

云南高原湖泊杞麓湖动态演变及景观生态风险评价

王涛¹, 肖彩霞¹, 刘娇², 禄鑫³

(1. 贵州林业勘察设计有限公司, 贵州 贵阳 550003; 2. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224;
3. 贵州省林业调查规划院, 贵州 贵阳 550003)

摘要:【目的】探究气候变化背景下杞麓湖动态演变过程及其流域景观生态风险。【方法】基于 1975-2015 年 8 期时序 Landsat 数据, 提取湖泊边界, 并解译得到 3 期流域景观类型分类数据。从湖泊面积、轮廓和质心 3 个方面对杞麓湖动态演变进行研究, 通过划分生态风险采样小区, 建立生态风险评价模型, 定量分析杞麓湖流域的景观生态风险。【结果】①近 30 a 来, 杞麓湖流域景观结构变化特征明显, 建设用地和滩涂湿地面积显著增加, 农地、林地和水体面积持续减少, 未利用地面积变化不大; ②近 40 a 来, 杞麓湖处于持续萎缩状态, 2015 年水体面积仅为面积最大年(1985 年)的 56.05%; 杞麓湖形状体现为连续的复杂变化, 以西部和南部的河流入湖口处变化最为明显, 东部变化最小; 杞麓湖质心主要向东北方向迁移, 1975 和 2015 年湖泊质心相距 1 242 m; ③生态风险评价结果表明: 流域以较低生态风险为主, 所占比为 26.75%~35.09%, 1985-2015 年生态风险均值由 0.957 8 增加至 1.013 9, 流域生态风险趋于恶化。【结论】杞麓湖流域生态风险空间分布具有明显的区位性和异质性, 高生态风险主要分布于杞麓湖水体部分, 低生态风险主要分布于流域的湖盆之中, 其余生态风险主要沿湖盆和湖泊呈块状或带状分布。图 6 表 2 参 19

关键词: 景观生态学; 动态演变; 生态风险; 杞麓湖

中图分类号: S771.8; P901

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2020)01-0009-09

Dynamic evolution and landscape ecological risks assessment of Qilu Lake in Yunnan Plateau

WANG Tao¹, XIAO Caixia¹, LIU Jiao², LU Xin³

(1. Guizhou Forestry Survey and Design Co., Ltd., Guiyang 550003, Guizhou, China; 2. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] The research aim is to study the dynamic evolution process of Qilu Lake and its watershed landscape ecological risks under the background of climate change. [Method] The lake boundary was extracted based on eight time series Landsat images from 1975 to 2015, and three watershed landscape classification data were interpreted. The dynamic evolution of Qilu Lake was studied from the change of lake area, lake shape and the lake centroid. The ecological risk assessment model was established by dividing ecological risk sampling plots, and the landscape ecological risk of Qilu Lake Basin was quantitatively analyzed. [Result] (1) Over the last 30 years, the landscape structure of Qilu Lake Basin has changed obviously; the area of construction land and beach wetland has increased significantly; the area of farmland, forest land and water area has decreased continuously, and the area of unused land has not changed much; (2) Over the last 40 years, Qilu Lake has been in a continuous shrinking state, and the water area in 2015 is only 56.05% of that in the

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-06-13

基金项目: 贵州省林业厅林业优秀青年人才培养专项资金资助项目(黔林科合 J[2018]10 号); 国家自然科学基金资助项目(31660236)

作者简介: 王涛, 从事资源环境遥感研究。E-mail: 1050789968@qq.com。通信作者: 禄鑫, 高级工程师, 从事森林资源调查研究工作。E-mail: 57567071@qq.com

largest year (1985); Qilu Lake is characterized by continuous and complex changes in shape, the most obvious change is at the entrance of rivers to lake in the west and south part, and the smallest change in the east part; The centroid of Qilu Lake mainly migrates to the northeast, and there is a 1 242 m gap between the centroid in 1975 and that in 2015. The results of ecological risk assessment indicates that the main ecological risk is in lower grade, accounting for 26.75%–35.09% between 1985–2015; The average ecological risk has increased from 0.957 8 to 1.013 9 between 1985–2015, indicating increasing ecological risks. [Conclusion]The spatial distribution of ecological risk in Qilu Lake Basin has obvious aggregation and spatial heterogeneity. The high ecological risk mainly lies in the Qilu Lake, the low ecological risk mainly in the lake basin, and the other ecological risks mainly in block or band along the lake basin and lake. [Ch, 6 fig. 2 tab. 19 ref.]

Key words: landscape ecology; dynamic evolution; ecological risk; Qilu Lake

高原湖泊不仅是云南生境中举足轻重的生态系统,也是促进云南国民经济和社会发展,实现富民兴滇不可缺少的重要资源。湖泊的形成与衰亡、扩张与收缩,及其所引起的生态环境变化都反映了一定地域乃至全球的景观构造和气候事件^[1],随着气候变化与人类不合理活动的加剧,湖泊面积萎缩及生态环境恶化等问题引起了社会各界的广泛关注^[2-4]。高原湖泊所集成的湖泊流域是以湖泊为主题,集自然、地理环境为一体的复杂综合生态系统^[5],在人类活动与自然因素的强烈扰动叠加下,生态压力和风险日益增加。生态风险是指种群、生态系统或整个景观的生态功能受到外界胁迫,从而在目前和将来对该系统健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值产生不良影响的一种状况^[6]。景观生态风险评价区别于常规生态风险评价方法,依托景观生态学的生态过程与空间格局耦合关联视角,更加关注生态风险的时空异质性和尺度效应可能产生的不良结果,是生态风险评价在区域尺度上的重要分支领域^[7]。目前,景观生态风险评价已成为国内外研究的热点^[8-10],而对云南高原湖泊流域景观生态风险定量化评估及生态过程时空变化规律等相关研究仍缺乏。杞麓湖是云南九大高原湖泊衰退速率最快,水面缩减最多,富营养化最为严重的湖泊之一。杞麓湖流域汇集了通海县90%以上的人口,是全县人口最密集,经济最发达,物产最丰富的地区。近些年来,发生在中国云南省内的持续干旱使杞麓湖湖泊面积大幅缩减,水资源短缺问题越来越严重。随着流域社会、经济的持续发展,流域将进一步承受经济规模和土地利用扩张造成的生态压力和风险^[11]。开展基于时序遥感数据的湖泊动态研究,探讨空间景观格局剧烈变化背景下景观生态风险的时空变化规律,有助于深入分析杞麓湖湖泊动态演变的规律和原因。鉴于此,本研究以1975–2015年研究区的遥感影像为基础,对杞麓湖进行了动态监测,并对杞麓湖流域的景观格局和生态风险时空演变进行分析,从而揭示了湖泊剧烈变化下流域景观生态风险时空演变规律,以期对杞麓湖生态安全科学评价和流域土地利用开发规划提供理论依据和技术参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

杞麓湖中心点位于24°10′4.13″N, 102°46′40.55″E,距所属县城通海县人民政府驻地6.5 km,水面海拔1 796.6 m。杞麓湖属南盘江水系,是云南省九大高原湖泊的重要湿地之一,因断层陷落而天然形成,湖泊主要靠天然降水所形成的地表径流供给水源,入湖的主要河流为红旗河、姚春沟河及大新河,其泄水的唯一通道为湖水下的天然溶洞,是1个封闭型高原湖泊,具有灌溉农田,调节气候,提供鱼产、工业用水、观光旅游等多种经济功能。杞麓湖流域位于云南省中部玉溪市,流域面积37 445.85 km²,占全市土地总面积的2.5%,属于典型的高原湖泊小流域类型。流域为一向南突出的新月型断拗盆地,属中亚热带湿润高原凉冬季风气候,每年5–10月为雨季,10月下旬至来年5月初为旱季。杞麓湖流域是通海县经济社会发展的主体,为省城通往滇南的交通要道。

1.2 数据获取与分类

选用美国国家航空航天局(NASA)的Landsat系列陆地资源卫星遥感数据作为空间时序土地利用信息提取的数据源,包括1975、1985、1990、1995、2000、2005、2010和2015年共8个时期成像于1或2月的杞麓湖流域影像数据。其中1975年为MSS传感器(空间分辨率为78 m),1985–2010年为TM影像

(空间分辨率为 30 m)，2015 年为 OLI(空间分辨率为 30 m)，1 月或 2 月为旱季，湖泊水位相对稳定，且利于农地识别。对原始的影像数据首先进行图像融合、拼接、裁剪和图像增强等处理，便于影像解译。参照杞麓湖流域土地利用地理信息数据以及通海县第 3 次森林资源二类调查空间矢量数据库，结合本研究的实际需求，将杞麓湖流域划分为农地、林地、建设用地、水体、滩涂湿地和未利用地 6 个景观类型。在本研究中，迹地、宜林地、荒草地和苗圃地均划分为未利用地。采用目视解译的方法对波段组合 RGB 为 4, 3, 2 的影像数据进行人工区划判读，最终形成 8 个时期的杞麓湖湖泊矢量数据和 1985、2000、2015 年(图 1)3 个时期的流域景观类型矢量数据。解译结果利用校正过后的谷歌卫星地图以及研究区第 3 次森林资源二类调查成果进行精度验证，最终水体的总体精度达 97% 以上，其他各景观类型的精度均在 90% 以上，解译精度满足研究需要。

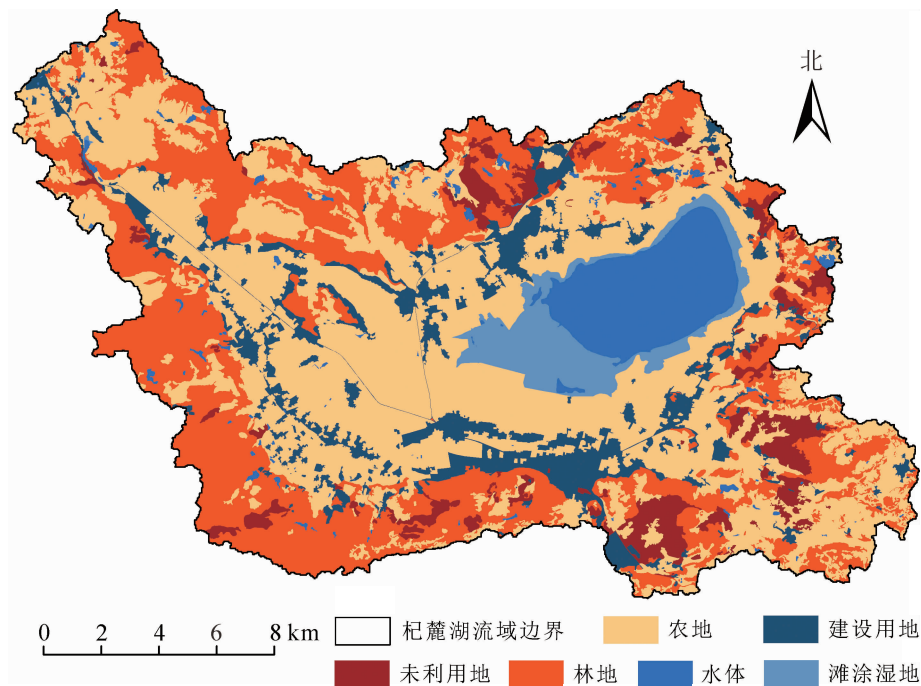


图 1 杞麓湖流域 2015 年景观类型空间分布示意图

Figure 1 Spatial distribution of landscape types in Qilu Lake Basin in 2015

1.3 湖泊动态演变分析方法

基于地理信息空间统计方法，先从湖泊面积变化方面研究杞麓湖近 40 a 来湖泊动态的总体特征，进而基于 Fragstats 软件计算杞麓湖水体的景观形状指数(LSI)，定量揭示杞麓湖形状的变化趋势，最后在 ArcMAP 中求算各时期杞麓湖斑块的空间质心，跟踪分析杞麓湖空间质心的迁移规律。

1.4 生态风险样区划分

依据研究区景观斑块平均面积 2~5 倍的原则^[12]，将流域网格化为大小 1.5 km × 1.5 km 的方形单元格，基于流域边界对生成的单元格进行裁剪，使单元格总面积与研究区面积一致，共生成 219 个单元格，用单元格与解译结果进行叠加处理，使每一单元格都成为具有特定景观结构组成的生态风险采样小区。依次计算每一评价单元样区的生态风险指数，并把该生态风险值赋予为样地中心点的值，作为空间插值分析的样本。

1.5 景观生态风险评价

借鉴相关的研究成果^[13]，以景观破碎度、景观分离度和景观优势度为自变量，采用景观干扰度指数和景观敏感度指数来建立景观损失度指数，在此基础上构建景观生态风险指数。其计算公式为：

$$E_{Rk} = \sum_{i=1}^m \frac{A_{ki}}{A_k} L_{Li} \quad (1)$$

式(1)中： E_{Rk} 为第 k 个采样区的景观生态风险指数； L_{Li} 为第 i 种景观类型的生态损失度指数； A_{ki} 为第 k 个采样区第 i 种景观类型的面积； A_k 为第 k 采样区的面积； m 为景观类型。 L_{Li} 的计算公式为：

$$L_i=10U_iS_i \quad (2)$$

式(2)中： U_i 为景观干扰度指数； S_i 为敏感度指数^[14]。按敏感性高低对各景观类型的 S_i 进行赋值。水体为6，滩涂湿地为5，农地为4，林地为3，未利用地为2，建设用为1^[15]。归一化后得到各景观类型的敏感度指数。 U_i 计算公式为：

$$U_i=aC_i+bF_i+cD_i \quad (3)$$

式(3)中： a 、 b 、 c 分别为景观破碎度、分离度和优势度权重，对其赋值分别为0.3、0.2和0.5^[16]； C_i 为破碎度； F_i 为分离度； D_i 为优势度。

2 结果与分析

2.1 景观结构变化特征

如表1所示：杞麓湖景观类型以农地和林地为主，分别占了研究区土地总面积的42.66%~44.72%和30.83%~32.17%。各土地利用类型面积从大到小依次为农地、林地、建设用地、水体、未利用地、滩涂湿地。1985–2015年，建设用地和滩涂湿地面积显著增加，其中，建设用地所占比率由6.49%增加到10.47%，且前15 a增幅大于后15 a，滩涂湿地在前15 a呈略微减少的变化趋势，1985年流域滩涂湿地的面积占了流域总面积的0.30%，到了2010年，其面积仅占流域总面积的0.11%，2000–2015年滩涂湿地的总面积显著增加，占流域总面积的3.95%，这与2015年杞麓湖湖泊面积急剧缩减有关。水体在30 a间不断减少，其面积总共减少了37.13%。未利用地面积变化最小，呈先小幅度增加然后又小幅度减少的波动变化趋势。

表1 不同时期土地利用类型面积占比和变化率

Table 1 Area rates and changing rates of land use in different periods

土地利用类型	面积占比/%			变化率/%		
	1985年	2000年	2015年	1985–2000年	2000–2015年	1985–2015年
建设用地	6.49	9.37	10.47	44.36	11.72	61.28
林地	32.17	31.35	30.83	-2.57	-1.64	-4.17
农地	44.72	43.30	42.66	-3.18	-1.48	-4.61
滩涂湿地	0.30	0.11	3.95	-62.35	3 340.20	1 195.36
水体	10.58	10.09	6.65	-4.63	-34.08	-37.13
未利用地	5.72	5.77	5.44	0.86	-5.87	-5.05

说明：“-”表示变化率为负

2.2 湖泊动态演变过程

2.2.1 面积变化 杞麓湖水体仅有1个斑块。为研究杞麓湖近30 a来面积和形状的变化特征，选取景观水平上的景观面积和景观形状指数2个指标来对其进行定量研究。从图2可以看出：杞麓湖面积的变化可分为3个主要阶段。第1个阶段为1975–1985年，这10 a杞麓湖面积呈增加的趋势，共增加了32.18 hm²；第2个阶段为1985–2010年，这个阶段杞麓湖面积呈逐渐减少的变化趋势，减少速率为10.77 hm²·a⁻¹；第3个阶段为2010–2015年，这个阶段杞麓湖面积急剧缩减，面积共减少了1 396.94 hm²。到2015年春，杞麓湖面积仅有面积最大年份1985年的56.05%，这主要是由于2010年至2013年末，云南省连续4 a发生严重干旱，致使杞麓湖面积大幅缩减，湖泊西南边的浅水区域因泥沙淤积导致大面积湖滩裸露。

2.2.2 轮廓变化 景观形状指数是度量景观形状复杂程度的重要指标，其值越大，表明景观形状越复杂或越扁长，其计算公式参见文献[17]。形状指数变化表明：杞麓湖形状指数在1975–2010年的变化起伏波动，2010–2015年呈显著减小的变化趋势。1975年，杞麓湖形状指数最大，为1.809 2，说明此时杞麓湖形状最为复杂，受到的人为干扰最小。1975年以来，由于环杞麓湖周围不断筑路筑坝，放水围田，修建景区等频繁的人为干扰活动，加之流域内每年的雨水丰沛不均，造成杞麓湖形状指数变化频繁，且较无规律。到2015年，由于湖泊面积大幅减小，形状指数降至最低，为1.456 9。从杞麓湖轮廓变化(图3)可以看出：1975年，杞麓湖轮廓显得最为复杂，轮廓上的内凹和外凸最多。1975–2010年，杞

麓湖轮廓在这 7 个时期均有细小的变化，西部的红旗河入湖口处以及南部的姚春沟河入湖口处轮廓差异最为明显。由于湖泊东面水岸较深，无人湖河流，且人为活动相对较少，形状变化不明显。2015 年湖泊形状边缘的凹凸明显减少，与前 7 个时期的轮廓形成显著对比，尤以西部变化最为剧烈，南部变化次之，东北部变化最小。

2.2.3 质心变化 由 1975–2015 年杞麓湖质心位置迁移变化(图 4)可以看出：杞麓湖质心总共向东北迁移了 1 242.0 m。1975–1985 年，杞麓湖质心以 $6.5 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度向东南迁移了 65.0 m，结合湖泊面积的变化特征，说明这个阶段湖泊呈现东南方向的扩张变化；1985–1990 年，这个阶段迁移速度较快，向东北迁移了 76.0 m，平均迁移 $15.2 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ；1990–1995 年，迁移速率较慢，共向北偏东 12° 方向迁移了 15.0 m，平均迁移 $3.0 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ；1995–2000 年和 2000–2015 年，这两个阶段均向东偏北 8° 方向迁移，分别迁移了 70.0 和 22.0 m，平均迁移 14.0 和 $4.4 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ；2005–2010 年，杞麓湖质心以 $34.4 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 的迁移速率向西南方向迁移了 171.8 m，这主要是由于湖面增长，以及西南边的人湖口进行过大面积的清淤，导致西南边水域面积扩展所致；2010–2015 年，湖泊质心以 $240.8 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率向东北迁移了 1 204.0 m，由于连续干旱，湖泊面积大量缩减，湖泊西南方向因地势平缓，水面较浅而迅速向东北方向萎缩。

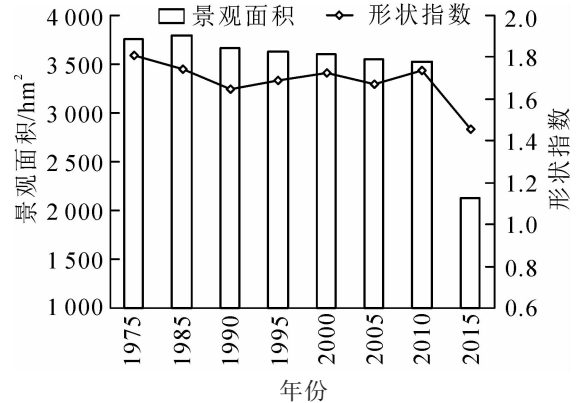


图 2 1975–2015 年杞麓湖景观面积和形状指数变化

Figure 2 Landscape area and shape index changes of Qilu Lake in 1975–2015

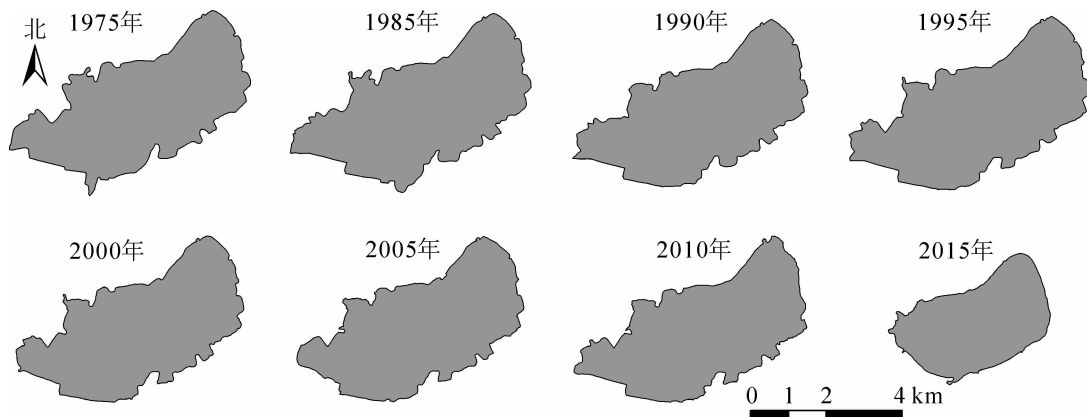


图 3 1975–2015 年杞麓湖轮廓变化示意图

Figure 3 Outlines changes of Qilu Lake in 1975–2015

2.3 景观生态风险评价

2.3.1 生态风险指数计算结果 根据建立的生态风险评价模型计算得到 219 个单元格的生态风险指数(E_{Rk})，用自然断点法^[18]将整个流域的生态风险划分为 5 个等级：低生态风险($E_{Rk} \leq 0.8073$)，较低生态风险($0.8073 < E_{Rk} \leq 0.8829$)，中生态风险($0.8829 < E_{Rk} \leq 1.4296$)，较高生态风险($1.4296 < E_{Rk} \leq 1.6895$) 和高生态风险($1.6895 < E_{Rk}$)。结果如图 5 所示：杞麓湖流域 1985 年的生态风险为 0.2606~1.9986，均值为 0.9578；2000 年生态风险为 0.3713~1.9470，均值为 0.9643；2015 年生态风险为 0.2075~1.9969，均值为

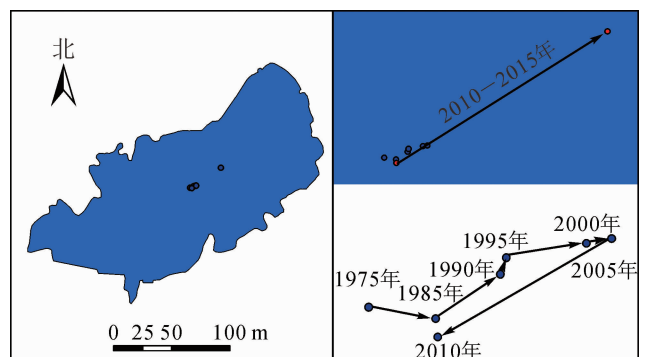


图 4 1975–2015 年杞麓湖质心变化

Figure 4 Centroid change of Qilu Lake in 1975–2015

1.013 9。各单元格生态风险指数值随年份变化呈不同的变化趋势，其中有 25 个单元格(单元格总面积为 4 893.37 hm²)生态风险持续下降，有 135 个单元格(单元格总面积 20 846.09 hm²)生态风险持续上升，有 19 个单元格(单元格总面积 3 804.51 hm²)生态风险先增加后降低，有 40 个单元格(单元格总面积为 7 920.19 hm²)生态风险先降低后上升。上述 4 种变化的单元格面积分别占了流域总面积的 13.06%、55.64%、10.16%、21.14%。表明研究区土地利用景观格局差异较大，旅游开发、城镇化等人类干扰对景观的改造，作用于流域生态系统中在不断地累加和转化，使景观格局变化所引起生态风险也开始增加，流域景观生态趋于恶化。

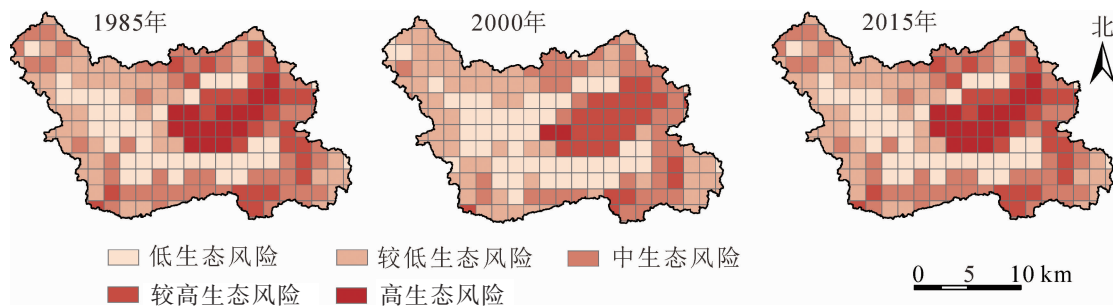


图 5 单元格生态风险计算结果

Figure 5 Ecological risk calculation results of the cell samples

2.3.2 时间演变特征 通过对研究区 1985、2000 和 2015 年 3 个时期各等级生态风险所占面积进行统计(表 2)可知：杞麓湖流域主要为较低生态风险等级，所占比率为 26.75%~35.09%。3 个时期生态风险面积存在以下变化趋势：低生态风险面积先增加后减少，总体表现为减少，面积比率由 1985 年的 22.51% 减少到 2015 年的 21.75%，面积共减少了 284.7 hm²；较低生态风险面积显著增加，由 1985 年的 10 021.7 hm² 增加至 2015 年的 13 146.2 hm²，累计增加 3 124.5 hm²；中生态风险面积先减少后增加，面积总体为减少，由 1985 年的 9 643.3 hm² 减少到 2015 年的 8 924.0 hm²；较高生态风险面积持续减少，累计减少了 2 570.1 hm²，其所占比率由 1985 年的 15.39% 降低至 2015 年的 8.53%；高生态风险面积先减少后增加，所占比率由 1985 年的 9.61% 减少到 2000 年的 6.10%，再增加至 2015 年的 10.81%，面积总共增加了 449.6 hm²，总体呈增加趋势。

表 2 1985、2000 和 2015 年各级生态风险面积所占比率

Table 2 Area and percentage of the ecological risk grades in 1985, 2000 and 2015

风险等级	1985 年		1985-2000 年面积变化/hm ²	2000 年		2000-2015 年面积变化/hm ²	2015 年		1985-2015 年面积变化/hm ²
	面积/hm ²	占流域面积比/%		面积/hm ²	占流域面积比/%		面积/hm ²	占流域面积比/%	
低	8 433.2	22.51	2 390.2	10 823.4	28.89	-2 675.0	8 148.5	21.75	-284.7
较低	10 021.7	26.75	1 640.9	11 662.6	31.13	1 483.6	13 146.2	35.09	3 124.5
中	9 643.3	25.74	-1 820.8	7 822.6	20.88	1 101.5	8 924.0	23.82	-719.3
较高	5 765.8	15.39	-895.4	4 870.4	13.00	-1 674.7	3 195.7	8.53	-2 570.1
高	3 600.3	9.61	-1 315.0	2 285.3	6.10	1 764.6	4 049.9	10.81	449.6

说明：“-”表示面积减少

2.3.3 空间分布规律 用生态风险单元格的中心点来代表风险小区的生态风险值，采用克吕金插值法得到杞麓湖流域生态风险插值结果(图 6)。杞麓湖流域生态风险空间差异分析表明：杞麓湖流域生态风险空间分布具有明显的区位性和异质性特征。低生态风险主要分布在流域内的湖盆之中，具有明显的空间聚集性，该区域为景观优势明显的连片农地和集中的城镇住宅，多年来已经形成较为稳定的景观结构，景观破碎度和敏感度较低；较低生态风险主要分布在湖盆与山区的过渡地带和环杞麓湖一带，这些区域景观结构较为完善，但也是毁林开垦、城镇拓展等行为的主要发生区域，存在一定的潜在风险；中生态风险主要分布在流域边缘的山区地带，该区域属于杞麓湖流域的高海拔区域，存在较多的破碎化林地和坑塘，自身的稳定性较差，生态系统相对脆弱；较高生态风险主要集中分布在杞麓湖水体的边缘，纳古

镇的北部区域，杨广镇的东南部，这一区域地势较低，被流域中的城镇所包围，人类干扰强度较大；高生态风险区域主要位于杞麓湖水体部分，水域生态系统十分脆弱，尤其是近年来，杞麓湖的结构性污染较为突出^[19]，水质逐步变差，已成为中度富营养型湖泊，其潜在的景观生态风险程度最高。

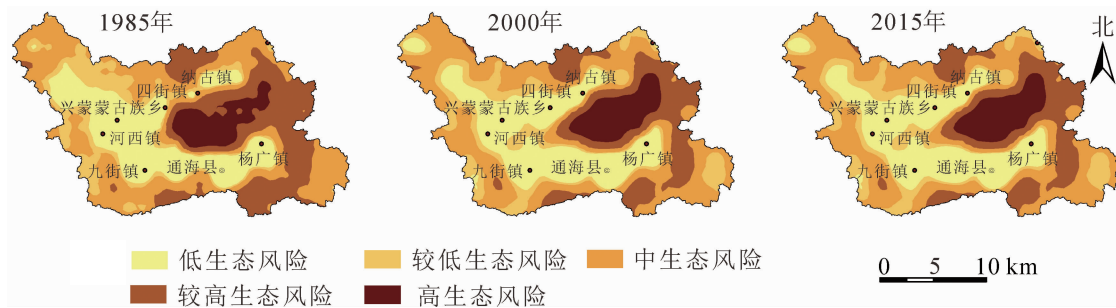


图 6 杞麓湖流域生态风险空间分布示意图

Figure 6 Spatial characteristics of ecological risk index in Qilu Lake Basin

3 结论与讨论

杞麓湖流域景观结构类型以农地和林地为主。整个研究期内，景观类型变化总体趋势为建设用地和滩涂湿地处于涨势，农地、林地和水体逐渐萎缩，未利用地变化不大。其中，滩涂湿地增幅最大，而建设用地增长面积最多。农地和林地均呈小幅度减少。通过对比影像数据可知：减少的农地和林地主要变为了建设用地，水体在 30 a 间不断减少，其面积总共减少了 37.12%。主要原因为随着气候的变化和人类活动的增强以及连续的干旱，入湖径流递减，加上强烈的蒸发作用以及农田灌溉用水，流域水资源量日趋紧张。

近 40 a 来，杞麓湖面积变化可分为 3 个阶段：1975–1985 年，杞麓湖呈扩张趋势，面积缓慢增加，1985 年为研究期间面积最大的时段；1985–2010 年，杞麓湖呈萎缩趋势，面积逐年缓慢减少；2010–2015 年是杞麓湖变化最大的阶段，面积急剧萎缩，仅为 1985 年的 56.05%，以西南部萎缩最为显著，其主要原因为 2010–2013 年间云南省的持续干旱。这与李浩杰等^[2]对包括杞麓湖在内的云南九大高原湖泊开展的湖泊水面遥感监测研究所得出的结论相吻合。杞麓湖形状指数在 1975–2010 年间变化起伏波动，与面积变化无明显的相关性，到 2015 年形状指数值降至最低。轮廓上以西部和南部河流入湖口处变化最为明显，东北部因水岸较深变化较小。杞麓湖质心的变化方向与其缩减的主要方向相反，共向东北方向迁移了 1 242.0 m。

219 个采样小区生态风险计算结果表明：1985–2015 年杞麓湖流域景观生态风险均值介于 0.957 8~1.013 9，流域有 55.64% 面积的生态风险不断升高，流域生态趋于恶化。时间变化方面，低生态风险、中生态风险和较高生态风险面积减少，较低生态风险和高生态风险面积增加。今后应重点防范低生态风险和较高生态风险向更高等级的生态风险转化。空间分布上，杞麓湖流域景观生态风险具有较强的区域性和异质性，生态风险的等级分布规律与景观破碎程度和景观敏感性有密切关系，低生态风险主要分布在流域内的湖盆之中，高生态风险主要分布于湖泊处，而其他等级的生态风险主要沿湖盆和湖泊呈块状或带状分布。

本研究利用生态学、环境学和地理学等多学科原理对杞麓湖近 40 a 湖泊的动态和流域景观生态风险特征进行了多层面的探讨和评价。针对杞麓湖不断缩减、流域生态风险不断升高等问题，相关主管部门应当抓住杞麓湖国家湿地公园建设的契机，本着因地制宜的原则，一方面要合理规划城乡建设和土地配置，防止流域景观高度破碎化和高空间异质性的发生；另一方面要大力实施退田环湖、退耕还林的政策，并及时清理入湖河流，从根源上防止杞麓湖进一步受到污染，同时对湖口淤积的泥沙要及时清理，以防范因滩涂裸露而造成的围湖造田和围湖造塘行为；此外，在开发过程中，要控制好土地利用强度，尽量减轻人为干扰对林地、水体及农地等生态功能型景观的破坏；最后着力优化湖泊周围的生态系统，重点关注对湿地景观的保护，增强其生态风险抵抗力。本研究对杞麓湖多个时期的面积进行纵向比较，反映景观变化动态，但均限于旱季。关于对杞麓湖不同季节的遥感监测，以及生态风险演变的人为干扰

机制将会在后续研究中进一步加强。

4 参考文献

- [1] 吴小君, 吴鹏海, 刘紫涵, 等. 利用时序 Landsat 数据的杞麓湖面积年变化时空分析[J]. 遥感信息, 2016, **31**(4): 89 – 94.
WU Xiaojun, WU Penghai, LIU Zihan, *et al.* A spatio-temporal analysis of water body area annual changes in Qilu Lake based on times series landsat data [J]. *Remote Sensing Inf*, 2016, **31**(4): 89 – 94.
- [2] 李浩杰, 种丹, 范硕, 等. 近 30 a 云南九大高原湖泊水面面积遥感变化监测[J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(增刊 1): 32 – 37.
LI Haojie, CHONG Dan, FAN Shuo, *et al.* Remote sensing monitoring of the nine plateau lakes' surface area in Yunnan in recent thirty years [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2016, **25**(suppl 1): 32 – 37.
- [3] 郭玉静, 郑毅, 王妍, 等. 滇西北高原湖泊剑湖演变过程及其生态环境效应分析[J]. 环境工程, 2017, **35**(4): 45 – 50, 105.
GUO Yujing, ZHENG Yi, WANG Yan, *et al.* Evolution of Jianhu Lake and its eco-environmental effects in the north-western Yunnan Province [J]. *Environ Eng*, 2017, **35**(4): 45 – 50, 105.
- [4] 陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆流域区域景观生态风险分析: 以阜康三工河流域为例[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(4): 116 – 120.
CHEN Peng, PAN Xiaoling. Ecological risk analysis of regional landscape in inland river watershed of arid area: a case study of Sangong River Basin in Fukang [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22**(4): 116 – 120.
- [5] 许妍, 高俊峰, 高永年. 基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 642 – 648.
XU Yan, GAO Junfeng, GAO Yongnian. Landscape ecological risk assessment in the Taihu region based on land use change [J]. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 642 – 648.
- [6] 高永年, 高俊峰, 许妍. 太湖流域水生生态功能区土地利用变化的景观生态风险效应[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(7): 1088 – 1096.
GAO Yongnian, GAO Junfeng, XU Yan. Response of landscape ecological risk to land use change in level aquatic eco-functional regions in Taihu Lake watershed [J]. *J Nat Resour*, 2010, **25**(7): 1088 – 1096.
- [7] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, **70**(4): 664 – 677.
PENG Jian, DANG Weixiong, LIU Yanxu, *et al.* Review on landscape ecological risk assessment [J]. *Acta Geogr Sin*, 2015, **70**(4): 664 – 677.
- [8] 闻国静, 刘云根, 王妍, 等. 普者黑湖流域景观格局及生态风险时空演变[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(6): 1095 – 1103.
WENG Guojing, LIU Yungen, WANG Yan, *et al.* Temporal and spatial evolution of landscape patterns and ecological risk in the Puzhehei Lake basin [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(6): 1095 – 1103.
- [9] 位宏, 徐丽萍, 李晓蕾, 等. 博斯腾湖流域景观生态风险评价与时空变化[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(增刊 1): 345 – 351.
WEI Hong, XU Liping, LI Xiaolei, *et al.* Landscape ecological risk assessment and its spatiotemporal changes of the Boston Lake basin [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, **41**(suppl 1): 345 – 351.
- [10] 赵卫权, 杨振华, 苏维词, 等. 基于景观格局演变的流域生态风险评价与管控: 以贵州赤水河流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(8): 1218 – 1227.
ZHAO Weiwan, YANG Zhenhua, SU Weici, *et al.* Ecological risk assessment and management of watershed based on landscape pattern change: a case study of the Chishui River basin in Guizhou [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2017, **26**(8): 1218 – 1227.
- [11] 董琼. 高原湖泊杞麓湖流域土地利用变化及生态安全评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
DONG Qiong. *Studies on Land Use Changes and Ecological Security Assessment of Qilu Lake Basin in Yunnan Plateau* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [12] 苏海民, 何爱霞. 基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(1): 91 – 99.
SU Haimin, HE Aixia. Analysis of land use based on RS and Geo-statistics in Fuzhou City [J]. *J Nat Resour*, 2010,

- 25(1): 91 – 99.
- [13] 王涛, 张超, 于晓童, 等. 洱海流域土地利用变化及其对景观生态风险的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(7): 2003 – 2009.
WANG Tao, ZHANG Chao, YU Xiaotong, *et al.* The effect of land use change on landscape ecological security in Erhai basin [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(7): 2003 – 2009.
- [14] 任金铜, 杨可明, 陈群利, 等. 贵州草海湿地区域土地利用景观生态安全评价[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(5): 158 – 165.
REN Jintong, YANG Keming, CHEN Qunli, *et al.* Evaluation on ecological security of land use landscape in Guizhou Caohai wetland [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, **41**(5): 158 – 165.
- [15] 黄木易, 何翔. 近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 785 – 793.
HUANG MUYI, HE XIANG. Landscape ecological risk assessment and its mechanism in Chaohu Basin during the past almost 20 year [J]. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 785 – 793.
- [16] 王娟, 崔保山, 刘杰, 等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 269 – 277.
WANG Juan, CUI Baoshan, LIU Jie, *et al.* The effect of land use and its change on ecological risk in the Lancang River Watershed of Yunnan Province at the landscape scale [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2008, **28**(2): 269 – 277.
- [17] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 96 – 119.
- [18] 吴莉, 侯西勇, 邸向红. 山东省沿海区域景观生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(1): 214 – 220.
WU Li, HOU Xiyong, DI Xianghong. Assessment of regional ecological risk in coastal zone of Shandong Province [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(1): 214 – 220.
- [19] 于洋, 张民, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊水质现状及演变[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 820 – 828.
YU Yang, ZHANG Min, QIAN Shanqin, *et al.* Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau [J]. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 820 – 828.