

滇西北高原湖泊剑湖流域景观时空演变特征

郭玉静¹, 王妍², 郑毅¹, 刘云根³, 闻国静³, 展鹏飞¹

(1. 西南林业大学 国家高原湿地研究中心/湿地学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 石漠化研究院, 云南 昆明 650224; 3. 西南林业大学 生态与水土保持学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 为深入了解流域景观演变规律并有效保护高原湖泊, 以滇西北剑湖流域为研究对象, 基于 1990–2015 年 6 期剑湖流域以及 1974–2015 年 8 期剑湖湖泊 Landsat 影像数据, 在 Arc GIS 平台下采用 Fragstats 计算景观指数, 并运用 SPSS 分析流域景观格局与剑湖景观形状的相关性。结果表明: ①25 a 间剑湖流域的建设用地和耕地呈增加趋势, 分别增加了 1 269.27 和 1 038.42 hm², 水域和未利用地显著减少, 分别减少了 93.51 和 2 664.99 hm², 林地面积变化幅度不大, 增加了 450.81 hm²; ②景观水平斑块个数、斑块密度和蔓延度指数增加, 分别增加了 193 个、0.09 和 0.60, 景观多样性指数降低了 0.05; ③剑湖湖泊面积整体呈递减趋势, 从 1974 年的 504.47 hm² 减少到 2015 年的 451.72 hm²; 剑湖景观形状指数越来越复杂, 金龙河入湖口形状变化尤其剧烈; 剑湖湖泊质心向西南偏移, 1974–2015 年偏移了 113.92 m。表明: 剑湖流域 25 a 间景观破碎化程度和景观蔓延度不断增加, 泥沙淤积、围湖造田等人类活动对剑湖景观的演变起主要作用, 流域景观格局的演变影响湖泊形状及质心的变化。图 5 表 4 参 29

关键词: 景观生态学; 剑湖流域; 景观格局; 时空演变; 质心变化

中图分类号: S756 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2018)04-0695-10

Temporal and spatial evolution of landscapes in Jianhu Lake Basin of northwestern Yunnan Province

GUO Yujing¹, WANG Yan², ZHENG Yi¹, LIU Yungen³, WEN Guojing³, ZHAN Pengfei¹

(1. National Plateau Wetlands Research Center/College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Research Institute of Stony Desertification, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: To better understand the evolution of basin landscapes and to protect plateau lakes effectively, Jianhu Lake Basin in northwestern Yunnan Province was chosen as a study area. Based on data from six Landsat images for Jianhu Basin from 1990 to 2015 and data from eight Landsat images for Jianhu Lake from 1974 to 2015, several landscape indices with Fragstats using Arc GIS operational platforms were calculated and SPSS software was used to analyze the relationship between landscape patterns and landscape shapes of Jianhu Lake. Results showed that (1) in the 25 years from 1990 to 2015, significant increases in building and arable land areas, and significant decreases in water areas and unused land areas occurred; whereas, changes in forest land areas were small. Among these changes, water areas decreased 93.51 hm² and unused land areas decreased 2 664.99 hm². Arable land areas increased 1 038.42 hm², forest land areas increased 450.81 hm², and residential lands increased 1 269.27 hm². (2) Also, in the 25 years from 1990 to 2015, landscape indices, such as number of patches, patch density, and contagion index, increased separately 193, 0.09 and 0.60, but Shannon's Diversity Index decreased 0.05. (3) Overall, the water bodies of Jianhu Lake Basin from 504.47 hm² in 1974 to

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31560237, 31760245, 31660236)

作者简介: 郭玉静, 从事湿地生态修复研究工作。E-mail: 15100317358@163.com。通信作者: 郑毅, 教授, 博士生导师, 从事土壤与植物营养研究。E-mail: zhengyi-64@163.com

451.72 hm² in 2015. Landscape shapes in the Jianhu Lake Basin have become more complex, in particular, the river mouth shape of the Jinlong River has drastically changed. From 1974 to 2015 the centroid of Jianhu Lake Basin has also shifted to the southwest by 113.92 m. This work showing degree of landscape fragmentation and contagion levels as well as the effect of human activities, such as land reclamation from the lake and acquiring building land around the lake, could provide a theoretical basis for basin landscape optimization and scientific protection of the Jianhu Lake Basin. [Ch, 5 fig. 4 tab. 29 ref.]

Key words: landscape ecology; Jianhu Lake Basin; landscape pattern; temporal and spatial evolution; change in centroid

流域景观格局是流域范围内自然与人类社会活动相互作用、相互影响的陆地生态系统的基本单元，是流域内各类斑块以一定规律镶嵌组合而成的具有一定结构和功能的有机体^[1-2]。对流域景观格局的研究有助于了解景观格局与自然、生态过程以及社会经济活动之间的关系。目前，流域景观格局的研究已受到国内外广泛关注，研究内容主要集中在流域景观格局及其动态变化^[3]、流域景观格局变化对流域水文过程^[4-5]、非点源污染过程^[6-7]、水质^[8-9]、植被^[10]、生态风险^[11-12]等的影响。流域景观格局动态变化的研究对流域内景观调控和流域综合治理具有重要理论和现实意义，因此，开展剑湖流域景观格局的研究对流域的土地利用规划具有重要意义。景观质心的迁移变化能够很好地从空间上描述景观类型的时空演变特征。通过了解各研究时段的景观质心，可以发现景观空间变化趋势^[13]。景观质心变化已经应用在沙漠化土地变迁^[14]和海岸生态景观迁移^[15]等。当前在景观格局演变质心变化的研究中，方仁建等^[16]研究了围垦活动影响下海滨地区景观质心移动的特征；张华兵等^[17]开展了海岸湿地景观质心变化趋势的研究；宫兆宁等^[18]分析了不同湿地类型空间质心的变化等，李磊等^[19]采用湖泊面积动态度和质心偏移模型分析了艾比湖的动态变化。这些景观质心的研究集中在大范围的景观类型或湿地类型以及特定景观斑块的质心变化，从景观空间角度探讨剑湖湖泊质心变化鲜有报道。本研究以滇西北剑湖流域为研究对象，采用1990–2015年的遥感影像来揭示25 a间剑湖流域景观格局动态变化特征，采用1974–2015年的影像来探析近40 a剑湖湖泊的质心迁移规律和原因，以期为剑湖及其流域的合理利用和可持续发展提供科学依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

剑湖位于滇西北剑川县城东南部(26°28'N, 99°55'E)，距县城4.5 km，海拔为2 186 m，属云南高原湖泊重要湿地类型。剑湖流域气候受印度洋季风气候影响，属南温带冬干夏湿季风气候类型，干湿两季分明，年温差小，日温差大，多年平均气温为12.3 °C，多年平均降水量为724.4 mm。

剑湖流域属澜沧江水系，是以断层冲积为主的侵蚀构造型湖泊，流域面积为5.113 × 10⁴ hm²。剑湖湖泊入湖河流有永丰河、金龙河、漾江(原称格美江)、回龙河、狮河等。湖内有4处地下涌泉，湖水从海尾河出水口流经黑惠江、漾濞江后再汇入澜沧江。剑湖流域具有丰富的物种资源，是候鸟越冬的重要迁徙通道、停歇地或中转地以及夏候鸟的繁殖地。

1.2 数据获取与分类

采用的遥感影像数据为1974年和1977年2月的Landsat-MSS影像(栅格大小70 m × 70 m)和1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015年2月的Landsat-TM影像(栅格大小为30 m × 30 m)。选择2月遥感数据是由于在旱季剑湖水位能够保持相对稳定，不会受雨季降水丰沛程度的影响，有利于不同年度之间剑湖湖泊面积变化的比较分析。对遥感影像进行几何校正、影像拼接、数据融合、波段组合、影像增强和影像剪切等处理，并参照研究区地形图、森林资源调查资料和文献资料等相关地理数据以及野外详细调查所建立的野外判读标志，依据GB/T 21010–2007《土地利用现状分类》，将土地分类系统划分为耕地、林地、水域、建设用地和未利用地，其中将火烧迹地，宜林荒山荒地和草地(包括牧地和苗圃地)划分到未利用地，水库、湿地、河流和湖泊划分到水域(图1)，按照上述分类系统使用目视解译法获得6期剑湖流域景观类型的矢量数据。

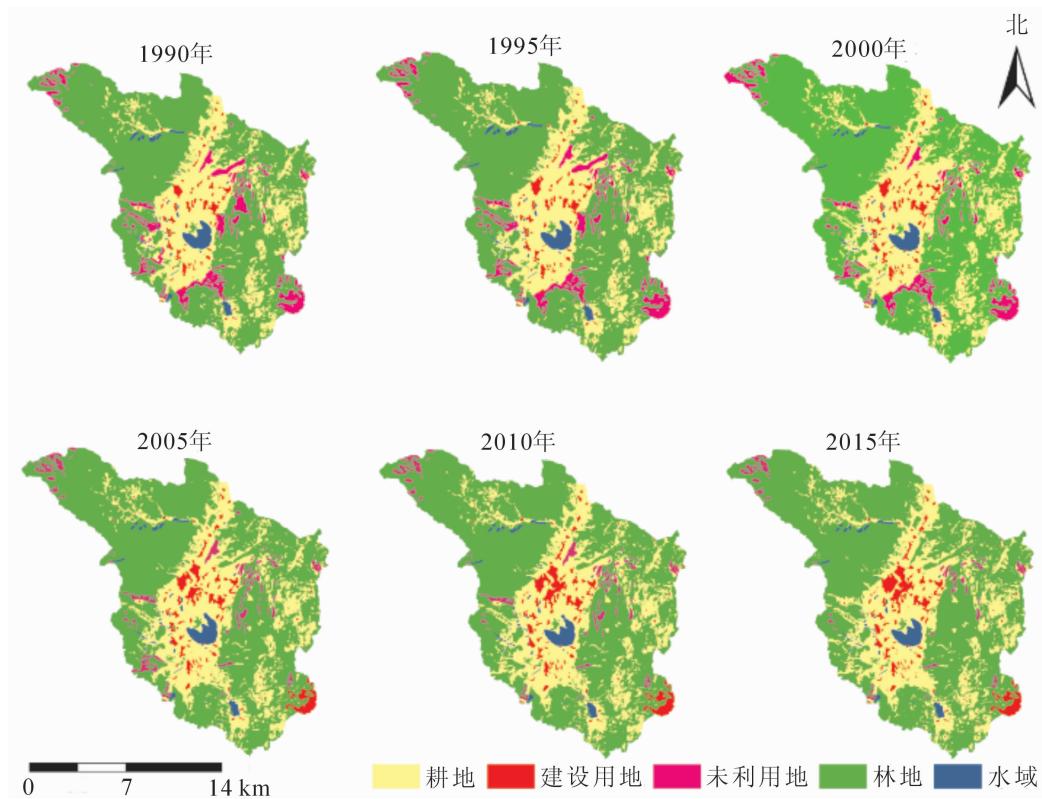


图 1 1990–2015 年剑湖流域景观类型

Figure 1 Landscape types of Jianhu Lake Basin in 1990–2015

1.3 景观格局指数选取与质心量测

景观格局指数能够度量流域景观格局，并从不同尺度上反映特定区域景观异质性^[20]。为揭示剑湖流域景观格局动态变化及剑湖湖泊面积和湖泊质心的变化规律，剑湖流域景观结构特征分析选用了类型水平的景观类型面积(A_c)和景观类型百分比(D_{PLAN})，剑湖流域景观格局特征分析选用了景观水平的景观多样性指数(I_{SHD})，景观聚集度指数(I_c)，斑块个数(N_p)和斑块密度(D_p)，剑湖景观形状变化选用了斑块水平的形状指数(I_{SHAPE})和分维数(C_{FRA})共 8 个指标进行分析，景观指数的计算通过 Fragstats 3.4 完成^[21](表 1)。景观质心分析主要用于研究各类景观的动态变化，通过计算景观质心分析景观格局的空间变化规律和趋势。其公式如下：

$$x_t = \sum_{i=1}^N (C_{ia} \times x_i) / \sum_{i=1}^N C_{ia}; \quad (1)$$

$$y_t = \sum_{i=1}^N (C_{ia} \times y_i) / \sum_{i=1}^N C_{ia}. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中： x_t 和 y_t 分别表示第 t 年湖泊分布质心的经度和纬度坐标； C_{ia} 表示第 t 年第 a 个湖泊斑块的面积； x_i 和 y_i 分别表示第 a 个湖泊斑块的经度和纬度坐标^[22]。

2 结果与分析

2.1 剑湖流域景观结构特征分析

研究结果表明：1990–2015 年 25 a 间林地面积变化幅度不大，建设用地和耕地面积大幅度增加，水域和未利用地面积显著减少。1990–2000 年建设用地和耕地的增加幅度比 2005–2015 年较大，1990–2000 年水域面积的减少比 2005–2015 年快，而未利用地面积在 2005–2015 年减少很快。由表 2 可以看出：剑湖流域景观要素类型以林地和耕地为主，这 2 种景观类型面积占整个研究区总面积的 90% 左右，其中又以林地面积最大，1990–2015 年林地面积均占研究区总面积 60% 以上，其次是耕地，占研究区总面积的 24% 以上。这种特征决定了该区以农林生产为主的特点，建设用地、水域、未利用地景观类型相

表1 各景观指数说明

Table 1 Landscape index description

景观指数	公式	说明
斑块个数(N_p)	N_p N_p 为所有斑块的数目	指某一景观或斑块类型中所有的相关斑块数目, 反映斑块破碎程度
景观类型面积(A_c)	$A_c = \sum_{j=1}^n a_j (\frac{1}{10000})$ i 为斑块类型, $j=1, \dots, n$ 为斑块数目, a_j 为斑块 j 的面积	$A_c > 0$, A_c 等于某一斑块类型中所有斑块的面积之和, 用于描述景观的组成结构。通过各景观要素的面积, 可以分析景观的组成成分以及各成分所占的地位
景观类型百分比(D_{PLAND})	$D_{PLAND} = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{A} \times 100$ a_i 是第 j 个 i 类型斑块面积, m 为斑块类型数, A 是景观总面积	某一斑块类型面积占整个景观面积百分比。其值趋于0时, 说明景观中此斑块类型变得稀少; 等于100时, 说明整个景观只有1类斑块组成
斑块密度(D_p)	$D_p = \frac{N_i}{A}$ N_i 为景观中斑块类型 i 所包含的斑块数量, A 是景观总面积	指每平方千米(即 100 hm^2)的斑块数。斑块密度的大小, 直接反映景观的破碎程度。取值范围: $D_p > 0$, 无上限
平均斑块面积(S_{MP})	$S_{MP} = \frac{A}{N} \times 10^6$ A 是景观总面积, N 为斑块数目	$S_{MP} > 0$, 无上限。用于描述景观粒度, 在一定意义上揭示景观破碎化程度
蔓延度指数(I_c)	$I_c = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[\ln P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln m} \times 100$ P_i 为指斑块类型在景观中的面积比重, g_{ik} 为基于双倍法的斑块类型 i 和斑块类型 k 之间的节点数; m 是景观中的斑块类型数, 包括景观边界中的斑块类型	蔓延度指数是用于测量景观是否由多种要素聚集分布的指标(%), 范围: $0 \leq I_c \leq 100$, 指数较高, 说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连接性; 反之则表明景观是具有多种要素的密集格局, 景观的破碎化程度较高
景观多样性指数(I_{SHD})	$I_{SHD} = - \sum_{i=1}^m P_i \times \ln P_i$ P_i 是景观类型 i 所占面积的比例; n 为景观类型的数目	每一斑块类型所占景观总面积的比例乘以其对数, 然后求和, 取负值。取值范围: $I_{SHD} \geq 0$, 无上限。当景观中只有1种斑块类型时, $I_{SHD}=0$ 。当斑块类型增加或各类型斑块所占面积比例趋于相似时, I_{SHD} 也相应增加
斑块形状指数(I_{SHAPE})	$I_{SHAPE} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$ P 是斑块周长, A 是斑块面积	斑块的形状越复杂或越扁长, I_{SHAPE} 就越大
分维数(C_{FRA})	$P = kA^{C_{FRA}/2}$, $C_{FRA} = 2\ln \frac{P}{k} / \ln A$, $C_{FRA} = 2s$ P 是斑块的周长, A 是斑块的面积, C_{FRA} 是分维数, k 是常数, s 是对景观中所有斑块的周长和面积的对数回归而产生的斜率	分维数反映了所研究景观不同尺度的特征

对较少, 面积均占研究区总面积的5%以下。

1990–2000年是景观结构变化最大的时段, 建设用地、耕地和水域在这10 a间变化幅度最大。1990–2000年和2005–2015年建设用地面积分别增加了22.57%和12.83%。耕地面积在1990–2000年和2005–2015年分别增加了2.87%和2.26%, 主要是人口增加开垦未利用地以及围湖造田导致的结果。水域面积在1990–2000年和2005–2015年分别减少了9.26%和3.39%, 水域面积由1990年的850.77 hm^2 降至2015年的757.26 hm^2 , 水域面积减少了93.51 hm^2 。这是因为泥沙淤积、围湖造田、围湖建塘和湖滩开发导致水域面积减少。未利用地面积在1990–2000年和2005–2015年分别减少了20.93%和48.60%, 未利用地面积由1990年的3 368.97 hm^2 降至2015年的703.98 hm^2 , 未利用地面积减少了2 664.99 hm^2 。

显著减少的原因是建设用地和耕地占用了大面积的未利用地。从各类景观所占地区面积的百分比看, 林地最大, 其后依次是耕地、建设用地、未利用地, 水域最小, 说明研究区景观以林地为主, 森林覆盖率高, 水资源含量较少, 林地面积占总体景观一半以上。

表2 剑湖流域各类景观类型面积

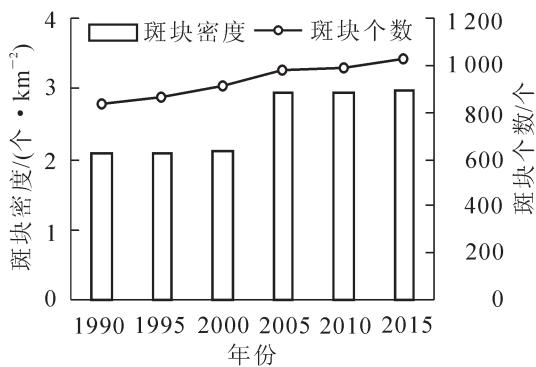
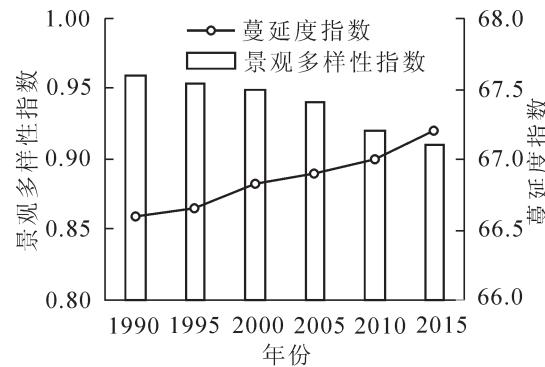
Table 2 Area of different types of landscapes in Jianhu Lake Basin

景观类型	1990		1995		2000	
	面积(C_A)/hm ²	百分比(D_{PLAN})/%	面积(C_A)/hm ²	百分比(D_{PLAN})/%	面积(C_A)/hm ²	百分比(D_{PLAN})/%
建设用地	1 120.68	2.19	1 180.08	2.31	1 373.67	2.69
林地	33 036.21	64.61	33 192.63	64.92	33 201.18	64.93
耕地	12 754.08	24.94	12 813.21	25.06	13 119.84	25.66
水域	850.77	1.66	837.54	1.64	772.02	1.51
未利用地	3 368.97	6.59	3 107.25	6.08	2 664.00	5.21
合计	51 131.21	100.00	51 131.21	100.00	51 131.21	100.00
景观类型	2005		2010		2015	
	面积(C_A)/hm ²	百分比(D_{PLAN})/%	面积(C_A)/hm ²	百分比(D_{PLAN})/%	面积(C_A)/hm ²	百分比(D_{PLAN})/%
建设用地	2 118.15	4.14	2 267.19	4.43	2 389.95	4.67
林地	33 371.01	65.27	33 376.59	65.28	33 487.02	65.49
耕地	13 488.12	26.38	13 580.37	26.56	13 792.50	26.98
水域	783.81	1.53	775.62	1.52	757.26	1.48
未利用地	1 369.62	2.68	1 130.94	2.21	703.98	1.38
合计	51 131.21	100.00	51 131.21	100.00	51 131.21	100.00

2.2 剑湖流域景观格局特征分析

斑块密度和斑块个数是景观水平上破碎化程度的直观表现。研究结果表明: 剑湖流域的斑块个数(N_p)在1990–2000年和2005–2015年分别增加了9.51%和4.38%, 相应的斑块密度(D_p)在1990–2000年和2005–2015年分别增加了0.48%和1.71%, 斑块个数和斑块密度都是在1990–2000年变化较快, 在2005–2015年变化较慢。由图2可以看出: 斑块个数从1990年的831个增至2015年的1 024个, 斑块数量增加了23.23%, 斑块密度从1990年的2.09增至2015年的2.98, 表明25 a间剑湖流域景观水平斑块个数和斑块密度都在增加, 而平均斑块面积(S_{MP})从1990年的61.53 hm²降至2015年的49.93 hm²。这一结果可在一定程度上说明剑湖流域景观破碎化程度逐步增加。

蔓延度指数(I_c)描述的是景观中不同类型斑块的团聚程度, 其值越大表明景观由少数团聚的大斑块组成, 越小则为许多分散的小斑块组成。研究表明1990–2015年剑湖流域聚集度指数逐渐增加(图3), 1990–2000年蔓延度指数值增加了0.35%, 2005–2015年蔓延度指数值增加了0.45%。由图3可以看出: 蔓延度指数从1990年的66.60增至2015年的67.20, 表明剑湖流域景观中某种优势拼块类型形成了良好的连接性, 说明剑湖流域多由大的景观斑块所组成。这对于剑湖流域整个生态环境维护具有重要

图2 1990–2015年剑湖流域 D_p 和 N_p 变化趋势Figure 2 Trend of D_p and N_p of Jianhu Lake Basin in 1990–2015图3 1990–2015年剑湖流域 I_{SHD} 和 I_c 变化趋势Figure 3 Trend of I_{SHD} and I_c of Jianhu Lake Basin in 1990–2015

作用。

景观多样性指数(I_{SHD})反映的是景观要素的多少及各景观要素所占比例的变化情况。研究表明景观多样性指数逐年降低,1990—2000年景观多样性指数下降了1.00%,2005—2015年景观多样性指数下降了3.19%(图3)。1990年时剑湖流域的多样性指数最大,表明1990年的土地利用景观丰富度和复杂度要高于其他4个时段,主要是由于该时期存在开荒与退耕并存的现象,不同景观要素之间转换较为频繁。景观多样性指数从1990年的0.96降至2015年的0.91,说明剑湖流域景观多样性丰富程度和景观异质性程度逐渐降低。

2.3 剑湖景观形状及质心变化分析

剑湖湖泊只有1个斑块,为揭示剑湖景观形状演变规律,选取类型水平的面积(A_c)和斑块水平指数的斑块形状指数(I_{SHAPE})和分维数(C_{FRA})等3个常用的景观指数(表3)。

表3 剑湖流域景观指数列表

Table 3 List of landscape index of Jianhu Lake Basin

年份	景观面积/ hm^2	形状指数	分维数	年份	景观面积/ hm^2	形状指数	分维数
1974	504.47	1.500 0	1.052 8	2000	459.48	1.602 4	1.061 7
1977	484.48	1.503 4	1.053 3	2005	460.19	1.659 7	1.066 9
1990	470.42	1.558 2	1.058 2	2010	456.12	1.662 3	1.067 0
1995	460.57	1.601 4	1.061 4	2015	451.72	1.669 6	1.067 1

2.3.1 剑湖面积时空变化规律 利用1974—2015年8期影像的剑湖湖泊矢量数据统计得到剑湖面积(表3)。1974—1995年剑湖面积减少了8.70%,2000—2015年剑湖面积减少了1.69%,前一阶段比后一阶段减少速度快。从1974—2015年剑湖面积减少了10.46%,减少的平均速率为0.26%,且呈先减少后增加,再减少的趋势,其中在2000—2005年面积有所增加,增加了4.07 hm^2 。这可能与当地实施的政策有关,2001年剑湖自然保护区晋升为州级自然保护区,“退(耕)田还湖”和“退塘还湖”等措施在一定程度上有效地保护了剑湖。

2.3.2 剑湖轮廓变化规律 分维度指数和斑块形状指数都是度量斑块形状的复杂程度,值越高表明形状越复杂。1974—2015年剑湖的形状指数(I_{SHAPE})和分维数(C_{FRA})值虽然增加不大,但总趋势是增加的。结合图4中1974—1995年图的形状比较相似,2000年起金龙河入湖口的形状发生了较大变化,2000—2015年图的形状又比较相似,这与形状指数和分维数值反映的情况是一致的。1974—2015年,形状指数和分维数值逐渐增大,分别从1.500 0和1.052 8增至1.669 6和1.067 1。1974—2015年剑湖斑块形状越来越复杂,西部入湖河流入湖口形状变化尤为明显,尤其是金龙河入湖口形状变化剧烈;湖泊东面地势较高且无入湖河流,因此湖泊东面萎缩较少,形状变化不明显。

2.3.3 剑湖湖泊质心变化规律 质心是描述地理对象空间分布的重要指标,其可以跟踪土地类型等某些地理分布的变化。研究表明,剑湖湖泊质心从1974—2015年总体向西南偏移了113.92 m,可以分为2个时期:1974—2005年每个阶段偏移速度较快和2005—2015年每个阶段偏移速度较慢(图5)。1974—2005年这段时间偏移速度较快,向西南偏移了126.09 m,平均偏移 $4.07 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2005—2010年和2010—2015年这2个阶段偏移速度较慢,分别向西南偏移5.14和6.90 m,平均分别偏移1.03和1.38 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.4 流域景观格局演变特征与剑湖景观形状演变的关联性

表4表明:流域景观指数斑块密度(D_p),斑块个数(N_p)与剑湖景观形状指数(I_{SHAPE})和分维数(C_{FRA})显著正相关($P<0.01$),蔓延度指数(I_c)也与剑湖景观形状指数(I_{SHAPE})和分维数(C_{FRA})显著正相关($P<0.05$),多样性指数(I_{SHD})与剑湖景观形状指数显著负相关($P<0.05$)。建设用地面积、林地面积、耕地面积与剑湖景观形状指数显著正相关($P<0.01$),未利用地面积与之显著负相关($P<0.01$)。流域内的水域面积与剑湖景观形状指数 I_{SHAPE} 呈显著负相关($P<0.05$),剑湖湖泊面积与剑湖景观形状指数和分维数均呈显著负相关($P<0.05$),与文中前面的分析结果是一致的,即1974—2015年剑湖湖泊面积逐渐减小,剑湖景观形状指数呈逐渐增加趋势。而水域面积与分维数负相关较大,但未达到显著性水平,原因可能为流域水域面积较大,包括剑湖湖泊、水库、湿地和河流,且人为干扰因素较大,这有待于进一步研

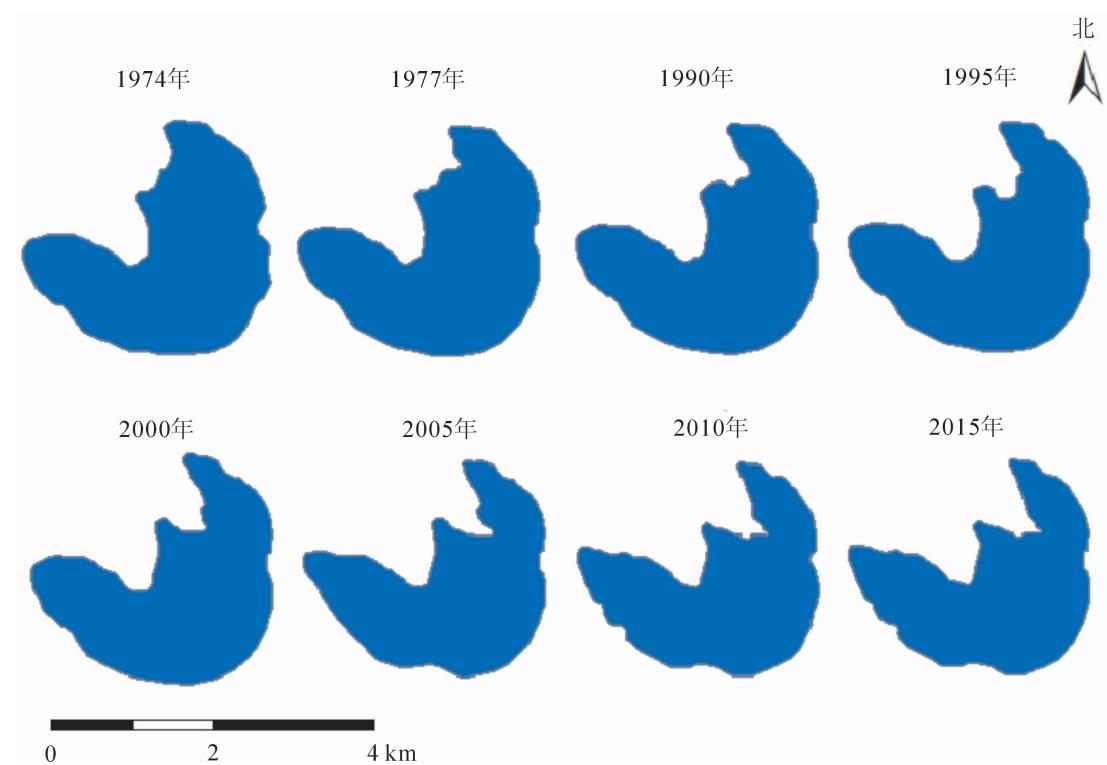


图 4 1974–2015 年剑湖湖泊 8 个时段轮廓变化
Figure 4 Outlines changes of 8 periods of Jianhu Lake in 1974–2015

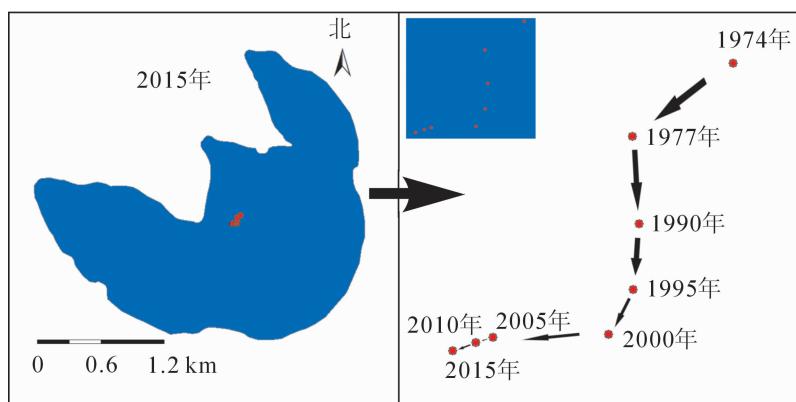


图 5 1974–2015 年剑湖湖泊的质心变化
Figure 5 Change in centroid of Jianhu Lake in 1974–2015

究。可见, 剑湖流域景观格局指数对剑湖景观形状指数有着显著影响(表 4), 而剑湖形状的变化(湖泊萎缩)又影响着湖泊质心的迁移, 因此流域景观格局的演变对湖泊形状及质心的变化有着潜移默化的影响。

3 结论与讨论

1990–2015 年林地面积变化幅度不大, 建设用地和耕地面积大幅度增加, 水域和未利用地面积显著减少。25 a 间剑湖流域的景观破碎化和景观聚集程度逐渐增加, 景观多样性指数逐渐下降。1974–2015 年的近 40 a 剑湖湖泊面积整体上呈递减趋势, 由 1974 年的 504.47 hm² 减少到 2015 年的 451.72 hm², 湖泊质心偏移了 113.92 m。流域景观格局的演变影响剑湖湖泊形状及质心的变化。反映景观破碎化程度的斑块密度和斑块个数与剑湖景观形状指数和分维数呈显著正相关, 剑湖湖泊面积与剑湖景观形状指数和分维数呈显著负相关, 1974–2015 年剑湖湖泊面积逐渐减小, 剑湖景观形状指数呈逐渐增加趋势。

1990 年金华镇和甸南乡总人口共有 42 311 人, 2000 年末为 48 232 人^[23–24], 到 2015 年数字乡村网

表4 流域景观格局与剑湖景观形状的相关性

Table 4 Correlation between watershed landscape pattern and Jianhu Lake landscape shape

指数	形状指数	分维数	指数	形状指数	分维数
斑块密度	0.933**	0.945**	耕地面积	0.948**	0.947**
斑块个数	0.971**	0.969**	水域面积	-0.812*	-0.805
多样性指数	-0.886*	-0.871*	剑湖湖泊面积	-0.863*	-0.830*
蔓延度指数	0.891*	0.876*	未利用地面积	-0.966**	-0.966**
建设用地面积	0.958**	0.963**	形状指数		0.998**
林地面积	0.983**	0.970**			

统计为 73 490 人, 1990–2015 年, 人口增加了 73.69%, 因此建设用地面积的增加可能是由于人口迅速增长、住房需求增加所致。耕地面积增加主要原因是人口增加开垦未利用地以及围湖造田导致的结果。剑湖流域耕地转化为其他土地类型的面积为 839.57 hm², 从其他土地类型转为耕地的面积为 1 876.97 hm², 其主要来源为林地和未利用地^[25]。

景观破碎化主要表现为景观斑块面积由大变小以及伴随斑块面积的减少和地理空间隔离程度的增加产生的景观结构破碎化^[26]。本研究应用斑块密度、平均斑块面积和斑块个数来说明剑湖流域的景观破碎化程度。剑湖流域景观聚集度在 25 a 间是逐渐增加的, 表明剑湖流域景观中同一类型斑块形成了良好的连接性; 景观多样性指数稍有偏低, 这与喻庆国等^[27]研究结果相悖, 而景观破碎化程度和景观类型面积变化幅度是一致的。分析原因主要可能与研究区范围选取以及影像数据选取的时间等因素有关。本研究遥感数据选取的剑湖流域面积较大, 为 5.2×10^4 hm², 而喻庆国等^[27]研究选取的剑湖自然保护区的面积为 1 510.0 hm²; 本研究选取的影像时间均为 2 月, 喻庆国等^[27]的研究选取时间为 12 月、1 月和 10 月。

质心偏移的方向可以说明湖泊在此方向的反方向上缩减^[28], 说明西南方向湖泊萎缩面积相对较少。资料表明^[27,29]: 剑湖湖泊质心向西南方向偏移的原因主要为出湖河流海尾河的出湖口周围以及带着大量泥沙入湖的金龙河入湖口周围萎缩, 而泥沙淤积导致剑湖周围大面积湖滩裸露, 从而进行围湖造田和围湖建塘。因此, 泥沙淤积、围湖造田等人类活动对剑湖景观演变起了主要的塑造作用。李晶等^[5]在延河流域的研究表明景观格局与水土流失有着密切联系。

本研究通过 1990–2015 年剑湖流域以及 1974–2015 年剑湖湖泊的遥感影像制作了研究区土地利用变化图, 提取了剑湖流域土地利用类型的景观格局指数, 在此基础上分别对剑湖流域景观格局指数和剑湖湖泊质心迁移变化进行分析。景观格局变化将带来怎样的生态环境效应, 如对河流湖泊的水质、水文过程、土壤过程和生物多样性等方面的影响, 这需要在今后的研究中深入探索。

4 参考文献

- [1] FROHN R C. *Remote Sensing for Landscape Ecology: New Metric Indicators for Monitoring Modeling, and Assessment of Ecosystems* [M]. Boca Raton FL(EUA): Lewis Publishers, 1998.
- [2] TURNER M G, GARDNER R H. *Quantitative Methods in Landscape Ecology* [M]. New York: Springer Verlag, 1991.
- [3] 阿斯卡尔江·司迪克, 楚新正, 艾里西尔·库尔班. 新疆艾里克湖滨绿洲景观空间格局动态变化[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 793 – 798.
- [4] Esquer Sidiq, CHU Xinzhen, Alishir Kurban. Landscape pattern dynamic changes of Eric Lakeside Oasis, Xinjiang [J]. *J Lake Sci*, 2010, 22(5): 793 – 798.
- [5] 刘明, 王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5970 – 5979.
- [6] LIU Ming, WNAG Kelin. Analysis on hydrological responses to changes of landscape patterns in the middle and upper reaches of Dongting Lake Watershed [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(12): 5970 – 5979.
- [7] 李晶, 周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 933 – 944.
- [8] LI Jing, ZHOU Zixiang. Landscape pattern and hydrological processes in Yanhe River basin of China [J]. *Acta Geogr Sin*, 2014, 69(7): 933 – 944.
- [9] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2296 – 2306.

- LI Mingtao, WANG Xiaoyan, LIU Wenzhu. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohe River Watershed [J]. *Acta Sci Circumst*, 2016, 33(8): 2296 – 2306.
- [7] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 香溪河流域土地利用变化过程对非点源氮磷输出的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 129 – 138.
- CUI Chao, LIU Shen, ZHAI Limei, et al. Effect of land use/cover changes on nitrogen and phosphorus losses via non-point source pathway in Xiangxi River Basin [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2016, 35(1): 129 – 138.
- [8] 刘白杨, 尹黎明, 刘新亮, 等. 金井流域景观格局对地下水硝态氮时空分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 753 – 760.
- LIU Baiyang, YIN Liming, LIU Xinliang, et al. Landscape effects on temporal and spatial pattern of groundwater nitrate concentrations in the Jinjing catchment [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2017, 36(4): 753 – 760.
- [9] 包姗姗, 李崇巍, 王祖伟, 等. 天津于桥水库流域水体氮磷空间分异与景观格局的关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1609 – 1616.
- BAO Shanshan, LI Chongwei, WANG Zuwei, et al. Relationship between spatial variation of nitrogen and phosphorus in water and landscape pattern in Yuqiao Reservoir Basin, Tianjin [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2014, 33(8): 1609 – 1616.
- [10] 易扬, 信忠保, 覃云斌, 等. 生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6277 – 6286.
- YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al. Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(19): 6277 – 6286.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 孟丹, 王明玉, 李小娟, 等. 京沪穗三地近 10 年夜间热力景观格局演变对比研究[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1545 – 1558.
- MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al. The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(5): 1545 – 1558.
- [14] 陈芳, 魏怀东, 徐先英, 等. 黄河首曲玛曲县高寒草地沙化景观动态研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 198 – 201.
- CHEN Fang, WEI Huaidong, XU Xianying, et al. Landscape dynamics of land desertification of different origins of first bends of Yellow River in Maqu County [J]. *J Northwest For Univ*, 2011, 26(5): 198 – 201.
- [15] 冯永玖, 韩震. 基于遥感和 GIS 的海岸带水域生态景观格局演变研究: 以杭州湾北岸上海市段为例[J]. 国土资源遥感, 2011, 22(1): 123 – 127.
- FENG Yongjiu, HAN Zhen. RS and G1S derived spatio-temporal evolution of water landscape in coastal areas: a case study of Shanghai section on the Northern Bank of Hangzhou Bay [J]. *Remote Sens Land Resour*, 2011, 22(1): 123 – 127.
- [16] 方仁建, 沈永明. 围垦对海滨地区景观演变及其质心移动的影响: 以盐城保护区部分区域为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 772 – 783.
- FANG Renjian, SHEN Yongming. Effects of coast beach reclamation on the change of landscape pattern and its spatial centroids: a case study in coastal wetland of part of Yancheng National Natural Reserve [J]. *J Nat Resour*, 2015, 30(5): 772 – 783.
- [17] 张华兵, 刘红玉, 郝敬锋. 江苏省盐城海岸湿地景观时空演变特征研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 226 – 229.
- ZHANG Huabing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng. Landscape spatial and temporal evolutions of Yancheng coastal wetlands in Jiangsu Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2012, 32(6): 226 – 229.
- [18] 宫兆宁, 张冀然, 宫辉力, 等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 77 – 88.

- GONG Zhaoning, ZHANG Yiran, GONG Huili, et al. Evolution of wetland landscape pattern and its driving factors in Beijing [J]. *Acta Geogr Sin*, 2011, **66**(1): 77 – 88.
- [19] 李磊, 李艳红, 陈成贺日, 等. 1972–2011年期间艾比湖面积变化研究[J]. 湿地科学, 2014, **12**(2): 263 – 267.
- LI Lei, LI Yanhong, CHEN Chengheri, et al. Change of Ebinur Lake Area during 1972–2011 [J]. *Wetland Sci*, 2014, **12**(2): 263 – 267.
- [20] HEROLD M, COUCLELIS H, CLARKE K C. The role of spatial metrics in the analysis and modelling of urban land use change [J]. *Comput Environ Urban Syst*, 2005, **29**(4): 369 – 399.
- [21] 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.
- [22] WANG Fahui. *Quantitative Methods and Application in GIS* [M]. Hoboken: CRC Press, 2006.
- [23] 云南省剑川县志编纂委员会. 剑川县志[M]. 昆明: 云南民族出版社, 1999: 117 – 118.
- [24] 云南省剑川县志编纂委员会. 剑川年鉴[M]. 昆明: 云南民族出版社, 2005: 545 – 551.
- [25] 郭玉静, 王妍, 郑毅, 等. 1990–2015年剑湖流域土地利用变化动态及趋势预测[J]. 西南林业大学学报, 2016, **36**(6): 87 – 93.
- GUO Yujing, WANG Yan, ZHENG Yi, et al. The dynamic changes and simulating prediction of land use in Jianhu Lake Basin from 1990 to 2015 [J]. *J Southwest For Univ*, 2016, **36**(6): 87 – 93.
- [26] 刘红玉, 李兆富, 李晓民. 湿地景观破碎化对东方白鹳栖息地的影响: 以三江平原东北部区域为例[J]. 自然资源学报, 2007, **22**(5): 817 – 823.
- LIU Hongyu, LI Zhaofu, LI Xiaomin. Effects of wetland landscape fragmentation on habitats of oriental white storks: a case study on northeastern Sanjiang Plain, China [J]. *J Nat Resour*, 2007, **22**(5): 817 – 823.
- [27] 喻庆国, 李昊民, 董跃宇, 等. 1957–2012年滇西北剑湖景观演变特征及驱动因子研究[J]. 西部林业科学, 2014, **43**(2): 1 – 11.
- YU Qingguo, LI Haomin, DONG Yueyu, et al. Landscape evolution law and driving factors of the Jianhu Lake from 1957 to 2012 [J]. *J West China For Sci*, 2014, **43**(2): 1 – 11.
- [28] 李宁, 刘吉平, 王宗明. 2000–2010年东北地区湖泊动态变化及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 545 – 551.
- LI Ning, LIU Jiping, WANG Zongming. Dynamics and driving force of lake changes in northeast China during 2000–2010 [J]. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 545 – 551.
- [29] 张宝元. 对保护高原湖泊剑湖的思考[J]. 环境科学导刊, 2011, **30**(3): 49 – 52.
- ZHANG Baoyuan. Consideration on Jianhu Lake conservation in plateau area [J]. *Environ Sci Surv*, 2011, **30**(3): 49 – 52.