

doi: 10.6046/zrzyyg.2021012

引用格式: 张景华,欧阳渊,刘洪,等. 基于主控要素的生态地质脆弱性评价——以四川省西昌市为例[J]. 自然资源遥感, 2021,33(4):181–191. (Zhang J H,Ouyang Y,Liu H,et al. Eco–geological vulnerability assessment based on major controlling factors: A case study of Xichang City, Sichuan Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(4):181–191.)

基于主控要素的生态地质脆弱性评价 ——以四川省西昌市为例

张景华¹, 欧阳渊¹, 刘洪^{1,2}, 黄瀚霄¹, 张腾蛟¹, 李富¹, 李樋²
(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,成都 610081; 2. 成都理工大学地球科学学院,成都 610059)

摘要: 为了给西昌市生态保护修复提供依据,对其生态地质脆弱性做出评价。在生态地质调查、综合研究的基础上,选取了 10 项影响西昌市生态地质脆弱性的主要因素,构建了评价指标体系;在地理信息系统(geographic information system,GIS)的支持下,采用改进后的层次分析法,对西昌市开展了生态地质脆弱性评价。结果表明:西昌市生态地质较为脆弱,虽然没有极脆弱区,但中度脆弱—高度脆弱达 50.14%。不脆弱与轻度脆弱区主要集中于安宁河谷和邛海盆地,中度脆弱—高度脆弱区域主要集中在西昌市西部的牦牛山一带和东南部的螺髻山一带;全市可划分为 5 个生态地质脆弱性分区,包括 2 个生态地质轻度脆弱区——安宁河谷生态地质轻度脆弱区(Ⅰ)和大箐生态地质轻度脆弱区(Ⅱ),1 个生态地质中度脆弱区——巴汝—马鞍山生态地质中度脆弱区(Ⅲ),2 个生态地质高度脆弱区——螺髻山西坡生态地质高度脆弱区(Ⅳ)和牦牛山生态地质高度脆弱区(Ⅴ)。对于不同的生态地质脆弱性分区,应实行不同的生态保护修复方案与开发建设措施。

关键词: 生态地质; 脆弱性; 评价与分区; 西昌市

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097–034X(2021)04–0181–11

0 引言

生态学(ecology)是研究有机体与其周围环境相互关系的科学,环境包括非生物和生物环境,前者包括地质环境在内的各种自然环境,后者则包括同种或异种其他有机体^[1]。地质学(geology)的研究对象为地球的固体硬壳——地壳或岩石圈,主要研究地球的物质组成、内部构造、外部特征、各层圈之间的相互作用和演变历史,是研究地球及其演变的一门自然科学。生态学与地质学结合,诞生了生态地质学(eco–geology)。生态地质学是地质学的一个分支,同时也是生态学和地质学之间的新兴边缘科学^[2–6]。生态地质的研究对象涉及岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈及生物圈^[7–9],是用地质学、生态学理论和方法研究生物与其生存地质环境之间关系的学科^[10]。

国外生态地质调查工作最早始于 20 世纪 80 年代末的前苏联^[11],我国则始于 1994 年^[12–13]。进入 21 世纪后,国内外一些学者对生态地质开展了不同程度的研究^[8,14–19],这些研究工作多是从地球化学

角度对生态地质进行研究。2019 年,自然资源部中国地质调查局启动“生态地质调查工程”,以服务长江上游重要生态功能区生态保护修复为宗旨,着眼于大凉山区生态文明建设对地质工作的重大需求,设立了“大凉山区生态地质调查”项目,以全新的调查思路,将“山水林田湖草”视作一个生态共同体,把地质作用过程和生态空间分布、变化规律作为整体进行系统性调查研究;在此基础上,开展生态地质脆弱性评价与分区,为生态系统管理、保护与修复提供地球系统科学解决方案。本文即为“大凉山区生态地质调查”项目所取得的部分成果。

“脆弱性”一词最早源自拉丁文 vulnerare,其原意是“可能受伤”。在早期,脆弱性问题(vulnerability)主要用于流行病学领域,用来指出哪些地区容易发生流行病。从 20 世纪 70 年代开始,专家逐渐将脆弱性引入生态研究领域,并逐渐延伸到其他领域^[20–21],脆弱性评价已成为生态(地质)环境评价的重要内容之一^[22–29]。综合前人对脆弱性概念的理解和笔者在西昌市开展的生态地质调查实践,本文认为生态地质脆弱性是指地球表层系统对内外扰

收稿日期: 2021–01–13; 修订日期: 2021–04–10
基金项目: 中国地质调查局项目“大凉山区生态地质调查”(编号: DD20190542)资助。
第一作者: 张景华(1978–),男,学士,高级工程师,从事遥感与生态地质调查与研究工作。Email: zjinghua@mail.cgs.gov.cn。
通信作者: 欧阳渊(1982–),男,博士,高级工程师,从事遥感与生态地质调查与研究工作。Email: freebad@126.com。

动的敏感性以及因缺乏应对能力而使系统的结构和功能发生改变的一种属性;即在一定条件下,生态地质环境对内外扰动的敏感性以及因缺乏应对能力而使生态地质环境的结构和功能发生改变的一种属性。本文以西昌市为研究区,在生态地质调查和综合研究的基础上,基于构造运动及其演化是控制西昌市生态环境演变的重要驱动力的观点来筛选评价指标;在地理信息系统支持下,采用改进后的层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)确定评价指标的权重,开展生态地质脆弱性评价与分区,提出生态保护修复建议,为西昌市生态保护修复提供依据。

1 研究区概况

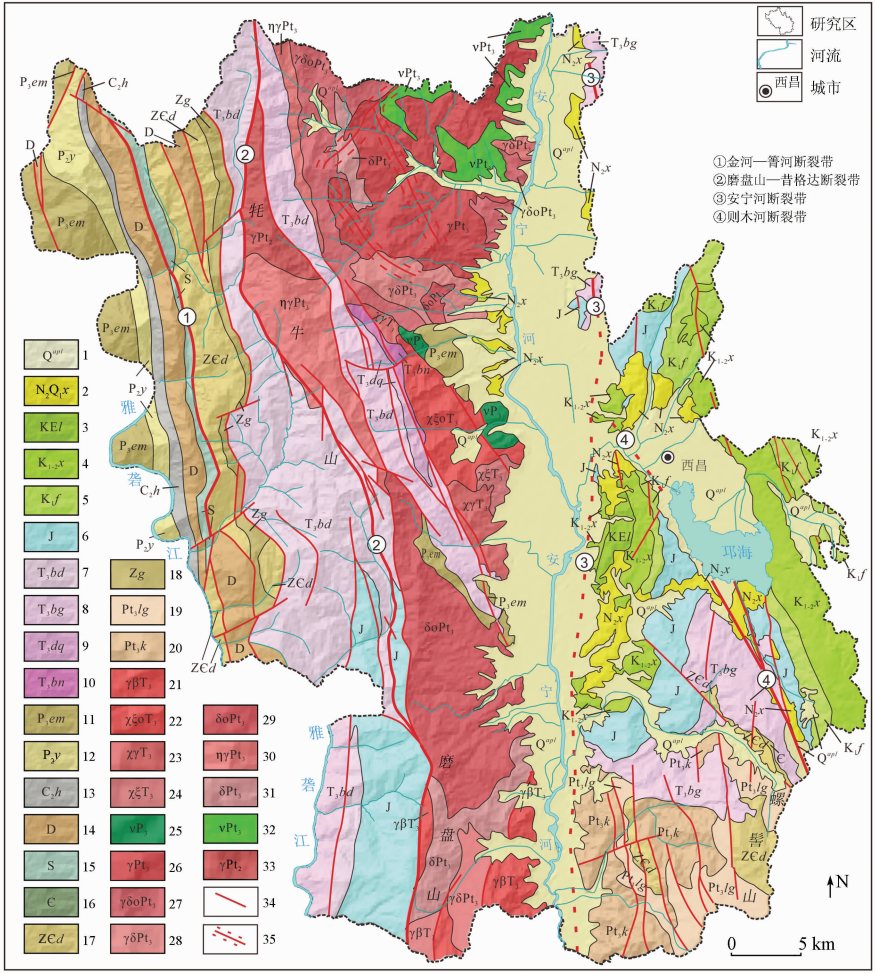
1.1 自然地理

西昌市位于四川省西南部,是凉山彝族自治州的州府所在地,也是攀西地区的政治、经济、文

化及交通中心和打造攀西城市群中的核心力量,其地理位置在 $E101^{\circ}46' \sim 102^{\circ}25'$, $N27^{\circ}32' \sim 28^{\circ}10'$ 之间,南北长约 70 km,东西宽约 43 km,幅员面积 2 655 km^2 ;地势北高南低,以山地为主,山脉走向和构造线一致,多呈 SN 向,山地分布在安宁河东西两侧,西部的牦牛山是市境内山地的主体,占全市总面积的一半,自北向南纵贯全境。西昌属于亚热带高原季风气候区,素有小“春城”之称,四周群山环绕,立体气候特点突出。

1.2 地层岩性与地质构造

西昌市前寒武系至第四系均有出露,以中生界和新生界为主,地层呈近 SN 向展布,与主构造线一致。侵入岩出露在磨盘山区,主要岩石类型有石英斑岩、黑云母花岗岩、闪长岩和正长岩等;喷出岩主要分布在牦牛山及磨盘山区,以晚二叠世峨眉山玄武岩出露最广(图 1)。



1. 第四系: 冲洪积物; 2. 新近系-第四系普格达组: 粉砂岩; 3. 白垩-古近系雷打树组: 粉砂岩、泥岩为主; 4. 中下白垩统小坝组: 粉砂质泥岩、泥岩为主; 5. 下白垩统飞天山组: 粉砂岩、泥岩为主; 6. 侏罗系官沟组、牛滚组、新村组、益门组: 泥岩、粉砂岩为主; 7. 上三叠统宝顶组: 长石石英砂岩为主; 8. 上三叠统白果湾组: 长石石英砂岩为主; 9. 上三叠统大界地组: 长石石英砂岩为主; 10. 上三叠统丙南组: 板岩为主; 11. 上二叠统峨眉山玄武岩组: 玄武岩为主; 12. 中二叠统阳新组: 灰岩为主; 13. 上石炭统黄龙组: 灰岩、泥质灰岩、白云岩为主; 14. 泥盆系干沟组、烂泥箐组、曲靖组: 灰岩、白云岩为主; 15. 志留系稗子田组: 灰岩、白云岩、钙质页岩为主; 16. 寒武系: 筇竹寺组、沧浪铺组, 粉砂岩、泥岩为主; 17. 震旦-寒武系灯影组: 白云岩为主; 18. 震旦系观音崖组: 灰岩、泥岩为主; 19. 上元古界列古六组: 酸性火山碎屑岩; 20. 上元古界开建桥组: 酸性火山碎屑岩; 21. 晚三叠世黑云母花岗岩; 22. 晚三叠世钠闪闪正长岩; 23. 晚三叠世钠闪闪正长岩; 24. 晚三叠世钠闪闪正长岩; 25. 晚二叠世辉长岩; 26. 新元古代花岗岩; 27. 新元古代英云闪长岩; 28. 新元古代花岗岩闪长岩; 29. 新元古代石英闪长岩; 30. 新元古代二长花岗岩; 31. 新元古代闪长岩; 32. 新元古代辉长岩; 33. 中元古代花岗岩; 34. 断裂带; 35. 韧性剪切带

图 1 西昌市地质简图
Fig. 1 Geological map of Xichang City

西昌市位于上扬子陆块西缘和羌塘陆块东缘,为一个构造复杂的造山带系统,形成多条大型左旋走滑构造带,形成了“纵向成条,条中有块”的断块构造特征。区内褶皱和断裂十分发育,褶皱主要有螺髻山背斜、磨盘山向斜等;主要断裂带有金河—菁河断裂带(F_1)、磨盘山—昔格达断裂带(F_2)、安宁河断裂带(F_3)和则木河断裂带(F_4)等。金河—菁河断裂带位于磨盘山—马鞍山以西,呈南北向纵贯市域西部,沿线分布有较多晚二叠世小型超基性、基性侵入体,表明其在晚二叠世是一个深达上地幔的岩石圈断裂。磨盘山—昔格达断裂带北起牦牛山,向南经磨盘山纵贯全境,形成于新元古代,经多期构造变形,对两侧中生代地层有明显的控制作用,是一条第四纪活动断裂。安宁河断裂带沿安宁河谷发育,呈近南北展布,断面以西倾为主,总体表现出挤压、走滑特征,造成两侧断块差异升降,形成安宁河断陷盆地和断块山脉,具有强烈的地震活动性。则木河断裂带西北由西昌开始,向东南延伸出西昌,由多条次级剪切断层呈左阶斜列组合而成,也是一条活动断裂,发生过多次强震和大地震。

1.3 森林植被

西昌市属于川西南河谷山原植被地区的金沙江下游安宁河植被小区,森林覆盖率为46.0%,森林针叶化现象较普遍,作为地带性植被的阔叶林较少。由于地形地貌及垂直气候的差异,植被群落分布具有垂直性差异^[30],在干热河谷发育稀疏草丛,河谷盆地和阶地上栽培着各种热带、亚热带经济植物,中山山地分布着大面积的云南松和松栎混交林,局部沟谷地区保存有亚热带偏干性常绿阔叶林,亚高山残存有冷杉林及冷杉、云杉混交林分布,高山分布蒿草、杂草类高山草甸。

1.4 生态环境

西昌市四周群山环绕,形成相对独立的气候、土壤和植被,使得生态环境表现出较强的相对独立性。近年来,西昌市社会经济高速发展,随着人口压力和生产活动的不断增强,也对生态环境产生了较大的压力和胁迫。除安宁河谷外,西昌市大部分土地承载力较低,抗干扰能力弱,受干扰后生态系统自然恢复的速度慢、难度大,虽然生态环境整体较好,但还存在一些诸如水土流失较严重、地质灾害较频发、森林生态系统功能降低等生态地质环境问题。

2 评价方法

2.1 技术思路

目前对生态地质脆弱性进行评价,主要有2种

技术思路,一种是针对生态地质问题进行评价,另一种是基于生态地质条件(要素)进行评价^[31-35]。作为地质学的一个分支,生态地质及其脆弱性的概念目前尚无统一的定义,但本文认为二者的内涵比较清楚,生态地质的内涵是研究各种生态问题或生态过程的地质学机理、地质作用过程及背景条件,而生态地质脆弱性的内涵则为在一定的生态地质条件下,生态地质环境对内外扰动的敏感性以及因缺乏应对能力从而使自身的结构和功能容易发生改变的一种属性。无论生态地质还是生态地质脆弱性,其内涵都强调生态地质条件。因此,对西昌市生态地质脆弱性采用基于生态地质条件(要素)进行评价更能反映其内涵,从服务生态保护修复目的出发,将生态地质脆弱性分为不脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、高度脆弱与极脆弱5个等级。

2.2 指标筛选

通常把自然界分为生物与非生物两大类,虽然这两大类几乎总是可区别、可分开的,但又不能彼此孤立地存在。生物依赖于环境,它们必须与环境连续地交换物质和能量,需适应于环境才能生存;另一方面,生物又影响环境,不断改造环境条件,生物与环境在相互作用中形成统一的整体^[1],亦即生物与环境密不可分,一起构成了生态环境。如果从地球系统科学的角度出发,将岩石圈、生物圈、大气圈、水圈等圈层作为一个系统看待,影响或控制这些圈层之间能量与物质交换的动力为地球的内、外营力,地球生态地质环境演变结果都是地球内外营力综合作用的结果。因此,从地球系统科学和多圈层交互作用来看,生态地质脆弱性是由气象、水文、地形地貌、地质环境、土壤、地质灾害和生态环境本身等各个条件所控制,而上述影响生态地质脆弱性各项条件,又可进一步划分为各种单要素。

西昌市属亚热带西南季风气候,多年平均气温16.9℃,多年平均日照2 445.4 h,无霜期273 d,多年平均降雨1 013.5 mm,水资源丰富。从气象、水文条件来说,在整个西昌市范围内,与植物生长关系最为密切的水、热、光等条件都非常有优越,完全可以满足植被生长所需;除了垂直分带性外,在横向上,气象、水文条件并不会造成植被生长的巨大差异,亦即气象、水文条件并不是控制西昌市生态地质的主控因素,其对生态地质脆弱性及分区的影响不大。

既然气象、水文条件不是西昌市生态地质的主控因素,那么地形地貌、土壤类型、土壤侵蚀、地质灾害等都是受地质条件控制,与地质环境相关。根据笔者在西昌市开展的生态地质调查工作取得的认

识^[36], 本文认为地质构造及其演化是控制西昌市生态地质环境演变的重要驱动力, 而地质建造及其环境则是形成现今生态地质格局的物质基础。构造运动及其演化控制着西昌市地层岩性的出露和宏观地貌, 并与风化、剥蚀、搬运作用等外营力一起塑造了西昌市现今地貌形态, 进而影响着地面坡度^[37]、地表的岩石类型、成土母质类型、土壤类型和植被类型等生态地质要素, 间接控制着基岩→成土母质→土壤→植被这一生态地质谱系。换言之, 由地球内营力形成的构造运动及其演化与地形

地貌、气候和人类活动等一起塑造了西昌市现今生态地质格局, 西昌市现今生态地质环境主要受各种地质环境条件控制。

通过上述分析, 筛选了地形地貌、地质环境、土壤、生态 4 项生态地质条件, 然后进一步细化为坡度、沟壑密度、地层岩性、地质建造、地质灾害易发性、土壤类型、成土母质、土壤侵蚀强度、生态系统类型、人口密度共 10 项生态地质要素, 参考相关国家标准、其他学者的研究成果^[38-39]并结合西昌市的实际情况, 制定了分级标准, 构建评价指标(表 1)。

表 1 西昌市生态地质脆弱性评价指标
Tab. 1 Evaluation indicators of eco-geological vulnerability in Xichang City

生态地质条件	生态地质要素	不脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	高度脆弱	极脆弱
地形地貌	坡度/(°)	<8	[8,15)	[15,25)	[25,35]	>35
	沟壑密度/(km·km ⁻²)	[0,1.09)	[1.09,1.69)	[1.69,2.09)	[2.09,2.58)	[2.58,4.05]
地质环境	地层岩性	Q,N ₂ Q _{1x}	KEl,K _{1-2x} ,K _{lf} ,J	T ₃ bd,T ₃ bg,T ₃ dq,T ₃ bn	Є ₂ ,Pt ₃ lg,Zg	P ₂ y,C ₂ h,D,S,ZGd,玄武岩,花岗岩,闪长岩
	地质建造	第四纪陆相松散堆积建造	新近纪陆相碎屑岩建造、侏罗纪-白垩纪陆相碎屑岩建造、三叠纪陆相碎屑岩建造	二叠纪陆相基性岩建造、青白口纪基性岩建造	三叠纪陆相中酸性岩建造、前寒武纪中酸性火山岩建造、前寒武纪中酸性岩建造	震旦纪-二叠纪海相-海陆过度陆相碳酸盐岩建造
	地质灾害易发性	不易发区	低易发区	中易发区	高易发区	极易发区
土壤	土壤类型	水稻土	红壤	棕壤、暗棕壤、黄棕壤	紫色土	石灰土、黑毡土
	成土母质	第四纪冲洪积风化物、新近纪泥岩类风化物	侏罗纪-白垩泥岩类风化物、三叠纪砂岩类风化物	三叠纪中性岩类风化物、二叠纪基性岩类风化物、三叠纪基性岩类风化物、震旦纪-二叠纪碳酸盐岩类风化物、寒武纪泥岩类风化物、前寒武纪基性岩类风化物	三叠纪泥质变质类风化物	三叠纪酸性岩类风化物、前寒武纪酸性岩类风化物
	土壤侵蚀强度	微度	轻度	中度	强烈	极强烈、剧烈
生态	生态系统类型	森林生态系统	湿地生态系统	草地生态系统	农田生态系统	城镇生态系统
	人口密度/(人·km ⁻²)	<70.98	70.98~190.66	190.66~345.51	345.51~547.32	>547.32
分级赋值(C)		1	3	5	7	9
分级标准(SS)		[1.0,2.0)	[2.0,4.0)	[4.0,6.0)	[6.0,8.0]	>8.0

2.3 数据来源与单因子脆弱性评价

本研究所使用的基础数据主要来自于收集和利
用遥感手段获取,包括西昌市行政区划图、数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据、地质图、地质灾害易发分区图、土壤类型图、土壤侵蚀强度数

据、土地利用类型数据和人口密度数据等,具体如表 2 所示。并对这些数据进行加工处理,提取表 1 种所列的 10 项生态地质要素数据并分级赋值,统一转换为 Gauss Kruger 投影、30 m 空间分辨率的栅格图像,得到西昌市生态地质脆弱性单因子评价图(图 2)。

表 2 数据来源与描述

Tab. 2 Source and description of the data	
数据名称	数据来源
西昌市行政区划图	凉山彝族自治州自然资源与规划局
西昌市 DEM 数据	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn) GDEM V2 30 m 分辨率
西昌市地质图	中国地质调查局西昌市幅 (G48C001001) 1:25 万地质图 (公开版)
西昌市地质灾害易发分区图	四川省地质调查院 (2013 年)

(续表)

数据名称	数据来源
西昌市土壤类型图	凉山彝族自治州土壤普查办公室 (1987 年)
西昌市土壤侵蚀强度数据	遥感近似计算
西昌市土地利用类型数据	遥感提取
西昌市人口密度数据	西昌市 2019 年国民经济和社会发展统计公报

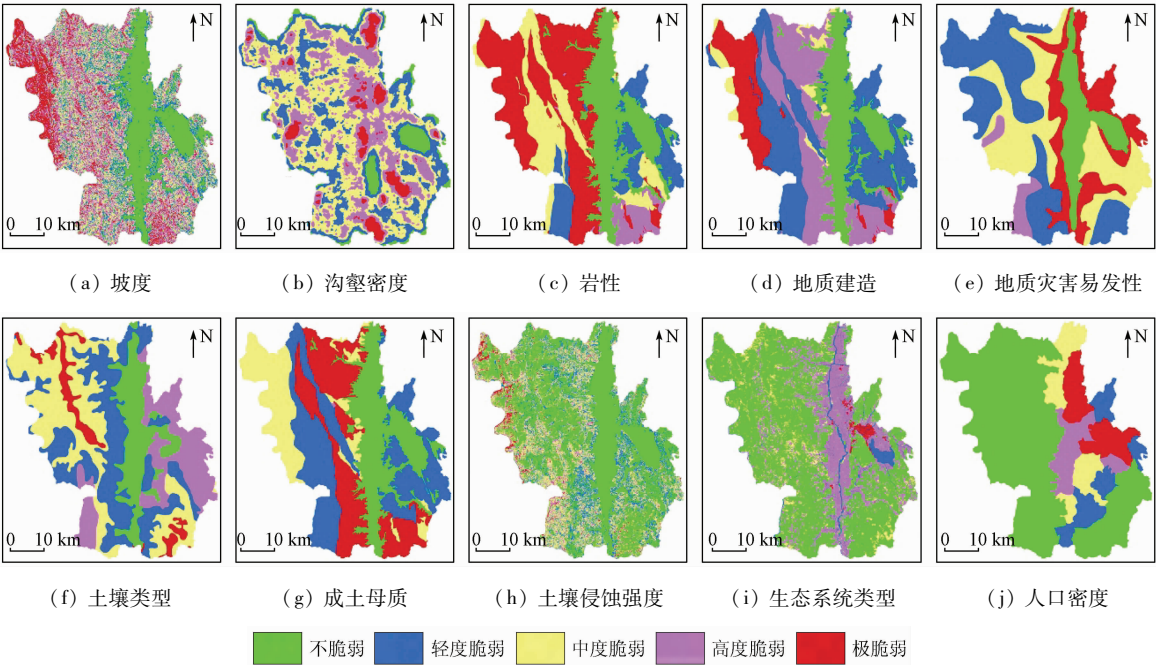


图 2 西昌市生态地质脆弱性单因子评价图

Fig. 2 Eco-geological vulnerability evaluation map of single factor in Xichang City

2.4 权重计算与综合评价

从单因子分析得出的生态地质脆弱性,只反映了某一因子的作用程度;要将生态地质脆弱性的区域差异综合地反映出来,还需要进行生态地质脆弱性综合评价。由于各个因子对于生态地质脆弱性的重要性不同,在进行综合评价时,应当对单因子赋予不同的权重,运用加权方法进行评价。本次研究,在地理信息系统的支持下,采用改进的 AHP 法评价西昌市生态地质脆弱性。

AHP 法是一种定性与定量相结合的决策分析方法,常被运用于多目标、多准则、多要素、多层次的非结构化的复杂决策问题,在生态环境和资源环境评价领域应用十分广泛^[29,40-44]。由于 AHP 法存在着较大的随意性,为了克服这一问题,往往需要多部门、多领域的专家共同会商、集体决定,通常采用发放和回收专家调查表的形式来比较各因素的重要程度^[45]。然而在实际操作中,发放和回收专家调查表这种方式依然存在着较大的局限性。首先,为了保证专家意见具有一定的代表性和普遍性,需要向各

行业专家发放大量的调查表,有时甚至达到数百份,导致实际操作极为困难;其次,发放的调查表与回收的调查表不成比例,在实际操作中,由于各种因素,发放了大量的调查表,实际回收的调查表却往往寥寥无几,导致样本数量不够,失去了统计意义;再次,由于调查表是向各行业专家发放的,而专家感兴趣的是其从事行业内的问题,造成了专家对其从事行业问题的重要性的偏好,从而加大了主观性。

2.4.1 AHP 法改进

针对上述问题,本次研究在构建西昌市生态地质脆弱性评价判断矩阵时,对于各个因素之间的重要程度的判断,提出了在生态地质调查的基础上,通过综合研究各相关因素的控制作用及继承关系来比较各相关因素的重要性的方法,用以取代专家打分,从而最大限度降低主观性。

如前文所述,在西昌市域,构造控制地貌形态和岩性分布,进而影响着地面坡度、地表的岩石类型、地质灾害发育程度,而岩石作为成土母质的来源控

制着成土母质的类型,还影响着地质灾害的发育分布,母质转化为土壤,存在着地质建造(构造)控制地貌形态和岩性、岩性控制母质、母质控制土壤、土壤影响生态的控制关系,即基岩→成土母质→土壤→植被这一生态地质谱系。由此,通过研究西昌市生态地质脆弱性各相关因素的控制作用及继承关系来进行两两比较,即凡是控制其他要素的相对被控制的要素显得更为重要,据此先预判各相关因素的重要性比较结果,构建了西昌市生态地质脆弱性层

次分析判断矩阵;然后计算判断矩阵的随机一致性比例,通过分析随机一致性比例、各因素的权重及排序来确定判断矩阵是否构建合理,验证预判是否正确。

2.4.2 权重计算

基于上述分析与预判,构建了西昌市生态地质脆弱性评价的判断矩阵,然后求解判断矩阵的随机一致性比例、最大特征根及其所对应的特征向量,从而得到各因素的权重及排序(表3)。

表 3 西昌市生态地质脆弱性评价判断矩阵与层次排序^①

Tab.3 Judgement matrix and arrangement of eco – geological vulnerability evaluation in Xichang City												
A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	权重(W)	排序
B ₁	1	1/3	1/3	1/5	3	1/3	1/3	3	1/3	3	0.055 6	6
B ₂	3	1	1/3	1/5	2	1/3	1/3	1/2	1/3	2	0.052 4	7
B ₃	3	3	1	1/3	3	3	3	4	3	4	0.175 0	2
B ₄	5	5	3	1	4	4	4	5	4	5	0.280 3	1
B ₅	1/3	1/2	1/3	1/4	1	1/3	1/3	1/3	1/3	3	0.036 5	9
B ₆	3	3	1/3	1/4	3	1	1/3	3	3	4	0.107 5	4
B ₇	3	3	1/3	1/4	3	3	1	3	3	4	0.134 5	3
B ₈	1/3	2	1/4	1/5	3	1/3	1/3	1	1/3	2	0.048 0	8
B ₉	3	3	1/3	1/4	3	1/3	1/3	3	1	3	0.084 0	5
B ₁₀	1/3	1/2	1/4	1/5	1/3	1/4	1/4	1/2	1/3	1	0.026 1	10

①λ=11.295 8,CI=0.144 0,RI=1.49,CR=0.096 6<0.10。λ为判断矩阵的最大特征根;CI为判断矩阵的一致性指标;RI为平均随机一致性指标;CR为判断矩阵的随机一致性比例。A为总目标——西昌市生态地质脆弱性;B₁为坡度单因子脆弱性;B₂为沟壑密度单因子脆弱性;B₃为地层岩性单因子脆弱性;B₄为地质建造单因子脆弱性;B₅为地质灾害易发性单因子脆弱性;B₆为土壤类型单因子脆弱性;B₇为成土母质单因子脆弱性;B₈为土壤侵蚀强度单因子脆弱性;B₉为生态系统类型单因子脆弱性;B₁₀为人口密度单因子脆弱性。

由表3可知,λ=11.295 8,CI=0.144 0,RI=1.49,CR=0.096 6<0.10,即判断矩阵的随机一致性比例小于0.10,表明构建的判断矩阵具有符合要求的随机一致性,判断矩阵构建合理。在10个单因素中,地质建造权重最大、排序第一,往下依次是地层岩性、成土母质、土壤类型、生态系统类型、坡度、沟壑密度、土壤侵蚀强度、地质灾害易发性、人口密度。计算出来的10个因子的权重分配较合理,排序与预判一致,表明根据预判构建的判断矩阵合理,权重分配合适。

2.4.3 综合评价

在地理信息系统中,把10个生态地质脆弱性单因子评价图分别赋以表3中的权重(W),按照式(1)进行加权叠加,得出西昌市生态地质脆弱性加权总和;然后按照表1中的生态地质脆弱性分级标准(SS)进行分级,得到西昌市生态地质脆弱性综合评价图。

$$SS_j = \sum_{i=1}^{10} C_{ij} W_i, \quad (1)$$
式中:SS_j为j空间单元生态地质脆弱性;C_{ij}为j空间单元i因子生态地质脆弱性等级分值;W_i为i因子生态地质脆弱性权重。

3 评价结果

西昌市生态地质脆弱性综合评价图及各等级面积统计如图3和表4所示。总体而言,西昌市生态地质环境较为脆弱,不脆弱—轻度脆弱和中度脆弱—高度脆弱各占一半左右,但没有极脆弱区域。不脆弱区域面积仅有208.31 km²、仅占研究区面积的7.85%,主要分布于安宁河谷;轻度脆弱区域面积1 115.41 km²、占研究区面积的42.01%,主要分布于安宁河谷、安宁河谷右岸的月华至黄水一带、邛海周围一带及白马—荞地一带;中度脆弱—高度脆弱区域面积合计1 331.28 km²、占研究区面积的50.14%,略微超过一半,中度脆弱—高度脆弱区域分布集中,主要分布于市域西部的牦牛山一带和东南部的螺髻山一带(图3)。为了检验评价结果的准确性,采用生态地质路线调查的方式对评价结果进行了野外验证,调查路线横穿了整个西昌市,东起西昌市与昭觉县交界处,向西经大箐、洛古坡、佑君、马鞍山等地止于雅砻江边。从路线调查情况来看,安宁河谷以东生态地质条件较好、不脆弱,以西则生态地质条

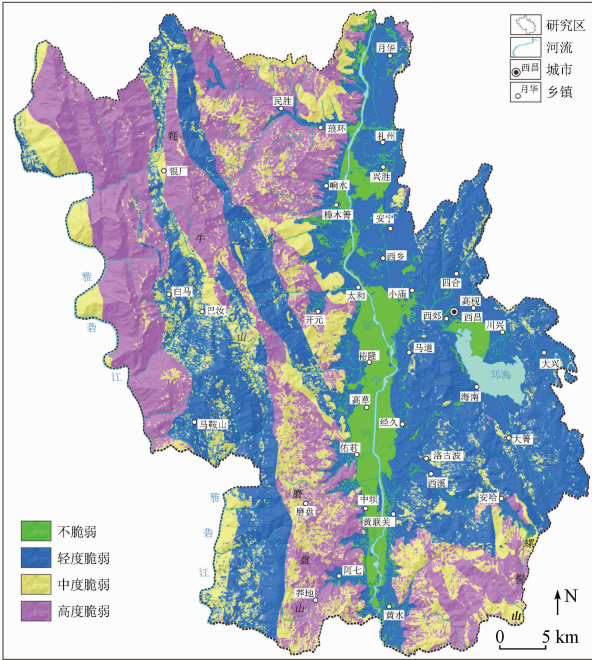


图 3 西昌市生态地质脆弱性评价图

Fig.3 Map of eco – geological vulnerability evaluation for Xichang City

表 4 西昌市生态地质脆弱性面积统计

Tab.4 Area statistics of eco – geological vulnerability in Xichang City

生态地质脆弱性分级	面积/km ²	百分比/%
不脆弱	208.31	7.85
轻度脆弱	1 115.41	42.01
中度脆弱	543.43	20.47
高度脆弱	787.85	29.67
合计	2 655.00	100.00

件较差、生态地质脆弱,路线调查与评价结果基本一致,说明评价结果较准确。

4 生态地质脆弱性分区

在生态地质脆弱性评价的基础上,根据生态地质脆弱性等级与空间分布的相似性与差异性,并尽可能保持乡镇地域的完整性,进行生态地质脆弱性分区。将西昌市划分为 5 个生态地质脆弱性分区(图 4 和表 5),分别是安宁河谷生态地质轻度脆弱区(Ⅰ)、大箐生态地质轻度脆弱区(Ⅱ)、巴汝—马鞍山生态地质中度脆弱区(Ⅲ)、螺髻山西坡生态地

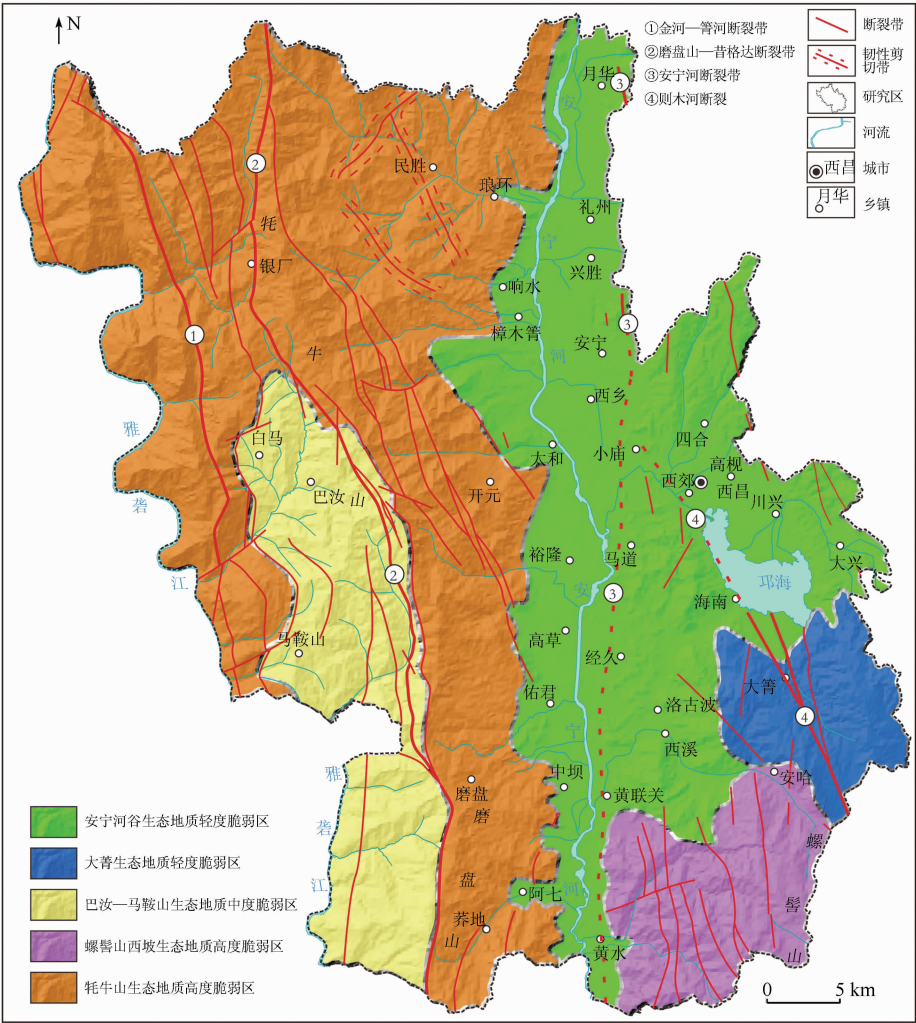


图 4 西昌市生态地质脆弱性分区图

Fig.4 Map eco – geological vulnerability zone of Xichang City

表 5 西昌市生态地质脆弱性分区与保护建议
Tab.5 Protection suggestions of each eco-geological vulnerability zones in Xichang City

生态地质脆弱性分区	面积/ km ²	占比/ %	涉及乡镇	生态地质背景	主要生态地质问题	生态保护与建设重点	产业开发策略
安宁河谷生态地质轻度脆弱区(Ⅰ)	851.75	32.08	月华、礼州、兴胜、响水、樟木箐、安宁、西乡、四合、太和、小庙、裕隆、马道、西郊、川兴、大兴、高草、经久、海南、洛古波、西溪、佑军、黄联关、中坝	生态地质脆弱性以轻度脆弱为主,安宁河谷地带不脆弱;地貌主要为中山宽谷平原和构造侵蚀剥蚀中山;出露地层主要为第四系冲洪积物、昔格达组和白垩系小坝组;安宁河断裂带和则木河断裂带纵贯全区	水土流失、地质灾害	加强工业“三废”污染的防治,加快污水处理设施建设,对大气污染进行重点监控,加强城郊面源污染的治理,做好城区和郊区景观生态建设和保护,保护好邛海湿地及其水质	工农业综合开发,安宁河谷发展生态农业;在工业发展和城市发展过程中,发展循环经济和清洁产业;依托邛海发展生态旅游
大箐生态地质轻度脆弱区(Ⅱ)	128.48	4.84	大箐、安哈	生态地质脆弱性以轻度脆弱为主;地貌主要为构造侵蚀剥蚀中山;出露地层主要为三叠系白果湾组、侏罗系和白垩系小坝组;则木河断裂带纵贯全区	水土流失	保育好中亚热带常绿针叶、阔叶林生态系统,维护森林生态系统的水源涵养、水土保持和生物多样性维持的功能,为邛海的生态安全、水源保证做出重要贡献	以保护为主,适当发展生态林业
巴汝—马鞍山生态地质中度脆弱区(Ⅲ)	333.50	12.56	巴汝、马鞍山	生态地质脆弱性以中度脆弱为主;地貌主要为构造侵蚀剥蚀中山,少量构造侵蚀剥蚀高山;出露地层主要为三叠系宝顶组、侏罗系和白垩系小坝组;磨盘山—昔格达断裂带纵贯全区	水土流失、地质灾害、植被退化	维护和恢复山地森林生态系统,加强植树造林,以改善森林结构,提高水源涵养能力和水土保持能力	以保护为主,适当发展生态林业、牧业,重点维护和恢复山地森林生态系统,改善林业生态环境,从而促进区域经济持续发展
螺髻山西坡生态地质高度脆弱区(Ⅳ)	189.47	7.14	黄水、安哈	生态地质脆弱性以高度脆弱为主;地貌主要为构造侵蚀剥蚀中山,少量构造侵蚀剥蚀高山;出露地层主要为震旦系灯影组、南华系开建桥组、青白口—南华系苏雄组;断裂发育	水土流失、地质灾害	着重于生态恢复和水土流失治理,保护地质环境,降低地质灾害的发生频率,陡坡地区森林生态系统水源涵养功能对保证安宁河的稳定和安全十分重要,必须通过山地自然生态恢复与维护来增强水源涵养能力	以保护为主,适当发展生态林业
牦牛山生态地质高度脆弱区(Ⅴ)	1151.80	43.38	民胜、琅环、银厂、开元、白马、磨盘、荞地、阿七	生态地质脆弱性以高度脆弱为主;地貌主要为构造侵蚀剥蚀中山,少量构造侵蚀剥蚀高山;出露地层从震旦系到侏罗系,岩性复杂多样;断裂发育,箐河—金河断裂带和盘山—昔格达断裂带纵贯全区	水土流失、地质灾害、植被退化	着重于生态恢复和水土流失治理,保护地质环境,降低地质灾害的发生频率,陡坡地区森林生态系统水源涵养功能对保证雅砻江的稳定和安全十分重要,必须通过山地自然生态恢复与维护来增强水源涵养能力;加强生态公益林的建设 and 保育,对生态公益林逐步进行改造与建设,使其向常绿阔叶林演化,提高其生态保护和水源涵养的功效	以保护为主,适当发展生态林业

质高度脆弱区(Ⅳ)和牦牛山生态地质高度脆弱区(Ⅴ)。然后,在分析、总结各分区的主要生态地质问题的基础上,提出了生态保护与建设的重点与发展方向。

5 结论与讨论

1)地球内营力形成的构造运动及其演化是形

成西昌市现今生态地质格局的最主要的驱动力,与地形地貌、气候和人类活动等一起塑造了西昌市现今生态地质格局。

2)在生态地质调查的基础上,通过研究西昌市生态地质脆弱性各相关因素的控制作用及继承关系来比较各相关因素重要性的方法,构建的判断矩阵随机一致性好,计算出来的权重符合调查结果,相较专家打分法,可操作性更好。

3)西昌市生态地质环境较为脆弱,虽然没有极脆弱区域,但中度脆弱—高度脆弱达西昌市面积的 50.14%。不脆弱与轻度脆弱区主要集中分布于安宁河谷和邛海盆地,中度脆弱—高度脆弱区域主要集中分布于西昌市西部的牦牛山一带和东南部的螺髻山一带。

4)全市可划分为 5 个生态地质脆弱性分区,包括 2 个生态地质轻度脆弱区——安宁河谷生态地质轻度脆弱区(Ⅰ)和大箐生态地质轻度脆弱区(Ⅱ),1 个生态地质中度脆弱区——巴汝—马鞍山生态地质中度脆弱区(Ⅲ),2 个生态地质高度脆弱区——螺髻山西坡生态地质高度脆弱区(Ⅳ)和牦牛山生态地质高度脆弱区(Ⅴ)。对于不同的生态地质脆弱性分区,建议实行不同的生态保护修复方案与因地制宜的开发建设措施。

5)基于在西昌市开展的生态地质调查与评价的实践,笔者认为生态地质和生态地质脆弱性的内涵与概念比较清楚,对于生态地质脆弱性评价的指标体系、内容与评价方法也较为明确。然而,生态地质调查与评价对生态功能区划的意义与作用是什么?从地球系统科学角度来看,生态地质调查所查明的生态地质条件和生态地质问题,无疑为生态环境的综合评价提供了大量的参考依据与素材。而如何将这些素材引入到生态功能区划中则值得进一步深入研究。

参考文献 (References) :

[1] 孙儒泳,李庆芬,牛翠娟,等.基础生态学[M].北京:高等教育出版社,2002:1-4.
Sun R Y, Li Q F, Niu C J, et al. Basic ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 1-4.

[2] Trofimov V T. 生态地质学——地质科学的新分支[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 27-35.
Trofimov V T. Ecological geology: A novel branch of geological sciences[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 27-35.

[3] Trofimov V T. 生态地质条件评估的方法、原理和标准[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 533-542.
Trofimov V T. Approaches, principles and criteria of evaluation of ecological geological conditions[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 533-542.

[4] 刘丙祥,李玉成,孙丙华,等.“大地质”背景下高校地质学专业生态地质学课程教学探讨[J]. 生物学杂志, 2017, 34(2): 124-127.
Liu B X, Li Y C, Sun B H, et al. On teaching the course of ecological geology based on the background of the strategy of “the great geology”[J]. Journal of Biology, 2017, 34(2): 124-127.

[5] 聂洪峰,肖春蕾,郭兆成. 探寻生态系统运行与演化的秘密——生态地质调查思路及方法解读[J]. 国土资源科普与文化, 2019, 6(4): 4-13.
Nie H F, Xiao C L, Guo Z C. Exploring the secrets of ecosystem

operation and evolution: Interpretation of ecological geological survey ideas and methods[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2019, 6(4): 4-13.

[6] 张景华,欧阳渊,刘洪,等. 西昌市生态地质特征与脆弱性评价[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2020: 1-5.
Zhang J H, Ouyang Y, Liu H, et al. Eco-geological characteristics and vulnerability evaluation of Xichang City[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020: 1-5.

[7] 陈树旺, Antonina A Z, 邢德和,等. 铁岭地区生态地质研究[M]. 北京:地质出版社, 2011: 1-2.
Chen S W, Antonina A Z, Xing D H, et al. Eco-geological study in Tieling area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1-2.

[8] 陈树旺,邢德和,丁秋红,等. 生态地质调查评价——以辽宁铁岭地区为例[J]. 地质与资源, 2012, 21(6): 540-545.
Chen S W, Xing D H, Ding Q H, et al. Eco-geological survey and evaluation: A case study of Tieling area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(6): 540-545.

[9] 汪振立. “生态地质”课程教学初探[J]. 中国地质教育, 2012, (1): 17-20.
Wang Z L. Preliminary study on teaching the course of ecological geology[J]. Chinese Geological Education, 2012, (1): 17-20.

[10] 汪振立. 生态地质[M]. 北京:地质出版社, 2013: 1-5.
Wang Z L. Eco-geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-5.

[11] 吴传璧,刘燕平. 生态地质调查工作——俄罗斯的状况与启示[J]. 国土资源情报, 2003, (12): 36-42.
Wu C B, Liu Y P. Eco-geological survey: Situation and enlightenment of Russia[J]. Land and Resources Information, 2003, (12): 36-42.

[12] 王长生,王大可. 试论 1:5 万生态地质调查[J]. 中国区域地质, 1997, 16(1): 56-59.
Wang C S, Wang D K. On the 1:50 000 ecological geological investigation[J]. Regional Geology of China, 1997, 16(1): 56-59.

[13] 王长生,王大可. 生态地质学的创立及其在大巴山区的初步应用[J]. 大自然探索, 1998, 17(6): 68-70.
Wang C S, Wang D K. Production of ecological geology and its applications in the Daba Mountain[J]. Exploration of Nature, 1998, 17(6): 68-70.

[14] 侯春堂,李瑞敏,冯翠娥,等. 区域农业生态地质调查内容与方法——以河北平原为例[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 66-70.
Hou C T, Li R M, Feng C E, et al. An approach to survey contents and methods of regional and agroecological geology: A case study in Hebei Plain[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 66-70.

[15] 何政伟,黄润秋,孙传敏,等. 浅议“生态地质学”[J]. 国土资源科技管理, 2003, 3(20): 69-72.
He Z W, Huang R Q, Sun C M, et al. A brief discussion on ‘eco-geology’[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2003, 3(20): 69-72.

[16] 杨忠芳,奚小环,成杭新,等. 区域生态地球化学评价核心与对策. 第四纪研究[J], 2005, 25(3): 276-284.
Yang Z F, Xi X H, Cheng H X, et al. The core and countermeasures of regional ecological geochemical assessment[J]. Quaternary

- Sciences, 2005, 25(3): 276–284.
- [17] 孙立广. 南极无冰区生态地质学及其形成与发展[J]. 自然杂志, 2006, 28(3): 150–154.
- Sun L G. The formation and development of eco-geology in ice-free area, Antarctica[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(3): 150–154.
- [18] Trofimov V T, Andreeva T V. Ecological geological systems and their types, position in the ecosystems structure and tasks of the investigation[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 425–438.
- [19] 赵平. 新时代生态地质勘查工作的基本内涵与架构[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(10): 1–5.
- Zhao P. Fundamental connotation and framework of eco-geological exploration in new era[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(10): 1–5.
- [20] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18–24.
- Li H, Zhang P Y, Cheng Y Q. Concepts and assessment methods of vulnerability[J]. Progress in Geography, 2008, 27(2): 18–24.
- [21] 李莉, 王晓婷, 王辉. 脆弱性内涵、评价与研究趋势综述[J]. 中国渔业经济, 2010, 28(3): 161–169.
- Li L, Wang X T, Wang H. Review of content, evaluation and research trends of vulnerability[J]. Chinese Fisheries Economics, 2010, 28(3): 161–169.
- [22] 姚建, 丁晶, 艾南山. 岷江上游生态脆弱性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4): 380–384.
- Yao J, Ding J, Ai N S. Assessment of ecological vulnerability in upper reaches of Mingjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(4): 380–384.
- [23] 沈珍瑶, 杨志峰, 曹瑜. 环境脆弱性研究述评[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 91–94.
- Shen Z Y, Yang Z F, Cao Y. Review on environment vulnerability research[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(3): 91–94.
- [24] 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 eco-environmental vulnerability in Pearl River Delta based on RS and GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2987–2995.
- [25] 卢远, 苏文静, 华瑾. 基于景观格局和生态敏感性的左江流域生态脆弱性分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 78–87.
- Lu Y, Su W J, Hua C. Analysis of ecological vulnerability in Zuojiang River Basin based on landscape pattern and ecosystem sensitivity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 78–87.
- [26] 李念春, 袁辉. 黄河三角洲高效生态经济区生态环境脆弱性评价研究[J]. 山东国土资源, 2015, 31(10): 57–61.
- Li N C, Yuan H. Evaluation and study on ecological vulnerability of efficient ecological economic zone in the Yellow River Delta area[J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(10): 57–61.
- [27] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 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[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 320–330.
- Hou W J, Gao J B, Peng T, et al. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure-function-habitat framework[J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 320–330.
- [28] 邵秋芳, 彭培好, 黄洁, 等. 长江上游安宁河流域生态环境脆弱性遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 175–181. doi: 10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 27.
- Shao Q F, Peng P H, Huang J, et al. Monitoring eco-environmental vulnerability in Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River using remote sensing techniques[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 8(2): 175–181. doi: 10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 27.
- [29] 姚昆, 张存杰, 何磊, 等. 雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态评价及预测[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 199–208. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020. 04. 25.
- Yao K, Zhang C J, He L, et al. Dynamic evaluation and prediction of ecological environment vulnerability in the middle-upper reaches of the Yalong River[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(4): 199–208. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020. 04. 25.
- [30] 陈开伟. 西昌市天然林资源保护工程建设成效评价[J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(10): 85–86.
- Chen K W. Effects evaluation on natural forest protection engineering construction of Xichang City[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2012, 53(10): 85–86.
- [31] Hong W Y, Jiang R R, Yang C Y, et al. Establishing an ecological vulnerability assessment indicator system for spatial recognition and management of ecologically vulnerable areas in highly urbanized regions: A case study of Shenzhen, China[J]. Ecological Indicators, 2016(69): 540–547.
- [32] Zhang F, Liu X P, Zhang J Q, et al. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China[J]. Ecological Modelling, 2017(349): 41–50.
- [33] Zhao J C, Jia G X, Tian Y, et al. Environmental vulnerability assessment for Mainland China based on entropy method[J]. Ecological Indicators, 2018(91): 410–422.
- [34] Yang Z, Li W P, Li X Q, et al. Assessment of eco-geo-environment quality using multivariate data: A case study in a coal mining area of Western China[J]. Ecological Indicators, 2019(107): 1–13.
- [35] Wei W, Shi S N, Zhang X Y, et al. Regional-scale assessment of environmental vulnerability in an arid inland basin[J]. Ecological Indicators, 2020(109): 1–19.
- [36] 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(1): 91–105.
- Liu H, Huang H X, Ouyang Y, et al. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(1): 91–105.
- [37] 张景华, 高慧, 欧阳渊, 等. 贵州省黔西县土壤侵蚀敏感性评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 88–94.
- Zhang J H, Gao H, Ouyang Y, et al. Sensitivity evaluation of soil erosion in Qianxi County of Guizhou Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(2): 88–94.
- [38] 王克晓, 陈刚, 陈伟涛, 等. 生态地质环境评价方法研究[J]. 测绘科学, 2015, 40(7): 78–82.

Wang K X,Chen G,Chen W T,et al. Comprehensive assessment of eco – geological environment[J]. Science of Surveying and Mapping,2015,40(7):78 – 82.

[39] 王 尧,张茂省,杨建锋. 中国地质环境脆弱性评价[J]. 西北地质,2019,52(2):199 – 206.

Wang Y,Zhang M S,Yang J F. Evaluation research on the fragility of geological environment in China [J]. Northwestern Geology, 2019,52(2):199 – 206.

[40] Satiprasad S, Anirban D, Amlanjyoti K. Environmental vulnerability assessment using grey analytic hierarchy process based model[J]. Environmental Impact Assessment Review,2016(56):145 – 154.

[41] 张茂省,王 尧,薛 强. 资源环境承载力评价理论方法与实践 [J]. 西北地质,2019,52(2):1 – 11.

Zhang M S,Wang Y,Xue Q. Evaluation resource environment carrying capacity:Theoretical method and practice [J]. Northwestern Geology,2019,52(2):1 – 11.

[42] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J]. 国土资源遥感,2019,31(3):183 – 192. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 03. 23.

Zhang X D,Liu X N,Zhao Z P,et al. Geological disaster hazard assessment in Yanchi County based on AHP[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31 (3): 183 – 192. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 03. 23.

[43] 郑 续,苗俊霞,王 东,等. 黄河中上游地质灾害高发县国土空间适宜性评价及功能分区——以陕西省延川县为例[J]. 西北地质,2020,53(2):289 – 297.

Zheng X,Wang J X,Wang D,et al. Suitability evaluation and functional division of land space development in the high – incidence area of geological hazards in the Yellow River: A case study of Yanchuan County, Shangxi Province [J]. Northwestern Geology, 2020,53(2):289 – 297.

[44] 赵玉灵. 基于层次分析法的矿山环境评价方法研究——以海南岛为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):148 – 153. doi:10. 6046/gtzyyg. 2020. 01. 20.

Zhao Y L. Study and application of analytic hierarchy process of mine geological environment: A case study in Hainan Island [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(1):148 – 153. doi:10. 6046/gtzyyg. 2020. 01. 20.

[45] 徐建华. 计量地理学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2014: 234 – 239.

Xu J H. Quantitative geography [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press,2014:234 – 239.

Eco – geological vulnerability assessment based on major controlling factors: A case study of Xichang City, Sichuan Province

ZHANG Jinghua¹, OUYANG Yuan¹, LIU Hong^{1,2}, HUANG Hanxiao¹, ZHANG Tengjiao¹, LI Fu¹, LI Tong²
(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The eco – geological vulnerability assessment of Xichang City, Sichuan Province was performed in this study to provide bases for the ecological protection and restoration of the city. Firstly, an assessment indicator system was constructed, for which 10 major influencing factors of the eco – geological vulnerability in Xichang City were selected according to the eco – geological survey and comprehensive research. Then the eco – geological vulnerability assessment of Xichang City was conducted using the improved analytic hierarchy process (AHP) and the geographic information system (GIS). The results are as follows. Xichang City suffers from vulnerable eco – geology. The areas with moderate – high eco – geological vulnerability account for 50. 14% , although no areas suffer extreme eco – geological vulnerability. The areas not suffering eco – geological vulnerability and those with slight eco – geological vulnerability are concentrated in the Anning River valley and the Qionghai Lake Basin, while the areas with moderate – high eco – geological vulnerability are mainly distributed in the Maoni Mountain area in the western part of Xichang City and the Luoji Mountain area in the southeastern part of the city. Overall, the whole city includes five areas with eco – geological vulnerability, namely two areas with slight eco – geological vulnerability in the Anning River Valley (I) and Daqing (II), one area with moderate eco – geological vulnerability in the Baru – Ma’ anshan area (III), and two areas with high eco – geological vulnerability on the western slope of the Luoji mountain (IV) and in the Maoni Mountain (V). Different ecological protection and restoration schemes and different development and construction measures should be implemented for different eco – geologically vulnerable areas in the city.

Keywords: eco – geology; vulnerability; evaluation and zoning; Xichang City

(责任编辑: 张 仙)