

引文格式: 杨峻明, 胡恬滋, 李炳蓬, 等. 基于 CA-MC 模型的滇池流域生态敏感性时空演变特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(5): 894–906. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202206058](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202206058)

基于 CA-MC 模型的滇池流域 生态敏感性时空演变特征*

杨峻明^{1#}, 胡恬滋^{2#}, 李炳蓬¹, 李东徽¹, 张敬丽¹, 黄秋霞¹, 葛倍辰^{1,3}, 白天^{1**}

(1. 云南农业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650201; 2. 北京农学院 园林学院, 北京 102206;

3. 西南林业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650224)

摘要:【目的】探究滇池流域近 30 年间生态敏感性时空演变特征。【方法】定量分析生态因子的相互关系, 基于 1995 年、2005 年、2010 年和 2018 年的遥感影像和基础数据, 运用 CA-MC 模型、重心迁移及核密度进行分析。【结果】1995—2018 年, 滇池流域土地覆盖/利用、河岸缓冲区和景观指数敏感性均呈波动下降趋势, 归一化植被指数敏感性总体升高, 流域综合生态敏感性呈现高等级向低等级转化的特征。不敏感、轻度敏感和中度敏感性区域面积整体上升, 分别增加 2.10%、0.47% 和 11.20%; 高度敏感性区域面积波动下降, 减少 13.77%。各级生态敏感性重心转移及核密度分布差异显著, 不敏感和轻度敏感性区域向西北方向迁移, 中度敏感和极度敏感性区域向西南方向迁移, 高度敏感性区域向东南方向迁移。通过 CA-MC 模型推演, 2018—2026 年滇池流域敏感性空间演变, 总体敏感性等级缓慢上升。【结论】研究区域生态敏感性演变过程能够及时了解区域生态演变规律, 提出生态保护策略。

关键词: 生态敏感性; 熵值法; CA-MC 模型; 重心迁移; 核密度; 滇池流域

中图分类号: Q141 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2023) 05-0894-13

Spatial and Temporal Evolution Characteristic of Ecological Sensitivity of Dianchi Lake Basin Based on CA-MC Model

YANG Junming¹, HU Tianzi², LI Bingpeng¹, LI Donghui¹, ZHANG Jingli¹,
HUANG Qiuxia¹, GE Beichen^{1,3}, BAI Tian¹

(1. College of Horticulture and Landscape, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. School of Landscape Architecture, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 3. College of Horticulture and Landscape, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Purpose] To explore the spatial and temporal evolution characteristics of ecological sensitivity in Dianchi Lake Basin during the past 30 years. [Methods] Quantitative analysis was used for the interrelationships among ecological factors, based on remote sensing images and basic data in 1995, 2005, 2010 and 2018, and CA-MC model, migration of gravity center and kernel dens-

收稿日期: 2022-06-22

修回日期: 2023-08-06

网络首发日期: 2023-10-10

*基金项目: 云南省基础研究项目 (202001AU070133)。

作者简介: #对本文贡献等同, 为并列第一作者。杨峻明 (1999—), 男, 四川广安人, 在读硕士研究生, 主要从事城乡绿地资源建设与管控研究。E-mail: 742891286@qq.com; 胡恬滋 (2000—), 女, 四川成都人, 在读硕士研究生, 主要从事城乡绿地资源规划相关研究。E-mail: 2826883499@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 白天 (1986—), 男, 云南昆明人, 博士, 讲师, 主要从事城乡绿地资源建设与管控和城乡灾害预警研究。E-mail: tbai@ynau.edu.cn
网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20231009.0748.001>



ity estimation were applied. [Results] From 1995 to 2018, the land use and cover change, riparian buffers and landscape indices sensitivities of Dianchi Lake Basin showed a fluctuating decreasing trend, and the normalized difference vegetation index sensitivity increased overall, the comprehensive ecological sensitivity of the basin showed a transformation from high to low level. The area of insensitive, low sensitive and moderate sensitive increased overall, by 2.10%, 0.47% and 11.20%, respectively; the area of high sensitive fluctuated down, decreasing by 13.77%. The center of gravity shifted and kernel density distribution of ecological sensitivity at all levels differed significantly, with the insensitive and low sensitive areas migrated to the northwest, the moderate and extremely sensitive areas migrated to the southwest, and the high sensitive areas migrated to the southeast. The spatial evolution of sensitivity in the Dianchi Lake Basin from 2018 to 2026 is deduced by the CA-MC model, and the overall sensitivity level slowly increases. [Conclusion] The study of regional ecological sensitivity evolution can provide timely understanding of regional ecological evolution patterns and propose ecological protection strategies.

Keywords: ecological sensitivity; entropy method; CA-MC model; migration of gravity center; kernel density; Dianchi Lake Basin

城镇化高速发展导致生态空间挤压、生态过程受到过度干扰,表现出植被减少、水土流失、河岸缓冲区恶化和生物多样性丧失等生态安全问题^[1]。生态敏感性是表征区域生态安全的重要指标,对区域生态保护和空间规划起着重要的导向作用^[2],对制定区域生态环境保护与恢复治理措施具有科学参考价值^[3]。GIS分析流域生态敏感性是区域生态研究的重要手段,随着机器学习的发展,生态敏感区也逐渐从层次分析、聚类分析和主成分分析等静态分析向人工神经网络(artificial neural network, ANN)和马尔科夫链(Markov chain, MC)等动态预测发展,提升了研究的可行性和应用价值,呈现多角度揭示生态敏感格局与过程的稳态特征^[4-5]。MC与元胞自动机(cellular automata, CA)均为时间离散、状态离散动力学模型,MC模型预测未来土地数量具有优势,但无法体现空间分布格局的变化^[6];CA模型可有效模拟元胞间的相互作用,具有较强的空间分析和模拟运算能力,但存在局限性^[7]。CA-MC耦合模型汲取二者优势,能够实现复杂系统空间演化的长期预测,已广泛运用于生态学研究并取得了良好成果^[8]。

滇池流域位于滇中城市群核心区,占云南省总国土面积的0.7%,聚集省内7.6%的人口,创造全省24%的GDP^[9]。多年来城镇化发展与人口

基数剧增对高原滇池流域生态环境冲击巨大。运用科学方法探究滇池流域生态敏感性的数量性状和空间演变过程,有利于促进滇池流域治理、保护及可持续发展^[10]。本研究以滇池流域2920 km²为对象,运用熵值法与CA-MC模型,结合静态评价与动态预测,探究1995—2018年其生态敏感性时空演变特征、重心迁移和核密度空间分布,推演2026年滇池流域生态敏感性变化,较传统层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、均方误差(mean square deviation weighted decision, MSE)和AHP-GIS法更具客观性^[11-12],以为高原湖泊生态环境治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池流域属长江流域金沙江水系,是滇中生态多样性保护的重要屏障,地理坐标N24°28′~25°28′, E102°30′~103°00′(图1)。自20世纪60年代,滇池流域生态环境持续恶化。历经30年治理,滇池外海水质由2011—2015年的劣V类转变为2016—2020年的以IV、V类为主,草海水质由2011—2015年的劣V类转变为2016—2020年的IV、V类;但其夏季水华现象频发,仍是中国污染最严重的湖泊之一^[13-15]。滇池流域植被破坏现象持续发生,1950年森林覆盖率为58.21%,

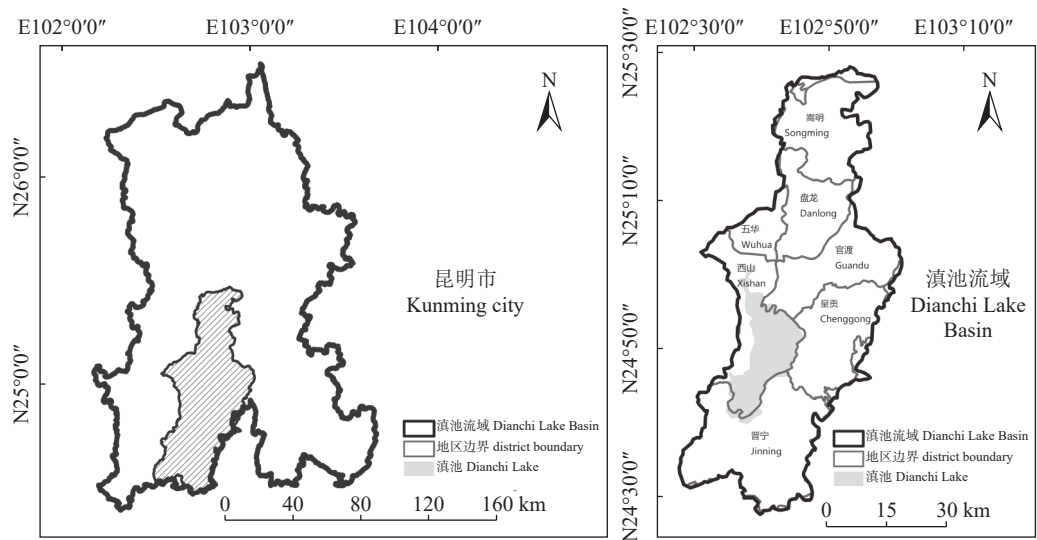


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of research area

1979 年第三次森林资源普查降为 22.7%^[16-17]。植被覆盖降低致使流域水生态遭受严重侵害，水涵养量剧减、水土流失加剧^[18]。2006 以来，滇池开展“四退三还”工程，环境质量稳步提升，2017 年森林覆盖率回升至 40.78%；植被覆盖率和物种多样性均有上升，生态环境逐步改善，但目前滇池流域植被覆盖率仍低于全国水平^[19-20]。

1.2 数据来源

基于 1995 年、2005 年、2010 年和 2018 年的

Landsat 4-5 TM、Landsat 8 OIL_TIRS 30 m 遥感影像以及数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 等数据 (表 1)，通过空间矫正、地理配准、监督分类和栅格化处理，获得研究区域土地覆盖/利用 (land use and cover change, LUCC)、归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、河岸缓冲区 (riparian buffers, RB) 和景观指数 (landscape indices, LI) 等相关数据，建立地理数据分析库。

表 1 主要数据来源数据库

Tab. 1 Primary data source database

名称 name	来源 source
土地覆盖/利用 LUCC	中国科学院资源环境科学数据中心 Resource and Environment Science Data Center of Chinese Academy of Sciences
归一化植被指数 NDVI	地理空间数据云Landsat 4-5 TM卫星数字产品、Landsat 8 OIL_TIRS卫星数字产品 geospatial data cloud Landsat 4-5 TM satellite digital product, Landsat 8 OIL_TIRS satellite digital product
河岸缓冲区 RB	地理空间数据云Landsat 4-5 TM卫星数字产品、Landsat 8 OIL_TIRS卫星数字产品 geospatial data cloud Landsat 4-5 TM satellite digital product, Landsat 8 OIL_TIRS satellite digital product
数字高程模型 DEM	SASTER GDEM 30 m DEM (2009)
景观指数 LI	中国科学院资源环境科学数据中心 Resource and Environment Science Data Center of Chinese Academy of Sciences

注/Note: LUCC. land use and cover change, NDVI. normalized difference vegetation index, RB. riparian buffers, DEM. digital elevation model, LI. landscape indices; 下同/the same as below.

1.3 研究方法

1.3.1 流域评价指标体系

基于地理空间数据库、参考相关文献及标准，选取 LUCC 因子、NDVI 因子、RB 因子和 LI 因子构建生态敏感性指标体系 (表 2)。其中，RB

因子根据已有学者对水体资源的研究，以与水体的距离划分 RB 因子的敏感性等级^[21]；LI 因子选取能够展现空间变化程度的最大斑块指数 (largest patch index, LPI)、平均斑块面积 (mean patch area, AREA_MN)、香农多样性指数 (Shannon's

diversity index, SHDI) 和香农均匀度指数 (Shannon's evenness index, SHEI) 作为拟合数据^[9, 22], 并与 LUCC 因子、NDVI 因子、RB 因子进行加权叠加^[8, 21]。根据敏感性因子叠加效能及贡献率, 参考李益敏等^[11]、丁雨琛等^[21]和吴金华等^[23]对评价因子敏感等级的划分, 将研究区划分为极度敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感和不敏感区域 5 个等级。参考文献^[24-25]计算 LPI、AREA_MN、SHDI 和 SHEI: 以幅度为 6 km×6 km

矩形对滇池流域进行划分, 得到 84 个幅度相等的矢量数据图, 分别导入 Fragstats 4.2 进行景观格局指数的计算, 采用反距离权重和自然断点法得到上述 4 个指数的生态敏感性图; 基于 LPI、AREA_MN、SHDI 和 SHEI 的源数据, 采用熵值法计算其权重分别为 0.27、0.23、0.27、0.23, 加权叠加计算^[26]得到 1995—2018 年滇池流域 LI 敏感性分布图。

表 2 生态敏感性指数分级标准
Tab. 2 Classification standard of ecological sensitivity

评价因子 evaluation factors	生态敏感性分级 ecological sensitivity classification				
	不敏感 insensitive	轻度敏感 low sensitive	中度敏感 moderate sensitive	高度敏感 high sensitive	极度敏感 extremely sensitive
LUCC因子 LUCC factor	建设用地、保留地 construction land, reserved land	耕地、果园、其他农用地 cultivated land, orchard, other agricultural land	草地 grassland	林地 forest	水域 water area
NDVI因子 NDVI factor	≤0.2	0.2~0.4	≥0.4~0.6	≥0.6~0.8	≥0.8
RB因子/m RB factor	≥500	350~500	≥200~300	100~200	≤100
LI因子 LI factor	最大斑块指数 LPI 平均斑块面积 AREA_MN 香农多样性指数 SHDI 香农均匀度指数 SHEI 利用自然断点法分为五级 divided into five levels by using the natural breakpoint method				

注/Note: LPI. largest patch index, AREA_MN. mean patch area, SHDI. Shannon's diversity index, SHEI. Shannon's evenness index; 下同/ the same as below.

1.3.2 影响因子权重分析

通过计算熵值判断指标的离散程度, 离散程度越大, 该指标对综合评价的影响越大。根据因子相对变化程度对整体系统的影响确定因子权重, 具有较强的客观性^[27-29], 具体步骤为:

(1) 设定数据矩阵: 假设矩阵 $A = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$, 其中 x_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的值。

(2) 数据标准化: 因各项指标的计量单位并不统一, 故需要进行数据标准化处理; 又因正向—负向指标数值含义不同, 需对正向和负向指标采用不同算法进行数据标准化处理,

正向指标: $x_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} + 0.000\ 01$;

负向指标: $x_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} + 0.000\ 01$ 。

(3) 计算第 j 项指标的熵值 (W_j):

$$W_j = \frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n \frac{T_{ij}}{\sum_{i=1}^n T_{ij}} \ln \frac{T_{ij}}{\sum_{i=1}^n T_{ij}}$$

式中: T_{ij} 为指标 j 中 i 年的标准化数据; $\sum_{i=1}^n T_{ij}$ 为各项指标经数据标准化和非负化后的无量纲值。

1.3.3 生态敏感性空间重心转移分析

平面重心模型能够反映生态敏感区空间重心迁移过程, 计算各生态敏感区不同时期的重心位置可揭示二维空间内生态敏感区的空间演化过程, 计算公式为:

$$x = \sum_{i=1}^n (c_i \times x_i) / \sum_{i=1}^n c_i$$

$$y = \sum_{i=1}^n (c_i \times y_i) / \sum_{i=1}^n c_i$$

式中： x 和 y 分别为某景观类型重心的经、纬度坐标； c_i 为该景观类型第 i 个斑块的面积； x_i 和 y_i 分别为某景观类型第 i 个斑块分布重心的经、纬度坐标。

1.3.4 核密度分析

核密度计算结果的二维灰度表达可直观地获取景观的聚集或离散等分布特征^[30-31]。借助移动窗口，计算并输出栅格单元的点或线密度^[32]，通常由 Rosenblatt-Parzen 核估计计算：

$$f_{n(x)} = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right)。$$

式中： $k\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$ 为核函数； $h>0$ ，为带宽； $(x-x_i)$ 为估计点到样本 x_i 处的距离。

1.3.5 CA-MC 模型预测分析

CA 模型由元胞及其状态、元胞空间、元胞邻域和转换规则 4 个部分组成，具有时间、空间和状态离散型，任意元胞变量只存在有限且离散状态，并依据相同的转变规定进行同步修正，状态改变的规则在时间和空间上均为局部特征，普通 CA 模型为：

$$S = (t + 1) = f[S(t), N]。$$

式中： S 为元胞有限和离散状态集合； N 为元胞的邻居； f 为局部映射元胞的转换规则。

MC 模型用于计算空间转化概率，利用时间发展的前后状态统计解释某一事件在一定时期变化转移的特征规律^[33]。生态敏感性演变具有 MC 过程特征，其分级对应 MC 过程中的“可能状态”，而分级之间相互转换的面积或比例即为状态转移概率，表达式为：

$$N_{t+1} = N_t^* P_{ij}$$
$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}。$$

式中： N_{t+1} 表示后一时期生态敏感性分级； N_t 表示前一时期生态敏感性分级； P_{ij} 表示状态转移概率矩阵， $0 \leq P_{ij} < 1$ 且 $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ ($i, j = 1, 2 \cdots, n$)。

MC 模型具有时间序列推演的能力，而 CA 模型则具备预测复杂系统时空动态演进的优势，故综合 2 种模型可科学地推演流域生态敏感性的空间变化^[34]。

本研究采用 Kappa 系数对土地格局演变预测的精度进行检测，其计算公式为：

$$Kappa = (P_0 - P_c) / (P_p - P_c)。$$

式中： P_0 为正确模拟的比例； P_c 为模型随机情况下的正确预测比例； P_p 为理想情况下正确预测的比例。

2 结果与分析

2.1 单因子生态敏感性评价

2.1.1 LUCC 单因子敏感性评价

由表 3 和图 2 可知：滇池流域 LUCC 敏感性较高，近 30 年来极度敏感性区域维持在 10% 以上。LUCC 敏感性由流域外围向中心城区呈现逐渐递减的趋势，极度敏感性区域主要分布于流域中部河流水系集中地区，而不敏感和轻度敏感性区域呈现环滇分布趋势。时间序列上 LUCC 敏感性总体呈波动递减趋势，极度敏感性区域波动下降 0.37%，而不敏感性区域持续上升 11.43%。建设区域面积增多，LUCC 敏感性下降。

表 3 1995—2018 年滇池流域 LUCC 敏感性面积及其占比
Tab. 3 Area and percentage of LUCC sensitivity in Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

区域 region	1995		2005		2010		2018	
	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage
不敏感 insensitive	27 506.79	8.96	30 192.63	9.84	38 806.49	12.65	62 550.57	20.39
轻度敏感 low sensitive	70 713.07	23.04	72 123.56	23.50	67 178.88	21.89	53 195.24	17.34
中度敏感 moderate sensitive	59 806.14	19.48	60 545.23	19.73	52 615.82	17.15	47 367.86	15.44
高度敏感 high sensitive	114 878.94	37.42	109 706.19	35.75	114 135.36	37.20	110 790.79	36.11
极度敏感 extremely sensitive	34 059.30	11.10	34 278.66	11.17	34 107.55	11.12	32 937.69	10.73

2.1.2 NDVI 单因子敏感性评价

由表 4 和图 3 可知: 1995—2018 年滇池流域 NDVI, 不敏感性区域下降 21.09%, 轻度敏感和中度敏感性区域分别上升 11.62% 和 9.48%, 高度敏感性区域主要分布于流域边缘地带。时间序列上, 1995 年和 2005 年的 NDVI 轻度敏感性相似, 与 2005 年和 2010 年相比, 2018 年的 NDVI 不敏感性区域下降至 37.82%。

2.1.3 RB 单因子敏感性评价

由表 5 和图 4 可知: 1995—2018 年滇池流域 RB 敏感性等级较低, 不敏感和轻度敏感性区域占比之和均大于 50%, 且离水系越近, 区域敏感度高。时间序列上, 2018 年的 RB 敏感性等级较 1995 年有所下降, 其中极度敏感性区域降幅最大 (6.30%), 其次为高度敏感性区域 (5.79%)。

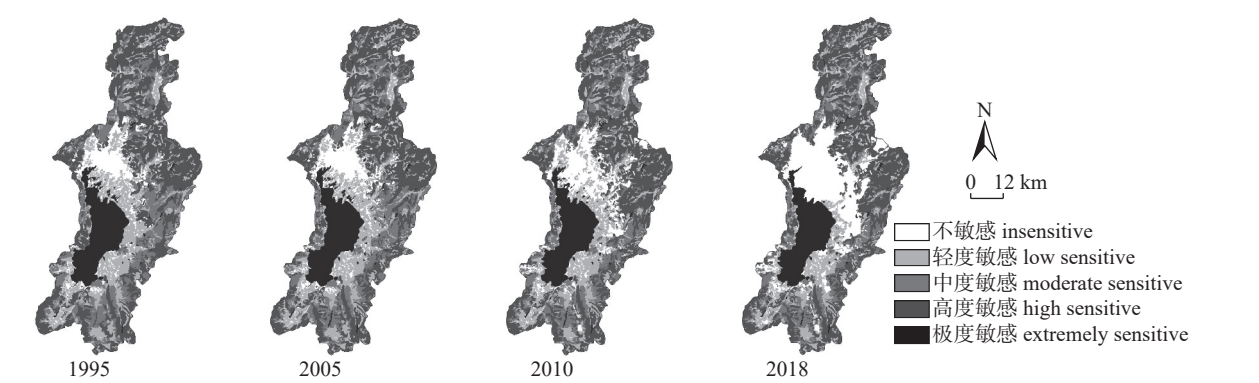


图 2 1995—2018 年滇池流域 LUCC 敏感性
Fig. 2 LUCC sensitivity of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

表 4 1995—2018 年滇池流域 NDVI 敏感性面积及其占比
Tab. 4 Area and percentage of NDVI sensitivity in Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

区域 region	1995		2005		2010		2018	
	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage
不敏感 insensitive	180 840.48	58.91	151 054.28	49.21	171 444.41	55.85	116 084.27	37.82
轻度敏感 low sensitive	112 314.50	36.59	115 605.79	37.66	93 479.20	30.45	147 976.78	48.21
中度敏感 moderate sensitive	13 773.65	4.49	38 376.12	12.50	41 720.65	13.59	42 895.08	13.97
高度敏感 high sensitive	36.06	0.01	1 921.04	0.63	318.26	0.10	6.87	0.00
极度敏感 extremely sensitive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

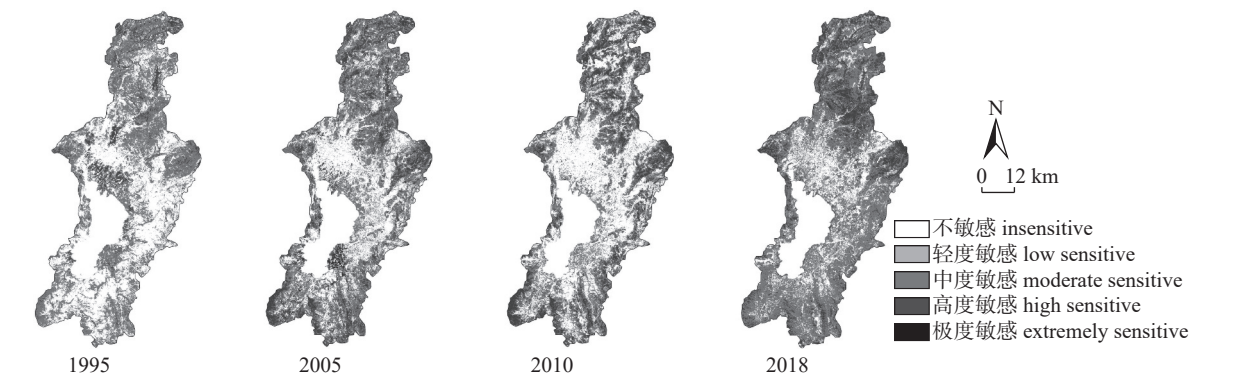


图 3 1995—2018 年滇池流域 NDVI 敏感性
Fig. 3 NDVI sensitivity of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

表 5 1995—2018 年滇池流域 RB 敏感性面积及其占比
Tab. 5 Area and percentage of RB sensitivity in Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

区域 region	1995		2005		2010		2018	
	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage
不敏感 insensitive	112072.94	36.51	124822.71	40.69	137148.49	44.68	189923.86	61.87
轻度敏感 low sensitive	47525.78	15.48	43526.28	14.19	41269.59	13.44	30802.18	10.03
中度敏感 moderate sensitive	54057.92	17.61	48291.34	15.74	45087.31	14.69	30048.93	9.79
高度敏感 high sensitive	33033.35	10.76	29845.61	9.73	27326.83	8.90	15255.66	4.97
极度敏感 extremely sensitive	60279.49	19.64	60315.86	19.66	56143.03	18.29	40958.18	13.34

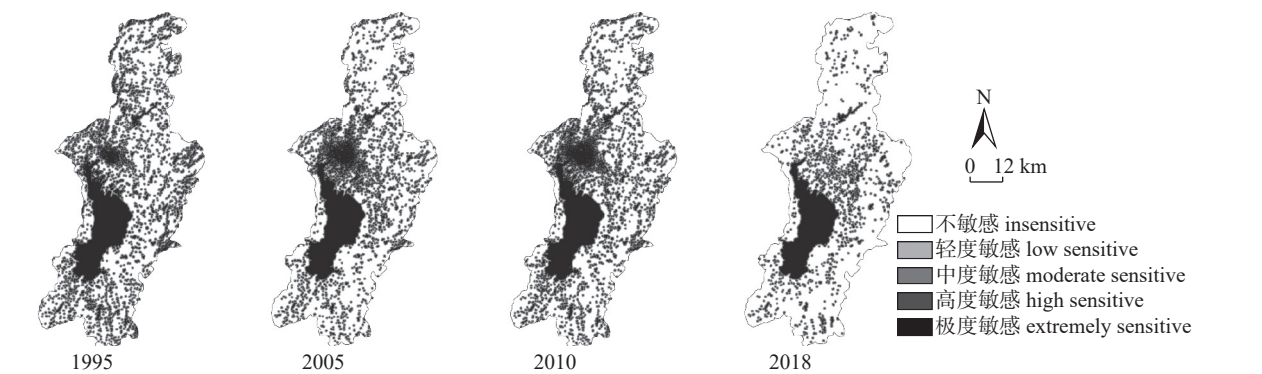


图 4 1995—2018 年滇池流域 RB 敏感性
Fig. 4 RB sensitivity of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

2.1.4 LI 单因子敏感性评价

由表 6 和图 5 可知：滇池流域 LI 敏感性总体较高，高度敏感和极度敏感性区域之和占比均大于 70%。时间序列上，1995—2018 年不敏感和极度敏感性区域分别向轻度、中度和高度敏感性区域转移 2 732.96 和 23 364.50 hm²；极度敏感性区域呈现波动变化，但总体下降。尽管不敏感性

区域下降 0.89%，但极度敏感区域下降幅度更大 (7.63%)，表明 LI 敏感性有所下降。空间分布上，LI 敏感性较低的区域主要分布于流域中部及边缘地带。

2.2 综合因子生态敏感性评价

由表 7~8 和图 6 可知：1995—2018 年滇池流域极度敏感性区域占比极低，可忽略不计；不敏

表 6 1995—2018 年滇池流域 LI 敏感性面积及其占比
Tab. 6 Area and percentage of LI sensitivity in Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

区域 region	1995		2005		2010		2018	
	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage
不敏感 insensitive	14708.97	4.79	18977.04	6.18	10367.33	3.38	11976.01	3.90
轻度敏感 low sensitive	19392.36	6.32	33127.43	10.80	25219.16	8.22	35858.31	11.68
中度敏感 moderate sensitive	37293.61	12.15	31739.05	10.34	46764.52	15.23	38903.88	12.67
高度敏感 high sensitive	92152.61	30.03	96121.44	31.33	131878.51	42.96	100300.53	32.67
极度敏感 extremely sensitive	143299.25	46.70	126881.79	41.35	92744.37	30.21	119934.75	39.07

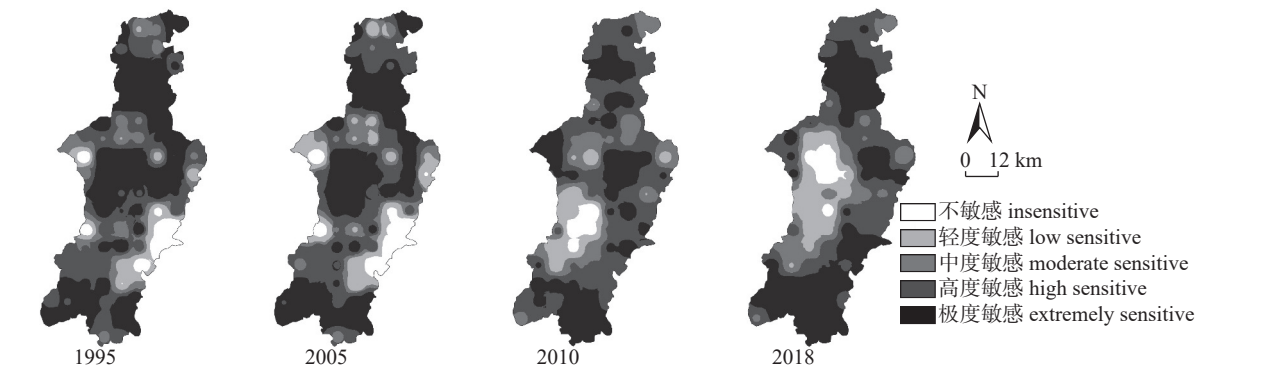


图 5 1995—2018 年滇池流域 LI 敏感性

Fig. 5 LI sensitivity of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

表 7 各因子权重

Tab. 7 Weight of each factor

一级指标 grade 1	权重 weight	二级指标 grade 2	权重 weight	三级指标 grade 3	权重 weight
综合生态敏感性 integrated ecological sensitivity	1.00	LUCC因子 LUCC factor	0.18	—	0.18
		NDVI因子 NDVI factor	0.21	—	0.21
		RB因子 RB factor	0.18	—	0.18
				LPI	0.11
		LI因子 LI factor	0.43	AREA_MN	0.10
				SHDI	0.12
				SHEI	0.10

表 8 1995—2018 年滇池流域生态敏感性区域面积及其占比

Tab. 8 Ecologically sensitive area of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

区域 region	1995		2005		2010		2018	
	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage	面积/hm ² area	占比/% percentage
不敏感 insensitive	4 625.47	1.51	6 073.05	1.98	11 664.42	3.80	11 085.24	3.61
轻度敏感 low sensitive	64 901.16	21.16	73 596.05	24.01	101 791.05	33.16	66 395.15	21.63
中度敏感 moderate sensitive	181 756.10	59.27	175 937.36	57.40	182 591.14	59.48	216 311.61	70.47
高度敏感 high sensitive	55 388.96	18.06	50 872.85	16.60	10 767.98	3.51	13 180.49	4.29
极度敏感 extremely sensitive	0.94	0.00	7.68	0.00	157.70	0.05	0.33	0.00

感性区域增加 2.10%；轻度敏感性区域增加 0.47%；中度敏感性区域增加 11.20%；高度敏感性区减少 13.77%。空间分布上，不敏感区域多分布于流域中上部及边缘地带；轻度敏感性区域流域内均有分布；中度敏感性区域面积占比较大，达到 50% 以上，流域内分散分布；高敏感区集中

分布于流域水系及边缘地带。时间序列上，滇池流域生态敏感性波动变化，但总体呈下降趋势。1995—2018 年不敏感性区域面积翻倍；轻度敏感性区域增加 1 493.99 hm²；中度敏感性区域增加 34 555.51 hm²，流域内均有分布；高度敏感性区域面积减少 42 208.47 hm²。

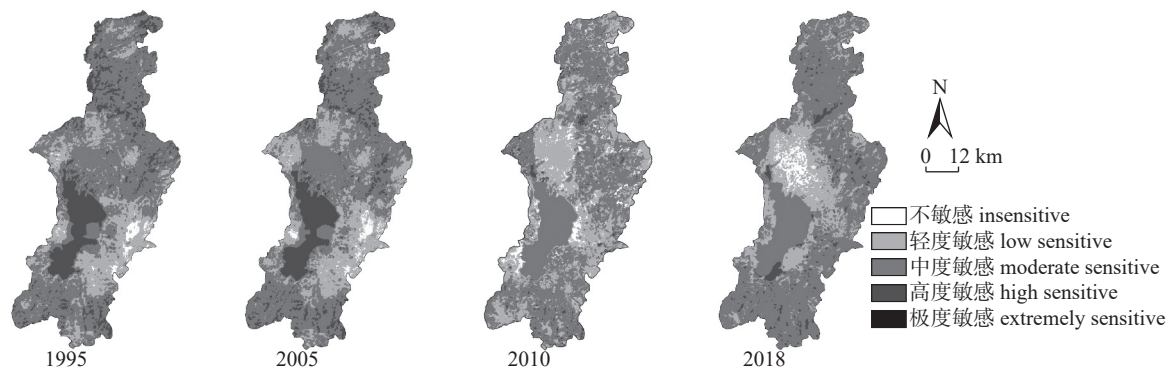


图 6 1995—2018 滇池流域综合生态敏感性

Fig. 6 Integrated ecological sensitivity of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

2.3 生态敏感性重心的转移

1995—2018 年滇池流域生态敏感区重心发生转移,且在 1995—2005 年、2005—2010 年和 2010—2018 年 3 个研究时段内,各敏感区都有不同程度的转移(表 9 和图 7)。其中,极度敏感性区域在 1995—2005 年转移的距离最远,为 48.99 km;不敏感和轻度敏感性区域整体向西北方向转移,中度敏感和极度敏感性区域重心整体向西南方向转移,高度敏感性区域整体向东南方向转移。

表 9 1995—2018 年敏感区重心转移距离

Tab. 9 Center of gravity shift distance in sensitive areas from 1995 to 2018

区域 region	转移距离/km transfer distance		
	1995—2005	2005—2010	2010—2018
不敏感 insensitive	1.69	16.53	8.63
轻度敏感 low sensitive	5.08	2.94	3.10
中度敏感 moderate sensitive	0.08	3.75	0.45
高度敏感 high sensitive	5.10	1.36	2.99
极度敏感 extremely sensitive	48.99	10.19	33.79

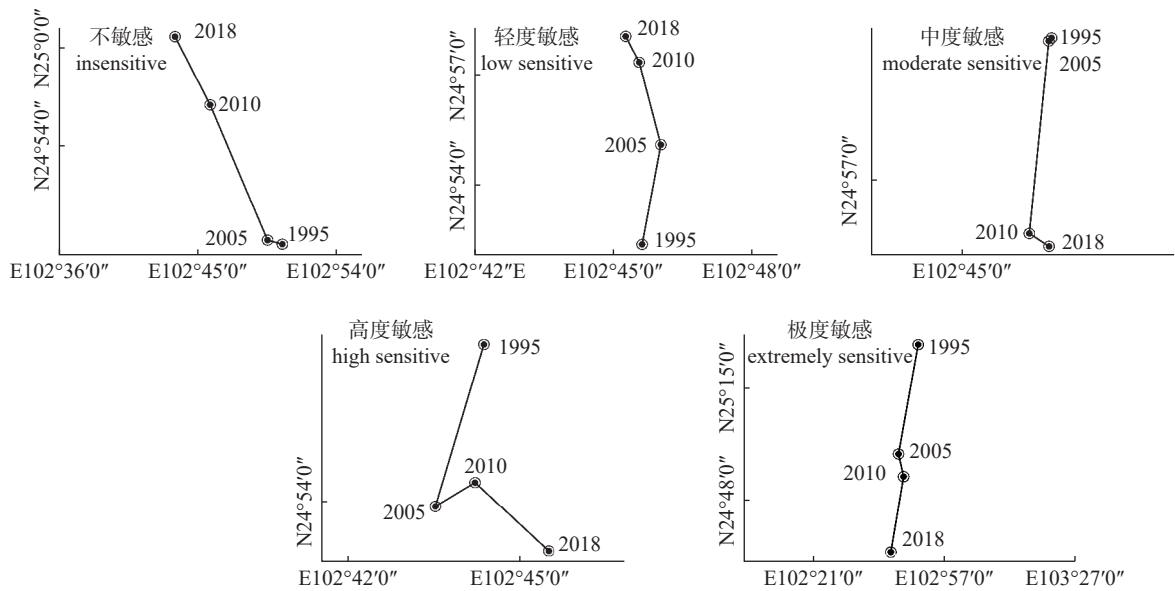


图 7 1995—2018 年滇池流域各敏感区重心转移

Fig. 7 Center of gravity shift in the sensitive areas of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

2.4 生态敏感性核密度分析

1995—2018 年滇池流域生态敏感性核密度分布结果(图 8)表明:从空间分布上,不敏感性密度核多分布于流域边缘;轻度敏感和高度敏感性

密度核在流域内均有分布;中度敏感性密度核分布于流域中上部及南部;极度敏感性密度核集中于流域北部。从时间序列上,1995—2018 年,不敏感性区域首先分布于研究区西北部及南

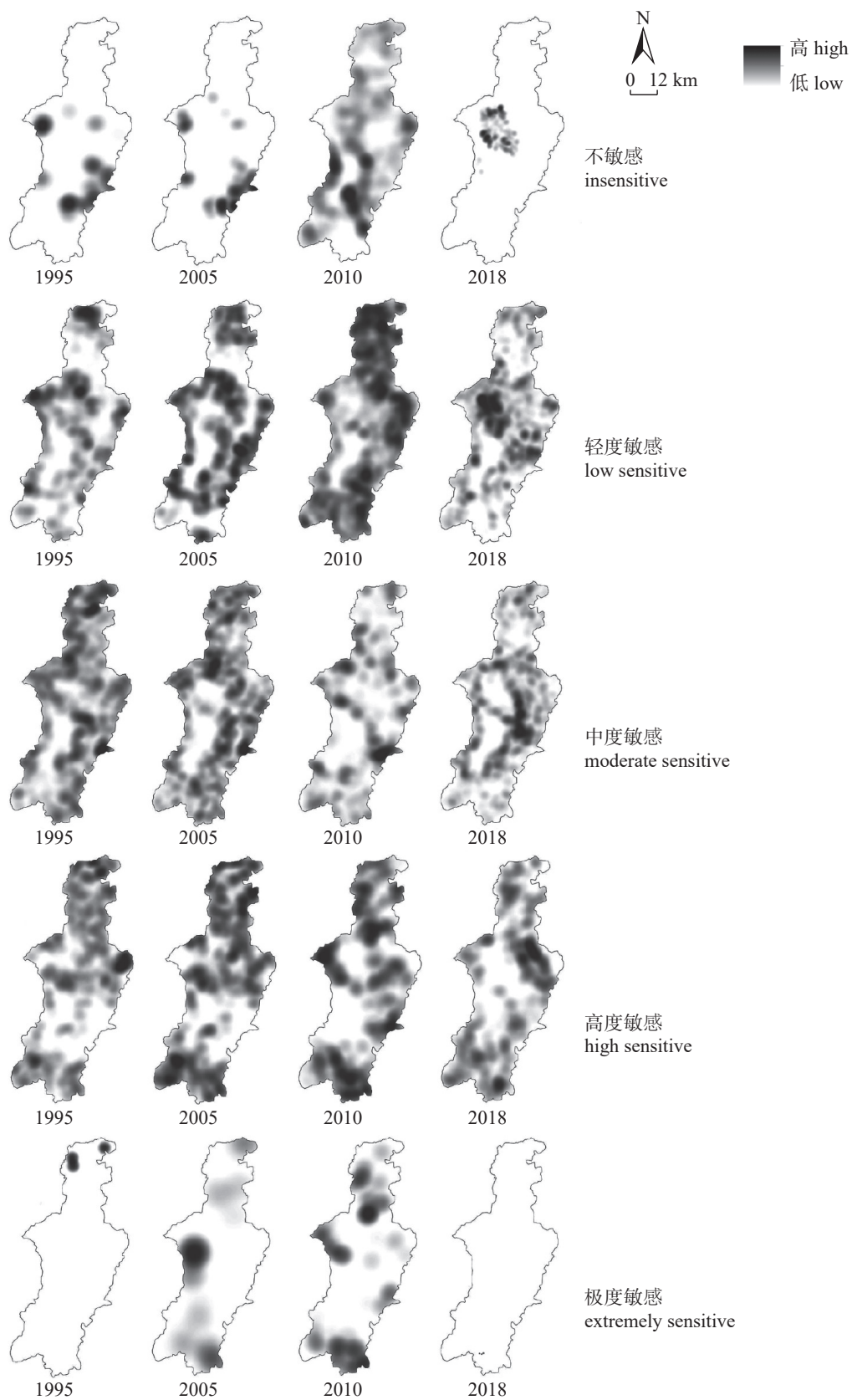


图 8 1995—2018 年滇池流域生态敏感性核密度

Fig. 8 Kernel density estimate of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

部, 随后向北转移; 轻度敏感性区域首先分布于流域北部及边缘, 随后转移至流域中心; 中度敏感性区域首先分布于流域北部及边缘, 随后转移至流域西部; 高度敏感性区域首先分布于流域北部及东部, 随后转移至流域东部及南部边缘地带; 极度敏感性区域首先分布于流域北部, 随后转移至流域南部边缘地带。

2.5 CA-MC 模型综合生态敏感性预测分析

基于 IDRISI 平台中 CROSSSTAB 分析计算 2015 年滇池流域生态敏感性预测图和滇池流域实际生态敏感性各等级预测准确率 (表 10), 根据公式计算得出 2015 年流域生态敏感性模拟的 Kappa

系数为 0.833 0, 预测效果良好, 进一步开展研究区 2026 年生态敏感性演变预测。CA-MC 模型预测结果 (表 11 和图 9) 显示: 滇池流域 2018—2026 年敏感区演变规律与 2010—2018 年相近, 但总体敏感区等级有所上升。至 2026 年, 轻度敏感和中度敏感性区域占比持续减少, 分别降低 0.81% 和 3.55%, 向不敏感和高度敏感性区域转变。尽管不敏感性区域较 2018 年上升 0.41%, 但高度敏感性区域大幅上升, 增加 12 109.75 hm²。反映出 2018—2026 年滇池流域生态敏感性将会上升, 主要是由于 2018—2026 年高度敏感性区域增加, 而生态敏感性等级较低的区域面积下降所致。

表 10 2015 年滇池流域生态敏感性等级实际栅格与模拟栅格对比

Tab. 10 Comparison between actual and simulated raster of ecological sensitivity level in Dianchi Lake Basin in 2015

区域 region	2015年实际栅格 2015 actual raster	2015年预测栅格 2015 forecast raster	预测一致性 predictive consistency	准确率/% accuracy
不敏感 insensitive	69 226	83 109	59 891	86.52
轻度敏感 low sensitive	941 976	884 209	787 643	83.62
中度敏感 moderate sensitive	1 711 023	1 910 461	1 450 886	84.80
高度敏感 high sensitive	665 854	526 134	513 284	77.09
极度敏感 extremely sensitive	5	98	4	80.00

表 11 滇池流域 2010—2026 生态敏感区变化特征

Tab. 11 Variation characteristics of Dianchi Lake Basin from 1995 to 2018

区域 region	2026年预测面积/hm ² predicted area in 2026	2010—2018		2018—2026	
		变化面积/hm ² changed area	变化率/% change rate	变化面积/hm ² changed area	变化率/% change rate
不敏感 insensitive	12 352.80	−579.18	−0.19	1 267.56	0.41
轻度敏感 low sensitive	63 905.80	−35 395.90	−11.53	−2 489.35	−0.81
中度敏感 moderate sensitive	205 411.46	33 720.47	10.98	−10 900.15	−3.55
高度敏感 high sensitive	25 290.23	2 412.50	0.79	12 109.75	3.95
极度敏感 extremely sensitive	12.25	−157.37	−0.05	11.93	0.00

3 讨论

3.1 生态敏感性

本研究选取 LUCC、NDVI、RB 和 LI 因子构建流域综合生态敏感性评价体系, 对滇池流域生态敏感性时空演变特征进行分析, 采用熵值法计算影响因子的权重, 在一定程度上克服了 AHP

层次分析法和特尔斐专家评价法主观性较强的特征^[35]。为验证熵值法的可行性, 研究收集和查阅了滇池流域的相关文献资料^[13, 36-38], 发现与本研究结果基本吻合, 说明本研究方法可信。

3.2 生态敏感性区域重心迁移与核密度

滇池流域生态敏感性区域重心迁移整体表现离散程度较大, 核密度分析发现存在不同等级敏

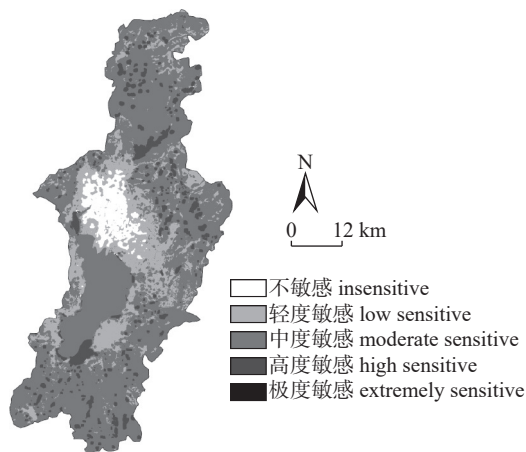


图9 滇池流域2026年综合生态敏感性预测

Fig. 9 Predicted integrated ecological sensitivity of Dianchi Lake Basin in 2026

感性区域分布离散程度较大的现象,推测与昆明市环滇池发展规划有关,现有土地利用模式和城市化发展存在林地和草地缩减,生态敏感性等级将持续下降的风险^[11,39]。

3.3 CA-MC 模型生态敏感性推演

采用 CA-MC 模型能够模拟未来生态敏感性趋势,可剖析生态敏感区域的空间演变^[8-10,32]。本研究表明:2026年,滇池流域轻度敏感和高度敏感区域面积变化出现负增长,而不敏感、高度敏感和极度敏感性区域面积保持正增长,说明生态敏感性有逐步改善趋势;与2018年相比,2026年流域NDVI的总体敏感性区域等级上升。极度敏感、高度敏感和高度敏感性区域主要沿河流水系以及林地和草地分布,而轻度敏感和不敏感性区域主要集中分布于建设用地和周围耕地,空间分布较分散,生态敏感性由水域和林地为核心递减。推演结果与星云湖流域生态敏感研究结果^[11]相似,反映出高原流域生态敏感性等级的分布特征。

3.4 对策与建议

流域生态环境的可持续发展,首先要保证生态系统的完整性和服务功能的全面性。以地形地貌为基底,以环境保护为核心,将滇池流域划分为4个生态分区,并根据不同敏感性建设要求提出对应的控制及建设意见^[30-40]。将不敏感性区域划定为适宜建设区,进行合理城市更新改造;将轻度敏感性区域划定为生态缓冲区,可对其适度开发、建设绿色基础设施;将中度敏感性区域划定为生态缓冲区,以保护为主,允许少量适度开

发建设,增加其森林覆盖率;将极度敏感和高度敏感性区域划定为生态保护区,原则上禁止无关生态保护的建設活动,增加保护区面积和力度。

4 结论

1995—2018年,滇池流域单因子生态敏感性变化趋势多样,LUCC、RB和LI敏感性总体下降,NDVI敏感性总体升高。流域综合生态敏感性呈波动下降趋势,表现为极度敏感和高度敏感性区域向中度敏感和低度敏感性区域转化;生态敏感性重心转移差异显著,不敏感和轻度敏感性区域向西北方向迁移,中度敏感和极度敏感性区域向西南方向迁移,高度敏感性区向东南方向迁移,各敏感区重心迁移呈波动变化,但极度敏感性区域迁移变化最大,其次是不敏感性区域。各个敏感区域核密度分布呈现不规则迁移,但都呈现多核到单核、复杂到简单转化的趋势。CA-MC模型推演2018—2026年滇池流域总体敏感性等级呈缓慢波动上升趋势。

[参考文献]

- [1] 熊善高,秦昌波,于雷,等.基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究:以南宁市为例[J].生态学报,2018,38(22):7899. DOI: 10.5846/stxb201802090351.
- [2] 何苏玲,邹凤琼,王金亮.基于AHP和MSE赋权法的龙南县生态敏感性评价[J].生态学报,2021,40(9):2927. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202109.022.
- [3] 刘海龙,王炜桥,王跃飞,等.汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J].生态学报,2021,41(10):3952. DOI: 10.5846/stxb202101190204.
- [4] 何云玲,熊巧利,罗贤,等.基于NDVI滇池水华特征的时空变化研究[J].生态环境学报,2019,28(3):555. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.03.016.
- [5] 魏伟,周陶,郭泽呈,等.基于遥感指数的干旱内陆河流域土地生态敏感性时空演变特征:以石羊河流域武威市为例[J].生态学报,2020,39(9):3068. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202009.022.
- [6] 朱萌,马孝义,刘雪娇.基于马尔科夫模型的武功县土地利用/覆被动态变化研究[J].水土保持研究,2013,20(5):64.
- [7] 叶娇,罗莉,肖志峰.基于CA-Markov模型的东江流域土地利用动态模拟[J].地理空间信息,2020,18(9):102. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2020.09.026.
- [8] 井云清,张飞,张月.基于CA-Markov模型的艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化及预测[J].应用生态学报,2016,27(11):3649. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201611.027.
- [9] 李中杰,郑一新,张大为,等.滇池流域近20年社会经济发展对水环境的影响[J].湖泊科学,2012,24(6):875. DOI: 10.18307/2012.0610.
- [10] 王小伦,刘雁,张玉,等.基于CA-Markov模型的吉林省西部土地利用/覆被变化研究及预测[J].科学技术与工

- 程, 2021, 21(19): 7942. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2021.19.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2021.19.012).
- [11] 李益敏, 管成文, 朱军. 基于GIS的星云湖流域生态敏感性评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 266. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.042](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.042).
- [12] 陈佳楠, 唐代生, 贾剑波. 基于MCE-CA-Markov模型的森林景观格局演变和模拟预测: 以宁乡市为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(9): 127. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.09.014](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.09.014).
- [13] 邓伟明, 雷坤, 苏会东, 等. 2008年滇池流域水环境承载力评估[J]. 环境科学研究, 2012, 25(4): 372. DOI: [10.13198/j.res.2012.04.19.dengwm.006](https://doi.org/10.13198/j.res.2012.04.19.dengwm.006).
- [14] 刘瑞华, 曹暄林. 滇池20年污染治理实践与探索[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(6): 31. DOI: [10.13623/j.cnki.hk-dk.2017.06.007](https://doi.org/10.13623/j.cnki.hk-dk.2017.06.007).
- [15] 黄杰, 王英才, 邓晓庆, 等. 滇池水质及营养状态时空变化特征[J]. 人民长江, 2022, 53(6): 61. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.06.009](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.06.009).
- [16] 郑丙辉, 鄧永宽, 郑凡东, 等. 滇池流域生态环境动态变化研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(2): 16. DOI: [10.13198/j.res.2002.02.18.zhengbh.005](https://doi.org/10.13198/j.res.2002.02.18.zhengbh.005).
- [17] 冯宁, 毛锋, 李晓阳, 等. 滇池生态安全综合评估研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 282. DOI: [10.13227/j.hjks.2010.02.002](https://doi.org/10.13227/j.hjks.2010.02.002).
- [18] 陈悦, 罗明没, 李尚磷, 等. 基于荧光定量PCR技术分析滇池沉积物产甲烷菌空间分布特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(1): 132. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202002015](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202002015).
- [19] 黄贝. 滇池流域森林资源现状分析与评价[J]. 林业建设, 2019(3): 66.
- [20] 廖悦, 张刘东, 陈晨, 等. 滇池流域NDVI动态变化特征及其对气候的响应[J]. 农业工程, 2021, 11(9): 34. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1795.2021.09.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1795.2021.09.008).
- [21] 丁雨琛, 冯长春, 王利伟. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究: 以重庆市涪陵区义和镇为例[J]. 地理科学进展, 2016, 35(7): 851. DOI: [10.18306/dlkxjz.2016.07.006](https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2016.07.006).
- [22] 董玉红, 刘世梁, 安南南, 等. 基于景观指数和空间自相关的吉林大安市景观格局动态研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1860. DOI: [10.11849/zrzyxb.2015.11.007](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2015.11.007).
- [23] 吴金华, 房世峰, 刘宝军, 等. 乌裕尔河—双阳河流域湿地景观格局演变及其驱动机制[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4279. DOI: [10.5846/stxb201911042316](https://doi.org/10.5846/stxb201911042316).
- [24] 邓越, 唐代生, 李裕元, 等. 亚热带典型农林混合流域河岸带景观格局对河流磷输出的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 64. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.010](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.010).
- [25] 汪桂芳, 穆博, 宋培豪, 等. 基于无人机航测的漯河市土地利用景观格局尺度效应[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5158. DOI: [10.5846/stxb201705190927](https://doi.org/10.5846/stxb201705190927).
- [26] 王娜, 李满春, 陈振杰, 等. 生态网络约束下的长沙市景观格局模拟[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 269. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2022.03.034](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2022.03.034).
- [27] 黄楚珩, 蒋志云, 杨志广, 等. 基于熵值法和层次分析法的广东省水资源安全评价及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 140. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.21](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.21).
- [28] 沈雨婷, 金洪飞. 中国地方政府债务风险预警体系研究: 基于层次分析法与熵值法分析[J]. 当代财经, 2019(6): 34. DOI: [10.13676/j.cnki.cn36-1030/f.2019.06.004](https://doi.org/10.13676/j.cnki.cn36-1030/f.2019.06.004).
- [29] 吴帛阳. 基于生态敏感性评价的尧山自然保护区生态保护对策分析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [30] XIE Z X, YAN J. Kernel density estimation of traffic accidents in a network space[J]. Computers Environment & Urban Systems, 2008, 32(5): 396. DOI: [10.1016/j.compenvurbsys.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.05.001).
- [31] ELGAMMAL A, DURAISWAMI R, HARWOOD D, et al. Background and foreground modeling using nonparametric kernel density estimation for visual surveillance[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(7): 1151. DOI: [10.1109/JPROC.2002.801448](https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.801448).
- [32] 蔡雪娇, 吴志峰, 程炯. 基于核密度估算的路网格局与景观破碎化分析[J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 158. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2012.0035](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2012.0035).
- [33] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于MCE-CA-Markov的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.035](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.035).
- [34] DA CUNHA E R, SANTOS C A G, DA SILVA R M, et al. Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil[J]. Land Use Policy, 2020, 101(1): 5896. DOI: [10.1016/j.landusepol.2020.105141](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105141).
- [35] 杨蕴雪, 张艳芳. 基于空间距离指数的延河流域生态敏感性时空演变特征[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 229. DOI: [10.6046/zrzyyg.2020281](https://doi.org/10.6046/zrzyyg.2020281).
- [36] 付磊, 李增华. 近20年滇池流域土地利用/覆被变化过程、特征及其生态价值变化研究[J]. 生态经济, 2022, 38(6): 183.
- [37] 武泽民, 余哲修, 李瑶, 等. 滇池流域土地利用演变及景观生态安全评价研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(3): 122. DOI: [10.11929/j.swfu.202004008](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004008).
- [38] 许冬凡, 张加龙, 鲍瑞, 等. 基于GEE的滇池流域土地覆盖变化及建设用地扩张驱动力分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(1): 142. DOI: [10.11929/j.swfu.202101026](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202101026).
- [39] 曹钊豪, 张京生, 王鑫宇, 等. 山地城市绿地适宜性评价及布局优化研究: 以新县为例[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(3): 35. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1212.2022.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1212.2022.03.009).
- [40] 李振亚, 魏伟, 周亮, 等. 中国陆地生态敏感性时空演变特征[J]. 地理学报, 2022, 77(1): 150. DOI: [10.11821/dlxb202201011](https://doi.org/10.11821/dlxb202201011).

责任编辑: 何承刚