

杞麓湖流域景观时空格局演变及其 对景观生态风险的影响

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, 贵阳 550003; 2. 西南林业大学, 昆明 650224; 3. 贵州省林业调查规划院, 贵阳 550003)

摘要:持续的干旱致使杞麓湖水面大幅萎缩、生态系统不断退化,由经济规模和土地利用扩张造成的生态压力和风险日益增大。为探析景观格局演变及其对景观生态风险的影响,以杞麓湖流域为研究区,基于 1985 年、2000 年和 2015 年 3 期 Landsat 卫星影像,建立了杞麓湖流域景观结构类型矢量数据库,分析了区域景观结构的组成及其转化。应用景观生态风险评价理论及景观格局指数构建景观生态风险评价模型,对 219 个生态风险采样小区和流域生态风险的等级空间分布特征进行了分析。结果表明:(1) 研究期间景观格局变化明显,主要特征为建设用地和湿地为转入变化,面积显著增加,水体为转出变化,面积显著减少,缩小了近 50%,耕地、林地和未利用地一直处于双向转化,但面积均有所减少。(2) 流域景观破碎度小于 0.1,景观破碎化程度较轻,耕地和林地的景观优势明显,占流域的主导地位,湿地的干扰度最大,最易受到外界环境变化的影响。(3) 样区生态风险值大多介于 0.5~1.0,流域主要处于较低生态风险等级,但低和较高生态风险正向更高等级的生态风险转化,流域生态趋于恶化;流域生态风险空间分布的区位性和异质性特征明显,低生态风险主要位于流域中的平原地带,高生态风险集中于杞麓湖,较低和中生态风险绕湖盆和湖泊分布,较高生态风险分布比较零散。

关键词:景观格局; 类型转换; 生态风险; 杞麓湖流域

中图分类号: P901; F301.24; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0219-07

Evolution of Spatial and Temporal Patterns of Landscape and Its Impact on Landscape Ecological Risk in Qilu Lake Basin

WANG Tao¹, XIAO Caixia¹, LIU Jiao², LU Xin³

(1. Guizhou Forestry Survey and Design Co., Ltd., Guiyang 550003, China; 2. Southwest Forestry

University, Kunming 650224, China; 3. Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, China)

Abstract: The sustained drought has caused the water surface of Qilu Lake to shrink dramatically and the ecosystem to degenerate continuously. To research the landscape spatial changes and its impacts on landscape ecological risk, the ecological pressure and risk caused by the expansion of economic scale and land use is increasing day by day. The Qilu Lake Basin was taken as the study area. Landsat remote sensing images of the Qilu Lake Basin in 1995, 2000 and 2015 were classified to establish the vector database of landscape structure types, the composition and transformation characteristics were analyzed in this paper. Based on landscape ecological risk assessment theory and landscape pattern index, the landscape ecological risk assessment model was constructed. Ecological risk values of 219 ecological risk sampling plots and the spatial distribution characteristics of different levels of ecological risk were evaluated. The results showed that: (1) during the past 30 years, the landscape pattern of the Qilu Lake Basin had changed significantly, the main characteristics were that the expansions of construction land and wetland, and the their areas increased, the reduction of water area, the water area decreased by nearly 50%, agricultural land, forest land and unused land presented two-way transformation, but their area decreased in general; (2) landscape fragmen-

收稿日期: 2019-01-18

修回日期: 2019-02-18

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

第一作者: 王涛(1991—), 男, 四川冕宁人, 硕士, 助理工程师, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: 1050789968@qq.com

通信作者: 禄鑫(1984—), 男, 贵州威宁人, 双学士学位, 高级工程师, 主要从事森林资源调查研究。E-mail: 57567071@qq.com

tation degree was less than 0.1, it was relatively slight; agricultural land and forestland had obvious landscape advantages, occupying the dominant position in this basin; wetlands had the greatest degree of interference and were most vulnerable to changes in the external environment; (3) most of the ecological risk values in the sample plots were between 0.5 and 1.0, and the basin was mainly at the lower ecological risk level, but the lower and higher ecological risks were transforming to the higher ecological risk level, which meant that the ecosystem of the basin tended to deteriorate; the spatial distribution of ecological risk in the basin had obvious characteristics of location and heterogeneity, the low ecological risk was mainly located in the plain area of the basin, and the high ecological risk was concentrated in Qilu Lake, the lower and middle ecological risks distributed around the lake basins and lakes, while higher ecological risks scattered.

Keywords: landscape pattern; type conversion; ecological risk; Qilu Lake Basin

高原湖泊不仅是云南生境中具有举足轻重的生态系统,而且是促进云南国民经济、社会发展,实现富民兴滇不可缺少的重要资源。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^[1],在人类活动与自然因素的强烈扰动叠加下,湖泊流域的生态压力和风险日益增加^[2-3]。目前,各国对环境管理的目标和环境观念已发生转变,景观格局对生态环境的影响开始受到相关管理部门的关注,景观生态风险评价正逐渐成为地理学、生态学等学科的研究热点^[4-6]。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,国内对流域景观生态风险的研究主要集中在人口较为稀疏的干旱区和人口集中的长江流域中下游,对高原湖泊所集成的小流域景观生态风险的研究目前还比较缺乏^[8-10]。王涛等^[11]以洱海流域土地利用变化为研究背景,对其景观生态风险的时空演化规律和机制进行了探讨,其结果表明洱海流域的生态正趋于恶化;闻国静等^[12]对普者黑流域景观格局及生态风险时空演变进行了分析,其结果认为流域生态风险时空分布与土地利用强度及人类活动有着密切关系。这些研究为云南省高原湖泊生态环境评价的研究开辟了新的视角,对区域生态环境质量改善和区域发展具有指导意义。

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,受我国云南省持续干旱的影响,杞麓湖流域正面临湖泊萎缩、河流干涸、流域资源受损、生态系统退化等诸多问题。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^[13]。开展基于时序遥感数据的湖

泊景观时空格局演变研究,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,对维护杞麓湖流域生态安全、科学评价杞麓湖流域土地利用状况、以及合理调配土地利用格局以应对景观生态胁迫具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杞麓湖流域位于云南省中部玉溪市,地理坐标为 24°4'27"—24°14'47"N,102°33'38"—102°52'35"E。流域内共涉及通海县 1 个县及 7 个乡镇,流域面积共 37 445.85 hm²,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、地势四周高、中间低,高山、平原和湖泊依次分布是杞麓湖流域最典型的地貌特征。流域入湖河流主要为红旗河、姚春沟河及大新河 3 条,无明显出湖河道,泄水的唯一通道为湖水下的天然溶洞,是一个封闭型高原湖泊。流域每年 5—10 月为雨季,10 月下旬—翌年 5 月初为旱季,属中亚热带湿润高原凉季风气候,是通海县经济社会发展的主体,省城通往滇南的交通要道。

1.2 数据获取与分类

选用 1985 年、2000 年和 2015 年共 3 个时期成像是 1 或 2 月份的杞麓湖流域 Landsat 遥感影像数据(分辨率为 30 m)。首先利用 ENVI 5.3 软件对影像进行图像融合、拼接、裁剪和图像增强等处理。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 2 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耕地、林地、建设用地、水体、滩涂湿地和未利用地(含迹地、宜林地和荒草地)6 个景观类型。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 1985 年、2000 年、2015 年 3 个时期的流域景

观类型矢量数据库。解译结果利用校正过后的高清谷歌卫星地图以及研究区第 3 次森林资源 2 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。

1.3 生态风险样区划分

为了采集流域生态风险,根据研究区解译斑块个数和平均斑块面积,并结合研究区实际特征,利用 ArcGIS 10.1 生成杞麓湖流域渔网图层,共生成 219 个大小为 1.5 km×1.5 km 的方形单元格,以此作为生态风险采集的样本。利用景观生态风险评价模型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。研究区流域地理位置及生态风险样区划分如图 1 所示。

1.4 景观生态风险评价

借鉴相关的研究成果^[14],以景观破碎度、景观分离度和景观优势度为自变量,建立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:

$$ER_k = \sum_{i=1}^m \frac{A_{ki}}{A_k} \cdot LL_i \tag{1}$$

式中:ER_k 为第 k 采样区的景观生态风险指数;LL_i 为景观生态损失度指数;A_{ki} 为采样区面积;A_k 为第 k 采样区的面积;m 为景观类型。

$$LL_i = 10U_i \cdot S_i \tag{2}$$

式中:U_i 为景观干扰度指数;S_i 为敏感度指数^[15],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,林地为 4,耕地为 3,未利用地为 2,建设用地为 1^[16]。归一化后得到各景观类型的敏感度指数。景观干扰度的计算公式及各参数的意义见表 1。

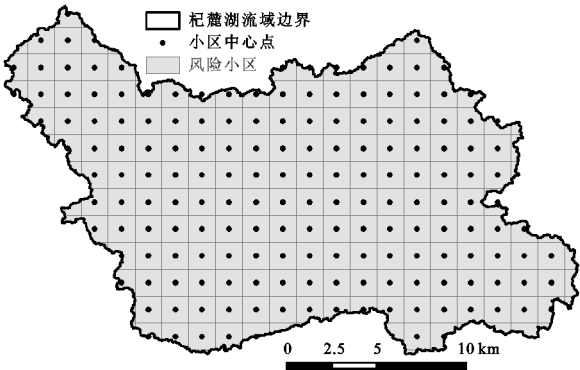


图 1 研究区生态风险样区网格化采样

表 1 景观指数计算方法^[17]

指数名称	计算公式	参数意义
景观破碎度指数	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	n_i 为景观 i 的的斑块数; A_i 为景观 i 的总面积
景观分离度指数	$F_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A_i}}$	A_i 为景观 i 的总面积; A 为景观总面积; n_i 为景观 i 的的斑块数
景观优势度指数	$D_i = \frac{Q_i + M_i + 2L_i}{4}$	Q_i 为斑块 i 出现的样方数/总样方数; M_i 为斑块 i 的数目/斑块总数; L_i 为斑块 i 的面积/总面积
景观干扰度指数	$U_i = a \cdot C_i + b \cdot F_i + c \cdot D_i$	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, 0.5

2 结果与分析

2.1 景观类型变化及相互转化分析

研究区景观类型目视解译结果如图 2 所示。结果表明,研究区以耕地、林地和水体为主,其中耕地主要分布于湖盆平原,北部山区和东南部山区有零星分布,林地主要分布于西南和北部山区,水体主要为杞麓湖,另有较多的坑塘和水库分布于流域四周,建设用地间插于耕地之中,湿地绕杞麓湖分布,而未利用地则散布在流域各个部分。在各个研究阶段,杞麓湖在形状和水面大小上存在明显变化,表现为形状趋于平滑简单,水面显著减小,仅为 1985 年的 56.05%。分别对 3 期数据进行地类面积和数理统计可知,

1985—2015 年建设用地和湿地处于涨势,耕地、林地和水体逐渐萎缩,未利用地面积变化最小,较 1985 年少了 5.05%。

为了描述流域景观类型间的转入、转出关系,生成 1985—2000 年、2000—2015 年和 1985—2015 年 3 个时段景观类型转移矩阵,并按照各景观类型转入与转出的面积与同时段流域所有景观类型转入、转出总面积的百分比绘制各时期景观类型转移面积百分比柱状图(图 3)。其中,面积转化比率大于 0 表示该景观由其他景观转入,面积转化率小于 0 表示该景观转为其他景观。

1985—2000 年,共有 2 537.62 hm² 的土地发生相互转换,其中,转入的面积以建设用地和耕地为主,分别占总的转入面积的 45.12%,30.70%,转出的面积主要为耕

地和林地,分别占转出面积的 51.70%,10.54%。研究区内,耕地和林地首先成为建设用地拓展的对象,耕地在

被建设用地侵占时,又以侵占林地作为补充,但整体上,耕地转出的面积大于耕地转入的面积。

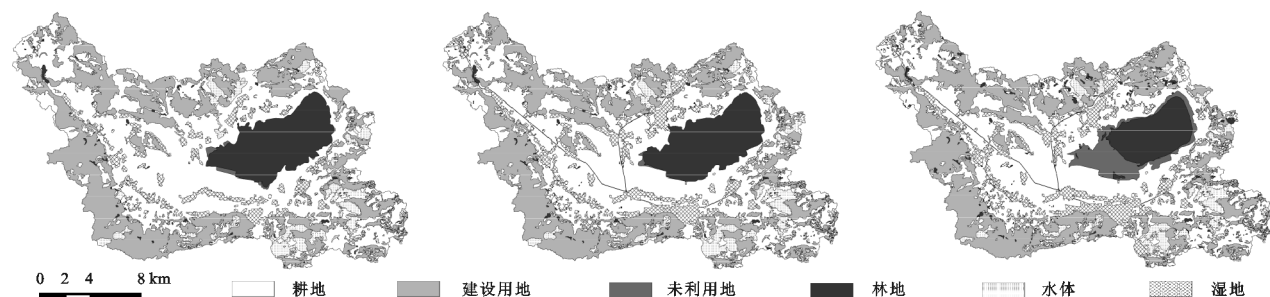


图2 杞麓湖流域不同时期土地利用解译结果

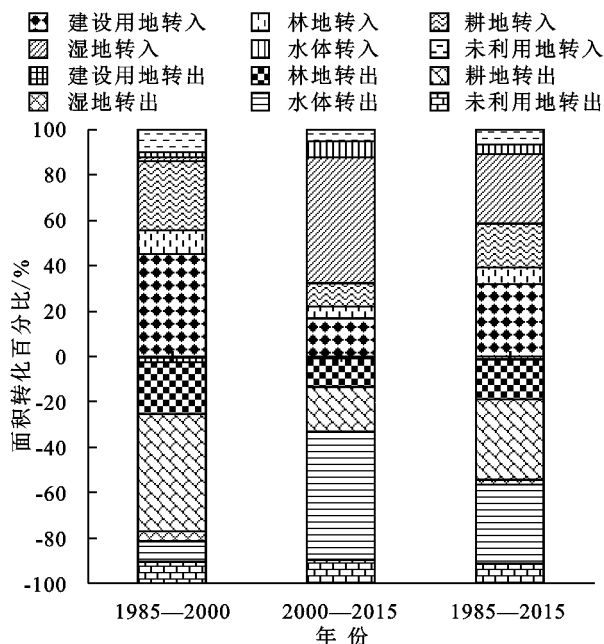


图3 杞麓湖流域景观类型转移面积百分比

2000—2015年,共有 2 577.4 hm²的土地发生相互转换,较前 15 a,各景观类型间相互转化的速率有所提升,其中,转入的面积以湿地和建设用地为主,分别占总的转入面积的 55.72%,16.80%,转出的面积以水体和耕地为主,分别占转出面积的 56.68%,19.64%。这主要是由于杞麓湖受云南省连续干旱的影响,湖面大面积缩减而转化为了湖滨滩涂湿地,建设用地持续侵占其他地类继续扩张。

1985—2015年,转入的面积建设用地>湿地>耕地>林地>未利用地>水体,而转出的面积耕地>水体>林地>未利用地>湿地>建设用地。整个过程中,建设用地和湿地主要表现为单向的转入变化,水体则以单向的转出变化为主,耕地、林地和未利用地表现为转入和转出均比较明显的双向转化特征。

2.2 景观指数变化分析

利用景观格局指数计算公式(表1),得出研究区近 30 a 土地利用景观格局变化情况(表2)。景观优势度指数用于描述景观中少数几个主要的景观类型的控制

作用,可以反映景观类型对整个景观的主导程度^[18]。研究表明,流域中林地和耕地的优势度明显较其他景观类型高,在整个景观中具有显著的主导地位,1985—2015年,两种景观类型的优势度小幅度减小,控制能力有所减弱。对于其他主导作用较弱的景观类型,建设用地景观优势度呈不断增加的趋势,湿地和未利用地景观优势度波动变化,水体的景观优势度持续减小。

景观破碎度指数多用于描述自然或人为的干扰对景观拼块的分割尺度,可反映出景观格局的复杂程度^[19]。分析表明,杞麓湖流域各时期景观类型的破碎度介于 0.001 3~0.057 2,景观破碎度<0.1,景观破碎程度整体偏低。其中,建设用地景观破碎度变化不大,林地和耕地景观破碎度先增加再减小,湿地景观破碎度持续减小,水体和未利用地景观破碎度显著增加。

景观分离度指数表征的是相同景观类型不同拼块间的离散分离程度^[20],流域中建设用地的分离度最低,仅为 0.000 7~0.001 1,湿地的分离度最高,达 12.450 3~15.481 1,流域内建设用地集中分布于流域湖盆的平原之中,随着社会发展及城镇化步伐的加快,建设用地的斑块逐渐联结,形成相互连通的大斑块,表现为建设用地分离度降低。

干扰度指数表示的是景观抵抗外界干扰的能力和自我恢复的能力,景观所受的干扰度越大,则景观的敏感性越强^[21]。通过模型计算可得,流域中不同景观类型干扰度特征差异较大,湿地干扰度最大,最大值为 4.657,未利用地和水体的干扰度次之,最大值分别为 2.814 8,2.341 5。林地、耕地和建设用地抵抗外界的能力相对较强,干扰度指数较低,最大值依次为 0.574 4,0.457,0.078 2。

2.3 景观生态风险的空间分异及其格局变化

2.3.1 采样小区生态风险时序变化 根据公式(1)计算得到 219 个生态风险采样小区的生态风险值,以生态风险采样小区的编号为横坐标,各生态风险采样

小区的生态风险值作为纵坐标,作生态风险分布散点图,结果如图4所示。研究表明,在1985年,杞麓湖流域的生态风险介于0.260 6~1.947 0,均值为0.957 8;2000年的生态风险介于0.371 3~1.998 6,均值为0.964 3,2015年生态风险指数值介于0.207 5~1.996 9,均值为1.013 9。3个时期,样区景观生态风险值介于0.5~1.0的个数依次为159,148,133个,生态风险大于1.0的采样小区个数递增,分别为58,62,76个。流域景观生态趋于恶化。

表2 杞麓湖流域1985年、2000年、2015年景观格局指数					
景观类型	年份	优势度	破碎度	分离度	干扰度
建设用地	1985	0.2080	0.0465	0.0011	0.0649
	2000	0.2543	0.0479	0.0010	0.0748
	2015	0.2737	0.0469	0.0007	0.0782
林地	1985	0.4117	0.0080	1.5540	0.5525
	2000	0.4161	0.0139	1.5950	0.5687
	2015	0.4072	0.0129	1.6216	0.5744
耕地	1985	0.5115	0.0072	1.1179	0.4413
	2000	0.5162	0.0134	1.1546	0.4563
	2015	0.4987	0.0113	1.1720	0.4570
湿地	1985	0.0128	0.0350	13.0000	3.9201
	2000	0.0055	0.0232	15.4811	4.6570
	2015	0.0561	0.0013	12.4505	3.7470
水体	1985	0.2022	0.0151	4.7265	1.4659
	2000	0.1901	0.0222	4.9558	1.5359
	2015	0.1745	0.0572	7.5932	2.3415
未利用地	1985	0.1609	0.0312	8.7347	2.6682
	2000	0.1656	0.0425	8.6598	2.6523
	2015	0.1626	0.0447	9.1996	2.8148

2.3.2 时空演变特征 用生态风险采样小区的中心点来代表该风险小区的生态风险值,采用 Kriging 插值法得到杞麓湖流域生态风险插值结果,随后用Natural

Breaks 断点法对其进行重分类,共划分为5个生态风险等级,分别为低(生态风险 $\leq 0.807\ 3$)、较低($0.807\ 3 <$ 生态风险 $\leq 0.882\ 9$)、中($0.882\ 9 <$ 生态风险 $\leq 1.429\ 6$)、较高($1.429\ 6 <$ 生态风险 $\leq 1.689\ 5$)、高(生态风险 $> 1.689\ 5$),结果如图5所示。

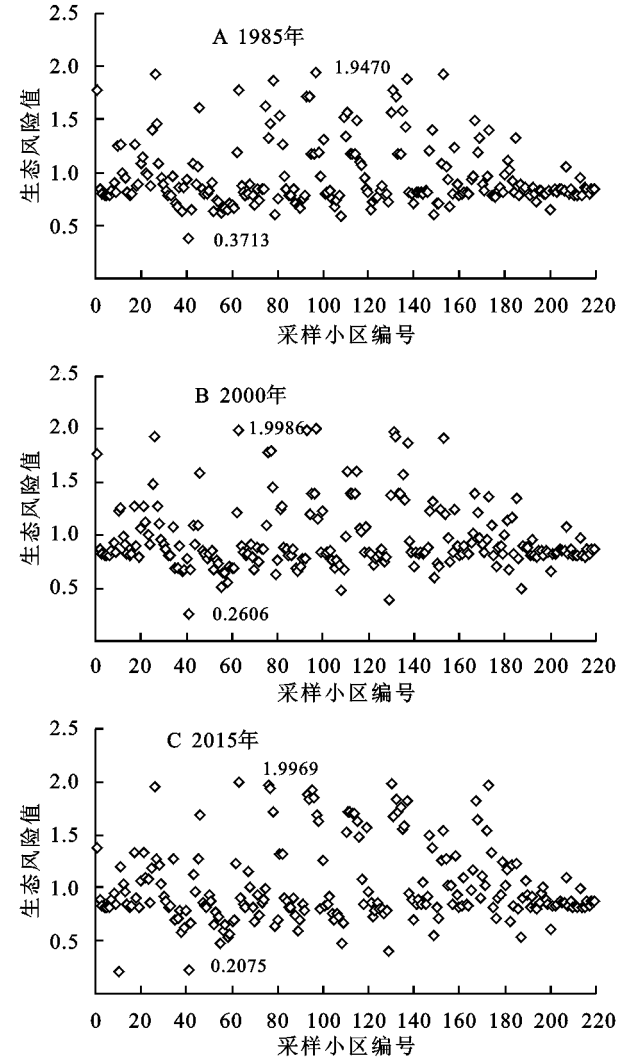


图4 生态风险采样小区计算结果

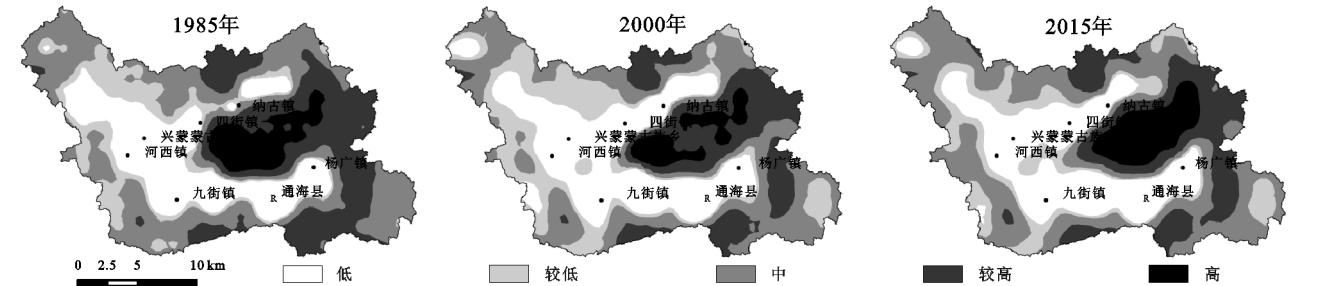


图5 杞麓湖流域生态风险空间分布

研究表明,杞麓湖流域生态风险空间分布一定程度上体现了流域景观结构的分布规律,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湖盆的平原上,该区域为景观优势明显的连片耕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,1985—2015年,受其

他风险等级的胁迫,低生态风险以城镇为中心逐渐萎缩;较低生态风险主要分布在湖盆外边缘以及环杞麓湖一带,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。1985—2015年,较低生态风险的分布有向平原蔓延的趋势;中生态风险主要分布于流域四周的

山区地带,该区域海拔相对较高,有较多的破碎化林地和坑塘镶嵌其中,这些景观的自身的稳定性较差,生态系统相对脆弱;较高生态风险分布最为零散,主要分布在环杞麓湖周围、纳古镇的北部和杨广镇的东南部,这些区域地势较低,景观类型以湿地和未利用地为主,人类干扰强度较大。1985—2015年,流域西部较高生态风险明显增多,今后应重点防范;高生态风险区域主要位于杞麓湖,由于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^[17],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。

由图6可知,杞麓湖流域较低生态风险为主,低生态风险和高生态风险次之。流域的生态总体向更高等级生态风险转化。主要表现为:低生态风险面积所占比率减少,其所占比率由22.51%减少到21.75%,面积共减少了286.2 hm²;低生态风险和中生态风险主要转化为较低生态风险,表现为较低生态风险面积比率显著增加,由26.75%增加至35.09%,面积累计增加3 124.2 hm²;中生态风险面积比率由25.73%降低到23.82%;较高生态风险向更高等级的高生态风险转化,表现为较高生态风险面积持续减少,其所占比率由1985年的15.39%降低至2015年的8.53%;高生态风险面积所占比率由1985年的9.6%增加至2015年的10.81%,面积总共增加了450 hm²。从各个等级的生态风险转化趋势可以得出,今后应重点关注湖盆平原及环杞麓湖周围湿地的治理,避免高破碎化的发生而使低和较高生态风险向更高等级风险转化。

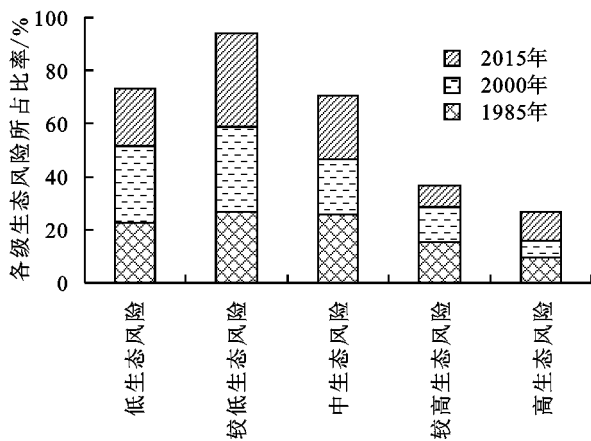


图6 1985年、2000年、2015年各级生态风险面积所占比率

3 结论

(1) 流域景观结构类型相互转化过程频繁且复杂。1985—2000年,共有2 537.62 hm²的土地发生相互转换,其中,转入的面积以建设用地和耕地为主,转出的面积主要为耕地和林地,2000—2015年,共有

2 577.4 hm²的土地发生相互转换,转入的面积以湿地和建设用地为主,转出的面积以水体和耕地为主。对于整个过程而言,建设用地、湿地和水体表现为单向转化,而耕地、林地和未利用地为双向转化。

(2) 在整个景观中林地和耕地具有显著的主导地,景观优势度明显。流域景观破碎度 <0.1 ,景观破碎化程度较低,其中建设用地的景观破碎度最高,随着流域不断向城镇化迈进,其分离度逐渐降低。流域中不同景观类型干扰度特征差异较大,湿地干扰度最大,未利用地和水体的干扰度次之,而林地、耕地和建设干扰度指数相对较低。

(3) 生态风险采样计算结果表明,1985—2015年,流域生态风险均值分别为0.957 8,0.964 3,1.013 9,多数样区的生态风险值介于0.5~1.0,随着时间的演进,生态风险值大于1.0的样区个数逐渐增加,流域生态压力增大。

(4) 研究发现,流域以较低生态风险为主,低生态风险和较高生态风险有向更高等级的生态风险转化的趋势,今后应重点防范。流域景观生态风险表现出明显的区域性和异质性,在一定程度上表达了流域的景观结构特征。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湖盆的平原上,高生态风险仅分布于杞麓湖一带,较高生态风险分布最为零散,较低和中生态风险主要绕湖盆和湖泊分布。

参考文献:

- [1] 宋长青,杨桂山,冷疏影.湖泊及流域科学研究进展与展望[J].湖泊科学,2002,14(4):3-14.
- [2] 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.
- [3] 许妍,高俊峰,赵家虎,等.流域生态风险评价研究进展[J].生态学报,2012,32(1):284-292.
- [4] Chen P, Pan X L. Ecological risk analysis of regional landscape in inland river watershed of arid area: a case study of Sangong River Basin in Fukang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003,22(4):116-120.
- [5] 刘世梁,刘琦,张兆苓,等.云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析[J].生态学报,2014,34(13):3728-3734.
- [6] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.
- [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.
- [8] 张月,张飞,周梅,等.干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J].应用生态学报,2016,27(1):233-242.
- [9] 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,2016,35(3):791-799.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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(S1):345-351.

[14] 任金铜,莫世江,陈群利,等.贵州夹岩水利枢纽区域景观生态风险评价研究[J].环境科学与技术,2018,41(4):182-189.

[15] 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.

[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.

[17] 邬建国.景观生态学:概念与理论[J].生态学杂志,2000,19(1):42-52.

[18] 张月,张飞,王娟,等.基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评价及预测研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3465-3474.

[19] 巩杰,谢余初,赵彩霞,等.甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J].中国环境科学,2014,34(8):2153-2160.

[20] 孙广友,田卫,贾志国,等.松原灌区建设对查干湖生态风险分析及对策[J].湖泊科学,2014,26(1):66-73.

[21] 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.

(上接第 204 页)

[21] 任正超,朱华忠,柳小妮.年际尺度上土地覆盖类型时空分异及其对气候和地形的响应[J].农业工程学报,2012,28(15):205-214.

[22] 任正超,朱华忠,史华,等.中国潜在自然植被 NPP 时空分布格局变化及其对气候和地形的响应[J].草地学报,2017,25(3):474-485.

[23] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.

[24] 邓舒雨,董向忠,马明哲,等.基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效[J].生物多样性,2018,26(1):27-35.

[25] 崔林丽,史军,肖风劲.气候要素及 El Niño/La Niña 事件对中国陆地 NPP 变化的影响[J].地理学报,2018,73(1):54-66.

(上接第 218 页)

[14] 张铎,吴中海,李家存,等.滇西北永胜—宾川地区滑坡发育的影响因子分析及其动力成因与意义探讨[J].自然灾害学报,2016,25(1):176-190.

[15] 王德耀,杜忠潮,张满社.陕西省泾阳南塬崩塌、滑坡地质灾害及成因分析[J].水土保持通报,2004,24(4):34-37.

[16] 戴福初,李军.地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J].地质科技情报,2000,19(1):91-96.

[17] 胡最,汤国安,闫国年.GIS 作为新一代地理学语言的特征[J].地理学报,2012,67(7):867-877.

[18] 王亚强,王兰民,张小曳.GIS 支持下的黄土高原地震滑坡区划研究[J].地理科学,2004,24(2):170-176.

[19] 王萌,乔建平.基于 GIS 的沐川县滑坡危险度区划[J].自然灾害学报,2009,18(1):174-179.

[20] 白世彪,闫国年,盛业华,等.基于 GIS 的长江三峡库区滑坡影响因子分析[J].山地学报,2005,23(1):63-70.

[21] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J].工程地质学报,2009,17(1):19-28.

[22] 王帅,王深法,俞建强.构造活动与地质灾害的相关性:浙西南山地滑坡、崩塌、泥石流的分布规律[J].山地学报,2002,20(1):47-52.

[23] 曾琳洁,张涛,冯文凯.河南南召县地质灾害形成条件与分布规律[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):82-89.