

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.020.

王兆林, 张露洋, 钟激懿, 等. 三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 348-355.
WANG Zhaolin, ZHANG Luyang, ZHONG Weiyi, et al. Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Ecological Space Vulnerability in Three Gorges Reservoir Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 348-355.

三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征

王兆林, 张露洋, 钟激懿, 陈 萌, 杨承绣, 黄丹妮

(重庆工商大学 公共管理学院, 重庆 400067)

摘 要:探讨生态空间脆弱性时空分异特征,有助于客观识别区域生态环境的敏感程度和自我恢复能力,并为国土空间规划提供依据。基于 VSD 模型构建三峡库区生态空间脆弱性分析框架,从空间暴露度、空间敏感性和空间适应力分析 2005—2018 年三峡库区生态空间脆弱性的时空分异特征及规律。结果表明:(1) 三峡库区生态空间脆弱性的 3 个维度均具有显著的空间分布特征和时间演变规律。生态空间暴露度呈现以重庆的主城区(平均为 0.355)和渝东北的万州区(0.416)为双核心向四周逐渐减弱的分布特征;由 2005 年的 0.235 6 持续增至 2018 年的 0.269 1。生态空间敏感性呈现“东北高西南低”的分布特征,渝东北的巫溪县敏感性最强为 0.691,渝西南的北碚区最低为 0.296;由 2005 年的 0.360 7 持续增至 2018 年的 0.437 4。生态空间适应力呈现“两端高,中间低”的分布特征,以重庆主城区(平均为 0.634)和湖北夷陵区(0.613)为双核心向四周增强;由 2005 年的 0.518 4 减至 2010 年 0.457 4 后增至 2018 年的 0.571。(2) 三峡库区生态空间极度脆弱区主要分布在库区西南地区的重庆市主城区(平均为 0.735)及重庆的万州区(0.814);时间上呈现“倒 U”的演变规律,由 2005 年的 0.336 2 增至 2015 年的 0.378 9 后减至 2018 年的 0.344 2。(3) 三峡库区生态空间脆弱性时空变化是一个动态的变化过程;与人类活动强烈程度和自然条件联系紧密;与土壤侵蚀强度、坡度、废水排放量、产业结构等自然环境和社会经济因素息息相关;同时库区生态空间具有较强的自我修复能力。

关键词:三峡库区;生态空间;脆弱性;演变特征;VSD 模型

中图分类号:F124.5; X826; X171.1 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2023)01-0348-08

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Ecological Space Vulnerability in Three Gorges Reservoir Area

WANG Zhaolin, ZHANG Luyang, ZHONG Weiyi, CHEN Meng, YANG Chengxiu, HUANG Danni
(School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: It is helpful to objectively identify the sensitivity and self-recovery ability of regional ecological environment to explore the spatiotemporal differentiation characteristics of ecological space vulnerability, and provide a basis for national spatial planning. Based on the VSD model, we constructed an ecological spatial vulnerability analysis framework in the Three Gorges Reservoir area, and analyzed the spatial and temporal characteristics and rules of ecological space vulnerability in the three Gorges Reservoir area from 2005 to 2018 from the perspectives of spatial exposure, spatial sensitivity and spatial adaptation. The results show that: (1) the three dimensions of ecological space vulnerability in the Three Gorges Reservoir Area had significant spatial distribution characteristics and time evolution law; the ecological spatial exposure in the main urban area of Chongqing (average 0.355) and Wanzhou District of northeast Chongqing (0.416) showed a double-core decreasing trend; it continued to increase from 0.235 6 in 2005 to 0.269 1 in 2018; the ecological spatial sensitivity of Wuxi County in northeast Chongqing was 0.691, while that of Beibei District was 0.296,

increased from 0.360 7 in 2005 to 0.437 4 in 2018; the distribution of ecological spatial adaptation was high at both ends and low in the middle, with the main urban area of Chongqing (0.634 on average) and Yiling District of Hubei Province (0.613) as the double core; after decreasing from 0.518 4 in 2005 to 0.457 4 in 2010, it increased to 0.571 in 2018; (2) The extremely vulnerable ecological spatial regions of the Three Gorges Reservoir area mainly distributed in the southwest of the main urban area of Chongqing (average 0.735) and Wanzhou District of Chongqing (0.814), which showed an ‘inverted U’ evolution law chronologically, increased from 0.336 2 in 2005 to 0.378 9 in 2015 and then decreased to 0.344 2 in 2018; (3) the temporal and spatial variation of ecological spatial vulnerability in the Three Gorges Reservoir area was a dynamic process, which was closely related to the intensity of human activities and natural conditions, and closely related to soil erosion intensity, slope, wastewater discharge, industrial structure and other natural environment and social and economic factors; meanwhile, the reservoir ecosystem had the strong self-repair ability.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; ecological space; vulnerability; evolution characteristics; VSD model

发展中国家城镇规模无序扩张,城镇化和工业化进程不断加快等人类扰动的加剧,直接或间接地影响着区域生态空间稳定性和自我修复能力,各国生态空间脆弱性问题日益突出^[1-2]。自 1972 年“联合国人类环境会议”首次探讨生态环境问题至今,生态脆弱性问题始终是全球密切关注的热点,各国先后提出可持续发展战略、生态文明建设、全球气候变化框架条约等策略以保护生态空间安全与稳定。21 世纪以来,生态系统脆弱性问题逐渐受到国内外专家学者的关注。随着研究进程的不断推进,有关生态脆弱性的研究方法和方向逐渐多元化。模糊综合评价法^[3]、主成分分析法^[4]、层次分析法^[5]、景观生态学法等^[6]逐渐应用到生态系统脆弱性评价中。此外,随着干扰生态系统的因素逐渐增多,评价框架愈发趋于系统化与规范化,VSD(暴露度—敏感性—适应力)模型^[7]、SEP(敏感性—弹性—压力)概念模型^[8]、SRP(敏感性—恢复力—压力)模型^[9]、PSR(压力—状态—响应)模型等^[10]已成为生态评价中常用的评价指标构建模型。此外,生态系统脆弱性的研究范围更加广泛,现已涉及喀斯特地貌区^[7]、湿地景观^[11]、海洋生态^[12]、农牧交错带^[8]、矿业城市^[5]、干旱地区等^[13]典型脆弱区。

生态空间是具有自然属性、以提供生态服务或生态产品为主体功能的国土空间,进一步是区域除建设用地以外的一切自然或人工的植物群落、山水林田湖草等及具有绿色潜能的空间等系列生态用地,是各类生态系统存在的载体^[14]。当前理论界对于生态空间的研究也仅限于空间识别^[15]、三生空间的协同效应等^[16]方面,对生态空间脆弱性的研究还不多见。同时有关生态空间脆弱性的研究对于“库区”这一重要自然与人类综合单元,尚未系统涉及。三峡库区是我国长江上游重要的生态屏障区,也是典型的生态脆弱

区。三峡库区因其特殊的地形特征,加之移民工程的推进、社会经济的发展,使得人类活动对自然资源的破坏逐渐凸显,生态脆弱性问题越发严重。因此,研究三峡库区生态空间脆弱性问题具有理论与实践意义。在目前有关三峡库区生态环境的研究中,多数研究区域仅限于重庆段或湖北段的一个地带,对三峡库区整体的研究较少,不利于在宏观上对比库区各区(县)的生态空间脆弱性^[17]。在研究内容上,学者关注生态系统脆弱性的研究^[17-18],对生态空间脆弱性的关注不够,同时相关研究多集中于有关库区消落带等生态问题的研究^[18],对三峡库区整体生态空间时空分异规律缺乏全面认识;选取的指标大多以自然指标为主,忽略了人类活动因素,并且在时间维度上缺乏连续性^[19]。在研究方法上,主要利用传统的 PSR 研究生态脆弱性^[10,20],而对于更为精确的 VSD 模型,应用不够。

基于此,本文尝试基于 VSD 模型分别从暴露度、敏感性和适应力 3 个方面,构建生态空间脆弱性评价指标体系,利用 TOPSIS 模型对三峡库区 2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年的生态空间脆弱性进行定量评价。旨在探讨三峡库区生态空间脆弱性的时间演变规律和空间分异特征,揭示库区人类社会活动对生态空间的影响,为长江上游“共抓大保护,不搞大开发”的国土空间规划的编制提供参考。

1 研究区、方法与数据

1.1 研究区概况

三峡库区地处长江上游下段(北纬 28°56′—31°44′N、东经 106°16′—111°28′E),横穿鄂中山区峡谷、川东岭谷地带、大巴山及川鄂高原交界处。涉及重庆市 22 个区(县)以及湖北省 4 个区(县)。库区地形崎岖,地貌复杂,

山地和丘陵占库区总面积的95%，多为典型的喀斯特地貌区。因峡谷和盆地特殊地形的影响，库区呈现夏季高温多雨，冬季温和湿润的亚热带季风性湿润气候类型，但水热条件时空分布不均。库区年均气温为17~19℃，年降水量为1 000~1 800 mm。由于特殊的地形地貌作为生长基础，库区的植被种类丰富，以亚热带常绿阔叶林作为主要植被，亚热带常绿针叶林、灌丛、亚热带竹林等也在库区内广泛分布。2018年三峡库区常住人口2 103.02万人，人口密度为52 436.41人/km²，人均耕地面积1.92 hm²/人，森林覆盖率38%。区域土地利用以林地、耕地和草地为主，库区仍存在水土流失、地质灾害频发、水污染等系列问题。

1.2 研究方法

1.2.1 VSD模型及指标 Polsky等^[21]提出的VSD(暴露度—敏感性—适应力)模型清晰地表达了人类活动与生态系统之间的关系，经常被用于生态系统评价等相关研究中^[7,22]。基于该模型，本研究将生态空间分解为3个维度，分别为生态空间的暴露度、敏感性和适应力。

暴露度是反映生态系统受外界干扰或影响程度以及人类对生态系统产生负荷的指标^[23]。当人类活动的剧烈扰动能够对区域生态系统产生直接或间接的负向影响时，在一定程度上就改变了生态系统的自然稳定性与生态空间的连续性，不利于区域可持续发展。即在同一生态空间下，各地区因不同强度的人类活动使生态系统受到不同强度的破坏。暴露度越高，对生态空间的干扰作用及影响程度越强，则生态空间脆弱性越高；反之，暴露度越低，生态空间脆弱性越低。基于暴露度的内涵，结合数据可得性，本研究选择工业废水排放量、城镇生活污水排放量、城镇生活垃圾排放量、化肥施用强度、农药施用强度、人口密度、人均GDP、人均耕地面积、建设用地面积占比和土地垦殖率等10个指标，衡量库区生态空间暴露度。

敏感性是指生态系统受到自然和外部环境正向或负向的影响，对自然环境和人为扰动等的敏感程度^[24]。当人类活动干扰导致自然环境遭受破坏时，生态系统问题随之产生。也表示承载生态系统空间的感知力，即在相同程度的外界胁迫和干扰下，生态系统受到外界干扰影响的难易程度。敏感性越低，说明区域遭受破坏的可能性和程度就越小，则生态空间脆弱性越低；反之，敏感性越高，生态空间脆弱性越高。基于敏感性内涵，结合数据可得性，本研究选择NDVI、土壤侵蚀强度、森林覆盖率、坡度、地形起伏度、最高季节温度和年降水量

7个指标，衡量库区生态空间敏感性。

适应力是指生态系统在受到外界干扰后，能够处理、适应胁迫，以及恢复至系统平衡状态的自我协调能力^[25]。主要表现为人类面对一系列生态问题采取的应对措施和策略，以及生态空间对于外界胁迫的反馈、协调和韧性。即在生态系统偏离稳定状态后，各个地区适应外界干扰和自我恢复的能力。适应力越强，说明系统在被破坏后恢复的可能性越大，则生态空间脆弱性越低；反之，适应力越弱，生态空间脆弱性越高。基于适应力内涵，结合数据可得性，本研究选择城镇化率、第三产业比重和生态修复用地面积比重3个指标，衡量库区生态空间适应力。

依据VSD模型，本研究结合自然资源部出台的《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》(以下简称《技术指南》)中“双评价”的要求，结合库区实际，构建库区生态空间脆弱性评价指标体系(表1)。

1.2.2 TOPSIS模型 TOPSIS模型(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)是一种常用的在有限的方案中进行多目标决策分析的技术，是一种逼近理想解的排序方法^[26]。其原理为将评价指标进行归一化处理以消除量纲的影响，并计算指标的最优解和最劣解，最后根据指标与最优、最劣解的近似程度判断指标的优劣。

(1) 对 n 个评价对象的 m 个指标构建原始矩阵，进行综合评价，并对原始矩阵进行归一化处理，获得矩阵 \mathbf{X} 和 \mathbf{Z} ：

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}$$

(2) 由各项指标的最优解和最劣解确定最优解向量和最劣解向量：

最优解向量：

$$Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \cdots, Z_m^+)$$

$$Z_j^+ = \max\{Z_{1j}, Z_{2j}, \cdots, Z_{nj}\} \quad (j=1, 2, \cdots, m) \quad (2)$$

最劣解向量：

$$Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \cdots, Z_m^-)$$

$$Z_j^- = \min\{Z_{1j}, Z_{2j}, \cdots, Z_{nj}\} \quad (j=1, 2, \cdots, m) \quad (3)$$

表 1 三峡库区生态空间脆弱性指标体系及权重

目标层	要素目标层	参数层			
		编号	内容	指标导向	权重
暴露度	空间干扰强度	C_1	工业废水排放量(t)	+	0.183
		C_2	城镇生活污水排放量(t)	+	0.118
		C_3	城镇生活垃圾排放量(t)	+	0.082
		C_4	化肥施用强度(kg/hm ²)	+	0.041
		C_5	农药施用强度(kg/hm ²)	+	0.061
	空间压力状况	C_6	人口密度(万人/km ²)	+	0.042
		C_7	人均 GDP(万元/人)	+	0.042
		C_8	人均耕地面积(hm ² /15 人)	+	0.017
	空间土地利用	C_9	建设用地占比(%)	+	0.049
		C_{10}	土地垦殖率(%)	+	0.033
敏感性	空间自然条件	C_{11}	NDVI	—	0.024
		C_{12}	土壤侵蚀强度	+	0.049
		C_{13}	森林覆盖率(%)	—	0.022
	空间地形条件	C_{14}	坡度(°)	+	0.013
		C_{15}	地形起伏度(°)	+	0.009
	空间气候条件	C_{16}	最高温季节温度(℃)	+	0.019
		C_{17}	年降水量(mm)	—	0.019
适应力	空间产业发展	C_{18}	城镇化率(%)	+	0.041
		C_{19}	第三产业比重(%)	—	0.023
	空间生态韧性	C_{20}	生态修复用地面积比重(%)	—	0.113

注:“+”表示强化生态空间脆弱,“—”表示抑制生态空间脆弱。指标权重采用 Analytic Hierarchy Process(AHP)法确定,由 YAAHP 软件实现,具体经由专家对要素目标层中各参数按照对要素层贡献进行打分量化,进而应用 YAAHP 软件运算,限于篇幅,运算过程省略。

(3) 定义各评价对象与最优解和最劣解的距离:
与最优解的距离:

度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱 5
个等级(表 2)。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

与最劣解的距离:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (5)$$

式中: ω_j 为第 j 个指标的权重值。 $0 < D_i^+ < 1$, D_i^+ 越小,表示评价对象越接近最优解; $0 < D_i^- < 1$, D_i^- 越大,表示与最劣解距离越远。

(4) 计算各评价对象与最优值的相近度。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (6)$$

最后按相近度进行大小排序, C_i 越大表示第 i 个评价对象越优。当 $C_i = 1$ 时,说明该评价对象各项指标均处于最优状态;反之,当 $C_i = 0$ 时,说明评价对象各项指标均处于最劣状态。

在 TOPSIS 评价基础上,参照国内外已有的对生态脆弱性研究评价标准^[4-7,9-10,17,20,27]和自然资源部出台的《技术指南》中有关生态空间评价的要求,依据三峡库区现状,将三峡库区生态空间脆弱性划分为微

脆弱性	等级 Rank	脆弱性指数归一化值
微度脆弱	I 级	<0.2
轻度脆弱	II 级	0.2~0.4
中度脆弱	III 级	0.4~0.6
重度脆弱	IV 级	0.6~0.8
极度脆弱	V 级	≥0.8

1.3 数据来源及处理

表 1 指标体系中, $C_1 - C_{10}$, $C_{18} - C_{20}$ 以县级为单位,指标来源于 2006—2019 年《中国城市统计年鉴》《中国林业统计年鉴》《中国环境公报》《长江三峡工程生态与环境监测公报》《重庆统计年鉴》《宜昌市统计年鉴》《恩施州统计年鉴》和各地区环境公报统计年鉴。 C_{11} (NDVI)来自中国科学院资源环境科学与数据中心的 2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集。 C_{12} (土壤侵蚀强度)来源于地球系统科学数据共享网西南山地分中心,运用 ArcGIS 10.2 中的裁剪工具,得到三峡库区各区(县)1 : 10 万土地侵蚀等级数据。 C_{13} (森林覆盖率)来自于重庆市规划

和自然资源局中的重庆市土地利用现状分类面积统计表和重庆市土地利用总体规划(2006—2020 年)。 C_{14} (坡度)和 C_{15} (地形起伏度)的 DEM 数据来源于地理空间数据云平台,空间分辨率为 30 m, C_{14} (坡度)运用 ArcGIS 10.2 中的 slope 工具处理得到各区(县)坡度数据集。 C_{15} (地形起伏度)依据《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(征求意见稿)4 月版本》中“30 m \times 30 m 栅格采用 15 \times 15 邻域”的建议,运用 ArcGIS 10.2 的焦点统计工具处理得到各区(县)地形起伏度。 C_{16} (最高温季节温度)— C_{17} (年降水量)由重庆市和湖北省及周边地区各气象站点监测的数据运用反距离加权插值法(IDW)进行空间插值。

2 结果与分析

2.1 三峡库区生态空间各维度时空演变特征

2.1.1 暴露度 从空间维度看,三峡库区生态空间暴露度,各时段总体上以重庆的主城区和渝东北的万州区为双核心向四周逐渐减弱,空间分布呈现“局部突出,四周分散”的特征(图 1)。这是由于库区西部的巴南区、江北区、九龙坡区等区县的经济水平

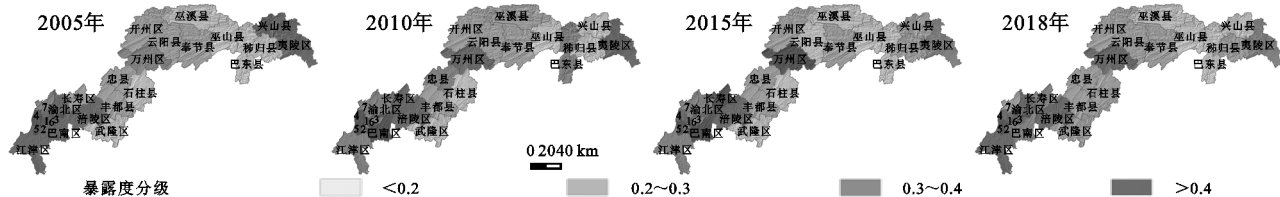


图 1 三峡库区生态空间暴露度分布

从时间维度来看,2005—2018 年三峡库区生态空间暴露度总体上呈逐年增强的演变特征(图 2)。近年来,虽然重庆和湖北积极加快转变农业发展方式,大力发展生态农业、加强环境保护与治理,倡导化肥农药施用量零增长。但由于三峡库区地形起伏大,土壤易受侵蚀,耕地细碎化严重,农业生产条件差,粮食产量的增长依旧需要依靠农药和化肥的使用。此外,自重庆直辖和长江经济带被确定为国家重大区域开发战略以来,重庆段内各区(县)受到直辖后国家政策和资源的倾斜,三峡库区各区(县)的经济发展水平呈上升的趋势,吸引大量外地人口迁入,人口密度和人均 GDP 增加,工业化进程加快,社会经济的快速发展致使生态环境问题愈加严峻。且由于人口的增加,导致建设用地面积占比增加,林地和耕地等生态用地随之减少,以此加剧生态空间的脆弱性。

2.1.2 敏感性 从空间维度看,三峡库区生态空间敏感性总体上呈现“东北高西南低”的趋势(图 3),渝东北地区的巫溪县、石柱土家族自治县、云阳县、巫山

高、人口密度大、城市用地需求多,使得建设用地扩张加剧,耕地面积较少。为了确保农业平稳生产,这些地区粮食产量多依赖于化肥和农药^[28],农药和化肥的施用强度以及建设用地面积占比均高于其他地区。此外,重庆主城区人口密度和人均 GDP 高于全库区平均水平,区域人类开发活动的强度较大,对生态空间造成不利影响。同时,由于城镇人口密度大,城镇生活垃圾和生活污水排放量也较高,环境破坏现象较为严重。因此,重庆主城区及其周边生态空间暴露度较强,平均达到 0.355。位于渝东北的万州区、开州区、忠县等地区多为喀斯特地貌,地形高差大,耕地种植不便,需依靠化肥和农药的施用。且万州区属于渝东北核心城市,人口密度较大,建设用地较广,城镇生活垃圾和生活污水排放量较高,致使生态空间暴露度均较强,达到 0.416。位于重庆东部的巫溪县、巫山县以及湖北的巴东县、兴山县等区县耕作方式较为传统,化肥和农药施用量较低;工业较不发达,工业废水排放量低于三峡库区平均水平;且建设用地面积占比较小,人口密度较低,城镇生活垃圾和生活污水排放量较低,致使生态空间暴露度均较弱,仅为 0.173。

县、奉节县等位于库区北部的区县敏感性强度最为显著,分别为 0.691,0.515,0.506,0.502,0.477。这是由于渝东北地区的巫溪县、巫山县、开州区等区县和湖北省的巴东县、秭归县、兴山县是典型的喀斯特地貌,区域坡度大、地形起伏度大。已有研究表明,随着山地城市经济的不断发展,人口不断从乡村向城镇迁入,造成多山地区出现住房紧张、用地不足等问题,城市建设用地不仅占用耕地、林地等生态用地和地势平坦的地区,还会逐步占用坡度较大的自然山体,对未来生态空间脆弱性有一定影响^[25]。虽然区域植被指数和森林覆盖率相对较高,但由于这些地区均为三峡库区移民工程最为集中的区域,大量的工程活动和陡坡地区农业耕作促使其土壤侵蚀强度更为剧烈^[29],致使库区北部生态敏感性较强。而位于渝西南部沙坪坝区、江津区、北碚区等区县地势平坦,土壤条件较好,加上重工业绝大部分已迁出区内,工业废气排放量较少,致使区域生态敏感性较低,分别为 0.306,0.301,0.296。此外,三峡库区内年降水量相对充沛

且空间差异较小,对生态空间内植物和粮食作物等的生长具有促进作用。因此,虽然重庆主城及周边地区植被指数和森林覆盖率较低,但在多个指标的综合影响下,使其生态空间敏感性较低。

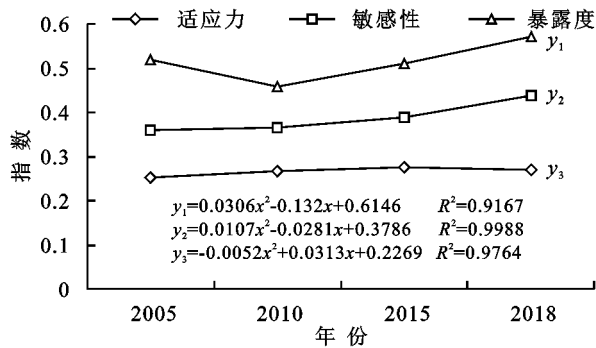


图 2 2005—2018 年三峡库区生态空间 VSD 总体变化趋势

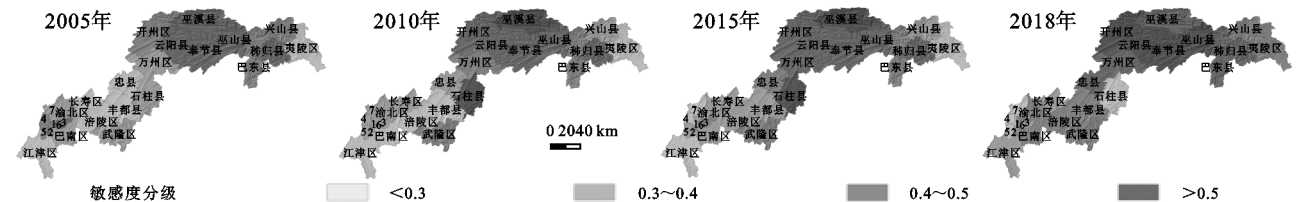


图 3 三峡库区生态空间敏感性分布

2.1.3 适应力 从空间维度看,三峡库区生态空间适应力总体以重庆主城区、湖北 4 个区县为双核心向四周减弱,呈现出“两端高,中间低”的空间分布格局(图 4)。这与重庆市直辖以来快速的城市化发展密切相关,城镇化率的提升迫使重庆主城区大量开发土地,生态修复用地的规划面积不足,意味着生态空间受到外界人为干扰的程度增加,恢复至平衡程度的能力减弱,致使重庆主城区生态空间适应能力较弱,仅为 0.634。湖北省的夷陵

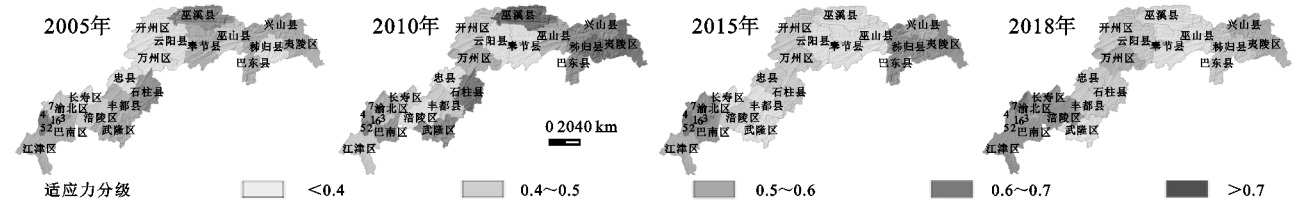


图 4 三峡库区生态空间适应力分布

从时间维度上看,2005—2018 年三峡库区生态空间适应力主要呈现先减后增的趋势,生态空间在人类活动干预和社会经济发展下的自我协调恢复能力加强;而库区西南部的重庆主城区适应能力较弱,没有明显地增加。库区进入城乡统筹发展新阶段后,产业结构转型升级加快,一产比重稳步下降,三产稳步上升,2010 年库区第三产业比重均值已达 41.09%,进入环境库兹尼茨曲线的拐点,环境治理投入力度逐年增大。同时居民保护环境、注重生态建设的意识逐渐加强,“退耕还林”、“退耕还草”等政策大力推进,尤其近年来一些跨区域的库区岸线重大生态修复工程

从时间维度来看,2005—2018 年三峡库区生态空间敏感性总体上呈波动上升的演变特征。在国家建设三峡库区生态屏障区战略背景下,各级政府逐渐重视长江流域的生态发展,全面控制城市污染,加强对水土流失及土壤侵蚀较严重区域的治理。同时,库区坚持“绿水青山就是金山银山”的理念,全面开展“退耕还林”工程,稳步推进植树造林工作,森林覆盖率由 2005 年的 39.73% 增加至 2018 年的 48.63%。此外,按照“共抓大保护、不搞大开发”方针,库区注重发展绿色产业,坚决执行“长江禁渔”政策,积极改善长江流域物种的生存环境,加大企业的转型和污染治理力度等举措,均对区域生态空间敏感性的降低产生积极的影响。

区、兴山县、巴东县、秭归县由于三峡库区移民等原因,人类活动剧烈,加上人工造林等生态修复用地较少,致使其生态空间的适应力较弱,分别为 0.613, 0.556, 0.540, 0.511。另一方面,位于库区中东部的重庆云阳县、忠县、奉节县等区县地势起伏较大等因素导致区域产业和城镇化进程缓慢,整个生态空间较为连续,生态空间的人为干预较少,因而其生态空间的自我恢复能力较强,分别为 0.291, 0.326, 0.356。

的推进,有力的提升了库区生态空间的适应力。

2.2 三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征

从空间维度看,三峡库区生态空间脆弱性总体上以重庆主城区和渝东北的万州区为双核心向四周减弱,呈现出“西高东低”的空间分布特征(图 5)。生态空间极度脆弱区大多数主要分布在库区西南地区的重庆市主城区及重庆万州。这些区域是城镇化重点区域,人类活动对生态扰动强烈,人多地少,人口容量超过土地负荷,建设用地无序扩张,导致区内森林覆盖率偏低。此外,工业化进程远超其他区域,工业废水和生活垃圾排放量的 80% 来源于重庆主城区、

万州区、长寿区等。因此,这些地区生态脆弱程度较为严重。另一方面,位于渝东北、渝东南以及湖北巴东县、秭归县等区县虽然地形崎岖、坡度较大、土壤侵蚀较强,但受自然条件的限制,使得这些地区城镇化

和工业化进程缓慢,人类活动对生态空间的扰动有限,因而这些山区森林覆盖率较高,自然环境状况优良,一定程度上增加了生态空间韧性与自我修复能力,降低了生态空间脆弱性。

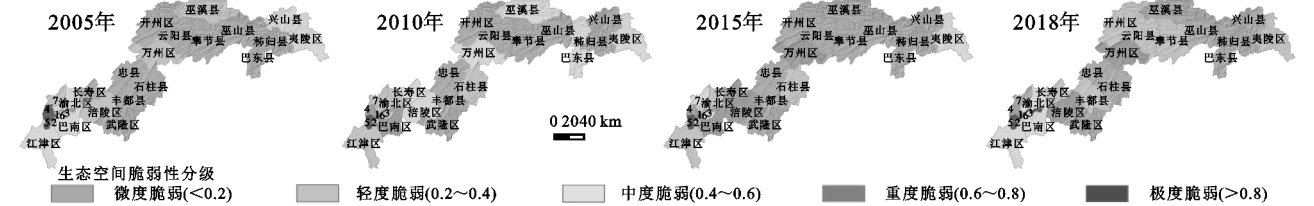


图 5 三峡库区生态空间脆弱性分布

从时间维度来看,2005—2018 年三峡库区生态空间脆弱性总体呈现倒“倒 U”变化趋势(图 6—7)。2005 年三峡库区生态空间脆弱程度整体较低,此阶段为库区经济发展初期,经济还未全面高速增长,人类活动干扰强度较低,植被覆盖率较高,自然环境较好,同期大部分区(县)生态空间较为优良。2010 年后,随着库区城镇化和工业化进程加快,库区人口快速增长,忽视生态环境保护,使得生态环境遭受人类活动的干扰较大,加剧库区生态空间脆弱程度。也有研究表明三峡库区水位存在周期性变化,在库岸形成垂直落差为 30 m 的水库消落带,在一定程度上破坏库区岸边植被和土壤结构,加剧了土壤侵蚀强度,水库蓄水增长,淹没了库区岸边部分用地,加上三峡库区移民的人口,致使建设用地需求增大,进一步加剧库区生态空间脆弱性^[30]。2015 年后,随着国家建设库区生态屏障战略的实施,“退耕还林”等重大生态修复工程的推进,长江上游流域生态治理力度加大,使环境污染在一定程度上得到缓解,库区生态空间脆弱性逐渐降低。

高;敏感性越高,所受到破坏的可能性和程度就越大,则生态空间脆弱性越高;适应力越强,系统在被破坏后恢复的可能性就越大,则生态空间脆弱程度性越低。

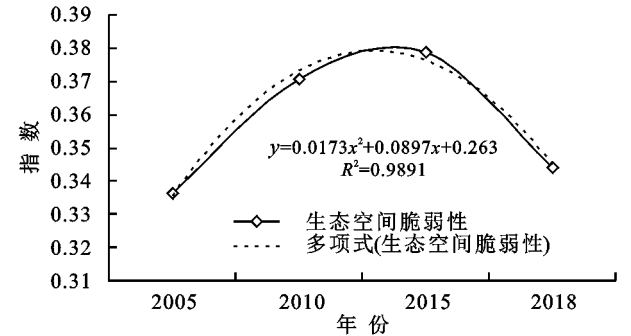


图 7 三峡库区生态空间脆弱性时间变化

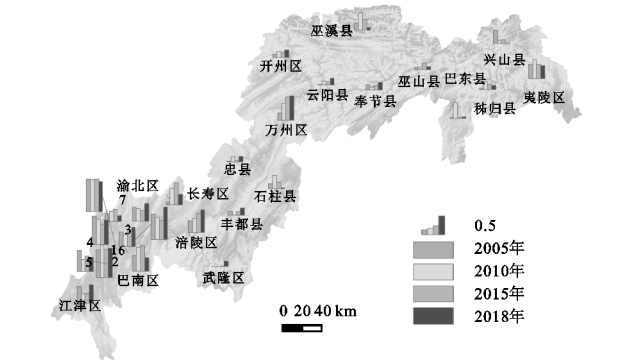


图 6 三峡库区生态空间脆弱性时间分布变化

3 结论

(1) 三峡库区生态空间脆弱性涵盖生态空间的暴露度、敏感性及适应力三方面。暴露度越高,对生态空间的干扰作用及影响程度就越强,则生态空间脆弱性越

(2) 三峡库区生态空间脆弱性具有显著的空间分布特征和时间演变规律。生态空间暴露度总体呈现以重庆的主城区(平均 0.355)和渝东北的万州区(0.416)为双核心向四周逐渐减弱的分布特征;时间上由 2005 年的 0.235 6,增强到 2018 年的 0.269 1,呈逐年增强的演变规律。三峡库区生态空间敏感性总体上呈现“东北高西南低”的趋势,巫溪县、石柱土家族自治县、云阳县、巫山县、奉节县等位于库区北部的区县敏感性强度最为显著,分别为 0.691,0.515,0.506,0.502,0.477。渝西南部沙坪坝区、江津区、北碚区等区县生态空间敏感度较低分别为 0.306,0.301,0.296。时间上,库区空间敏感性总体由 2005 年的 0.360 7,增强到 2018 年的 0.437 4,呈现逐年增强的演变规律。生态空间适应力总体以重庆主城区(0.634)、湖北夷陵区(0.613)、兴山县(0.556)、巴东县(0.540)、秭归县(0.511)为双核心向四周减弱,呈现出“两端高,中间低”的空间分布格局;时间上总体呈现先减后增的趋势,由 2005 年的 0.518 4,减少至 2010 年 0.457 4,然后增加到 2018 年的 0.571。

(3) 三峡库区生态空间脆弱性呈现以重庆主城区和渝东北的万州区为双核心向四周减弱的分布特

征。生态空间极度脆弱区主要分布在库区西南地区的重庆市主城区区域(平均 0.735)及重庆万州区(平均 0.814)。时间上,库区生态空间脆弱性总体呈现“倒U”的演变规律;2005 年为 0.336 2 年、2015 年达到顶点为 0.378 9 年、2018 年下降到 0.344 2。

(4) 三峡库区生态空间脆弱性时空变化是一个动态的过程;与人类活动强烈程度和自然条件联系紧密;与土壤侵蚀强度、坡度、废水排放量、产业结构等自然环境和社会经济因素息息相关,同时库区生态空间具有较强的自我修复能力。

参考文献:

- [1] 张学玲,余文波,蔡海生,等.区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J].生态学报,2018,38(16):5970-5981.
- [2] Crawford C L, Estes L D, Searchinger T D, et al. Consequences of underexplored variation in biodiversity indices used for land-use prioritization [J]. Ecological Applications, 2021,31(7):e02396.
- [3] 常丽博,骆耀峰,刘金龙.哈尼族社会—生态系统对气候变化的脆弱性评估:以云南省红河州哈尼族农村社区为例[J].资源科学,2018,40(9):1787-1799.
- [4] 钟晓娟,孙保平,赵岩,等.基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价[J].生态环境学报,2011,20(1):109-113.
- [5] 全占军,李远,李俊生,等.采煤矿区的生态脆弱性:以内蒙古锡林郭勒草原胜利煤矿为例[J].应用生态学报,2013,24(6):1729-1738.
- [6] 任金铜,杨可明,陈群利,等.草海湿地区域景观生态脆弱性时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2018,34(3):232-239.
- [7] 杨庆媛,毕国华,陈展图,等.喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究:以贵州省晴隆县为例[J].地理学报,2018,73(11):2250-2266.
- [8] 高海林,郝润梅,张瑞强,等.呼和浩特市生态环境脆弱性评价[J].干旱区资源与环境,2011,25(4):111-115.
- [9] 徐超璇,鲁春霞,黄绍琳.张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J].自然资源学报,2020,35(6):1288-1300.
- [10] 王群,银马华,杨兴柱,等.大别山贫困区旅游地社会—生态系统脆弱性时空演变与影响机理[J].地理学报,2019,74(8):1663-1679.
- [11] Malekmohmmadi B, Jahmishmkib F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model[J]. Ecological Indicators, 2017,82:293-303.
- [12] Lurgi M, Galiana N, Broitman B R, et al. Geographical variation of multiplex ecological networks in marine intertidal communities[J]. Ecology, 2020,101(11):e03165.
- [13] Wilcox K R, Koerner S E, Hoover D L, et al. Rapid recovery of ecosystem function following extreme drought in a South African savanna grassland[J]. Ecology, 2020,101(4):e02983.
- [14] 高吉喜,徐德琳,乔青,等.自然生态空间格局构建与规划理论研究[J].生态学报,2020,40(3):749-755.
- [15] 张合兵,于壮,邵河顺.基于多源数据的自然生态空间分类体系构建及其识别[J].中国土地科学,2018,32(12):24-33.
- [16] 江东,林刚,付晶莹.“三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析[J].自然资源学报,2021,36(5):1085-1101.
- [17] 马骏,李昌晓,魏虹,等.三峡库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117-7129.
- [18] 周永娟,仇江啸,王姣,等.三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J].生态学报,2010,30(24):6726-6733.
- [19] 何敏,王鹤松,孙建新.基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征[J].应用生态学报,2019,30(2):429-438.
- [20] 王志杰,苏嫒.南水北调中线汉中市水源生态脆弱性评价与特征分析[J].生态学报,2018,38(2):432-442.
- [21] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global chm²nge vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. Global Environmental Chm²nge, 2007,17(3/4):472-485.
- [22] Binita K C, Shepherd J M, Gaither C J. Climate chm²nge vulnerability assessment in Georgia[J]. Applied Geography, 2015,62:62-74.
- [23] 田亚平,向清成,王鹏.区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系[J].地理研究,2013,32(1):55-63.
- [24] 杨忍,潘瑜鑫.中国县域乡村脆弱性空间特征与形成机制及对策[J].地理学报,2021,76(6):1438-1454.
- [25] 任红玉,赵宇鸾.贵阳市岩溶山区快速城市化地区生态脆弱性评价[J].生态科学,2020,39(4):252-258.
- [26] 胡永宏.对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J].数学的实践与认识,2002,51(4):572-575.
- [27] Ifeanyi C E, Adoh E N, Alabi M O. Evaluation of eco-environmental vulnerability in Efon-Alaye using remote sensing and GIS techniques[J]. Journal of Geography and Regional Planning, 2010,3(1):8-16.
- [28] 王成,何焱洲.重庆市乡村生产空间系统脆弱性时空分异与差异化调控[J].地理学报,2020,75(8):1680-1698.
- [29] 刘春霞,李月臣,杨华,等.三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J].地理学报,2011,66(5):631-642.
- [30] 鲍玉海,贺秀斌.三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J].水土保持研究,2011,18(6):190-195.