

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.04.25

引用格式: 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. (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.)

雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态评价及预测

姚 昆¹, 张存杰², 何 磊³, 李玉霞⁴, 李小菊⁵

(1. 西昌学院资源与环境学院, 西昌 615000; 2. 国家气候中心, 北京 100081; 3. 成都信息工程大学软件工程学院, 成都 610103; 4. 电子科技大学自动化工程学院, 成都 610054; 5. 马来西亚博特拉大学工程学院, 吉隆坡 43400)

摘要: 为及时了解雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态变化和未来发展规律, 研究选取高程、坡度和土地利用类型等 9 项指标, 将遥感和地理信息系统技术与层次分析 - 主成分熵权模型相结合, 对其 2000—2018 年间生态环境脆弱性进行动态评价, 并引入 CA - Markov 模型对 2021 年的发展状况进行模拟预测。主要成果如下: ①该地区生态环境整体呈现出由北向南脆弱程度逐渐降低的分布变化; ②脆弱性栅格比例呈现微度、轻度、潜在、中度和重度逐渐降低的变化形态; ③预测精度验证表明, CA - Markov 模型适用于该地区生态环境脆弱性的预测且准确性较高; ④区域脆弱性综合指数分别为 2.539 2, 2.501 6, 2.485 6, 2.460 7 和 2.436 6, 2021 年的值预测为 2.428 5, 表明区域整体生态环境质量得到提升且发展良好。研究揭示了该地区生态环境脆弱性动态变化的规律和未来发展状况, 能作为该地区生态环境保护措施制定的理论参考。

关键词: RS; GIS; AHP - PCA 熵权模型; CA - Markov 模型; 雅砻江中上游流域

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 - 070X(2020)04 - 0199 - 10

0 引言

生态环境脆弱性评价作为学术界研究的热门领域之一, 是宏观衡量区域生态环境质量优劣程度的一项重要参考^[1-3]。科学实现其动态评价与未来发展状况分析, 对实现区域生态环境保护与恢复治理措施的制定有重要的科学参考价值^[4]。

针对区域生态环境脆弱性评价, 学者们已在其定义^[1-3]、地区选择^[1,5,6]、指标体选择^[3,7-10]和计算模型的选择^[3,11-13]等方面取得诸多成果。特别是已经形成层次分析(analytic hierarchy process, AHP)^[3,12,14]、主成分^[2,15-17]、投影寻踪^[5,18-19]和信息熵^[20-21]等多种评价模型。近年来, 随着研究不断深入, 研究员发现仍有 2 项不足尚需完善: ①大多成果主要针对地区生态环境脆弱性现状进行评价或变化分析, 却忽视了未来发展状况的模拟预测^[22-23], 然而实现其发展预测却有着重要的意义^[24]; ②大多学者

在进行指标权重确定时, 均仅从其属性或数量结构单方面进行计算具有一定局限^[25-26]。李峰等^[25]借助 AHP - PCA 模型对典型煤矿城市的生态环境状况进行了评估分析; 夏兴生等^[26]以三峡库区(重庆段)为研究区, 结合 AHP - PCA 熵组合权重模型对该地区生态环境的脆弱状况进行了评价与分析; 陈朝亮等^[27]利用 AHP - Logistic 熵权模型实现了内江市地质灾害的风险评价。这些成果均表明, 利用最小相对信息熵模型将各指标从属性和数量结构计算得到的权重, 进行优化重组而计算得到的权重比从单方面计算的结果更具准确性^[28-29]。

《四川省“十三五”生态保护与建设规划》指出, 加强雅砻江流域生态环境的监测与保护是实现西部生态高原建设目标的重要基础^[30], 但截至目前却少有关于该地区脆弱性的研究^[19], 且更未涉及未来发展预测。为实现该地区生态环境脆弱状况的实时变化监测及未来发展的预测, 本文将 GIS 和 RS 技术与 AHP - PCA 熵权模型相结合, 完成该地区 2000—

收稿日期: 2019 - 11 - 29; 修订日期: 2020 - 03 - 07

基金项目: 国家科技部全球变化与应对重点研发项目“气候极端事件风险防范决策支持系统研制”(编号: 2020YFA0608203)、四川省科技厅重点研发项目“集成机器学习的自然植被对气候变化响应研究”(编号: 2020YFS0338)和“基于多源数据的典型目标要素智能化提取与解释研究”(编号: 2020YFG0296)共同资助。

第一作者: 姚 昆(1991 -), 男, 硕士, 助教, 主要从事 GIS 技术应用与教学。Email: jiangshan996@126.com。

通信作者: 张存杰(1966 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事干旱气候变化及影响评估研究。Email: zhangcj@ema.gov.cn。

2018 年生态环境脆弱性的动态评价及变化规律的探索分析;同时,引入 CA - Markov 模型预测其 2021 年发展状况,以期为该地区生态环境的保护与恢复重建提供科学的参考依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

该地区位于四川省西北部(N30°32' ~ 34°20', E97°20' ~ 101°44'),总面积约 67 257 km²,主要包括石渠、德格、甘孜、色达和新龙等 7 个县级行政单元(图 1)。地形呈现西北向东南倾斜的变化形态,西北相比东南地区地势相对陡峭,地区海拔平均值约 4 929.26 m,地貌类型以中山和高山地貌为主。区域年平均气温相对较低约 1.14 ℃,年累计降水量在 451.23 ~ 962.86 mm 之间且主要集中于 5—10 月。地区土地生态景观以有林地、疏林地和中高覆盖度草地为主,耕地和建设用地资源相对稀缺。草毡土、黑毡土和灰褐土等为其主要的土壤类型。受海拔高、温度低、土壤贫瘠和地质灾害频发等自然条件的限制,区域生态环境先天性脆弱。

1.2 数据来源

研究的基础数据主要是利用遥感技术和统计手段 2 种方法获取(表 1)。

表 1 研究区基础数据来源及描述

Tab.1 Source and description of the basic data for research areas

名称及描述	数据来源
雅砻江中上游流域 90 m 空间分辨率 DEM 数据	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
雅砻江中上游流域 1:100 万 矢量土壤类型数据	中国土壤数据库
2000—2018 年研究区及周边 气象观测数据	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)
2000—2018 年研究区 1:10 万 土地利用类型矢量数据,分为 水田、旱地、有林地和疏林地 等 22 个二级类	中国科学院资源环境科学数据 中心(http://www.resdc.cn)
各年份 6—8 月的 MODIS - NDVI 数据,空间分辨率 250 m, 周期 16 d,采用最大化合成获 取最终成果数据	NASA
各年份各县的人口和 GDP 统 计数据	《四川省统计年鉴》及各县统 计公报等资料
全国 1:10 万土壤侵蚀强度等 级遥感解译成果矢量数据	国家地球系统科学数据共享平 台(http://loess.geodata.cn)

2 研究方法

2.1 指标与数据

2.1.1 指标体系构建

为科学合理地实现指标体系的构建,在参考已有成果的基础上^[5,11,18-19],遵循指标选取的代表性、数据可获得性与完整性等原则,结合地区实际,最终从地形、土地生态、气候和社会经济 4 个方面,选取高程、坡度、土地利用类型、NDVI、土壤类型、年平均气温、年累计降水量、GDP 和人口共计 9 项评价指标。

2.1.2 基础数据处理

1)数据插值。研究采用 Anusplin4.37 工具完成气象数据的空间插值^[31],而针对社会经济数据则采用 ArcGIS10.4 软件利用反距离权重插值模型完成,数据空间分辨率均为 250 m(图 2)。

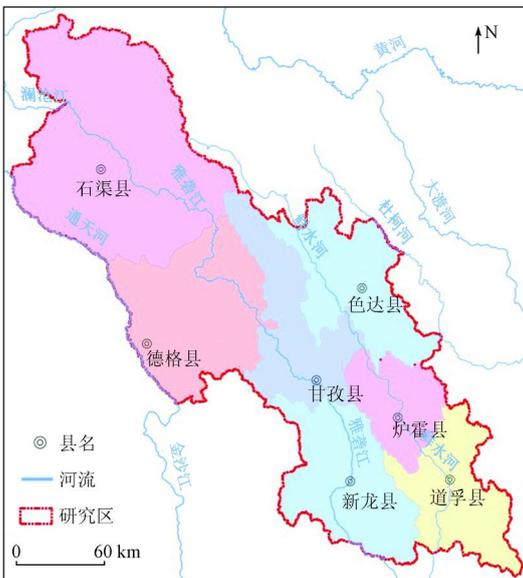
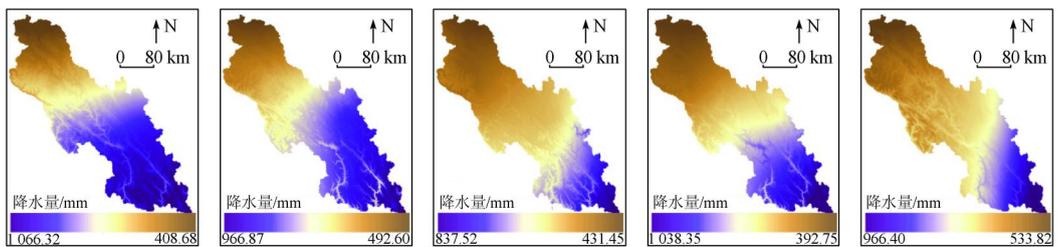


图 1 研究区地理位置

Fig1 Geographical location of the study area



(a)2000 年降水量 (b) 2005 年降水量 (c) 2010 年降水量 (d) 2015 年降水量 (e) 2018 年降水量

图 2-1 流域年累计降水量和年均气温空间插值

Fig.2-1 Annual precipitation and average annual temperature spatial interpolation in the basin

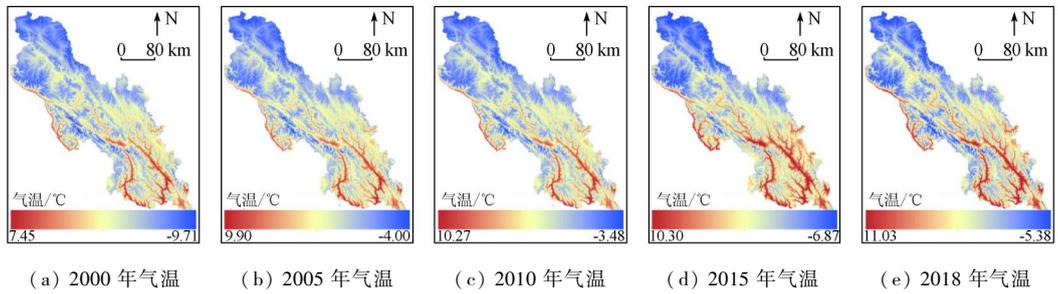


图 2-2 流域年累计降水量和年均气温空间插值

Fig. 2-2 Annual precipitation and average annual temperature spatial interpolation in the basin

2) 基础数据分级。由于各指标在维度和表达方式上存在明显差异无法直接比较,在参考已有成果的基础上^[11,19,32],将 9 项指标均分为 5 个等级。一方面,土地数据主要在参考已有成果的基础上^[11,19,32]结合地区实际将各地类进行初分级,然后将其与土壤侵蚀类型/强度图叠加进行分类修正(表 2);土壤类型则在参考已有成果的基

础上^[18,19,33],结合其贫瘠程度和保水性等完成分级(表 2)。另一方面,针对其他 7 项指标则采用“自然间断点分级”的方式完成,其以数据空间“空间聚类”原理为基础,具有操作简便且准确度较高的优势^[19,32](图 3),图例数字为指标分级数值,指标若与脆弱性呈正相关,数值越大生态环境越脆弱;负相关则相反。

表 2 研究区土地利用和土壤类型分级

Tab. 2 Land use and soil type classification in study area

指标	分级				
	1	2	3	4	5
土壤类型	泥炭土、草甸土、黑毡土和粗骨土	褐土	湖泊、水库、灰褐土、棕壤和棕色针叶林土	寒冻土、沼泽土、石质土和暗棕壤	草毡土
土地利用类型	有林地、灌木林地和高度盖度草地	中覆盖度草地、疏林地、沼泽地和旱地	低覆盖度草地、河渠、湖泊、水库坑塘和滩地	城镇用地、农村居民点和其他建设用地	裸岩石质地

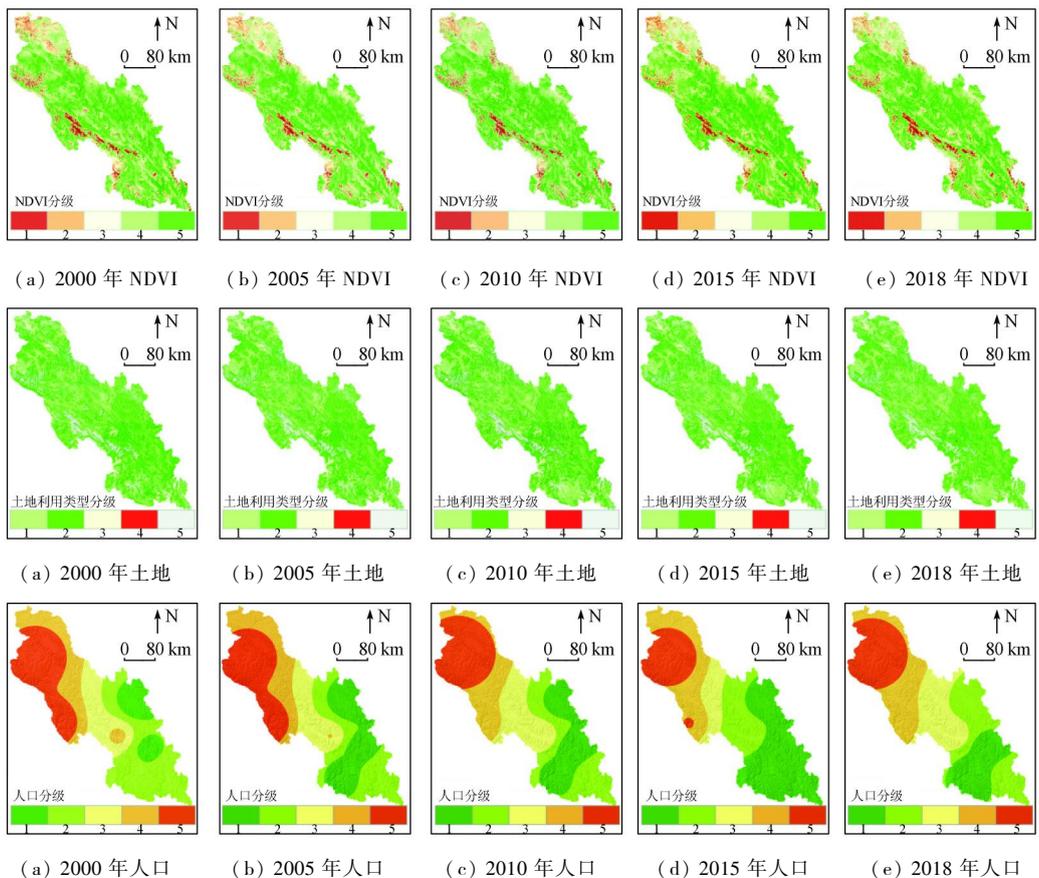


图 3-1 研究区各指标分级

Fig. 3-1 Classification of indicators in the study area

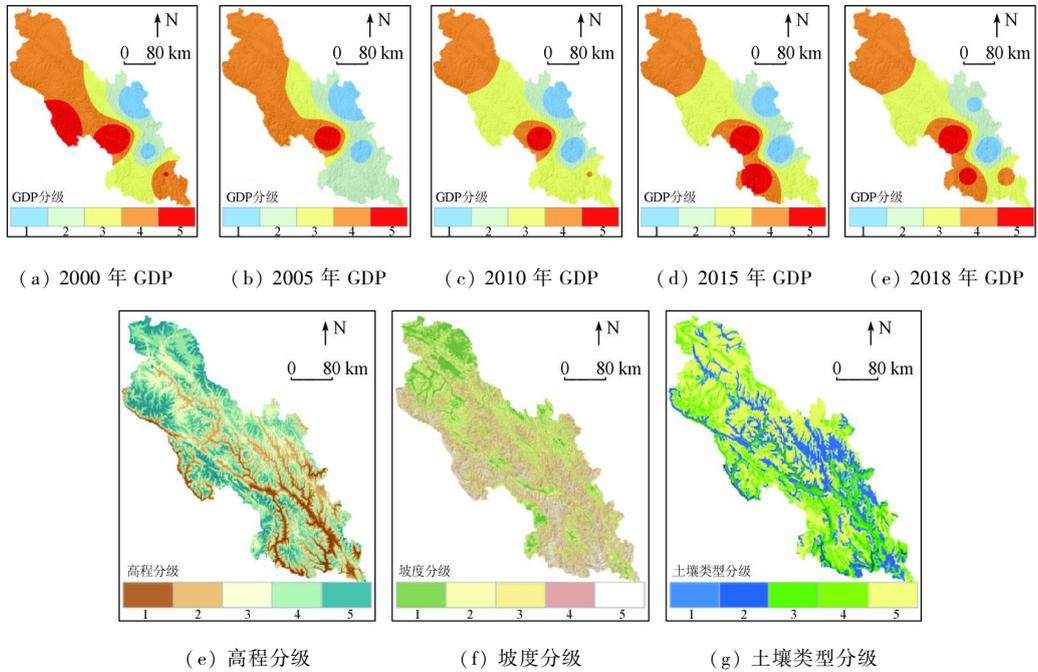


图 3-2 研究区各指标分级

Fig. 3-2 Classification of indicators in the study area

3) 坐标系统与分辨率统一。为确保各指标在空间位置上有较好的重合性,研究规定 9 项指标均采用 Krasovsky_1940_Albers 坐标系统,空间分辨率均为 250 m。

2.2 评价模型

2.2.1 数据标准化

为进一步提高各指标数据的收敛性,采用极差模型完成各数据的标准化处理^[2,6]。模型包括正相关指标和负相关指标。

正相关指标为:

$$K_{xy} = \frac{C_{xy} - C_{x,\min}}{C_{x,\max} - C_{x,\min}}, \quad (1)$$

负相关指标为:

$$K_{xy} = 1 - \frac{C_{xy} - C_{x,\min}}{C_{x,\max} - C_{x,\min}}, \quad (2)$$

式中: K_{xy} 为标准化结果; C_{xy} 为第 x 个指标在第 y 个像元的数值; $C_{x,\min}$ 和 $C_{x,\max}$ 分别为第 x 个指标的最小和最大值。

2.2.2 权重计算

1) AHP 权重。AHP 是一种从指标属性结构出发完成权重计算的方法^[3,14]。研究借助 yaahp10.5 软件完成指标权重计算,一致性为 $0.0478 < 0.10$ 满足要求,研究区各指标 AHP 权重计算结果如表 3 所示。

表 3 研究区各指标 AHP 计算权重

Tab. 3 AHP calculation weight of each index in the study area

决策层	方案层	指标层	权重	
生态环境脆弱性	土地生态 (0.528 7)	NDVI	0.307 5	
		土地利用类型	0.163 4	
		土壤类型	0.057 9	
	气候	(0.268 7)	年降水量	0.089 6
			年均气温	0.179 1
	地形	(0.134 3)	高程	0.100 6
			坡度	0.033 6
	社会	(0.068 3)	GDP	0.045 5
			人口	0.022 8

2) 空间主成分分析(spatial principal component analysis,SPCA) 权重。SPCA 是一种从指标数量结构完成权重计算的方法^[15-16]。研究选取累计因子贡献率达到 85% 以上的前 5 个变量为主成分分量。基本思路为: 相关系数矩阵的构建; 特征值、因子贡献和累计贡献率以及主成分因子的确定; 借助数学模型完成权重计算,模型为:

$$W_j = H_j / \sum_{j=1}^m H_j \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (3)$$

$$H_j = \sum_{k=1}^m \lambda_{jk}^2 \quad (j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, 5), \quad (4)$$

式中: H_j 为公因子方差; W_j 为各指标权重; m 为指标总数; j 为指标; k 为主成分个数。

3) 最小相对信息熵。研究 W_{1j} 和 W_{2j} 分别为利用 AHP 和 SPCA 计算的各指标权重,则优化后的权重为 W_j ^[26-27]。模型为:

$$\min F = \sum_{j=1}^m w_j (\ln w_j - \ln w_{1j}) + \sum_{j=1}^m w_j (\ln w_j - \ln w_{2j}) \quad s. t \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1, w_j > 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

同时,由拉格朗日中值定理可知:

$$w_j = (w_{1j}w_{2j})^{0.5} / \sum_{j=1}^m (w_{1j}w_{2j})^{0.5} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

研究利用 AHP - PCA 熵组合权重模型完成不同年份各指标数据的最终权重计算(表 4)。

表 4 2000—2018 年流域地区各指标权重

Tab. 4 Weight of indicators in the basin area from 2000 to 2018

指标	W _{1j}	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
		W _{2j}	W _j								
NDVI	0.307 5	0.064 4	0.163 1	0.076 8	0.173 8	0.077 8	0.176 5	0.061 3	0.161 8	0.077 9	0.177 2
土地利用类型	0.163 4	0.091 2	0.141 6	0.118 8	0.157 6	0.098 2	0.144 6	0.087 7	0.141 1	0.096 4	0.143 7
年降水量	0.089 6	0.119 7	0.120 1	0.059 3	0.082 5	0.071 7	0.091 5	0.079 1	0.099 3	0.067 9	0.089 3
DEM	0.100 6	0.060 8	0.090 7	0.094 6	0.110 3	0.084 2	0.105 0	0.058 9	0.090 7	0.082 6	0.104 4
年均气温	0.179 1	0.070 7	0.130 5	0.100 4	0.151 6	0.092 6	0.147 0	0.070 5	0.132 5	0.087 3	0.143 2
土壤类型	0.057 9	0.182 1	0.119 1	0.199 7	0.121 6	0.197 3	0.122 0	0.190 4	0.123 8	0.195 4	0.121 8
坡度	0.033 6	0.167 4	0.087 0	0.193 8	0.091 3	0.198 1	0.093 1	0.195 2	0.095 5	0.198 9	0.093 6
GDP	0.045 5	0.127 1	0.088 2	0.055 9	0.057 1	0.063 8	0.061 5	0.141 7	0.094 7	0.077 7	0.068 1
人口	0.022 8	0.116 6	0.059 8	0.100 7	0.054 2	0.116 4	0.058 8	0.115 1	0.060 4	0.115 8	0.058 8

2.2.3 脆弱性指数

生态环境脆弱性指数 (ecological vulnerability index, EVI) 能实现区域脆弱状况的定量描述^[4,34], 模型为:

$$EVI = \sum_{j=1}^m (K_j w_j) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

式中: EVI 为脆弱性指数, 值越大脆弱程度越高; K_j 为指标标准化的结果; w_j 为各指标权重。

2.3 脆弱性分等级

研究先采用“自然间断点分级法”将各年份 EVI 值进行分级, 分别找到各等级上下限阈值, 最后取同等级阈值的均值为数据分类最终的标准, 最后将 EVI 分为 5 级: I 级, 潜在 (<0.284 0); II 级, 微度 [0.284 0, 0.495 8]; III 级, 轻度 [0.495 8, 0.642 8]; IV 级, 中度 [0.642 8, 0.744 7]; V 级, 重度 (≥0.744 7)。等级越高脆弱程度越严重。

2.4 脆弱性综合指数

脆弱性综合指数是衡量区域生态环境整体状况的客观指标^[15,34], 模型为:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i \frac{A_i}{S} \quad (8)$$

式中: E 为脆弱性综合指数; P_i 为脆弱性等级; A_i 为第 i 个等级的栅格数量; n 为等级总数; S 为栅格总数。研究中 E 数值越小, 则区域整体的生态环境脆弱程度越低。

2.5 CA - Markov 模型

元胞自动机 (cellular automata, CA) 是一种能实

现巨复杂系统时空演变过程模拟的数学模型^[35], 模型为:

$$S_{ij}^{t+1} = f_q(S_{ij}^t) \quad (9)$$

式中: S 为第 ij 元胞的状态; t 和 t + 1 为时刻; f 为转换函数; q 为邻域。

马尔可夫模型 (Markov) 的基本原理是通过利用系统已有离散状态的经验传递概率来实现其未来发展状况的模拟预测^[36-38]。若一个系统的变化过程存在马尔可夫性, S₀ 为其在初始时刻的状态, 那么 e 个周期后的状态可被定义为:

$$S_e = S_0 P_e \quad (10)$$

式中: S_e 为 e 个周期后的状态; e 为周期个数; P_e 为系统经验传递概率矩阵。

研究以 IDRISI17.0 软件为工具, 以 2005 和 2010 年数据为基础计算其概率矩阵, 以迭代系数取 10, 过滤器为 5 × 5, 等比例系数为 0.15 的参数设置, 完成 2015 年脆弱性成果的预测, 采用 CROSSTAB 模块完成真实和模拟成果 Kappa 系数的计算与精度验证。同理, 完成该地区 2021 年的模拟预测。

3 结果与分析

3.1 空间分布

研究结合空间分布特征(图 4)分析可知, 流域生态环境脆弱性整体呈现出由北向南逐渐降低的空间变化, 南部相比北部地区的脆弱程度相对较低。

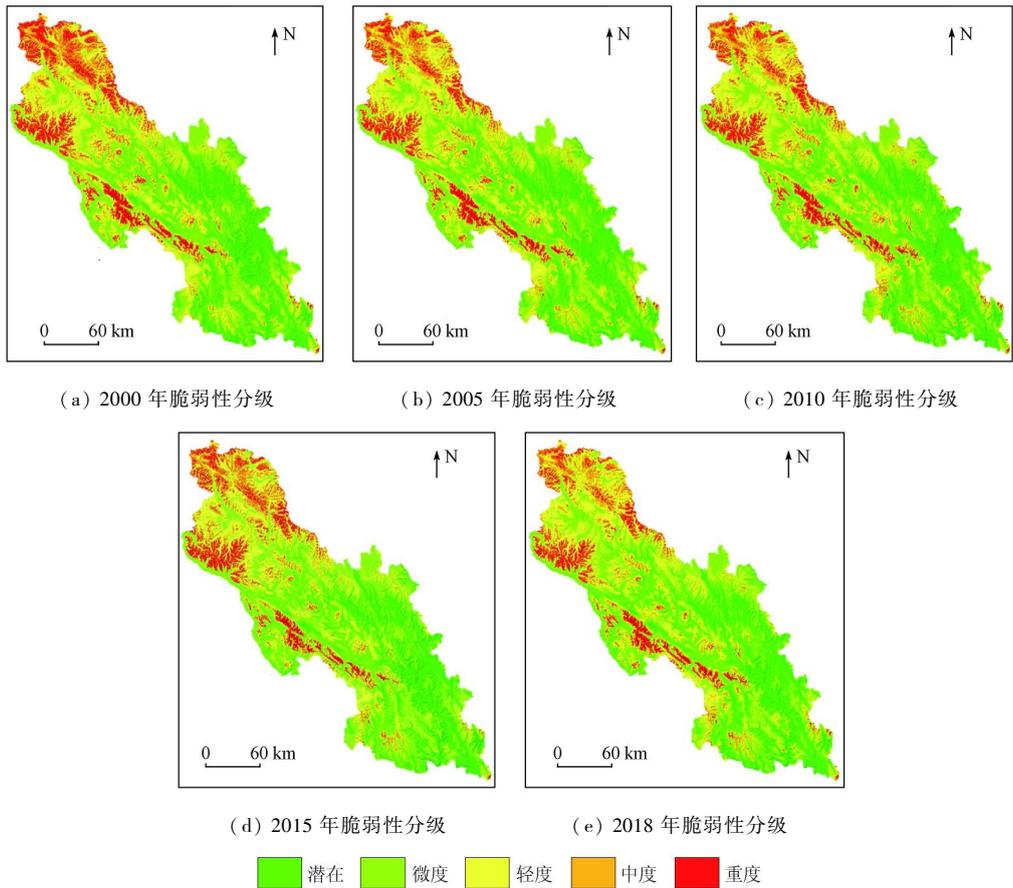


图 4 2000—2018 年雅砻江中上游流域生态环境脆弱性评价结果

Fig. 4 Assessment results of ecological environment vulnerability in the middle and upper reaches of Yalong River from 2000 to 2018

同时,流域地区各等级脆弱区在空间分布上也呈现出明显的区域差异性。潜在和微度脆弱区的空间分布范围最广,约占据整个地区的 65%,其大部分主要分布于雅砻江和鲜水河干流两侧地势相对平缓的中山区,小部分位于河谷两侧高植被覆盖的高山区,结合土地利用类型可知,其是流域地区社会经济发展的核心区居民点和建设用地主要集中区。此外,其主要的土地景观类型包括有林地、高覆盖度草地和耕地等。轻度脆弱区约占据整个地区的 25%,大多主要集中于流域的河谷两侧的中高山区,其人口密度相对较低,人类活动不明显,结合地形资料分析可知,其是区域水土流失和生态环境保护重要的

缓冲区与重点监测预防区,主要的生态系统相对复杂多样,土地景观以中覆盖度草地和疏林地为主。中度和重度脆弱区在整个研究区的占比最小,约为 10%,主要集中分布于石渠县北部和西南部,在甘孜县和德格县西南部地区也均有零散分布,结合这 2 个等级脆弱区的环境特征可知,其主要的地貌类型以高山和高原为主,具有海拔高、温度低和生态系统结构相对简单,以低覆盖度草地和裸岩石质地为主。

3.2 结构特征

对各等级脆弱区栅格比例进行分析,能有助于进一步全面了解该地区生态环境脆弱状况的结果差异和变化特征(表 5)。

表 5 2000—2018 年雅砻江流域各等级脆弱区栅格数及比例

Tab. 5 Ratio of grid number of vulnerable areas at different levels in Yalong River Basin from 2000 to 2018

等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	栅格数	比例/%								
潜在	202 043	18.77	205 514	19.10	205 124	19.06	207 976	19.33	215 774	20.05
微度	395 374	36.74	398 513	37.03	405 941	37.72	413 468	38.42	412 936	38.37
轻度	266 690	24.78	275 921	25.64	273 948	25.46	271 215	25.20	271 778	25.26
中度	120 452	11.19	119 127	11.07	119 614	11.12	117 882	10.95	113 105	10.51
重度	91 576	8.51	77 060	7.16	71 508	6.64	65 594	6.10	62 535	5.81

分析表 5 可知,各等级栅格比例在结构分布上存在较明显的差异性,其比例大小关系为微度 >

轻度 > 潜在 > 中度 > 重度。以2018年为例,微度的比例最大为38.37%,重度最小仅为5.81%,而轻度、潜在和中度的比例分别为25.26%,20.05%和10.51%,处于居中且数值依次降低。同时,2000—2018年间轻度及以下程度脆弱区的栅格比例均占据整个地区的80%以上,客观程度上可以判定研究期内该地区生态环境脆弱性整体持续处于中等脆弱

水平。

3.3 预测结果

2015年真实与模拟成果的Kappa系数检验值为0.8576,表明模拟结果整体精度较高,CA-Markov模型适用于该预测研究。同时,为进一步研究该地区生态环境脆弱性未来发展状况,又对其2021年状况进行模拟预测(图5)。

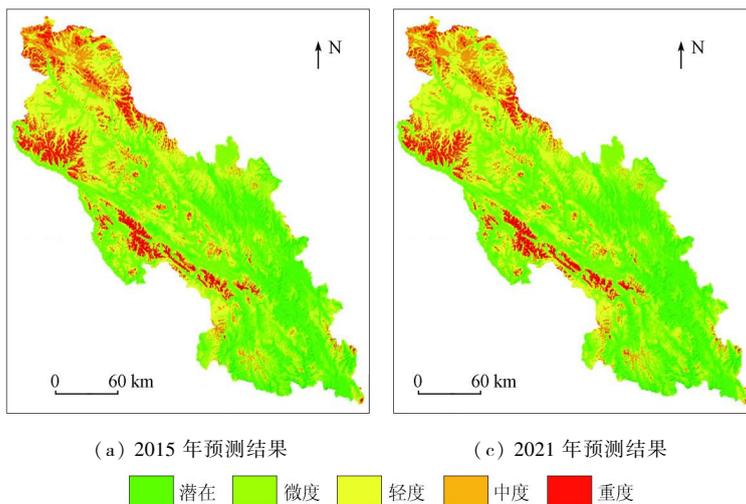


图5 流域2015和2021年脆弱性预测模拟结果
Fig. 5 Simulation results of vulnerability prediction in 2015 and 2021

通过分析2015年预测模拟结果可知:其空间分布特征与真实成果基本吻合;2015年潜在、微度、轻度、中度和重度预测的栅格比例分别为19.00%,37.73%,25.79%,11.87%和5.62%,通过与该年份各类别真实比例进行对比可以发现,各类别预测的准确度呈现潜在 > 微度 > 轻度 > 中度 > 重度的变化状态;精度检验表明CA-Markov模型在实现该地区生态环境脆弱性预测分析时,不仅整体的预测精度较高,各类别预测精度也较高;2021年预测成果显示,潜在、微度、轻度、中度和重度各类别的栅格比例分别为20.18%,38.02%,25.71%,10.96%和5.13%,相比2018年潜在、轻度和重度的占比呈增加的变化趋势,而微度和重度则表现出减少的变化趋势。

3.4 趋势变化

研究利用式(8)对2000年、2005年、2010年、2015年和2018年该地区的E值进行计算,其数值分别为2.5392,2.5016,2.4856,2.4607和2.4366,呈现出逐渐降低的变化趋势,这客观表征出近20a内,流域地区生态环境整体呈现出好转的发展状态。同时,研究预测该地区2021年的ESVI为2.4285,也呈现下降的变化趋势,这预示着随着系列环境措施的有效实施,区域生态环境整体将继续朝着持续好转的方向发展。

4 讨论与结论

4.1 讨论

以往单一的CA模型虽然能实现系统的空间演变,但其主要着眼于元胞的局部相互作用,存在局限性;单一的Markov模型虽然能对系统整体的发展趋势进行预测,但是不能进行空间格局变化的分析;而CA-Markov模型将两者进行有机结合则能有效弥补以上不足,既能有效实现系统空间格局的演变分析,又能对其未来发展状况进行科学预测模拟。CA-Markov模型最初被广泛运用于区域土地利用变化的预测研究中,随着研究进程不断加快,其也逐渐被用于植被覆盖度和土壤侵蚀的预测研究,且取得了较好的效果。因此,本研究尝试采用CA-Markov模型完成雅砻江中上游流域生态环境脆弱性状况的模拟预测,并结合Kappa系数对预测结果进行精度验证,结果表明该模型适用于地区生态环境脆弱性的模拟预测,其可作为区域生态环境脆弱性模拟预测的一种技术手段。

4.2 结论

研究以雅砻江中上游流域为对象,完成其2000—2018年生态环境脆弱性的动态评价及预测,主要结论如下:

1) 雅砻江中上游流域整体呈现北部相比南部地区整体脆弱性相对较高的空间变化; 各等级栅格比例亦呈现微度、轻度、潜在、中度和重度逐渐下降的变化; 趋势变化和预测结果表明, 该地区整体的生态环境质量将继续好转。

2) 研究表明, 将 RS 和 GIS 与 AHP - PCA 熵权模型相结合进行生态环境脆弱性评价具有较高的准确性; 利用 CA - Markov 模型实现其未来发展预测的方法基本可行。同时, 与以往的研究不同, 本研究实现了多期成果长时间变化规律的探索且预测分析了区域生态环境未来发展, 较有效弥补了该空缺。

由于部分资料是利用统计手段获取的属性数据, 虽然可以通过栅格插值的方式将它们转换为空间数据, 该方法也具备一定的合理性, 但是数据精度仍然存在一定不足。因此, 更科学合理地实现基础数据的搜集与处理, 将有助于进一步提高研究成果的准确性。

参考文献 (References):

[1] 张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 749 - 757.
Zhang X N, Wang K L, Zhang W, et al. The quantitative assessment of eco - environment vulnerability in Karst regions of northwest Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 749 - 757.

[2] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1968 - 1975.
Wei J, Guo Y M, Sun L, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability for Sanjiangyuan area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1968 - 1975.

[3] 谢人栋, 赵翠薇. 基于栅格尺度的喀斯特槽谷区生态环境脆弱性时空分异研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 48 - 53.
Xie R D, Zhao C W. Spatio - temporal differentiation of ecological environment vulnerability in Karst trough region based on grid scale[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(4): 48 - 53.

[4] 林金煌, 胡国建, 祁新华, 等. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4155 - 4166.
Lin J H, Hu G J, Qi X H, et al. Ecological environmental vulnerability and its driving forces in urban agglomeration in the Fujian Delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4155 - 4166.

[5] 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, 28(2): 175 - 181. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2016. 02. 27.

[6] 田超, 杨夏捷, 鞠园华, 等. 吉林省西部地区生态脆弱性的动态评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 298 - 303.

Tian C, Yang X J, Ju Y H, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in western Jilin Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 298 - 303.

[7] 郭梦迪, 韩继冲, 施玥, 等. 基于 DPRISM 概念框架的生态环境脆弱性评价——以岷江上游为例[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(1): 128 - 134.
Guo M D, Han J C, Shi Y, et al. Assessment of eco - environmental vulnerability based on DPRISM conceptual framework: A case study of upper Minjiang River[J]. Compute Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(1): 128 - 134.

[9] 张梅, 罗怀良, 陈林. 资源型城市脆弱性评价——以攀枝花市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1170 - 1178.
Zhang M, Luo H L, Chen L. Vulnerability assessment of resource - based city: A case study of Panzhihua[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1170 - 1178.

[10] 仙巍, 李涛, 邵怀勇. 基于 SVM 的安宁河流域生态环境脆弱性评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(11): 180 - 184.
Xian W, Li T, Shao H Y. Ecological fragility evaluation of Anning River Basin in the Upper Yangtze River based on support vector machine[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(11): 180 - 184.

[11] 陈金月, 王石英. 岷江上游生态环境脆弱性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 471 - 479.
Chen J Y, Wang S Y. Ecological environment vulnerability assessment in upper reaches of Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(3): 471 - 479.

[12] 杨斌, 詹金凤, 李茂娇. 岷江上游流域环境脆弱性评价[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 138 - 144. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2014. 04. 22.
Yang B, Zhan J F, Li M J. Evaluation of environmental vulnerability in the upper reaches of the Minjiang River[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(4): 138 - 144. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2014. 04. 22.

[13] 王志杰, 苏媛. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 432 - 442.
Wang Z J, Su Y. Analysis of eco - environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City, near the water source midway along the route of the south - to - north water transfer project, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 432 - 442.

[14] 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(4): 380 - 383.
Yao J, Ding J, Ai N S. Assessment ecological vulnerability in the upper reaches of the Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004(4): 380 - 383.

[15] 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.
Zhong X J, Sun B P, Zhao Y, et al. Ecological vulnerability evaluation based on principal component analysis in Yunnan Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 109 - 113.

[16] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 等. 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2084 - 2090.
Liu Z J, Yu X X, Li L, et al. Vulnerability assessment of eco - environment in Yimeng Mountainous area of Shandong Province based

- on SRP conceptual model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2084 - 2090.
- [17] Shao H, Liu M, Shao Q, et al. Research on eco - environmental vulnerability evaluation of the Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(5): 1555 - 1568.
- [18] Shao H, Sun X, Tao S, et al. Environmental vulnerability assessment in middle - upper reaches of Dadu River watershed using projection pursuit model and GIS[J]. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2015, 10(4): 143 - 146.
- [19] Shao H, Sun X, Wang H, et al. A method to the impact assessment of the returning grazing land to grassland project on regional eco - environmental vulnerability[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2016, 56: 155 - 167.
- [20] 王 晓, 牛玉欣, 李 杨. 基于熵权计算的公路生态环境评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(9): 168 - 172.
Wang X, Niu Y X, Li Y. Entropy weight - based evaluation of ecological environment along highways[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(9): 168 - 172.
- [21] 牛玉欣, 许金良, 杨宏志, 等. GIS 支持下的公路生态环境评价[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 126 - 131.
Niu Y X, Xu J N, Yang H Z, et al. GIS - based eco - environmental quality evaluation of highway[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 126 - 131.
- [22] 欧定华, 夏建国, 欧晓芳. 基于 GIS 和 RBF 的城郊区生态安全评价及变化趋势预测——以成都市龙泉驿区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 49 - 58.
Ou D H, Xia J G, Ou X F. Regional ecological security assessment and change trend prediction in per - urban areas based on GIS and RBF: A case study in Longquanyi District of Chengdu City[J]. Geography and Geo - Information Science, 2017, 33(1): 49 - 58.
- [23] 靳 毅, 蒙吉军. 生态脆弱性评价与预测研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2646 - 2652.
Jin Y, Meng J J. Assessment and forecast of ecological vulnerability: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2646 - 2652.
- [24] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于 MCE - CA - Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268 - 277.
Zhang X J, Zhou Q G, Wang Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE - CA - Markov[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 268 - 277.
- [25] 李 峰, 刘小阳, 于雪涛, 等. 基于 AHP - PCA 模型的煤炭城市生态环境质量评价[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(5): 103 - 106, 110.
Li F, Liu X Y, Yu X T, et al. Eco - environmental quality evaluation of coal city based on AHP - PCA model[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2017, 44(5): 103 - 106, 110.
- [26] 夏兴生, 朱秀芳, 李月臣, 等. 基于 AHP - PCA 熵组权重模型的三峡库区(重庆段)农业生态环境脆弱性评价[J]. 南方农业学报, 2016, 47(4): 548 - 556.
Xia X S, Zhu X F, Li Y C, et al. Evaluation for vulnerability of agroecological environment in Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) based on AHP - PCA entropy combination weight mode[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(4): 548 - 556.
- [27] 陈朝亮, 彭树宏, 钱 静, 等. 基于 AHP - Logistic 熵权模型的西南浅丘区地质灾害分布特征研究——以内江市为例[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(2): 55 - 61.
Chen Z L, Peng S H, Qian J, et al. Distribution characteristics of geological hazards in southwestern shallow hill based on AHP - Logistic entropy combined weight model: A case study of Neijiang[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(2): 55 - 61.
- [28] 侯成成, 赵雪雁, 张 丽, 等. 基于熵组合权重属性识别模型的草原生态安全评价——以甘南黄河水源补给区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(8): 44 - 51.
Hou C C, Zhao X Y, Zhang L, et al. Ecological security evaluation of grassland based on combined weight on principle of relative entropy: A case of Yellow River water source areas of Gannan[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(8): 44 - 51.
- [29] 吴开亚, 金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 754 - 758.
Wu K Y, Jin J L. Attribute recognition method of regional ecological security evaluation based on combined weight on principle of relative entropy[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(6): 754 - 758.
- [30] 四川省人民政府. 四川省“十三五”生态保护与建设规划[EB/OL]. [2017 - 04 - 19]. <http://www.sc.gov.cn/zcwj/xxgk/NewT.aspx?i=20170421084123-670731-00-000>.
Sichuan Provincial People's Government. Sichuan Province's "13th Five - Year Plan" for ecological protection and construction [EB/OL]. [2017 - 04 - 19]. <http://www.sc.gov.cn/zcwj/xxgk/NewT.aspx?i=20170421084123-670731-00-000>.
- [31] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 875 - 886.
Tan J B, Li A N, Lei G B. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai - Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(4): 875 - 886.
- [32] 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.
- [33] 邓良基, 侯大斌, 王昌全, 等. 四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究[J]. 中国水土保持, 2003(7): 27 - 29, 48.
Deng L J, Hou D B, Wang C Q, et al. Soil erodibility characteristics of natural soil and dryland in Sichuan Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003(7): 27 - 29, 48.
- [34] 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.
Ma J, Li C X, Wei H, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7117 - 7129.
- [35] 任金铜, 莫世江, 陈群利, 等. 草海湿地区域土地利用/覆被变化与预测研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 385 - 392.

- Ren J T, Mo S J, Chen Q L, et al. Analysis and prediction of land use and land cover changes in Caohai Wetland areas [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 30 (3): 385 – 392.
- [36] 艾丽娅, 王少军, 张 志. 1997—2017 年锡林郭勒盟中部草原植被覆盖时空演变及预测 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 249 – 256.
- Ai L Y, Wang S J, Zhang Z. Spatial – temporal evolution and prediction of vegetation cover in central part of Xilingol grassland during 1997—2017 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 249 – 256.
- [37] Wang L X, Yu D Y, Liu Z, et al. Study on NDVI changes in Weihe Watershed based on CA – Markov model [J]. *Geological Journal*, 2018, 53: 435 – 441.
- [38] 龚雪梅, 冯文兰, 郑 杰, 等. 岷江上游土壤侵蚀敏感性评价 [J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(9): 68 – 74.
- Gong X M, Feng W L, Zheng J, et al. Assessment of soil erosion sensitivity in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(9): 68 – 74.

Dynamic evaluation and prediction of ecological environment vulnerability in the middle – upper reaches of the Yalong River

YAO Kun¹, ZHANG Cunjie², HE Lei³, LI Yuxia⁴, LI Xiaojun⁵

- (1. *College of Resource and Environment, Xichang University, Xichang 615000, China*; 2. *National Climate Center, Beijing 100081, China*; 3. *School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103, China*; 4. *School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*; 5. *Engineering College, Universitiy Putra Malaysia, Kuala Lumpur 43400, Malaysia*)

Abstract: In order to timely grasp the changes and future development of the ecological environment vulnerability, the authors selected 9 indicators, such as elevation, slope and land use type. Combining RS and GIS technology with AHP – PCA entropy weight model, the authors evaluated the vulnerability of the region in 2000—2018 dynamically, and introduced CA – Markov model for the development of 2021 simulation prediction. The following results have been achieved: ①The overall vulnerability of the region shows gradual decrease in gradient from north to south. ②The degree of vulnerability shows a gradual decrease in the proportion of micro, light, potential, moderate and severe grids. ③CA – Markov is not only suitable for predicting ecological vulnerability in the region, but also with high accuracy, and the proportion of potential, micro, mild, moderate and severe grids in 2021 is 20.18%, 38.02%, 25.71%, 10.96% and 5.13% respectively. ④Throughout the study period, the region's vulnerability composite index is 2.539 2, 2.501 6, 2.485 6, 2.460 7 and 2.436 6, respectively, and the 2021 value is 2.428 5. The continuous decrease of this value indicates that the overall ecological environment of the region has been effectively improved and will be in a state of change with sustained and good development. The study effectively reveals the law of dynamic change of ecological environment vulnerability in middle – upper reaches of the Yalong River Basin. With a more scientific analysis of its main drivers and future development, it can be used as an important theoretical reference for the formulation of ecological protection measures in the region.

Keywords: RS; GIS; AHP – PCA entropy model; CA – Markov model; the middle – upper reaches of the Yalong River Basin

(责任编辑: 陈 理)