

岷江上游生态环境脆弱性评价^{*1}

陈金月 王石英*

(四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610101)

【摘要】: 生态环境脆弱性评价是全球生态问题和可持续发展研究中的重要内容之一。岷江上游因地质构造复杂、人地矛盾突出、生态系统异常脆弱和灵敏而备受关注。本文以岷江上游生态环境脆弱性为研究对象,选取证据权重法(WOE)进行滑坡脆弱性评价,层次分析法(AHP)进行水力侵蚀、景观破坏与污染脆弱性评价;在此基础上,进行了研究区各生态主题脆弱性的空间叠加分析;探讨了岷江上游生态环境脆弱性及其在不同影响因子作用下的空间分异特征。结果表明:研究区的滑坡脆弱性、水力侵蚀脆弱性、景观破坏与污染脆弱性均以轻微度为主,分别占研究区面积的80.43%、71.89%、75.55%;各生态环境主题脆弱性综合分析表明,54.70%的区域至少面临一种生态问题,面临两种及以上环境问题的区域占15.43%,同时面临三种环境问题的占1.35%。研究结果探讨了岷江上游生态环境存在的主要问题和影响因子,对岷江流域乃至长江流域的生态安全和可持续发展具有积极意义,未来应持续关注生态环境脆弱区的生态环境问题。

【关键词】: 岷江上游; 生态脆弱性; 评价; WOE; AHP

【中图分类号】: X171.1, X821 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2017)03-0471-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201703018

生态环境脆弱性是全球环境变化的重要表现形式,生态系统脆弱区的生态环境脆弱性评价不仅有助于找出区域发展过程中存在的环境问题及其主要驱动力,同时也为生态环境治理提供了必要依据,对人类经济活动和区域可持续发展具有重要参考价值^[1, 2]。随着GIS和RS技术的发展,国内外生态环境脆弱性的研究取得了许多重要成果,尤为重要是将层次分析法^[2, 3]、模糊判定法^[4]、主成分分析法^[5]、灰色关联法^[6]等传统数理分析方法与GIS、RS结合,使生态环境脆弱性评价向着快速、精准、量化的方向发展。数据收集不再局限于传统调查,研究区域的选择也不再局限于县市等传统评价单元。然而,由于生态环境系统复杂,涉及自然、社会、经济等多个方面,不同研究目的和学科背景的学者选择的评价指标及拟定的评价体系受人为影响因素较大,缺乏统一的指标筛选体系,且多集中在自然因素方面^[7]。尽管研究者越来越注重人为因素的影响,从传统的脆弱性评价向新的、更加关注人-地系统、社会-生态

¹ 收稿日期: 2016-06-22; 修回日期: 2016-09-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目“南方红壤水土流失治理技术与示范”课题3“水土流失治理效果情景分析与评价”(2013BAC08B03-4) [“The analysis and evaluation of Loss Control effect scenario”(2013BAC08B03-4), the sub project 3 of China National Science and Technology Support Program “The technology research and demonstration of Southern Red Soil Loss Control”]

作者简介: 陈金月(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为GIS空间分析与设计. E-mail: 173381351@qq.com

*通讯作者 E-mail: 345301068@qq.com

系统等耦合系统脆弱性的方向转变^[8]，但总体上对人为扰动因素的关注不够。

岷江上游作为四川人民的母亲河、长江流域水资源的重要源头之一，不仅是成都平原的生态围栏，更是西南地区的一个绿色水库^[9]。岷江上游位于成都平原向青藏高原的过渡地带，是一个典型的山区高地生态系统，是中国山地灾害易发区和水土保持重点区，具有显著地生态环境脆弱性和灵敏度。近年来随着人口、资源和环境问题的日益突出，岷江上游的生态环境受到了越来越多的关注，主要涵盖地质灾害^[10]、水土流失^[11]、土地利用/覆被^[12]、环境污染和景观破坏^[13]等领域。但对岷江上游的研究还缺乏整个区域的生态环境脆弱性研究，特别是缺少人为因素影响下的生态环境脆弱性研究。本文基于 GIS 和 RS 技术，选择岷江上游作为研究对象，从滑坡地质灾害、水力侵蚀、景观破坏与污染等 3 个方面进行生态环境脆弱性评价，探讨研究区生态环境空间格局及其主要影响因素，旨在丰富岷江流域乃至长江流域的生态环境脆弱性研究，为区域生态环境的综合整治和可持续发展提供依据。

1 研究区域概况

本文所指岷江上游区域为都江堰以上岷江水系(含都江堰)，位于 30° 45′ N~33° 10′ N，102° 35′ E~103° 57′ E，行政区划上主要包括松潘、黑水、茂县、理县、汶川和都江堰等 6 个县(市)，干流全长 341 km，面积 $2.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，如图 1 所示。

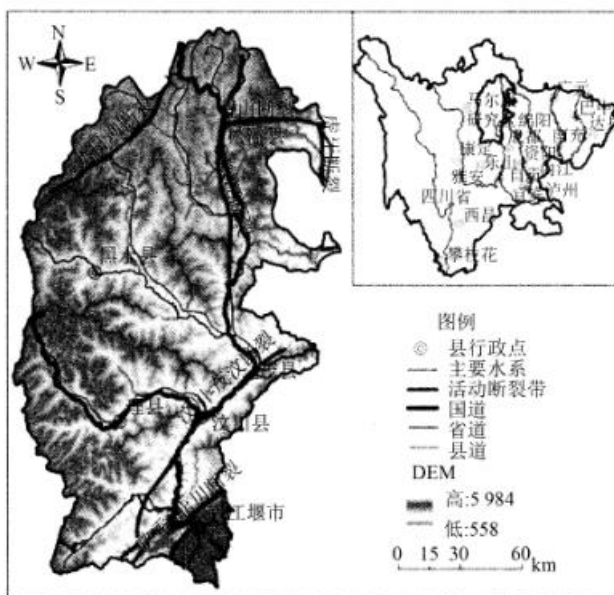


图 1 岷江上游概况图

Fig.1 Location Map of the Upper Reaches of Minjiang River

岷江上游地处川西高原东北边缘与龙门山过渡地带，西北高东南低，由西北向东南倾斜；海拔变化在 558~5984 m 之间，地形起伏大；区内地貌类型复杂，以山地为主，河谷深切，平坝面积积极小；地层从上至下以寒武—泥盆系砂岩、千枚岩和前震系花岗岩、黄岗闪长岩侵入岩体及泥盆至侏罗系砂页岩和灰岩等为主；区内有几个构造运动强烈的褶皱带，地质构造复杂，有频繁的历史地震活动^[14]。岷江上游土壤类型多样，发育有大面积石灰性褐土、黑毡土、燥褐土、暗红棕壤、淋溶褐土、硅质黄壤等，以石灰性褐土、黑毡土为主。岷江上游流域，2500 m 以上地区，年均气温 5℃~9℃，年均降雨量 700~800 mm；1500~2500 m 地带，年平均气温 11℃~13℃，年均降雨量 400~800 mm；1500 m 以下地区，年均温在 15℃ 以上，年降雨量介于 1000~1600 mm 之间。

由于研究区内地质构造复杂、人地矛盾突出，其生态系统异常脆弱和灵敏，主要表现为崩塌滑坡、水土流失、景观破坏与污染等。

2 研究方法

岷江上游生态环境脆弱性评价可以从滑坡脆弱性(ULVI)，水力侵蚀脆弱性(UWVI)、景观破坏与污染脆弱性(UPVI)等3个方面入手^[15]，建立与之对应的指标，采用证据权重法(WOE)计算滑坡敏感性指数，使用层次分析法(AHP)计算水力侵蚀、景观破坏与污染指数。

2.1 评价指标选取

评价指标的选取是评价工作的核心工作之一，结合岷江上游生态环境特征及存在的问题，本着科学性、可度量性、可获得性和可操作性原则，本文各生态环境主题脆弱性的评价指标选取如下：

(1)ULVI：滑坡灾害发生的三大要素是势能、水源和物源^[16]。坡度是评估剪切力运动的一个主要因素，但仅用坡度不能反映势能的影响，需要结合坡向来反映土壤水分和植被差异或者地震活动，进一步确定其对滑坡产生的影响。岩性和降水控制着运动的类型，是滑坡发生中物源和水源的重要组成部分，在相同的地貌条件下，降雨量越大、岩土质地越疏松，越容易发生滑坡。岷江上游流域，地形起伏大、河谷深切，为引力运动的发生提供了足够的势能；岩土类型多样，砂岩、页岩等软岩广泛分布，降雨集中且丰富，多集中于夏季，给滑坡发生提供了丰富的水源和物源条件，是滑坡发生的潜在区域。因此，本文选择坡度、坡向、岩土性质和年降雨量等作为滑坡灾害的评价因子。

(2)UWVI：降雨量是水力侵蚀的诱发动力，坡度、植物覆被类型和土壤类型是水力侵蚀的重要控制因素。坡地上水力侵蚀类型、物质迁移方式和侵蚀强度随坡度和土壤质地的变化而有较大的差异，一般情况下，随着坡度的增加，重力作用不断增强，水力侵蚀效果也更为显著^[17]；与坡度对水力侵蚀作用不同，随着土壤质地的增强，坡地上水力侵蚀作用的效果受到抑制。岷江上游地貌类型复杂，以山地为主，平坝面积极小，水力侵蚀情况与流域的坡度、降雨量、植物覆被类型以及土壤类型密切相关。因此，本文选择坡度、年降雨量、植物覆被类型和土壤类型作为水力侵蚀脆弱性的评价指标，植物覆被的分类参考文献^[18]中黄方等人的分类经验，其分级如表1所示。

表 1 水力侵蚀脆弱性指标分级
Tab.1 Evaluation Index Classification of Water Erosion Vulnerability

评价指标	评价等级				
	1	2	3	4	5
坡度(°)	[0, 10)	[10, 20)	[20, 30)	[30, 40)	≥40
年降雨量(mm)	[450, 600)	[600, 750)	[750, 900)	[900, 1 050)	[1 050, 1 250)
土壤类型	黄壤、棕壤、 针叶林土	紫色土、褐土	石灰(岩)土、粗骨土	潮土、沼泽土、草甸土、 泥炭土	黑毡土、水稻土、草毡土
植被覆被类型	河滩地、 沼泽地	有林地、高覆盖 草地	中覆盖度草地、 灌木林、疏林地	低覆盖度草地、旱地、 水浇地、水田	城镇建设用地、农村聚落、 裸岩、裸地

表 2 景观破坏与污染脆弱性评价指标分级
Tab.2 Evaluation Index Classification of Landscape Destruction and Pollution Vulnerability

评价指标	评价等级				
	1	2	3	4	5
坡度(°)	≥40	[30, 40)	[20, 30)	[10, 20)	[0, 10)
年降雨量(mm)	[450, 600)	[600, 750)	[750, 900)	[900, 1 050)	[1 050, 1 250)
人口密度(人/km ²)	[0, 9)	[9, 11)	[11, 15)	[15, 25)	>25
植被覆被类型	河滩地、 沼泽地	有林地、高覆盖 草地	中覆盖度草地、灌木林、 疏林地	低覆盖度草地、旱地、 水浇地、水田	城镇建设用地、农村聚 落、裸岩、裸地

(3)UPVI: 景观破坏和污染除受地形和植物覆被类型等地貌类型限制外, 受降雨量和人为影响较大。降雨量在一定范围的增加, 可以补给河流湖泊等水源, 加快环境污染的降解与稀释, 减少景观破坏与污染的时间; 草地、林地等自然景观基本不会对自然环境造成破坏和污染, 而城镇建设用地、农村聚落等则对自然环境破坏较大。岷江上游耕地、居住用地、建设用地相对较少且集中分布, 经济以第一产业为主, 景观环境受人为破坏较大, 人口密度可反映人为因素对土地等自然景观的开发程度; Jensen 等^[19]研究表明, 多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)残留浓度与人口密度呈正相关, 人口过度集中使化肥、生活污水、生活垃圾等排放激增, 消费性污染迅速增加, 加剧该区域生态环境脆弱性^[7], 可以选择人口密度反映人口对环境的污染。因此, 本文选择人口密度、植物覆被类型、坡度、年均降雨量作为景观破坏与污染的主要指标(详见表2)。表2中, 坡度对景观破坏与污染的影响机理和表1中的不同, 对于岷江上游景观破坏与污染而言, 随着坡度的升高环境破坏的机率及持续的时间均会减少, 因为地势平坦的地方人为破坏更大, 污染物更容易滞留, 造成景观破坏、污染加重^[15]。

2.2 数据来源与处理

主要数据源包括: (1)高程数据为 ASTGTM2 提供的 30×30 mDEM 数据; (2)岩性数据来源于 1:25 万四川省水文地质图; (3)土壤数据来源于 1:25 万四川省土壤分布图; (4)土地利用情况来源于岷江上游 1:10 万土地覆被数据; (4)气象数据来源于当地气象观测站点的统计数据; (5)人口密度来源于 2011 年四川省阿坝藏族自治州和都江堰(县级)市的人口普查数据, 以县为研究单元; (6)其他数据则根据实地考察和相关图件数字化所得。

评价单元的确定对评价结果具有重大影响, 评价单元过大易于平滑单元内的要素, 忽略局部重要因素, 尤其是地形要素, 而评价单元过小容易导致要素的锐化、增加处理难度, 结合研究区内地质构造复杂, 新构造运动活跃, 地形起伏大的特点, 选取的评价单元为 30×30 m, 共有 28 782 590 个栅格单元, 使用统一的 Krasovsky 椭球体和 Albers 投影。

2.3 评价方法

(1)证据权重法。证据权重法(Weight of evidence, WOE)属于数据驱动的二元方法, 避免了权值选择的主观性。WOE 最早用于矿产勘探^[20], 随后, 一些研究人员将该方法与 GIS 结合, 扩展了其适用范围, 如常顺利等^[21]充分发掘 GIS 工具强大的空间分析

功能，结合例证对滑坡的空间分布特征进行研究，完成了新源县的地质灾害区划工作。WOE 方法是在对数线性贝叶斯规则之上发展而来，利用历史滑坡(L)的分布情况来计算预测滑坡因子的权重；建模过程假设未来山体滑坡与历史滑坡发生条件相似，且诱发条件随着时间推移保持不变，其数学表达如下：

$$W_i^+ = \ln \frac{P(B|L)}{P(B|\bar{L})} \quad (1)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P(\bar{B}|L)}{P(\bar{B}|\bar{L})} \quad (2)$$

$$W_f = W_i^+ - W_i^- \quad (3)$$

式中：P 代表发生概率；L、B 分别表示各滑坡因子的滑坡发生单元数与因子存在区的单元数；、分别表示各滑坡因子中未发生滑坡单元数与因子存在区的单元数。似然比的对数(即公式(1)和(2))用于计算条件概率值的权重，权重差值对比度的大小则反映预测变量与山体滑坡之间的整体空间关联。正的权重表示有利于滑坡的发生；负的权重恰好相反；原始数据缺失区权重值为 0，表示无法确定此处的滑坡发生概率。基于 WOE 模型的滑坡评价因子与滑坡之间的空间关系如表 3 所示。

表 3 基于WOE模型的滑坡评价因子与滑坡之间的空间关系
Tab.3 Spatial Relationship Between Each Landslide Conditioning Factor and Landslides Using WOE

变量	类	栅格数	面积(km ²)	域百分比(%)	滑坡数	滑坡百分比(%)	W_i^+	W_i^-	W_f
坡度	0~10	2 015 943	1 814.35	7.00	66	5.89	-0.172 7	0.011 9	-0.184 6
	10~20	4 761 730	4 285.56	16.54	127	11.34	-0.377 7	0.060 5	-0.438 2
	20~30	7 913 074	7 121.77	27.49	256	22.86	-0.184 7	0.062 0	-0.246 6
	30~40	8 214 224	7 392.80	28.54	323	28.84	0.010 5	-0.004 2	0.014 7
	>40	5 877 619	5 289.86	20.42	348	31.07	0.419 7	-0.143 7	0.563 4
坡向	平的	1 307	1.18	0.004	0	0	0	0	0
	北	3 193 607	2 874.25	11.10	119	10.63	-0.043 4	0.005 3	-0.048 7
	东北	3 525 273	3 172.75	12.25	142	12.68	0.034 5	-0.004 9	0.039 4
	东	4 070 551	3 663.50	14.14	156	13.93	-0.015 3	0.002 5	-0.017 8
	东南	3 962 140	3 565.93	13.77	152	13.57	-0.014 3	0.002 3	-0.016 5
	南	3 326 796	2 994.12	11.56	137	12.23	0.056 6	-0.007 6	0.064 3
	西南	3 435 243	3 091.72	11.94	149	13.30	0.108 5	-0.015 7	0.124 2
	西	3 629 820	3 266.84	12.61	120	10.71	-0.163 1	0.021 5	-0.184 5
	西北	3 637 853	3 274.07	12.64	145	12.95	0.024 0	-0.003 5	0.027 5
岩性	软岩	5 553 669	4 998.30	19.30	353	31.49	0.489 8	-0.163 9	0.653 6
	中等	9 426 849	8 484.16	32.75	281	25.07	-0.267 5	0.108 2	-0.375 7
	硬岩	13 800 712	12 420.64	47.95	487	43.44	-0.098 75	0.083 05	-0.181 8
降雨量	<600	2 458 738	2 212.86	8.54	235	20.89	0.894 1	-0.145 0	1.039 1
	600~750	8 164 790	7 348.31	28.37	341	30.31	0.066 2	-0.027 5	0.093 7
	750~900	16 220 456	14 598.41	56.36	384	34.13	-0.501 4	0.411 6	-0.913 1
	900~1150	1 048 185	943.37	3.64	113	10.04	1.014 5	-0.068 8	1.083 3
	>1150	890 313	801.28	3.09	46	4.09	0.279 0	-0.010 3	0.289 3

层次分析法。层次分析法(Analytic HierarchyProcess, AHP)是由运筹学家 Satty^[22]提出的一种对模糊问题进行定性与定量评价相结合的方法，本文使用的层次分析法是汪树玉等^[23]改进后的新比例标度值，它更能反映因子重要程度之间的差异，其表达式为：

$$K = k^{k/9} \quad (4)$$

式中: K 表示标度通式; k 的取值为 0, 1, 3, 6, 9, 数值之间的比值及其倒数表示两者之间的重要性程度, 同等重要、稍微重要、明显重要、非常重要和极度重要之间的比值分别为 1, 1.277, 2.080, 4.327, 9。基于 AHP 的脆弱性计算可以归纳为以下四个步骤:

①运用 AHP 模型构建水力侵蚀脆弱性和景观破坏脆弱性判断矩阵;②使用 Matlab 软件计算判断矩阵的最大特征根及其特征向量, 即影响因子的权重值, 如表 4、表 5; ③对评价因子进行去量纲标准化处理; ④在 ArcGIS10.1 中, 使用式(5)计算栅格各主题的脆弱性指数。

表 4 水力侵蚀脆弱性影响因子及其判断矩阵

Tab.4 Impact Factors of Water Erosion Vulnerability and its Judgment Matrix

A-B	坡度	降雨量	土壤类型	土地利用类型	权重
坡度	1.000	0.231	0.481	0.783	0.115 2
降雨量	4.327	1.000	2.080	3.388	0.498 3
土壤类型	2.080	0.481	1.000	1.630	0.239 5
植被类型	1.277	0.295	0.614	1.000	0.147 1

表 5 景观破坏与污染脆弱性影响因子及其判断矩阵

Tab.5 Impact Factors of Landscape Destruction and Pollution Vulnerability and its Judgment Matrix

A-B	坡度	降雨量	人口密度	土地利用类型	权重
坡度	1.000	1.277	0.295	0.614	0.147 1
降雨量	0.783	1.000	0.231	0.481	0.115 1
人口密度	3.388	4.327	1.000	2.080	0.498 2
植被类型	1.629	2.080	0.481	1.000	0.239 6

$$UVI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (5)$$

式中: UVI 表示主题脆弱性指数, 在本研究中主要指水力侵蚀脆弱性指数(UWVI)、景观破坏与污染脆弱性指数(UPVI); w_i 为评价

指标 i 的权重; f_i 为评价指标 i 的等级; n 为评价指标的分类数。UVI 是各评价因子综合作用于生态环境的结果, 它使各环境主题脆弱性以数值形式表示, 具体而明确, 数值由小到大表示环境脆弱程度由轻到重。

最后, 将以上三类环境主题的评价结果进行综合叠加分析, 采用最大值保留法提取出各脆弱性主题中中等脆弱以上的区域^[16]。

3 结果与分析

3.1 研究区各环境主题脆弱性评价分析

研究区滑坡脆弱性评价(图 2、表 6)表明: 岷江上游滑坡脆弱性基本上呈东南向西北递减趋势, 越靠近岷江水系主河道的滑坡脆弱性越严重; 大部分区域处于中度以下脆弱水平, 约占整个研究区的 80.43%。其中, 微度脆弱比率最大, 占 30.18%, 滑坡点密度为 1.5 处/100 km²; 潜在滑坡区域占 10.28%, 主要分布在松潘、黑水和都江堰的东南部。19.57%的研究区域处于中度脆弱以上程度, 主要分布在汶川、茂县和都江堰等受 5·12 汶川地震扰动强烈地区, 滑坡分布比率占 47%, 滑坡点密度超过 10 处/100 km², 较低的岩石强度, 结合显著的高山峡谷地形地貌和全年降雨多集中于夏季的特征, 导致该地区崩塌滑坡等地质灾害颇为严重, 与文献^[10, 24]的研究成果一致。

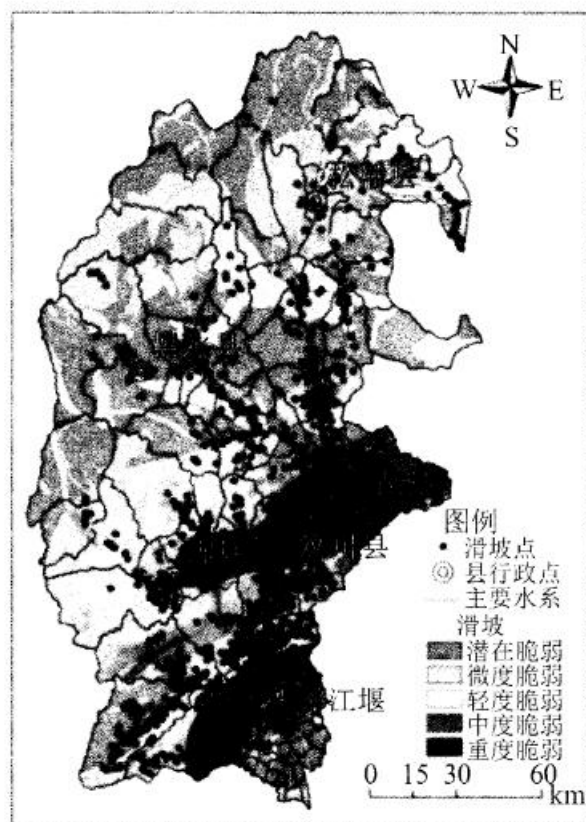


图 2 研究区滑坡脆弱性评价分布图

Fig.2 Distribution Map of Landslide Vulnerability Assessment in Study Area

表 6 滑坡脆弱性统计表

Tab.6 Statistical List of Study Areas' Landslide Susceptibility

脆弱等级	ULVI值	栅格数	栅格面积(km ²)	域百分比(%)	滑坡数	滑坡百分比	滑坡点密度(处/100 km ²)
潜在脆弱	[-3.48, -1.52)	8 492 418	7 643.18	29.59	115	10.28	1.50
微度脆弱	[-1.52, -0.49)	8 659 665	7 793.70	30.18	218	19.48	2.80
轻度脆弱	[-0.49, 0.44)	5 928 045	5 335.24	20.66	260	23.24	4.87
中度脆弱	[0.44, 1.35)	3 107 457	2 796.71	10.83	280	25.02	10.01
重度脆弱	[1.35, 2.93)	2 508 297	2 257.47	8.74	246	21.98	10.90

岷江上游水力侵蚀脆弱性采用自然断点法划分为 5 级, 评价结果如图 3、表 7 所示。自然断点法是一种根据数值统计分布规律分级和分类的统计方法, 它能使类与类之间的不同最大化^[25]。结果表明: 中轻度脆弱区域有大面积分布, 占研究区的 54.01%, 该区域是高海拔、低覆盖度植被的干旱河谷区域, 过度放牧、开垦导致草地退化, 是致使该区域水土流失的主要原因。重度区域主要分布在靠近四川四大暴雨区的都江堰地区, 该地区多为燥褐土、石灰性褐土, 土质结构疏松, 遇暴雨、大风等条件, 土体迅速崩解, 水土流失严重; 另外, 都江堰经济较为发达(2012 年 GDP 超过 2 0 8 . 1 8 亿元), 旅游业旺盛(2 0 1 2 年接待游客 1 731.4 万人次), 土壤受人为干扰大, 孔隙度减小, 质地变硬, 降雨入渗变差, 易产生径流等因素也造成水土流失加剧。

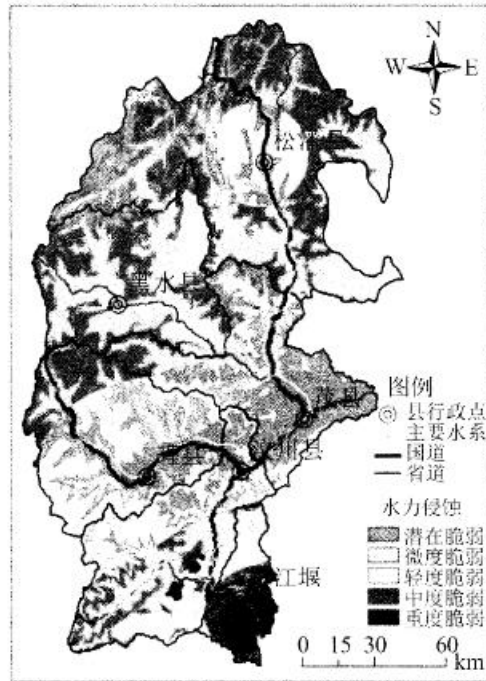


图3 研究区水力侵蚀脆弱性评价分布图

Fig.3 Distribution Map of Water Erosion Vulnerability Assessment in Study Area

表7 水力侵蚀脆弱性统计表

Tab.7 Statistical List of Study Areas' Water Erosion Vulnerability

脆弱等级	UWVI值	栅格数	面积(km ²)	域百分比(%)
潜在脆弱	[1.15, 2.19)	5 145 819	4 631.24	17.88
微度脆弱	[2.19, 2.78)	8 859 750	7 973.78	30.79
轻度脆弱	[2.78, 3.27)	6 683 122	6 014.81	23.22
中度脆弱	[3.27, 3.82)	7 519 283	6 767.35	26.13
重度脆弱	[3.82, 4.85)	571 244	514.12	1.98

岷江上游景观破坏与污染脆弱性也采用自然断点法分为5级,评价结果如图4、表8所示。结果表明:景观破坏与污染中、重度脆弱区域主要发生在都江堰-茂县流域,分别占研究区面积的20.77%、3.68%,该段人口密度大、地质脆弱,交通网密集,213国道、302省道等穿越而过,人地矛盾极为突出,生态景观受到的破坏和污染更为严重。潜在和微度脆弱区域主要分布在松潘和理县,分别占研究区面积的28.47%、24.23%,该区域人口密度较小(分别为8.77人/km²、10.75人/km²),海拔较高,国家级自然生态保护区也分布于此,在一定程度上限制了对生态景观的破坏与污染;另外受到地震及其次生灾害影响较小。

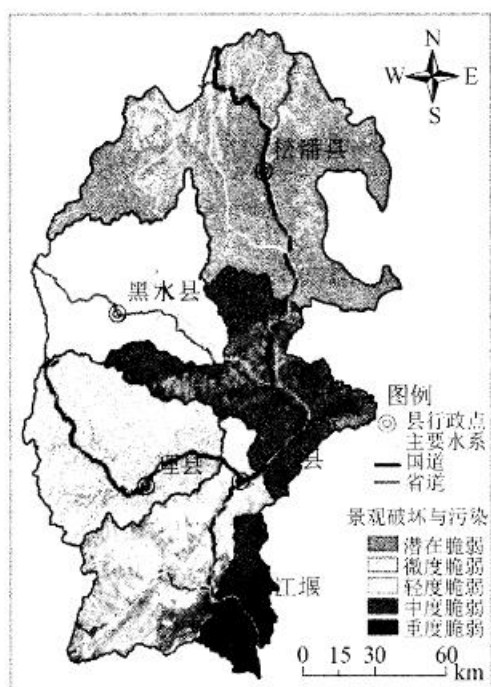


图 4 研究区景观破坏与污染脆弱性评价分布图

Fig.4 Distribution Map of Landscape Destruction and Pollution Vulnerability Assessment in Study Area

表 8 景观破坏与污染脆弱性统计表

Tab.8 Statistical List of Study Areas' Landscape Destruction and Pollution Vulnerability

脆弱等级	UPVI值	栅格数	面积(km ²)	域百分比(%)
潜在脆弱	[1.23, 2.07)	8 194 674	7 375.21	28.47
微度脆弱	[2.07, 2.71)	6 972 958	6 275.66	24.23
轻度脆弱	[2.71, 3.37)	6 574 868	5 917.38	22.85
中度脆弱	[3.37, 4.08)	5 977 117	5 379.41	20.77
重度脆弱	[4.08, 5)	1 059 572	953.61	3.68

3.2 岷江上游综合脆弱性评价分析

将滑坡、水力侵蚀、景观破坏与污染等 3 类环境主题脆弱性的评价结果进行空间叠加分析，即在某一栅格图层中，评价单元为中度或重度脆弱，就将其赋值为 1，否则为 0；图层的顺序依次为滑坡脆弱性、水力侵蚀脆弱性、景观破坏与污染脆弱性。研究区生

态环境脆弱性的综合评价结果，如图 5 所示。其中，001 表示区域面临的主要生态环境问题是景观破坏与污染，011 表示区域面临的最主要生态环境问题是水力侵蚀和景观破坏与污染，111 则表示区域面临的三类生态环境问题都很严重。综合评价结果（图 5、表 9）表明：54.70%的区域至少面临一种生态问题；面临两种及以上的区域占研究区的 15.43%；同时面临三种问题的占 1.35%，主要分布在都江堰-茂县段，该段与省会成都接壤，坡度小、海拔低，是人类活动密集区，人类的各种生产生活活动以及对林地的滥砍滥伐导致生态环境受到人为破坏严重，特别是 5·12 汶川地震以来，在暴雨的累积作用下，生态脆弱性更为显著^[12]，可以预见，未来一段时期该地区生态环境仍将处于脆弱状态，是需要重点监测和保护的区域。

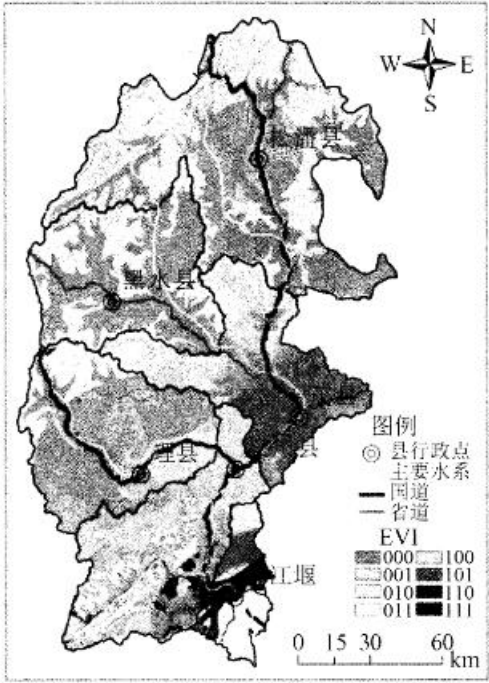


图 5 研究区生态环境脆弱性评价分布图

Fig.5 Distribution Map of Eco-environmental Vulnerability Assessment in Study Area

表 9 研究区不同等级脆弱性统计表

Tab.9 Statistical List of Study Areas' Vulnerability

等级	000	001	010	011	100	101	110	111
栅格数	12 998 417	2 541 682	6 270 400	1 269 603	2 458 014	2 648 205	123 012	386 519
面积(km ²)	11 698.58	2 287.51	5 643.36	1 142.64	2 212.21	2 383.38	110.71	347.87
域百分比(%)	45.30	8.86	21.85	4.42	8.57	9.23	0.43	1.35

4 结论

岷江上游是一个地形、气候和植被等多要素生态环境变化的过渡地带，也是长江流域的重要发源地，生态环境十分敏感。岷江

上游的滑坡、水力侵蚀和景观破坏与污染脆弱性均以轻度和潜在为主，中度和重度所占比例较低，各生态环境主题的脆弱性都不强烈，但将三类生态环境问题综合分析发现：岷江上游流域，大部分区域至少面临一种生态问题，面临两种及以上问题的区域占 15.43%。从空间分异特征来看，各生态环境主题中，脆弱性基本呈东南向西北递减趋势，中重度脆弱区域主要分布在都江堰-茂县段。这说明岷江上游的生态环境脆弱风险众多，种类复杂，局部地区呈现显著脆弱特性，生态环境保护与治理亟待解决。

岷江上游生态环境问题不仅是岷江上游流域生态可持续发展的重大隐患，而且对整个岷江流域乃至长江流域城市的智慧发展都存在极大威胁，未来生态脆弱区经济的发展要更加强调生态需求，重视生态建设，通过自然恢复、生态保护以及环境修复等合理的人为活动提高生态环境的抗干扰能力和自我修复能力，使生态环境质量保持平稳好转。

本文将 WOE 和 AHP 模型与 GIS 结合，建立了滑坡、水力侵蚀和景观破坏与污染脆弱性指标体系，并进行了各环境主题的评价与分析，探讨了岷江上游生态环境脆弱性的空间分异特征，为生态脆弱区生态环境脆弱性的评价和区划提供了参考；为生态环境脆弱性的动态变化及其驱动力机制研究奠定了基础。需要指出的是，岷江上游生态环境脆弱性涉及的影响因子众多，响应机制复杂多变，现有的评价方法和结果仍具有一定的局限性，主要表现在以下方面：(1)评价指标选取及其权重的确定具有一定片面性，影响脆弱性评价结果的科学性，评价指标体系有待进一步完善；(2)由于数据所限，不同生态环境脆弱性主题的指标有部分重叠，在一定程度上影响了评价精度；(3)本研究只进行了岷江上游生态环境脆弱性的现状评价，使用最新时相的影像和数据，宏观与微观相结合，准确地揭示岷江上游生态环境的动态变化机理及其影响，特别是 5·12 汶川地震前后的差异，为灾后重建、生态环境保护等提供参考和治理模式需要进一步研究。

参考文献：

- [1] KATES R W, CLARK W C, CORELL T, et al. Environment and development: sustainability science[J]. Science, 2001, 292(5517): 641 - 642.
- [2] YING X, ZENG G M, CHEN G Q, et al. Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—a case study of Hunan Province, China[J]. Ecological Modelling, 2007, 209(2/4): 97 - 109.
- [3] 李德旺, 李红清, 雷晓琴, 等. 基于 GIS 技术及层次分析法的长江上游生态敏感性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 633 - 639.
- 【LI D W, LI H Q, LEI X Q, et al. Ecological sensitivity in the upper Changjiang River with GIS technology and hierarchy analysis method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(5): 633 - 639.】
- [4] ENEA M, SALEMI G. Fuzzy approach to the environmental impact evaluation[J]. Ecological Modelling, 2001, 136(2/3): 131 - 147.
- [5] 徐庆勇, 黄 玫, 李 雷, 等. 晋北地区生态环境脆弱性的 GIS 综合评价[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 705 - 711.
- 【XU Q Y, HUANG M, LI L, et al. Integrated assessment of ecoenvironmental vulnerability in north Shanxi Province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(5): 705 - 711.】

[6] 吴 晓, 吴宜进. 基于灰色关联模型的山地城市生态安全动态评价——以重庆市巫山县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3):385 - 391.

【WU X, WU Y J. Evaluation on the eco-safety of mountainous city based on gray correlation model——a case study of the Wushan county in the city of Chongqing[J]. Resources and Environment in theYangtze Basin, 2014, 23(3): 385 - 391.】

[7] 徐庆勇, 黄 玫, 刘洪升, 等. 基于 RS 和 GIS 的珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2987 - 2995.

【XU Q Y, HUANG M, LIU H S, et al. Integrated assessment of ecoenvironmental vulnerability in Pearl River Delta based on RS and GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11):2987 - 2995.】

[8] 王 岩, 方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 547 - 555.

【WANG Y, FANG C L. Comprehensive evaluation and dynamic evolution analysis of Daqing' S Urban vulnerability[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(5): 547 - 555.】

[9] 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.

[10] 南 希, 严 冬, 李爱农, 等. 岷江上游流域山地灾害危险性分区[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 113 - 120.

【NAN X, YAN D, LI A N, et al. Mountain hazards risk zoning in the upper reaches of Minjiang River[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 113 - 120.】

[11] 秦纪洪, 赵利坤, 孙 辉, 等. 岷江上游干旱河谷旱地土壤斥水性特征初步研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 259 - 262, 272.

【QIN J H, ZHAO L K, SUN H, et al. Preliminary study on the characteristics of soil repellency in the dry valley of Minjiang River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 259 - 262, 272.】

[12] 田 雨, 方自力, 谢 强, 等. 岷江上游植被在汶川地震中的损毁及灾后恢复状况[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 735 - 740.

【TIAN Y, FANG Z L, XIE Q, et al. Damages situations by Wenchuan Earthquake and recovery status of vegetations in upper Minjiang River basin[J]. Resources and Environment in the YangtzeBasin, 2014, 23(5): 735 - 740.】

[13] 杨兆平, 常 禹, 胡远满, 等. 岷江上游干旱河谷景观变化及驱动力分析[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 869 - 874.

【YANG Z P, CHANG Y, HU Y M, et al. Landscape change and its driving forces of dry valley in upper reaches of Minjiang River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(6): 869 - 874.】

[14] 常晓军, 丁俊, 魏伦武, 等. 岷江上游地质灾害发育分布规律初探[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(1): 103 - 108.

【CHANG X J, DING J, WEI L W, et al. Distribution of the geological hazards in the upper reaches of the Minjiang River, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(1): 103 - 108.】

[15] 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.

【ZHOU Y J, QIU J X, WANG J, et al. Assessment of ecoenvironmental vulnerability of water-level fluctuation belt in Three-Gorges Reservoir area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6726 - 6733.】

[16] 胡凯衡, 崔鹏, 韩用顺, 等. 基于聚类和最大似然法的汶川灾区泥石流滑坡易发性评价[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 12 - 18.

【HU K H, CUI P, HAN Y S, et al. Susceptibility mapping of landslides and debris flows in 2008 Wenchuan earthquake by using cluster analysis and maximum likelihood classification methods[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 12 - 18.】

[17] 徐茂其, 张大泉. 川中丘陵土壤水力侵蚀及防治对策[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 35 - 42.

【XU M Q, ZHANG D Q. Soil water erosion and its preventive strategies in hilly of the central Sichuan basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(4): 35 - 42.】

[18] 黄方, 刘湘南, 张养贞. GIS支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 95 - 100.

【HUANG F, LIU X N, ZHANG Y Z. GIS-Based eco-environmental vulnerability evaluation in west Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1): 95 - 100.】

[19] JENSEN H, REIMANN C, FINNE T E, et al. PAH-concentrations and compositions in the top 2 cm of forest soils along a 120 km long transect through agricultural areas, forests and the city of Oslo, Norway[J]. Environmental Pollution, 2007, 145(3): 829 - 838.

[20] BONHAM-CARTER G F, AGTERBERG F P, WRIGHT D F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia[J]. American Society for Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 1988, 54(11): 1585 - 1592.

[21] 常顺利, 张钟月, 孙志群, 等. 基于GIS的新源县滑坡灾害分析与区划[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 216 - 221.

【CHANG S L, ZHANG Z Y, SUN Z Q, et al. GIS-based analysis and zoning of landslide hazard in Kunes County[J]. Journal

of Natural Disasters, 2011, 20(5): 216 - 221.】

[22] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York:McGraw-Hill Inc., 1980.

[23] 汪树玉, 刘国华. 系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.

[24] 李艳豪, 蒋汉朝, 徐红艳, 等. 四川岷江上游滑坡触发因素分析[J]. 地震地质, 2015, 37(4): 1147 - 1161.

【LI Y H, JIANG H C, XU H Y, et al. Analyses on the triggering facrors of large quantities of landslides in the upper reaches of the Minjiang River, Sichuan province[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(4): 1147 - 1161.】

[25] WANG S Y, LIU J S, YANG C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China[J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 171 - 182.