

2003—2023年滇池湿地景观格局变化特征研究

赵一璐^{1,2}, 温兴平^{1,2}, 王怡晓^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省矿产资源预测评价工程实验室, 昆明 650093)

摘要: 滇池湿地是滇池生态系统的重要组成部分,在一定程度上对滇池及其周边城市生态环境具有指示作用。本文以2003—2023年Landsat系列遥感影像为数据源,运用Fragstats 4.2平台,计算将遥感影像通过支持向量机(support vector machine, SVM)分为湖泊湿地、人工湿地、生态缓冲林、农业用地、非湿地5类后专题图的景观格局指数,分析研究区内的景观格局演变情况。得到以下结果:SVM总体分类精度(Overall Accuracy, OA)为0.86, Kappa系数(Kappa Coefficient)为0.83;西山区的部分景观格局变化较小;官渡区非湿地与农业、生态缓冲林景观转化率为90.10%,呈贡区、西山区内非湿地、农业用地景观相互转化率分别为80.17%和91.34%,农业用地和非湿地的相互转化为主要演变。结果表明:研究区内景观格局指数以2007年和2015年为节点,表现为“快速增长-增长减缓-缓慢降低”,整体上景观破碎度增强,蔓延度指数增加,多样性和均匀性指数增加,景观趋于复杂,人类活动成为影响滇池湿地景观格局的主要因素。

关键词: 遥感;景观生态;景观格局;湿地;滇池

中图分类号: X171.1;X171.4 **文献标识码:** A

RESEARCH ON THE ECOLOGICAL ENVIRONMENTAL CHANGES IN DIANCHI LAKE WETLANDS BASED ON LANDSCAPE PATTERNS

ZHAO Yi-lu^{1,2}, WEN Xing-ping^{1,2}, WANG Yi-xiao^{1,2}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Mineral Resources Prediction and Evaluation Engineering Laboratory of Yunnan Province, Kunming 650093, China)

Abstract: Dianchi Lake wetlands constitute an integral component of the Dianchi Lake ecosystem, playing a pivotal role in indicating the state of the ecological environment of Dianchi Lake and its surrounding urban areas. This study utilizes Landsat series remote sensing imagery from 2003 to 2023 as its data source and employs the Fragstats 4.2 platform. It classifies remote sensing imagery into five categories: lacustrine wetlands, artificial wetlands, ecological buffer forests, agricultural lands, and non-wetlands, using support vector machine (SVM) classification. The study calculates landscape pattern indices for the resulting thematic maps and investigates the evolution of landscape patterns within the study area. The findings are as follows: The overall accuracy (OA) of the SVM classification is 0.86, and the Kappa coefficient is 0.83. Parts of the Xishan District exhibit minor landscape pattern changes. In Guandu District, the rate of transformation of non-

wetlands into agriculture and ecological buffer forests is 90.10%, while in Chenggong District and Xishan District, the mutual transformation rate between non-wetlands and agricultural lands is 80.17% and 91.34%, respectively. The primary evolution involves mutual conversions between agricultural lands and non-wetlands. The results indicate that landscape pattern indices in the study area exhibit distinct transitions in 2007 and 2015, manifesting a progression characterized by “rapid growth-diminished growth-gradual decline.” Overall, there is an increase in landscape fragmentation, sprawl index, diversity, and evenness indices, signifying a heightened landscape complexity. Human activities emerge as the principal factor influencing the landscape pattern of Dianchi Lake wetlands.

Key words: remote sensing; landscape ecology; landscape pattern; wetlands; Dianchi lake

景观格局在时间和空间上的演变特征是研究宏观尺度景观类型的一种景观生态学研究方法^[1],景观格局是自然和人为活动因素在不同空间尺度上最终作用结果。研究景观格局指数是将景观格局进行定量分析的过程,是研究景观格局及其形成过程的基础^[2]。湿地景观格局对区域湿地资源和区域发展和生态平衡起到了重要作用^[3],对区域生物多样性^[4]、城市热岛效应^[5]、区域生态环境变化^[6,7]、土地利用/覆盖变化^[8,9]等生态环境相关问题具有较好的指示作用。湿地生态系统作为巨大的碳汇,以 9.7% 的陆地面积储存了全球 20% 以上的碳^[10],具有良好的固碳作用,是全球碳循环的重要组成部分^[11]。目前大量湿地在人类活动的影响下面积大幅度减少,生态功能受到影响^[12]。目前讲景观生态学应用于湿地生态环境的评价方法已经十分成熟,在国内外已经有诸多学者对湿地和景观格局进行了研究。

Junhong B^[13] 等使用景观格局指数,描述了 1966—2000 年佐依格高原高寒湿地景观格局变化,发现研究时序内湿地景观集中分布,重心转移方向为“西北-东南-北”;国内的湿地景观格局的研究多数为较大范围湿地的景观格局变化,如三江平原景观格局、黄河三角洲景观格局、青藏高原湿地景观格局等。刘吉平^[14] 等分析了三江平原土地利用景观格局动态及驱动力;李桢^[15] 等,基于 CLUE-S 模型以 1980—2010 年三江平原的景观格局为基础进行模拟,分析了在生态预案和历史预案下的不同景观格局结果;卢晓宁^[16] 等研究了黄河三角洲 1973—2016 年湿地的不同尺度景观格局变化,分析了变化的驱动因子,得出人类活动成为黄河三角洲滨海湿地景观格局变化的主要驱动因子;于小娟^[17] 等在获取潮沟及湿地景观类型空间分布基础上,通过冗余分析识别影响黄河三角洲典型湿地景观特征的主要潮沟指标,结果表明黄河三角洲北部区域湿地景观

的斑块密度整体上大于南部,景观破碎化程度相对较高;李妍妍^[18] 等通过千年生态系统评估方法计算生态系统服务价值,得出沼泽湿地面积的大幅度萎缩是麦地卡湿地保护区生态服务功能减弱的主要原因。

当前在研究湖泊湿地景观格局的时空演变、驱动机制、生态环境变化方面已有较大进展,但是在对湿地景观格局及其驱动力分析等方面还有一定的不足,如研究尺度和研究对象的问题,对于湿地景观格局的研究大多数还基于湖泊湿地本身,对小范围湖泊湿地景观格局及其周边行政区划的生态环境变化研究较少。本文为研究滇池景观格局变化对周边生态环境的影响,以滇池湖岸线外 3 km 缓冲区为研究区,研究滇池湿地 20 a 间景观格局变化能够较细致了解滇池湿地 21 世纪以来的景观格局演变情况,为更好保护研究区内生态环境提供理论依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

滇池(24°40′~25°02′N,102°37′~102°48′E),南省昆明市南部,面积约 298 km²,是我国第六大淡水湖泊,具有水体流动性差、自净化能力弱、生态环境脆弱等典型高原型湖泊特点。周长约 140 km,北部和西部被西山区包围,东部为官渡区和呈贡区,南部和西南部为晋宁区,城市化程度较高,景观结构复杂。滇池周边人类活动强烈,受长期城镇化发展的影响,湖泊水体出现了严重退化。据中华人民共和国生态环境部地表水自动发布系统发布水质内容,近年滇池水质平均为 V 类水水质,水质较差,超出了滇池的自净能力,湖体的破坏也对滇池周围湿地产生了负面影响。

滇池北部 3 km 位于昆明市西山区和五华区交界处,五华区人类活动较西山区更加活跃,选取 3

km 距离为研究区可以在一定程度上减少人类活动对滇池湿地景观格局的干扰。区域面积约为 366.30 km², 研究区内有 4 个昆明市的区县级行政区划, 分别为官渡区、呈贡区、晋宁区、西山区, 研究

区区位图采用 Landsat 8 OLI 2023 年 1 月 26 日影像采用 RGB 合成显示, 使用 B4、B3、B2 合成的并裁剪如图 1 所示。

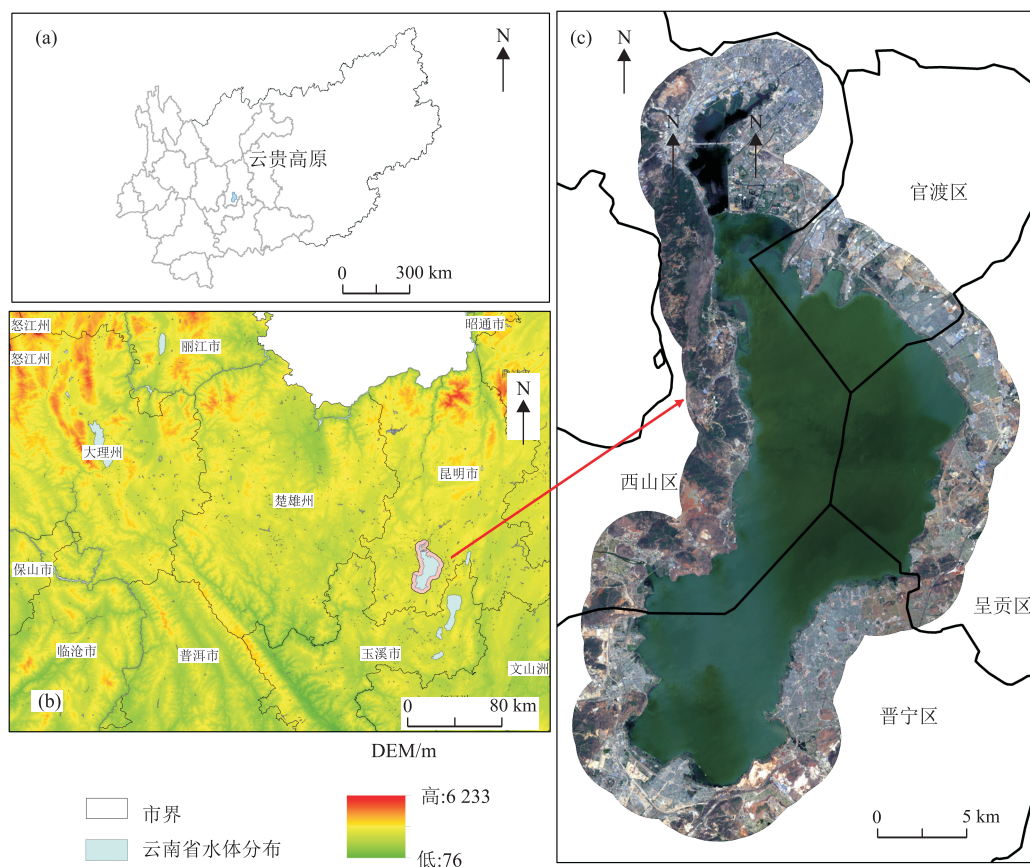


图 1 研究区地理区位图

1.2 数据源及其预处理

本研究选用了 2003—2023 年间不同时期 Landsat 5 TM 与 Landsat 8 OIL 两种传感器的遥感影像共 11 幅, 空间分辨率 30 m×30 m, 来自美国陆地调查局 USGS 官方网站 (<http://glovis.usgs.gov/>)。

将获取的遥感影像通过辐射定标、大气校正、裁剪出研究区后按照昆明市行政区划进行分割。

1.3 研究方法

(1) 湿地景观遥感解译

根据《中华人民共和国国家标准》(GB/T 24708-2009) 湿地分类标准, 结合研究区湿地分布现状, 采用监督分类 SVM, 将研究区湿地景观分为一级湖泊湿地、人工湿地、生态缓冲林、农业用地、非湿地等 5 类, 二级分类 12 类。选择 2023 年 1 月 26 日 Landsat 8 OLI 影像, 建立滇池湿地典型地物类别解译标志库(表 1), 并采用 Fragstats 4.2 进行湿地分







类结果分析。随机选取 500 个验证点进行样本训练和解译精度检验, 计算总体分类精度 (Overall Accuracy, OA) 和 Kappa 系数 (Kappa Coefficient) 分别为 OA=0.86、Kappa Coefficient=0.83, 分类精度满足研究区景观格局指数计算要求。

(2) 景观格局的计算

景观格局指数是一种将复杂的景观格局数据化, 可以表征区域景观格局及其变化特征, 反映了研究区景观结构组成和空间配置方面的定量指标^[19]。本研究中将从类型尺度 (Class metrics) 和景观尺度 (Land metrics) 两个方面计算研究区内共 4 个行政区划内分类得到的包括斑块密度 (Patch Density, PD) 在内的 5 个景观格局指数指标, 分别可以表示在一定范围内的景观空间的密度大小及差异、景观斑块的多样性和聚散性。

PD: 单位面积上各个斑块和斑块的个数的比值, 能较好反映景观的破碎化程度和人类活动对景

表 1 滇池湿地典型地物类别解译标志

一级 Level 1	二级 Level 2	遥感影像 Remote sensing image	一级 Level 1	二级 Level 2
湖泊湿地 Lake wetland	滇池 Dianchi lake		生态缓冲林 Ecological buffer forest	林地 Forest
	河流 River			草地 Grass
人工湿地 Artificial wetland	水田 Paddy field		非湿地 No wetland	其他植被 Other plant
	池塘 Ponds			建筑 Building
农业用地 Agriculture land	农田 Farm land			道路 Road
	其他 Other			裸地 Bare land

观的干扰程度。

$$PD = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^M N_i \quad (1)$$

式中, M 为研究区内的整个景观类型总个数面积; C 为研究区内单个景观的数量。

凝聚度指数 (Contagion Idenx, CONTAG): 反映景观里不同斑块类型的凝聚程度或延展趋势。

$$CONTAG = \left[\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_i \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \times \ln(p_i) \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}}}{2 \ln(m)} \right] \times 100 \quad (2)$$

式中, M 为斑块类型总数; g_{ik} 为随机选择的两个相邻斑块属于类型 i 和 k 的概率。

景观分割度 (Landscape Division Index, DIVISION): 反映景观的分割化、破碎化程度。

$$DIVISION = 1 - \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{A} \quad (3)$$

式中, a_{ij} 为第 i 类景观第 j 斑块的面积; A 为景观总面积。

香农多样性 (Shannon's Diversity Index, SHDI): 用于调查植物群落局域生境内多样性。

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m [P_i \ln(P_i)] \quad (4)$$

式中, P 为斑块类型所占景观总面积的比例; i 为斑块数量。

香农均匀性 (Shannon's Evenness Index, SHEI): 反映景观类型中各斑块类型在面上的均匀程度。

$$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)}{\ln m} \quad (5)$$

式中, P 为斑块类型所占景观总面积的比例; i 为斑块数量。

2 结果与分析

2.1 滇池湿地景观类型面积变化

根据数据可以看出, 除去滇池湖泊的主体部分, 研究区内的主要景观类型以农业用地和非湿地两种类型为主, 虽然在 20 a 的时间里面积略有波动, 但依旧是较有优势的两种景观类型。从景观分类结果占比上看 (图 2), 研究区人工湿地和非湿地景观面积占比增加, 从分类面积统计结果上看 (表 2), 人工湿地和非湿地面积分别从 2003 年的 3.56 km² 和 172 km² 上升到 2023 年的 20.95 km² 和 208.35 km²; 湖泊湿地、生态缓冲林和农业用地面积减少,

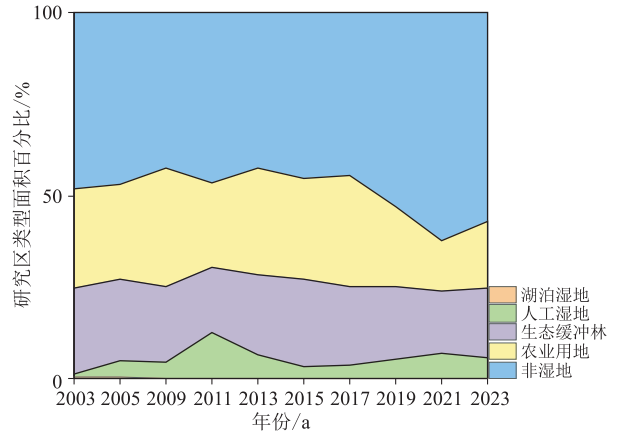


图 2 滇池湿地景观类型面积占比

湖泊湿地面积由 2003 年的 1.26 km² 减少到 2023 年的 0.3 km²,生态缓冲林面积由 2003 年的 85.95 km² 减少到 2023 年的 68.8 km²;农业用地面积由 2003 年的 94.84 km² 减少到 2023 年的 67.88 km²。

表 2 湿地景观类型面积变化特征(单位:km²)

景观类型	湖泊湿地	人工湿地	生态缓冲林	农业用地	非湿地
2003年	1.26	3.56	85.95	99.65	175.97
2005年	1.14	16.46	81.58	94.84	172.25
2009年	0.48	15.83	75.71	118.44	155.82
2011年	0.66	45.05	66.32	84.09	170.15
2013年	0.26	24.30	79.91	06.25	155.54
2015年	0.41	11.16	88.24	101.82	167.64
2017年	0.20	12.90	78.80	111.89	162.47
2019年	0.36	19.48	71.73	80.15	194.54
2021年	0.10	25.87	61.42	50.93	227.96
2023年	0.30	20.95	68.80	67.88	208.35

整体上滇池湿地景观类型面积演变特征可以总结为湖泊湿地景观面积占比较少,人工湿地和非湿地面积占比增加,农业用地和生态缓冲林面积占比减少。

2.2 滇池湿地景观类型转化分析

将分类结果按照昆明市行政区划分为 4 部分,可以明显看出西山区的景观类型变化较小(图 3),可大致按照时间分为 3 个阶段,即 2003 年时西山区景观类型为以生态缓冲林、非湿地为主,其余景观类型零星分布;2005—2017 年以生态缓冲林、非湿地为主,人工湿地面积增加和农业用地均匀分布在非湿地类型中;2019—2023 年,人工湿地、农业用地面积减少,大部分成为非湿地,且整体景观类型趋于稳定。

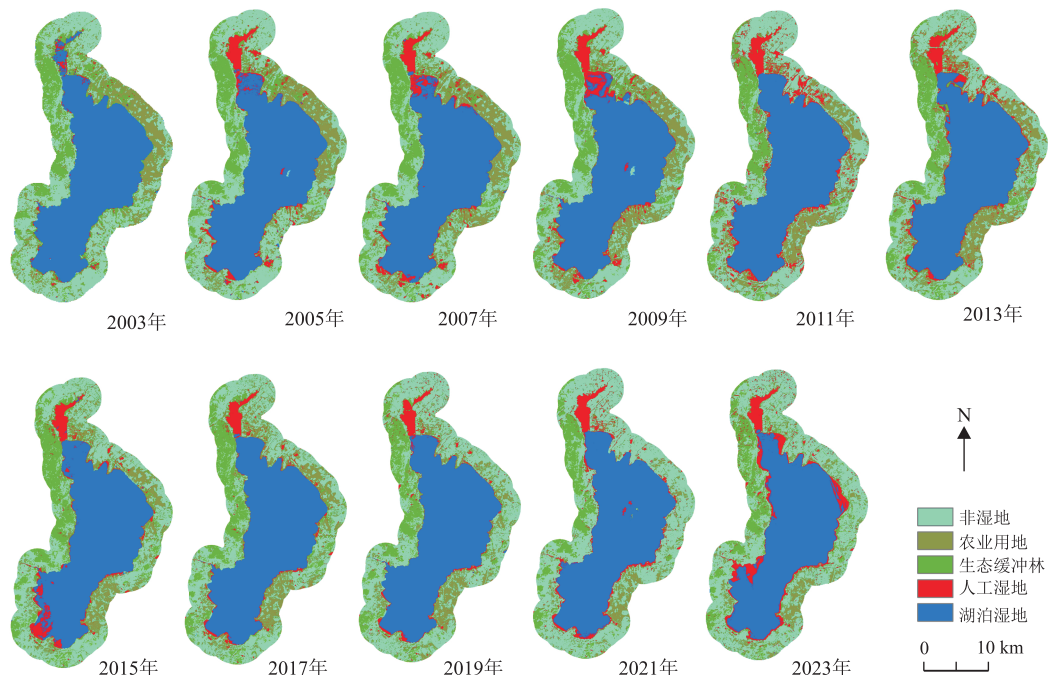


图 3 滇池湿地景观类型空间分布

分别提取研究区内每个行政区划中各景观类型的面积变化特征发现(图 4),研究区内湖泊湿地面积变化情况不明显,研究区内整体上的景观类型演变趋势为“建筑用地-农业用地”和“人工湿地-生态缓冲林”景观类型相互转化。其中,官渡区、呈贡区、晋宁区景观演变趋势和滇池湿地景观类型整体演变趋势相同,西山区景观类型演变情况为“建筑用地-生态缓冲林”和“农业用地-人工湿地”相互演变。

根据滇池湿地 SVM 景观分类结果可以建立滇池湿地景观类型转移矩阵,进一步研究 2003—2023 年滇池湿地景观类型演变情况(图 5)。

整体上 2003—2023 年滇池湖泊湿地景观类型的主要演变特征主要表现为生态缓冲林、农业用地、建筑用地的相互转化(图 5)。

表 3 滇池湿地景观类型演变率

2003—2023年	湖泊湿地 /%	人工湿地 /%	生态缓冲林 /%	农业用地 /%	建筑用地 /%
湖泊湿地	1.52	41.11	10.24	22.31	24.81
人工湿地	1.73	35.04	5.16	24.20	33.87
生态缓冲林	0.15	9.78	49.38	11.72	28.97
农业用地	0.01	3.90	9.60	26.08	60.41
建筑用地	0.02	3.69	9.45	17.50	69.34

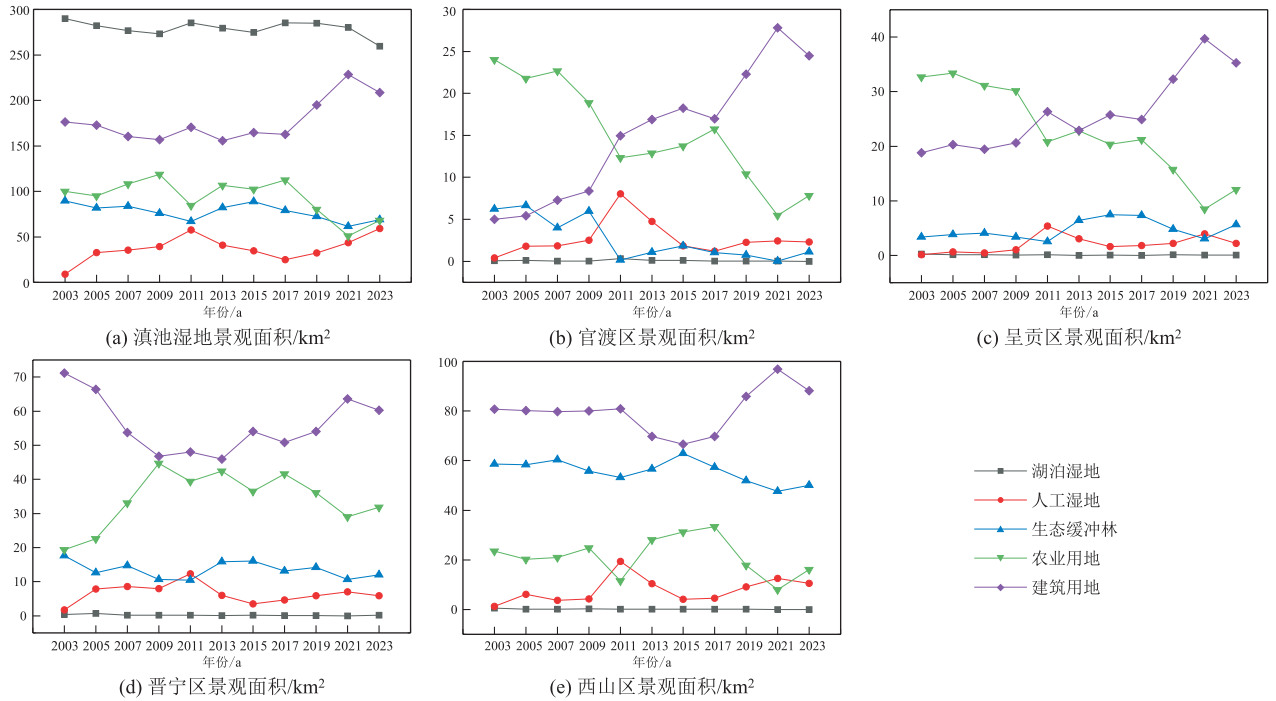


图 4 滇池湿地景观面积演变特征

2003年	/km²				
建筑用地	0.029	6.457 4	16.535 1	30.608 4	121.265 7
农业用地	0.011 5	3.858 5	9.509 7	25.824 5	59.809 7
生态缓冲林	0.124 9	8.278 6	41.823 3	9.927 9	24.535 5
人工湿地	0.058 5	1.184	0.174 3	0.817 7	1.144 2
湖泊湿地	0.015 7	0.425 2	0.106	0.230 9	0.256 7
	湖泊湿地	人工湿地	生态缓冲林	农业用地	建筑用地

2023年

图 5 滇池湿地景观类型转移矩阵

综合研究图 4 和表 3 可以得出,2003—2023 年建筑用地转化率最高的除在 2003 年依旧为建筑用地的区域外(西山区和晋宁区),大多数景观类型的演变发生在官渡区和呈贡区;农业用地主要演变为建筑用地,多发生在官渡区,农业用地演变为建筑用地的百分比最高,数值为 60.41%;生态缓冲林受到人类活动影响,演变为建筑用地,转化率达到 28.97%,主要发生在西山区;人工湿地主要演变为农业用地和建筑用地,转化率分别为 24.20% 和 33.87%;湖泊湿地和人工湿地的转化率最高,为 41.11%。

根据图 3 所示的滇池湿地景观类型演变结果,可以看出发生大规模景观类型演变和发生优势景观

类型变化的年份为 2007 年和 2015 年,提取这些年份的滇池湿地景观类型,计算每种景观类型的平均重心,进一步了解滇池湿地景观类型的空间分布规律(图 6)。

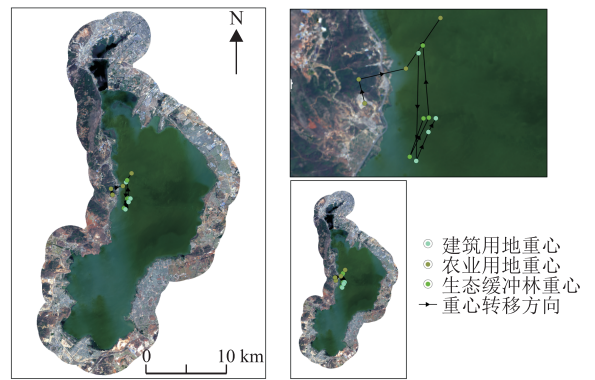


图 6 滇池湿地景观类型重心转移特征

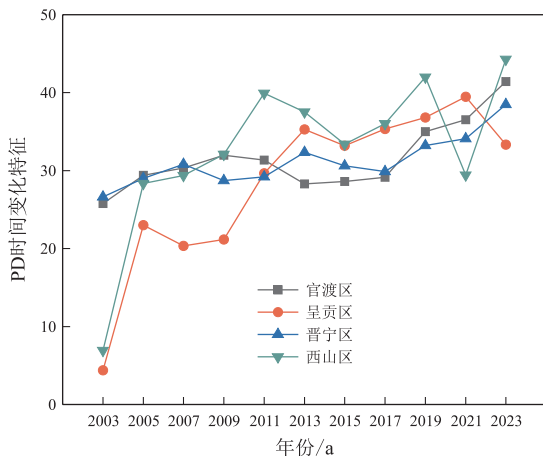
如图 6 所示,由于人工湿地和湖泊湿地在 3 km 缓冲区中的面积较少,认为在本研究中,两种景观面积不具有较好的代表性,在本研究中不做重心转移研究。滇池湿地景观类型重心均位于滇池西岸西山区中部附近,其中建筑用地重心在 2003—2007 年重心南移,2007—2023 年持续向东北方向移动,整体上重心较 2003 年向东南方向移动;农业用地重心在 2003—2023 年由滇池湖泊西岸持续向东北方向移动,整体上向东北方向移动;生态缓冲林重心在 2003—2007 年向西南方向移动,2007—2023 年持续

向原位置的北方移动;整体上看3种景观类型重心均向滇池北方移动。

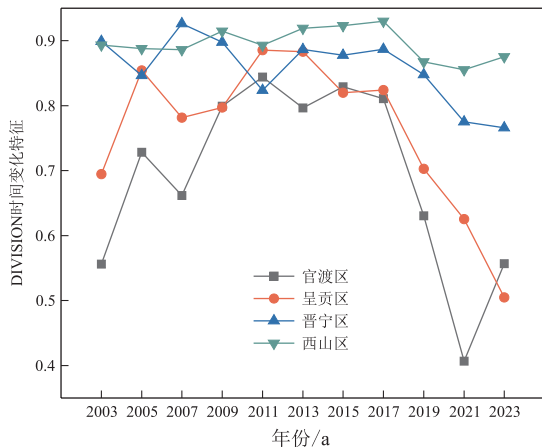
2.3 滇池湿地景观格局指数演变特征分析

由研究区4个行政区的滇池湿地景观分类结果使用Fragstats 4.2分别计算景观格局指数可以放大每个行政区内的景观类别对景观格局指数的影响,更好地将每个行政区划内的景观格局指数变化情况表现出来。

根据4区的景观格局指数,由图7可知,PD和DIVISION整体上表现出的趋势相同。研究区内的PD在研究时间序列里数值有波动,但整体上有明显的上升趋势,这表示研究区的景观破碎度在升高,人类活动、自然等因素对景观的干扰在整体上是增强的。



(a) PD时间变化特征



(b) DIVISION时间变化特征

图7 滇池PD、DIVISION时间变化特征

DIVISION在20a的时间中呈现出先增大后减小,最后有小幅上升。可以看出2007年是指数变化的节点,这和此研究区内的优势景观类型开始变化的时间相符。根据数据变化可知,此区域内景观形状、多样性、分割化、破碎化程度均为在2007年

以前先快速变得复杂后保持稳定,表示随着人类活动的城市发展的,在此之后为提升生活质量的人类活动对景观的恢复是起正面作用的。

由官渡区晋宁区、景观格局指数可以得知,2003—2023年官渡区和晋宁区的CONTAG变化趋势大致相同,有稳定持续增加的趋势,与斑块的边缘密度呈反比,斑块的离散程度减小。研究区内原本分散的土地被合理的利用起来,空间聚集度增大,景观在人为干预的情况下得到整合并稳定,见图8。

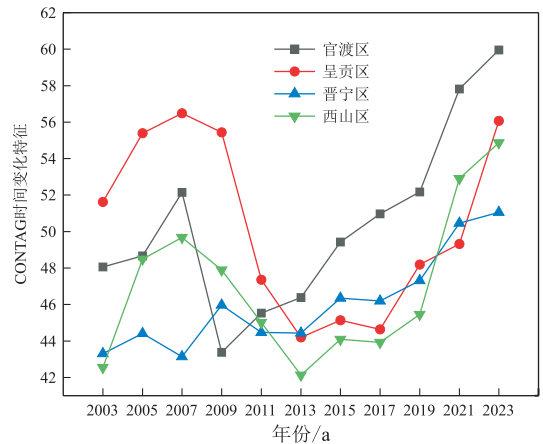


图8 滇池CONTAG时间变化特征

西山区和呈贡区的CONTAG表现出来的变化趋势相同,与官渡区和晋宁区的CONTAG数值有一定的差别,数值波动较为明显,整体上数值增加,表明期间景观斑块边缘离散程度变化程度较大。在2007年以前人类对此区域的利用情况未出现太大改变,在2007年以后,随着人类活动的干预,此地斑块边缘离散程度增大,斑块分布趋于复杂,景观斑块较之前分散,人工湿地斑块和非湿地斑块侵入农业用地斑块。当2015年以后,研究区内的景观格局稳定下来,斑块边缘也不再大幅度增加,景观分散程度降低。

SHDI(香农多样性指数)和SHEI(香农均匀性指数)两种景观格局指数数值有相似变化趋势,见图9,在研究区内表现为先增后减。呈贡区、晋宁区、西山区3个行政区划内SHDI和SHEI变化趋势大致相同,整体上表现为数值增加,表明在此研究范围内,土地利用类型和程度变化明显,景观类型多样化增大,物种丰富度和斑块分布有复杂趋势;官渡区SHDI和SHEI以2007年为转折点,整体上数值减小,可知官渡区景观类型多样化、物种丰富度在2003—2007年增加,在2007年以后减少。

整体对滇池湿地景观格局指数进行分区、整体研究,可以发现(图10)去除异常值后,从研究区全

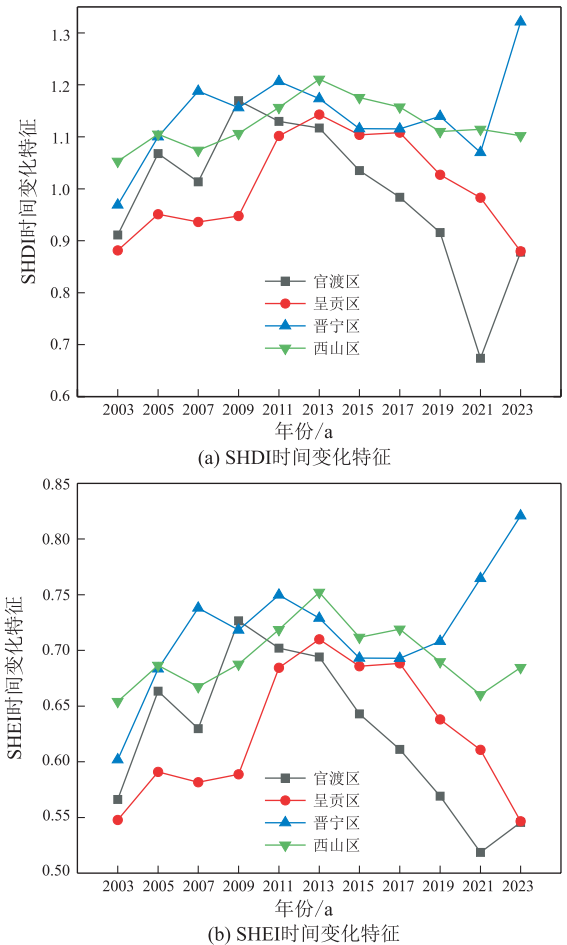


图 9 滇池 SHDI 和 SHEI 时间变化特征

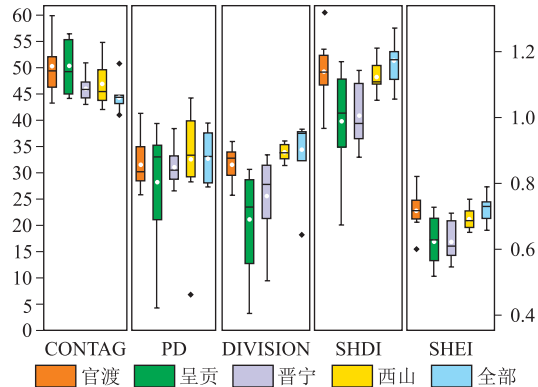


图 10 滇池湿地整体景观格局指数演变特征

局上看 CONTAG 处于较低水平, 研究区整体上斑块凝聚度较差; 研究区 4 个行政区划数据变化程度最小的行政区为西山区, 可以理解为该区的景观格局较其他 3 个行政区划和整体是最稳定的; 景观格局指数变化程度最大的是呈贡区, 表明此行政区划内受到人类活动影响最强烈; 晋宁区的 CONTAG 和 PD 表现出的数据分布较稳定, 但 DIVISION、SHDI 和 SHEI 变化幅度明显, 表明此行政区划内

的斑块密度变化不大, 但是生态多样性增加。

3 讨论与结论

3.1 讨论

Landsat 系列遥感影像具有空间分辨率较高、遥感影像数据丰富和获取免费等优点, 在应用于湿地信息提取和湿地景观格局的研究中具有较高的应用价值。使用 Landsat 系列遥感影像结合 SVM 分类对滇池湿地景观类型进行提取, 发现 SVM 对滇池湖泊湿地景观类型的提取中 OA 和 Kappa 分别为 0.86 和 0.83, 具有较好的景观提取精度, 能够应用于湖泊湿地景观类型的提取。滇池湿地景观格局的主要演变区域主要发生在官渡区、呈贡区和晋宁区, 主要演变表现为生态缓冲林、农业用地和建筑用地之间的演变, 转化率最高的是农业用地转变为建筑用地, 主要发生在官渡区。

造成本研究中湿地景观类型变化的主要原因可能为当地政策和气候因素共同作用, 与 2003 年以后国家政策和昆明市城市发展相关, 官渡区地价上涨, 由农业用地演变为建筑用地。在 2007 年, 云南省政府曾发表《云南省人民政府关于加强滇池水污染治理工作的意见》^[20], 同时, 2013 年云南省降水不足^[21], 和降水对生态环境影响的滞后性发现在 2015 年滇池湿地景观格局指数发生了较明显的改变, 符合事实, 使用景观格局对滇池湖泊湿地及其周边城市生态环境进行研究是具有科学依据符合事实的。

从滇池湿地景观格局指数变化特征上看, 景观格局指数数据发生较明显变化的年份为 2007 年和 2015 年, 和滇池景观格局演变特征变化年份相同。研究区内的 PD 和 CONTAG 的整体分布范围表现为部分大于整体, 各行政区内的斑块破碎化大于研究区整体。西山区属于研究区内的部分表现出的数据分布较其他 3 个行政区划密集变化程度较小, 说明西山区在人为因素和自然因素的共同影响下景观格局并未发生较大的改变。DIVISION 的变化趋势可能与 21 世纪初昆明市的快速城市化发展和土地利用情况改变有关。官渡区和呈贡区的地价上涨, 原本作为两区优势景观类型的农业用地面积减少, 相关农业产业成本上升, 农业用地大部分转移到晋宁区, 优势景观类型改变, 即人类活动对官渡区的影响程度增强, 造成研究区内景观破碎化程度升高。同时从 SHDI 和 SHEI 可以看出, 人类活动对景观格局的影响并不是持续性的, 当到达了某一阶段, 利用的资源足够满足当前发展的需要, 伴随着相关政策的出现, 对环境的负面影响便会开始减小, 人与自

然的关系开始稳定并保持在平衡状态,某一指数就会出现“快速增长-增长减缓-缓慢降低”的现象,即本文中出现的时间节点 2007 年和 2015 年。研究区内在 2015 年以后的部分格局指数开始稳定下来,斑块密度、数量、多样性、均匀性整体上为增加的趋势,表明研究区中的城市发展还未结束,处于持续发展阶段。

3.2 结论

本文通过 SVM 对滇池周围 3 km 缓冲区内的景观进行分类后统计分类结果,将分类结果使用 Fragstats 4.2 进行景观格局指数计算,以区级行政区划为研究尺度,精细化研究小范围的湿地景观格局演变情况,得到以下结果:

(1) 研究区内生态缓冲林、农业用地、建筑用地在研究区范围内占比较大整体上景观重心向北移动,且研究区内的景观类别的演变以三者的相互演变为主,研究区景观面积两增两减,非湿地和人工湿地面积增加,生态缓冲林和农业用地面积减少。

(2) 滇池湿地景观格局指数的变化特征上看官渡区、呈贡区、晋宁区变化相较研究区整体较大,斑块破碎化、复杂化程度、生态多样性增加;西山区景观格局较稳定,参考西山区的生态环境可以在为以后恢复滇池流域生态环境提供原始素材。

(3) 本研究时间序列里,人类活动为影响研究区景观格局演变的主要影响因素,景观格局以 2007 年和 2015 年为时间节点,在 2007—2015 年景观格局快速演变,在 2015 年以后演变减缓,研究区内的景观格局整体呈破碎化、复杂化。

在未来研究中,可以考虑在以下方面对本研究进行拓展和深入:将高分辨率的遥感影像和具有较长时间序列的遥感影像相结合,提高总体分类精度以进一步加强景观格局指数的可靠性和准确性;分别计算通过多种机器学习方法分类后研究区内的景观格局指数,以景观格局指数为标准,优化机器学习分类方法,得到一种更加精确的湿地提取办法;将生态指数和景观格局指数相结合,提出一种新的基于景观格局指数和生态指数的生态环境评价方法。

参考文献

[1] 傅伯杰,陈利顶,王仰麟,等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001.

- [2] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? [J]. *Landscape Ecology*, 2001, 16(4): 235-254.
- [3] 宫兆宁,张翼然,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.
- [4] Crooks K R. Relative sensitivities of mammalian carnivores to habitat fragmentation[J]. *Conservation Biology*, 2002, 16(2): 488-502.
- [5] 邱俊楠,苏涛,雷波,等. 基于“源-汇”景观格局的城市热岛效应及影响因素分析——以合肥市为例[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(11): 6039-6050.
- [6] 马小雪,吴昊,秦伯强,等. 长江经济带景观格局动态演变及其景观生态环境效应[J]. *地理科学*, 2022, 42(10): 1706-1716.
- [7] 陈利顶,孙然好,刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [8] 李星,周京春,金婷婷,等. 滇中城市群土地利用/覆盖变化(LUCC)空间模拟研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(10): 1318-1329.
- [9] 张莹莹,蔡晓斌,杨超,等. 1974~2017 年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(1): 171-182.
- [10] 齐菲,王丰,刘斌,等. 河北滨海湿地生态系统服务供需特征与情景分析[J]. *中国生态农业学报*, 2023, 31(7): 1133-1144.
- [11] Ou Y X, Lee S Y. Improved estimates on global carbon stock and carbon pools in tidal wetlands [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 317.
- [12] 张骁栋,朱建华,张小全,等. 中国湿地碳汇功能的提升途径[J]. *自然保护地*, 2022, 2(3): 17-23.
- [13] Junhong B, Hua O, Baoshan C, et al. Changes in landscape pattern of alpine wetlands on the Zoige Plateau in the past four decades[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2245-2252.
- [14] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等. 1954~2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3234-3244.
- [15] 李桢,刘森,薛振山,等. 基于 CLUE-S 模型的三江平原景观格局变化及模拟[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1805-1812.
- [16] 卢晓宁,黄玥,洪佳,等. 基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(11): 4314-4324.
- [17] 于小娟,薛振山,张仲胜,等. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2504-2515.
- [18] 李妍妍,王景升,税燕萍,等. 拉萨河源头麦卡湿地景观格局及功能动态分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8700-8707.
- [19] 陈启慧,纪璐,李琼芳,等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 90-99.
- [20] 云南省人民政府关于加强滇池水污染治理工作的意见[J]. *云南政报*, 2007, 16(17): 21-23.
- [21] 罗燕,田永丽,戴敏,等. 云南近 50 年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(6): 870-877.

作者简介: 赵一璐(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为遥感技术及其生态学应用。E-mail:zhaoyilu@stu.kust.edu.cn

通讯作者: 温兴平(1970—),男,教授,博士,主要研究方向为遥感技术及应用。E-mail:wfxyp@qq.com