减小后增加的趋势,2015 年之前 7—10 地形位区间是其分布的优势区间,但 2020 年在低地形位区间的分布优势增大。各风险等级区在不同地形位梯度上的分布情况表明,研究时段前期,低、较低风险区倾向分布在中、低地形位区间,高风险区倾向分布在高地形位区间;随时间推移,较低风险区与中风险区对于地形的选择性均减弱,高风险区在高地形位区间的分布优势也有所减弱,说明地形对景观生态风险的影响逐渐减小。

4 讨论与结论

4.1 讨论

西南喀斯特地区一直是我国主要的生态脆弱区,生态环境问题与经济发展的压力并存,使其生态安全问题难以得到解决[40—41]。自“十五”和“十一五”规划纲要中将石漠化治理列为国计民生的大事,其退耕还林、天然林保护和石漠化治理已有较大进展[42],但实现生态与经济双赢的目标依然任重道远。故对于该地区在人类社会影响下生态安全格局的研究十分重要[43]。

综合前人研究可知[44—45],不同的景观类型构成了景观格局,景观格局的改变进而会导致区域景观生态风险的演变,故景观生态风险的演变受到自然地理环境和人类活动的双重影响。本文从“自然-社会-景观格局”三个维度共选取 11 个生态风险评价因子,并采取空间主成分分析的方法分别确定 2000、2005、2010、2015、2020 年评价因子权重,较为客观地反映出各年各评价因子的重要性程度,避免了人为主观因素的影响和时间变化带来的差异。此外,喀斯特断陷盆地是典型的岩溶地貌,地形复杂,其景观生态格局会不可避免地受到地形地貌的影响[34]。因此,本文基于高程和坡度数据提取地形位指数,在此基础上与生态风险等级叠加得到地形分布指数,进一步探究研究区地形与景观生态风险水平的关系。研究发现,喀斯特断陷盆地景观生态风险的时空分布格局发生了显著变化,主要表现在:2010 年前,高、较高风险区主要分布在研究区北部且较为集中以及南部部分区域且较为分散。这是因为研究区的景观生态风险在早期极大程度上受到了地形因素的制约,北部山地海拔高、坡度陡,以中、高地形位梯度为主,土壤可蚀性较强,故北部风险等级较高的区域分布较为集中;而南部虽然以中、低地形位梯度为主,但石漠化程度严重,水土资源有限,加之不合理的土地利用,“人地矛盾”突出,导致南部风险等级较高的区域分布较为分散。2010 年后,随着石漠化治理与生态修复工程的实施,研究区的景观生态风险水平整体呈现下降的趋势,高风险区均有明显减少,较低、低风险区面积增加,但南部个别区县的生态风险水平未有明显好转,尤其是西山区、官渡区、五华区、麒麟区等城区。这是因为研究区南部的生态修复虽有一定成效,但这些地区人类活动较为频繁,建设用地扩张明显,植被覆盖度不高,“人地矛盾”仍十分突出。景观生态风险在研究区南部表现出更明显的空间异质性也反映了一定时间内,该区受到了除自然因素以外的其他因素的共同影响。此外,通过地形分布指数的分析可以发现景观生态风险与地形之间确实存在一定关系,但随时间推移,地形对景观生态风险的影响有所减小。

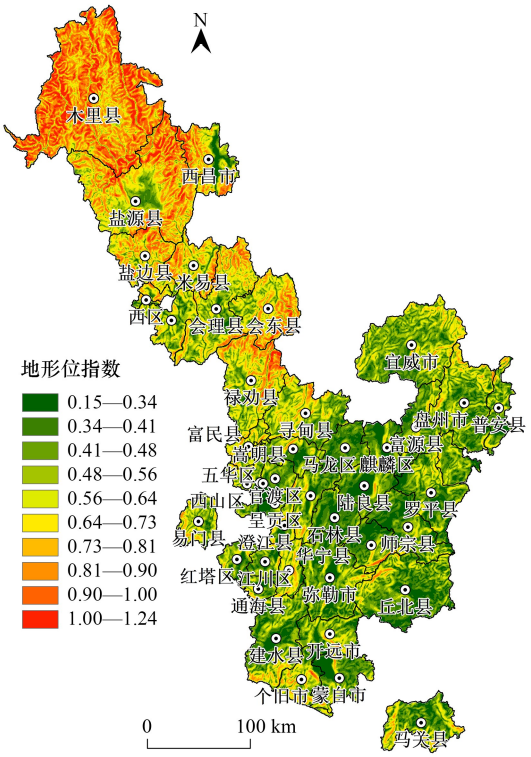


图 5 喀斯特断陷盆地地形位指数

Fig.5 The terrain niche index of Karst Fault Basin

景观生态风险演变是多方面因素综合作用的结果。本文通过空间主成分分析对权重的计算发现,除均匀度、蔓延度这类景观指数以外,权重较大的依次是土壤可蚀性、植被覆盖指数、土地覆被类型、高程与人口密度,说明上述因子对于喀斯特断陷盆地的景观生态风险影响占据主导地位。此外,喀斯特断陷盆地作为我国喀斯特地区石漠化治理难度最大的区域[46],其石漠化分布和综合治理情况对该区域景观生态风险的影响也至关重要。2005、2011 和 2016 年,国家共累计开展了 3 期石漠化监测(图 7),结果显示,喀斯特断陷盆地石漠化治理措施的面积占比由 2005 年的 6.3%扩大到 2016 年的 27.67%,主导措施由早期的生物措施逐渐发展到林草措施再到封山育林育草措施。鉴于三期石漠化治理措施数据与本文所选的研究时段不完全对应,较难将

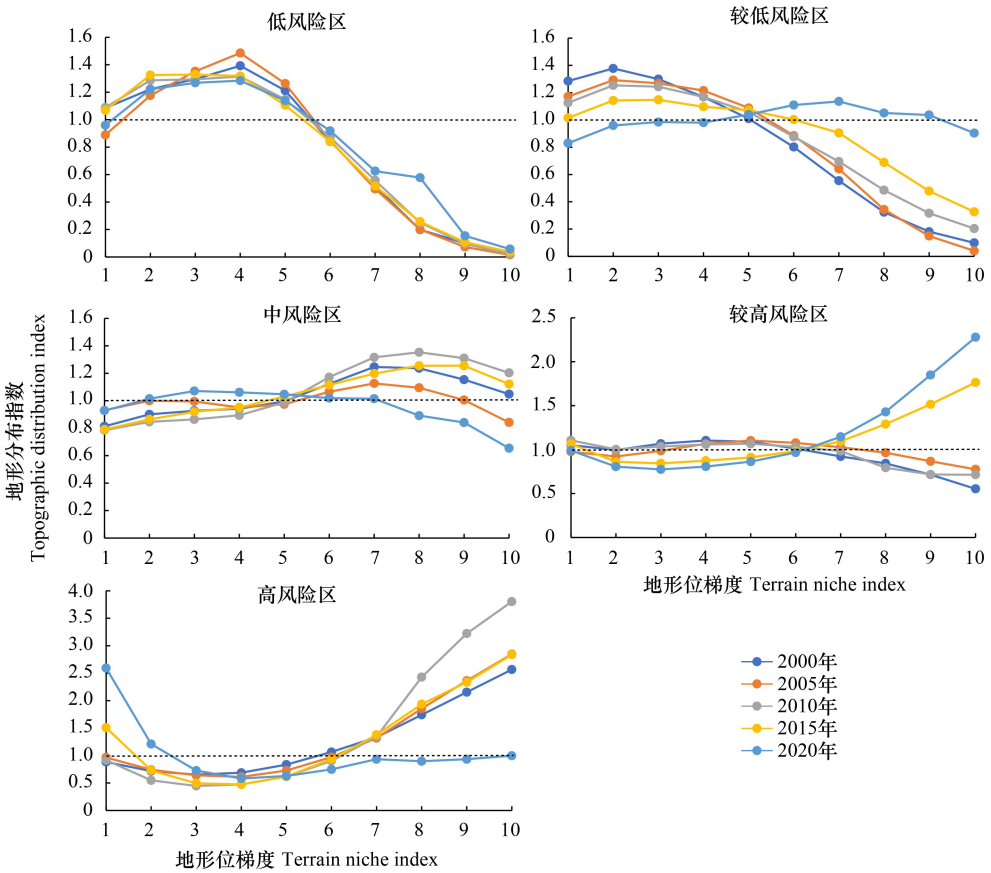


图 6　喀斯特断陷盆地不同地形位上生态风险等级区分布指数

Fig.6　Distribution index of ecological risk grades in Karst Fault Basin on different terrain niche

石漠化治理工程作为其中一个指标。然而,石漠化治理等生态工程的实施会直接通过土地利用结构和植被覆盖度的变化进而对研究区的景观生态风险产生影响。因此,本文在景观生态风险评价指标体系中选取土地覆被类型、植被覆盖指数亦能间接表征石漠化治理工程实施后的景观生态风险的变化情况。

从图 7 可以看出,喀斯特断陷盆地的石漠化治理措施主要集中在研究区南部,这也解释了研究区南部的景观生态风险呈现出较强空间异质性的原因。为探讨石漠化治理工程对研究区景观生态风险的影响,本文特意选取景观生态风险水平提升较为明显的建水县、木里县以及呈现明显空间异质性的西山区、官渡区、麒麟区共 5 个具有代表性的区县进一步探讨(表 3)。5 个区县中,建水县和木里县石漠化治理措施面积较大,2016 年分别为 2558km^2、5126.25km^2,相比其他 3 区较多且增幅很大,其高风险区面积降幅均在 80%以上,低风险区面积也显著增加;而西山区、官渡区、麒麟区在石漠化治理措施面积相对较小、植被覆盖度变化度不大的情况下,人口密度增幅分别为 176.31%、122.52%、64.41%,人类活动强度明显增加,高风险区面积变化幅度分别为-12.16%、79.29%、2.03%,景观生态风险水平并未得到明显改善。由此可知,20 年间喀斯特断陷盆地景观生态风险虽整体好转,但有一些较为特殊的地区景观生态风险仍处于较高水平,人地矛盾并未得到明显缓解,需引起足够重视。

本文研究结果可为后续喀斯特断陷盆地的景观格局优化和生态修复提供参考。但是,本研究未能对景观生态风险评价结果进行不确定性评价[1],因此不能排除该结果受到如随机干扰等其他因素的影响,在未来研究中将结合喀斯特断陷盆地实际情况进一步进行探讨。

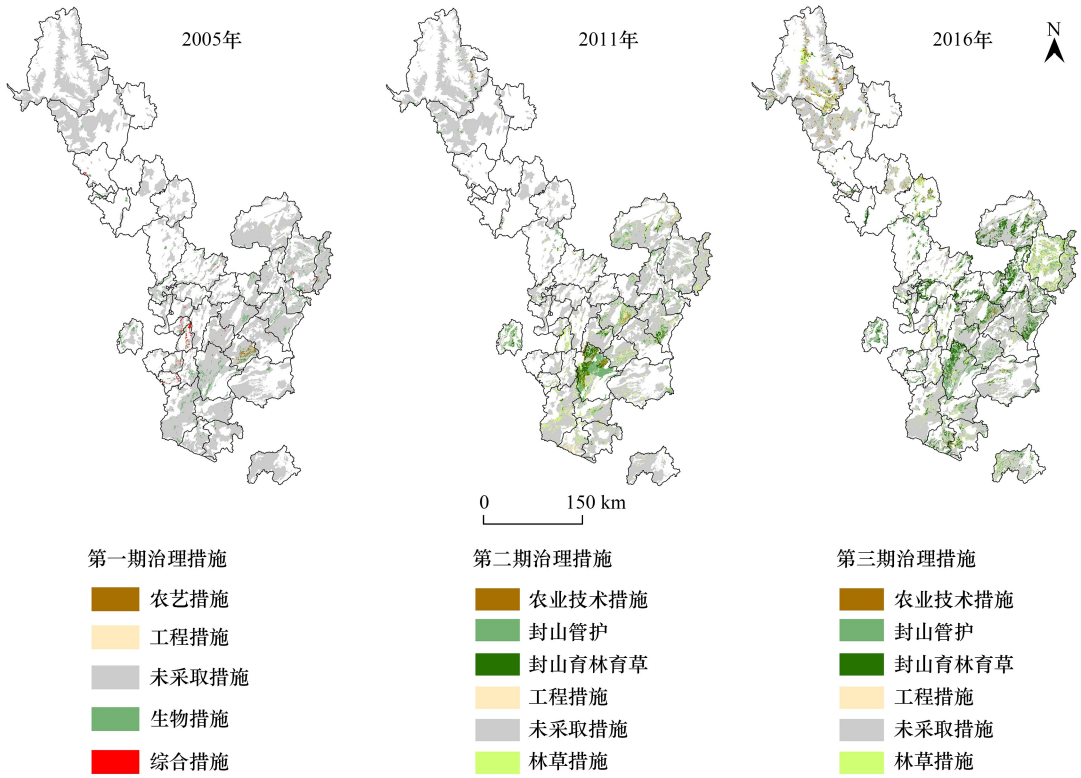


图 7 喀斯特断陷盆地三期石漠化监测治理措施分布

Fig.7 Three phases of rocky desertification monitoring and control measures distribution in Karst Fault Basin

表 3 喀斯特断陷盆地 5 区县代表因子和景观生态风险结果分析

Table 3 Analysis of representative factors and landscape ecological risk in 5 counties in Karst Faulted Basin

区县 County	年份 Year	面积 Area/km^2	低风险区面积 Area of low risk region/ km^2	高风险区面积 Area of high risk region/ km^2	人口密度 Population density/ (人/ km^2)	植被覆盖指数 Vegetation coverage index	石漠化治理措施面积 Area of rocky desertification control measures/km^2
建水县	2000 年	3809.35	262.30	325.05	128.37	0.72	168.75
	2020 年		965.63	59.23	140.23	0.75	2558.00
	变化幅度		268.15%	−81.78%	9.24%	4.17%	1415.85%
木里县	2000 年	13247.75	0.00	6693.14	9.36	0.77	5.25
	2020 年		118.81	927.56	9.28	0.78	5126.25
	变化幅度		—	−86.14%	−0.81%	1.30%	97542.86%
西山区	2000 年	1116.66	4.58	258.07	519.41	0.72	3.00
	2020 年		8.46	226.69	1435.18	0.75	343.00
	变化幅度		84.62%	−12.16%	176.31%	4.17%	11333.33%
官渡区	2000 年	1045.01	10.22	238.32	424.88	0.67	7.75
	2020 年		22.21	427.29	945.45	0.63	339.00
	变化幅度		117.24%	79.29%	122.52%	−5.97%	4274.19%
麒麟区	2000 年	1646.40	9.17	433.99	368.08	0.73	58.25
	2020 年		9.87	442.80	605.14	0.73	785.00
	变化幅度		7.69%	2.03%	64.41%	0.00%	1247.64%

鉴于三期石漠化治理措施数据与本文所选的研究时段不完全对应,2000 和 2020 年的石漠化治理措施面积分别用 2006 年和 2016 年代替

4.2 结论

本文以喀斯特断陷盆地为研究对象,从自然、社会、景观格局三个维度选取 11 个评价因子构建景观生态风险评价指标体系,采取空间主成分分析和地形分布指数的方法,系统揭示了研究区 2000—2020 年景观生态

风险的时空演变格局及其与地形的关系。研究表明:

(1)喀斯特断陷盆地的景观生态风险水平整体呈下降趋势,低风险区面积增幅和高风险区面积降幅分别为 213.92%、353.04%,空间上呈“北高南低”的分布格局。2000 和 2005 年,高、较高风险区集中分布在研究区北部、分散位于南部部分区县;2010 年后,风险等级较高的区域明显减少,但南部个别区县的风险水平并未得到明显改善,空间异质性明显。

(2)20 年间,除建设用地外,其余用地的生态风险等级均显著降低。到 2020 年,耕地、林地、草地均主要分布在风险等级较低的区域,而建设用地在高风险区的面积仍高达 43.43%。

(3)景观生态风险与地形存在较为密切的联系。研究时段前期,低、较低风险区倾向分布在中、低地形位区间,高风险区倾向分布在高地形位区间;随时间推移,较低风险区与中风险区对于地形的选择性均减弱,高风险区在高地形位区间的分布优势也有所减弱,说明地形对景观生态风险的影响逐渐减小,人类活动对景观生态风险的影响逐渐浮现。

参考文献(References):

[1] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.

[2] 郭力嘉, 刘瑞民, 门聪, 王清睿, 张妍. 城市扩张背景下京津冀地区景观格局演变及生态风险变化评价研究.2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 合肥, 2018: 429-437.

[3] 张应裕, 吕凤涛, 麦建开, 王园园, 王彬. 基于土地利用/覆被变化的景观生态风险演化分析. 地理空间信息, 2021, 19(9): 44-49, 157.

[4] 赵卫权, 杨振华, 苏维词, 李科. 基于景观格局演变的流域生态风险评价与管控——以贵州赤水河流域为例. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1218-1227.

[5] 景培清, 张东海, 艾泽民, 郭斌. 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. 生态学报, 2021, 41(17): 7026-7036.

[6] 彭建, 刘焱序, 潘雅婧, 赵志强, 宋治清, 王仰麟. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究: 回顾与展望. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1186-1196.

[7] 郭彦君, 郭文炯. “三生空间”视角下山西中部盆地城市群景观生态风险分析. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1813-1824.

[8] 曾勇. 区域生态风险评价——以呼和浩特市区为例. 生态学报, 2010, 30(3): 668-673.

[9] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. 生态学报, 2018, 38(12): 4307-4316.

[10] 巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 高彦净. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2153-2160.

[11] 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. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.

[12] 徐兰, 罗维, 周宝同. 基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价——以洋河为例. 自然资源学报, 2015, 30(4): 580-590.

[13] Stammel B, Fischer C, Cyffka B, Albert C, Damm C, Dehnhardt A, Fischer H, Foeckler F, Gerstner L, Hoffmann T G, Iwanowski J, Kasperidus H D, Linnemann K, Mehl D, Podschun S A, Rayanov M, Ritz S, Rumm A, Scholz M, Schulz-Zunkel C, Thiele J, Venohr M, Haaren C, Pusch M T, Gelhaus M. Assessing land use and flood management impacts on ecosystem services in a river landscape (Upper Danube, Germany). River Research and Applications, 2020, 37(2): 209-220.

[14] 张莹, 雷国平, 林佳, 张慧. 扎龙自然保护区不同空间尺度景观格局时空变化及其生态风险. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1250-1256.

[15] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.

[16] 刘仙, 蒋勇军, 况明生. 西南喀斯特石漠化区水土保持与生态文明研究新进展. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2009, 32(3): 396-400.

[17] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策. 草业科学, 2008, 25(9): 40-50.

[18] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.

[19] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范. 生态学报, 2016, 36(22): 7103-7108.

[20] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 廖传露, 王飞. 基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化. 生态学报, 2021, 41(10): 3940-3951.

[21] 李青圃, 张正栋, 万露文, 杨传训, 张杰, 叶晨, 陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.

[22] 杜华明. 西秦岭地区景观生态风险评价及格局优化研究. 资源环境与工程, 2021, 35(3): 347-354.

[23] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 李炳元, 张百平. 中国陆地 1∶100 万数字地貌分类体系研究. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.

[24] 龙晓君, 李小建. 基于多源数据的中国地形海拔分级指标调整研究. 地理科学, 2017, 37(10): 1577-1584.
[25] 李炳元, 潘保田, 程维明, 韩嘉福, 齐德利, 朱澈. 中国地貌区划新论. 地理学报, 2013, 68(3): 291-306.
[26] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 157-160, 192.
[27] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 郝志新, 尹云鹤, 廖要明. 1981—2010 年中国气候区划. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.
[28] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 韩煜, 高晓奇, 全占军. 锡林郭勒盟生态安全评价及生态调控途径. 农业工程学报, 2019, 35(18): 228-236.
[29] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.
[30] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析. 地理学报, 2009, 64(2): 202-210.
[31] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012.
[32] 徐建华. 计量地理学. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
[33] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. 生态学报, 2020, 40(9): 2895-2906.
[34] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究. 地理科学, 2001, 21(1): 64-69.
[35] 斯钧浪, 齐伟, 曲衍波, 李乐. 胶东山区县域土地利用在地形梯度上的分布特征. 应用生态学报, 2009, 20(3): 679-685.
[36] 武爱彬, 刘欣, 赵艳霞, 秦彦杰. 浅山丘陵区土地利用格局的地形梯度特征与变化研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 181-185.
[37] 臧玉珠, 刘彦随, 杨园园. 山区县域土地利用格局变化及其地形梯度效应——以井冈山市为例. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1391-1404.
[38] 胡海, 周勇, 徐涛. 1980—2018 年湖北省土地生态风险时空演变分析. 长江流域资源与环境, 2022, 31(10): 2246-2258.
[39] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.
[40] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 吴绍洪, 戴尔阜. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(3): 320-330.
[41] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
[42] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望. 地理科学进展, 2014, 33(1): 76-84.
[43] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
[44] 郑可君, 李琛, 吴映梅, 高彬嫔, 李婵, 武燕. 云南边境山区景观生态风险时空演变及其影响因素. 生态学报, 2022, 42(18): 7458-7469.
[45] Wu J G. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop. Landscape Ecology, 2013, 28(1): 1-11.
[46] 李桂静, 廖江华, 吴斌, 关颖慧, 曹建华, 周金星. 我国喀斯特断陷盆地石漠化区植物群落构建机制研究. 世界林业研究, 2020, 33(3): 67-73.