

## 基于灰色关联模型的区域生态安全综合评价——以江西省赣州市为例

胡坤侠 (东华理工大学测绘工程学院, 江西南昌 330013)

**摘要** 以赣州市 18 个县市为评价单元, 基于 PSR 模型构建综合评价指标体系, 集成熵权法和灰色关联评价模型, 对研究区 2016 年生态安全综合指数、压力指数、状态指数和响应指数进行评价, 并分析所得结果。结果表明, 研究区目前的生态安全综合指数基本处于安全水平, 生态环境状况较好; 赣州综合生态安全形势在北部和南部地区差异较为明显。南部地区的生态安全水平优于中部和北部地区, 生态压力总体情况更好, 东北地区整体上比西南部好, 章贡区生态压力情况较差; 生态状态总体情况较差。南部地区的总体生态安全水平优于中部和北部地区; 生态响应指数整体上处于临界安全水平, 总体情况较好, 会昌县生态响应较差。

**关键词** 灰色关联模型; 熵权; PSR 模型; 生态安全综合评价

中图分类号 X 826 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)02-0093-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.02.025



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Comprehensive Evaluation of Regional Ecological Security Based on Grey Relational Model—Taking Ganzhou City, Jiangxi Province as an Example

HU Kun-xia (Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013)

**Abstract** Taking 18 counties and cities in Ganzhou City as evaluation units, a comprehensive evaluation index system, an integrated entropy weight method and a gray relational evaluation model were constructed based on PSR model to evaluate the comprehensive index, pressure index, state index and response index of ecological security in the research area in 2016, and the results were analyzed. The results showed that the comprehensive index of ecological security in the study area was basically at a safe level and the ecological environment was in good condition. Ganzhou comprehensive ecological security situations in the north and south were different. The ecological security level of the southern region was better than that of the central and northern regions, and the overall ecological pressure was better than that of the southwest region. The overall ecological situation was poor. The overall ecological security level of the southern region was better than that of the central and northern regions. On the whole, the ecological response index was at the critical safety level. The ecological response of Huizhang County was poor.

**Key words** Grey relational model; Entropy weight; PSR model; Comprehensive evaluation of ecological security

生态安全是国家安全的重要组成部分。伴随着我国社会经济的飞速发展和土地开发力度的不断增强, 脆弱的生态环境正处于一种快速恶化的状态中。生态安全已成为生态系统研究的热门话题, 也是可持续发展的新主题<sup>[1-2]</sup>。生态安全的概念是指通过加强有益的生态过程和控制有害的生态过程, 保障资源、环境和生态系统服务的安全健康和可持续发展, 寻求确保生态安全的措施<sup>[3]</sup>。生态安全评价是对区域生态安全程度进行分析、预测和评价, 为生态过程的调控提供依据, 是生态安全研究的重要组成部分。

国外对生态安全评价的研究始于 20 世纪 80 年代初, 主要针对流域或其他地理单位的区域尺度生态风险和生态健康评估<sup>[4-5]</sup>。20 世纪 90 年代末, 我国生态安全评价研究迅速发展。目前, 从研究内容来看, 在生态系统压力-状态-响应(PSR)框架模型的基础上, 构建了评价指标体系对区域生态安全状况综合评价<sup>[6-9]</sup>。基于遥感数据和 GIS 空间分析技术, 评价其区域土地利用的生态安全, 进行空间格局分析和演化分析<sup>[10-14]</sup>。评价单元基于中尺度, 不同评价单元下评价结果的耦合是今后研究趋势。它涉及各种评估对象和典型区域, 包括林地、建设用地、流域等其他生态系统。其中, 基于 PSR 模型的区域生态安全综合评价以行政区域作为评价基本单元, 有助于政府机构根据不同评价单元的生态安全状

况制定相应的政策。

笔者采用“压力-状态-响应(PSR)”模型和灰色关联模型相结合的方法, 对赣州市总体的生态安全状况进行全方位的综合评价, 以期为赣州市经济发展及生态文明建设提供政策上的建议和支持。PSR 模型体现了人与自然环境的关系, 这个模型比其他理论模型更加系统和全面<sup>[15]</sup>。灰色关联模型有一个明显的缺陷, 就是在指标权重的确定过程中存在很大的主观性, 为了避免这一缺陷, 笔者采用熵权法来确定每个指标的权重以去除主观上影响因素, 从而使最后的计算结果能够客观地反映研究区域的现状。

#### 1 数据来源与研究方法

**1.1 研究区概况** 赣州市位于赣江上游, 江西南部, 东邻福建省三明市和龙岩市, 南毗广东省梅州市、韶关市, 西接湖南省郴州市, 北连江西省吉安市和抚州市, 地处 24° 29' ~ 27° 09' N, 113° 54' ~ 116° 38' E。纵距 295 km, 横距 219 km, 全市总面积 39 379.64 km<sup>2</sup>, 占全省总面积的 23.6%, 为省内最大的行政区(图 1)。赣州市是珠江三角洲、闽东南三角区的腹地, 是内地通向东南沿海的重要通道, 更是连接长江经济区与华南经济区的纽带。全年生产总值(GDP)为 2 194.34 亿元, 第三产业的比重为 42.7%, 年末赣州市的户籍总人口为 970.78 万, 森林覆盖率为 76.2%。赣州市地形图如图 1 所示。

**1.2 数据来源** 数据主要来源于《赣州统计年鉴》(2017 年), 图件所涉及的行政区边界来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>) 1:400 万数据。

**基金项目** 江西省自然科学基金项目(2016BAB203102); 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ150555)。

**作者简介** 胡坤侠(1994—), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 研究方向: 土地信息技术。

**收稿日期** 2019-07-26

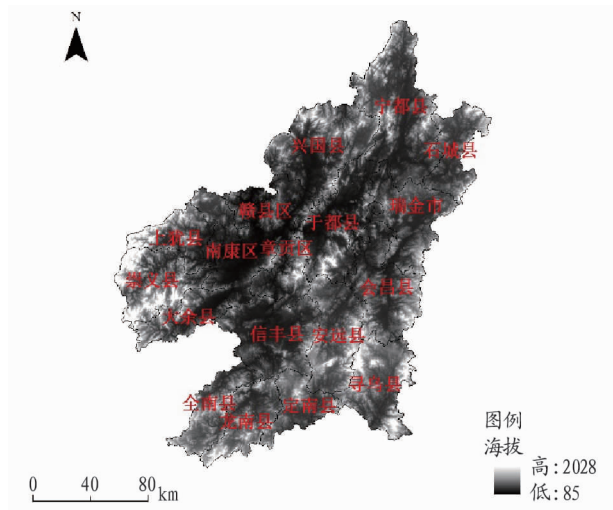


图 1 赣州市地形图

Fig.1 Topographic map of Ganzhou City

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系构建。加拿大统计学家弗里德在20世纪

70 年代提出了 PSR 模型,即压力-状态-响应模型,该理论模型经过不断完善,是目前学术界用来评价区域生态安全状况的重要理论方法之一<sup>[16-18]</sup>。在这个模型中,压力指数是指人类通过社会经济活动对生态系统产生的压力;状态指数意味人为活动对生态环境造成的社会环境的一系列变化;响应指数代表人类利用一定技术手段改善生态环境问题。在 PSR 模型的大致框架下,考虑数据可获得性,结合相应研究成果<sup>[8,11,19]</sup>,选择可以表征社会、经济和生态环境的代表性因素,从而得到研究区生态安全综合评价指标体系(表 1)。

1.3.2 评价指标权重确定。

1.3.2.1 标准化。熵权法是依据评价指标提供的信息量计算综合指标,由评价指标形成的判断矩阵确定指标权重。由于评价体系中的评价指标中既有正向指标也有反向指标,在这种情况下样本矩阵必须进行无量纲化的数据处理。首先假设研究区域内有  $m$  个评价对象,包括  $n$  个评价指标。 $X$  定义为生态安全样本矩阵,表示为:

表 1 赣州市生态安全评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of Ganzhou ecological security

项目 Item	指数类型 Index type	指标层 Index level	指标解析 Index analysis	基准值 Reference value	
研究区生态安全评价指数 Ecological security evaluation index of the study area	压力指数	人口密度(人/km <sup>2</sup> )	表征人口承载压力	247	
		经济密度(万元/km <sup>2</sup> )	表征经济承载压力	560.73	
		人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	表征耕地资源承载压力	0.08	
	状态指数	状态指数	人口自然增长率(%c)	表征人口增长压力	8
			单位面积化肥使用量(kg/hm <sup>2</sup> )	表示农业生产对土地质量安全的压力	250
			单位面积农药使用量(kg/hm <sup>2</sup> )	表示农业生产对土地质量安全的压力	30
			城市化水平(%)	表征城市化扩张压力	65
			人均粮食产量(kg/人)	表示粮食资源人均状态	400
			有效灌溉面积耕地比重(%)	表示土地有效生产状态	50
			每万人拥有床位数	表征医疗水平发展状况	40
			每万人拥有卫生技术人员	表征医疗水平发展状况	39
			万元 GDP 能耗(t/万元)	表征工业生产对生态安全影响状况	0.354
			城乡居民人均收入(元/人)	表征经济发展状况	17 650.5
	响应指数	响应指数	饮用水水质达标率(%)	表征饮用水资源质量状态	100
			森林覆盖率(%)	表征生态资源质量状态	76.2
			人均 GDP(万元/人)	表征维护生态安全的经济发展水平	2.5
第三产业比重(%)			表征维护生态安全的产业发展水平	45	
非农人口比重(%)			表征人口结构生态响应水平	50	
农业机械化水平(kW/hm <sup>2</sup> )			表征维护生态的科技水平	3.82	
人均造林面积(hm <sup>2</sup> /人)			表征森林生态响应水平	0.002 5	
水土流失治理面积比重(%)	表征土地治理生态响应水平	45.96			
工业废水排放达标率(%)	表征生产用水生态响应水平	100			

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}, X = \{x_{ij}\}_{m \times n}, (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n) \quad (1)$$

指标体系中各指标系数之间的量纲不一样,并不是统一的单位,所以有必要采用极差化方法对指标系数进行规范化处理。评价指标划分为正向指标  $y_{ij}^p$  和逆向指标  $y_{ij}^n$ ,正向指

标代表指标值越大越好;逆向指标表示指标值越小越好。标准化公式如下:

$$y_{ij}^p = \frac{X_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (2)$$

$$y_{ij}^n = \frac{\max x_j - X_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (3)$$

式中,  $\max x_j$  和  $\min x_j$  表示第  $j$  个指标下各评价对象的最大值和最小值。矩阵  $X$  转化为矩阵  $Y$ , 计算方法如下:

$$Y = (y_{ij})_{mn}, \text{ 其中, } y_{ij} \in [0, 1] \quad (4)$$

**1.3.2.2 熵权法。**在熵权法中, 熵值越大, 评价指标的值差越小, 那么这个指标的权重就越小。反之, 当指标值变化较大时, 熵值较小, 指标权重较大。在矩阵  $Y$  中, 第  $i$  个评价对象在指标  $j$  下的指标值所占贡献度为  $f_{ij}$ , 计算公式为:

$$f_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}, \text{ 其中, } j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$H_j$  代表第  $j$  项指标的熵值, 计算公式为:

$$H_j = -K \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (6)$$

其中,  $K = 1/\ln m$ , 当  $f_{ij} = 0$  时,  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$

$W_j$  即熵权代表第  $j$  个指标的权重, 计算公式为:

$$w_j = (1 - H_j) / \sum_{i=1}^n (1 - H_j) \quad (7)$$

其中,  $w_j \in (0, 1)$ ,  $\sum_{i=1}^n w_j = 1$

**1.3.3 灰色关联评价模型。**一个区域生态环境是受多方面因素影响的, 其中包括自然、社会、经济等诸多不确定因素, 正是这些不确定因素的综合影响, 相互作用, 相互牵制, 使得这个生态系统变成一个灰色系统。该研究运用灰色系统理论<sup>[20]</sup>建立赣州市灰色关联模型, 从而进行生态安全评价。

**1.3.3.1 评价指标数值标准化。** $X_j$  为第  $j$  个评价指标值, 即公式(1)中第  $j$  列的样本属性值;  $S_j$  为该指标的基准值;  $P_j$  为第  $j$  个评价指标标准化后数值:

正向指标: 当  $X_j > S_j$  时,  $P_j = 1$ ; 当  $X_j < S_j$  时,  $P_j = X_j/S_j$  (8)

负向指标: 当  $X_j < S_j$  时,  $P_j = 1$ ; 当  $X_j > S_j$  时,  $P_j = S_j/X_j$  (9)

每个指标都有一个生态安全基准值, 正向指标实际值大于基准值时, 那么该指标为安全; 逆向指标实际值小于基准值时, 该指标是安全的。基准值标准化后记为  $G = (g_1, g_2, \dots, g_{22})$ , 即  $g_j = s_j/s_j = 1$ , 生态安全就代表着优的水平<sup>[7]</sup>。

**1.3.3.2 求关联系数。**接下来计算第  $j$  个评价指标标准化后的数值  $P_j$  与生态安全标准过后的序列  $G$  的关联系数  $\zeta_i(P_j, G)$ , 计算公式为:

$$\zeta_i(P_j, G) = \frac{\Delta \min + \rho \times \Delta \max}{\Delta L_{ij} + \rho \times \Delta \max} \quad (10)$$

在上述公式中,  $\Delta \max = \max \max_j |P_{ij} - g_j|$ ,  $\Delta \min = \min \min_j |P_{ij} - g_j|$ ,  $\Delta \max$  和  $\Delta \min$  分别为极大差和极小差;  $\Delta L_{ij} = |P_{ij} - g_j|$ ;  $\rho \in (0, \infty)$  称为分辨系数,  $\rho$  值越小, 其分辨力越大, 当  $\rho \leq 0.563$  时, 分辨力最好, 一般情况取  $\rho = 0.5$ 。

**1.3.3.3 生态安全指数计算。**关联度与区域生态安全等级具有相关性, 它可以反映出区生态安全等级的高低, 即评价对象  $i$  的生态安全指数。第  $i$  个评价对象与标准序列  $G$  的关联度  $R$  计算公式为:

$$R = \sum_{j=1}^n w_j \zeta_i(P_j, G) \quad (11)$$

## 2 结果与分析

经过计算, 得到赣州市 2016 年生态安全综合指数及压力-状态-响应指数(表 2)。在仔细参阅相关研究成果<sup>[11]</sup>的基础上, 咨询相关专家, 并结合上述计算结果, 设计赣州市生

态安全分级标准(表 3)。赣州市区域相对而言较小, 其环境条件和国家政策等整体差异较小, 这种情况下, 赣州市生态安全综合指数值的跨度相对较小, 所以分级的数据标准与大尺度生态安全研究的分级数据标准有所不同。该研究设计的生物分级标准尽可能地凸显赣州市生态安全区域的细微差异, 为国民经济发展与生态文明建设提供可靠的数据参考。

表 2 基于 PSR 模型的生态安全评价指数

Table 2 Ecological security evaluation index based on PSR model

市县区 City, county, district	压力指数 Pressure index	状态指数 State index	响应指数 Response index	生态安全 综合指数 Ecological security composite index
章贡区 Zhanggong District	0.546	0.929	0.822	0.823
赣县区 Ganxian District	0.828	0.475	0.709	0.612
南康区 Nankang District	0.736	0.723	0.697	0.717
信丰县 Xinfeng County	0.838	0.823	0.724	0.794
大余县 Dayu County	0.861	0.735	0.929	0.818
上犹县 Shangyou County	0.904	0.549	0.731	0.670
崇义县 Chongyi County	0.716	0.692	0.886	0.755
安远县 Anyuan County	0.739	0.479	0.809	0.628
龙南县 Longnan county	0.722	0.780	0.915	0.810
定南县 Dingnan County	0.893	0.853	0.915	0.878
全南县 Quannan County	0.745	0.595	0.817	0.691
宁都县 Ningdu County	0.828	0.466	0.584	0.570
于都县 Yudu County	0.768	0.525	0.614	0.597
兴国县 Xingguo County	0.874	0.539	0.653	0.636
会昌县 Huichang County	0.831	0.572	0.502	0.598
寻乌县 Xunwu County	0.816	0.513	0.792	0.655
石城县 Shicheng County	0.850	0.722	0.631	0.717
瑞金市 Ruijin City	0.872	0.453	0.715	0.611

表 3 生态安全分级评价标准

Table 3 Ecological security classification evaluation criteria

生态安全指数 Ecological safety index	等级 Grade	评语 Remark	生态安全特征描述 Description of ecological security features
<0.45	I	恶劣	生态环境恶劣, 不适合人类生存发展
[0.45, 0.55)	II	差	生态环境较差, 勉强满足人类生存发展需求
[0.55, 0.65)	III	中	生态环境一般, 基本满足人类生存发展需求
[0.65, 0.75)	IV	良	生态环境较好, 较适合人类生存发展
$\geq 0.75$	V	优	生态环境优越, 适合人类生存发展

根据计算结果, 利用 ArcGIS 软件, 参考相应的等级标准绘制出赣州市各个生态安全状况图, 包括压力指数图、状态指数图、响应指数图、综合指数图(图 2)。

由图 2 可知, 2016 年赣州市生态安全水平整体处于一般的临界安全状态, 以 III 级为主。从县域个数上来看, 全市 18 县市中, III 和 IV 级的县域个数分别为 7 和 5, 6 个县域处于 V 级水平, III 级、IV 级和 V 级分别占全市 38.89%、27.78% 和

33.33%。

赣州市 18 县市生态安全压力指数处在 0.546~0.904(表 2、图 2)。在生态安全压力指数中,赣州市 18 县市中整体上处于优良状态,其中,南康区、崇义县、安远县、全南县、龙南县处于Ⅳ级的良好水平,其余县市中除章贡区外均处于Ⅴ级优的水平,这表明赣州市生态环境面临的压力总体上较小,主要是因为该地区经济发展落后,人均收入水平较低,工业化与城市化水平较低。该地区人均 GDP 为 2.58 万元,远低于 4.05 万元的全省平均标准,仅为全省标准的 63.70%;经济

密度为 560.73 万元/km<sup>2</sup>,而全省平均标准为 1 108.39 万元/km<sup>2</sup>,仅为全省标准的 50.59%;章贡区生态安全压力指数为 0.546,处于Ⅱ级差的水准,主要是因为章贡区为赣州市市中心,相对而言,经济发展水平较高。章贡区城市化水平为 91.09%,其人口密度为 1 499.8 人/km<sup>2</sup>,而整个赣州市城市化水平和人口密度分别为 45.51%和 247 人,这说明章贡区人口承载压力和城市扩张的压力很大,对生态资源的需求较大,所以章贡区生态安全压力指数处于Ⅱ级差水平。

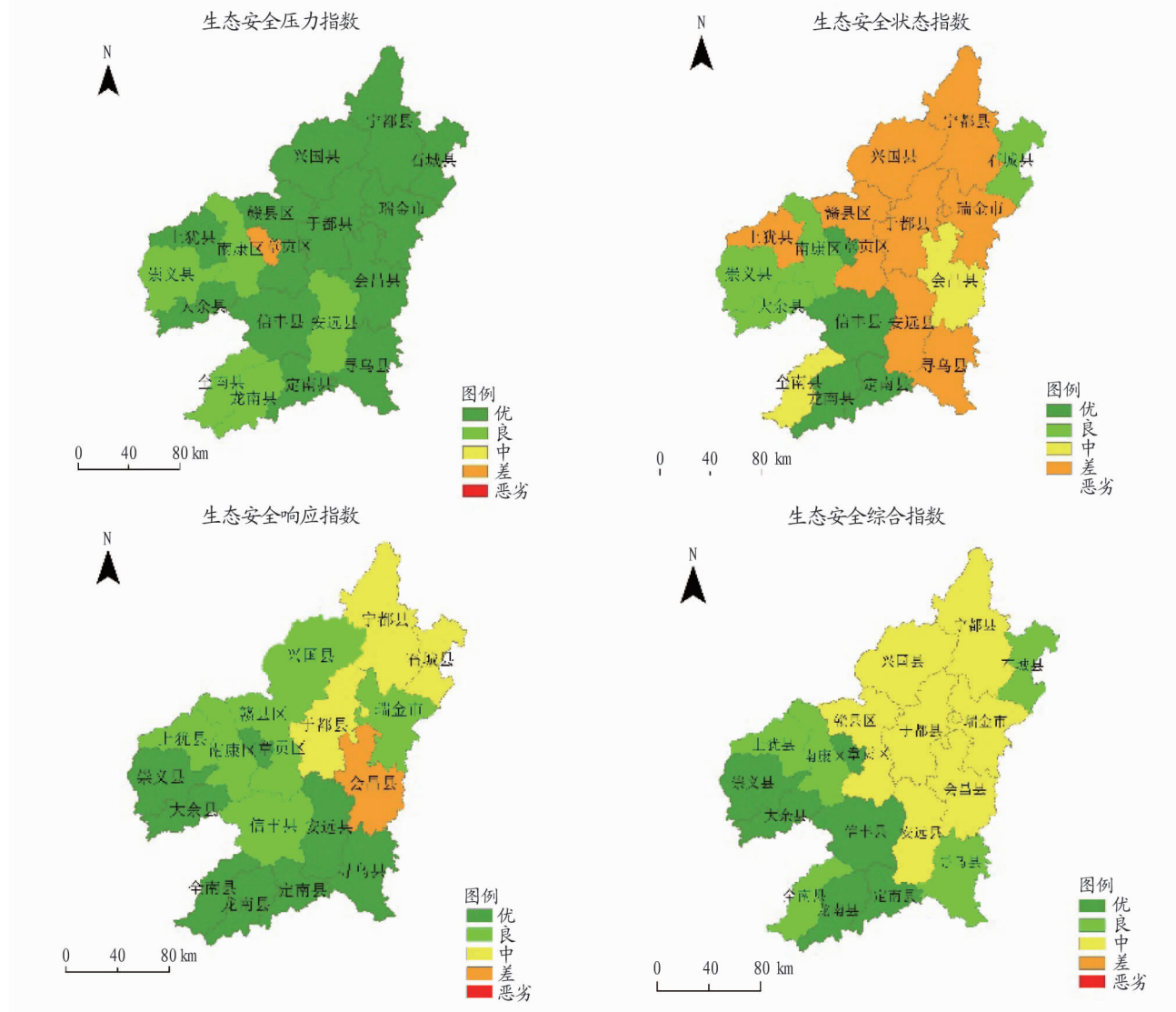


图 2 赣州市生态安全状况

Fig.2 Ecological security of Ganzhou City

赣州市 18 县市生态安全状态指数处于 0.453~0.929(表 2、图 2)。宁都县、兴国县、赣县区、于都县、瑞金市、安远县、寻乌县、上犹县处于Ⅱ级差水平;全南县、会昌县处于Ⅲ级的临界安全状态;南康区、崇义县、大余县、石城县处于Ⅳ级的良好水平;章贡区、信丰县、龙南县、定南县处于Ⅴ级优的水平。宁都县、兴国县、赣县区、于都县、瑞金市、安远县、寻乌县、上犹县有效灌溉面积占耕地面积的比重较低,医疗水平非常落后,每万人拥有床位数和每万人拥有卫生技术人员远

低于赣州市平均水平,每万元 GDP 能耗较高,因而对环境污染较大;全南县、会昌县人均粮食产量 364.11、319.46 kg,低于赣州市平均水平 400 kg,有效灌溉面积占耕地面积比重分别为 35.23%、39.67%,低于国家标准 50%,南康区、崇义县、大余县、石城县在生态安全状态指标中大多指标等于或略小于与之相对应的生态安全基准值,甚至有些指标大于基准值,因而该地区的生态安全状态指数处于Ⅳ级的良好水平;章贡区、信丰县、龙南县、定南县中,章贡区经济发达,医疗水平较

为先进,每万人拥有床位数和每万人拥有卫生技术人员远高于赣州市平均水平,城乡居民人均收入为30 178.03元,远超17 650.50元的赣州市平均水平;信丰县、龙南县、定南县水热条件优越,人均粮食产量高,万元GDP能耗较低,森林覆盖率高,环境污染小,所以处于V级优的水平。

赣州市18县市生态安全响应指数为0.502~0.929(表2、图2),会昌县处于II级差水平;宁都县、石城县、于都县处于III级的临界安全状态;赣县区、南康区、上犹县、兴国县、信丰县、瑞金市处于IV级的良好水平;章贡区、崇义县、大余县、全南县、龙南县、定南县、安远县、寻乌县处于V级的安全水平。会昌县经济落后,其人均GDP、第三产业比重、非农比重及农业机械化水平均低于生态基准值,再加上由于环境保护力度不够,人均造林面积较少,工业废水、生活垃圾、污水处理率较低,水土流失治理不到位,导致生态安全响应程度较低,处于较差水平;宁都县、石城县、于都县人均GDP、第三产业比重、非农比重低于生态基准值,但在人均造林面积上与基准值基本相当;赣县区、南康区、上犹县、兴国县、信丰县、瑞金市经济水平较高,其人均GDP、第三产业比重略高于基准值,而人均造林面积和水土流失治理面积高于生态基准值;章贡区、崇义县、大余县、全南县、龙南县、定南县、安远县、寻乌县在环境保护、植树造林、绿化建设、市政设施完善、水土流失治理等方面表现较好,生态安全响应指数较高。

赣州市18县市生态安全综合指数为0.570~0.823(表2、图2),赣州市多为贫困地区,该地区经济发展水平相对落后,人们生活水平较低,其人均GDP仅为江西省总体水平的63.70%,居民人均消费水平仅为江西省平均水平的64.23%。但由于该地区耕地资源充足,人均耕地面积均超过0.08 hm<sup>2</sup>,也就是国际上所公认的人均耕地安全标准,森林覆盖率高达76.2%,并且赣州市在污染物总量控制、生态保护、污染防治、水土流失治理、生态建设等方面投入很大,使得该地区的生态安全综合指数处于较安全水平以上。

### 3 讨论

过分强调经济发展而忽视生态保护容易导致生态环境恶化。科学合理地对区域生态安全评价是有必要的,这可以对生态环境保护起着监测和警示的作用,增加对生态保护的

投入,从而促进生态保护,最终实现区域的可持续发展。赣州在促进经济社会发展的同时,要保持生态环境良好,进一步改善当地生态安全状况,做到既要发展经济,又要保护生态环境。

### 参考文献

- [1] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. *Science*, 2015, 347: 1-10.
- [2] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [3] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域[J]. *地理研究*, 2010, 29(3): 383-396.
- [4] SERVEISS V B. Applying ecological risk principles to watershed assessment and management[J]. *Environmental management*, 2002, 29(2): 145-154.
- [5] NORTON B G, COSTANZA R, HASKELL B D, et al. Ecosystem health: New goals for environmental management[M]. Washington: Island Press, 1992.
- [6] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于RBF的湖南省土地生态安全动态预警[J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [7] 张家其, 吴宜进, 葛咏, 等. 基于灰色关联模型的贫困地区生态安全综合评价: 以恩施贫困地区为例[J]. *地理研究*, 2014, 33(8): 1457-1466.
- [8] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 基于PSR模型的东阳江流域生态安全评价[J]. *资源科学*, 2014, 36(8): 1702-1711.
- [9] 邵佳, 冷志明. 武陵山片区区域生态安全测度与评价[J]. *经济地理*, 2016, 36(10): 166-171.
- [10] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [11] 彭月, 李昌晓, 李健. 2000—2012年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J]. *资源科学*, 2015, 37(12): 2480-2490.
- [12] 卿凤婷, 彭羽. 基于景观结构的北京市顺义区生态风险时空特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1585-1593.
- [13] 刘婷婷, 孔越, 吴叶, 等. 基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 4946-4955.
- [14] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 441-452.
- [15] 全川. 环境指标研究进展与分析[J]. *环境科学研究*, 2000, 13(4): 53-55.
- [16] 徐成龙, 程钰, 任建兰. 黄河三角洲地区生态安全预警测度及时空格局[J]. *经济地理*, 2014, 34(3): 149-155.
- [17] 殷春雪, 李锋, 钱谊, 等. 基于熵权的长沙市生态安全综合评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(S1): 83-87.
- [18] 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): 385-390.
- [19] 刘海龙, 谢亚林, 贾文毓, 等. 山西省生态安全综合评价及时空演化[J]. *经济地理*, 2018, 38(5): 161-169.
- [20] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.