

基于模糊层次分析法的生态环境脆弱性评价 ——以三峡水库生态屏障区湖北段为例

范语馨¹, 史志华²

(1. 合肥工业大学, 安徽 宣城 230009; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 三峡水库生态屏障区的生态环境脆弱性评价, 对屏障区自身生态系统的构建与维护、发挥屏障区对三峡水库水质和生态环境的安全保障功能, 具有重要的意义。利用模糊层次分析法, 基于 GIS 和 RS 技术, 对屏障区湖北段的生态环境脆弱性进行了评价, 并分析了主要影响因素。结果表明: (1) 生态环境脆弱性以轻度、中度和潜在脆弱性为主, 占屏障区总面积的 74.9%, 主要分布在秭归县中部和巴东县北部, 严重脆弱区面积占总面积 21.7%, 主要分布在秭归县南部、巴东县中南部和夷陵区南部; (2) 生态环境脆弱性级别较高的区域主要分布于高程 800 m 以下、坡度 25° 以下、植被覆盖较低、人口密度较大的位置, 人类活动是导致生态环境脆弱的重要原因; (3) 在严重脆弱性区域通过构建农林复合系统, 结合植树造林、生态恢复等措施, 以提高植被覆盖度, 是解决该区生态环境脆弱的可行性措施。

关键词: 生态环境脆弱性评价; 生态屏障区; 三峡水库; 影响因素

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0091-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.01.015

Eco-environmental Vulnerability Assessment Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process

—A Case Study in the Ecological Shelter Zone of Three Gorges Reservoir Area in Hubei Province

FAN Yuxin¹, SHI Zhihua²

(1. Hefei University of Technology, Xuancheng, Anhui 230009; 2. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: Eco-environmental vulnerability assessment for the ecological shelter zone was pivotal for protecting the water quality and maintaining the ecosystem of shelter zone in Three Gorges reservoir. By the aid of the fuzzy analytic hierarchy process and GIS & RS, this study performed an eco-environmental vulnerability assessment for the ecological shelter zone in Hubei province, and the main influencing factors were also analyzed. The main results were listed as follows: (1) The vulnerability of the ecological environment was mainly mild, moderate and potential vulnerability, accounting for 74.9% of the shelter zone area, which mainly located the middle part of Zigui and north part of Badong, and the 21.7% of the shelter zone was covered by the heavy vulnerability area which distributed in the southern part of Zigui and Yiling, middle and southern parts of Badong; (2) The heavy and very heavy ecological vulnerability areas mainly located in the area with the elevation lower than 800 m and the slope less than 25°, where the land was not well covered by vegetation but concentrated residence, and the anthropogenic activities was the main influencing factor on eco-environmental vulnerability; (3) Increasing the vegetation cover by constructing the agroforestry system, adopting afforestation and ecological restoration would be the effective treatments to decrease the eco-environmental vulnerability in this shelter zone.

Keywords: eco-environmental vulnerability assessment; ecological shelter zone; Three Gorges Reservoir; influencing factors

“生态屏障”源于我国生态建设实践, 是指结构与功能符合人类生存与发展的生态要求的生态系统^[1]。

生态屏障区具有过滤、缓冲、隔板、庇护、水源涵养和美学等功能, 可为一定尺度的功能覆盖范围提供生态

安全保障^[2]。三峡水库蓄水后,为保护三峡水库水质和生态环境,划定 175 m 土地征用线至第一道山脊线之间的区域作为三峡水库生态屏障区^[3-4]。生态屏障区可保护三峡库区生物多样性、涵养水源、净化环境和改善景观、保持水土、防风固沙、调节气候、维持生态系统良性循环和促进区域稳定。生态脆弱性是指生态系统及其组成要素受到内外扰动时易受损的性质。随着人口增长和经济快速发展,生态屏障区的生态环境脆弱问题逐渐显现。如高强度的坡地农业生产加剧了水土流失,增加了入库面源污染物,使生态屏障区的拦截、消纳与过滤农业面源污染物的功能急剧降低^[5]。对生态脆弱性进行评价,可识别生态系统脆弱性的关键因子及其变化规律,为生态保护与恢复提供依据^[6]。因此,评价三峡水库生态屏障区生态环境脆弱性,对于维护屏障区自身生态系统、发挥屏障区对三峡水库的生态安全保障功能,具有重要的意义。

三峡大坝位于湖北宜昌市夷陵区,三峡水库生态屏障区湖北段对三峡水库的影响更为直接。区内丘陵山地占 90% 以上,地形破碎,是三峡水库泥沙及面源污染的重要源区。该区域支流入库的污染物浓度较高,且库周来水受水库的顶托,长时间滞留在支流河口或库湾处,造成水质恶化,是影响生态屏障区乃至水库水质的重要原因。区内人均耕地少,环境承载力不足,导致部分生态位空置,生态过程无法有效实现,生态功能较弱。本研究在野外调查、遥感资料收集基础上,借助 GIS 与 RS 技术,对三峡水库生态屏障区湖北段进行生态环境脆弱性评价,为该区生态建设与功能发挥提供科学依据。

1 研究区概况

三峡水库生态屏障区湖北省段总面积为 3 792.9 km²(图 1),位于宜昌市夷陵区、巴东县、秭归县和兴山县,下辖 18 个乡镇,人口 68.7 万人,密度约 181.3 人/km²。属湿润亚热带季风气候,四季分明,冬暖春早、夏热伏旱、秋雨多,湿度大。该区域年平均气温 14.9~18.5℃,年平均降水量约 1 000~1 300 mm,降水量主要集中在 6—9 月,占年降水量的 50%~65%。土壤类型包括黄棕壤、黄褐土、石灰土、潮土及棕壤。植被为亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、常绿针叶林及常绿阔叶灌丛、落叶阔叶灌丛。

2 数据与方法

生态环境脆弱性评价是将多源生态环境信息综合为整体的相对脆弱性等级,并以此评价生态环境的相对优劣程度^[7]。生态脆弱性具有双重特征:精确又模糊,确定又不确定。因此,需要用精确与模糊的方法来共同评价。目前评价方法有综合评估法、景观评估法、主成分分析法、神经网络法、模糊层次分析法等^[8-11],其中模糊层次分析法兼顾层次分析法^[12]和模糊综合评价法^[13]

的优点,被广泛应用于资源与环境评价、生态评价等多个领域^[14-16]。本文利用模糊层次分析法对研究区的生态环境脆弱性进行评价,其主要包括指标体系构建、数据获取、因子权重确定、数据标准化和综合评价等步骤。

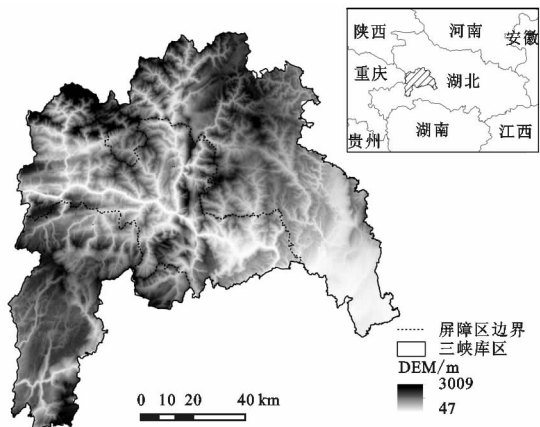


图 1 三峡水库生态屏障区湖北段位置

2.1 指标体系构建

层次分析法的指标体系一般包括目标层、指标层、因子层共 3 个层次。生态环境脆弱性受人类活动和自然条件的共同影响,因此,评价指标体系需包括此两大类要素。借鉴已有研究成果^[15-16],基于屏障区实际,确定生态环境脆弱性评价指标体系(图 2):目标层(A)反映生态脆弱性程度;指标层(B)包括人类活动要素(B₁)和气象条件(B₂)、地形地质(B₃)与土地覆被(B₄)等 3 个自然条件要素;因子层(C)共 14 个指标,即人类活动(B₁)包括人口密度(C₁)、人均 GDP(C₂)、道路密度(C₃),气象条件(B₂)包括年平均气温(C₄)、>10℃积温(C₅)、年均降雨量(C₆)、干燥度(C₇)、湿润指数(C₈),地形地质条件(B₃)包括高程(C₉)、坡度(C₁₀)、地质条件(C₁₁),土地覆被条件(B₄)包括归一化植被指数(C₁₂)、可耕地面积比率(C₁₃)、土壤类型(C₁₄)。

2.2 数据收集与处理

通过野外调查、室内分析、遥感解译、扫描数字化以及测绘成果转绘等方法,获取生态环境脆弱性评价指标体系中因子层所涉及的各项因子值(表 1)。将所获取的各项指标在 ARCGIS 中构建为图层,并投影至阿尔伯投影坐标系统。按照 500 m×500 m 栅格精度,对已有栅格数据进行重采样,并将矢量数据转换为栅格数据。将具有相同栅格精度和统一坐标系统的栅格数据存储至 GDB 数据库。

2.3 因子权重确定

采用模糊层次分析法对各层次因子进行权重赋值。步骤为:(1)首先通过专家咨询,两两比较要素间的相对重要程度,并将其利用正三角模糊对比矩阵表示;(2)利用 Lambda-Max 方法,计算每位专家的各个因子的模糊权重^[17];(3)将每位专家各个因子的模糊权重值利用平均数法进行整合;(4)计算各个层次因子的总排序权重,确定指标体系中因子层对指标层、指标层对目标层的重

要程度,获取各因素的权重值。基于 Li 等^[15]的研究成果,在 Matlab 中编程计算,获得各因子权重(表 2)。

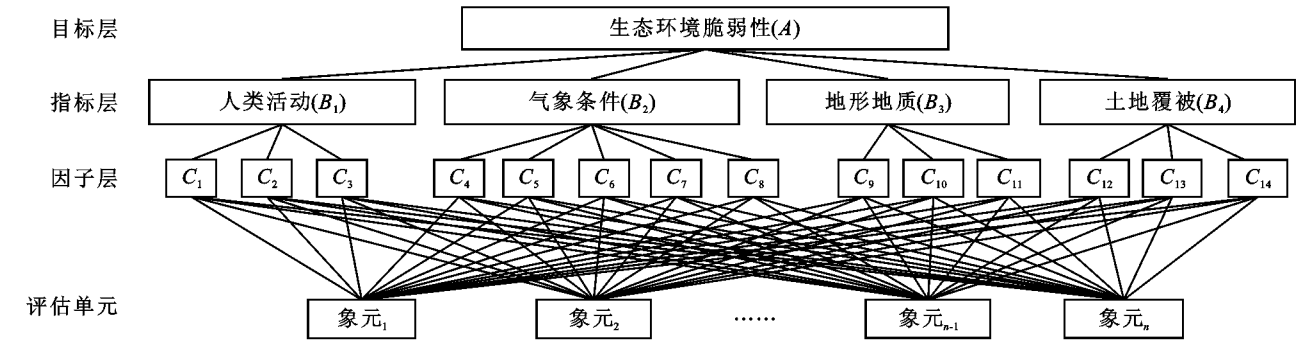


表 1 生态环境脆弱性评价指标获取的数据来源与处理方法

原始数据	数据来源	处理方法	获取指标(共 14 项)
TM 影像(2013 年)	地理空间数据云	遥感解译	归一化植被指数、可耕地面积比率
DLG 数据	湖北省测绘局	3D 分析	高程、坡度、道路密度
土壤图	中国科学院南京土壤研究所	空间分析	土壤类型
地质图	中国地质调查局	数字化	地质条件
气象数据	中国农业科学院农业自然资源与农业区划研究所	统计分析	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年均温、年均降雨量、干燥度、湿润指数
社会经济数据	湖北省统计年鉴	数字化	人口密度、人均 GDP

表 2 生态环境脆弱性评价因子的模糊权重值

目标层		指标层			因子层		
指标	编号	指标	编号	权重	因子	编号	权重
生态环境脆弱性	A	人类活动	B_1	0.32	人口密度	C_1	0.15
					人均 GDP	C_2	0.07
					道路密度	C_3	0.10
					年平均气温	C_4	0.04
					$>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	C_5	0.05
		气象条件	B_2	0.21	年均降雨量	C_6	0.08
					干燥度	C_7	0.02
					湿润指数	C_8	0.02
					高程	C_9	0.17
		地形地质	B_3	0.32	坡度	C_{10}	0.11
					地质条件	C_{11}	0.04
					归一化植被指数	C_{12}	0.08
		土地覆被	B_4	0.15	可耕地面积比率	C_{13}	0.02
					土壤类型	C_{14}	0.05

2.4 数据标准化

生态环境脆弱性评价因子存在量纲差异和取值范围差异,因此需要对数据进行标准化。基于专家咨询,结合李璐^[16]的研究成果,将生态环境脆弱性划分为 5 个等级:潜在、轻度、中度、严重和极端脆弱性,并确定各等级中 14 个评价因子的划分标准(表 3)。

采用模糊隶属度函数确定各影响因子对每一个等级生态环境脆弱性贡献的大小。由于各个指标对脆弱性的影响有正负之分,因此需分别进行计算。其中,对于正向指标,采用公式(1)~公式(3)。负向指标的标准化方法可类比构建。非数值型的指标,如土壤类型和地质条件,则根据表 3 直接在相应等级赋值为 1。

当 $j=1$ 时,

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & C_{ki} \geq P_{i1} \\ \frac{C_{ki} - P_{i1}}{P_{i1} - P_{i2}} & P_{i1} \leq C_{ki} \leq P_{i2} \\ 0 & C_{ki} \leq P_{i2} \end{cases} \quad (1)$$

当 $j=2,3,\cdots,m-1$ 时,

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{P_{ij-1} - C_{ki}}{P_{ij-1} - P_{ij}} & P_{ij} \leq C_{ki} \leq P_{ij-1} \\ \frac{C_{ki} - P_{ij+1}}{P_{ij} - P_{ij+1}} & P_{ij+1} \leq C_{ki} \leq P_{ij} \\ 0 & C_{ki} > P_{ij-1}, C_{ki} < P_{ij+1} \end{cases} \quad (2)$$

当 $j=m$ 时,

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & C_{ki} \geq P_{im-1} \\ \frac{P_{im-1} - C_{ki}}{P_{im-1} - P_{im}} & P_{im} \leq C_{ki} \leq P_{im-1} \\ 1 & C_{ki} \leq P_{im} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为 i 评价因子在第 j 等级的隶属度; C_{ki} 为第 i 个评价因子的观测值; $P_{i1}, P_{i2}, \cdots, P_{ij}$ 分别为第 i 个评价因子在第 j 等级的分级标准。

2.5 生态环境脆弱性综合评价

计算权重(CC_i)与隶属度矩阵(R)的张量积(公式 4),获得生态环境脆弱性在不同脆弱性等级的隶属度(V)。根据最大隶属度方法,在 ARCGIS 中对研究区内的生态环境脆弱性进行等级综合评判,并获得

脆弱性等级图;利用空间分析,统计每个县和乡镇的不同生态环境脆弱性等级的面积。

$$V=CC_i\otimes R \tag{4}$$

式中:CC_i 为计算权重;R 隶属度矩阵的张量积。

表 3 生态环境脆弱性评价因子的等级划分标准

因素	等级				
	1	2	3	4	5
人口密度/(人·km ⁻²)	<2	2~50	50~100	100~250	>250
人均 GDP/(万元·km ⁻²)	<10	10~30	30~60	60~100	>100
道路密度/(km·km ⁻²)	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	>1.2
归一化植被指数	>0.80	0.65~0.80	0.50~0.65	0.30~0.50	<0.30
可耕地面积比率	<0.03	0.03~0.10	0.10~0.30	0.30~0.50	>0.50
土壤类型	潮土、新积土	水稻土、紫色土	黄棕壤、棕壤	黄褐土	石灰土、粗骨土
年均温/℃	>15	14~15	13~14	12~13	<12
>10℃积温/℃	>4800	4500~4800	4200~4500	3800~4200	<3800
年均降雨量/mm	>1050	1000~1050	950~1000	900~950	<900
干燥度	<0.95	0.95~1.05	1.05~1.15	1.15~1.25	>1.25
湿润指数	>14	9~14	6~9	3~6	<3
高程/m	<300	300~500	500~800	800~1100	>1100
坡度/(°)	<6	6~15	15~25	25~40	>40
地质条件	火山岩	沉积岩、变质岩	闪长岩等	碳酸盐	花岗岩

3 结果与分析

3.1 生态环境脆弱性总体特征

三峡水库生态屏障区湖北段的生态环境脆弱性以轻度、中度和潜在脆弱性为主,分别占屏障区面积的 34.9%,24.3%,15.7%;严重脆弱区与极端脆弱区面积分别占 11.0%,10.7%。由图 3 可知,严重脆弱区与极端脆弱区分布比较集中,主要位于巴东县的中南部、秭归县的北部和南部。

由表 4 可知,秭归与巴东的极端脆弱性面积占屏障区该级别面积的 75.8%,严重脆弱性面积主要分布在秭归、巴东和夷陵区,总面积占该级别面积的 89.8%。中度和轻度脆弱性和轻度脆弱性面积主要分布在秭归和巴东。潜在脆弱性面积主要分布在夷陵区,占 41.7%。因为兴山县面积在生态屏

障区的面积较小,因此对各个级别脆弱性面积的贡献较小,其轻度与中度脆弱性面积最大,分别为 206.6,142.0 km²。

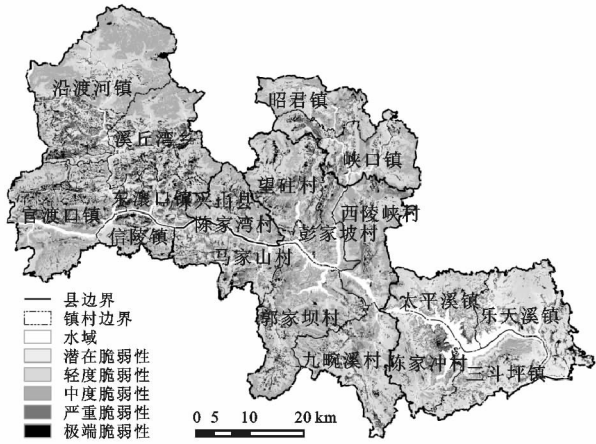


图 3 生态屏障区生态环境脆弱性空间分布

表 4 三峡生态屏障区分县生态环境脆弱性分级

地区	潜在脆弱性		轻度脆弱性		中度脆弱性		严重脆弱性		极端脆弱性	
	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/%
秭归	139.4	23.5	438.2	33.3	351.5	38.3	140.4	34.7	125.1	30.1
巴东	152.6	25.7	442.4	33.6	341.4	37.2	112.3	27.8	190.1	45.7
夷陵	247.2	41.7	229.6	17.4	83.6	9.1	110.5	27.3	55.8	13.4
兴山	53.5	9.0	206.6	15.7	142.0	15.5	41.1	10.2	45.1	10.8
合计	592.7	100.0	1316.8	100.0	918.5	100.0	404.3	100.0	416.1	100.0

3.2 生态环境脆弱性影响因素

生态建设主要是采取政府主导、民众参与的方式,因此生态环境脆弱性评价结果精确至村镇级别,对于生态规划与管理、生态保护与修复具有指导作用。表 5 中统计了 18 个村镇不同级别生态环境脆弱性的面积。人口密度、道路密度、高程、坡度、归一化植被指数和年降雨量的权重较大(表 2),表明这些因子对脆弱性的影响较大。由于人口密度与道路密度均以村镇为单元进行计算,表现为同一村镇范围内人口密度或道路密度的值

不变,且人口密度与道路密度受控于住宅区分布,所以采用住宅用地分布可反映村镇范围内部的差异。为便于分析,将住宅用地在高程与坡度分带分布绘制为图 4,植被覆盖与年降雨量分绘制为图 5。

潜在脆弱性面积较大的村镇分别为位于三峡大坝周边的乐天溪镇、三斗坪镇、太平溪镇,以及位于西北部的沿渡河镇(图 3)。三峡大坝周边高程低、坡度小,植被覆盖较好,年均降雨量处于中等,因而生态环境脆弱性低。虽然沿渡河镇北部高程大,坡度陡,降

雨较少,但是由于植被较好,因此该位置的生态环境脆弱性级别较低(图 4、图 5)。轻度与中度脆弱性分布面积较大的村镇具有较好的一致性(表 5),主要分布在沿渡河镇北部,官渡口镇南部、郭家坝村中部,多处于潜在脆弱性之上的较高处;该部位虽然植被较好,降雨稍多,但是坡度较陡,导致脆弱性稍微严重。严重与极端脆弱带主要分布在沿渡河、官渡口、溪丘

湾乡、乐天溪、陈家冲、郭家坝以及马家山等村镇。对比住宅用地、高程、坡度与降雨分布(图 4、图 5),可见生态环境脆弱性级别较高的村镇主要位于高程 800 m 以下、坡度 25°以下、植被较差、住宅用地较为集中的位置。严重与极端脆弱带在不同的年均降雨量下均有分布,表明年降雨量的影响较小。由此推理,人类活动是影响环境脆弱性的重要原因。

表 5 三峡生态屏障区分村镇生态环境脆弱性分级

地区		潜在脆弱性		轻度脆弱性		中度脆弱性		严重脆弱性		极端脆弱性	
		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/%
巴东	信陵镇	8.6	1.4	34.4	2.6	16.9	1.8	5.4	1.3	16.4	3.9
	沿渡河镇	55.2	9.3	173.4	13.2	163.2	17.8	35.8	8.9	51.2	12.3
	官渡口镇	27.5	4.6	117.2	8.9	85.6	9.3	25.5	6.3	57.3	13.8
	东壤口镇	21.0	3.5	28.0	2.1	13.4	1.5	18.6	4.6	22.2	5.3
	溪丘湾乡	40.3	6.8	89.4	6.8	62.4	6.8	27.1	6.7	42.9	10.3
兴山	昭君镇	20.6	3.5	63.5	4.8	39.3	4.3	11.6	2.9	8.0	1.9
	峡口镇	27.8	4.7	91.0	6.9	54.4	5.9	21.1	5.2	19.2	4.6
	陈家湾村	5.1	0.9	52.0	4.0	48.3	5.3	8.3	2.1	17.8	4.3
	太平溪镇	44.9	7.6	49.8	3.8	12.7	1.4	19.1	4.7	9.2	2.2
夷陵	乐天溪镇	105.9	17.9	72.3	5.5	8.0	0.9	34.9	8.6	21.4	5.2
	三斗坪镇	62.5	10.5	45.4	3.5	24.1	2.6	27.8	6.9	9.7	2.3
	陈家冲村	34.0	5.7	62.0	4.7	38.9	4.2	28.7	7.1	15.4	3.7
	郭家坝村	27.5	4.6	104.4	7.9	96.6	10.5	27.4	6.8	32.1	7.7
秭归	九畹溪村	33.1	5.6	110.0	8.4	47.5	5.2	21.9	5.4	22.9	5.5
	西陵峡村	11.6	2.0	77.2	5.9	86.6	9.4	21.3	5.3	13.0	3.1
	彭家坡村	10.8	1.8	18.4	1.4	34.1	3.7	14.4	3.6	8.7	2.1
	望碚村	20.3	3.4	85.2	6.5	45.9	5.0	25.6	6.3	31.1	7.5
	马家山村	36.1	6.1	43.1	3.3	40.6	4.4	29.8	7.4	17.3	4.2
合计		592.6	100.0	1316.8	100.0	918.6	100.0	404.4	100.0	416.0	100.0

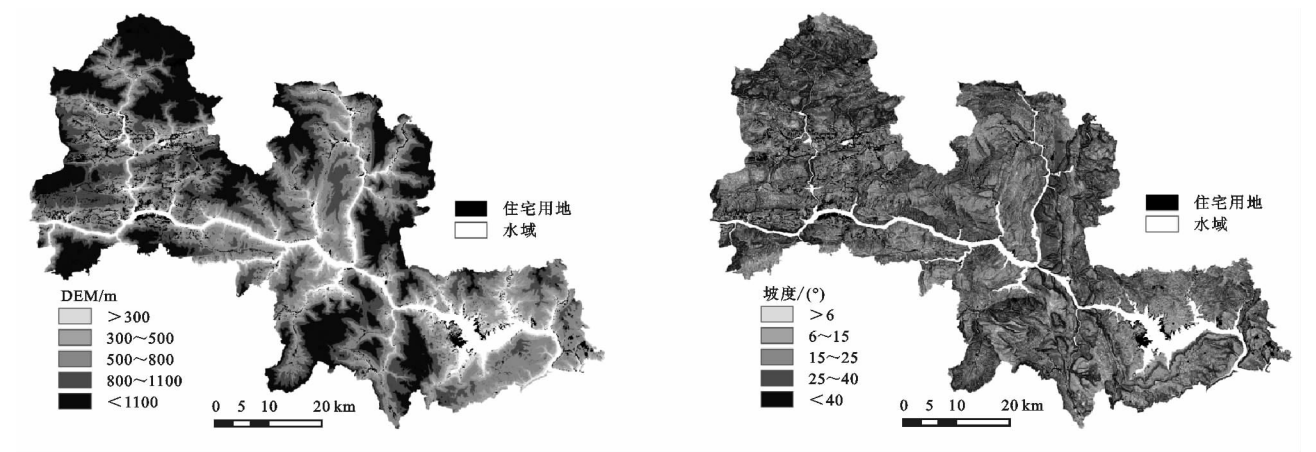


图 4 住宅用地在高程与坡度分带分布

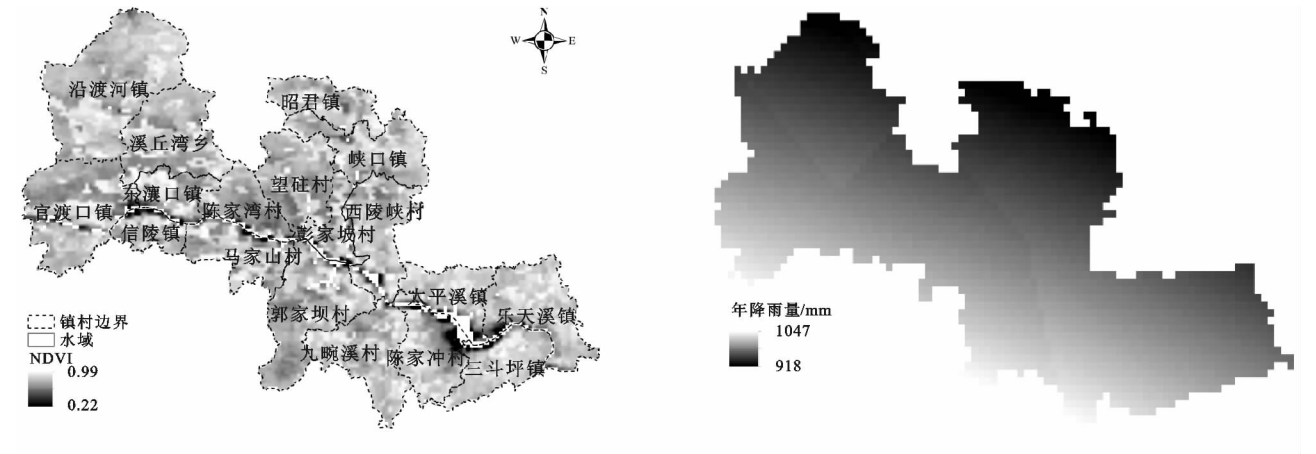


图 5 植被覆盖指数 NDVI 与年降雨量分布

3.3 生态环境脆弱性治理对策

三峡水库生态屏障区湖北段的生态环境脆弱性问题较为突出,严重脆弱性与极端脆弱性所占面积比例达到 21.7%,主要集中分布在人类活动较为剧烈的低高程地带和低坡度地区,围绕住宅用地分布,地形破碎,植被覆盖度较低。由于住宅用地周边区域属于移民迁入区,人类农业活动强烈,因此通过控制人类耕作的措施来保护环境难以实施。相对于高程、坡度和降雨因素,人类活动导致的较低植被覆盖度成为生态环境脆弱的主要因素。

农林复合经营是指在一个土地利用单元中,人为地把木本植物与农作物以及畜禽养殖等多种成分结合起来的土地利用系统,该系统在保护农田环境、维持经济效益和提供多种农产品组合上具有优越性,适合我国传统的精耕细作而非大规模机械化耕作现状,对山地丘陵区农田地块破碎条件具有良好的适宜性^[18-19]。因此,在三峡水库生态屏障区的严重与极端脆弱性区域构建农林复合系统,结合植树造林、生态恢复等修复措施,提高植被覆盖度是解决生态环境脆弱的可行性措施。

4 结论

(1)三峡水库生态屏障区湖北段生态环境脆弱性以轻度、中度和潜在脆弱性为主,其中轻度脆弱性面积比例最大,占总面积的 34.9%。严重脆弱区与极端脆弱区面积占总面积 21.7%,生态环境问题比较突出。

(2)三峡水库生态屏障区湖北段生态环境脆弱性级别较高的区域主要分布于高程 800 m 以下、坡度 25°以下、植被覆盖度较低、住宅用地分布较为集中的部位。人类活动导致较低的植被覆盖是影响屏障区生态环境脆弱性的重要原因。

(3)在严重与极端脆弱性区域构建农林复合系统,结合植树造林、生态恢复等措施,以提高植被覆盖,是解决三峡水库生态屏障区生态环境脆弱的可行性措施。

参考文献:

- [1] 王玉宽,孙雪峰,邓玉林,等.对生态屏障概念内涵与价值的认识[J].山地学报,2005,23(5):431-436.
- [2] 潘开文,吴宁,潘开忠,等.关于建设长江上游生态屏障的若干问题的讨论[J].生态学报,2004,24(3):617-629.
- [3] 胡友兵,李致家,冯杰,等.三峡库区生态屏障范围界定[J].水利学报,2012,43(10):1248-1253.
- [4] 杨馨越,魏朝富,倪九派.三峡生态屏障区耕地承载力与人口生态转移[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1554-1562.
- [5] 肖新成,何丙辉,倪九派,等.三峡生态屏障区农业面源污染的排放效率及其影响因素[J].中国人口·资源与环境,2014,24(11):60-68.
- [6] 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.
- [7] Wickham J D, Jones K B, Riitters K H, et al. An integrated environmental assessment of the US Mid-Atlantic Region [J]. Environmental Management, 1999, 24(4): 553-560.
- [8] Gowrie M N. Environmental vulnerability index for the Island of Tobago, West Indies [J]. Conservation & Ecology, 2003, 7(2): 1850-1851.
- [9] Park Y S, Chon T S, Kwak I S, et al. Hierarchical community classification and assessment of aquatic ecosystems using artificial neural networks [J]. Science of the Total Environment, 2004, 327(1/3): 105-122.
- [10] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等.基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J].生态学报,2007,27(4):1257-1264.
- [11] Li A N, Wang A S, Liang S L, et al. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS-A case study in the upper reaches of Minjiang River, China [J]. Ecological Modelling, 2006, 192(1/2): 175-187.
- [12] Li Z W, Zeng G M, Zhang H, et al. The integrated eco-environment assessment of the red soil hilly region based on GIS-A case study in Changsha City, China [J]. Ecological Modelling, 2007, 202(3/4): 540-546.
- [13] Mikhailov L, Tsvetnikov P. Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process [J]. Applied Soft Computing, 2004, 5(1): 23-33.
- [14] Laarhoven P J M, Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1983, 11(1/3): 229-241.
- [15] Li L, Shi Z H, Yin W, et al. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the danjiangkou reservoir area, China [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23): 3439-3447.
- [16] 李璐.南水北调中线水源区多尺度生态环境综合评价[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [17] Csutora R, Buckley J J. Fuzzy hierarchical analysis: The Lambda - Max method [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 120(2): 181-195.
- [18] 申元村,冷疏影,张永涛,等.坡地农林复合系统的结构类型与效益分析:以长江三峡库区坡地农业为例[J].地理研究,1995,14(3):43-51.
- [19] 洪传春,刘某承,李文华.农林复合经营:中国生态农业发展的有效模式[J].农村经济,2015(3):37-41.