

基于 GIS 和模糊数学的川西地区生态安全评价

陈春容, 仙巍, 潘莹, 王浩帆

(成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225)

摘要: [目的] 对川西生态安全进行评价研究, 以期为该地区生态环境建设、社会经济发展规划提供科学依据。[方法] 基于 GIS 和遥感技术, 从自然和人为影响两个方面构建评价指标体系, 通过模糊数学模型对川西地区 2000, 2005, 2010, 2015 年和 2018 年的生态安全状况进行评价。[结果] 川西 40% 的区域生态安全状况处于较危险状态, 呈现出“东高西低”的空间分布格局。川西生态安全 2000—2018 年总体变化趋势为“上升—小幅度下降—上升”。川西地区生态安全 Moran's I 指数在 0.5 左右, 西部白玉、巴塘、理塘一带生态安全状况好转, 东部九龙、雅江、木里和若尔盖一带生态安全质量有所下降。地形植被是川西生态安全最主要的影响因子。[结论] 川西整体生态安全状况偏差, 但呈现出改善趋势, 具有较强的空间聚集性, 对川西生态安全状况的治理要充分考虑其空间分异特征。

关键词: 生态安全; GIS 和遥感技术; 模糊数学模型; 川西地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0329-08

中图分类号: X826

文献参数: 陈春容, 仙巍, 潘莹, 等. 基于 GIS 和模糊数学的川西地区生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 329-336. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.043; Chen Chunrong, Xian Wei, Pan Ying, et al. Ecological security evaluation of Western Sichuan Province based on GIS and fuzzy mathematics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 329-336.

Ecological Security Evaluation of Western Sichuan Province Based on GIS and Fuzzy Mathematics

Chen Chunrong, Xian Wei, Pan Ying, Wang Haofan

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: [Objective] The ecological security of Western Sichuan Province was evaluated in order to provide a scientific basis for the ecological environment construction and socio-economic development planning of the region. [Methods] Based on GIS and remote sensing technology, an evaluation index system was constructed from two aspects of natural and human impacts, and the ecological security status of Western Sichuan Province in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2018 was evaluated through fuzzy mathematical models, respectively. [Results] The ecological security in 40% of the region in Western Sichuan Province was in a dangerous state, showing a spatial distribution pattern of “high in the east and low in the west”. The overall change trend of ecological security in Western Sichuan Province from 2000 to 2018 was “rising first, then decreasing slightly, and then rising”. The Moran's I index of ecological security in Western Sichuan Province was around 0.5. The ecological security situation in the Western Baiyu, Batang, and Litang areas had been improved, while the ecological security in Eastern Jiulong, Yajiang, Muli, and Ruoergai areas was declined. Topography and vegetation were the main factors influencing ecological security in Western Sichuan Province. [Conclusion] The overall ecological security situation in Western Sichuan is relatively poor, but it shows a trend of improvement, with strong spatial aggregation. The management of the ecological environment of West Sichuan Province should consider its spatial differentiation characteristics.

Keywords: ecological security; GIS and remote sensing technology; fuzzy mathematical models; Western Sichuan Province

收稿日期: 2020-10-26

修回日期: 2020-12-11

资助项目: 国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金项目“川中低山丘陵区撂荒耕地遥感研究监测”(KLGST2018-01); 四川省科技厅项目“川西高原冬季枯草的遥感监测方法”(2019YFS0465)

第一作者: 陈春容(1997—), 女(汉族), 四川省广元市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 集成与气象应用。Email: 1039952749@qq.com。

通讯作者: 仙巍(1979—), 女(汉族), 山东省济宁市人, 博士, 副教授, 主要从事遥感技术应用研究。Email: 66952965@qq.com。

生态安全是国家安全体系的重要基石^[1],作为国家安全体系的重要组成部分,生态安全已成为当前研究人类可持续发展的热点和趋势^[2]。21 世纪以来,我国社会经济迅猛发展、人口急剧增长,导致城镇化进程加快、人地矛盾紧张、资源约束趋紧;此外,各类自然灾害频发,诸多因素致使生态结构紊乱和生态功能退化,严重威胁着国家生态安全。因此研究区域生态安全具有十分重要的意义。当前针对生态安全的研究内容主要包括生态安全评价、生态系统功能及服务价值和生态保护与恢复等方面^[3]。生态安全评价是研究区域生态是否安全的必要步骤,同时也是解决其余生态问题的基础。对生态安全评价的研究主要包括两个方面,一是如何选取评价指标,二是对评价模型的研究。生态安全受自然条件、经济发展和人类活动等多方面因素影响,基于此,国内外研究主要根据“环境(自然)—经济—社会”、“压力(pressure)—状态(state)—响应(response)”(PSR)等概念模型构建评价指标体系。早期生态安全评价的方法多为数字模型法和生态模型法^[4-5]。如丁道军^[6]根据 PSR 模型研究阿坝羌族藏族自治州生态安全状况,总结了阿坝州主要生态问题及原因;陈蓓^[7]基于生态碳足迹评价了甘孜藏族自治州生态安全状况,发现川西南地区所承受的生态环境压力较大。后来又引入了景观生态学^[8-9]的方法对生态安全进行评价。但这些方法存在空间差异性难以体现、忽略自然环境因素等问题。随着遥感和 GIS 高新技术的发展,基于网格的评价及分析能最大限度地体现行政单元内部生态安全状况的空间差异^[10]。近年来,模糊数学在生态问题研究中使用广泛。如邹长新等^[11]运用模糊数学方法探讨若尔盖湿地生态安全变化情况,发现研究区生态安全状况有所下降;刘祖涵^[12]将模糊数学引入城市生态安全评价中,论证了煤炭开采对萍乡市生态环境的负面影响。该方法能够很好的解决生态安全评价指标的复杂性和评价结果等级的不确定性问题,在生态安全评价研究中应用良好。习近平指出要从事关中华民族永续发展和千秋大计的高度推

动黄河流域生态安全保障和高质量发展^[1]。川西地区是长江、黄河上游的重要生态屏障,然而,该区位于高海拔地区,地势陡峭、降水空间分布不均、地质条件复杂等诸多自然因素造成了川西地区生态先天性脆弱。加之近年来人类活动加剧、土地利用不合理和森林资源退化,不仅使得研究区生态屏障功能减弱,而且成为了四川省生态安全问题突出的典型区域之一^[13]。目前,对川西生态问题的研究十分匮乏,在已有的少量研究中,多以县(州)行政区域为评价单元,难以反映更小尺度区域生态安全状况。此外,研究过多考虑社会经济影响,忽略了川西作为高原地区及其自身自然条件的影响。基于此,本文利用 GIS 和遥感技术,以 1 km×1 km 网格为评价单元,从自然和人为因素两个方面构建生态安全评价指标体系,运用模糊数学法对川西生态安全进行评价研究,以期为该地区生态环境建设、社会经济发展规划提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

川西地区位于四川省西部,地处青藏高原东部的横断山区,包括甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州和凉山彝族自治州的木里县。川西地区水系丰富,金沙江、雅砻江纵贯全境,是长江、黄河重要的水源地。区内设有多个国家级自然保护区,在水土保持、生物多样性保护和区域气候调节等方面具有不可替代的作用。作为我国第一、二阶梯过渡带,川西地区西北部以高原地形为主,西南部以山地地形为主,平均海拔高 4 000 m,土壤质地松脆,易被风化侵蚀。区内常年气温偏低,降雨量较少,日照时间长,气候随季节变化特征明显。川西高原植被多为草地,生物种类繁多,具有重要的生态战略地位,是《全国主体功能区规划》确定的国家重点生态功能区之一。

1.2 数据来源

研究所用数据及来源详见表 1。在 ArcGIS 中对数据进行投影转换、拼接、裁剪,空间分辨率统一为 1 km×1 km。

表 1 数据及来源

数据类型	数据来源
高程数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
气象数据(气温、降水)	国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn)
归一化植被指数数据(NDVI)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
土壤数据	寒区旱区科学数据中心(http://data.casnw.net/portal)
社会经济数据(GDP、人口)	中国科学院资源环境科学数据中心
土地利用类型数据	中国科学院资源环境科学数据中心

2 研究方法

2.1 川西生态安全评价方法

2.1.1 评价指标体系构建 指标体系构建遵循科学性、代表性、可获取性、综合考虑研究区的实际情况以

及前人的研究,本文从自然和人为两个角度构建评价指标体系,包括人类活动、气候变化、地形地貌、森林资源和地质条件 5 个方面共 9 个正负指标。正(负)指标与生态安全状况呈正(负)相关。具体指标体系及解析详见表 2。

表 2 川西生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标属性	权重	属性确定依据	计算方法和模型	说明
地形地貌		高程	-	0.134	汪朝霞 ^[4] 、李益敏等 ^[10] 、宋晓华 ^[14] 、王娟 ^[15]	高程直接下载获取。坡度根据高程数据 ArcGIS 中计算获得	高程和坡度是表征地形起伏的重要因子,川西作为高山峡谷地区,海拔普遍偏高且空间差异较大,严重影响着区域植被的生长状况。研究区地形陡峭,随着坡度增大,崩塌体下滑力增大,易发生地质灾害和水土流失。
		坡度	-	0.098			
自然因素	气候变化	气温	+	0.097	汪朝霞 ^[4] 、王怡然 ^[16] 、张雅娴等 ^[17]	研究区年均气温和年降水量站点数据通过 ArcGIS 插值得到	气象因素是评价区域生态安全的必要条件,气温对区域植被生长和空气质量有着明显的正向影响。降水是发生洪涝、干旱等自然灾害的决定因素。研究区常年气温寒冷、降水稀缺,恶劣的气象条件影响着人类财产和生命安全。
		降水	+	0.104			
森林资源	植被覆盖度		+	0.128	王娟 ^[15] 、王怡然 ^[16]	依据像元二分模型 ^[20] 计算获得	植被覆盖度的多少能直观的反映出区域生态安全的优良状况,是最主要的生态环境表征因子。川西地区荒漠化程度严重,植被覆盖程度对其生态安全状况变化产生明显影响。
地质条件	土壤可蚀性		-	0.123	汪朝霞 ^[4] 、朱玉林等 ^[18]	依据 EPIC 模型 ^[21] 计算获得	水土流失、草地退化是目前川西地区面临的主要生态问题,土壤可蚀性因子是其重要表征之一。研究区土壤多为草毡土、泥炭沼泽土、薄黑毡土和草甸土等,保水性相对较差,易被侵蚀,威胁着区域生态安全。
人为因素	人类活动	人均 GDP	+	0.117		人均 GDP 和人口密度直接下载获取。人为干扰指数参考严恩萍等 ^[22] 人的研究方法计算得到	人类活动是影响区域生态安全不可或缺的因素。人口密度和人均 GDP 能够在很大程度上反映人类活动强度。研究区主要以发展农牧业为主,但耕地资源有限,人口增长和经济发展使得人地矛盾突出,对生态环境的威胁越来越严重。而人为干扰指数根据土地利用情况来表征人类活动对生态环境的影响程度。
		人口密度	-	0.098	王娟 ^[15] 、朱玉林等 ^[18] 、王振波 ^[19]		
		人为干扰指数	-	0.101			

注:“-”,“+”分别表示负指标和正指标。

2.1.2 评价指标权重确定

(1) 指标标准化。研究采用极值法对各个指标进行标准化处理,计算公式为:

$$X_{\text{正指标}} = (a_i - a_{\min}) / (a_{\max} - a_{\min}) \quad (1)$$

$$X_{\text{负指标}} = (a_{\max} - a_i) / (a_{\max} - a_{\min}) \quad (2)$$

式中: $X_{\text{正指标}}$ 表示正指标的标准化值; $X_{\text{负指标}}$ 表示负指标的标准化值; a_i 表示第*i*项指标原始值; a_{\max} 第*i*项指标的最大值; a_{\min} 第*i*项指标的最小值。

(2) 熵权法。本文选取相对客观的熵权法^[23]计算指标权重。指标的信息熵越小,该指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用越大,权重就越高,反之则越低。结果详见表 2。

2.1.3 模糊数学综合评价 模糊数学法是把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。它具有结果清晰,系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量

化的问题。对研究区生态安全状况进行模糊数学综合评价时,评价因素为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_j)$, u_j 表示第 j 个评价指标;评价因素值为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i)$, x_i 表示第 i 个评价单元对应的值;评语集为 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ 。在燕守广、李悦等^[24-25]生态安全等级划分的标准上,本文将生态安全分为 5 个等级(表 3)。

表 3 川西生态安全等级划分标准

生态安全等级	范围	说明
I	[0,0.2)	生态安全状况处于危险状态
II	[0.2,0.4)	生态安全状况处于较危险状态
III	[0.4,0.6)	生态安全状况处于临界安全状态
IV	[0.6,0.8)	生态安全状况处于较安全状态
V	[0.8,1]	生态安全状况处于安全状态

(1) 隶属度函数构建。根据生态安全值域分布的一般规律,研究选取梯形函数来构建隶属度函

数^[26]。具体公式为:

偏小型:

$$U(x)_i = \begin{cases} 1 & (x \leq v_1) \\ (v_2 - x) / (v_2 - v_1) & (v_1 < x < v_2) \\ 0 & (x \geq v_2) \end{cases} \quad (3)$$

中间型:

$$U(x)_i = \begin{cases} 0 & (x \leq v_{i-1} \text{ 或 } x \geq v_{i+1}) \\ (x - v_{i-1}) / (v_i - v_{i-1}) & (v_{i-1} < x < v_i) \\ (v_{i+1} - v) / (v_{i+1} - v_i) & (v_i < x < v_{i+1}) \\ 1 & (x = v_i) \end{cases} \quad (4)$$

偏大型:

$$U(x)_i = \begin{cases} 1 & (x \geq v_5) \\ (x - v_4) / (v_5 - v_4) & (v_4 < x < v_5) \\ 0 & (x \leq v_4) \end{cases} \quad (5)$$

(2) 川西生态安全等级划分。

模糊综合评价模型为:

$$H = W \cdot R = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (6)$$

式中: H 为生态安全评价等级结果; W 为指标权重集; R 为指标隶属度矩阵; c_n 对应各个生态安全等级的隶属度。依据隶属度最大原则确定各评价单元的生态安全等级, 最终得到川西生态安全状况评级结果。

2.2 川西生态安全空间分析方法

采用空间自相关方法对川西生态安全空间聚集或离散特征进行分析。

2.2.1 全局自相关 全局自相关的莫兰指数 (Moran's I) 从整体上揭示事物空间聚集程度, 计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (7)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

式中: x_i 表示第 i 个地区的要素值; n 为区域总个数; W_{ij} 为空间权重矩阵, 当区域 i 和 j 相邻时, $W_{ij} = 1$; 不相邻时, $W_{ij} = 0$ 。Moran's I 指数取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 Moran's I 指数属于 $(0, 1]$, 要素值在空间上表现为正相关, 且 Moran's I 指数数值越趋近于 1, 表明其空间分布越聚集; 当 Moran's I 指数属于 $[-1, 0)$, 要素值在空间上表现为负相关; Moran's I 指数数值越趋近于 -1, 表明其空间分布越离散; 若 Moran's I 等于 0, 则表明要素值在空间上随机分布。

2.2.2 局部自相关 局部自相关的局域关联指标

LISA 可表征小区域空间聚散特征。LISA 是将 Moran's I 分解到各个单元地区, 正值表示空间单元要素值与相邻单元要素值相近, 负值表示空间单元要素值与相邻单元要素值差异较大, LISA 计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{m} \right) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (10)$$

$$m = \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n x_j^2 \right) / (n-1) - \bar{x} \quad (11)$$

3 结果与分析

3.1 川西生态安全状况

3.1.1 川西生态安全面积统计分析 对研究区生态安全面积进行统计分析, 结果见图 1。2000—2018 年生态安全呈正态分布, 川西地区整体生态安全状况偏差。以 2018 年为例, 生态安全状况 II 级区域所占面积最多, 占研究区总面积的 40%; 其次是 III 级区域, 占总面积的 26%; I 级区域所占面积最少。2000—2018 年 IV, V 级区域所占面积之和一直少于 I, II 级所占面积之和。这表明川西虽极少地区生态处于危险状态, 但处于较危险状态的区域面积占比最多, 川西生态脆弱区域多于生态环境良好区域, 川西地区整体生态安全状况偏差。

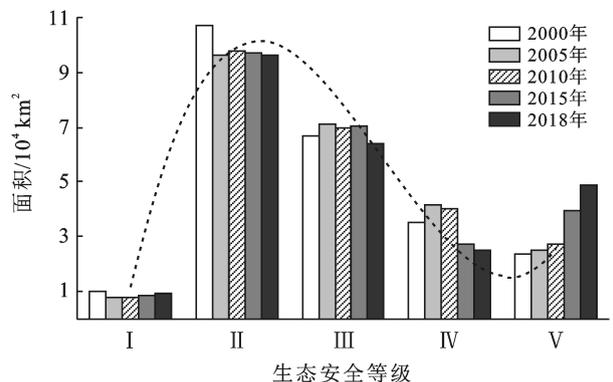


图 1 川西地区 2000—2018 年生态安全等级面积

3.1.2 川西生态安全空间分布格局 由图 2 可知, 研究区生态安全东西部差别显著, 呈现出“东高西低”的空间分布格局。2000 年, 以色达县—甘孜县—新龙县—理塘县—稻城县为分界线, 川西西部地区 (包括上述县级行政区) 生态安全多处于 I 级和 II 级, 东部地区生态安全多处于较 IV 级和 V 级。这表明西部地区相较于东部地区面临着人类活动和自然环境的巨大压力, 生态安全受到严重威胁。而 2000 年以后, 川西西南地区生态安全多处于 III 级。2000—2018 年川西有 3 个明显的区域生态处于安全状态, 分别位于川西东北部若尔盖、红原、松潘一带; 汶川、茂县东南地区; 以及泸定县东部地区。其中, 若尔盖和红原部分

地区在 2005 和 2015 年生态处于临界安全状态。汶川、泸定等县经济较发达,川东北一带坡度均在 8° 以下,区内多为草地和湿地,植被长势较好,生物多样性丰富,水土保持能力较强,生态安全状况良好。生态危险区在德格、理塘和泸定县等地有少量分布,这些区域几乎没有植被分布,多为冰川雪被覆盖,抗干扰能力弱。而石渠县有较多部分区域属于生态危险区,

自 2000—2018 年石渠县人口呈持续高速增长状态,2000 年人口达到 6.3 万人,到 2018 年约为 10.1 万人,年均增长率高达 3.35%,远超川西其他地区。石渠县境内人口的爆发式增长导致耕地资源和水资源急剧减少,草地退化程度加剧,生态压力倍增。除此之外,石渠县鼠虫害泛滥、自然气候恶劣,并且在“十二五”期间生态投资力度较弱,使得石渠县生态环境愈发脆弱。

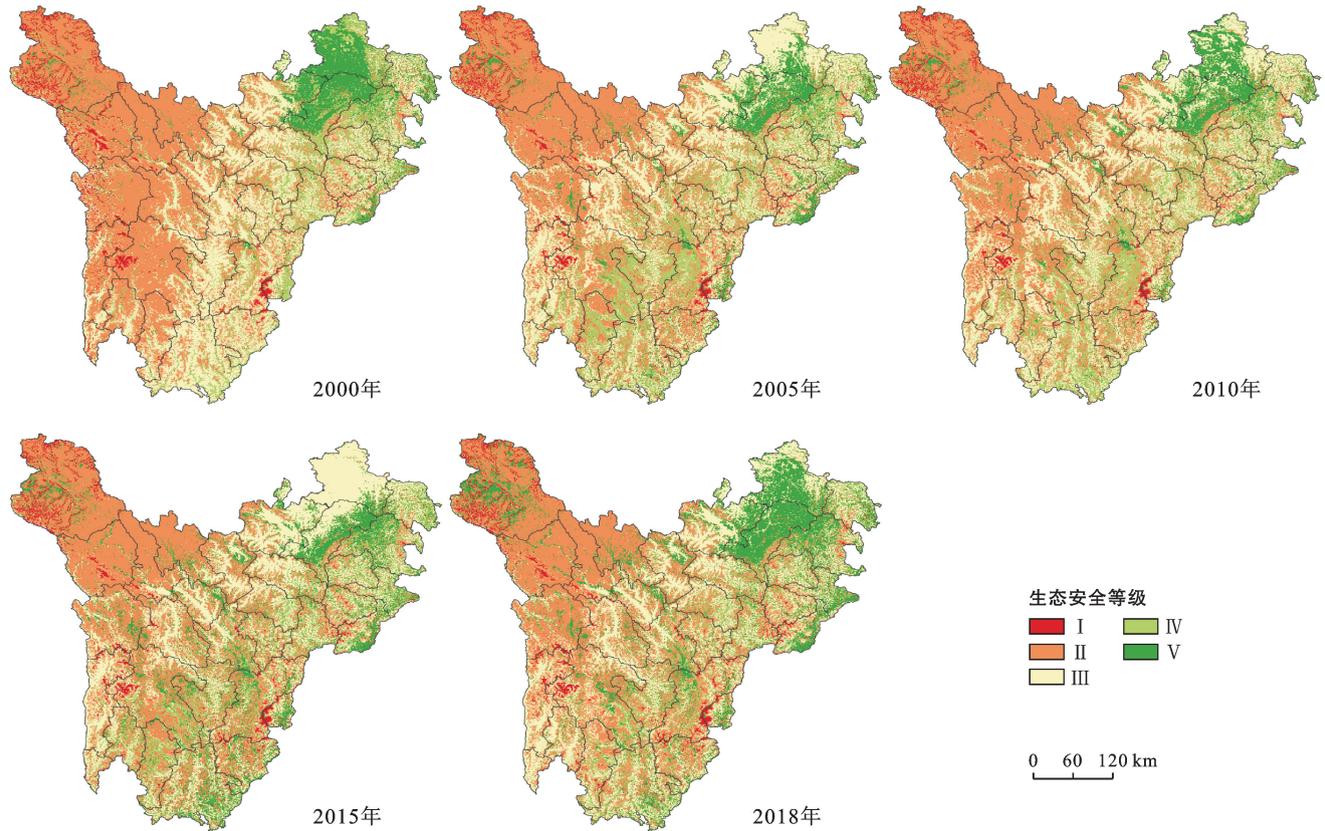


图2 川西地区生态安全等级分布

3.2 川西生态安全时间变化分析

为了解研究区生态安全时间变化趋势,利用 GIS 技术对 2000—2018 年川西地区生态安全状况做转移矩阵分析,结果详见表 4。其中上升表示生态安全等级变高,不变表示生态安全等级没有发生变化,下降表示生态安全等级变低。2000—2018 年川西生态安全等级保持不变的区域均占川西地区总面积的 70% 以上,这表明川西地区生态安全整体变化幅度较小。2000—2005 年川西生态安全等级上升占比为 16.7%,其中 II 级区域面积变化占 9.3%,下降为 10.9%,生态安全等级总体有较大幅度上升。2005—2010 年生态等级上升占比为 7.8%,下降为 8%,出现极小幅度下降的情况。2010—2015 年生态等级上升占比为 13.9%,下降为 11.4%;2015—2018 年生态等级上升占比为 14.4%,下降为 12.2%;说明 2010—2018 年川西生态状况持续变好,这得益于国家大力提倡和发展绿色生态城市,

四川生态省建设规划的大力实施,使得研究区生态安全得到重视和保护。川西生态安全 2000—2018 年的总体变化趋势为“上升—小幅度下降—上升”。

3.3 川西生态安全空间聚集特征分析

3.3.1 全局空间自相关分析 利用空间数据分析软件 GeoDa 对研究区生态安全进行全局空间自相关分析,计算得到研究区生态安全 2000—2018 年的 Moran's I 指数。如图 3 所示,川西 2000, 2005, 2010, 2015 年以及 2018 年生态安全的 Moran's I 指数都通过了 1% 的显著性检验,值分别为 0.572, 0.434, 0.446, 0.363 和 0.419,这说明川西生态安全在空间上呈现出显著相关性。2000 年 Moran's I 指数最高,其他年份降低,呈波动下降趋势,空间关联性减弱。将川西生态安全在空间上分为 4 个区域,“H-H”区(高值与高值聚集),“L-L”区(低值与低值聚集),“L-H”区(低值向高值聚集),“H-L”区(高值向低值聚集)。从图 3

可得出,“H-H”区和“L-L”区所占面积之和是“L-H”区和“H-L”区所占面积之和的 6~10 倍,这表明川西

生态安全呈现出较强的空间正相关,空间聚集性显著。

表 4 川西 2000—2018 年生态安全面积变化幅度

生态安全等级	2000—2005 年			2005—2010 年			2010—2015 年			2015—2018 年		
	上升	不变	下降	上升	不变	下降	上升	不变	下降	上升	不变	下降
I	1.4	2.5	0	0.7	2.7	0	0.9	2.4	0	0.7	2.7	0
II	9.3	34.6	0.3	3.8	35.7	0.3	6	33.9	0.5	7.3	32.2	0.4
III	4.5	20	3.2	2.6	24.9	1.9	3.1	23.2	2.4	4.9	21.9	2.2
IV	1.5	9.1	3.9	0.7	12.9	3.5	3.9	8	4.7	1.5	6	3.6
V	0	6.2	3.5	0	8	2.3	0	7.2	3.8	0	10.4	6
总和	16.7	72.4	10.9	7.8	84.2	8	13.9	74.7	11.4	14.4	73.2	12.2

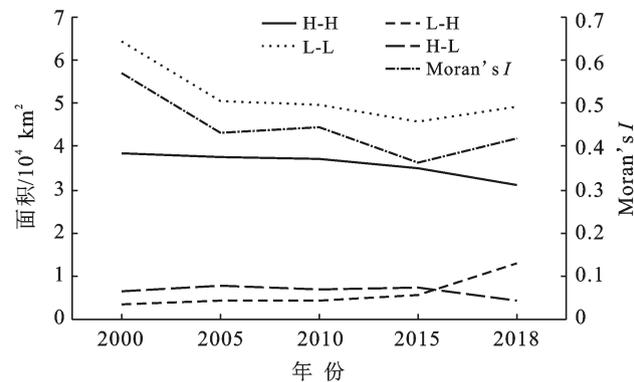


图 3 川西 2010—2018 年生态安全 Moran's I 指数及空间关联区面积图

3.3.2 局部空间自相关分析 利用 GeoDa 生成研究区生态安全局部空间自相关 LISA 聚类图(图 4),研究区生态安全聚集性具有明显的地域差异。东部为 H-H 区,主要包括若尔盖、红原、松潘、茂、汶川东南部、康定北部、以及泸定和木里部分地区。H-H 区主要分布于湿地绿洲地区或者地势较为平坦的区域。空间相关性不显著区域主要位于中部地区,如壤塘、道孚、雅江等地。L-L 区即低值聚集区主要分布在西部的石渠、色达、德格等地,这些区域地势险峻,多为高山峡谷地带,且草地荒漠化程度严重。从图 4 可以看出,2000 年之后川西生态安全空间聚集分布格局变异特征明显,高值聚集区向川西中部扩张,面积有大幅度缩减;位于西南部的白玉、巴塘、理塘等 L-L 低值聚集区面积明显减少。2015 年较之前年份生态安全 H-H 区在东北部若尔盖、阿坝等地面积缩减。到 2018 年东部雅江、九龙、木里等 H-H 区面积有所下降,这些区域受人类干扰影响较大,植被和草地面积减少,建设用地面积增多,水土流失加重,生态环境恶化。

3.4 川西生态安全影响因素分析

因子分析法最早由英国心理学家斯皮尔曼提出^[27],研究众多变量间的关系,用较少的几个公因子

来表达原始变量的主要信息。本文运用 SPSS 提供的 KMO 统计检验和 Bartlett 球形检验方法来判断数据是否适合因子分析,得到 KMO 检测值为 0.701, Bartlett 检测值 sig. 为 0.000。根据 Kaiser 给出的度量标准可知原有变量适合做因子分析。对标准化处理后的指标数据进行因子分析得到碎石图如图 5 所示。由图 5 可以看出,从第 4 个因子起曲线趋于平缓,有 3 个特征值大于 1 的主要因子,其方差累积贡献水平为 62.64%,能够较为全面地反映整体信息。

利用最大方差法对影响因素进行降维处理,对因子载荷矩阵进行正交旋转,得到旋转成分矩阵见表 5。因子 1 对气温、降水具有较高载荷,主要为气象影响因子。因子 2 对人口密度和 GDP 具有较高载荷,主要为社会经济影响因子。因子 3 对高程和植被覆盖度具有较高载荷,主要为地形植被因子。因此,将提取出来的 3 个主要因子分别命名为气象因子(X_1)、社会经济因子(X_2)和地形植被因子(X_3)。

对川西生态安全 5 个等级从低到高分分别赋值 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1。以生态安全值(Y)为因变量与因子分析提取出的 3 个因子进行多元线性回归,并通过了 0.01 的显著性检验。线性函数关系为:

$$Y=0.055X_1+0.012X_2+0.065X_3+0.548$$

气象因子、社会经济因子和地形植被因子的生态安全系数分别为 0.055, 0.012, 0.065。即川西生态安全主要受到地形植被的影响。植被是表征生态环境的重要因子,直接影响了生态环境的抵抗力和恢复力。高海拔地区气温常年较低,坡度陡峭,土壤贫瘠,不利于植被生长,容易发生地质灾害,对生态环境造成恶劣影响。川西地区地势“西高东低”的空间分布格局,使得川西生态安全状况表现出“东高西低”的状态,且与植被分布具有一致性。川西属于高原山地气候,气温偏低,降水较少,使得该地区生态环境先天脆弱。社会经济对川西整体生态状况影响较小,研究区地广人稀,人类活动影响只在小部分区域明显。

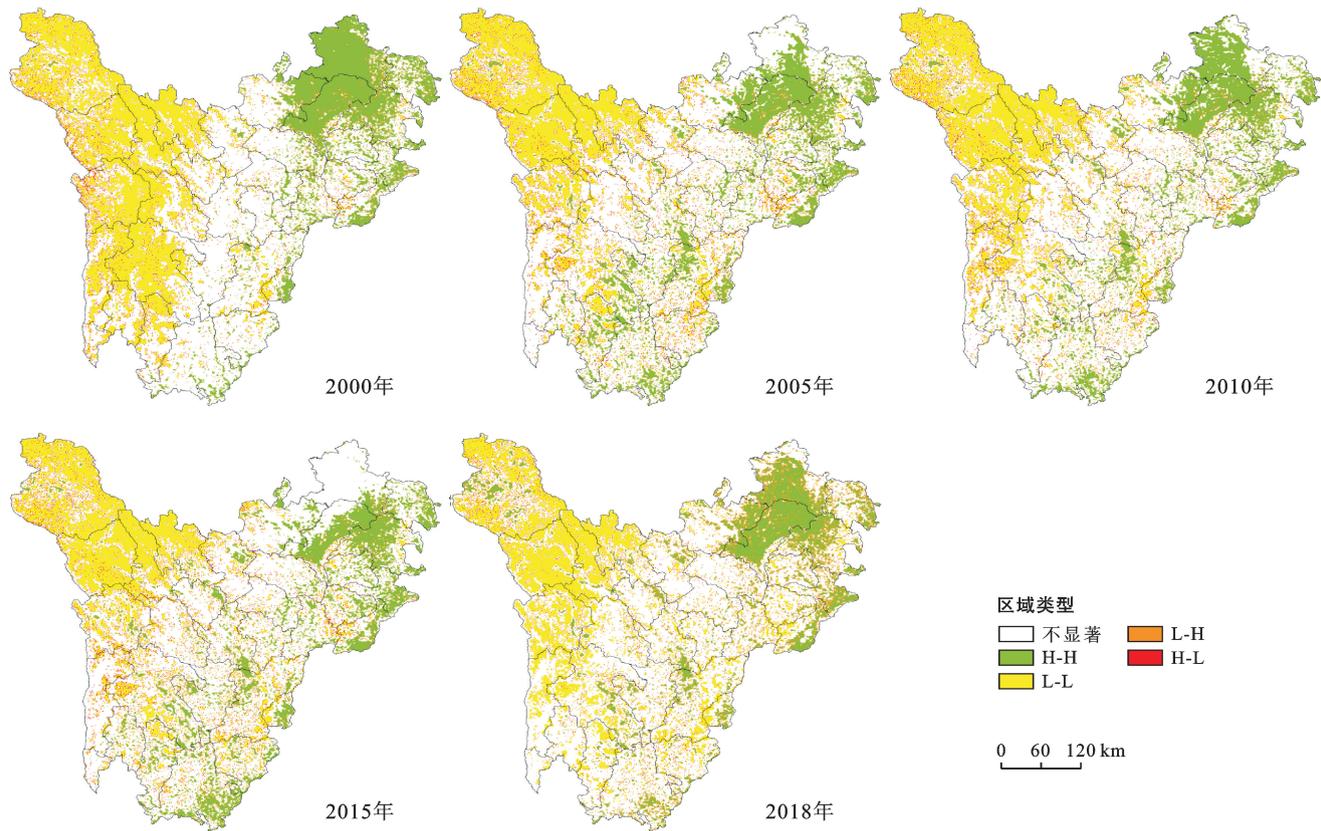


图 4 川西地区生态安全空间自相关分析(Lisa 聚集图)

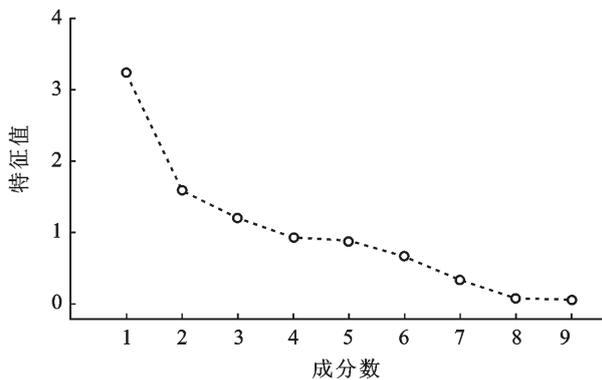


图 5 川西地区生态安全因子分析碎石图

表 5 川西地区生态安全影响因子旋转成分矩阵

准则层	指标层	主要因子		
		1	2	3
自然因素	高程	0.449	0.216	0.690
	坡度	-0.547	-0.081	-0.194
	气温	0.941	0.170	-0.023
	降水	0.898	0.224	0.058
	植被覆盖度	0.067	-0.004	0.859
	土壤可蚀性	-0.025	-0.027	-0.422
人为因素	GDP	0.212	0.952	0.017
	人口密度	-0.144	-0.964	-0.056
	人为干扰指数	-0.371	0.109	-0.470

4 结论与讨论

(1) 研究区生态安全总体状况不容乐观,地形因素直接导致了川西生态整体上呈现出“东高西低”的空间分布格局。从时间变化上来看,2000—2018 年期间,川西地区生态安全在小幅度波动中呈现出改善趋势。

(2) 川西地区生态安全空间聚集性强,且具有明显的地域差异。红原、松潘一带为高值聚集区,低值聚集区分布在色达、德格一带。2000—2018 年,低值聚集区大面积缩减,研究区西部地区生态安全状况明显好转,东部地区生态出现小幅度恶化趋势。地形植被是川西生态安全最主要的影响因子。

本文基于模糊数学理论,从栅格空间尺度对川西地区生态安全状况、时空变化规律以及影响因素进行了探究。川西地区生态安全状况整体偏差,这与徐洲洋^[28]在四川生态系统健康时空动态研究中的结果基本一致。西部地区地势陡峭,气候条件恶劣,是其主要生态安全脆弱区,这与前人^[7]研究结果相似。但本文与前人相比,基于川西地区自然生态状况和人类发展对于生态环境的迫切需求,减少了对社会、经济、人文等相关统计资料的依赖,强化了自然生态状况评价指标的使用,以更加科学合理的角度构建指标评价

体系。采用遥感和 GIS 技术,克服了以往大范围区域内以行政界线划分评价单元的桎梏,使得评价结果更加精细化。采用模糊数学法实现川西生态安全评价,与其他研究相比充分考虑到生态安全等级划分的模糊特性,提高了评价的准确性。

区域生态安全评价是一项复杂而又系统的工程,研究还存在着一定的不准确性和局限性。受限于川西地区数据的匮乏和资料获取的困难程度,研究未能引入地下水资源和土壤岩性等其他生态指标,致使研究结果存在一定的片面性。此外,如何依托遥感和 GIS 技术的飞速发展,从更加细小尺度上全面评价区域生态安全以及如何有效预测未来生态安全变化以保证科学调控区域生态资源实现人类社会永续发展是未来需要高度关注和克服的领域。

[参 考 文 献]

- [1] 陆波,方世南.习近平生态文明思想的生态安全观研究[J].南京工业大学学报(社会科学版),2020,19(1):27-36,111.
- [2] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet [J]. *Science*, 2015, 347(6223):125-9855.
- [3] 叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.
- [4] 汪朝霞.基于 GIS 格网模型的重庆市生态安全时空格局研究[D].重庆:重庆师范大学,2019.
- [5] Wang Haiming, Wang Hai'e, Sun Hongyang, et al. Assessment of the ecological security in the Three Gorges reservoir area by using the ecological footprint method [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(6): 891-900.
- [6] 丁道军.基于 PSR 模型的川西生态脆弱区生态安全评价研究[D].四川 成都:西南石油大学,2015.
- [7] 陈蓓.基于生态足迹模型的川西南高原地区生态安全评价:以甘孜藏族自治州为例[J].中国农业资源与区划,2019,40(6):185-190.
- [8] Zhou Kehao, Liu Yaolin, Tan Ronghui, et al. Urban dynamics, landscape ecological security, and policy implications: A case study from the Wuhan area of central China [J]. *Cities*, 2014, 41(A): 141-153.
- [9] 雷金睿,陈宗铸,陈毅青,等.1990—2018 年海南岛湿地景观生态安全格局演变[J].生态环境学报,2020,29(2): 293-302.
- [10] 李益敏,谢亚亚,刘雪斌,等.基于 GIS 的云南泸水市生态安全评价[J].人民长江,2019,50(6):56-62,187.
- [11] 邹长新,陈金林,李海东.基于模糊综合评价的若尔盖湿地生态安全评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(3):53-58.
- [12] 刘祖涵.城市生态安全模糊综合评价研究:以萍乡市为例[J].甘肃科技,2019,35(8):11-14.
- [13] 四川省人民政府.四川省“十三五”生态保护与建设规划 [EB/OL]. http://www.sc.gov.cn/10462/11555/11563/2017/6/7/10424723_shtml, 2017-04-19/2020-09-25.
- [14] 宋晓华.基于 GIS 的地质灾害评估研究[D].北京:北京建筑大学,2013.
- [15] 王娟.基于遥感和 GIS 的成都平原地区土地利用变化与生态安全评价研究[D].四川 成都:四川师范大学,2018.
- [16] 王怡然,张大红,吴宇伦.基于 DPSIR 模型的森林生态安全时空变化研究:以浙江省 79 个县区为例[J].生态学报,2020,40(8):2793-2801.
- [17] 张雅娴,樊江文,王穗子,等.三江源区生态承载力与生态安全评价及限制因素分析[J].兽类学报,2019,39(4):360-372.
- [18] 朱玉林,李明杰,顾荣华.基于压力—状态—响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(12):2057-2064.
- [19] 王振波,梁龙武,方创琳,等.京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素[J].生态学报,2018,38(12):4132-4144.
- [20] 彭文甫,王广杰,周介绍,等.基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [21] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5):381-383.
- [22] 严恩萍,林辉,王广兴,等.1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J].生态学报,2014,34(20):5962-5973.
- [23] 周荣,刘鹏.基于灰色预测模型的土地生态安全评价[J].中国环境管理干部学院学报,2019,29(4):36-40.
- [24] 燕守广,唐欢欢,曹学章,等.江苏省陆域生态红线区域生态安全评价[J].生态环境学报,2016,25(10):1638-1643.
- [25] 李悦,袁若愚,刘洋,等.基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价[J].生态学杂志,2019,38(3):847-855.
- [26] 安佑志.基于 GIS 的城市生态风险评价[D].上海:上海师范大学,2011.
- [27] 刘江涛,刘立佳. SPSS 数据统计与分析应用教程[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [28] 徐洲洋.基于 PSR 模型的四川生态系统健康时空动态研究[J].国土资源遥感,2020,32(2):251-258.