

# 安宁河流域土地生态安全动态评价与预测

廖成浩<sup>1,2</sup>, 姚昆<sup>3</sup>, 曾艳<sup>1,2</sup>

(1. 南昌大学公共政策与管理学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学中国乡村振兴研究院, 江西 南昌 330031; 3. 西昌学院资源与环境学院, 四川 西昌 615000)

**摘要:** 基于GIS空间分析技术结合CA-Markov预测模型,对安宁河流域2000—2018年的土地生态安全进行动态评价及预测。结果表明:安宁河流域土地生态安全指数由北向南递增,垂直差异显著;研究期内预警和风险总占比由27.72%下降至23.84%,良好和安全面积总占比由46.11%上升至51.49%;2000—2018年安宁河流域土地生态安全综合指数呈上升趋势,土地生态发展态势良好;预测结果显示,流域土地生态安全状况将持续好转。安宁河流域土地生态安全虽然总体水平有较大提高,但仍须加强对生态环境的治理力度,推进土地生态安全的可持续发展。

**关键词:** 土地生态安全;动态评价;预测;CA-Markov模型;安宁河流域

中图分类号:X171 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2022)02-0027-05

## Dynamic Evaluation and Prediction of Land Ecological Security in Anning River Basin

LIAO Cheng-hao<sup>1,2</sup>, YAO Kun<sup>3</sup>, ZENG Yan<sup>1,2</sup>

(1. School of Public Policy and Administration, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;  
2. Institute of China's Rural Revitalization Research, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;  
3. College of Resource and Environment, Xichang University, Xichang, Sichuan 615000, China)

**Abstract:** Based on GIS spatial analysis and CA-Markov prediction model, the land ecological security of Anning River Basin was dynamically evaluated and predicted from 2000 to 2018. The results showed that the land ecological security index of Anning River Basin increased from north to south, and the vertical difference was significant. During the study period, the total proportion of early warning and risk decreased from 27.72% to 23.84%, the total area proportion of good and safe land increased from 46.11% to 51.49%. From 2000 to 2018, the comprehensive index of land ecological security in Anning River Basin showed an upward trend, the land ecological development trend was good. The prediction results showed that the land ecological security in the basin would continue to improve. Although the overall level of land ecological security in Anning River Basin had been greatly improved, it was still necessary to strengthen the governance of ecological environment and promote the sustainable development of land ecological security.

**Key words:** Land ecology security; Dynamic evaluation; Prediction; CA-Markov model; Anning River Basin

土地生态安全指在特定时空范围内,土地生态系统在维持自身结构安全性的前提下满足人类可持续发展需要的能力<sup>[1]</sup>。随着社会经济的迅速发展,土地生态环境面临的严峻威胁与日俱增,实现人与自然的和谐相处,缓解紧张的人地关系已成为

收稿日期:2021-04-13;修订日期:2022-01-08

基金项目:四川省教育厅基金资助项目(18ZB0541);凉山州学术和技术带头人培养基金资助项目(ZRS202001);西昌学院“两高”人才科研支持计划基金资助项目(YBZ202108);四川省大学生创新创业训练计划基金资助项目(201810628034);四川省教育厅人文社会科学重点研究基地沱江流域高质量发展研究中心基金资助项目(TJGZL2020-06);内江师范学院校级科研基金资助项目(2019YB04)

作者简介:廖成浩(1999—),男,江西上饶人,在读研究生,研究方向为土地生态与农业经济。

土地生态学、环境科学和地理学等众多学科领域研究的热点问题之一<sup>[2-3]</sup>。加强土地生态安全状况综合评价与动态规律探索分析,能为土地生态环境治理与建设提供科学的理论参考。

通过文献资料分析可知,以往学者主要集中在从计量角度对区域土地生态安全展开评价<sup>[4]</sup>,鲜见时空耦合研究。随着“3S”技术推进,通过GIS和RS技术实现区域土地生态安全时空动态监测在学界已形成广泛共识。李子君等<sup>[5]</sup>基于熵权物元模型对沂蒙山区土地生态安全进行综合评价,指出森林覆盖率等因素的提升为该地区土地生态安全改善作出重要贡献。郑岚等<sup>[6]</sup>通过组合赋权法对嘉峪关土地生态安全进行动态评价,指出资源环境是土地生态安全最大影响因素。安宁河流域是四川省重要的生态环境建设区,由于受自然条件的限制,区域内地质灾害相对频发,加之受耕地过度开垦、水电和矿产资源过度开发的影响,区域土地生态安全正发生着明显的改变。因此,加强对该流域土地生态安全状况的实时监测与分析十分必要。然而,截至目前尚未见对该地区土地生态安全状况及其未来发展开展研究和预测。鉴于此,今以安宁河流域为研究区域,将GIS和RS技术相结合,完成土地生态安全评价指标体系的构建,对研究区域2000—2018年的土地生态安全时空演变规律进行探索分析,同时,引入CA-Markov模型对2021年土地生态安全进行预测,以期为该地区土地生态安全治理措施的制定提供科学借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

安宁河流域位于横断山脉东缘,地理范围在E101°51′~E102°48′,N26°38′~N28°53′之间,冬季干燥少雨,夏季高温多雨,流域内河流冲积形成的安宁河平原是四川省第二大平原。安宁河源于冕宁,经西昌、德昌,于米易县流入雅砻江,流域总面积达11 150 km<sup>2</sup>。安宁河流域作为攀西地区的经济重心和彝族主要聚居区,是川西南经济发展的重要增长区。

### 1.2 数据来源与预处理

根据研究需要完成基础数据收集:①数字高程模型(DEM)采用地理空间数据云平台的ASTER GDEM 30M数据;②2000—2018年土地利用数据来自中国科学院地理资源数据中心(www.resdc.

cn),归一化植被指数(NDVI)提取自美国航空航天局的MODIS13Q1产品;③气象数据来自中国气象数据科学共享网(data.cma.cn);④2000—2018年社会经济数据来自四川省统计年鉴。

为实现各数据的空间可视化处理,今以Anusplin 4.37实现不同年份降水和温度数据的栅格插值;社会经济数据以ArcGIS 10.4为工具,利用反距离权重插值模型进行处理。为保证各数据在空间位置上具有良好的重合性,所有数据均采用GCS\_Krasovsky\_1940坐标系统,像元大小均为250 m×250 m。

### 1.3 指标体系构建

在参考文献[7-13]并结合区域特点的基础上,从地形、水土保持、气候和社会经济4个方面完成研究区土地生态安全评价指标体系的构建。其中,地形方面包括海拔和坡度;水土保持方面选取土壤侵蚀模型(USLE)和NDVI;气候方面包括年累计降水量和年平均地表温度;社会经济指标包括人均耕地、人口和国内生产总值(GDP)。

### 1.4 评价模型

#### 1.4.1 数据标准化

为去除各指标单位量纲,采用极差模型对各指标进行标准化处理<sup>[14]</sup>。结合已有文献规定年累计降水、年平均地表温度、NDVI、人均耕地、人口及GDP等6个指标与土地生态安全成正相关关系,而高程、坡度和土壤侵蚀等3个指标与土地生态安全呈现负相关关系。模型如下:

$$\text{正相关指标: } P_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{负相关指标: } P_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: $X_i$ 为评价指标序列内的实际值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为指标序列内的最大值和最小值; $P_i$ 为标准化后指标的评价值。

#### 1.4.2 主成分因子提取

采用空间主成分分析(SPCA)完成各指标权重计算。以ArcGIS 10.4软件为工具实现该过程,最终筛选出累计因子贡献率达到85%以上的前5个变量(见表1),将其所对应的因子作为主成分因子构建反演模型。

#### 1.4.3 土地生态安全指数

为更科学分析土地生态系统的安全程度和可持续发展状态,利用安全指数模型对安宁河流域的

表 1 各土地安全等级空间主成分分析结果

Table 1 Spatial principal component analysis results of each land security level

年份	系数	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
2000 年	特征值	0.145	0.096	0.061	0.040	0.028
	贡献率/%	33.45	24.17	12.43	10.12	7.04
	累计贡献率/%	33.45	57.62	70.05	80.17	87.21
2005 年	特征值	0.124	0.090	0.056	0.046	0.038
	贡献率/%	30.73	22.36	13.91	11.25	9.36
	累计贡献率/%	30.73	53.09	67.00	78.25	87.61
2010 年	特征值	0.152	0.115	0.056	0.038	0.029
	贡献率/%	35.85	22.30	13.40	8.93	6.88
	累计贡献率/%	35.85	58.15	71.55	80.48	87.36
2015 年	特征值	0.131	0.097	0.060	0.037	0.025
	贡献率/%	34.25	23.32	14.62	9.76	6.43
	累计贡献率/%	34.25	57.57	72.19	81.95	88.38
2018 年	特征值	0.121	0.089	0.065	0.050	0.035
	贡献率/%	30.30	22.24	16.32	12.37	8.69
	累计贡献率/%	30.30	52.54	68.86	81.23	89.92

土地生态安全进行量化计算。

$$LESI = \sum_{i=1}^n Y_i \times r_i \quad (3)$$

式中:LESI 为土地生态安全指数;  $Y_i$  为各主成分因子;  $r_i$  为空间主成分计算后各因子贡献率。LESI 值越高,土地生态安全水平越高。

### 1.5 土地生态安全等级划定

利用 ArcGIS 10.4 软件的自然断点法将研究区土地生态安全指数划分为预警、风险、临界、良好和安全 5 个等级,并对生态安全系统进行特征描述,见表 2。

表 2 土地生态安全等级划分

Table 2 Classification of land ecological security

土地生态安全指数	等级	特征
(0.257, 0.568]	预警	水土流失严重,植被覆盖率低,气候扰动异常,土地生态极不安全
(0.568, 0.652]	风险	水土流失较为严重,植被覆盖率不高,气候扰动较为异常,土地生态不安全
(0.652, 0.746]	临界	水土流失较不严重,植被覆盖率一般,土壤肥力一般,气候较为正常,土地生态临界安全
(0.746, 0.841]	良好	水土流失隐患较小,植被覆盖率较好,人地矛盾和谐,土地生态较为安全
(0.841, 0.948]	安全	水土流失隐患小,植被覆盖率高,气候正常,土地生态安全

### 1.6 综合指数

为更宏观地表征区域土地整体的生态安全状况,用综合指数对其进行定量描述。

$$EVSI = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{S} \times P_i \quad (4)$$

式中:EVSI 为研究区土地生态安全综合指数;  $n$  为评价等级数;  $i$  为评价等级;  $A_i$  为第  $i$  级面积;  $S$  为总面积;  $P_i$  为第  $i$  级的赋值数。EVSI 数值越大,代表研究区整体的土地生态安全状况越好。

### 1.7 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型是将元胞自动机(CA)和马尔科夫(Markov)模型有机结合的新模型,该模型既能对土地生态系统进行时空动态监测,又能预测其

未来发展,已被广泛应用于土壤侵蚀、植被覆盖和土地利用特性的预测研究<sup>[15-16]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 空间分布特征

图 1(a)~(e)分别为 2000—2018 年安宁河流域土地生态安全等级空间分布。由图 1 可见,2000—2018 年安宁河流域土地生态安全等级以临界和良好为主;安宁河流域土地生态安全指数在空间上由北向南递增,同时,各安全等级在不同海拔上呈现明显的区域差异。

预警和风险等级区主要分布在河谷平原两侧的高山和极高山地带。结合土地利用类型和地形等

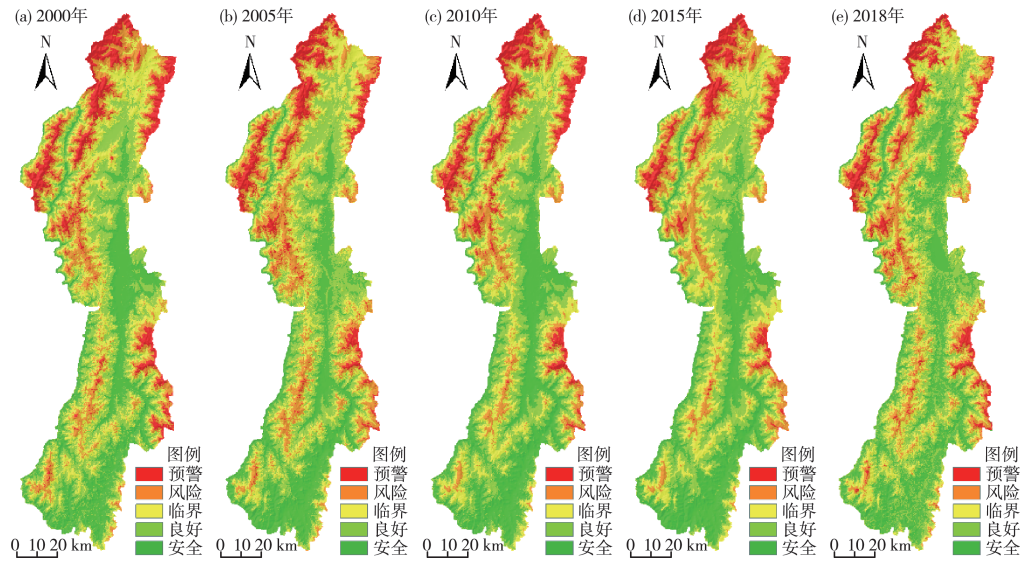


图 1 2000—2018 年安宁河流域土地生态安全等级空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land ecological security levels in Anning River Basin from 2000 to 2018

数据可知,这些地区地形起伏大,地势相对陡峭,随着海拔的升高气温逐渐呈现明显降低的变化趋势,流域内植被生态系统结构相对简单且覆盖度也相对较低,水土流失问题相对严重,是滑坡、崩塌等地质灾害的频发地带,先天复杂的自然条件对有效实施人工干预治理也产生了明显的限制。临界等级区主要分布在河谷两侧的缓坡区和部分高植被覆盖的高山区,这些区域是安宁河流域土壤侵蚀治理的重要地段,也是流域内土地生态环境保护与恢复治理的重要缓冲区。结合相关指标数据可知,该区域植被覆盖度最高,土地景观类型以中覆盖度草地、有林地和灌木林地等为主。安全和良好区主要集中于河流两侧的平原和中低山区,这里是人类活动和社会经济发展的核心地带,耕地、城市建设用地和其他相关建设用地均集中于此。这些地区地势平缓、地形起伏度不明显,土壤肥沃和适宜的气候条件使这些地区土地生态治理难度较其他区域

而言相对较小且治理效果也更加明显。

## 2.2 结构分布特征

对各等级安全区不同年份栅格比例分布和变化状况进行分析(见表 3),有助于更全面掌握其土地生态安全的真实状况。由表 3 可知,安宁河流域土地生态安全等级在结构上存在显著差异。其中,土地生态安全等级最低的预警区域面积占比始终最低,该区域占比由 2000 年的 10.23% 逐步下降至 2018 年的 7.86%;风险区域占比尽管在 2015 年出现一定波动,但仍从 2000 年的 17.49% 下降至 2018 年的 15.98%,可见,在整个研究时段内安宁河流域土地生态安全水平得到显著提高。与此同时,临界区域面积占比由 2000 年的 26.17% 下降至 2018 年的 24.66%。2000 年良好和安全区域面积占比仅为 46.11%,2010 年该区域面积占比首次突破至 51.82%,尽管 2018 年良好和安全区域面积占比在自然规律更替影响下出现小幅度波动,但

表 3 2000—2018 年土地生态安全各等级面积及其占比

Table 3 Area of each land ecological security level and its proportion from 2000 to 2018

等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	面积 A/km <sup>2</sup>	占比/%	面积 A/km <sup>2</sup>	占比/%	面积 A/km <sup>2</sup>	占比/%	面积 A/km <sup>2</sup>	占比/%	面积 A/km <sup>2</sup>	占比/%
预警	1 140.65	10.23	933.26	8.37	1 035.90	9.29	863.19	7.74	876.72	7.86
风险	1 950.14	17.49	2 063.86	18.51	1 762.00	15.80	1 785.84	16.02	1 781.78	15.98
临界	2 917.96	26.17	2 777.46	24.91	2 574.36	23.09	2 713.03	24.33	2 749.43	24.66
良好	2 739.54	24.57	2 901.23	26.02	3 044.87	27.31	2 990.64	26.82	2 964.06	26.58
安全	2 401.71	21.54	2 474.19	22.19	2 732.87	24.51	2 797.30	25.09	2 778.01	24.92

客观上仍反映出安宁河流域土地生态安全结构呈现良好的发展趋势。

### 2.3 预测分析

基于 CA-Markov 模型,以 2005 年和 2010 年的数据为基础,对 2015 年的土地生态安全指数进行预测,并采用 kappa 系数做精度验证。同时,以 2015 年和 2018 年的基础数据为基础,实现安宁河流域 2021 年土地生态安全状况的预测,结果分别见图 2(a)(b)。

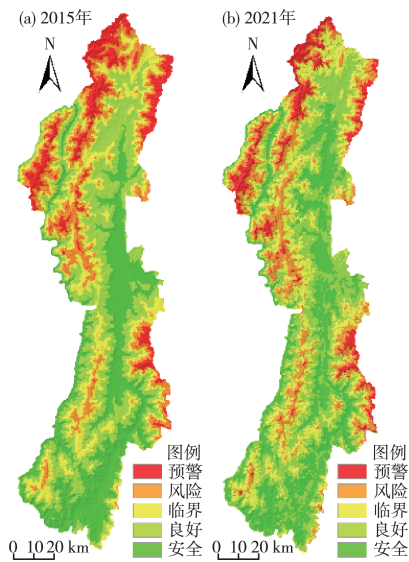


图 2 2015 年和 2021 年安宁河流域土地生态安全预测结果

Fig. 2 Prediction results of land ecological security in Anning River Basin in 2015 and 2021

由图 2 可见,2015 年预测数据与实际评价结果的 kappa 系数为 0.91,精度验证显示,整体预测效果较好,CA-Markov 模型适用于安宁河流域土地生态安全状况的预测。2021 年安宁河流域土地生态安全预测结果显示:该地区土地生态安全整体状况相对较好,良好区域面积占比最高,为 28.03%,安全区域面积占比为 23.39%,两区域面积综合占比高达 51.42%,可见,安宁河流域土地生态安全指数仍然保持在较高水平;临界和风险区域面积占比分别为 24.49% 和 16.54%,预警区域面积占比由 2018 年的 7.86% 下降至 7.55%。表明,继续实施土地生态保护措施将有助于土地生态安全水平的持续改善。

### 2.4 趋势变化分析

由公式(4)计算得出,2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年安宁河流域 EVSI 分别为 3.299、3.351、3.419、3.454 和 3.447。EVSI 呈现波动上升趋势,表明安宁河流域土地生态安全状况日趋转好。这预示,随着系列生态环保措施的不断实施,区域整体的土地生态安全状况将向更加理想的趋势发展。安宁河流域作为长江流域片区的重要组成部分,特别是在攀西地区的发展中扮演着重要的角色,保持土地生态安全的稳定对该地区社会经济的发展有重要的价值。因此,针对安宁河流域土地生态安全环境的保护与恢复建设、不断提高土地的节约集约利用、合理控制城市的发展规划,能对推进土地的可持续发展起到一定的促进作用。

### 3 结论

(1)从空间角度分析,研究区土地生态安全在空间分布上呈现出明显的梯度差异,整个地区越往南部发展流域整体的土地生态安全状况越好;预警和风险两个等级主要集中于高海拔的高山区,该地区地广人稀,受地形和气候影响植被也较为稀疏;良好和安全相对集中于河谷平原及两侧的低山平原地区,这些区域是人类活动频繁的城市建成区,较好的地形和气候条件加之完善的水土保持措施,土地生态安全持续处于较优状态。

(2)从时间角度分析,2000—2018 年整个区域的土地生态安全指数波动上升,良好以上面积占比持续增加,生态环境不断改善;高度预警地区逐渐趋向临界,尤其是流域北部的冕宁县生态安全状态改善最为明显,土地生态安全总体状态趋于良好。

(3)研究结合时空演变分析并引入 CA-Markov 模型,比以往单一针对时间或空间的分析获得更好的效果。同时,土地生态安全评价是一个相对复杂的体系,由于数据收集条件限制,在指标体系构建中存在许多不足,如土壤污染和粮食安全未能有效纳入,在今后研究中有待完善。

#### [参考文献]

- [1] 苏迎庆,刘庚,赵景波,等. 2006—2018 年汾河流域土地生态安全预警测度及时空格局演变[J]. 水土保持通报,2021,41(1):144-151.
- [2] 李昊,李世平,银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(9):50-56.

(下转第 37 页)