

# 杞麓湖流域生态安全性及在各因子中的变化特征

赵筱青, 谭 琨, 易 琦, 李思楠, 苗培培, 普军伟

(云南大学 资源环境与地球科学学院, 昆明 650091)

**摘 要:**以杞麓湖流域主要生态环境问题为出发点,利用综合指数法、熵值法和 GIS 技术,选取坡度、海拔、植被覆盖度、土地覆盖类型、距水体距离、距其他建设用地距离、距居民点距离、距道路距离 8 个生态安全评价指标,对流域生态安全进行了评价,并分析了各单因子对生态安全影响的空间变化特征与形成机理。结果表明:(1) 杞麓湖流域平均生态安全指数为 2.59,生态安全以较低安全为主,占流域总面积的 36.33%,中度安全和不安全次之,分别占流域总面积的 23.36% 和 22.53%,高度安全面积最少,仅占 17.77%。较低安全区主要分布在西北部、东南部和西南部,应加强对这些地区的生态保护建设;(2) 通过对流域生态安全性及在各因子中的变化特征研究,表明在坡度较小和海拔较低区域以较低安全为主;有林地主要以高度安全为主,建设用地地区不安全面积比例最大;距其他建设用地距离、距居民点距离和距道路距离越近生态不安全区面积越大,生态安全性越低;(3) 流域生态安全性受多种因素综合影响,各因子间存在相互促进与相互抑制关系,植被覆盖度、土地覆盖类型、距其他建设用地距离、距居民点距离和距道路距离近因子对流域生态安全性有较大影响。

**关键词:**生态安全性; 影响因子; 变化特征; 综合指数法; 杞麓湖流域

**中图分类号:**F301.24

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)03-0285-08

## Ecological Security of the Qilu Lake Basin and Its Variation Characteristics in Factors

ZHAO Xiaoqing, TAN Kun, YI Qi, LI Sinan, MIAO Peipei, PU Junwei

(College of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract:** In view of the major ecological environmental problems in the Qilu Lake Basin, we selected eight ecological safety assessment indicators, i. e., slope, altitude, vegetation coverage, land cover type, distance to water surface, distance to other construction land, and distance to residential area, to assess the ecological security of this basin using the comprehensive index method, entropy method, and GIS technology. The results indicated that: (1) the average eco-safety index of the Qilu Basin was 2.59 and the ecological safety was mainly based on lower safety, accounting for 36.33% of the total area of the river basin, followed by moderate safety and insecurity, accounting for 23.36% and 22.53% of the total basin area, respectively; the safest area was the smallest, accounting for only 17.77%; the lower safety zones mainly distributed in the northwest, southeast and southwest, and ecological protection construction in these areas should be strengthened; (2) through the research on the ecological security of the basin and its variation characteristics in factors, it was shown that the lower security was dominant in the areas with smaller slopes and lower elevations; forest lands were mainly based on high security, and the construction area had the largest proportion of unsafe areas; the greater the distance between other construction land, residential areas and roads, the greater the area of ecological insecurity, and the lower the ecological security; (3) the ecological security of the river basin was affected by a variety of factors; there were mutual promotion and mutual inhibition be-

**收稿日期:**2018-08-08

**修回日期:**2018-08-26

**资助项目:**云南大学研究生科研创新项目(YDY17117, YDY17119);国家自然科学基金(41361020, 41761109);“第二批云岭学者培养”项目(C6153001)

**第一作者:**赵筱青(1969—),女,云南省大理市人,博士,博士生导师,教授,主要从事土地生态安全、土地利用覆被变化环境效应、土地利用优化研究。E-mail:xqzhao@ynu.edu.cn

**通信作者:**易琦(1966—),男,云南省开远市人,副教授,硕士生导师,主要从事水资源利用与保护、水分循环与地表产流过程、城市环境问题研究。E-mail:yiqi@ynu.edu.cn

tween the factors; vegetation coverage, land covers types, distance to other construction land, distance to residential sites, distance to roads and distance factors had the significant impacts on ecological security.

**Keywords:** ecological security; impact factors; variation characteristics; comprehensive index method; Qilu Lake Basin

20 世纪 80 年代以来,随着生态环境问题日益突出,生态安全性问题研究引起了地理学、资源学和生态学等研究者的广泛关注<sup>[1]</sup>。自 20 世纪九十年代以来,杞麓湖流域内人口迅速增加,农业生产活动加剧了用水压力、加之“十二五”期间连续多年干旱等原因,加剧了湖泊水质恶化及流域生态安全风险。为了弄清杞麓湖流域的生态安全性,指导流域环境综合治理工作,遏制生态环境恶化,开展杞麓湖流域生态安全性及在影响因子中的变化特征研究十分必要且具有重要的现实意义。

生态安全评价是对一定时间、空间范围内生态安全水平的定性、定量描述<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者对区域生态安全性理论和方法进行了诸多研究<sup>[3]</sup>,国外对生态安全的研究主要表现在 3 个方面:环境污染引发的生态风险评估、国家层面生态安全政策的制定和微观生态系统健康与质量评估<sup>[4]</sup>,国内主要集中在对生态安全概念、内容和方法、进展等方面的研究<sup>[5]</sup>。我国对生态安全的研究从定性分析到区域生态安全状态的分析再到现在的信息技术(3S 技术)的引入,促使近些年来我国生态安全的研究获得较快发展,同时因为研究时间较短,还没有形成完整系统的理论方法体系,对生态安全评价的理论及实践、研究方法和动态风险监测预警机制等方面还没有形成统一意见<sup>[6]</sup>。但生态安全评价方法主要有以利用专家判读和层次分析为代表的综合指数评价法、以生态系统模型为代表的生态模型评价法、以生态学理论为基础的景观生态模型评价法和以 3S 技术为支撑的数字地面模型评价法等<sup>[7-8]</sup>。

综合指数评价法是指应用统计学将一组相同或不同指数值,转化成一个综合指数的方法,是当前生态安全评价中运用最多的一种方法<sup>[9]</sup>。论文以水土保持、生物多样性保护和生态环境治理与保护为目标,选择高原湖泊杞麓湖流域为研究区,运用综合指数法并结合 GIS 空间分析技术,对流域生态安全性进行评估并划分安全等级,分析各安全等级形成的主导因素,进一步探讨流域生态安全性及其影响因子空间分异与成因机理,对湖泊保护、流域土地合理利用、生态环境保护及生态系统的稳定性和流域生态保护规划等具有一定的参考价值,同时为类似流域生态安全性及在影响因子中的变化特征研究提供借鉴。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

杞麓湖流域位于 102°33′48″—102°52′36″E, 24°4′36″—24°14′2″N, 属于珠江流域西江水系。流域涉及 7 个乡镇,总面积 354.94 km<sup>2</sup>,总人口 240 896 人。杞麓湖流域是一个典型的高原湖盆地,近似为一个封闭型的西东向平行四边形形状,中部为湖泊,湖周为平坝区,主要分布在湖泊的南、西、北三面,坝区外围为中、低山,海拔高程多在 1 979~2 100 m 之间。研究区主要以钢铁及其制品加工行业、造纸彩印包装、食品加工、化肥制造以及大量施用化肥农药的蔬菜种植业为主,致使湖泊水质持续恶化趋势,影响着人类对杞麓湖流域内的资源开发和保护,进一步激化了流域内经济—社会—生态系统的基本矛盾,严重制约高原湖泊流域社会经济发展。

### 1.2 数据来源及处理

研究数据包括土地覆盖类型、植被覆盖度、DEM 数据、距水体距离、距其他建设用地距离、距居民点距离等。其中土地覆盖类型数据采用美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)15 m 空间分辨率的 Landsat8 OLI 遥感数据,进行人机交互式室内遥感解译和野外验证得到,室内解译根据遥感影像特征所反映的形状、颜色,用类比分析方法获得遥感图像中与实际地物的对应信息,并依据国家发布的土地利用分类标准及土地经营特点、利用方式和覆盖特征等进行分类,实地的采点验证表明,研究区的 31 个实地采样点中,采样点与判图时的土地利用类型对照一致的点有 28 个,解译精度为 90.32%,符合研究需要。植被覆盖度是基于 NDVI 的像元二分模型结合 ENVI 5.1 软件进行提取;DEM 数据来源于地理空间数据云(30 m×30 m),主要用来提取所需坡度和海拔数据;DEM 数据和遥感影像是流域边界提取的主要数据源,流域边界矢量数据由云南省环境监测中心站提供;距水体距离、距其他建设用地距离和距居民点距离等数据从土地覆盖类型矢量数据中提取,结合 GIS 空间分析技术,建立多级缓冲区得到;社会经济统计数据来源于通海县统计年鉴;此外还有来自于环保局、国土局、通海县人民政府等部门的相关流域治理防治规划和专题报告等数据资料。

1.3 研究方法

研究运用 3S 技术与综合指数法相结合,采取熵值法确定指标权重,对高原湖泊杞麓湖流域生态安全进行评价,将单因子评价结果与综合评价结果进行叠加分析,并运用 ArcGIS 空间区统计功能,求取各生态安全等级与平均生态安全指数在不同因子中的面积比例,然后从面积比例差异、平均生态安全指数等角度,把单因子评价结果和综合评价结果进行对比分析,以此揭露流域生态安全格局的空间分异规律特征与形成机理。

1.3.1 生态安全评价 生态安全评价是对其维护生态系统完整性能力及生态安全性状况的研究<sup>[10-11]</sup>。论文运用综合指数法结合 GIS 加权叠加分析技术对杞麓湖流域生态安全进行评价。评价模型如下:

$$ESI=\sum_{j=1}^n P_{ij} W_j$$

式中:ESI 为第  $i$  个栅格单元的综合生态安全指数; $P_{ij}$  为第  $i$  个栅格单元的第  $j$  个指标的安全指数; $W_j$  为第  $j$  个指标的权重。以 ArcGIS 中的 Natural Break 法将得到的 ESI 值分为 4 级,分别对应不同级别的生态安全等级。该方法是利用统计学中的 JENK 最优法得出的分界点,能使各级的内部方差之和最小<sup>[12]</sup>。

1.3.2 评价指标体系 评价指标的选取不仅要考虑该区域自然和人文社会因素及潜在因素的影响,同时

考虑流域指标数据的可获取性、代表性、全面性、综合性。海拔和坡度可以反映地表起伏程度和侵蚀强度,由地表起伏和水土侵蚀带来的污染物是杞麓湖流域水域污染的主要原因之一,影响该流域的生态安全状况;植被覆盖度和土地覆盖类型能反映生物多样性、生态系统稳定状况及地表覆被状况等,对流域生态安全性有重要影响;道路、其他建设用地和居民点用地是杞麓湖流域人类主要活动场所,越靠近道路、其他建设用地和居民点,交通越便利,社会经济越发达,人类开发利用强度就越大,对流域生态安全性影响更大;水是一切生物和人类生存与发展的基本条件,距离水体越近一般具有较好的生态条件,其土壤水分含量在一定程度上也较高,对流域生态系统服务功能的大小及安全性影响较大,由此可见距水体距离可作为其指标之一;距不同用地类型的距离可以作为人类活动对生态安全状态影响的指标。因此,根据研究区实际情况,选取了海拔、坡度、植被覆盖度、土地覆盖类型、距水体距离、距其他建设用地距离、距居民点距离、距道路距离等 8 个指标为评价因子。因子的分级赋值,参考学者李晶<sup>[13]</sup>、蒙吉军<sup>[14]</sup>、卓静<sup>[15]</sup>、谢花林<sup>[16]</sup>、李玉平<sup>[17]</sup>、刘孝富<sup>[18]</sup>等的研究成果,并结合研究区实际情况,制定影响流域生态安全的各因子生态安全分级标准(表 1),界定各评价因子的安全等级:4,3,2,1 分别代表不安全、较低安全、中等安全和高度安全。值越小,生态环境越安全,安全性越高。

表 1 流域生态安全评价指标与等级划分

	不安全	较低安全	中度安全	高度安全	分级标准来源
坡度/°	>25	15~25	7~15	0~7	参考文献[14]
海拔/m	>2200	2000~2200	1800~2000	<1800	参考文献[14]
植被覆盖度/%	<30	30~45	45~60	>60	参考文献[15-16]
土地覆盖类型	建设用地	旱地、未利用地	草地、灌木林地、湖滨湿地、水田、园地	有林地、水域	参考文献[19]
距水体距离/m	>1500	1000~1500	500~1000	<500	参考文献[13]
距其他建设用地距离/m	<500	500~1000	1000~1500	>1500	参考文献[17]
距居民点距离/m	<500	500~1000	1000~1500	>1500	参考文献[17-18]
距道路距离/m	<500	500~1000	1000~1500	>1500	参考文献[18]
分级赋值	4	3	2	1	

1.3.3 指标权重确定 在多指标评价问题中,权重的确定是重点也是难点,目前有很多确定权重的方法,大致可以分为两大类:主观赋权法和客观赋权法。而客观赋权法中的熵值法在客观条件下能使权重更符合实际<sup>[20-22]</sup>。因此,考虑评价结果的客观性和精确性,本文采用熵值法求取指标权重,其模型如下。

(1) 根据熵的定义, $n$  个评价单元(栅格单元) $m$  个评价指标,可确定评价指标的熵为:

$$H_i=-\frac{1}{\ln n}\left[\sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}\right]$$

式中: $H_i$  为第  $i$  个指标的熵值,其中  $0 \leq H_i \leq 1=f_{ij}=\frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_{ij}}$ ,其中为使  $\ln f_{ij}$  有意义,假定  $f_{ij}=0, f_{ij} \ln f_{ij}=0$ ; $b_{ij}$  为第  $i$  个指标第  $j$  个栅格单元的属性值。

(2) 利用熵值计算评价指标的熵权,可得到第  $i$  个指标的熵权:

$$W_i=\frac{1-H_i}{m-\sum_{i=m}^m H_i}$$

利用以上熵值法模型通过数据统计与计算得到生态安全评价各指标的权重,见表 2。

表 2 评价指标熵值与熵权

评价 指标	坡度 因子	海拔 因子	植被覆 盖度	土地覆 盖类型	距水体 距离	距其他建设 用地距离	距居民 点距离	距道路 距离
熵值	0.4358	0.4829	0.4133	0.3333	0.5255	0.1467	0.2222	0.4643
熵权	0.1134	0.1039	0.1179	0.1340	0.0954	0.1715	0.1563	0.1077

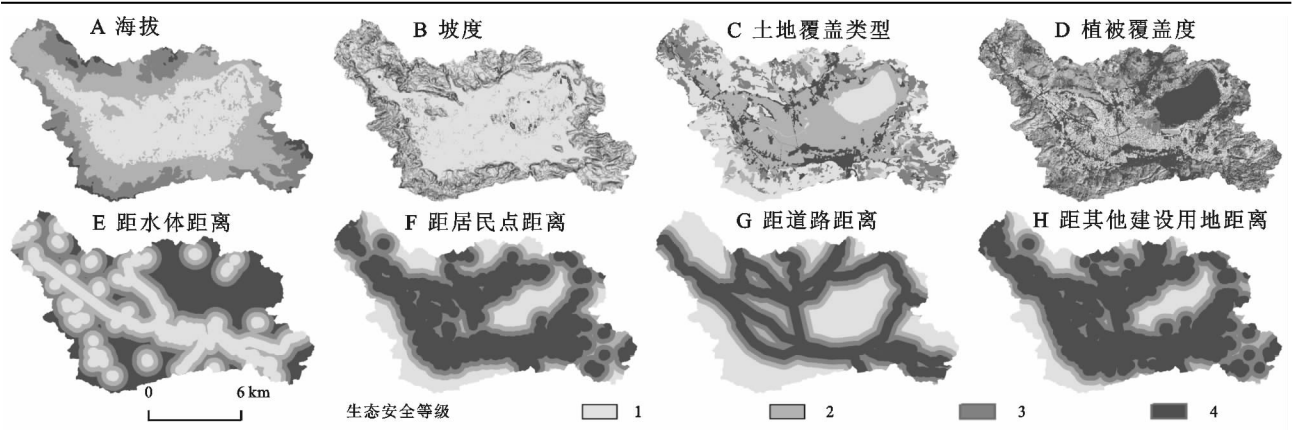


图 1 流域单因子的生态安全等级分布

2 结果与分析

2.1 流域生态安全性分析

运用自然断点法将生态安全综合指数分为 4 个等级,高度安全的 ESI 指数为 1.16~2.09;中度安全为 2.09~2.54;较低安全为 2.54~2.97;不安全为 2.97~3.86。流域平均生态安全指数为 2.59,处于较低安全状态;流域大部分区域处于较低安全状态,其面积为 128.15 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 36.33%;其次是中度安全状态,其面积为 82.41 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 23.36%;不安全状态面积为 79.48 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 22.53%;最少的是高度安全状态,其面积为 62.69 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 17.77%。流域较低安全状态及以下面积占到 58.86%,是遏制杞麓湖流域生态持续退化和水土保持的关键区(图 1)。

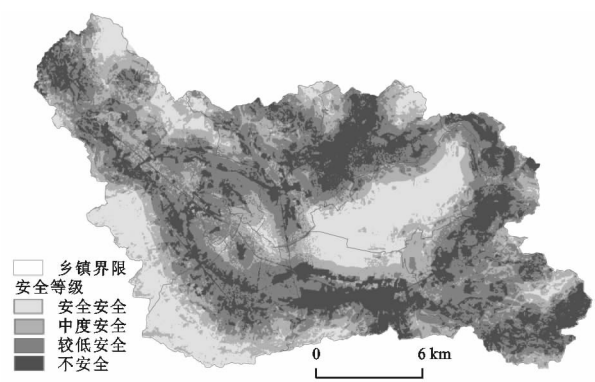


图 2 杞麓湖流域生态安全

从空间分布上来看,流域较低安全区主要分布在西北部、东南部和西南部,中度安全区集中在中部、西部和南部,不安全主要分布在西北部和东南部,高度安全主要分布在杞麓湖周围和流域西南部和北部的

林地(图 2);

从行政单元来看,高度和中度安全区主要集中在河西镇、九龙街道和杨广镇;较低安全区主要分布在河西镇、四街镇和杨广镇;不安全集中在纳古镇、四街镇、秀山街道和杨广镇;总的来说,杨广镇的西北部、河西镇的北部和九龙街道的西南部安全性较高,四街镇、纳古镇和杨广镇东南部以及秀山街道中部安全性较低(图 2)。

2.2 流域生态安全性在各因子中的变化特征

通过对比流域单因子的生态安全等级分布图和流域生态安全图(图 1,图 2)及平均生态安全指数的计算,地形、植被覆盖度、土地覆盖类型、距水体距离、距其他建设用地距离、距居民点距离和距离道路远近因子与流域生态安全空间耦合度较高,说明这些因子对流域的生态安全有重大影响。经 GIS 空间区统计,求取各生态安全等级与平均生态安全指数在不同因子中的分异情况(表 3)。

2.2.1 流域生态安全在地形因子中的变化特征

(1) 坡度。坡度 0°~7°的区域,生态安全等级以较低安全为主,占总面积的 38.29%;坡度 7°~15°的区域以较低安全为主,占 34.14%,中度安全面积也较大,占总面积的 24.28%,该区是水田和旱地集中分布区,人为干扰较大,对生态安全有重大影响,因此是生态保护建设的关键坡度区;坡度 15°~25°区域以较低安全为主,中度安全次之,分别占总面积的 34.56%和 26.25%,这与该区水土流失较严重但人为干扰相对较少有关;坡度 >25°区域较低和不安全占到总面积的 65.89%,高度安全仅占 10.6%,应加大对该区生态保护力度,增加植被覆盖度以提高其生

态安全性。4 个坡度等级的平均生态安全指数均属于较低安全。从平均生态安全指数变化规律来看,坡度和平均生态安全指数呈正相关,坡度增加平均生态安全指数亦增大。

(2) 海拔。海拔 1 800 m 以下区域,生态环境主要处于较低安全水平,占该海拔区总面积 36. 57%,其次为中度安全和高度安全,分别占 24. 39%,22. 41%,不安全区主要分布在县城中心区,该海拔区居民点用地、建设用地和耕地分布广泛,人类活动非常活跃,景观破坏程度较重,生态安全等级分界明显,应加强生态规划建设;较低和不安全集中分布在海拔 1 800~2 000 m 区域,共占总面积的 74. 42%,应把该区作为重点生态保护建设区,提高流域生态安全性;海拔 2 000~

2 200 m 区域,高度、中度和较低安全等级占总面积比例相差很小,不安全等级仅占 15. 15%,说明该海拔区生态安全性较高,景观连通性较好;海拔>2 200 m 区域,高度和中度安全占比很大,占总面积的 77. 52%,较低和不安全等级占比很小,仅占 22. 48%,说明该区生态安全性非常好,这与该区林地面积较大且受人类干扰少密切相关。

总之,在流域坡度和海拔范围较小区域,生态安全状况最复杂多变,且以较低安全为主,这些区域是人类开发利用强度最大的地区,在该区严格落实土地用途管制制度及严控过度开发、限制对重要生态保护区的开发利用,合理科学规划好各类用地,才是保证流域生态安全的关键。

表 3 生态安全等级及指数在各因子中的面积比例、平均值

因子	分级	高度安全	中度安全	较低安全	不安全	占总面积比例/%	平均生态安全指数
坡度/(°)	0~7	17. 97	21. 79	38. 29	21. 95	49. 43	2. 58
	7~15	18. 85	24. 28	34. 14	22. 73	28. 54	2. 59
	15~25	17. 23	26. 25	34. 56	21. 96	17. 68	2. 60
	>25	10. 60	23. 51	35. 66	30. 23	4. 35	2. 71
	<1800	22. 41	24. 39	36. 57	16. 63	33. 79	2. 49
海拔/m	1800~2000	7. 49	18. 09	42. 44	31. 98	41. 53	2. 77
	2000~2200	28. 08	29. 32	27. 45	15. 15	22. 02	2. 44
	>2200	34. 08	43. 44	11. 36	11. 12	2. 65	2. 33
	>60	20. 79	37. 49	40. 45	1. 27	11. 46	2. 37
植被覆盖度/%	>60	20. 34	28. 61	44. 36	6. 70	27. 79	2. 46
	45~60	20. 34	28. 61	44. 36	6. 70	27. 79	2. 46
	30~45	14. 86	22. 50	41. 14	21. 50	31. 55	2. 61
	<30	17. 29	13. 75	21. 89	47. 07	29. 20	2. 77
	有林地、水域	32. 20	31. 55	29. 19	7. 06	37. 94	2. 34
土地覆盖类型	草地、灌木林地、湖滨湿地、水田、园地	14. 98	25. 13	50. 28	9. 61	34. 88	2. 53
	旱地、未利用地	1. 97	15. 45	42. 68	39. 89	16. 82	2. 85
	建设用地	0. 00	0. 27	5. 24	94. 49	10. 37	3. 24
距水体距离/m	<500	14. 39	29. 91	38. 11	17. 60	28. 29	2. 56
	500~1000	14. 46	22. 35	41. 13	22. 07	25. 98	2. 62
	1000~1500	19. 12	20. 12	39. 33	21. 43	20. 62	2. 59
	>1500	23. 91	19. 70	26. 91	29. 48	25. 12	2. 59
	>1500	89. 35	10. 20	0. 45	0. 00	11. 06	1. 83
距其他建设用地距离/m	1000~1500	47. 60	48. 74	3. 67	0. 00	11. 00	2. 10
	500~1000	11. 17	45. 73	38. 30	4. 81	21. 42	2. 48
	<500	0. 48	12. 53	48. 96	38. 04	56. 53	2. 87
	>1500	71. 86	22. 48	5. 11	0. 55	16. 42	1. 95
	1000~1500	32. 59	45. 30	17. 06	5. 05	13. 51	2. 28
距居民点距离/m	500~1000	7. 03	37. 70	43. 99	11. 28	22. 36	2. 58
	<500	0. 00	10. 74	48. 94	40. 32	47. 71	2. 90
	>1500	51. 44	32. 05	13. 15	3. 36	29. 38	2. 13
	1000~1500	11. 36	41. 87	37. 30	9. 47	14. 28	2. 51
	500~1000	2. 90	22. 34	50. 47	24. 29	22. 34	2. 73
距道路距离/m	<500	1. 14	8. 75	46. 67	43. 44	34. 00	2. 92

2.2.2 生态安全在地表覆盖因子中的变化特征 地表覆盖对流域生态安全的影响主要体现在土地覆盖类型和植被覆盖度上,从表1可得,单因子评价的土地覆盖类型安全性从高到低为有林地、水域>草地、灌木林地、湖滨湿地、水田、园地>旱地、未利用地>建设用地,和综合评估结果相比(表3),土地覆盖类型的安全等级排序基本一致。从平均生态安全指数来看,最小为2.34,最大为3.24,变化很大,说明土地覆盖类型对生态安全影响非常大;从面积比例来看,有林地、水域主要以高度和中度安全为主,占该地类区面积的63.75%,草地、灌木林地、湖滨湿地、水田、园地则位于较低安全区,占该区50.28%,因为该区受人类干扰较大,所以生态安全水平较低;旱地、未利用地较低安全与不安全面积占比均较大,分别为42.68%,39.89%,应重视该区水土保持工作,合理科学利用土地。不安全区聚集在建设用地区,占到了该地类的94.49%,该地应进行科学合理的土地利用规划,严格实施土地用途管制制度,调整土地利用结构。从平均生态安全指数来看,植被覆盖度与生态安全指数呈负相关关系,随着覆盖度的降低,生态安全指数不断增大,且指数区间变化较大,说明植被覆盖度对生态安全有较大影响。从面积比例来看,在覆盖度>60的地区,以中度和较低安全为主,占到该面积区的77.94%,覆盖度30~60区域,较低安全比重很大,占到了85.5%,不安全区集中分布在覆盖度<30的区域,约占到了该等级区总面积的一半,生态环境很差,所以应合理开发利用土地,适当增加植被覆盖度,提高其生态安全水平。

2.2.3 生态安全在人类活动因子中的变化特征 距其他建设用地距离、距居民点距离和距道路距离能反映人类活动对生态安全格局的影响,从面积比例看,距离其他建设用地、居民点和道路越远生态高度安全区面积越大,生态安全性越高;在距离>1 500 m中,其他建设用地、居民点和道路在各区的高度安全区面积都占绝大比例,分别占各区域的89.35%,71.86%,51.44%,生态安全状况非常好,这主要与人类活动干扰少、开发利用强度小和生态系统破坏小有关;在1 000~1 500 m等级中,距其他建设用地距离和距居民点距离主要以中度安全 and 高度安全为主,分别各占总面积的96.34%,77.89%,但在道路因子中,虽然中度安全面积还是较大,但较低安全面积比例也较大,达到了总面积的37.30%,这主要是因为不合理的道路建设,阻隔了生态流扩散和物种的传

播,所以使其生态安全性有所降低;在距离500~1 000 m区域,距其他建设用地距离以中度安全为主,占总面积的45.73%,距居民点距离和距道路距离以较低安全为主,分别占该区总面积的43.99%,50.47%;在距离<500 m区间,距其他建设用地距离、距居民点距离和距道路距离均以较低安全和不安全为主,分别占各区总面积的87%,89.26%,90.11%,这说明离其他建设用地、居民点和道路越近,人类活动强度越大,生态环境破坏越严重,生态安全性越低,所以该区应控制其人口过快增长与资源过度开发,合理规划各类用地,增加绿地面积以提高其生态安全性。从平均生态安全指数来看,距离其他建设用地、居民点和道路越远,生态安全指数越小,安全性越高,且平均生态安全指数在等级区之间变化都很大,其他建设用地、居民点和道路其指数变化区间分别为1.83~2.87,1.95~2.90,2.13~2.92,说明这3个因子对生态安全影响非常大。

2.2.4 生态安全在水体环境因子中的变化特征 理论上,距水体越近,生物多样性越丰富,生态系统越稳定,生态安全程度较高,但生态安全会受到水体周边产业发展等多种因素的综合影响,其安全性距水体远近会存在一定变化差异。从面积比例来看,在距离水体500 m以内的区域,以中度安全和较低安全为主,占总面积的68.02%,高度安全区只占到了总面积的14.39%,这与人类活动密切相关,水源是工农业发展的基础,距水体越近越是工农业发展的集中区,同时也是人口聚集区,人类开发利用程度大,加剧了水体的污染,使生态安全性有所降低,应加大对该区的水污染治理,提高其生态安全性;在500~1 000 m与1 000~1 500 m区域内,以较低安全为主,分别占总面积的41.13%、39.33%,总体安全水平较低,合理节约利用水资源,是提高该区生态安全的关键;在>1 500 m区域,以高度安全为主,占到该区总面积的89.35%,这与远离湖泊污染区和人类开发利用程度相对较小紧密相关。从平均生态安全指数来看,其指数在各等级区变化较小,说明距水体远近因子与生态安全的空间耦合性不是很好。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

(1) 生态安全性评价的综合探讨。综合指数模型能将部分界线不清,很难定量的评价因子相对量化,能保证评价指标信息的完整化并使评价因子简单

化,体现区域生态安全真实的生态安全状态,解决评价结果的不确定性和模糊性问题,评价结果较为客观<sup>[23]</sup>。其缺陷是不易消除重复评价问题,运行处理较为繁杂。目前对生态安全的研究,主要是对区域总体生态安全进行评估<sup>[24-26]</sup>,很少从空间上深入剖析各单因子的生态安全性,不能充分的揭示区域各因子对生态安全性高低的影响及其内在形成机理。本文与大部分区域生态安全评价不同之处在于深入分析了各因子的生态安全空间分异规律,运用熵值法确定指标权重并结合GIS空间分析功能,提高了研究结果的空间可视化和实用性。

(2) 生态安全性及其影响因子空间分异探讨。一方面,生态安全性受多因素的综合影响<sup>[27-30]</sup>,单一因子无法准确反映其生态安全性高低,某些因子对生态安全性有明显的影响,其安全等级分界也比较明显,如论文中的植被覆盖度、土地覆盖类型、距其他建设用地距离、距居民点距离和距离道路远近等因子,但某些因子与生态安全空间耦合度较低,会出现与理论研究存在一定变化差异的情况,如论文中的距水体远近因子,在星云湖流域的研究中,其距离建设用地因子也存在与理论不相符的情况<sup>[31]</sup>,说明不同研究区会存在一些特殊影响因子,它主要与当地特殊的环境特征、具体利用情况及表现特征有关。因此,科学合理选取对生态安全性有明显影响的因子、多因素的综合评估和如何把理论与实际情况更好的结合起来将是下一步研究的重点内容。另一方面,目前对生态安全性影响因子变化特征的研究较少,本研究以各等级面积比例和平均生态安全指数来分析不同因子的空间变化特征,基本能反映影响该区生态安全性的因素及其各因子的空间规律特征,分析结果能为湖泊保护、合理的土地利用及生态环境保护规划等提供一定参考。

(3) 评价指标体系及分级标准探讨。影响生态安全性的因素很多,涉及社会、经济、自然等各方面,虽然国内外学者针对不同区域生态安全评价的指标体系构建做过很多研究<sup>[32-36]</sup>,但是至今为止仍未有统一的权威标准。本文建立的指标体系也是一种探索,旨在为流域生态安全性评估及其影响因子的变化特征研究摸索出一种研究方法。因子中海拔和坡度可以反映地表起伏程度和侵蚀强度,影响杞麓湖流域的生态安全状况;植被覆盖度和土地覆盖类型能反映生物多样性和地表的覆被状况,对流域生态安全有重要影响;道路、其他建设用地和居民点是杞麓湖流域人类主要活动场所,越靠近道路、其他建设用地和居民

点,交通越便利,人类开发利用强度就越大,对流域生态安全性影响更大,所以该评价指标体系具有一定的科学合理性。但由于涉及生态环境、社会经济指标等多方面,加之受数据获取和技术的限制,有些因素难以空间化,不得不舍弃,如湖泊富营养化程度、工农业污染强度和水质等指标,在接下来的研究中将考虑把这些因素纳入进来。另外,未能对影响生态安全的各因子之间的关联和联系深入剖析也是本文不足的地方,未来将对其进行深入研究。因此,进一步探索并建立科学、合理且针对性强的生态安全评价因子和分级标准,尝试多模型多方法的集成和运用,将是未来研究的重点内容。

### 3.2 结论

(1) 杞麓湖流域大部分区域以较低安全状态为主,占流域总面积的36.33%,中度安全和不安全次之,高度安全面积最少,仅占17.77%;从空间分布看,较低安全区主要分布在流域西北部、东南部和西南部。从行政单元看,较低安全区主要分布在河西镇、四街镇和杨广镇,应该加强对这些区域的生态保护和建设。

(2) 通过对杞麓湖流域生态安全性及在各因子中的变化特征研究,发现在流域坡度较小和海拔较低区域,生态安全状况最错综复杂,且以较低安全为主;有林地主要以高度安全为主,建设用地区不安全面积比例最大;距离其他建设用地、距离居民点和距离道路越近生态不安全区面积越大,生态安全性越低。距水体距离对生态安全性的影响受多重因素的制约,尤其是水污染状况,因此与理论上存在一定变化差异。

(3) 通过对比流域单因子评价结果和综合评价结果,发现两者存在一定差异,流域生态安全受多种因素综合影响,单因子评价难以科学综合的反映流域生态安全的空间分异特征与规律,各因子间存在相互促进与相互抑制关系,对生态安全性高低有重要影响。植被覆盖度、土地覆盖类型、距其他建设用地距离、距居民点距离和距离道路远近因子与流域生态安全空间耦合度较高,这些因子对流域生态安全性有重大影响。

### 参考文献:

- [1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.
- [2] 刘洋,蒙古军,朱利凯.区域生态安全格局研究进展[J].生态学报,2010,30(24):6980-6989.
- [3] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与理论基础[J].生态学报,2004,24(4):761-768.

- [4] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态环境问题已经成为国家安全的热门话题[J]. 环境保护, 2002, 1(5): 3-5.
- [5] 潘竞虎, 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, 26(10): 3126-3136.
- [6] 刘红, 王慧, 刘康. 我国生态安全评价方法研究述评[J]. 环境保护, 2005, 8(8): 34-37.
- [7] 黄宝强, 刘青, 胡振鹏, 等. 生态安全评价研究述评[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 74-78.
- [8] James F R, Mark D S, Eric F L, et al. Global Desertification: Building a Science for Dryland Development [J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.
- [9] 陈哲, 温庆忠. 国内外生态安全研究述评[J]. 林业调查规划, 2017, 42(4): 31-36.
- [10] 解雪峰, 吴涛, 肖翠王, 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.
- [11] 饶清华, 邱宇, 王菲凤, 等. 福建省山仔水库生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 221-225.
- [12] 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, 2008, 29(6): 3117-3125.
- [13] 李晶, 蒙古军, 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, 49(4): 707-715.
- [14] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766.
- [15] 卓静. 基于 3S 技术的陕北地区生态环境遥感动态监测及评价[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [16] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6305-6311.
- [17] 李玉平, 蔡运龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6): 784-789.
- [18] 刘孝富, 段培强, 王维, 等. 成都地震重灾区生态影响分区及恢复对策[J]. 环境科学研究, 2010, 23(6): 711-718.
- [19] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建: 以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.
- [20] 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, 33(11): 1323-1329.
- [21] 张宇, 曹卫东, 梁双波, 等. 中部地区资源型城市质量与规模时空差异演化研究: 以山西省为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2): 233-245.
- [22] 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, 35(6): 47-53.
- [23] 庞雅颂. 区域生态安全评价方法综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3): 340-344.
- [24] 余文波. 基于 RS 及 GIS 的南昌市土地生态安全动态评价及分区[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 244-249.
- [25] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [26] Dong J H, Dai W T, Shao G Q, et al. Ecological network construction based on minimum cumulative resistance for the City of Nanjing, China [J]. Isprs International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2045-2060.
- [27] 赵筱青, 王海波, 杨树华, 等. 基于 GIS 支持下的土地资源空间格局生态优化[J]. 生态学报, 2008, 29(9): 4892-4910.
- [28] Zhao X Q, Xu X H. Research on landscape ecological security pattern in a Eucalyptus introduced region based on biodiversity conservation [J]. Russian Journal of Ecology, 2015, 46(1): 59-70.
- [29] 廖冰, 张智光. 林业生态安全指标: 指数的耦合实证测度研究[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1777-1791.
- [30] 潘竞虎, 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, 35(3): 791-799.
- [31] 李益敏, 朱军, 余艳红. 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[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 198-205.
- [32] 潘竞虎, 石培基, 刘英英. 干旱区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.
- [33] 赵筱青, 和春兰. 外来树种桉树引种的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1860-1871.
- [34] Li F, Ye Y, Song B, et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: A case study from Changzhou, China [J]. Ecological Modelling, 2014, 318(2015): 194-203.
- [35] Broquet T, Ray N, Petit E, et al. Genetic isolation by distance and landscape connectivity in the American marten (*Martes Americana*) [J]. Landscape Ecology, 2006, 21(6): 877-889.
- [36] 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.