

基于GIS和几何平均数模型的流域生态安全评估及 在各因子中的分异特征

——以星云湖流域为例

李益敏^{1,2}, 朱军^{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, 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, 昆明 650091)

摘要:结合几何平均数模型和GIS技术,选取海拔高程、坡度、土壤侵蚀强度、地质灾害易发性、土地利用类型、植被覆盖度、距自然生态保护区距离、距离建设用地、人口密度和距水源距离10个指标对星云湖流域生态安全进行评价,分析了该区域生态安全的空间分异规律和形成机理。研究表明:星云湖流域平均生态安全指数为2.33,中度安全面积占流域总面积的42.34%,高度安全占22.84%,较低安全占26.43%,不安全面积为32.117 km²,占8.39%,说明流域生态安全总体以中度安全为主,生态系统健康一般;从空间上,流域生态安全较低区主要集中分布于北部、东部和南部以及城市建筑密集区,除了城市建筑密集区受人类干扰较强外,其余地区坡度和地形起伏较大,景观较为破碎,水土流失较为严重且有地质灾害发生,这些地区是生态保护和建设的重点区域。生态安全等级在综合评价下的结果与单因子评价下的结果存在较大差异,区域生态安全受多重因素的综合影响,单因子评价难以精确全面反映区域生态安全的空间分异规律特征和成因机理,各因子之间存在相互促进和相互抑制的作用关系,流域自然环境要素坡度、水资源环境和水土流失以及人类活动干扰要素土地利用格局、距离建设用地远近等因子是形成流域生态安全格局的主要因素。

关键词:几何平均数模型; GIS技术; 生态安全格局; 空间分异; 星云湖流域

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0198-08

An Assessment on Basin Ecological Security and Its Variation Characteristics in Factors Based on GIS Technique and Geometric Mean Model

—A Case in Nebula Lake Basin

LI Yimin^{1,2}, ZHU Jun^{1,2}, YU Yanhong²

(1. Department of Environment and Resources, Yunnan Institute of Geography, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Key Laboratory of Pollution Process and Management of Lake Basin in Yunnan Province, Kunming 650091, China)

Abstract: The 10 factors includes elevation, slope, soil erosion intensity, prone to geological disasters, land use types, vegetation coverage, distance from the natural ecological protection zone, the distance of construction land, population density and the distance from the water were selected to evaluate the ecological security of Nebula Lake Basin. The spatial distribution and formation mechanism of regional ecological security was analyzed by using the geometric mean model and 3S technology tentatively. The study showed that the average ecological security index was 2.33 in Nebula Lake basin. From the aspect of area proportion of all security levels, the area of moderate security zone accounted for 42.34%, high security for 22.84%, the low security for 26.43%, the unsafe for 8.39% of the total basin area, which illustrated that ecological security was mainly moderate security in the basin; from spatial distribution aspect, the zone of higher ecological security mainly distributed in the northern, eastern and southern and built-up zones in Nebula Lake basin where the slope gradients of land are great, terrain was undulated, the forest landscape was fragemental, land use was

收稿日期: 2016-10-15

修回日期: 2016-10-24

资助项目: 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室开放资助项目“高原湖泊流域关键生态用地识别技术及空间优化研究”(KH100992)

第一作者: 李益敏(1965—),女(白族),云南省昆明市人,教授,主要从事山地环境与发展研究。E-mail: 648119611@qq.com

朱军(1991—),男,贵州省黔西县人,硕士,主要研究方向: GIS应用与开发。E-mail: 846921812@qq.com

not reasonable, soil erosion was severe, and geological disasters has happened except that the city building intensive area was disturbed by the human, these regions are the key areas of ecological protection and construction; there is a big difference between the two results that the regional ecological security is affected by multiple factors, single factor evaluation is difficult to accurately reflect the characteristics and mechanism of spatial differentiation of the regional ecological security through the comparison and analysis between the results of comprehensive evaluation and single factor evaluation. There is the relationship of mutual promotion and inhibition among each factor. The factors such as slope, water resource environment, soil and water loss and disturbance factors of human activities such as land use pattern, distance from construction land are the main factors to form the ecological security pattern of the basin.

Keywords: geometric mean model; GIS technique; ecological security pattern; spatial differentiation; Xingyun Lake Basin

随着人口增长和社会经济快速发展对资源需要的迫切性增加,跟随而来的是环境退化、生态系统破坏和自然灾害等诸多问题^[1],地区生态安全问题对区域发展的威胁越来越大,成为了相关专业人士或部门近年来的研究热点。高原湖泊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;同时,矿产资源(磷矿)的开采,一定程度上破坏了原有景观结构,生态系统不稳定性加强,生态安全问题显现。星云湖既是玉溪市重要的粮食经济作物主产区和饮用水源地,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,通过文献检索,对高原湖泊生态安全评价研究较少,展开该流域生态安全的定量评估及安全等级格局构建,对流域生态农业布局、自然保护区的限定、居民生态型建设用地规划等相关生态保护工作具有一定的理论指导价值。目前,对生态安全的理解,有广义和狭义两种概念,广义的概念以国际应用系统分析研究所提出的为代表: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^[2];狭义的生态安全是自然和半自然生态系统的安全。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—生态复合生态系统可持续发展的一种稳定安全状态。

生态安全评价是对区域生态安全水平的定性、定量描述^[2],生态安全评价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^[3-4]。生态安全评价,多以加权叠加模型为主要评价方法,例如压力—状态—响应(PSR)模型、驱动力—状态—响应(DSR)模型、驱动力—压力—状态—暴露—

影响—响应(DPSEEA)模型、驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型^[3],即按照一定的结构准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。上述概念模型均以行政区或小流域为评价尺度,评价结果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,同时,在权重确定上主观性很大,影响结果指导实践的客观性。此外,物元、投影寻踪等方法的实现技术较复杂,对关键风险因子识别力不够;生态足迹法对数据要求较高不易获取,指标的标准化分异较多,试验成果与实际误差较大。几何平均数模型,其原理是 N 个数值相乘开 N 次方根,是对众多数据综合分析求取平均值,能更好地对多重数据叠加分析进行压缩和聚类,该模型构建相对较简单,易于实现,被有效广泛地应用于各种生态环境问题评价中,例如吴金华^[5]、凡非得^[6]、黄静^[7]、杨月圆^[8]等的研究为代表,同时,它规避了层次分析法和专家打分法等方法主观经验判断权重不合理的缺陷,并且以栅格单元为评价单元,空间显示效果较好,引用该模型对区域生态安全进行评估研究,能更加精确地反映评价内容的空间分异规律和成因机理,在评价分析内容上,多数学者主要分析评价指标的构建和空间生态安全格局特征。本文在以上研究进展的基础上,以典型高原湖泊流域为研究区,将几何平均数模型和GIS空间分析技术结合,从水土保持性、生物多样性、地质灾害环境安全性、水资源分布对生物的安全性、人类活动干扰性等方面,展开对流域生态安全评价及安全分区,从单因子评价到综合因子评价分析区域生态安全格局及其与各因子的空间耦合性特征,通过面积比例和平均生态安全指数分析揭露高原湖泊流域生态安全指数在各因子中的变化特征,进一步说明流域生态安全的空间分异成因机理,揭露各安全区形成的主导因素,希望能为流域相关生态建设工作提供针对性的指导意义,同时为相关高原湖泊流域生态安全研究提供一定的借鉴价值。

1 研究区概况

星云湖位于云南省玉溪市江川县境内,地理位置为东经 $102^{\circ}45'$ — $102^{\circ}48'$,北纬 $24^{\circ}17'$ — $24^{\circ}23'$,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六个乡镇 45 个村公所,总面积 371.7 km^2 (不包括昆明市晋宁县 10 km^2),总人口为 23.408 8 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 $1\,690\sim 2\,648\text{ m}$,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,流域降雨量为 $800\sim 1\,100\text{ mm}$ 。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和饮用水源地,又是全流域点面源的受纳地,星云湖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,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。

2 分析数据及预处理

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三类: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, $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,利用 ENVI 遥感软件进行几何校正),遥感影像(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。为我国高分辨率高分一号航拍影像,全色分辨率是 2 m ,多光谱分辨率为 8 m ,影像分三景(501273 20141206,228042 20140515,227506 20140515);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,包括等降雨量线分布图、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(国土局),该类数据本身不具有编辑条件,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),还有来自于国土局、农业局及环保局的相关流域治理规划数据资料。最后,所有分析图层数据统一在投影坐标系为 Beijing_1954_GK_Zone_18 N 下,栅格大小为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

3 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]。区域生态安全受到地形地貌、人类活动和各种自然灾害的威胁影响,本文从水土保持性、生物多样性、地质灾害环境安全性、水资源分布对生物的安全性、人类活动干扰性等方面,结合数据资料的全面性、可获取性,从以上角度选取海拔高程、坡度、土壤侵蚀强度、地质灾害易发性、土地利用类型、植被覆盖度、距自然生态保护区距离、距离建设用地、人口密度(人口密度是流域自然村点人口数通过 GIS 空间 Kriging 插值方法内插生成,通过自然间断法进行安全等级分级)和距水源距离(星云湖是江川县重要的农工业活动最强区域和动植物多样性丰富区,人类活动对水源环境的干扰强,星云湖污染严重,相关部门已对其周围规划建立湖滨湿地带,力图保护星云湖水体遭受最低程度的污染,同时对距离湖泊一定距离的农田进行调整优化,最大程度降低当地居民对湖泊较近区域的开发活动强度,从这个角度看,距离湖泊越近生态环境越安全)等 10 个因子展开对流域生态安全评价及安全分区。在各个因子的量化分级中,参考潘竞虎^[3]、吴金^[5]等的研究经验标准基础上,并结合研究区实际情况制定各因子生态安全分级标准(表 2),界定各约束因子的安全等级:7,5,3,1 级分别代表不安全、轻度安全、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。指标中土壤侵蚀强度的获取采用表 1 中的相关模型提取,最后根据水利部颁发的最新土壤侵蚀强度分级标准进行强度分级。生态安全综合评价模型,即几何平均数模型表达式为:

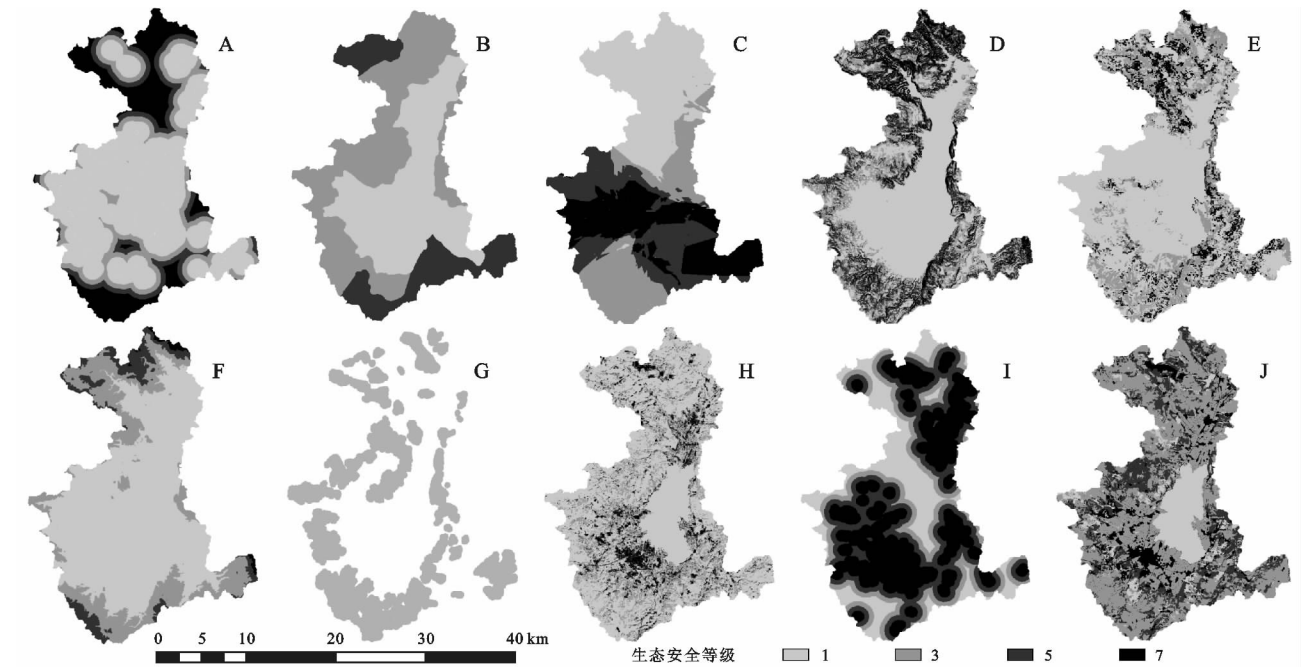
$$ESI = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n P_{ij}}$$

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。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^[15], 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。

表 1 土壤侵蚀模数及其各因子估算模型及参考文献

侵蚀模数和各因子	估算模型	参考文献
侵蚀模数(A)	$RUSLE(A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P)$	
降雨侵蚀力因子(R)	$R=0.44488P^{0.96982}$	[10]
土壤可蚀性因子(K)	综合多个学者研究成果求取其平均值	[10-13]
坡度坡长因子(LS)	$LS=\left(\frac{\lambda i}{20}\right)^{0.24} \cdot\left(\frac{\theta}{5}\right)^{2.22}(\theta \geqslant 14^{\circ})$ $S=(10.8 \sin \theta)+0.03(\theta < 5^{\circ})$ $S=(16.8 \sin \theta)-0.05\left(5^{\circ} \leqslant \theta < 14^{\circ}\right)$	[10-11]
植被覆盖因子(C)	$C=\left\{\begin{array}{ll} 1 & c=0 \\ 0.6508-0.3436 \lg c & 0 < c < 78.3 \% \\ (\text{NDVI}-\text{DNVI}_{\min}) /(\text{NDVI}_{\max }-\text{DNVI}_{\min }) & c \geqslant 78.3 \% \end{array}\right\}$	[12]
水土保持措施因子(P) 综合学者研究成果求取其平均值, 采用赋值		[12-14]



注: A 表示距离水域距离; B 表示地质灾害易发分区; C 表示人口密度; D 表示坡度; E 表示土壤侵蚀强度; F 表示海拔; G 表示距离自然保护区距离; H 表示植被覆盖率; I 表示距离建设用地距离; J 表示土地覆盖类型。

图 1 单因子生态安全评价结果分布

表 2 生态安全评价指标及分级赋值标准

安全等级	不安全	轻度安全	中度安全	高度安全
海拔/m	1690~1940	1940~2190	2190~2440	>2440
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	>1500	1000~1500	500~1000	<500
距建设用地距离/m	<500	500~1000	1000~1500	>1500
人口密度	1826~6752	1345~1826	829~1345	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

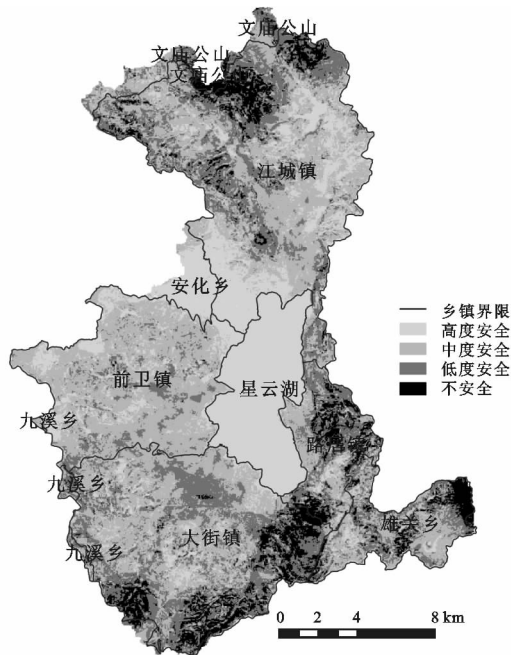


图2 星云湖流域生态安全格局

4 结果与分析

4.1 流域生态安全格局

选取 10 个生态安全评价指标,采用几何平均数模型进行空间叠加运算,获取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 1~1.86;中度安全为 1.86~2.63;较低安全为 2.63~3.52;不安全为 3.52~6.17,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 2.33,平均安全水平处于中度安全偏低;从各安全等级面积比例来看,中度安全面积为 161.96 km²,占流域总面积的 42.34%;其次,高度安全面积为 87.37 km²,占研究区总面积的 22.84%;处于较低安全面积为 101.12 km²,占流域总面积的 26.43%;最后,不安全面积为 32.117 km²,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,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北部、东部和南部以及城市建筑密集区,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。因此,流域南部、北部和东部以及城市建筑密集区是生态建设的重点区域。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 1,图 2),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。

4.2 流域生态安全在各因子中的空间分异特征

分析综合生态安全在单一因子特征中的变化规律,揭露生态安全综合指数在单因子评价等级中的演变特征,以说明各因子对区域生态安全分布格局和稳定的影响程度,继而揭露生态安全在各因子中的形成机理,更好地为相关生态建设展开工作提供针对性的理论指导。

4.2.1 流域生态安全在地形因素中的分异特征 地形地貌因素是各种生态环境问题(地质灾害、水土流失、荒漠化以及动植物空间演变和传递受阻)出现的客观条件,是不可改变的,只有改变地表覆盖结构特征,降低地形地貌的负面影响,才能最大程度保证生态系统稳定安全。经 GIS 空间区域分析统计,得出不同生态安全等级和平均生态安全指数在不同海拔和坡度中的分异情况,用以分析说明区域生态安全在地形地貌中的分异规律和变化特征。(1) 海拔分布。由表 3 得出,在海拔 1 940 m 以下地区,生态环境主要处于高度和中度安全,占该海拔区总面积的 77.85%,其次为轻度安全,占 19.41%,不安全区主要分布在城镇核心区,通过将土地覆盖和植被覆盖度与海拔分布和生态安全格局图层叠加分析,该海拔区是人类活动最强地区,城镇建设用地、农田和水域集中连片分布,景观破碎度较低,生态安全等级分界较明显,利于生态规划建设;轻度和不安全集中分布在海拔 1 940 m 以上地区,是流域生态建设的重点区域;从各海拔区平均生态安全指数看,安全指数与海拔分布呈正相关,随海拔升高而变大。

表3 生态安全及指数在不同海拔中的面积比例、平均值

海拔 分区/m	高度 安全	中度 安全	轻度 安全	不安全	占总面积 比例/%	平均生态 安全指数
1690~1940	31.15	46.70	19.41	2.75	68.59	2.08
1940~2190	6.10	38.26	39.56	16.08	23.68	2.87
2190~2440	0.42	17.05	49.14	33.39	7.06	3.56
>2440	0.07	5.97	43.11	50.86	0.67	3.74

(2) 坡度分布。在坡度<7°区域,生态安全等级主要以高度安全和中度安全为主,分别占总面积的 37.45%和 46.08%,但平均生态安全指数为 1.95,属于中度安全,1.86 是高度安全和中度安全的分界线,说明该坡度区总体处于较高的中度安全;平均生态安全指数与坡度呈正相关,随坡度递增而递增。坡度 15°~25°的区域是该研究区旱地和经果林集中分布区,景观破碎较严重,同时轻度和不安全区域也集中分布在该坡度段,是生态保护建设的重要坡度区(表 4)。

通过分析地形中的生态安全格局,区域生态安全随海拔和坡度的递增,生态安全性基本保持递减趋势,在流域海拔和坡度范围大小中间地带,是生态安全状况最为复杂的地区,安全等级较低区集中分布在该区,这些区域是人类开发利用自然矿产和相关自然资源的核心地带,生态环境较为破碎且相对较为敏感,因此对该区域进行科学地规划利用建设,才是保证区域生态安全的根本。

表 4 生态安全及指数在不同坡度中的面积比例、平均值

坡度/(°)	高度 安全	中度 安全	轻度 安全	不安全	占总面积 比例/%	平均生态 安全指数
<7	37.45	46.08	15.48	0.99	45.03	1.95
7~15	15.17	46.22	29.29	9.32	24.81	2.49
15~25	8.24	36.67	37.91	17.18	20.57	2.83
>25	5.38	26.81	45.90	21.91	9.59	3.21

4.2.2 生态安全在地表覆盖因素中的分异特征
地表覆盖对区域生态安全的影响体现在覆盖类型和植被覆盖度上,覆盖类型能反映植被覆盖度的高低程度,同时也能反映人类的干扰程度,是可控性因素,这里主要讨论地表覆盖类型与区域生态安全的空间耦合关系。由表 2 可知,单因子评价下的地表覆盖类型安全性由高到低为天然林地、草地和水域>水田、人工幼林地或草地>荒草地或旱地>裸地或建设用地,与综合因子评价结果相比(表 5),土地覆盖的安全等级性排序基本保持一致,仅有荒草地或旱地和裸地或建设用地安全性排名发生变化。从面积比例和平均生态安全指数上看,天然林、草地和水域等地区生态主要处于高度安全,占该地类分布区面积的 76.36%,水田和人工幼林或草地则处于中度和轻度安全,各占该区 52.79%和 26.17%,其次为高度安全;荒草地或旱地和裸地或建设用地在面积上主要处于中度和轻度安全,从平均生态安全指数上看,该区处于轻度安全。较低生态安全区主要分布在水田、人工幼林或草地、荒草地或旱地和裸地,应当重视该区的土地合理规划利用,实现生态安全最大化。

表 5 生态安全及指数在地表覆盖类型中的面积比例、平均值

地表覆盖 类型	高度 安全	中度 安全	轻度 安全	不安全	占总面积 比例/%	平均生态 安全指数
天然林地、 草地和水域	76.36	16.75	5.98	0.91	15.41	1.57
水田、人工 幼林地或草地	15.20	52.79	26.16	5.84	53.55	2.44
荒草地或旱地	12.54	33.18	35.31	18.97	19.68	2.74
裸地或建设用地	4.07	43.63	40.06	12.23	11.35	2.61

4.2.3 生态安全在人类活动环境中的分异特征
距离建设用地距离指标能综合反映人口分布和人类活动强度对生态安全的影响,据表 6 可知,从面积比例

上看,距离建设用地越远生态安全较低区面积越小,生态安全性越高;从各距建设用地缓冲区的平均生态安全指数看,生态安全指数在该指标中平均为 2.09~2.49,属于中度安全。在距离建设用地 1 000 m 以内地区,单因子评价下是不安全,理论上,距离建设用地越近人类活动越强,对生态系统的破坏越大,生态越不安全,但在综合因子评价下,不安全面积只占该缓冲区总面积的 10.43%,其余不安全区转化为安全较高区,主要以轻度和中度安全转化为主,这主要与建设用地周围建立生态公园、道路两旁生态廊道(绿化带)的建设、建设用地空间斑块面积大小和分布离散性有关。流域坝区建设用地集中分布,人类活动加强且斑块面积较大,对生态流的隔离性较强,生态安全性较低;在山区,人口较少,建设用地斑块面积较小且离散性较大,对生态环境的影响相对较小。在距离建设用地 1 000 m 以外区域,综合评价下,生态安全性总体降低,这主要与该区地形较复杂,生态环境较为敏感。(经果林、旱地和矿产资源开采集中地、水土流失和地质灾害多发地)有关。因此,距离建设用地远近并不能科学地说明人口集中且人类活动对生态的干扰程度,其斑块大小和集中性、周围的环境特征等要素才是决定该缓冲区的生态安全性。

表 6 生态安全及指数在距离建设用地不同距离中的面积比例、平均值

距离建设用 地距离/m	高度安全	中度 安全	轻度 安全	不安全	占总面积 比例/%	平均生态 安全指数
>1500	49.04	33.41	16.51	1.04	20.27	2.09
1000~1500	24.64	38.12	30.05	7.19	17.12	2.39
500~1000	19.70	40.21	27.88	12.21	23.73	2.45
<500	10.30	50.14	29.13	10.43	38.88	2.49

4.2.4 生态安全与水源环境中的分异特征
地球上生物最先出现在水里,水是生命起源之处,区域的湖泊河流对区域的人类和自然界生物的存在和生存好坏起着决定性的作用。水域承担着区域生物多样性、生态系统完整性和人类基本生存基础。因此,水域是区域生物的栖息地和人类活动的主要场所,纵观世界大江大河和重要湖泊,均是人类活动最繁忙和生物多样性最丰富的地方。人类活动最强的水域原有生态系统遭受破坏,导致生物多样性减少,水域受到污染,区域生态环境安全不断处于红色预警,逐步威胁到生物和人类的生存。因此,对区域生态安全的维护和构建成为了各国国家的重要政策。最近几年,生态文明国际论坛持续召开,力讨生态建设问题,构建全球生态安全格局,因此,对区域生态安全研究显得格外重要。就针对距离水域远近而言,理论上,距离水域越近,生物多样性越丰富,生态系统越稳定,生态安全程度较高,但生态安全受到多因素的综合影响,

其空间分布与距离水域远近因素评价下的生态安全格局存在差异。对此,本文将单因子生态安全评价格局与所有因子综合评价下的生态安全局进行空间叠加分析和统计(表 7),在面积比例和安全指数分异格局上:在单因子评价下,距离水域 500 m 以内的区域是处于高度安全区,但在所有因子评价下,统计出的平均综合生态安全指数为 1.95,属于中度安全,有 47.81%的转化为中度安全,14.53%为轻度安全,1.42%为不安全,生态安全程度有所降低,这主要与人类活动有关,水源是农业发展的根本,距离水源越近区越是农业生产发展的核心区,同时也是人口密集区。因此,对土地合理利用是水域生态安全的重要保障;距离水域 500 m 至 1 000 m 以内区,属于中度安全,在所有因子综合下,该区平均综合生态安全指数为 1.61,属于轻度安全等级范畴,中度安全区面积只占 44.50%,37.52%的面积转化为轻度安全,10.69%为不安全,7.285 为高度安全,总体生态安全程度有所下降,小部分地区安全程度有所上升;在距离水域 1 000 m 至 1 500 m 以内区,原属于轻度安全区,在所有因子综合评价下,该区平均生态安全指数为 2.99,归属于轻度安全,轻度安全区面积占 44.28%,31.60%转化为中度安全,3.46%转为为高度安全,20.66%转化为不安全区。距离水域 1 500 m 以外地区属于不安全,在所有因子综合评价下,平均生态安全指数为 3.34,安全等级属于轻度安全,不安全区面积只占该区总面积的 23.23%,有 47.45%转化为轻度安全,29.32%转化为中度及以上安全等级,总体上,生态安全程度有所提高。

表 7 生态安全及指数在距离水源不同
距离中的面积比例、平均值

距离水域 距离/m	高度 安全	中度 安全	轻度 安全	不安全	占总面积 比例/%	平均生态 安全指数
<500	36.24	47.81	14.53	1.42	58.43	1.95
500~1000	7.28	44.50	37.52	10.69	14.62	2.61
1000~1500	3.46	31.60	44.28	20.66	9.89	2.99
>1500	1.32	28.00	47.45	23.23	17.07	3.34

4.2.5 生态安全在土壤侵蚀、地质灾害中的分异特征 水土流失是导致山区土壤贫瘠,土地生产能力下降,阻碍生物健康生长,湖泊河流淤积和污染的重要因素,严重影响到区域生态系统稳定和安全;不同的土壤侵蚀强度,对生态安全的影响程度是有较大差异的。由表 8 可知,随着土壤侵蚀加强,平均安全指数呈递增趋势,说明水土流失越强,生态安全性越低,生态安全格局越复杂,一定程度上说明生态环境较为脆弱。单因子评价下,微度侵蚀区属于高度安全,综合评价下,原有的高度安全区分化为几个安全等级区,高度安全区面积只占 35.12%,中度安全区为

48.01%,其余为轻度和不安全区所占比例,同时,平均综合生态安全指数为 2.02,属于中度安全,安全性有所降低;轻度侵蚀区单因子评价下属于中度安全区,综合评价下,中度安全区保留 40.17%,其余主要转化为轻度安全和不安全等级,平均生态安全指数为 2.86,属于轻度安全,安全性降低;单因子评价下,中度侵蚀区属于轻度安全区,综合评价下,轻度安全区保留 52.28%,其余主要转化为中度安全和不安全区,平均综合生态安全指数为 2.95,属于轻度安全,安全水平等级相同,空间分布上,局部地区安全性提高和局部地区安全性降低;单因子评价下,高度及以上强度侵蚀区属于生态不安全区,综合评价下,不安全区保留 37.03%,其余主要转化为轻度安全和中度安全,同时平均生态安全指数为 3.48,属于轻度安全等级,从这个角度说明安全性上升。

表 8 生态安全及指数在土壤侵蚀强度中
的面积比例、平均值

土壤侵蚀 强度	高度 安全	中度 安全	轻度 安全	不安全	占总面积 比例/%	平均生态 安全指数
微度侵蚀	35.12	48.01	14.90	1.96	63.41	2.02
轻度侵蚀	2.06	40.17	44.31	13.46	23.90	2.86
中度侵蚀	1.44	28.08	52.28	18.21	4.08	2.95
高度以上侵蚀	0.16	13.31	49.50	37.03	8.61	3.48

流域地质灾害只要为斜坡地质灾害,从流域地质灾害易发区分布看,中部地区由于地形平坦,属于江川坝,不易发生地质灾害,四周坡度较陡山区易发性较强,地质灾害主要威胁到山区居民生命安全和财产安全,其诱发因素主要为降雨和人工斜坡道路或坡面不合理的建设;从土壤侵蚀指标和灾害易发性指标的空间分布看,二者存在空间上耦合性,大体上,灾害易发性较强区也是土壤侵蚀较严重区,灾害易发性越强,平均生态安全指数越高,安全性越低(表 9)。单因子评价下,灾害易发性为安全区生态安全属于高度安全,综合评价下,从面积上看,该区主要以高度和中度安全为主,各占该区总面积的 32.85%和 44.51%,安全性降低面积占 67.15%;从平均综合生态安全指数为 2.00 看,属于中度安全水平,总体安全水平下降;轻度易发区对应的是中度安全,综合评价下,22.73%的面积转化为高度安全,45.74%的安全等级面积保留不变,25.72%转为轻度安全,剩余转化为不安全区,平均生态安全指数为 2.48,与单因子评价下的安全等级相符合;中度易发区对应轻度安全,综合评价下,26.33%的区域转为不安全,安全性降低,33.09%转为中度及以上安全区,安全性提高,平均安全指数为 2.88,属于轻度安全,符合单因子评价下的安全等级。

表 9 生态安全及指数在地质灾害易发分区中的面积比例、平均值

灾害易发性	高度安全	中度安全	轻度安全	不安全	占总面积比例/%	平均生态安全指数
安全区	32.85	44.51	19.82	2.82	40.69	2.00
轻度易发区	22.73	45.74	25.72	5.82	41.09	2.48
中度易发区	3.62	29.47	40.58	26.33	18.21	2.88

5 结论和讨论

几何平均数模型规避了层次分析法和专家打分法等常规模型方法主观经验判断权重不合理的缺陷和以行政区划或小流域为评价单元带来的空间模糊性,以栅格单元为评价单元,空间精度和显示效果较好,能更加精确地反映评价内容的空间分异规律和成因机理。本文试图运用 3S 技术与几何平均数模型相结合,对高原湖泊流域生态安全进行评估,从面积比例差异、平均值等角度,并从单因子评价到综合所有因子评价去分析和揭露流域空间生态安全格局特征和形成机理。研究表明:(1) 流域生态安全水平总体上以中度安全为主,高度安全和较低安全分布面积相近。从空间上,流域生态安全等级格局集中分布,流域生态安全较高区主要集中分布于北部、东部和南部以及城市建筑密集区,除了城市建筑密集区受人类干扰较强外,其余地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。因此,流域南部、北部和东部以及城市建筑密集区是生态建设的重点区域;(2) 通过将综合评价下的结果与单因子评价下的结果对比统计分析,二者存在较大差异,区域生态安全受多重因素的综合影响,单因子评价难以精确全面反映区域生态安全的空间分异规律特征和成因机理,各因子之间存在相互促进和相互抑制的作用关系,流域自然环境要素坡度、水资源环境和水土流失与人类活动干扰要素土地利用格局、距离建设用地远近等因子是形成流域生态安全格局的主要因素。

区域生态安全问题涉及到多学科多领域的交叉,其形成机制复杂多变,有宏观研究和微观研究之分,目前多数学者停留在宏观角度进行评价研究,微观性评价研究较少,后者是未来该领域研究侧重点;不管是几何平均数模型还是其他评价模型,都有自身的优缺点,前者对因子的兼容性较差,社会经济指标难以以图层栅格像元量化并参与该模型评价。因此,结合多种模型评价,优势互补,模型间的集成优化研究对评价精度提高是一种有效的途径。针对生态安全指

标体系的构建,不同区域的生态环境有所差异,评价指标体系也应当有针对性。该流域核心生态环境问题之一为湖泊污染,受到资料限制,对污染强度指标较少考虑并该指标难以图层量化,因此没有将其参与评价,精度受到制约。因此,对难以量化的并很重要的评价指标量化模型研究显得格外重要。总体上,流域生态环境较为敏感区,生态安全水平较低,评价结果能反映该区生态环境问题的空间分布格局和成因,能为该区相关环保部门进行生态规划建设提供一定的科学理论指导意义。

参考文献:

[1] 劳燕玲. 滨海湿地生态安全评价研究[D]. 北京:中国地质大学,2013.

[2] 陈星,周成虎. 生态安全:国内外研究综述[J]. 地理科学进展,2005,24(6):8-20.

[3] 潘竟虎,石培基,刘英英. 干旱区县域土地利用规划环境影响的生态安全评价:以张掖市甘州区为例[J]. 水土保持通报,2012,32(1):248-2523.

[4] 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,2011,31(20):5928-5936.

[5] 吴金华,李纪伟,朱鸿儒. 基于 ArcGIS 区统计的延安市土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报,2011,26(7):1180-1188.

[6] 凡非得,王克林,熊鹰,等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报,2011,31(21):6353-6362.

[7] 黄静,崔胜辉,李方一,等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性[J]. 生态学报,2011,31(24):7441-7449.

[8] 杨月圆,王金亮,杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价[J]. 生态学报,2008,28(5):2253-2260.

[9] 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.

[10] 杨子生. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J]. 山地学报,2002,20(S1):1-9.

[11] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.

[12] 怡凯,王诗阳,王雪,等. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空分异特征分析:以辽宁省朝阳市为例[J]. 地理科学,2015,35(3):365-372.

[13] 查良松,邓国徽,谷家川. 1992—2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. 地理学报,2015,70(11):1708-1719.

[14] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J]. 生态学报,2013,33(10):2974-2982.

[15] 颜磊. 遗产景区旅游市场时空格局研究[D]. 成都:四川师范大学,2006.