

基于 GIS 的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究——以星云湖流域为例^{*1}

朱军^{1, 2} 李益敏^{1, 2*} 余艳红²

(1. 云南大学资源环境与地球科学学院, 云南省地理研究所, 云南昆明 650091;

2. 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 云南昆明 650091)

【摘要】:以星云湖流域自然人文环境特征、主要生态环境问题为出发点,结合景观生态学原理方法、熵值法和 GIS 空间分析技术,实现星云湖流域生态安全的空间分异格局及优化。选取海拔高程、坡度、土壤侵蚀强度、地质灾害易发性、土地覆被(利用方式和植被覆盖度)、人口密度、距自然保护区距离、距离建设用地和距水源距离等因素为阻力因子叠加生成综合阻力要素,根据 GIS 空间成本距离分析原理,引用最小累积阻力模型识别构建流域生态廊道和生态节点,进一步规划优化流域生态功能网络的结构和功能。研究表明:(1)从各安全等级面积比例和平均生态安全指数角度,星云湖流域中度安全占流域总面积的 45.81%,高度安全为 25.24%,较低安全为 21.05%,不安全占 7.9%,平均生态安全指数为 2.95,流域生态安全总体处于中度安全,生态系统健康一般,但部分地区生态安全性较低,主要分布在南部、东部和北部地区,应重视这些区域的生态保护和建设;同时,坡度、水土流失因子和水资源(自然环境要素)、土地利用格局和距离建设用地(人类活动干扰要素)等因素是流域生态安全格局形成的主要因子;(2)识别规划了中枢生态源、核心型生态源斑块、一般生态源、多种级别的生态廊道和生态节点或战略点等构成的具有结构性和层次性的流域生态安全网络格局,对不同层次和结构的生态源、生态廊道和生态节点或战略点进行针对性建设保护,将有效提升流域生态系统的功能价值性和系统的完整性,进而加强流域生态稳定安全。

【关键词】:熵值法;GIS 空间分析;最小累积阻力模型;生态安全;星云湖流域

【中图分类号】:X143 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)08-1237-14

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201708014

目前,对生态安全的理解,有广义和狭义两种概念,广义的以国际应用系统分析研究所提出的概念最具代表:生态安全是包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全在内的复合人工生态安全系统^[1];狭义的生态安全是自然和半自然生态系统的生态安全^[2]。总之,生态安全本质上是人类与环境相互作用下不会导致个体或系统受到侵害和破坏,保障人-自然界生物-生态复合

¹ 收稿日期:2016-12-08;修回日期:2017-03-11

基金项目:云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室开放基金项目(KH100992)“高原湖泊流域关键生态用地识别技术及空间优化研究”[Key Laboratory of Pollution Process and Management of Lake Basin in Yunnan Province(KH100992)“Study on Key Ecological Land Identification Technology and Spatial Optimization of Plateau Lake Watershed”]

作者简介:朱军(1991~),男,硕士研究生,主要从事 GIS 应用研究. E-mail:846921812@qq.com

***通讯作者** E-mail:648119611@qq.com

生态系统可持续发展的一种安全稳定状态。

生态安全评价是对区域生态安全水平的定性、定量描述^[3]，反映了地区生态安全空间分异特征，同时为区域生态安全格局构建提供依据；区域生态安全格局构建则借助人类的主动干预来促进生态系统各要素的优化配置，最终改善和提高区域生态安全状况^[4]。生态安全评价，多以加权叠加模型为主要评价机制，从国内外研究文献看，评价方法多以综合指数法、模糊综合法等相关模型为主^[5]，即按照一定的规则构建评价指标体系，根据各自的权重来加权总和综合确定生态安全程度指数，进一步进行安全等级分级，代表性模型主要有压力-状态-响应(PSR)模型、驱动力-状态-响应(DSR)模型、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型、主成分分析法等。例如朱卫红等^[6]、张继权等^[7]、许美等^[8]、解雪峰^[10]、丁新原等^[11]针对不同的研究区，引用上述概念模型，对区域生态安全评价指标体系及多时段的生态安全评价，并探究其生态环境安全演变的主要驱动因子和胁迫因子；当然还有李中才等^[12]、王磊等^[13]、曹瑀等^[14]的研究也具有代表性。除此之外，针对综合指数法和模糊综合法无法同时兼顾评价指标模糊性、主观性和随机性的问题，张杨等^[5]、李明月等^[15]、张小虎等^[16]、余健等^[17]、黄辉玲等^[18]分别引用正态云模型与层次分析法结合、BP神经网络模型、熵值理论和物元理论结合对区域生态安全进行了评价，取得了一定的实效。当然还有生态足迹法^[19]、优度评价法^[20]、量子遗传投影寻踪模型^[21]和TOPSIS法^[22]等模型被引用其中，具有一定的应用价值，这里就不一一论述了。从目前研究进展现状，从评价单元看，上述研究均以行政单元为评价尺度，评价结果能反映区域生态安全总体水平和主要因子，但难以精确反映区域生态安全的空间差异和体现生态安全的空间邻近影响关系、区域生态安全格局形成机制；

景观中有某些潜在的空间格局，被称为生态安全格局(Security Patterns, 简称 SP)，它们由景观中的某些关键性的局部，位置和空间联系所构成(俞孔坚, 1999)，生态安全通过优化景观生态格局来实现，而生态安全格局部分或全部破坏的景观改变将导致生态状况急剧恶化^[4]，建立安全的生态格局则可以使全或局部景观中的生态过程在物质、能量上达到高效。景观生态安全格局理论和方法最初由俞孔坚引入国内，认为一个典型的安全格局由源，缓冲区，源间联结，辐射道和战略点所组成，这些潜在的景观结构与过程动态曲线上的某些门槛相对应^[23]。基于生态学理论下的景观格局优化是其主要构建理论方法。最小累积阻力模型(MCR)，原理为：在生物扩散穿越异质景观的生态过程中，生物的空间运动、栖息地的维护均需要克服一定的景观阻力来完成，累积阻力最小的通道即为最适宜的通道，模型的优势在于它综合考虑了景观单元间的水平联系，而非景观单元内部的垂直过程。因此，能有效说明生态安全格局内部结构间的有机联系^[4]，在区域生态安全格局构建中得到广泛的应用和扩展，例如周锐等^[24]、潘竞虎等^[4]、李晶等^[25]、李辉等^[26]、刘杰等^[27]、唐丽等^[28]、蒙吉军等^[29]、余宇晨等^[30]和陈影等^[31]的研究具有代表性，当然还有其他学者的研究也具有一定的代表性，这里就不一一赘述了。云南省星云湖既是玉溪市重要的粮食经济作物主产区，又是全流域点面源的受纳地，是云南省环境保护重点整治保护的三大湖泊之一。星云湖进入湖沼发育的中晚期，属退化型湖泊，生态平衡相当脆弱，流域内湖泊被群山环抱，周围湖积平原狭窄，流域生态系统封闭程度高，生态经济容量弹性空间小。近 10a，随着流域经济快速发展，对土地、矿产资源的大量开采利用，在人类高强度开发活动影响下，流域资源过度利用导致流域天然林地、湖滨湿地不断缩小，取而代之的是工林地湿地、城镇居民地，物种入侵对流域原生态系统造成极大冲击作用，原生生态环境遭受极大威胁，流域正面临着天然林地、湖滨湿地萎缩，生物资源衰减，湖泊污染及其生态功能退化严重，原生野生动植物栖息地逐渐丧失，流域生态安全与经济发展矛盾突出。通过文献检索，对高原湖泊流域生态安全评价及研究较少，展开流域生态安全的定量评估及安全格局构建，并对其优化研究来指导流域进行生态农业布局、自然保护区的限定、生态型建设用地规划等相关生态保护工作的科学实施，提高流域生态安全是十分有必要的。对星云湖流域生态安全格局及优化研究，旨在从空间上和数据信息上，为流域相关生态保护建设规划工作提供客观且较高精确的理论指导依据。对此，在对以上研究综述基础上，本文拟选综合指数法、权重客观确定型模型熵值法与 GIS 空间分析技术相结合，以栅格像元为评价单元，展开对流域生态安全评价及其格局构建，并进一步引用最小累积阻力模型、GIS 空间成本距离模块结合对流域景观生态安全格局构建及功能优化，提升流域生态安全性。

1 研究区概况

星云湖位于云南省玉溪市江川县境内，地理位置为 102° 45' ~102° 48' E，24° 17' ~24° 23' N，属高原断陷湖泊，是一座

富营养化湖泊，东临华宁县，西接玉溪，南与通海接壤，北与晋宁、澄江两县为邻，规划范围包括江川县 6 个乡镇 45 个村公所，总面积 371.7km² (不包括昆明市晋宁县 10km²)，总人口为 23.4088 万人；星云湖流域由于受构造盆地影响，流域内地势周围高、中间低、海拔 1690~2648m，相对高差较大。流域内湖泊被群山环抱，周围湖积平原狭窄，流域生态系统封闭程度高，生态经济容量弹性空间小；星云湖流域共有大龙潭河、周德营河和螺蛳铺河等 12 条主要入湖河流，多数河流坡降较大，对河岸两侧的水土保持显得格外重要。流域属中亚热带半干燥高原季风气候，干湿季分明，流域多年降雨量为 800~1100mm。星云湖已进入湖沼发育的中晚期，生态平衡相当脆弱，森林植被涵养能力差、部分地区水土流失严重，不能很好地发挥涵养水源，保持水土，调节气候的作用；泥沙淤积湖中，降低了供水蓄水能力，缩短了湖泊寿命，加快了湖泊老化。由于星云湖既是玉溪市重要的粮食经济作物主产区，又是全流域点面源的受纳地，已是云南省环境保护重点整治的三大湖泊之一，以星云湖为研究区，对该流域生态安全评价及其安全格局构建和优化，对该区生态保护建设等相关举措具有十分重要的实践指导意义。

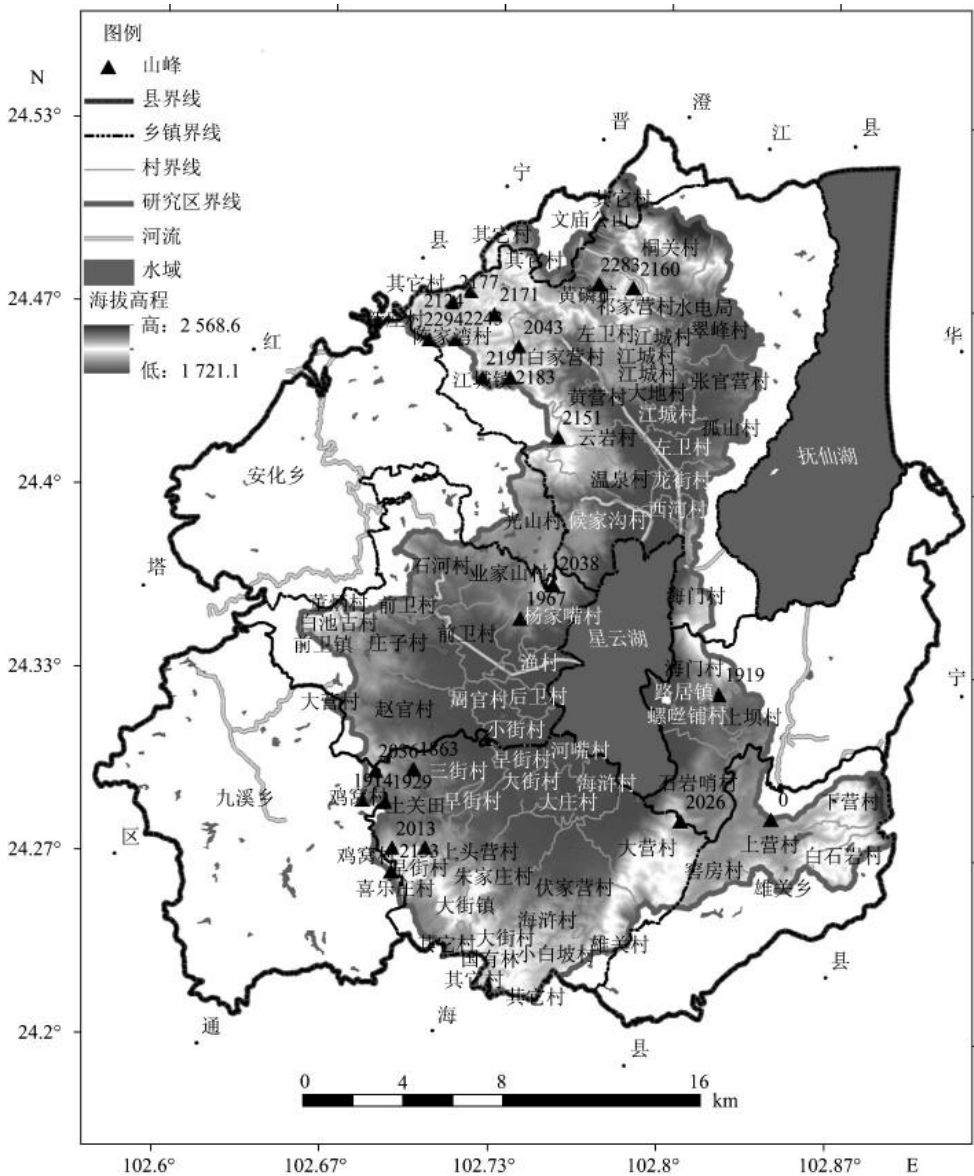


图 1 研究区区位图
Fig. 1 Location of the Study Area

2 数据及预处理

生态安全评价涉及到自然要素数据、社会经济数据以及相关政策数据,按其可编辑和显示格式分为3类:第一类为可编辑图层数据,包括自然地理数据例如数字高程模型数据(地理空间数据云下载,30m×30m,利用ENVI遥感软件进行几何校正),遥感影像数据(通过ENVI软件经过大气校正、几何校正,图像信息增强处理(融合),主要提取土地覆盖类型和植被覆盖度指标,土地覆盖类型数据通过GIS和RS技术进行人机交互解译,在对解译的结果采集100个样点进行野外验证,精度达到92%,符合后续研究需求)为高分一号,自然保护区分布数据(来源于林业局,数据格式为shp格式)和流域边界矢量数据(来源于云南省高原湖泊研究中心,地理坐标系为Beijing_1954,投影坐标系为Beijing_1954_GK_Zone_18N);第二类数据为不可编辑的JPEG图片格式,包括比例尺为1:170000的年降雨量等值线分布图(2012年)、土壤类型和有机质含量图(江川区土肥站),地质灾害易发性图和土壤侵蚀强度图(2012年)(国土局)。该类数据本身不具有编辑及分析条件,需要进行GIS空间地理配准,采用基于流域边界矢量图层配准,误差控制在2个像元之内;其次对该类数据进行数字化并构建相应属性表和拓扑错误检查,消除多边形之间的相交和重叠等错误;第三类数据为文本型数据,包括社会经济统计数据如村庄分布及人口数据(各乡镇府及村庄的)还有来自于国土局、农业局及环保局等部门的相关流域治理规划数据资料。最后,所有图层数据统一投影坐标系为Beijing_1954_GK_Zone_18N,栅格大小为30m×30m。

3 研究方法

3.1 生态安全评价

生态安全评价是对生态系统完整性以及对各种风险下维持其健康的可持续能力的识别与判断研究^[1]。综合指数法广泛引用于诸如土壤侵蚀敏感性、生态系统健康、生态敏感性和生态安全此类的评价研究中。本文结合GIS空间加权叠加分析技术和综合指数法对该流域生态安全评价。评价模型如下:

$$ESI = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n P_{ij} W_j} \quad (1)$$

式中:ESI为第*i*个栅格评价单元的综合生态安全指数; P_{ij} 为第*i*个栅格单元上的第*j*个指标安全等级指数; w_j 为第*j*个指标的权重。以ArcGIS中的Natural Break法将计算出的ESI值分为4级,分别对应不同程度的生态安全等级。该方法是利用统计学的JENK最优法得出的分界点,能使各级的内部方差之和最小^[32],在没有统一的分级标准时,此分级方法是较为有效的分级方法。

3.1.1 评价指标

区域生态安全受到地形地貌、自然环境要素、人类活动和各种自然灾害的影响,为了能够更加准确解剖流域生态安全空间分异规律和为后续的研究提供客观高效的依据,指标的选择应遵循突出性和代表性、全面性、相关性和冗余性最低。结合研究区主要生态问题和数据资料的全面性、可获取性,指标的空间量化性,拟选海拔高程、坡度、土壤侵蚀强度、地质灾害易发性、土地利用类型、人口密度(以自然村为统计单元,利用自然村边界图层增加人口密度属性字段,矢量转栅格(30×30)实现人口密度的空间化)、植被覆盖度、距自然生态保护区距离、距离建设用地和距水源距离等10个自然和人文因子参与评价。在各个因子的量化分级中,参考学者刘洋等^[3]、潘竟虎等^[4]和李晶等^[25]研究的统计和经验标准,并结合研究区实际情况制定研究区各因子生态安全分级标准(表1),界定各约束因子的安全等级:7、5、3、1级分别代表不安全、较低安全、中等和高度安全。值越小,生态环境越健康,抵抗外界干扰能力越大,安全水平越高。

表 1 流域生态安全约束指标及等级划分

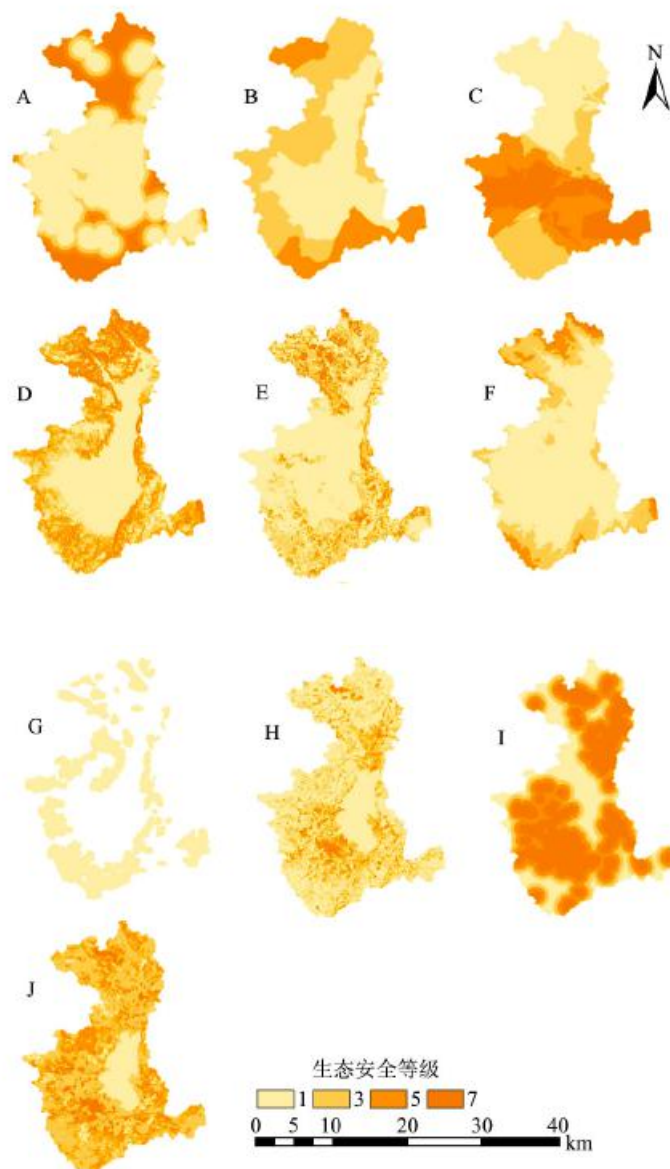
Tab. 1 Constraint Factors of Ecological Security and Classification of Xinyun Lake Basin

安全等级	不安全	较低安全	中度安全	高度安全
海拔 (m)	>2 400	2 190~2 440	1 940~2 190	1 690~1 940
坡度 (°)	>25	15~25	7~15	0~7
距自然和人文景观保护距离 (m)	重点文物保护单位 100 m 缓冲区			自然保护区 300 m 缓冲区
土壤侵蚀强度	高度及以上强度侵蚀	中度侵蚀	轻度侵蚀	微度侵蚀
植被覆盖率 (%)	<25	25~40	40~60	>60
土地覆盖类型	裸地或建设用地	荒草地或旱地	水田、人工幼林地或草地	天然林地、草地水域
距水源距离 (m)	>1 500	1 000~1 500	500~1 000	<500
距建设用地距离 (m)	<500	500~1 000	1 000~1 500	>1 500
人口密度 (人/km ²)	1 826~6 752	1 345~1 826	829~1 345	198~829
地质灾害易发性	高度易发区	中度易发区	低度易发区	安全区
分级赋值	7	5	3	1

因子中地形(海拔和坡度)代表地表的粗糙和起伏程度,反映水力侵蚀强烈的易发程度。水土流失是星云湖流域主要的生态问题和水域污染源之一,影响区域流域水质安全和土地生产能力安全;自然保护区及缓冲区内景观生态保护和恢复建设力度大,相关政府制定了合理的区域景观生态安全规划,保障了区域生态功能的稳定与服务功能的持续性,往往成为脆弱生态区遏制生态退化的屏障,对生态安全格局的恢复起着重要作用;水资源是生物生存和发展的主要条件,距离水源近的地方往往具有较优良的生态条件,因此在宏观评价中,地形和离河流的距离被当作是间接反映土壤水分含量的指标。植被覆盖能反映陆地生物多样性安全。星云湖流域居民集中分布,人类的干扰较集中,道路、工业用地和城乡居民点等建设用地是典型的人类活动场所。人类活动对干旱区景观的可持续利用具有双重功能,生态保育的强度随离建设用用地距离增大而减弱。由于建设用地越近,自然资源开发的强度越大,土地退化强度越大,因此,不同类型的距离可以作为空间活动生态风险强度的指标。同理,人口密度大的地方,人类对自然资源如土地资源、生物资源和水资源需求加大,对环境的干扰程度也就越大。以上指标均能较全面地反映自然因素和人文因素对生态安全的影响,预期评价结果具有一定的科学性。

3.1.2 指标权重确定

指标权重的精确性决定了评价结果的合理性程度,是评价过程中的核心重点研究内容。确定权重的方法主要分为客观赋权法和主观赋权法两大类,前者根据指标数据所反映的统计信息给指标赋权,如均方差法、熵权法、主成分分析法(空间主成分分析法)等;后者结合专业知识和专家经验综合确定指标权重,包括层次分析法、灰色关联度分析法等^[33]。灰色关联法(Grey Relational Analysis, GRA)确定指标权值,选取区域生态环境变化的决定性因子之后,比较确定其他指标与主层因子决定的指标之间的关联度排序状况,最后根据这个关联度排序关系来决定各指标的权重,针对本研究指标,难以客观定量地说明决定性因子;层次分析法构建核心是指标间的相对重要性判断矩阵,然而指标之间相对重要性很难定量客观判断,权重的主观性较大,在没有对各指标对评价内容影响的深入分析解剖下,引用此方法确定权重会导致结果与实际的误差较大。在客观赋权法中,熵值法和主成分分析法,其权重求取过程机制原理得到较多专家学者的认可,广泛应用于权重的确定,空间主成分分析法技术实现相对较难,需要较全面和深刻的知识理解。因此,考虑模型可行性和评价结果的客观性和精确性,这里采用熵权法求取指标权重。在信息论中,熵是系统混乱程度的度量,数据的离散程度越大,信息熵越小,其提供的信息量越大,该指标对综合评价的影响越大,其权重也应越大;反之,各指标值差异越小,信息熵就越大,其提供的信息量则越小,该指标对评价结果的影响也越小,其权重亦应越小^[34, 35]。用熵值法确定指标权重,既可以克服主观赋权法无法避免的随机性、臆断性问题,还可以有效解决多指标变量间信息重叠问题^[36]。熵值法过去主要应用在基于行政单元统计数值型指标权重求取之中,本研究基于GIS栅格数据结构的指标图层叠加分析实现,本文引入熵值法与GIS空间地图代数功能结合,构建基于空间化的数据指标熵值法权重确定模型,其模型构架如下。



注：A：距水域距离；B：地质灾害易发分区；C：人口密度；D：坡度；E：土壤侵蚀强度；F：海拔；G：距自然保护区距离；H：植被覆盖度；I：距建设用地距离；J：土地覆盖类型。

图 2 流域各因子的生态安全等级分布图

Fig. 2 Safety Grade Distribution of Different Factors in Xingyun Lake Basin

原始数据矩阵归一化。设 m 个评价指标 n 个评价单元(栅格像元)的原始数据矩阵为 $A=(a_{ij})_{m \times n}$ ，对其归一化处理得到 $R=(r_{ij})_{m \times n}$ 。本研究指标已经过分级标准化处理，考虑到后续数据运算值较大，对数据进行归一化处理(0~1)，本论文规定各指标中生态安全等级值越小，生态安全性越高，因此评价指标均为小者为优指标，对应的归一化模型为：

$$r_{ij} = \frac{(\max \{a_{ij}\} - a_{ij})}{(\max \{a_{ij}\} - \min \{a_{ij}\})} \quad (2)$$

式中: r_{ij} 为第 i 个指标图层上第 j 个栅格像元上的标准化属性值。

(2) 定义熵:在有 m 个指标、 n 个被评价单元(栅格单元)的评估问题中,第 i 个指标的熵为:

$$h_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

$$k = 1 / \ln n ; f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$$

式中: h_i 为第 i 个指标的熵值;

其中 r_{ij} 为第 i 个指标第 j 个栅格单元的属性值。

(3) 定义熵权:定义了第 j 个指标的熵之后,可得到第 j 个指标的熵权:

$$w_j = \frac{1 - h_j}{n - \sum_{j=1}^n h_j} (0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1) \quad (4)$$

通过 GIS 空间地图代数模块和统计分析工具,获取熵值法模型相关参数,进一步统计计算出各指标熵值和熵权,如表 2。

表 2 指标熵值及熵权
Tab. 2 Entropy and Entropy Weight of Indexes

评价指标	人口密度	灾害指标	距离自然保护区	距离水源	距离建设用地	土壤侵蚀指标	海拔指标	坡度指标	植被覆盖度	土地覆盖类型
熵值(h)	5.697 1	5.538 7	5.507 5	5.644 2	5.724 9	5.491 0	5.685 4	5.681 5	5.670 6	5.734 0
熵权(w)	0.101 3	0.097 9	0.097 2	0.100 1	0.101 9	0.096 8	0.101 0	0.100 9	0.100 7	0.102 1

从各指标权重分配上,指标权重差异化不大,没有异常指标权重,权重分配较均匀,这也说明指标叫具有代表性,熵值法是一种比较中性客观的权重确定模型。

3.2 景观生态安全格局优化

3.2.1 优化模型及构建

景观生态安全格局优化是对景观格局、功能和生态过程相互作用综合理解的基础上,通过调整、优化各种景观类型在空间上和数量上的分布格局,使景观产生最大生态功能作用,提升生态环境稳定性和安全性^[26, 27]。自然界中的能量流、信息流和生物流,需要一定的流通通道(生态廊道)、和关键结合点(生态节点)、局部(面)或其空间组合所构成的生态流网络结构,才能保证区域生态安全。景观流的最小累积阻力模型(MCR)构建,是实现关键生态网络部位的有效方法,MCR模型为:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=m}^{i=n} (D_{ij} R_i) \quad (5)$$

式中:MCR 是从源 j 扩散到空间某点的最小累积阻力; f 是反映 MCR 与变量(D_{ij}R_i)之间正比关系的函数; D_{ij}是目标单元从源 j 扩散到空间某点穿过景观 i 的距离; R_i是景观表面 i 对景观流向某个方向扩散的阻力。

3.2.2 生态源的判别

“源—汇”理论指出:生态源一般是具有多个物种、群体的自然栖息地生态系统,并应具有广泛的代表性,能充分反映研究区的多种生境特点的生态关键区域,具有空间扩展性和连续性,这些区域维持着地区生物多样性、生态系统的健全性和人类的发展持续性^[37],例如重要自然保护区等区域。据此,本文拟取研究区国家级和省级自然保护区(原生林地)、重要居民饮用水源地、星云湖向外缓冲 100m 以内的区域等生态保护区为生态源(通过实地考察,星云湖周围 100m 左右区域属于湿地,主要植被为芦苇等多种草本植被,是免受污染最强的水质净化带和以湖泊为中心的水生态和生物多样性的保证,其生态功能显著,因此,将星云湖向外缓冲 100m 区域也作为生态源。

3.2.3 阻力面的建立

阻力面的建立是景观安全网络结构构建的核心,阻力要素及阻力值的确定是关键。目前,阻力面的确定,有基于坡度和土地覆盖类型赋值计算^[26]、基于土地利用的生态服务功能价值计算^[27]和生态安全指数的计算^[4]等。生态安全指数考虑了较为全面的自然因素和人文因素,生态安全较高区,自然生态系统较完整,生态流阻力较小,反之则大。因此,本文采用生态安全指数作为阻力因素,通过 GIS 空间分析技术成本距离模块,构建最小累积阻力表面,能综合反映生态流的空间阻力形成的机制,更好地构建生态廊道和生态节点等景观生态安全网络关键部位。在景观阻力面分级没有统一的分级标准基础上,采用自然断裂法进行阻力强度分级是有效的分级方法,据此划分为低阻力区、较低阻力区、中度阻力区、较高阻力区和高阻力区 5 个阻力等级区。

3.2.4 生态廊道

生态廊道是源地间斑块的链接,是物种、信息和能量流通的主要通道,可以增强景观组分间的联系和防护功能等,其连通性是衡量廊道结构的基本指标^[27]。在 MCR 阻力面图上,廊道就是相邻两“源”之间的阻力低谷,是相邻两“源”之间最容易联系的低阻力通道。根据安全层次的不同,源间廊道可以有一条或多条,它们是生态流之间的高效通道和联系途径,每两个“源”之间联系的廊道至少应该有一条^[4, 39]。廊道有利于物种在“源”间及“源”与基质间的流动,连接原生植被的廊道有利于物种跨景观范围的扩散^[28]。通常认为在可能的范围内廊道越多越好,多一条廊道就相当于为物种的空间运动多增加一个可选择的途径,多一条廊道就减少一份被截流和分割的风险,为其安全增加一份保险^[40]。借鉴 GIS 的水文分析方法,利用水文学工具以累积耗费距离表面为基础,结合研究区的实际情况,对洼地填充、计算无洼地的水流方向,汇流累积量,通过反复设定阈值,确定汇流累积量的值,进一步确定源间累积阻力最小通道即生态廊道。在阈值 1500 处,流域源间最小累积阻力通道的完整性(延伸性)和连通性较好,因此,以该阈值为生态廊道识别标准,提取大于 1500 的累积汇流量,矢量化及平滑处理,最终得到流域生态廊道分布。

3.2.5 生态节点或战略点

低阻力的核心保护“源”位于高阻力的景观基质中，阻力等值线以各“源”为中心近似同心圆式地往外扩展^[29]。在各“源”间的等值阻力线相切的部位，就形成了鞍，当生态扩散能力超过一定程度时，这些部位就成为了联系不同“源”之间的关键点，即战略点^[30, 31]，它们是相邻“源”生态势力圈相切的点，是连接相邻“源”之间的潜在跳板^[42, 43]。通过对这些景观战略点的景观保护或改变，可以最有效地提高景观生态系统结构功能的完整性。在阻力面上，生态节点一般位于生态廊道上生态功能最薄弱处，即最小路径与最大路径的交点或最小路径的汇集处^[4, 44]，它将零散的斑块连接起来，并对生态流的运行起关键作用。

4 结果与分析

4.1 星云湖流域生态安全格局

选取 10 个生态安全评价指标，根据评价模型进行空间叠加运算，获取了研究区每个栅格像元上的生态安全综合指数及分布，生态安全指数越大，安全性越小；采用 GIS 空间重分类模块，应用自然间断分类法将生态安全综合指数分为 4 个等级，高度安全的安全指数为 1~2.43；中度安全为 2.43~3.24；较低安全为 3.24~3.84；不安全为 3.84~5.61，构成研究区的空间生态安全格局。经空间统计，星云湖流域平均生态安全指数为 2.95，平均安全水平处于中度安全偏低；从各安全级面积比例来看，中度安全面积为 175.25km²，占流域总面积的 42.34%；其次，高度安全面积为 96.56km²，占研究区总面积的 22.84%；较低安全区面积为 80.53km²，占流域总面积的 26.43%；最后，不安全面积为 30.22km²，占 8.39%。综合说明流域生态安全总体以中度安全为主。空间分布上，流域生态安全较高区集中分布在中部、东部和东北部，通过将生态安全格局图与各因子图综合叠加分析(图 3)，生态安全较高区坡度和地形起伏较小，同时有大面积的水域和农田，水土流失较小，灾害不易发；流域生态安全较低区主要集中分布于江城镇北部、路居镇北部和南部、大街镇南部、北部和东部大面积区、雄关乡中部和东部等地区，除了城市建筑密集区(坝区)受人类干扰较强外，其余地区(山区)坡度和地形起伏也较大，林地景观较为破碎，水土流失较为严重且有地质灾害发生，是生态保护建设的重点区域。通过流域生态安全格局与各评价因子分布格局对比分析(图 2、图 3)，坡度、水土流失因子和水资源(自然环境要素)、土地利用格局和距离建设用地远近因子(人类活动干扰要素)与流域生态安全格局空间耦合度较高，说明该流域生态安全主要受这些因子影响控制。流域有 34.82%的面积处于较低及以下安全区，是水域污染防治和水土保持的关键区，流域生态用地规划保护建设显得极为重要。通过强化流域原生态源区，识别构建源间生态廊道和生态节点，并对其缓冲生态建设能很好地提升流域生态安全。

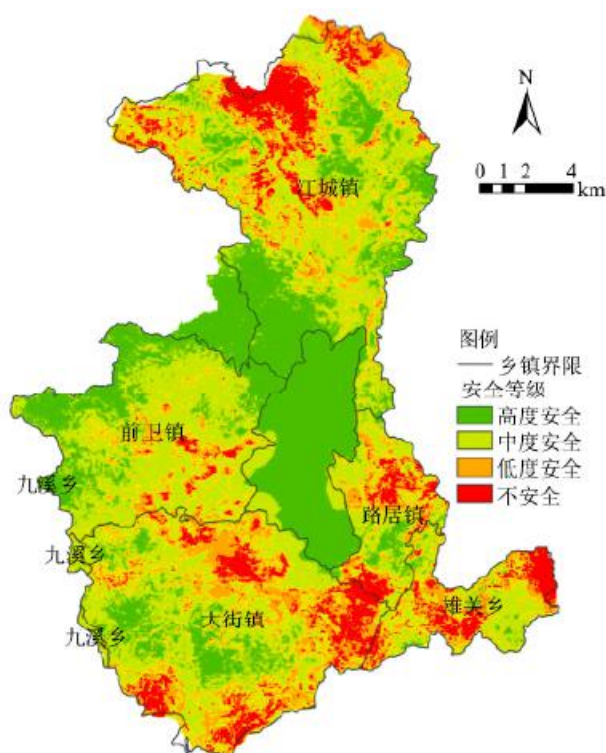


图 3 星云湖流域生态安全格局图

Fig. 3 Pattern of Ecological Security in Xingyun Lake Basin

4.2 景观网络格局分析及优化

4.2.1 景观网络格局

运用 MCR 模型生成生态源间的最小累积耗费距离, 识别星云湖流域潜在的生态廊道和生态节点(图 4)。通过将星云湖流域景观格局累积阻力栅格图与土地利用图和基础地理信息底图相叠加, 由于星云湖流域特殊的山地—坝区分离的地形特征以及人类发展的需要, 流域坝区的居民点、道路集中度较高, 致使大型生境斑块数量减少, 斑块的破碎程度严重, 增大了坝区地区景观的阻力, 其廊道自身内部结构以及植被质量均较差, 从物种的空间演变和生物多样性维护的角度来看, 低阻力廊道数量及其之间的连通性相对较少和薄弱; 中部星云湖、流域西部、西南部山区, 自然禀赋良好, 有面积较大的生态源, 具有较高的生态适宜度, 同时, 生态源空间分布较为紧凑, 生态廊道较短及其廊道累积阻力相对较小, 利于维护和建设, 生态流较安全稳定; 北部地区的生态斑块数量总体匮乏及面积较小, 对物种多样性的维护和该区生态系统安全稳定作用较小, 斑块之间连接度低, 源间生态流所受阻力也较大, 生物生境条件较差; 星云湖生态源区与流域四周生态源区之间的生态低安全区, 景观阻力较大, 生态斑块极为缺乏, 破碎度也较高, 山地与坝区之间缺乏完整紧密的廊道衔接。总之, 星云湖流域内生态斑块在数量、面积和分布上都存在较大的空间差异, 主要生态源间的生态廊道较少及连通性较低, 生态流难以进入生态功能减弱、抵御外来干扰的能力和生态服务功能脆弱的生态薄弱区。

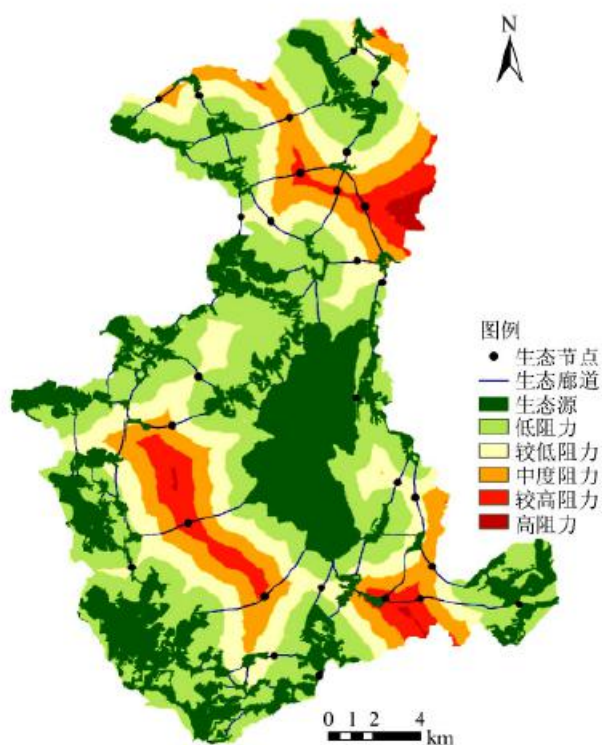


图 4 星云湖流域景观累积阻力、生态节点和廊道的空间分布图

Fig. 4 Spatial Distribution of Landscape Pattern Cumulative Resistance, Ecological Nodes and Corridor in Xinyun Lake Basin

4.2.2 关键生态部位功能格局规划建设

(1)生态源。生态源景观是区域各种自然界能量流、物质流和信息流的核心场所，是物种主要的空间栖息地和交替区。本文选择星云湖流域的生态源主要为国家或地方重点保护林区和水域，是原生生态区，面积最大的生态源为星云湖、大街镇南部和前卫镇西部以及江城镇的西南部和东北部、雄关乡的东部等原始生态区(图 4)，这些生态源区承担着流域的生物多样性，生态系统的完整性和稳定性，是流域生态红线区和保护的核心。从生态学、景观生态学、物种生境等理论分析，生态源的斑块大小、空间区位不同，所起的生态功能也有较大差异，一般来说，生态源区斑块越大越有利于区域物种长期栖息和繁衍，承担着区域物种多样性，生态系统完整性，是维护区域生态安全的底线生态核心区，处在多个较大生态源间的面积相对较小且空间分布破碎的生态源区，其所承担的生态功能主要为物种空间活动的的枢纽站和临时栖息地，应当对其进行缓冲建设保护。据此，将星云湖流域生态源按斑块面积大小、所处的战略区位和生态功能的的综合体现分为中枢生态源和面积较大的核心生态源和面积较小的一般生态源两种(图 5)，针对不同的生态源采取针对性的建设和保护措施，最大程度实现流域生态源应有的生态功能。核心型生态源是流域面积最大或分布在流域四周较为紧凑的大小生态源组成的源区，是核心生态保护区；中枢型生态源区是流域多个核心型生态源区之间的生态源区，是多个生态源间物种空间演变的跳板，是物种在多个生态源间活动的中间栖息地和缓冲区，是多个生态源间的低阻力区，强化了多源间的连接度和联系紧密性，其生态战略地位显得特殊，同时其受人类活动干扰较大，通过强化中枢型生态源的建设和保护，扩大其缓冲地带，使多源间的物种迁徙汇聚于此，利于物种间的交替和演化，构成流域关键的生态安全网络部位。通过将生态源与生态安全格局叠加分析，所有生态源并不都处于较高生态安全区，部分生态源生态安全性较低，星云湖流域四周为山区，对原始林地的生态缓冲建设保护是核心，根据地形地调整农业用地布局结构，越靠近原

始林地，尽可能地种植与原始林地性质相近的植被物种，降低其异质性，最大程度维护其生物多样性和水土保持性；流域中部为坝区，人类活动强烈，星云湖水质为第五类，湖泊污染严重，星云湖作为坝区及流域最大的生态功能源区，对的生态保护建设显得突出，可通过对其周围进行湿地缓冲带建设，即能净化污水，又能维持湖泊生物多样性、环湖生态旅游发展，缓解湖泊退化，提升湖泊生态系统安全性，进一步促进流域生态安全。

图 5 流域生态网络关键部位功能分布图

(2)生态廊道。生态廊道是彼此不相连的生态源间各种生态流通道,源与源之间物种流通的低阻力带即为生态廊道,本文模拟的生态廊道为源间的最小累积阻力生态廊道,如图4。提升现有生态廊道的连通性、增加廊道的数量、强化廊道保护建设程度是优化生态廊道的重要途径,藉此可提升研究区生态廊道的完整性和闭合性,增大其生态服务功能^[4, 39]。区域空间生态廊道的空间区位不同,其所承担的功能和保护建设重要性也有所差异,根据上文中的生态源规划原则,将生态廊道规划为三级,即一级生态廊道为面积较大或战略位置特殊(非处于生态源集中分布的位置偏僻地区,例如流域北部地区)的核心型生态源间低阻力道,其连接的生态源间没有中枢生态源,物种的空间流通阻力变大,因此,通过强化该类生态廊道的保护建设,对加强该流域核心型生态源间的各种生态流流通性具有重大的促进作用;二级生态廊道为核心型和中枢型生态源之间及中枢型生态源间的生态廊道,该类生态廊道核心型生态源间物种通过中枢生态源交替流通的低阻力通道,是大斑块和小斑块生态源间链接的纽带,是构建流域景观网络结构完整的关键部位。由图4可知,二级生态廊道自身的累积阻力存在空间差异,流域中部以南地区的二级生态廊道所跨过的阻力等级区阻力较小,生态流流通性相对较强,在流域中部以北地区的二级生态廊道经过的阻力区阻力值较大,这主要由于该区生态景观破碎、生态源斑块少且较小,同时地形较复杂,生态环境处于较低安全状态,物种的空间流通阻力增大;三级生态廊道是连接斑块较小且位置较孤立的一般生态源。生态源间的实地距离一定程度决定了生态廊道的长度和累积阻力大小,源间距离越长,廊道越长,所穿过的阻力区等级种类越多,累积阻力值就越大,越不利于源间生态流的流通,景观生态网络结构显得简单,网络连接度较低,不能发挥其最大的生态功能价值;流域生态源越紧凑,低阻力的廊道越多且短,

景观网络结构越复杂紧密,越有利于物种的空间交替和演变,区域生态系统越稳定安全。将生态廊道与生态安全格局叠加分析,生态廊道主要处于较低生态安全区,生态廊道作为源间物种栖息较适宜地,通过对其缓冲保护建设,能更好地提高该区的生态安全性,降低较低生态安全区面积,促进流域总体生态安全水平提高。

(3)生态节点或战略点。生态节点可以是低阻力廊道的交汇处或等阻力线上的鞍部或低阻力和高阻力的相交处,是景观生态安全网络构建的关键节点,对区域物种的空间流通起到战略性作用。针对本文生态廊道的识别原则及分布格局,识别等阻力线上的鞍部和低阻力廊道和高阻力廊道的交汇处或源间廊道上累积阻力最高处为生态节点或战略点,如图4。从其所处的阻力区来说,部分生态节点或战略点景观累积阻力较大,处于流域景观累积阻力最大区。生态节点或战略点是生态源间物种的跳板或转折点,本文的生态节点或战略点是源间累积阻力最小廊道上的高阻力区,通过强化建设生态节点或战略点景观,改善该处的生态环境,将大大降低生态廊道的景观阻力,同时提高廊道的上的物种空间流通性,进一步提升整个景观网络格局的生态功能价值,促进流域生态系统内部各部分之间的各种生态流健康可持续进行。根据生态级别,划分生态节点类型为两类(图5):一级生态节点或战略点为一级生态廊道和高阻力廊道的交汇处,是核心型生态源间生态廊道的关键部位,加强对其缓冲生态建设,降低景观阻力,促进流域核心生态源间的各种物质流,对于维护流域生物多样性,水土保持性具有重要的积极作用;二级生态节点或战略点为二、三级生态廊道与较高阻力廊道的交汇处,强化其生态建设,最大程度降低其景观阻力,是实现流域景观网络流通性加强的重要举措,促进提高流域生态安全性。

5 讨论与结论

采用GIS技术与熵权法、综合指数法相结合评价区域生态安全,以栅格像元为评价单元,其结果落实到每个像元上,规避常规评价模型的主观性因素带来的结果模糊问题,空间精度和显示效果得到提高,在此基础上运用最小累积阻力模型对流域景观网络格局进行构建,进一步优化规划流域景观生态安全网络格局,研究表明:(1)星云湖流域生态安全处于中度安全偏低,生态系统健康一般,但部分地区生态安全性较低,主要分布在南部、东部和北部地区,应到重视这些区域的生态保护和建设。通过流域生态安全格局与各评价因子分布格局对比分析(图2、图3),坡度、水土流失因子和水资源(自然环境要素)、土地利用格局和距离建设用地远近因子(人类活动干扰要素)与流域生态安全格局空间耦合度较高,说明该流域生态安全主要受这些因子影响控制。(2)星云湖流域景观空间阻力的分布与人类活动强度密切相关,人类开发越深地区阻力越大,道路的大量修建,成为了生态源间的高阻力区域,降低了区域生态流的流通安全性,因此需要对道路廊道进行绿化建设,降低其景观阻力;(3)针对模拟的潜在生态廊道和生态节点、生态源间的空间邻接关系及生态源、生态廊道和生态节点所处的空间区位和战略地位,规划了中枢生态源、核心型生态源及一般生态源斑块、三级生态廊道、二级生态节点或战略点等点线面构成的具有结构性和层次性的流域生态安全网络格局(图5),对不同层次和结构的生态源、生态廊道和生态节点或战略点进行针对性建设保护,将有效提升流域生态系统的功能价值性和系统的完整性,较大程度提高流域生态安全性,缓解流域湖泊的退化过程。

本文与众多学者研究的不同之处在于结合熵值法求取栅格数据结构的评价指标权重,基于栅格数据结构,采用GIS空间图层运算功能,对高原湖泊流域生态安全评价,其结果科学性和实践指导性相比过去主流评价的结果有一定提升。本文是在较为宏观层面上对生态安全进行评价,本研究结果与流域地形、人类空间活动格局叠加,具有一定的理论分析合理性,生态较敏感区^[45],生态安全性较低,本方法对该流域生态安全评价具有一定的科学可取性。就目前对区域生态安全评价及内容分析研究上,主要是对区域总体生态安全进行评估,很少从空间上深入分析各指标的生态安全性、区域生态安全在各指标中的分异规律等特征,不能很好地揭露区域生态安全空间格局形成机理;景观网络格局构建研究上,研究层次较为宏观,并没有进行较为微观上的深入研究,空间生物流、能量流和信息流所受到的内部阻力机制是什么目前还没有深入探讨过,仅仅从宏观上来研究和确定阻力要素;同时,生态源的选择目前也只停留在什么可以作为生态源上,对生态源尺度的研究颇为较少,多大面积的生态用地才能实现生态源内涵所具有的功能。以上这些问题可能会是今后该领域进一步发展的突破口。

参考文献:

-
- [1] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述 [J]. 地理科学进展, 2005(6) : 8—20.
- 【CHEN X, ZHOU C H. Review of the Studies on Ecological Security. Progress in Geography, 2005(6) : 8—20.】
- [2] 崔胜辉, 杨志峰, 张珞平, 等. 一种海岸带生态安全管理方法及其应用 [J]. 海洋环境科学, 2006, 2: 84—87.
- 【CUI S H, YANG Z F, ZHANG L P, et al. A method of coastal ecological security management and its application [J]. Marine Environmental Science, 2006, 2: 84—87.】
- [3] 刘洋, 蒙吉军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 24: 6980—6989.
- 【LIU Y, MENG J J, ZHU L K. Progress in the research on regional ecological security pattern [J]. Acta Ecological Sinica, 2010, 24: 6980—6989.】
- [4] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例 [J]. 应用生态学报, 2015, 10: 3126—3136.
- 【PAN J H, LIU X. Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based on spatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: A case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 10: 3126—3136.】
- [5] 张杨, 严金明, 江平, 等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价 [J]. 农业工程学报, 2013, 22: 252—258.
- 【ZHANG Y, YAN J M, JIANG P, et al. Normal cloud model based evaluation of land resources ecological security in Hubei province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29 (22) : 252—258.】
- [6] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 [J]. 生态学报, 2014, 06: 1379—1390.
- 【ZHU W H, MIAO C Y, ZHENG X J, et al. Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology [J]. Acta Ecological Sinica, 2014, 34(6) : 1379—1390.】
- [7] 张继权, 伊坤朋, Hiroshi Tani, 等. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价 [J]. 应用生态学报, 2011(1) : 189—195.
- 【ZHANG J Q, YI K P, HIROSHI T, et al. Ecological security assessment of Baishan City in Jilin Province based on DPSIR [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011 (1) : 189 —195.】
- [8] 徐美, 朱翔, 李静芝. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价 [J]. 冰川冻土, 2012 (5) : 1265 —1272.

-
- 【XU M, ZHU X, LI J Z. Evaluation of Land Ecological Security in Hunan Province Based on DPSIR-TOPSIS Model [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012 (5) : 1265 —1272. 】
- [9] 王鹏, 况福民, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价 [J]. 经济地理, 2015(1) : 168—172.
- 【WANG P, KUANG F M, DENG Y W, et al. Assessment of Land Eco-Security of the Hengyang City on the Principal Component [J]. Economic Geography, 2015(1) : 168—172. 】
- [10] 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(8) : 1702—1711.
- 【XIE X F, WU T, XIAO C, et al. Ecological Security Assessment of the Dongyang River Watershed Using PSR Model [J]. Resources Science, 2014(8) : 1702—1711. 】
- [11] 丁新原, 周智彬, 马守臣, 等. 矿粮复合区土地生态安全评价——以焦作市为例 [J]. 干旱区地理, 2013, 6:1067—1075.
- 【DING X Y, ZHOU Z B, MA S C, et al. Evaluation of ecosecurity of land for the overlapped areas of crop and mineral production:A case of Jiaozuo City [J]. Arid Land Geography, 2013, 6: 1067—1075. 】
- [12] 李中才, 刘林德, 孙玉峰, 等. 基于 PSR 方法的区域生态安全评价 [J]. 生态学报, 2010, 23: 6495—6503.
- 【LI Z C, LIU L D, SUN Y F, et al. Assessment method of regional ecological security based on Pressure-State-Response model [J]. Acta Ecological Sinica, 2010, 23: 6495—6503. 】
- [13] 王磊, 郭灿, 李慧明. 基于 PSR-TOPSIS 模型的宁夏回族自治区土地生态安全评价 [J]. 水土保持研究, 2016, 6: 154—159.
- 【WANG W, GUO C, LI H M. Evaluation of land security in Ningxia Hui autmomous regional Based on PSR-TOPSIS Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 6: 154—159. 】
- [14] 曹瑀, 王燕辉, 张立强, 等. 基于 PSR 模型的耕地生态安全时空分异特征研究——以河北省沧州市为例 [J]. 水土保持研究, 2016, 6: 290—295, 302.
- 【CAO Y, WANG Y H, ZHANG L Q, et al. Time and space differentiation characteristics of ecological security of cultivated land based on PSR Model—take Cangzhou city, Hebei Province as an Example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 6: 290—295, 302. 】
- [15] 李明月, 赖笑娟. 基于 BP 神经网络方法的城市土地生态安全评价——以广州市为例 [J]. 经济地理, 2011 (2) : 289—293.
- 【LI M Y, LAI X J. Evaluation on ecological security of urban land based on BP neural network——A case study of Guangzhou [J]. Economic Geography, 2011, (2) : 289—293. 】

-
- [16] 张小虎, 雷国平, 袁磊, 等. 黑龙江省土地生态安全评价 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2009(1) : 88—93.
- 【ZHANG X H, LAI G P, YUAN L, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter—element model: a case study of Heilongjiang Province. China Population, Resources and Environment, 2009 (1) : 88 —93. 】
- [17] 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用 [J]. 农业工程学报, 2012, 5:260—266.
- 【YU J, FANG L, CANG D B, et al. Evaluation of land ecosecurity in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) , 2012, 28(5) : 260—266. 】
- [18] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价 [J]. 农业工程学报, 2010, 3: 316—322.
- 【HUANG H L, LUO W B, WU C F, et al. Evaluation of land eco—security based on matter element analysis [J]. Transactionsof the CSAE, 2010, 26(3) : 316—322. 】
- [19] 黄海, 刘长城, 陈春. 基于生态足迹的土地生态安全评价研究 [J]. 水土保持研究, 2013(1) : 193—196, 201.
- 【HUANG H, LIU C C, CHEN C. Appraisal of land ecological security based on ecological footprint [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013(1) : 193—196, 201. 】
- [20] 王庆日, 谭永忠, 薛继斌, 等. 基于优度评价法的西藏土地利用生态安全评价研究 [J]. 中国土地科学, 2010(3) : 48—54.
- 【WANG Q R, TAN Y Z, XUE L B, et al. Assessment on the Eco—security of Land Use in Tibet Based on the Superiority Evaluation [J]. Method. China Land Sciences, 2010(3) : 48—54. 】
- [21] 聂艳, 彭雅婷, 于婧, 等. 基于量子遗传投影寻踪模型的湖北省耕地生态安全评价 [J]. 经济地理, 2015(11) : 172—178.
- 【NIE Y. PENG Y T, YU Q, et al. Evaluation on farmland ecological security in Hubei Province based on quantum genetic projection pursuit model [J]. Economic Geography, 2015(11) : 172—178. 】
- [22] 陈西蕊, 张蓉珍. TOPSIS 法在区域生态安全动态评价中的应用——以陕西省为例 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011 (7) : 177—184.
- 【CHEN X R, ZHANG R Z. Application of TOPSIS method in dynamic evaluation of regional ecological security ——A case study of Shanxi Province [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition) , 2011(7) : 177—184. 】
- [23] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长预景 [J]. 生态学报, 2009(3) : 1189—1204.

【YU K J, WANG S S, LI D H, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth frame work in Beijing [J]. Acta Ecological Sinica, 2009(3) : 1189—1204. 】

[24] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 基于生态安全格局的城市增长边界划定——以平顶山新区为例 [J]. 城市规划学刊, 2014(4) : 57—63.

【ZHOU R, WAGN X J, SU H L, et al. Delimitation of urban growth boundary based on ecological security pattern—a case study of pingdingshan new zone. Urban [J]. Planning Forum, 2014(4) : 57—63. 】

[25] 李晶, 蒙吉军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建——以鄂尔多斯市准格尔旗为例 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013(04) :707—715.

【LI J, MENG J J, MAO X Y. Based MCR Model for Developing Land Use Ecological security pattern in farming — pastoral zone: a case study of jungar Banner [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013(4) : 707—715. 】

[26] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划 [J]. 生态学报, 2011, 20: 5928 — 5936.

【LI H, YIN, YAO W J, et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern [J]. Acta Ecological Sinica, 2011, 20: 5928—5936. 】

[27] 刘杰, 叶晶, 杨婉, 等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化 [J]. 自然资源学报, 2012 (5) : 801—808.

【LIU J, YE J, YANG W, et al. A GIS—Based Landscape Pattern Optimization Approach for Lake Dianchi Watershed [J]. Journal of Natural Resources, 2012(5) : 801—808. 】

[28] 唐丽, 罗亦殷, 罗改改, 等. 基于粒度反推法和 MCR 模型的海南省东方市景观格局优化[J]. 生态学杂志, 2016(12) : 1—11.

【TANG L, LUO Y Y, LUO G G, et al. Landscape pattern optimization Based on the granularity inverse method and MCR model in Dongfang city, Hainan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016(12) : 1—11. 】

[29] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7) : 1052—1061.

【MENG J J, WANG Y, WANG X D, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang Based on MCR model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(7) : 1052—1061. 】

[30] 余宇晨, 陈彩虹, 贺丹, 等. 基于 MCR 模型和 Kriging 的海口市景观格局优化分析[J]. 西北林学院学报, 2016(3) : 233—238.

【SHE Y C, CHEN C H, HE D, et al. Landscape pattern optimization analysis Based on MCR model and kriging in

Hai Kou [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016 (3) :233—238. 】

[31] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究——以河北省怀来县为例 [J]. 自然资源学报, 2016 (4) : 556—569.

【CHEN Y, HA K, HE W L, et al. Study on the change and Optimization of landscape pattern in the basin of northwest Hebei Mountains—a case study of huailai county, Hebei Province [J]. Journal of Natural Resources, 2016(4) : 556—569. 】

[32] 颜磊, 许学工, 谢正磊, 等. 北京市域生态敏感性综合评价 [J]. 生态学报, 2009, 6: 3117—3125.

[YAN L, XU X G, XIE Z L, et al. Integrated assessment on ecological sensitivity for Beijing [J]. Acta Ecological Sinica, 2009, 6: 3117—3125. 】

[33] 庞雅颂, 王琳. 区域生态安全评价方法综述 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2014(S1) : 340—344.

【PANG Y S, WANG L. A review of regional ecological security evaluation [J]. China Population, Resources and Environment, 2014(S1) : 340—344. 】

[34] 马艳梅, 吴玉鸣, 吴柏钧. 长三角地区城镇化可持续发展综合评价——基于熵值法和象限图法 [J]. 经济地理, 2015(6) : 47—53.

[MA Y M, WU Y M, WU B J. Comprehensive evaluation of sustainable urban development of Yangtze River Delta based on entropy method and quadrant method [J]. Economic Geography, 2015(6) : 47—53. 】

[35] 乔家君. 改进的熵值法在河南省可持续发展能力评估中的应用 [J]. 资源科学, 2004, 26(1) : 113—119.

【QIAO J J. Application of improved entropy method in Henan sustainable development evaluation [J]. Resources Science, 2004, 26(1) : 113—119. 】

[36] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析 [J]. 地理科学, 2013, 11:1323—1329.

【WANG F X, MAO A H, LI H L, et al. Quality measurement and regional difference of urbanization in Shandong Province based on the entropy method [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 11: 1323—1329. 】

[37] 黄宁, 王红映, 吝涛, 等. 基于“源—汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架——以厦门市马銮湾流域为例 [J]. 应用生态学报, 2016(10) : 3325—3334.

【HUANG N, WANG H Y, LIN T, et al. Regulation framework of watershed landscape pattern for non — point source pollution control based on ‘source-sink’ theory: A case study in the watershed of Maluan Bay, Xiamen City, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 10: 3325—3334. 】

-
- [38] 岳德鹏,王计平,刘永兵,等. GIS 与 RS 技术支持下的北京西北地区景观格局优化[J]. 地理学报,2007 (11) :1223—1231.
- 【YUE D P, WANG J P, LIU Y B, et al. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in Northwest of Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 2007(11) : 1223—1231. 】
- [39] 潘竟虎,刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建 [J]. 生态学杂志, 2016(3) : 791—799.
- 【PAN J H, LIU X. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule river Basin [J]. Journal of Ecology, 2016(3) : 791—799. 】
- [40] 熊繁,邵景安. 不同土地利用情景下农村景观生态格局优化 [J]. 中国农业资源与区划, 2016(2) : 11—21.
- 【XIONG F, SHAO J A. The optimization of rural landscape ecological pattern of different land use scenarios: A case of Longhua Town, Jiangjing district of Chongqing[J]. Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016 (2) : 11 —21. 】
- [41] 魏伟,赵军,王旭峰. GIS、RS 支持下的石羊河流域景观利用优化研究 [J]. 地理科学, 2009(5) : 750—754.
- 【WEI W, ZHAO J, WANG X F. Landscape optimization of Shiyang river basin based on RS and GIS [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009(5) : 750—754. 】
- [42] 张小飞,王仰麟,李贵才,等. 流域景观功能网络构建及应用——以台湾乌溪流域为例[J]. 地理学报,2005(6) :96—102.
- 【ZHANG X F, WANG Y L, LI G C, et al. Landscape functions network construction and application in watershed scale:A case study Wuxi Watershed [J]. Acta Geographica Sinic, 2005(6) : 96—102. 】
- [43] 孙贤斌,刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例 [J]. 生态学报, 2010(5) : 1157—1166.
- 【SUN X B, LIU H Y. Optimization of wetland landscape patterns based on ecological function evaluation: a case study on the coastal wetlands of Yancheng, Jiangsu Province. Acta Ecological Sinica, 2010(5) : 1157—1166. 】
- [44] 韩文权,常禹,胡远满,等. 基于 GIS 的四川岷江上游杂谷脑流域农林复合景观格局优化 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2) : 231—236.
- 【HAN W Q, CHAGN Y, HU Y M, et al. Spatial optimization of agro-forest complex landscape pattern in Zagunao watershed, upper Mingjiang river, Sichuan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(2) : 231—236. 】
- [45] 闫海忠,杨树华,于福科. 基于遥感技术的玉溪市生态环境敏感性评价研究 [J]. 北方园艺, 2013(9) : 99—101.

【YAN H Z, YANG S H, YU F K. Evaluation of sensitivity to ecological environment based on RS in Yuxi City [J] . Northern Horticulture, 2013(9) : 99—101. 】