引文格式：王文才,杜嵩,邢晓露. 基于GIS的刘家峡水库流域景观生态风险评价及驱动力分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 70-74. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.10.017

基于GIS的刘家峡水库流域景观生态风险评价及驱动力分析

王文才[1]，杜　嵩[1*]，邢晓露[1]
（1. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司，河南 郑州 450000）

摘　要：为了合理有效的评估流域内生态风险和优化流域用地类型，探究流域内景观生态风险动态变化及其驱动机制尤为重要。基于GIS技术，结合景观生态学、地理探测器等方法，对研究区土地利用类型变化特征进行分析，同时构建景观生态风险评价模型，定量分析流域内景观生态风险变化趋势及其驱动机制。结果表明：研究区景观类型主要为耕地和草地，各类型景观在水域附近变化差异较大；景观格局指数表现为干扰度指数变化较为剧烈，损失度呈现水域增加的趋势；生态风险等级整体以中等以上为主。驱动机制结果显示，因子探测结果表明人为干扰度对引起景观生态风险动态变化的影响最大；交互探测显示流域景观生态风险动态变化不是由单一因子造成的，主要为2种以上的因子相互作用所致。

关键词：流域；GIS；景观生态风险评价；驱动机制
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0070-05

Landscape Ecological Risk Evaluation and Driving Force Analysis of Liujiaxia Reservoir Watershed Based on GIS

WANG Wencai[1], DU Song[1], XING Xiaolu[1]
(1. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to reasonably and effectively evaluate the ecological risk in the basin and optimize the land-use type in the basin, it is particularly important to explore the dynamic change of landscape ecological risk in the basin and its driving mechanism. Based on GIS technology, combined with landscape ecology, geographical detector and other methods, we analyzed the characteristics of land-use type change in the study area, and established landscape ecological risk evaluation model to quantitatively analyze the trend and driving mechanism of landscape ecological risk change in the basin. The results show that the main landscape types in the study area are cultivated land and grassland, and the change of each landscape type is very different near the water area. The disturbance index changed sharply, and the loss index showed an increasing trend of water area. The overall ecological risk level is above medium. The factor detection result shows that the degree of human disturbance has the greatest influence on the dynamic change of landscape ecological risk. The interactive detection result shows that the dynamic change of landscape ecological risk is not caused by a single factor, but mainly by the interaction of more than two factors.

Key words: watershed, GIS, landscape ecological risk evaluation, driving mechanism

生态环境为人类社会生存发展提供了不可或缺的物质基础，其结构与功能决定着生态系统的稳定性[1]。其中流域是区域内自然资源与人类社会发展之间有效链接的关键枢纽，流域自然地理特征具有整体性、复杂性和系统性[2]。随着城镇化速度不断加快，人类不合理的社会经济活动导致流域生态系统的环境承载力超出其限值，引发了水土流失、土壤污染、自然灾害频发等一系列生态问题，对自然生态环境保护和社会经济可持续发展造成阻碍，为此探究区域生态风险现状成为资源环境领域的研究热点之一[3]。

景观生态风险评价以景观为评价对象，主要强调区域生态环境在大尺度范围内因人类活动或者自然灾害的影响可能受到的危害程度[4]。国内外学者对区域进行景观生态风险评价的方法主要分为景观格局指数法[5]、熵值法[6]、基于土地利用变化构建风险指数法[7]和构建压力-状态-响应(P-S-R)模型的生态风险评价体系[8]等。评价尺度逐渐从典型生态脆弱区、城市、海岸、湿地等单一尺度过度到流域、省域等大尺度多类型的区域[9]。整体来看，景观生态的相关研究多是基于景观因子对景观格局进行量化和分析，并根据研究结果直接从空间及数量变化上进行表现生态风险变化，但对景观生态风险的驱动力缺少定量分析研究。

收稿日期：2023-03-07。
第一作者简介：王文才（1984—），硕士，高级工程师，研究方向为遥感与地理信息系统应用，E-mail：406277823@qq.com。
通信作者：杜嵩（1993—），硕士，助理工程师，研究方向为3S集成及应用研究、景观生态学，E-mail：1044691293@qq.com。

为此，本文以刘家峡水库流域为例，着重考虑区域内景观类型的空间异质性，基于景观格局指数法构建生态风险评价模型，通过地理探测器模型进行生态风险动态变化的驱动力定量分析，从而科学探究刘家峡水库流域的生态风险空间分布情况及主要驱动力，为流域内的景观格局优化、自然资源保护和可持续发展提供科学参考依据。

1　研究区概况

刘家峡水库地处甘肃省中部黄土高原的过渡地带，地质地貌复杂，由于植被覆盖率低，在该区域水土流失极其严重，存在泥沙淤积的现状，严重威胁着流域内的人类生命安全和生态环境环境。

2　研究方法

2.1　土地利用转移矩阵

土地转移矩阵用于反馈某一区域从研究初期到末期各用地类型间面积互相转化的动态信息，不仅可以定量地体现各土地利用类型之间的转化情况，还能够直观地反映区域内土地利用的结构变化特征。转移矩阵表达式[10]为：

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，S 为总面积；n 为土地利用类型转移前后的总数量（$n=6$）；i 和 j（i，$j=1$，2，…，n）为转移前后的土地利用类型；S_{ij} 为第 i 类土地类型转换成第 j 类土地类型的面积，数值越大说明变化越大，反之，则变化越小。

2.2　景观生态风险评价模型构建

为避免景观格局的空间异质性对生态风险评估的影响，采用建立风险小区的方法弥补这一不足。根据景观生态学的理论，风险小区的划分应达到斑块平均面积的2~5倍。为此借鉴相关学者的研究[11]，考虑研究区特点及评价单元精度，将刘家峡水库流域共划分了152个5 km×5 km的风险小区评价单元。利用景观生态风险评价模型分别计算每一个风险小区的景观生态风险值，采用克里金法进行空间插值进行风险分布的空间分析。借鉴前人研究[12-13]，用景观干扰度指数、景观脆弱度和景观损失度构建景观生态风险评价模型。

1）景观干扰度指数 E_i，表示 i 类景观类型所代表的生态系统在受到自然或人为干扰时其自然属性损失程度大小的反映[13]。

$$E_i=aC_i+bN_i+cF_i \tag{2}$$

式中，景观干扰度指数为由景观破碎度、景观分离度和景观分维数构建，各指数权重 a 、b 、c 赋值分别为0.5、0.3、0.2；C_i 、N_i 、F_i 分别是景观类型 i 的景观破碎度、景观分维数、景观分离度。

2）景观脆弱度指数 V_i，用来评价景观类型受外界干扰时的敏感程度，值越大说明景观受外部干扰的强度越大。结合前人研究经验[13]和研究区特征，分别对5种景观类型进行脆弱度赋值，经归一化，得到建设用地、林地、草地、耕地、水域的景观脆弱度指数分别为0.06、0.13、0.21、0.27、0.33。

3）景观损失度指数 R_i，表示 i 类景观类型受到自然或人为的影响后，其景观内部特征产生不同程度的损失[13]。

$$R_i=E_i\times V_i \tag{3}$$

4）景观生态风险指数 ERI_i 为研究区第 i 个景观生态风险指数，数值越大则表示风险小区域的风险越大，反之，值越小[13]。

$$\mathrm{ERI}_i=\sum_{i}^{n}\frac{A_{ki}}{A_k}\times R_i \tag{4}$$

2.3　人为干扰度指数

选取人为干扰度探究其刘家峡水库流域景观生态风险的相关性，参考相关研究[16]以及研究区景观类型个数，分别对不同景观类型进行人为干扰度指数计算并赋值。计算公式如下：

$$M=\frac{\sum_{i=1}^{n}H_iS_i}{S} \tag{5}$$

式中，M 为风险小区的人为干扰度指数；n 为类型总数（$n=5$）；H_i 和 S_i 分别为 i 类景观类型的景观干扰度和面积；S 所算风险小区内各类景观类型的总面积。

2.4　地理探测器

利用地理探测器中因子探测和交互探测模型对流域景观生态风险动态变化的驱动力进行探究[13-14]。

1）因子探测器，用来探测不同变量因子 X 对因变量 Y 的解释力。解释力越大说明自变量因子对景观生态风险动态变化的影响越大；解释力越小，则影响越小。该值用 q 值表示，取值范围是[0,1]，表达式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SWW}}{\mathrm{SST}} \tag{6}$$

$$\mathrm{SSW}=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2,\ \mathrm{SST}=N\sigma^2 \tag{7}$$

式中，L 为所选驱动因子个数；N_h 为 h 类驱动因子数；N 为总分类的单元数；σ_h^2 为分类 h 的方差；σ^2 为生态安全数值大小的方差；SSW 为不同驱动因子方差的和；SST 为全部驱动因子的总方差值。

2）交互探测器，用于识别不同因子之间的交互作用，即求得各评价因子相互之间共同作用是否会增加或减弱对因变量 Y 的驱动解释力。计算过程：通过计算驱动因子 X_1 和 X_2 的 q 值判断对生态风险的影响（$q(X_1)$ 和 $q(X_2)$），然后将两者进行交互得到交互作用后的 q 值（$q(X_1 \cap X_2)$），利用交互后值的大小来确定交互作用类型如表1。

表1 交互探测器的作用类型

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Min}(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\mathrm{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Max}(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \mathrm{Max}(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立

3 研究区与数据

3.1 研究区概况

刘家峡水库地处黄河上游，位于甘肃省临夏回族自治州，包含永靖县、东乡族自治县、临夏县、积石山县等4县，水库容量57亿 m^2，水域面积达130 km^2。地貌复杂，受黄河及其支流的切割，形成了沟壑纵横的地形。平均海拔在1 563~4 636 m，年均气温5~9℃，年降水量200~660 mm。植被分布呈差异性分布，西南部降水量较多，植被覆被率达20.97%；东北部干旱少雨，植被覆被率仅为4%左右[15]。由于刘家峡水库流域沿岸植被稀少，易发生滑坡、崩塌，水土流失等自然灾害，导致每年都有大量的泥沙淤积于水库中，开展库区生态环境综合治理工作形势较为严峻。

3.2 数据来源

研究使用数据主要包括土地利用、地形、气象、社会经济和土壤等五大类数据。土地利用数据和地形数据均来源于资源环境数据云（http://www.resdc.cn），利用GIS软件给予地形数据提取坡度、坡向数据，用于表示地表起伏变化特征；社会经济数据来源于临夏回族自治州统计局《临夏回族自治州统计年鉴》和统计局官网公布资料；气象数据来源于国家气象数据中心（http://data.cma,cn），主要包含2000—2020年间研究区及周边气象监测点的气温和降水数据；土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心（http://westgis.ac.cn），按照中国土壤数据集分类标准进行一级土纲进行划分处理。

4 结果与分析

4.1 土地利用变化特征分析

4.1.1 土地利用结构变化

通过对土地利用数据进行分类处理，得到耕地、林地、草地、水域和建设用地5类用地类型。利用ArcGIS软件对各期数据的面积进行统计得到表2。根据表2可知：2000—2020年期间刘家峡水库流域林地、水域和建设用的面积呈增加态势，分别增加329.12、38.20、95 km^2；耕地和草地呈减少态势，分别减少135.9、326.87 km^2。2020年研究区的优势土地利用类型仍以耕地和草地为主，分别占比为47.08%、37.14%；面积增幅较大的为林地，达8.65%，其次为建设用地，为3.63%。

表2 2000−2020年刘家峡水库流域土地利用结构

年份	耕地		林地		草地		水域		建设用地	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
2000	1 925.71	50.65	12.01	0.32	1 738.71	45.73	99.20	2.61	26.14	0.69
2020	1 789.81	47.08	341.13	8.97	1 411.84	37.14	137.85	3.63	121.14	3.18

4.1.2 土地利用结构变化

利用GIS软件将2000年和2020年两期土地利用数据进行叠加，得到2000—2020年刘家峡水库流域土地利用转移矩阵表（表3）。

表3 2000−2020年刘家峡水库流域土地利用转移矩阵/km^2

年份	景观类型	2000年					
		草地	耕地	建设用地	林地	水体	总计
2020年	草地	1 382.93	23.34	0.07	0.91	0.07	1 407.34
	耕地	48.45	1 735.19	2.06	0.01	4.09	1 789.81
	建设用地	6.08	90.89	23.88	—	0.24	121.11
	林地	294.71	35.33	0.02	11.04	—	341.11
	水体	1.97	40.93	0.10	0.05	94.79	137.85
	总计	1 734.16	1925.71	26.14	12.00	99.20	3 797.23

根据表3，流域内所有的用地类型均发生了不同程度的面积转移变化，其中草地的转出比例最大，转入到林地面积达到294.71 km^2，转出比重占21.31%；而耕地向建设用地转入90.89 km^2，转出比重占5.19%；其次分别向草地转移23.34 km^2、林地35.33 km^2、水体40.93 km^2，转移占比分别为1.35%、2.04%、2.36%。建设用地和林地的变化较小，主要为转入面积。水体受自然环境影响，向耕地转移4.09 km^2。2000—2020年土地利用类型转移变化特点显示，建设用地不断增加对生态环境产生破坏，同时随着生态保护政策的不断落实，林地的面积在逐渐加大。

4.2　刘家峡水库流域景观生态风险分析

4.2.1　景观格局指数变化特征分析

根据模型公式，分别计算出景观生态风险中的各景观类型的景观格局指数，得到表4。由表4可知：20 a来流域内各景观类型的破碎度差异性较弱，其中草地、耕地的破碎指数均小于0.1，变幅较弱，表明当用地类型连通性较时，景观整体性较高；建设用地变幅较小，说明该类景观分布较为均匀；林地破碎度为下降趋势，表明区域造林面积不断增大有利于改善林地破碎程度；水域的分布受季节性降水影响较为明显。景观分离度中，草地、耕地和建设用地均呈现逐渐降低的趋势；林地的分离度变化表明林地趋向于分散化；水域的变化为轻微下降变化，根据各类型分离度的变化特征可以看出，离散程度的大小与各类景观类型的面积及空间分布密切相关。景观分维数中，流域各景观类型的分维数均大于1，景观类型的复杂性相对较低，各个景观类型斑块之间异质性不够明显，变化幅度较小，呈现降低趋势。景观干扰度中呈现各景观类型均易受外部干扰，其中草地和建设用地的干扰度较大，说明随着城镇化进程的发展及社会经济活动的加剧，人为干扰的影响对自然环境的影响较为明显。从景观损失度指数来看，水域的损失度呈现增加的趋势，表明水域受外部干扰的影响大；建设用地的景观损失度变化较小，主要原因是该类型为人为景观，脆弱度较低，不易受自然环境干扰；耕地因建设用地扩张，耕地面积减少所致，损失度变大。

表4　2000−2020年刘家峡水库流域各景观类型景观格局指数

景观类型	年份	破碎度 *Ci*	分离度 *Ni*	分维数 *Fi*	干扰度 *Ei*	损失度 *Ri*
草地	2000	0.067	3.652	2.885	1.539	0.105
	2020	0.083	3.134	2.602	1.119	0.076
耕地	2000	0.018	1.879	2.816	1.136	0.103
	2020	0.014	1.279	2.705	0.740	0.067
建设用地	2000	0.194	5.965	3.033	1.863	0.269
	2020	0.215	3.887	3.012	1.632	0.166
林地	2000	1.208	0.489	2.798	1.111	1.185
	2020	0.986	1.041	2.634	0.857	0.798
水域	2000	0.424	3.957	1.588	1.032	0.458
	2020	0.462	3.789	1.391	0.872	1.008

4.2.2　景观生态风险时空变化分析

利用模型计算出刘家峡水库流域两期景观生态风险指数（ERI），采用自然断点法将风险等级划分为5个等级[11]：低生态风险区（0.115~0.173）；较低生态风险区（0.174~0.224）；中等生态风险区（0.225~0.270）；较高生态风险区（0.271~0.329）；高生态风险区（>0.329），统计各等级生态风险面积见表5。

表5　2000−2020年刘家峡水库流域各等级生态风险面积统计

年份	低生态风险区		较低生态风险区		中等生态风险区		较高生态风险区		高生态风险区	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
2000年	484.14	12.73	1 700.82	44.74	1 163.97	30.62	362.25	9.53	90.57	2.38
2020年	933.04	24.54	1 185.97	31.19	1 430.23	37.63	218.38	5.75	34.13	0.89

研究区景观生态风险的空间分布呈现明显的异质性特征，且区位特征明显。2000年低生态风险区主要位于北部及西南和东南两部分，面积为484.14 km^2，原因是该等级下的景观类型主要为草地，优势景观完整性较好。2020年时流域内南部低生态风险区的面积增大，为933.04 km^2，占比24.54%，受林地脆弱性较低影响，低生态风险区的面积增大，北部因建设用地增加，使得原本连贯的用地类型破碎化，局部低风险区转为中等风险区；较低生态风险区面积表现为逐渐降低趋势，由1 700.82 km^{2}降至1185.97 km^2，面积降幅为13.55%，该等级下的用地类型主要以耕地、林地、水域为主，景观结构较为完善，但在人为活动共同作用下，风险等级同样想逐渐向中等转移；中等生态风险区主要位于中部区域，以积石山县、东乡县和临夏县北部为主，两期中等风险区的面积分别为1 163.97、1 430.23 km^2；较高生态风险区表现为先增加后降低的趋势，面积变化由362.25 km^{2}降至218.38 km^2，原因是社会经济的发展，对自然环境的改变带来一定影响，且近年来生态环境保护政策的逐渐落实，使得风险等级减小，面积占比由9.53%降至5.75%；高生态风险区的分布呈现持续降低的趋势，面积由90.57km^{2}降至34.13 km^2，到2020年面积占比仅为0.89%，高风险分布的位置在发生着动态变化，表明有从边缘向中部区域发展的态势，这与人为活动密切相关。

总体来看，刘家峡水库流域气候较为干燥，降水少、蒸发量强的自然环境特征使得研究区的用地类型较为脆弱敏感，同时，社会经济的发展造成用地类型变化多样，人为活动与自然因素交融导致研究区的生态风险等级处于中等以上的区域较多。因此今后应加大对土地资源的合理利用，减少人为干扰强度，减缓

景观破碎化，进一步降低高生态风险区。

4.3 景观生态风险空间差异驱动力分析

本文采用地理探测器模型的因子和交互探测探究刘家峡水库流域的景观生态风险的空间分异性。结合自然因素和社会经济因素，分别选择平均降水量、平均气温、高程、坡度、坡向、土壤类型、GDP、人为干扰度和人口密度9类因子。根据王劲峰[24]地理探测器模型进行计算，得到因子探测结果和交互探测结果。

1）因子探测结果显示：从各因子的解释力可以看出人为干扰度的贡献率最高，达到0.794，说明人为干扰是刘家峡水库流域景观生态风险动态变化的主要控制因素；其次为平均降水量，贡献率为0.42，说明降水量的大小对研究区的生态风险影响同样较为明显；解释力最小的因子为坡向，贡献率为0.007。

2）交互探测器结果显示，所选因子中各个因子的交互作用均有明显增强，且大于单个因子，交互类型主要呈现为双因子增强和非线性增强2种类型。其中高程与人为干扰度交互后的作用最强，q值为0.855，说明这两类因子的线性协同较为明显，相互作用下使得景观生态风险产生动态变化；其他因子q值均较小，贡献率较低，但与人为干扰度交互后，解释力均同时呈现明显的提升，说明人为干扰度是研究区景观生态风险动态变化的关键因素。同时分别从社会经济、自然因素两个角度来看，发现自然因素的影响大于社会经济。综上所述：交互探测结果表明刘家峡水库流域的景观生态风险空间异质性不是由单一的驱动因子造成的，主要为2种以上的因子相互作用所致。

5 结 论

本文基于GIS构建景观生态风险评价模型，探究了刘家峡水库流域景观风险的时空动态变化特征，研究结果显示与研究区生态环境现状相吻合，且与类似研究[17-20]相同。但因研究区地处西北半干旱区域，本文在对流域景观生态风险的评价时，虽能客观地评价流域尺度上的景观生态风险格局，但未能充分考虑到气候影响、区域特征，所以在构建模型时未加入蒸发、风蚀度等气象因子，以及对流域内特定区域（例如：干湿交替区、农牧区）未进行细化生态风险的微观变化分析，因此在今后的研究中还有待进一步研究。

参考文献

[1] 钱逸凡,刘道平,楼毅.我国湿地生态状况评价研究进展[J].生态学报,2019,39(9):3 372-3 382

[2] 杨钦,胡鹏,王建华,等.1980-2018年扎龙湿地及乌裕尔河流域景观格局演变及其响应[J].水生态学杂志,2020,41(5):77-88

[3] 赖小霞,温家洪.南昌市土地利用变化及其驱动因素分析[J].地理空间信息,2022,20(10):54-60

[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

[5] 娄妮,王志杰,何嵩涛.基于景观格局的阿哈湖国家湿地公园景观生态风险评价[J].水土保持研究,2020,27(1):233-239

[6] 王瑞杰,裘钱玲琳,李国祥,等.宁波月湖水体中抗生素的分布与生态风险评价[J].湖泊科学,2018,30(6):1 616-1 624

[7] Hayes E H, Landis W G. Regional Ecological Risk Assessment of a Near Shore Mmarine Environment: Cherry Point, WA[J]. Hum Ecol Risk Assess,2004,10(2):299-325

[8] 陈晶晶,李天宏.基于PSR模型和投影寻踪法的荆州市景观生态风险评价[J].北京大学学报(自然科学版),2017,53(4):731-740

[9] 崔杨林,高祥,董斌,等.县域景观生态风险评价[J].浙江农林大学学报,2021,38(3):541-551

[10] 孙姣姣,王琦,郑洁,等.大英县2002-2017年土地利用分类动态分析[J].地理空间信息,2022,20(1):56-60

[11] 刘焱序,王仰麟,彭建,等.基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J].地理学报,2015,70(7):1 052-1 067

[12] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等.基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J].干旱区地理,2021,44(5):1 384-1 395

[13] 杜嵩. 基于土地利用变化的西安市景观生态风险评价研究[D].西安:西安科技大学,2021

[14] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134

[15] 张玉珍,周茂荣.刘家峡库区县水土保持生态环境建设对策[J].中国水土保持,2002(1):26-27

[16] 郭少壮,白红英,孟清,等.秦岭地区林地与草地景观格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(1):130-140

[17] 高星,宋昭颖,李晨曦,等.基于景观生态风险评价的白洋淀流域景观格局优化研究[J].生态与农村环境学报,2023,39(2):174-183

[18] 刘可暄,王冬梅,魏源送,等.密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势[J].生态学报,2023,43(1):105-117

[19] 杜文涛,李新萍,宋佳伟,等.黄河流域景观生态风险分析及预测[J].水土保持通报,2022,42(5):105-113

[20] 张雪茂,董廷旭,杜华明,等.涪江流域景观生态风险空间异质性特征分析[J].水土保持研究,2022,29(3):156-163