

基于 GIS 格网模型的长江上游山丘区国土 利用生态健康评价

——以四川省宜宾市为例

李 政^{1,2,3}, 何 伟^{1,2*}, 杨 皎^{1,2}, 赵晓全^{1,2}, 陈 林²

(1. 四川师范大学 西南国土资源评价与监测教育部重点实验室, 四川 成都 610066;

2. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610066; 3. 重庆市地理信息和遥感应用中心, 重庆 401121)

摘要:为测度研究区国土利用生态健康水平粒度特性与空间分异规律,论文基于“活力-组织-弹性-功能”理论与 PSR 模型,以公里格网为评价单元,采用熵权综合评价法计算健康值,利用空间探索性法揭示其空间分异规律,并通过因子探测器直观展现各因素决定力大小.结果表明:1) 宜宾市各区县国土利用生态综合健康平均指数围绕 0.60 上下波动,区域发展相对均衡,但中心城区与郊区县差异较大.2) 国土利用生态健康状况总体较好;健康区域面积最大,达到 6 131 km²,占区域总面积的 46.07%;亚健康区域面积次之,占比 29.78%;不健康区域面积最小,占比 24.15%.3) 国土利用生态系统健康水平具有较强的空间相关性,空间集聚格局显著,具有空间相关性的以正相关为主,主要是 HH 型或 LL 型集聚区.4) 人类活动差异是影响全市国土利用生态健康水平空间分异的主要因素,自然系统恢复力差异是次要因素,土壤属性、地形地貌与政策调控等是导致生态系统健康水平空间分异的其他因素.因此,收紧容量上线,兜住生态底线,坚持国土集约利用,优化“三生”空间布局,调整产业结构,发展生态旅游将成为宜宾市提升国土利用生态健康水平,打造生态山水文化名城的必要措施.

关键词: 国土利用生态健康; 格网模型; 空间探索性分析; 地理探测器; 宜宾市

中图分类号: F301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8395(2020) 03-0417-10

doi: 10.3969/j.issn.1001-8395.2020.03.019

国土利用生态健康是指辖区国土在人类的利用下能够保持自我组织结构功能的正常运转,并且不对其他系统产生影响,使国土、人类、生物、外界环境之间共生过程得到持续发展的一种状态,主要包括活力、组织力、恢复力与生态系统服务功能等 4 方面特征^[1-2].近年来,伴随着资源枯竭、环境污染等问题的凸显,国土利用生态健康作为国土生态环境保护 and 可持续发展的新目标备受关注.因此,评价国土利用生态健康并制定合理调控措施是当前区域健康与社会经济可持续发展的当务之急.

国土利用生态健康评价始于 20 世纪末期,国内外相关研究不多,主要集中于国土利用生态健康内涵、国土利用生态健康机理、国土利用生态健康水平分析和国土利用生态健康调控等方面^[3-4].研

究尺度以单一国土生态系统与市域、县(区)、乡(镇、街道)等基本行政区为主^[2,3],涉及城市^[5]、湿地^[6]、草地^[7]、河流^[8]等类型.研究方法大多依据活力-组织力-恢复力(VOR)理论,从“活力-组织-弹性-功能”等方面构建国土利用生态健康的指标评价体系^[9].本文以长江上游山丘区宜宾市为研究对象,综合考虑国土生态系统与人类活动间的相互作用,将偏自然的“活力-组织-弹性-功能”理论与表征“人地相互关系”的 PSR 模型相结合,利用格网模型将遥感数据、国土利用数据以及面板数据统一转化,在实现多元数据兼容、细化评价空间精度的同时,达到单一生态系统向复合型生态系统的拓展,从而建立适宜的国土利用生态健康评价体系;以公里格网为基本评价单元,测度各格网国土利用

收稿日期: 2019-01-15 接受日期: 2019-05-28

基金项目: 四川省哲学社会科学规划项目(SC16B066)

* 通信作者简介: 何 伟(1972—),男,副教授,主要从事国土资源利用及评价的研究, E-mail: cdwhe@163.com

生态健康水平;采用 ESDA 空间探索技术揭示网格尺度下国土利用生态健康水平空间分异规律,并利用因子探测器直观展现各因素决定力大小.旨在丰富国土利用生态健康评价研究内容,为区域国土利用生态健康水平提升提供针对性的对策.

1 研究区概况、数据来源与预处理

1.1 研究区概况 宜宾市位于四川省东南部,介于 $103^{\circ}36'E \sim 105^{\circ}20'E$, $27^{\circ}50'N \sim 29^{\circ}16'N$ 间,中心地理坐标为 $(103^{\circ}36'E, 29^{\circ}16'N)$,下辖二区八县,总面积达 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1).该区域是四川盆地至云贵高原的过渡地带,地形以中低山地和丘陵为主,岭谷相间,平坝狭小零碎,为“七山一水两分田”的景观分布格局,呈西南高、东北低态势^[10-11].2015 年,全市人口总计 554.29 万,地区生产总值达 1 525.94 亿元,近 5 年 GDP 增速均保持在 8.3% 以上,稳居四川省第四位.宜宾市拥有丰富的煤、铁矿产、水能、旅游、航运以及农业资源,为区域开发奠定了基础.凭借着其位于成渝经济区、南贵昆经济区、攀西经济区融合点的区位优势以及“长江上游辐射吸纳川滇黔的区域中心”“国际化生态山水文化名城”战略的启动,经济发展不断加快,城镇化水平持续提升,截止 2015 年底,城镇化率高达 48.5%.随着社会经济的发展,宜宾市外来人口不断增加,在为区域发展提供劳动力保障与技术的同时也加大了区域资源环境的压力,区域国土生态可持续发展面临新挑战.因此,在资源型城市转型、产业结构调整与区域国土生态发展规划战略的大背景下,开展市域内国土利用生态健康评价研究对于国土生态环境恢复与保护以及生态屏障的建立,具有一定的现实意义.2018 年 7 月,经报国务院批准,撤销宜宾县,设立宜宾市叙州区,但本文所用数据截止到 2016 年,故仍沿用撤销前名称.

1.2 数据来源与预处理 本研究中县级社会经济统计数据主要来自于《宜宾市统计年鉴》(2016 年)、《宜宾市统计公报》(2016 年)以及政府相关部门网站发布的信息.国土利用现状数据由中国科学院资源环境科学环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)下载的 2015 年 Landsat ETM+、OLI 影像解译得到,空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$.考虑研究需要,类型确定为耕地、林地、草地、城镇建设用地、农村居民点、水域、独立工矿及交通用地. DEM 数据来自于

NASA 美国国家航空航天局(search.earthdata.nasa.gov)提供的 ASTER-GDEM V2 30 m 分辨率的数字高程数据.利用 ArcGIS 10.2 中创建渔网工具,生成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的公里格网,宜宾市共生成 13 307 个公里格网,由于涉及的评价指标较多,利用空间统计工具将各指标细化到空间格网评价单元上,实现多元数据的转化.

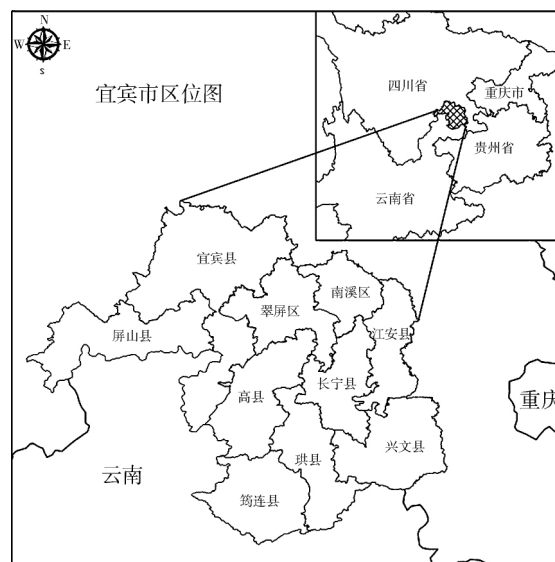


图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 研究方法

2.1 PSR 评价指标体系的构建 国土是人民生产生活的保障,人类赖以生存和发展的基本自然要素,自然与人类活动的综合体,系统内部健康与否关系到人类的生存和社会的可持续发展,建立指标体系时必须综合考虑国土生态系统内部与人类活动间的相互作用.本文将 PSR 模型与“活力-组织-弹性-功能”理论相结合,遵从指标选取的完整性、科学性、灵活性、系统性和可操作性等原则,参照相关学者的研究成果^[12-14],结合宜宾市的实际情况,以及数据的可获得性共选取了 10 个评价指标构建了宜宾市国土利用生态健康评价指标体系.该指标体系将偏自然的系统内部“活力-组织-弹性-功能”与表征“人地相互关系”的 PSR 模型有机结合,达到了评价的内在要求,有利于反映国土生态系统真实状况.其中“压力”是国土资源自身缺陷状况与人类活动对国土及周边环境的影响,选取地形破碎度、土壤侵蚀、人口密度与人为活动压力指数

来衡量,人为活动压力指数参考相关研究成果^[14-16]对人为压力强度参数设定。“状态”是国土系统结构与功能所呈现出的状态,并通过“活力-组织-弹性-功能”理论来阐述:活力是指国土生态系统的能量与活动性,以归一化植被指数表征^[17];组织是指国土生态系统的结构的复杂多样性,以景观多样性指数来表征^[18];弹性是指国土生态系统在胁迫条件下维持其结构和功能的能力,以生态弹性度来表

征,生态弹性度的计算参考了徐明德等^[13]的研究结果;功能凸显国土生态系统为人类提供服务的能力,以生态服务价值来表征,其中单位面积上的生态系统服务价值采用潘耀忠等^[19]与谢高地等^[20]基于专家建议优化的体系标准。“响应”是指人类为国土生态恢复所采取的政策性措施,主要包括环保投资金额与第三产业所占 GDP 比重.具体情况见表 1 和 2.

表 1 生态系统健康评价指标体系
Tab. 1 Ecosystem health evaluation index system

目标层	准则层	指标层	计算公式	安全趋向	权重
国土 生态 系统 健康	压力	P_1 土壤侵蚀度	—	负向	0.089
		P_2 地形破碎度	$P_2 = 1 / \cos \alpha$	负向	0.177
		P_3 人口密度/(人/km ²)	$P_3 = r_i / m_i$	负向	0.102
		P_4 人为活动压力指数	$P_4 = \sum_{i=1}^n t_i q_i / A$	负向	0.081
	状态	活力 S_1 归一化植被指数	$S_1 = \frac{R_{N1} - R}{R_{N1} + R}$	正向	0.090
		组织 S_2 景观多样性指数	$S_2 = - \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{A} \ln \left(\frac{t_i}{A} \right)$	正向	0.089
		弹性 S_3 生态弹性度	$S_3 = S \sum_{i=1}^n \frac{t_i P_i}{A}$	正向	0.087
		功能 S_4 生态服务价值	$S_4 = \sum_{i=1}^n t_i v_i$	负向	0.087
	响应	R_1 环保投资金额/万元	—	正向	0.097
		R_2 第三产业所占 GDP 的比重/%	$R_2 = S / \text{GDP}$	正向	0.101

注: n 为土地利用类型数, α 为单元栅格的平均坡度, r_i 为各县人口, m_i 为行政区面积, t_i 为第 i 种土地利用的面积, q_i 为第 i 种土地利用的人为压力强度参数, R 为红光波段的反射值, R_{N1} 为红外波段的反射值, v_i 为第 i 种土地利用单位面积的生态服务价值, P_i 为第 i 种土地利用的弹性分值, A 为评价单元的总面积, S 为第三产业产值^[14].

表 2 国土利用类型相关参数对照表
Tab. 2 Table of related parameters of land use types

国土利用类型 相关指标参数	耕地	林地	草地	城镇建设用地	农村居民点	水域	独立工矿及 交通用地
人为活动压力强度	0.55	0.10	0.23	0.95	0.68	0.12	0.68
生态弹性度参数	0.50	0.90	0.60	0.40	0.40	0.80	0.40
生态服务价值/(万元/km ²)	7.93	173.00	20.00	0.00	0.00	732.00	0.00

2.2 基于格网模型的熵权综合评价法 国土利用生态健康评价指标因子涉及到遥感数据、国土利用数据以及面板数据相关的自然、社会、经济多种评价因子.本文为了方便多元数据的转化与兼容,丰

富评价单元属性维度,细化评价区域空间精度,采用格网法进行空间索引的建立与矢量数据的栅格化^[21].同时为了避免人为因素的干扰,采用较为客观的熵值法确定权重,并利用综合指数法对研究区

各格网的国土利用生态健康值进行评价.其具体步骤为:

1) 格网数据的标准化处理:

$$\text{正项指标: } X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (2)$$

其中, X_{ij} 为标准化后的值, x_{ij} 为第 i 个格网第 j 项指标的值, $x_{j\min}$ 、 $x_{j\max}$ 为区域内第 j 项指标的最小值、最大值.

2) 熵权法求取权重:

(a) 计算第 j 项指标的信息熵 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \right) \ln \left(\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \right), \quad (3)$$

其中, $k > 0, k = 1 / \ln(n)$, n 为评价单元总个数, $e_j \geq 0$.

(b) 计算第 j 项指标权重值 w_j :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m (1 - e_j)}, \quad (4)$$

其中, e_j 为信息熵, m 为评价指标个数.

3) 健康值计算:

$$F = \sum_{i=1}^m w_i x_{ij}, \quad (5)$$

其中, F 为健康值, w_i 为第 i 子系统的权重, x_{ij} 为标准化值, m 为第 i 子系统所包含的指标数.

2.3 空间探索性分析 空间探索分析是一种强调以空间关联测度为核心,以揭示研究对象空间相互作用机制为目标的数据空间描述与可视化分析方法,可以分为全局自相关与局部自相关^[23].全局空间自相关主要探索属性数据值在整个区域空间的分布特征,全局 Moran's I 指数是反应分布特征的合意测度指标,指数介于-1 与 1 之间,大于 0 表示正相关,小于 0 则表示负相关;局部空间自相关主要用于分析各单元属性值在异质性空间的分布格局,度量每个区域与周边区域之间的局部空间关联程度,局部 Moran's I 统计量越大表示相似观测值的区域单元空间集聚,越小表示不相似值的区域单元空间集聚^[23].

全局 Moran's I 指数计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

局部 Moran's I 指数计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (7)$$

其中, w_{ij} 为空间邻接原则建立的权重矩阵, x_i 与 x_j 分别为第 i 与第 j 个单元评价价值, $\bar{x}$ 为 n 个评价价值的均值^[24].

2.4 地理探测器分析法 地理探测器是由王劲峰等^[24]提出的一种检验单变量的空间分异性以及通过检验两个变量空间分布的一致性,探测两变量之间因果关系的一种计量统计分析方法,主要包括因子探测器、风险探测器、生态探测器、交互探测器^[24-26].本文运用因子探测器对宜宾市国土生态系统健康综合评价指数空间分异规律进行驱动力探测识别,其实质是通过比较因子指标在不同类别分区上的总方差与其在整个区域上的总方差,计算公式如下:

$$P_{D,F} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{F_{D,i}}^2}{n \sigma_F^2}, \quad (8)$$

其中, $P_{D,F}$ 为影响因子 D 对宜宾市国土生态系统综合健康水平空间分异规律的探测力指标; $n_{D,i}$ 为次一级区域的样本数; n 、 σ_F^2 分别为整个区域的样本数与国土利用生态健康综合评价指数空间分异规律的方差; m 、 $\sigma_{F_{D,i}}^2$ 分别为次一级区域的样本数与方差; $P_{D,F}$ 介于 0 与 1 之间,值越大,表明该分区因子指标对国土利用生态健康水平空间分异规律影响越大^[27].综合考虑宜宾市自然、社会、经济情况,遵从指标因子的科学性与合理性,选取 P_1 (土壤侵蚀度)、选取 P_2 (地形破碎度)、选取 P_3 (人口密度)、选取 P_4 (人口活动压力指数)、 S_1 (归一化植被指数)、 S_2 (景观多样性指数)、 S_3 (生态弹性度)、 S_4 (生态服务价值)、 R_1 (环保投资金额)、 R_2 (第三产业所占 GDP 的比重),共计 10 个指标.

3 结果与分析

3.1 国土利用生态健康状况分析 为了反映宜宾

市各区县国土利用生态健康状况,将格网内的国土生态各系统健康指数在 ArcGIS 平台,利用汇总统计工具统计得到各区县的健康平均指数(图2)。由图2可得到宜宾市各区县国土生态系统综合健康状况与压力、状态、响应子系统的具体情况。

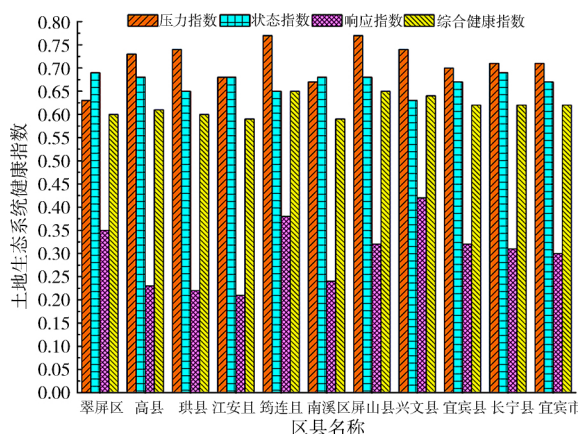


图2 宜宾市各区县国土利用生态健康指数图

Fig. 2 Ecological health index of land use in districts and counties of Yibin City

2015年宜宾市各区县国土生态系统综合健康平均指数围绕0.60上下波动,区域发展相对均衡,这得益于宜宾市以亚热带季风性湿润气候为主,气候温和,常年热量充足,雨量充沛,河流广布,动植物资源丰富,生态环境状况较好。各区县中仅有筠连县、屏山县与兴文县超过全市平均值,最高为0.65(屏山县、兴文县);其他区县略低于平均水平,最低为0.59(南溪区),中心城区与郊区县差异较大。差异出现的主要原因是各区县土地利用结构不同,南溪区与翠屏区建设用地面积比重较大,植被覆盖度相对于郊区县较低,导致国土生态系统“活力-组织-弹性-功能”水平低,其自我调节、自我恢复能力较差。

为了揭示系统内部健康状况,从压力、状态和响应3个维度加以分析,可以发现:市平均压力健康指数为0.71,二区八县指数高且比较均衡,其中最高值为屏山县与筠连县的0.77,最低值为翠屏区的0.63,这与该区域地形地貌关系密切,屏山县与筠连县处于云贵高原与四川盆地的过渡地带,海拔高且地形较为破碎,土壤易被侵蚀,生态环境压力大;翠屏区虽然人口压力指数大于其他区县,但地形较为平坦,平均海拔仅为371.20 m,加之长江的强大生态修复功能对压力的缓解作用,压力指数并不高。

二区八县平均状态健康指数围绕全市平均水平0.67上下小幅波动,区县之间差异不大,表明面对人类施加的压力国土系统内部都能呈现出良好的状态。全市植被覆盖度高,生态环境质量较好,生态系统恢复能力强,导致区域间差异小。这也是该区域打造国际化生态山水文化名城的自身优势。

二区八县平均响应健康指数呈现“三级阶梯”的态势,第一级阶梯为高值区,主要包括兴文县、筠连县与翠屏区,其响应健康指数均大于0.35,该区域是宜宾市的工业集中区,在面临产业化转型与生态经济的建设中,政府投入相对较大;第二级阶梯为中值区,其值介于0.30~0.32之间,主要包括:长宁、宜宾与屏山三郊区县。三级阶梯为低值区,主要包括江安县、珙县、高县与南溪区,生态系统健康响应指数均低于0.24,该区域生态环境较好,政府对环保的投入较小。

为了明确研究区国土利用生态健康程度的差异,需要对其进行分级处理。本文利用 ArcGIS 中自然断裂法,通过对比分析方差合格率 GVF 值将生态健康值划分为不同离散类,寻找数据间的“断裂”之处,使数据类间的差异最大,类内部的差异最小,实现“物以类聚”^[28]。依据研究需要,将宜宾市国土利用生态健康综合指数分为3个级别,分别表征不同的健康状况,依次为健康、亚健康与不健康。通过计算发现,在0.38、0.59、0.63处数据出现明显的断层,将13307个数据划分为三级阶梯,第一级阶梯[0.38,0.59)、第二级阶梯[0.59,0.63)、第三级阶梯[0.63,0.73],三级阶梯分别对应国土利用生态不健康、亚健康、健康状态。各级别的区域特征参考了徐明德等^[13]对于土地生态系统不同健康状况区域的定义,具体情况见表3。

依据国土利用生态健康状况分级标准对宜宾市国土利用生态健康状况进行分级评价。由图3可得,国土生态系统不健康区域主要集中于宜宾市东北部平原丘陵区与南部高原盆地过渡区,主要包括宜宾县西部的泥溪镇、东部永兴镇与白花镇,翠屏区中部城区,南溪区东南部与江安县西北部接壤区域以及珙县中西部上罗镇与玉和苗族乡及其周边地区,面积达3214 km²,占区域总面积的24.15%。该区域生态结构不合理,活力较低,出现大面积的生态环境异常区,生态系统受到一定程度的破坏。因此,相关政府部门要积极采取措施,优化国土利

表 3 国土利用生态健康状态分级
Tab. 3 Classification of ecological health status of land use

健康状态	划分标准	区域面积/km ²	面积百分比/%	区域特征
健康	[0.63,0.73]	6 131	46.07	生态结构较合理、系统活力较强,外界压力较小,无生态异常,生态系统功能较完善,系统较稳定,处于可持续状态
亚健康	[0.59,0.63)	3 962	29.78	生态结构相对合理、系统较稳定,外界压力较大,生态敏感性区域较多,出现少量生态异常,发挥基本生态功能,处可持续状态
不健康	[0.38,0.59)	3 214	24.15	生态结构出现缺陷,系统活力较低,外界压力大,生态异常较多,生态功能满足维持生态系统的需要较弱,生态系统退化

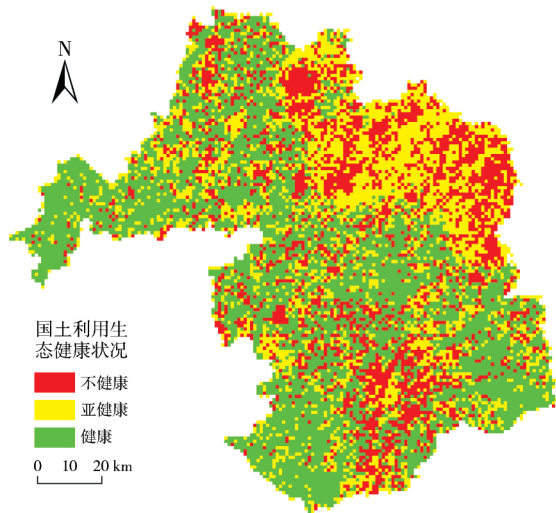


图 3 宜宾市国土利用生态健康状况图

Fig. 3 Ecological health status of land use in Yibin City

用类型空间结构,恢复生态用地,加大环保投资,制定相关环境保护政策法规,同时加强防灾减灾能力,提高自然灾害的预防与处理能力,建立健全国土生态系统预警监测机制,改善国土利用生态健康水平,为打造长江上游生态城市、国际化生态山水文化名城而努力。

亚健康区域面积较不健康区域面积大,约占区域总面积的 29.78%,该类型集中分布于翠屏区、南溪区与江安县境内,零散分布于各区县。表明全市国土生态系统虽然敏感性区域较多,但基本能发挥正常的生态功能,生态经济基本可持续。因此,该类型区在保持原有现状的基础上要充分挖掘影响国土生态健康的障碍因子,寻找主要矛盾,并提出针对性措施。

健康区域面积达 6 131 km²,占区域总面积的 46.07%。该类型主要分布于屏山县中西部,筠连县与兴文县中部、南部以及零散分布于其他区县。该类型区在应对国土利用生态健康的问题上,主要工作是保持与防范。未来几年是宜宾市建设小康社会

的攻坚期,生态经济协同发展,资源环境友好发展离不开国土生态健康发展。

3.2 国土利用生态健康空间探索分析 本文运用空间探索分析法,选用 Moran's I 作为国土利用生态健康水平空间差异性规律的评判标准,揭示国土利用生态健康空间集聚格局特征,便于为区域进行国土生态整治工程项目布局寻求合理的选址参考等。将评价数据导入 Geoda 10.0,建立一个 rook 一阶空间权重矩阵,得到宜宾市国土利用生态健康水平 Moran's I 值,并采用蒙特卡罗模拟的方法在 99.9% 的置信度下进行显著性检验。为进一步分析国土利用生态健康水平局部空间自相关程度,需将 Moran 散点图与 LISA 显著性水平有机结合。依据国土利用生态健康水平 Moran's I 指数,在 5% 显著性水平下绘制 LISA 集聚图(图 4(B))。

由图 4(A) 可得,2015 年宜宾市国土利用生态健康水平 Moran's I 值为 0.447 179。通过 Moran 散点的分布状况可以定性各区域与周边区域某地理现象或者某一属性值的相互关系。属性值存在较强的空间正相关的点将落入 HH(“高-高”)和 LL(“低-低”)象限,即自身健康水平高周围高,自身低周围低,具有均质性;存在较强的空间负相关的点将会落入 LH(“低-高”)和 HL(“高-低”)象限,即自身健康水平高低与周围相反,具有异质性。根据属性值落入区间的情况可知宜宾市国土利用生态健康水平在市域内具有较强的空间相关性。

由图 4(B) 可得,宜宾市国土利用生态健康水平大部分呈空间不显著性,具有空间相关性的以正相关为主,主要是高值或低值集聚区。其中 HH(“高-高”型集聚)呈片状分布于屏山县东部与西部、兴文县中部、南部以及筠连县中部、西部。屏山县全县植被繁茂,其境内的老君山国家自然保护区东西长约 11.6 km,南北宽约 7.4 km,总面积 3 500 hm²,在今后的发展中将生态保护工程放在第一位,切实保

障全县生态不退化。筠连县位于四川盆地南缘,云贵高原北麓川滇结合部,垂直地带性明显,生物种类繁多,未来要以创建省级生态县为抓手,因地制宜,充分利用国土资源优势高标准打造生态循环农业示范基地,同时加快构建“畜牧养殖-沼气-绿色种植”的生态农业循环经济发展模式。兴文县生态环境优美,旅游业十分发达,在面临越来越大的旅游压力背景下要以“绿色”为点、以“熨苗林中城”为主题的城建工作充分融合,大力发展生态旅游,生态城建设。

LI(“低-低”型集聚)零散分布于宜宾市东北部与南部,主要包括翠屏区城区、南溪区东部、江安县中部、宜宾县东部与珙县中部区域。翠屏区与南溪区为宜宾市城镇化水平较高的区域,应该优化城市用地内部空间布局,加大城市绿地建设,打造川

南宜居宜业典型区与金融生态区。江安县耕地比重大,农业发达,为全国的夏橙基地、商品粮基地、蚕桑基地,在现有基础上该区域应继续加强农田水利设施建设、注重新型技术人才培养、完善耕地保障制度、提高国土集约利用效益,全面推动生态农业的发展,缓解区域生态系统压力。珙县作为四川省重要的能源、建材与化工基地,应该积极响应人才引进战略,大力发展第三产业,注重产业结构调整、升级,坚持走资源节约型与环境友好型道路,构建宜宾“资源转化创新区、城市发展增长极”。宜宾县幅员面积大、人口众多、资源丰富,应该抓住撤县设区的大好机遇,积极发展生态旅游、生态经济,打造县域副中心。总之,LL型区要在生态经济的大背景下,国土利用结构优化的基础上,因地制宜地发展新型主导产业。

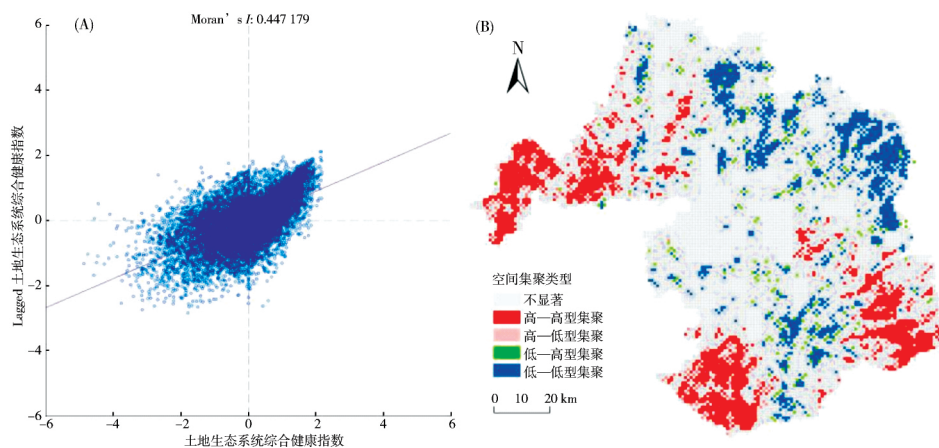


图4 宜宾市国土利用生态健康水平 Moran 散点图(A) 和 LISA 聚类图(B)

Fig. 4 Moran scatter plot (A) and LISA cluster plot (B) of the ecological health level of land use in Yibin City

3.3 国土利用生态健康水平空间分异影响因素分析 国土利用生态健康水平是区域自然因素与人文因素共同作用的结果,在借鉴相关学者研究成果,考虑区域特性的基础上遴选出符合“PSR”-“活力-组织-弹性-功能”指标体系框架下的10个因子指标作为国土利用生态健康水平空间分异的地理探测要素变量。将上述要素变量归一化值利用自然断裂点法分为3个级别(表4),并以渔网进行分区统计,将统计结果导入 GeoDetector Example (Disease Dataset) 计算平台中,分别计算出各影响因子对国土利用生态健康水平空间分异规律的决定力 P 值。

由表4可知:人口活动压力的地理探测器 P 值为0.350,远大于其他因子,表明人类活动差异是影

响生态系统健康水平空间分异的主要原因。人类活动与国土生态系统是相互依存、相互影响的关系。人类在改造地表环境,寻求自身发展的同时忽视了对自然资源与生态环境的保护,造成区域国土类型比例失衡,国土资源污染与破坏严重。一方面人们为追求粮食的高产而大量使用化肥农药对耕地生态环境造成了巨大的压力;另一方面,城镇化水平提升,大量林地与草地被占用,生态用地面积减少。截至2015年底,宜宾市的耕地与建设用地面积分别达到36.69%、7.02%,但各区县差异明显。人类活动对国土施加的压力差异导致区域生态环境破坏、生态系统失衡程度不同。因此,控制人口数量,提高人口质量,减少人类活动对国土的直接破坏成为当务之急。

表 4 各影响因素对国土利用生态健康水平的空间分异决定力地理探测结果

Tab. 4 Geographical detection results of the spatial differentiation of influencing factors on the ecological health of land use

指标因子	指标层	阈值			P
		一级区	二级区	三级区	
P_1	土壤侵蚀度	[0,0.330]	[0.330,0.667]	[0.667,1]	0.208
P_2	地形破碎度	[0,0.842]	[0.842,0.931]	[0.931,1]	0.064
P_3	人口密度/(人/km ²)	[0,0.561]	[0.561,0.769]	[0.769,1]	0.184
P_4	人为活动压力指数	[0,0.085]	[0.085,0.500]	[0.500,1]	0.350
S_1	归一化植被指数	[0,0.675]	[0.675,0.916]	[0.916,1]	0.032
S_2	景观多样性指数	[0,0.210]	[0.210,0.730]	[0.730,1]	0.296
S_3	生态弹性度	[0,0.0017]	[0.0017,0.110]	[0.110,1]	0.318
S_4	生态服务价值	[0,0.028]	[0.028,0.237]	[0.237,1]	0.315
R_1	环保投资金额/万元	[0,0.225]	[0.225,0.553]	[0.553,1]	0.054
R_2	第三产业所占 GDP 的比重/%	[0,0.364]	[0.364,0.633]	[0.633,1]	0.005

自然系统恢复力差异是影响生态系统健康水平空间分异的次要原因。生态弹性度、生态服务价值与景观多样性指数的 P 值分别为 0.318、0.315、0.296,表明生态健康状况受系统自身恢复力的影响。虽然宜宾市耕地与建设用地比重较大,但是国土类型多样,特别是草地与林地面积占区域总面积的 41.74%,区域水源涵养、水土保持、气候调节、污染物净化以及生态恢复功能显著,生态系统自我调节、自我恢复能力强。因此,区域国土自然系统恢复力不同,生态系统健康水平就不同。在今后的发展过程中,各区县要调整国土利用结构,优化“三生”空间布局,通过国土整理、盘活存量、严守耕地“红线”,加大生态用地,坚持可持续发展的道路,促使生态系统内部恢复力的提升。

土壤属性、地形因素与政策调控等是导致生态系统健康水平空间分异的其他原因。宜宾市幅员广阔,处于云贵高原与四川盆地的过渡地带,“七山一水两分田”的地貌使得区域自然地理特征不同,土壤侵蚀与地形破碎度存在差异;同时由于区位优势、自然资源、开发历史背景以及开发利用强度不同使得区域经济发展方向、发展水平、产业结构、政策调控不同。因此,上述因素导致国土生态系统的反馈差异明显。全市必须实行严格的生态环境保护制度,对破坏生态环境的行为予以严厉打击;同时大力发展科技,积极调整产业结构,加大第三产业比重,减轻一二产业对于土壤的污染与破坏,构建长江上游生态保护屏障。

4 结论与讨论

4.1 结论 1) 宜宾市各区县国土生态系统综合健

康平均指数围绕 0.60 上下波动,区域发展相对均衡,但市辖区与郊区县差异较大。其中筠连县、屏山县与兴文县超过全市平均值,究其原因这是由于中心城区与郊区呈现国土利用结构不同,国土生态系统受人类活动影响具有差异,城区因建设用地面积较大,生态用地较少,生态系统内部自我调节、自我恢复能力较差。

2) 宜宾市国土利用生态健康状况总体较好。其中健康区域面积最大,达到 6 131 km²,占区域总面积的 46.07%;亚健康区域面积次之,约占区域总面积的 29.78%,该类型集中分布于翠屏区、南溪区与江安县境内,零散分布于各区县;不健康区域面积达 3 214 km²,占比 24.15%,主要集中于宜宾市东北部平原丘陵区与南部高原盆地过渡区。

3) 宜宾市国土利用生态健康水平大部分呈空间不显著性,具有空间相关性的以正相关为主,主要是高值或低值集聚区。其中 HH 型呈片状分布于屏山县东部与西部、兴文县中部、南部以及筠连县中部、西部,LL 型零散分布于宜宾市东北部与南部。

4) 人类活动差异是影响生态系统健康水平空间分异的主要原因,自然系统恢复力差异是次要原因,土壤属性、地形因素与政策调控等是导致生态系统健康水平空间分异的其它原因。因此,收紧容量上线,兜住生态底线;坚持国土集约利用,优化“三生”空间布局;大力发展科技,调整产业结构将成为宜宾市提升生态系统健康水平,打造生态山水文化名城的必要措施。

4.2 讨论 国土利用生态健康评价是国土空间整治规划的前提与基础,本文结合 GIS、空间探索分

析、地理探测器模型,利用 ArcGIS、Geoda 10.0、Geo-Detector Example 等工具,探索宜宾市国土利用生态健康状况空间分布特征,并通过定量与定性相结合的方法解释其空间分异规律。在参考已有研究成果的基础上,本文将 PSR 模型与“活力-组织-弹性-功能”理论有机结合并做出改进,建立符合宜宾实际的国土生态安全综合健康评价指标体系,以1 km×1 km 的格网来统计健康指数,利用 ESDA 法揭示空间分异规律,最后用因子探测器直观展现各因素决定力大小,是对前人研究成果的继承与发展。但仍然存在诸多不足:1) 国土利用生态健康评价指标体系不够完善,生态系统是一个复杂的系统,本文仅以 10 个指标来衡量,忽视了 NPP、土壤污染等

反映生态系统自身属性的因子,同时由于数据的可获得性,响应指标偏少,有待于进一步改进。2) 人为活动压力强度、生态弹性度、生态资产价值化是参考已有研究成果,若参考的标准不同,其核算出来的值将会存在差异,因此,需要根据宜宾市实际情况进行修正。3) 本文为了方便多元数据的转化与兼容,丰富评价单元属性维度,细化评价区域空间精度使用 1 km×1 km 的格网作为评价基本单元,但未考虑行政界限、数据精度、数据处理方便等因素对格网大小的影响。4) 若能增加时间序列分析内容,则能揭示国土利用生态健康评价时空演变规律。

参考文献

- [1] 张继权,邹桃红,路兴昌,等. 模糊综合评判在国土利用生态健康评价中的应用 [J]. 科技导报,2011,29(19):34-39.
- [2] 彭建,王仰麟,吴健生,等. 区域生态系统健康评价:研究方法与进展 [J]. 生态学报,2007,27(11):4877-4885.
- [3] 高洁芝,夏梦蕾,孟展,等. PSR 框架下国土利用生态健康诊断 [J]. 江苏农业科学,2017,45(11):240-243.
- [4] 张晓琴,石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究 [J]. 干旱区资源与环境,2010,24(3):77-82.
- [5] 魏芳. 乡-镇-街道尺度生态系统健康评价 [D]. 兰州:兰州交通大学,2017.
- [6] 马明睿,韩华,王昊彬,等. 基于 RS 和 GIS 的崇明县生态系统健康评价 [J]. 生态科学,2014,33(4):788-796.
- [7] 朱卫红,郭艳丽,孙鹏,等. 图们江下游湿地生态系统健康评价 [J]. 生态学报,2012,32(21):6609-6618.
- [8] 赵玉婷,李文龙,陈迪,等. 高寒牧区草地生态系统健康动态评价:以甘南地区为例 [J]. 草业科学,2017,34(1):16-29.
- [9] 郝利霞,孙然好,陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价 [J]. 环境科学,2014,35(10):3692-3701.
- [10] 漆良华,周金星,张旭东,等. 长江上游山丘区国土承载力研究与评价:以四川省宜宾市为例 [J]. 长江流域资源与环境,2007,16(2):169-169.
- [11] 刘小波,甄英,陈怡君. 宜宾市近 60 a 降水变化特征分析 [J]. 内江师范学院学报,2017,32(4):73-77.
- [12] 赵漫,余景,陈丕茂,等. 海湾生态系统健康评价研究进展 [J]. 安徽农业科学,2015(35):8-11.
- [13] 徐明德,李静,彭静,等. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价 [J]. 生态环境学报,2010,19(8):1809-1814.
- [14] 何新,姜广辉,张瑞娟,等. 基于 PSR 模型的国土利用生态健康时空变化分析:以北京市平谷区为例 [J]. 自然资源学报,2015(12):2057-2068.
- [15] 陈浮,葛小平,陈刚,等. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究 [J]. 地理科学,2001,13(3):210-216.
- [16] 王静爱,何春阳,董艳春,等. 北京城乡过渡区国土利用变化驱动力分析 [J]. 地球科学进展,2002,17(2):201-208.
- [17] 蒋卫国,潘英姿,侯鹏,等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价 [J]. 地理研究,2009,28(6):1665-1672.
- [18] 陈鹏. 基于遥感和 GIS 的景观尺度的区域生态健康评价:以海湾城市新区为例 [J]. 环境科学学报,2007,27(10):1744-1752.
- [19] 潘耀忠,史培军,朱文泉,等. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量 [J]. 中国科学,2004,34(4):375-384.
- [20] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [21] 李建春,袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市国土生态安全评价研究 [J]. 自然资源学报,2017,32(6):988-1001.
- [22] LI Z, HE W, ZHENG H Y. Evolvement and driving forces of cultivated land ecological security spatial pattern [J]. Boletín Técnico,2017,55(6):352-363.
- [23] 刘晋希,何伟. 四川省县域乡村性空间分异及演变机制研究 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2018,41(1):122-130.
- [24] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with Geogdetector [J]. Environmental Modelling & Software,2012,33(10):114-115.

- [25] 刘吉平,马长迪,刘雁,等. 基于地理探测器的沼泽湿地变化驱动因子定量分析:以小三江平原为例[J]. 东北师大学报(自然科学版),2017,49(2):127-135.
- [26] 王曼曼,吴秀芹,吴斌,等. 盐池北部风沙区乡村聚落空间格局演变分析[J]. 农业工程学报,2016,32(8):260-271.
- [27] 杨忍,刘彦随,龙花楼,等. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别:以环渤海地区为例[J]. 地理研究,2015,34(6):1077-1087.
- [28] 陈健. 地缘环境单元划分方法研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2015.

Ecological Health Assessment of Land Use in the Upper Reaches of the Yangtze River Based on GISGrid Model: Take Yibin in Sichuan Province as an Example

LI Zheng^{1,2,3}, HE Wei^{1,2}, YANG Jiao^{1,2}, ZHAO Xiaoquan^{1,2}, CHEN Lin²

(1. Key Laboratory of Southwest Land Resources Evaluation and Monitoring of Ministry of Education of China,

Sichuan Normal University, Chengdu 610066, Sichuan;

2. Geography and Resources Science College, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, Sichuan;

3. Geographic Information and Remote Sensing Application Center, Chongqing 401121)

Abstract: In order to measure the grain size characteristics and spatial differentiation of the ecological health level of the land use in the study area, the paper is based on the “vigor-organization-elastic-function” theory and the PSR model. Taken the kilometer grid as the evaluation unit, the health value is calculated by the entropy weight comprehensive evaluation method, its spatial differential law is revealed by the ESDA method and the determinant factors are visually shown by the factor detector. The results show that: 1) The average comprehensive ecological index of land use in all districts and counties of Yibin City fluctuates around 0.60, and the regional development is relatively balanced. However, the central city and suburban counties are quite different. 2) The ecological health status of land use is generally good; the area of healthy area is the largest, reaching 6 131 km², accounting for 46.07% of the total area; the sub-health area is the second, accounting for 29.78%; the unhealthy area is the smallest, accounting for 24.15%. 3) The health level of the land use ecosystem has strong spatial correlation, spatial agglomeration pattern is significant, and spatial correlation is mainly positive correlation, mainly HH type or LL type accumulation area. 4) The difference in human activities is the main factor affecting the spatial differentiation of the ecological health level of the land use in the city. The difference in natural system resilience is a secondary factor. Soil properties, topography and policy regulation are other factors that lead to spatial differentiation of ecosystem health. Therefore, tightening the capacity on the line, absorbing the ecological bottom line, adhering to the intensive use of the land, optimizing the spatial layout of the “three students”, adjusting the industrial structure, and developing eco-tourism will be necessary for Yibin City to improve the ecological health level of the land use and create an ecological mountain culture city measures.

Keywords: land use ecological health; grid model; spatial exploratory analysis; geographic detector; Yibin

(编辑 周俊)