

闻国静, 王妍, 刘云根, 等. 典型岩溶湖泊湿地流域景观格局动态变化及趋势预测 [J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 249-258.

DOI: [10.11932/karst2021y41](https://doi.org/10.11932/karst2021y41)

典型岩溶湖泊湿地流域景观格局动态变化及趋势预测

闻国静^{1,2,3}, 王 妍^{1,2}, 刘云根^{1,2}, 侯 磊^{1,2}

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2. 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224; 3. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 勐腊 666303)

摘要: 岩溶湖泊湿地流域作为景观格局变化的热点研究区域, 探讨景观格局动态变化及预测趋势, 为岩溶流域生态安全研究提供科学依据。应用遥感与地理信息系统技术, 结合普者黑岩溶湖泊湿地流域实际情况, 分别对该地区 1990、1995、2000、2005、2010、2015 年 6 期遥感影像进行分类、解译, 系统地获取地区景观格局状况, 分析动态变化特征, 并运用 CA-Markov 模型对未来湿地景观格局进行模拟预测。结果表明: 1990—2015 年普者黑岩溶湿地流域景观格局随时间变化显著, 景观破碎化程度总体呈现增加趋势, 斑块数(NP)从 861 增加到 889, 景观类型的优势斑块面积在逐渐增加, 而多样性指数从 1.064 下降到 0.966; 2020—2030 年普者黑岩溶湿地流域建筑用地、农地和湿地景观类型面积在增加, 农地和林地在减少, 其中, 较为突出的是建筑用地占有率为由 2.79% 上升到 2.97%, 农地占有率为 60.12% 增加到 60.74%, 湿地占有率为 6.67% 上升 7.02%, 而林地占有率为由 26.70% 下降到 26.40%。景观格局进行预测可以发现湿地面积、建筑用地面积和农地变化幅度最大, 本文相关研究和预测结果可为普者黑流域生态保护提供一定的建议和参考。

关键词: CA-Markov 模型; 岩溶湖泊湿地; 景观格局; 模拟与预测

中图分类号: P901; X171.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 02-0249-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

0 引言

湿地在生态系统中具有多种生态功能和生态角色而被广泛称为“地球之肾”^[1], 岩溶湖泊湿地作为一种特殊的湿地类型, 具有独特的水文地质结构^[2]。景观格局是景观生态学中的一个分支^[3], 是指大小和形状各异的景观要素在空间上的排列和组合, 它能根据生态系统的时空分布及驱动因子, 推出景观变化的原因并预测景观发展趋势^[4-5], 而景观格局指数是景观生态学中使用较广泛的定量研究方法之一^[6], 通过量化指标分析湿地格局变化特征和规律, 为湿地资源保护提方法理论, 这对流域景观生态管理和

保育政策的制定具有十分重要的意义^[7]。近年来受全球气候变化及人类活动影响, 使该研究区景观格局遭到严重破坏^[8-9] 湿地面积在持续减少, 景观格局斑块破碎化程度增加, 湿地生态系统脆弱性加剧^[10]。与此同时, 前人对岩溶湖泊湿地的研究主要集中在岩溶湿地生态水文循环过程及水质污染风险评价等方面, 且主要集中于岩溶湿地面积分布更为连片的地区^[11-13], 而对滇东南普者黑地区的岩溶湿地景观的研究较少, 尤其是关于普者黑湿地生态系统的功能、格局及动态演变规律特征关注的人很少。

本文以滇东南典型岩溶湖泊湿地——普者黑流域为研究对象, 采用景观破碎化指数、景观形状指数

基金项目: 国家自然科学基金项目(3156023, 51469030, 31760245)

第一作者简介: 闻国静(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事湿地生态修复的研究工作。E-mail: wenguojing920@126.com。

通信作者: 王妍(1980—), 女, 副教授, 主要从事生态修复及景观生态的研究工作。E-mail: wycaf@126.com。

收稿日期: 2020—08—10

和景观多样性指数对研究区景观格局变化规律进行分析, 基于 CA-Markov 模型研究湿地景观格局随时间的变化过程并对未来景观格局变化进行预测, 可以揭示湿地景观格局变化的规律和机制, 以期从景观格局角度对未来流域内土地利用类型变化提供一定的借鉴与参考。

1 研究区概况

普者黑位于云南省丘北县, 距县城约 11 km, 地理坐标为东经 103°55'~104°13', 北纬 24°05'~24°12', 是典型的岩溶地区湖泊(图 1)。该流域属于低纬度

季风气候, 多年平均气温 16.4 °C, 平均降雨量 1 206.8 mm。流域内共有保护植物 10 种, 其中国家级保护植被 2 种。地貌景观为国内罕见的高原喀斯特峰林、峰丛、湖群组合, 湿地内分布有 54 个湖泊, 312 座孤峰, 83 个溶洞, 15 条河流和 120 km 的地下暗河。研究区特殊的水文地质条件在云贵高原湖泊湿地及西南部滇黔桂喀斯特地貌中都极具代表性, 是典型的生态敏感区, 具有较高的研究及保护价值。但近年来, 由于发展旅游业不合理的开发和人为破坏, 导致普者黑湿地遭受到很大的破坏, 湿地生态系统恢复迫在眉睫。

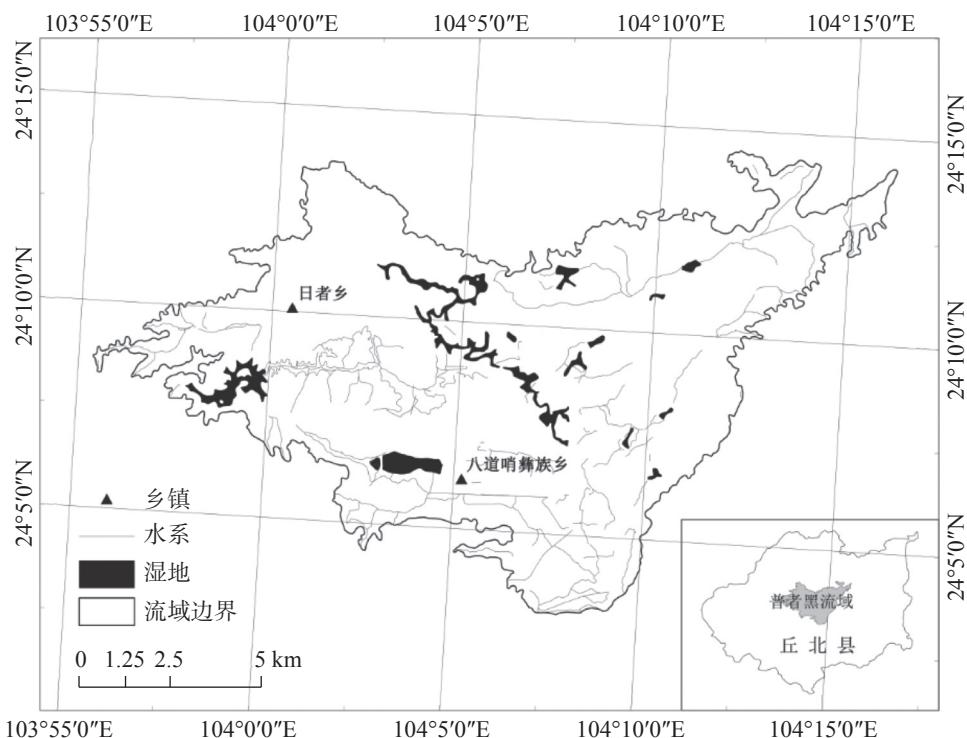


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of the study area

2 数据获取与研究方法

2.1 数据来源及预处理

为研究普者黑湿地流域景观格局动态变化, 本文收集 TM(1990 年、1995 年、2000 年)、ETM(2005 年、2010 年)以及 OLI(2015) 年等 6 期 10 月中旬遥感影像数据源, 且影像上云量较少, 图片清晰, 空间分辨率均为 30 m, 统一投影坐标信息为 WGS_84_UTM_zone_50N。结合野外地面控制点调查和地形

资料, 基于光谱特征及地物纹理特征等信息, 同时参考 GB/T21010-2007《土地利用现状分类》, 将研究区域标准假彩色合成影像进行手工解译和分类(图 2), 景观类型分为 6 类: 建筑用地、农地、林地、湿地、园地、未利用地等。在完成图像分类后, 为了确保研究区土地利用类型解译的准确性, 采用研究区高空间分辨率遥感图像进行抽样、利用地面 GPS 点进行现场采样, 并对研究区每一期图像分类精度进行计算如表 1 所示。

以 1990–2015 年 6 期土地利用数据为基础, 利

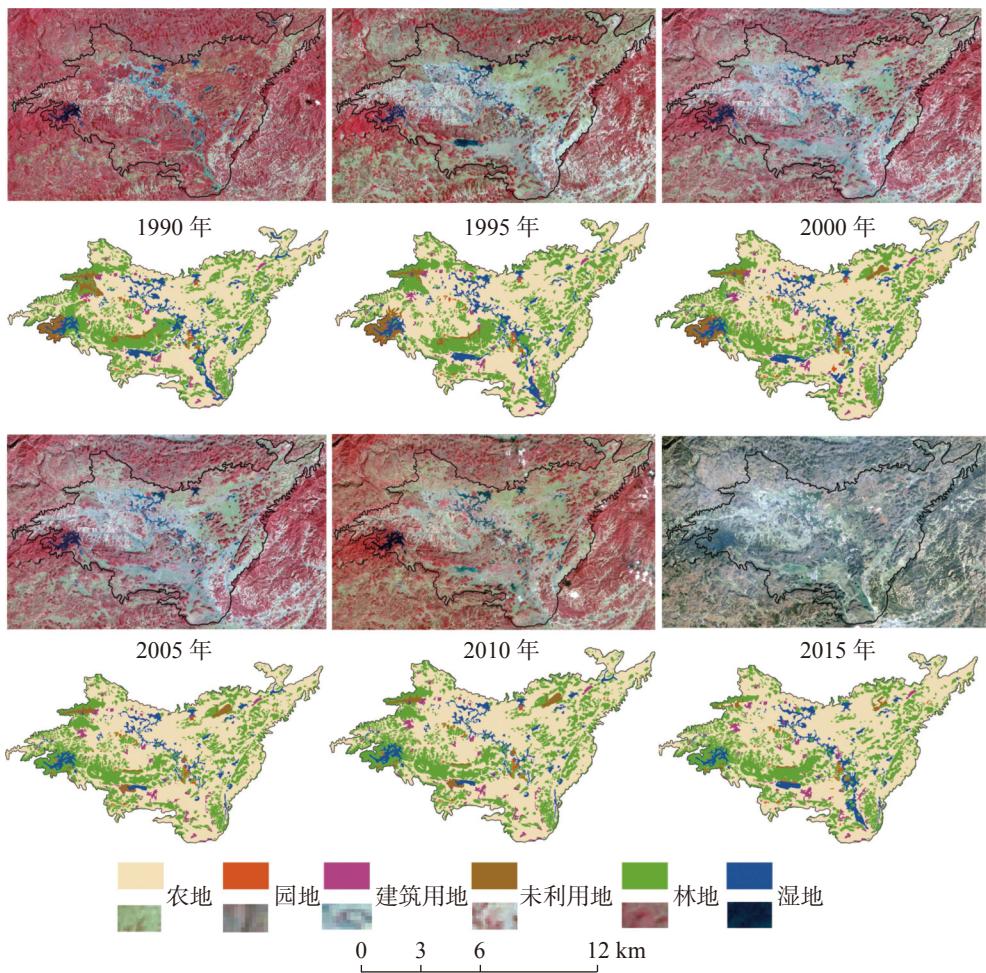


图 2 1990—2015 年普者黑流域土地利用动态变化及对应假彩色合成影像

Fig. 2 Dynamic change of land use and synthetic image of corresponding false color in Puzhehei watershed from 1990 to 2015

表 1 不同年份普者黑流域土地利用类型分类精度

Table 1 Classification precision of land use of Puzhehei basin in different year

时间(年)	1990	1995	2000	2005	2010	2015
影像类型	Landsat TM	Landsat TM	Landsat ETM	Landsat TM	Landsat TM	Landsat OLI
Kappa 系数	0.78	0.82	0.85	0.82	0.84	0.87

用 Fragstas3.4 计算出斑块数(NP)、板块密度(PD)、最大斑块数(LPI)、边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)、景观聚集度(CONTAG)、香浓多样性指数(SHDI)、香浓均匀度指数(SHEI)等景观格局指数, 同时使用 Arcmap10.1 和 IDRISI 17.0 软件完成数据解译和格式之间转换, 最终生成可用于 CA-Markov 模型分析的栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 CA-Markov 模型

Markov 模型是一种基于栅格的空间概率模型,

也是一种用来模拟植被动态和土地利用格局变化的模型。在土地利用变化研究中, 土地利用类型之间相互转移的面积或比例即为状态转移矩阵, 用下式对土地利用状态进行预测^[14]:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为状态 S_t 转为 S_{t+1} 的状态转移概率, 可由下式表示:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $0 \leq P_{ij} < 1$, 且 $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)。

ArcGIS 软件中, 将土地利用类型矢量数据.shp 格式转成栅格数据, 栅格数据大小设置为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 利用 Conversion Tools 工具将栅格数据转换成 ASCII 文件, 并在 IDRISI 软件中将 ASCII 文件转为.rst 格式的图件。

使用 IDRISI 软件对数据进行处理, 具体处理过程如下:

(1) 划分元胞大小和构建滤波器

根据研究区面积和土地利用类型, 在模拟过程中选择元胞大小 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 能较好地模拟出研究区土地利用变化情况, 因此, 选择元胞大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 选择栅格单元为 $5 \times 5 \text{ m}$ 的元胞滤波器。

(2) 模型运行时间和元胞迭代次数

基于 1990 年、2000 年和 2010 年 3 期土地利用数据, 计算出 1990–2000 年和 2000–2010 年土地利用类型转移矩阵, 结合土地利用转移适宜性图像集, 以 1990 年为起始年, CA 循环次数为 10, 结合 1990–2000 年和 2000–2010 年土地利用转移概率理论, 预测 2020 年、2035 年土地利用变化类型。

2.2.2 Kappa 检验模型

Kappa 指数一般被用来评价两幅图件的一致性或者用于遥感解译的精度评价^[15]。

$$I_r = \frac{(P_o - P_c)}{(P_p - P_c)} \quad (3)$$

式中: I_r 为 Kappa 指数; P_o 为正确模拟比例; P_c 为理想分类情况下的正确模拟比例。在研究中, Kappa 系数标准如表 2

表 2 Kappa 系数分类标准^[16–18]

Table 2 Classification criteria of Kappa coefficient

Kappa系数	一致性程度
<0	很差
0~0.20	微弱
0.21~0.40	弱
0.41~0.60	适中
0.61~0.80	显著
0.81~1.00	最佳

3 数据结果与分析

3.1 普者黑流域景观格局变化分析

3.1.1 景观类型水平的格局特征分析

从各景观类型的面积和斑块数(表 3)可看出, 从 1990–2015 年建筑用地、农地景观类型面积在不断增加, 林地、湿地和未利用地景观类型面积在不断减少。其中, 随着建筑用地景观面积从 549.05 hm^2 增加到 784.77 hm^2 , 建筑用地斑块数目也由 59 增加到 63; 同时, 农地景观面积 $19\ 670.03 \text{ hm}^2$ 增加到 $20\ 804.27 \text{ hm}^2$ 斑块数目由 107 减少到 84。表中显示, 从 1990 年到 2000 年, 林地景观类型面积在逐渐减少, 由于 2003 年国家实施退耕还林政策, 使得 2005 年林地面积相比 2000 年增加 264.73 hm^2 , 未利用地景观类型面积减少 329.47 hm^2 。总体来说, 农地的景观类型面积在逐年递增, 但越往后增长速度越慢。2010 年下半年, 丘北县发生严重干旱, 有部分农业人口外出打工, 农地的利用率有所下降。从 1990 年到 2005 年, 湿地景观面积在不断减少, 2000 年至 2005 期间,

表 3 普者黑岩溶湿地流域景观类型数量与面积变化 (1990–2015)
Table 3 Change of number and area of the Puzhehei karst wetland landscape (1990–2015)

土地利用 类型	1990年		1995年		2000年		2005年		2010年		2015年	
	斑块数 (NP)	面积/ hm^2										
建设用地	59	549.05	58	621.82	60	674.26	62	706.77	65	756.37	63	784.77
林地	550	9 369.64	529	9 343.73	613	9 180.54	594	9 423.89	598	9 165.24	589	9 177.44
农地	107	19 670.03	103	19 818.32	102	20 045.42	95	20 695.63	89	20 777.79	84	20 804.27
湿地	91	2 319.14	89	2 241.09	110	2 190.14	63	1 573.34	60	1 848.94	62	1 916.19
未利用地	7	1 024.34	6	898.55	5	838.81	7	530.71	6	376.1	10	243.12
园地	47	236.69	45	245.39	46	239.70	48	238.56	51	244.45	51	243.10
合计	861	33 168.90	830	33 168.90	936	33 168.90	869	33 168.90	869	33 168.90	859	33 168.90

降雨量减少导致湿地面积不断萎缩。1990 年到 2015 年湿地面积减少了 402.95 hm², 到 2010 年, 在普者黑流域下游修建湿地公园, 才让这种递减情况有所改善。

3.1.2 景观水平格局特征分析

3.1.2.1 景观破碎化指数分析

斑块数量反映景观的空间格局, 用来描述整个景观的异质性, 其值大小与景观的破碎度呈正相关, NP 越大, 表明景观的破碎度就越高^[19]。由表 4 可以看出, 从 1990 年到 2015 年, 普者黑流域景观破碎化现象进一步加深, 景观斑块数、斑块密度和最大斑块数指数在增加。其中, 2000 年景观斑块数达到最大值 936。斑块密度指数从 1990 年的 2.596 上升到 2000 年的 2.822, 之后又减少到 2015 年的 2.69, 最大斑块数值反映人类活动的方向和强弱, 随着斑块数和斑块密度增加, 最大斑块数也在不断增大, 1990—2015 年最大斑块数由 58.345 增加到 62.036, 表明人类活动对普者黑流域景观格局的影响趋于复杂, 破碎化程度在不断加深。

表 4 普者黑岩溶湖泊湿地流域景观破碎化指数特征

Table 4 Fragmentation index of the Puzhehei karst wetland landscape

	斑块数(NP)/个	斑块密度(PD)	最大斑块数(LPI)/个
1990年	861	2.596	58.345
1995年	830	2.502	58.911
2000年	936	2.822	59.404
2005年	869	2.62	61.797
2010年	879	2.62	61.218
2015年	889	2.69	62.036

3.1.2.2 景观形状指数分析

从图 3 可以看出, 边缘密度与景观形状指数呈现上升趋势, 说明景观类型的优势斑块面积在逐渐增加^[20]。景观聚集度指数描述的是景观中不同斑块的延展趋势, 高的聚集度说明景观中存在某种优势斑块类型, 形成良好的连接性, 反之说明景观类型密集组合, 景观的破碎化程度较高^[21]。1990—2015 年边缘密度从 47.552 增加到 48.063, 而景观形状指数由 30.175 下降到 29.625, 2000 年边缘密度和景观形状指数都达到最大值, 分别为 49.987 和 31.012, 这是由于 2000 年林地、湿地面积在不断减少, 景观形状指数增加, 使景观结构变得复杂。1990 年景观聚集度

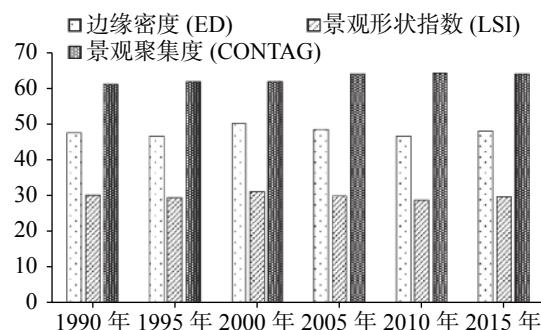


图 3 普者黑岩溶湖泊湿地流域景观形状指数特征
Fig. 3 Shape index of the Puzhehei karst wetland landscape

为 60.983, 而 2015 年景观聚集度为 63.984, 其中, 2010 年景观聚集度最大 64.001, 说明景观中存在某种优势斑块, 景观斑块的物理连接性在增加, 进一步分析出农地、林地和湿地对景观聚集度指数的增加贡献最大。同时说明农地、林地和湿地物理连接性在不断改善, 普者黑国家湿地公园工程以及退耕还林政策起到一定的作用。

3.1.2.3 景观多样性指数分析

景观多样性指数一般通过丰富度、均匀度来体现。丰富度是指景观中不同景观类型的种类, 而均匀度是指景观中不同景观类型分布的均匀程度^[22]。不同类型斑块的面积分布越均匀, 香浓均匀度指数就越大; 景观类型越丰富, 破碎化程度越高, 香浓多样性指数的值就越大^[23]。从图 4 可以看出, 1990 年和 2015 年多样性指数分别为 1.064、0.966, 而均匀度指数为 0.594、0.539, 说明 1990—2015 年期间研究区景观多样性有小幅度增加, 而均匀度略有下降, 即 2015 年研究区景观破碎化程度较高, 不同类型斑块的面积趋向于不均匀, 景观抗干扰能力和生态系统稳定性在不断降低。2010 年农地和未利用土地的减少以及湿地的增加直接反映出斑块类型一直趋于复

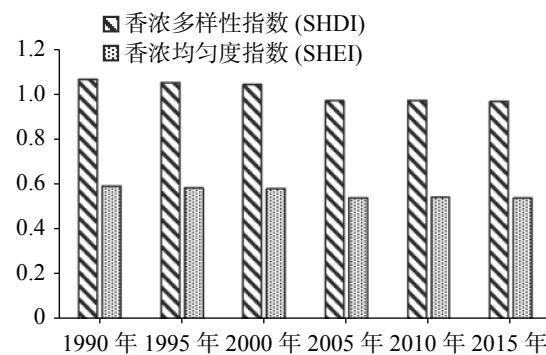


图 4 普者黑岩溶湖泊湿地流域景观多样性指数特征
Fig. 4 Diversity index of the Puzhehei karst wetland landscape

杂化趋势, 到 2015 年这种趋势得到一定改善。

3.2 运用CA-MARKOV 模型进行景观格局预测

3.2.1 普者黑湿地流域景观格局预测及精度评价

为检验 CA-Markov 模型预测土地利用变化的精确度, 选用 2010 年普者黑流域土地利用模拟预测图与 2010 年实际解译得到的地类图做精度检验, 将模拟结果中各土地利用类型面积与实际面积进行对比(表 5)。通过比较发现, CA-Markov 模型能够较好模拟出各土地利用类型的变化趋势, 其中, 农地、林地和湿地面积模拟正确率都达到 90% 以上, 建筑用地和未利用地模拟预测面积正确率也在 80% 以上, 但园地面积与模拟预测面积出入较大, 其原因是园地所占总面积的比例较小, 其面积稍微发生变化产生的影响都会比较显著。以土地利用总面积来计算, 预测值与实际值的相似度达到 90% 以上, 同时在空间上, 将 2015 年普者黑流域的土地利用预测图和土地利用现状图进行叠加统计作空间位置的精度验证, 得出 Kappa 系数为 0.80, 达到显著相关精度要求。表明模拟结果具有较好的可靠性, 预测值达到精度要求, 用 IDRISI 软件的 CA-Markov 模型可以较准确对土地利用进行模拟预测。

表 5 2010 年普者黑流域土地利用模拟与实际结果对比

Table 5 Comparison between simulation of land use and actual land use in the Puzhehei karst wetland in 2010

类型	预测面 积/hm ²	预测占 有率/%	实际面 积/hm ²	实际占 有率/%	模拟正 确率%
建筑面积	650.80	1.96	554.81	1.67	85.25
农地	20 053.81	60.42	20 143.46	60.73	99.55
湿地	2 374.33	7.15	2 190.14	6.61	92.24
林地	8 908.94	26.84	9 180.61	27.68	97.04
园地	399.89	0.91	239.70	0.72	59.94
未利用地	1 001.26	2.72	860.18	2.59	85.91
合计	33 189.03	100	33 168.90	100	99.93

3.2.2 普者黑湿地流域景观格局预测结果分析

根据模拟预测结果表 6 得出, 未来 20 年普者黑流域景观类型变化总体呈现出建设用地、农地和湿地增加, 林地、园地和未利用地减少的趋势。其中, 较为突出的是建设用地占有率为 2.79% 上升到 2.97%, 农地占有率为 60.12% 增加到 60.74%, 湿地占

表 6 普者黑岩溶湖泊湿地流域 2020 年和 2030 年土地利用预测结果

Table 6 Prediction of land use of the Puzhehei karst wetland in 2020 and 2030

类型	2020年 面积/hm ²	预测占 有率/%	2030年 面积/hm ²	预测占 有率/%
建筑用地	928.99	2.79	980.07	2.97
农地	20 043.94	60.12	20 250.58	60.74
湿地	2 224.92	6.67	2 339.77	7.02
林地	8 901.94	26.70	8 801.94	26.40
园地	726.10	2.18	593.53	1.78
未利用地	511.37	1.53	371.37	1.11
合计	33 337.26	100	33 337.26	100

有率 6.67% 上升 7.02%, 而林地占有率为 26.70% 下降到 26.40%, 从而改变普者黑岩溶湖泊湿地流域景观格局。从 2010 年到 2020 年, 普者黑流域建筑用地、湿地和园地分别增加 374.18、34.78 和 486.4 hm², 而农地、林地和未利用地分别减少 99.52、278.67 和 348.81 hm²。不同于先前 20 年农地增加以及湿地减少的变化趋势, 这说明建筑用地、湿地增加占用农地, 同时湿地增加还可能受到政策因素影响^[24]。2020–2030 年普者黑流域建筑用地、农地和湿地面积依次增加 51.08、206.64 和 114.85 hm², 园地、林地和未利用地依次减少 100、132.57 和 140 hm²。将预测结果(表 6), 与 2010 年景观指数进行对比, 结果表明从 2010 年到 2020 年直至 2030 年, 普者黑流域斑块数目在逐渐增加达到 999 个, 说明景观格局更加复杂, 景观破碎化程度加深; 同时, 边缘密度和景观形状指数有较为明显的增加, 景观聚合度上升, 反映了优势斑块的面积进一步增加; 香浓多样性指数增加表明 2030 年研究区景观多样化趋于复杂, 破碎化程度加深(表 7)。

从空间分布(图 5)来看, 未来 20 年普者黑流域土地利用格局显著变化。到 2020 年增加的建设用地主要是在现有建设用地的基础上扩张, 变化主要集中在落水洞景区周围及国家湿地公园景区周边的新村、新城等, 并伴随着交通要道向周边蔓延, 同时, 八道哨、日者等乡镇建设用地也有所增加, 尤其明显的是位于普者黑村、矣堵村、石羊坡村的建设用地增加, 这一过程将会大量占用未利用地和湿地。林地面积减少主要集中在该流域的西面红旗水库周围, 同时, 湿地公园下游、上游的湿地面积在不断增加,

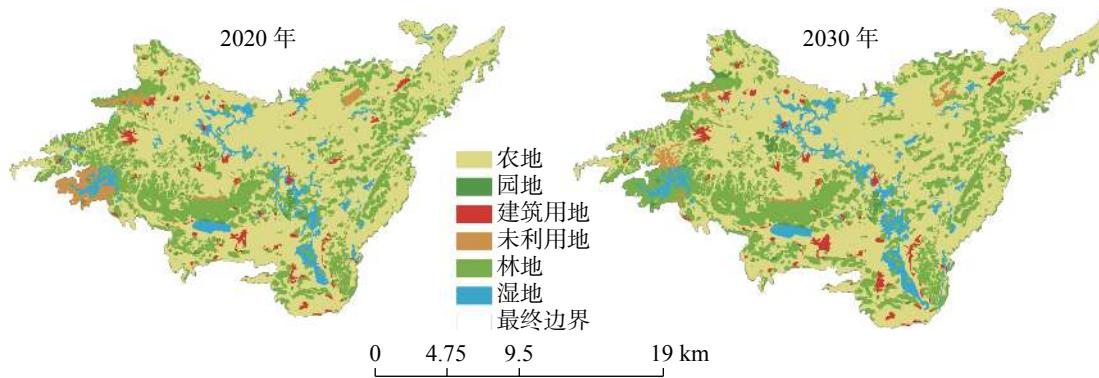


图 5 普者黑岩溶湖泊湿地流域 2020 年与 2030 年景观格局预测对比图

Fig. 5 Comparison between landscape patterns of the Puzhehei karst wetland in 2020 and 2030

表 7 普者黑岩溶湖泊湿地流域 2010 年与 2020 年、2030 年景观水平指数对比

Table 7 Comparison among the level index of the Puzhehei karst wetland landscape in 2010, 2020 and 2030

年份	景观指数							
	NP	PD	LPI	ED	LSI	CONTAG	SHDI	SHEI
2010年	879	2.620 0	61.217 5	46.424 5	28.634 9	64.009 5	0.971 9	0.542 4
2020年	989	2.690 7	62.693 6	48.362 1	29.675 2	64.579 1	0.946 9	0.529 7
2030年	999	2.701 0	62.732 1	48.543 2	29.684 3	64.597 3	0.920 6	0.510 9

提高了湿地景观保护能力,有效缓解了研究区景观破碎化程度。2020 年未利用地主要分布在红旗水库周围和老虎冲村,2030 年未利用地面积在减少,红旗水库周围荒地将变成林地,而杨家丫口村附近的林地将变成荒地。

4 结论与建议

4.1 结 论

从景观类型水平格局特征和景观水平格局特征来分析普者黑岩溶湖泊湿地流域景观格局变化规律得出:

(1)从景观类型水平格局来看,1990–2015 年普者黑流域建筑用地、农地景观类型面积在不断增加,林地、湿地和未利用地景观类型面积在不断减少,受降雨量减少影响湿地面积变化幅度较大,减少面积达到 402.95 hm^2 ;

(2)景观水平格局特征表明,1990–2000 年普者黑流域景观格局破碎化程度、景观形状复杂度以及景观多样性都在不断加深,2000–2015 年景观类型破碎化现象得到改善;

(3)2020–2030 年普者黑流域建筑用地、农地和湿地景观类型面积在增加,未用地和林地在减少。

其中,增加和建设用地主要是在现有建设用地的基础上扩张,以及伴随着交通要道和乡镇而向周边蔓延。林地面积减少主要集中在该流域的西面红旗水库周围,同时,湿地公园下游以及上游湿地面积在不断增加;

(4)针对 CA-Markov 预测结果林地面积减少情况,相关部门应采取措施,严格监控,可加强退耕还林力度;虽然湿地景观类型面积在增加,但由于普者黑流域特殊的地貌及其属于生态敏感区,更应该重视湿地景观的保护。

4.2 建 议

4.2.1 普者黑流域景观格局预测结果分析

2010–2020 年与 2020–2030 年相比,变化趋势有所不同,建筑用地和湿地呈增加趋势,说明当地政府开始重视湿地景观的保护与居民建房的开发利用,使湿地景观保护与经济发展处于相对平衡状态,林地的减少原因可能是因人类活动频繁导致耕地相对紧张,为了满足人口增长的需要,人们开发林地和未利用地;未利用地减少有利于当地经济的可持续发展,但未利用地的大量开垦、甚至是过度开垦则会造成土地荒漠化,应引起有关部门的重视。

4.2.2 预测模型精度分析

CA-Markov 模型在预测中, Kappa 系数为 0.80, 达到显著相关精度要求, 预测结果总体上能反映出各时期景观格局类型的变化趋势, 但为了尽可能提高预测模型的精确度, 可加入驱动因子(人口因素、气候因素、水质因素等)来进一步完善 CA-Markov 预测模型, 达到更好地预测普者黑流域未来景观格局变化目的。

4.2.3 普者黑流域未来发展建议

基于 20 年来景观格局变化及预测结果, 相关部门应该采取措施严格控制林地减少, 加强退耕还林力度; 加强未利用地开垦限制, 尤其是加强研究区红旗水库以及湿地景观周围的林地保护; 同时, 对于建筑用地增加主要集中在湿地公园附近以及乡镇周边的现象, 要严格执行相关建房规定, 居民住房可以往西南方向修建, 这样既能欣赏到岩溶湖泊湿地景观, 又能对湿地景观起到保护作用。虽然预测结果显示湿地景观类型面积在增加, 但由于研究区属于特殊的岩溶地貌, 需要有关部门加强对普者黑湿地景观的监管与保护。

参考文献

- [1] 刘红玉, 李玉凤, 曹晓, 郝敬峰, 胡俊纳, 郑囡. 我国湿地景观研究现状、存在的问题与发展方向[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1394-1401.
LIU Hongyu, LI Yufeng, CAO Xiao, HAO Jingfeng, HU Junna, ZHEN Nan. The current problems and perspectives of landscape research of wetlands in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1394-1401.
- [2] 马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, 27(2): 101-106.
MA Zulu, CAI Desuo, JIANG Zhongcheng. About karst wetland classification system[J]. *Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2009, 27(2): 101-106.
- [3] 宋涛, 于晓英, 邹胜章, 张连凯, 刘朋雨, 赵一, 沈利娜. 岩溶湿地退化评价指标体系构建初探[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 673-681.
SONG Tao, YU Xiaoying, ZOU Shengzhang, ZHANG Liankai, LIU Pengyu, ZHAO Yi, SHEN Lina. Preliminary study on the construction of evaluation index system of karst wetland degradation[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 673-681.
- [4] 郎永娟, 种培芳, 林杨杰, 胡波, 宁建杨. 兰州秦王川国家湿地公园土地利用及湿地景观格局动态变化分析[J]. 园林, 2021, 38(7): 58-66.
LANG Yongjuan, ZHONG Peifang, LIN Yangjie, HU Bo, NING
- [5] Jianyang. The analysis of dynamic changes of land use and wetland landscape pattern of Qinwangchuan national wetland park in Lanzhou, Gansu province[J]. *Landscape Architecture*, 2021, 38(7): 58-66.
- [6] 郑青华, 罗格平, 朱磊, 周德成. 基于CA-Markov模型的伊犁河三角洲景观格局预测[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 873-882.
ZHENG Qinghua, LUO Geping, ZHU Lei, ZHOU Decheng. Prediction of landscape patterns in Ili River Delta based on CA-Markov model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 873-882.
- [7] Semlitsch R D. Critical elements for biologically based recovery plans of a quantic-breeding amphibian[J]. *Conservation Biology*, 2002, 16(3): 619-629.
- [8] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 闻青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 123-134.
LI Xiuzhen, BU Rencang, CHANG Yu, HU Yuanman, WEN Qingchun, WANG Xugao, XU Chonggang, LI Yuehui, HE Hongshi. The response of landscape metrics against pattern scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 123-134.
- [9] 肖羽芯, 王妍, 刘云根, 郭玉静, 张紫霞, 刘鹏. 典型岩溶湿地流域生态功能区划研究: 以滇东南普者黑流域为例[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 47-55.
XIAO Yuxin, WANG Yan, LIU Yungen, GUO Yujing, ZHANG Zixia, LIU Peng. Research on ecological function regionalization of typical karst wetland watershed: take Puzhehei basin as an example[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 47-55.
- [10] 李益敏, 李卓卿. 国内外湿地研究进展与展望[J]. 云南地理环境研究, 2013, 25(1): 37-40.
LI Yimin, LI Zhuoqing. Progress and prospect of research on wetlands at home and abroad[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2013, 25(1): 37-40.
- [11] 白军红, 房静思, 黄来斌, 邓伟, 李爱农, 孔博. 白洋淀湖沼湿地系统景观格局演变及驱动力分析[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1634-1644.
BAI Junhong, FANG Jingsi, HUANG Laibin, DENG Wei, LI Ainong, KONG Bo. Landscape pattern evolution and its driving factors of Baiyangdian lake-marsh wetland system[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1634-1644.
- [12] 陈静, 罗明丽, 廖春来, 马瑞, 周宏, 邹胜章, 陈植华. 中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 221-230.
CHEN Jing, LUO Mingming, LIAO Chunlai, MA Rui, ZHOU Hong, ZOU Shengzhang, CHEN Zhihua. Review of eco-hydrological process in karst wetlands of China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 221-230.
- [13] 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一. 会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4948-4957.

- LI Jun, ZOU Shengzhang, LIANG Yongping, LIN Yongsheng, ZHOU Changsong, ZHAO Yi. Metal distributions and human health risk assessments on waters in the Huixian karst wetland, China[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4948-4957.
- [13] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 赵一, 卢海平, 谢浩. 桂林会仙岩溶湿地水位动态特征及水文生态效应[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 661-670.
- ZHU Danni, ZOU Shengzhang, ZHOU Changsong, ZHAO Yi, LU Haiping, XIE Hao. Dynamic characteristics of water Level and hydro-ecological effects in Huixian karst wetland in Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 661-670.
- [14] 李丽, 刘普幸, 姚玉龙. 近28年金昌市土地利用动态变化及模拟预测[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1097-1104.
- LI Li, LIU Puxing, YAO Yulong. Land-use dynamic change of Jinchang City in the last 28 years and simulation prediction[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1097-1104.
- [15] 凌成星, 鞠洪波, 张怀清, 孙华. 基于CA-Markov模型的北京湿地资源变化预测研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 262-267.
- LING Chengxing, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, SUN Hua. Study on the forecast of wetland resources changes in Beijing based on CA-Markov model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20): 262-267.
- [16] 侯西勇, 常斌, 于新芳. 基于CA-Markov的河西走廊土地利用变化研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 286-291.
- HOU Xiyong, CHANG Bin, YU Xinfang. Land use change in Hexi corridor based on CA-Markov methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(5): 286-291.
- [17] 张海龙, 蒋建军, 解修平, 吴宏安, 张丽. 基于GIS与马尔可夫模型的渭河盆地景观动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(7): 119-124.
- ZHANG Hailong, JIANG Jianjun, XIE Xiuping, WU Hongan, ZHANG Li. Analysis on landscape dynamics of Weihe basin based on gis and markov methods[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(7): 119-124.
- [18] 陈爱玲, 都金康. 基于CA-Markov模型的秦淮河流域土覆盖格局模拟预测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 184-188.
- CHEN Ailing, DU Jinkang. Simulation and forecast of land cover pattern in Qinhuai river basin based on the CA-Markov model[J]. Remote Sensing for Land & Resource, 2014, 26(2): 184-188.
- [19] 张小松. 西宁市土地利用景观格局演变及预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- ZHANG Xiaosong, Dynamics and prediction of landscape in land utilization of Xining city[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [20] 闫文文. 基于3S和CA的盐城滨海湿地景观格局演变及预测模拟研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2012.
- YAN Wenwen. Study of landscape changing on Yancheng coastal wetlands based on gis and ca technology[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, MNR, 2012.
- [21] 赵永华, 贾夏, 刘建朝, 刘耿. 基于多源遥感数据的景观格局及预测研究[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2556-2564.
- ZHAO Yonghua, JIA Xia, LIU Jianchao, LIU Geng. Analysis and forecast of landscape pattern in Xi'an from 2000 to 2011[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2556-2564.
- [22] 谭志卫. 3S技术支持下的抚仙湖流域景观格局变化研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(5): 117-121.
- TAN Zhiwei. Dynamic changes of landscape pattern in the Fuxianhu lake basin based on 3S technology[J]. Environmental Science Survey, 2015, 34(5): 117-121.
- [23] 郭玉静, 王妍, 刘云根, 郑毅, 张超, 侯磊. 普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1711-1721.
- GUO Yujing, WANG Yan, LIU Yungen, ZHENG Yi, ZHANG Chao, HOU Lei. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1711-1721.
- [24] 毛转梅, 刘青, 彭尔瑞, 陈劲松, 吴培军. 云南普者黑湿地流域水域面积变化及其影响因素[J]. 江西农业学报, 2021, 33(5): 109-114.
- MAO Zhuanmei, LIU Qing, PENG Errui, CHEN Jinsong, WU Peijun. Dynamic changes of water area in yunnan Puzhehei wetland river basin and its influencing factors[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(5): 109-114.

Change and its prediction of landscape patterns in the watershed of typical karst lake wetland

WEN Guojing^{1,2,3}, WANG Yan^{1,2}, LIU Yungen^{1,2}, HOU Lei^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous and Rural Areas of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650224, China;
3. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China)

Abstract As a research focus of landscape pattern change, the change and its prediction of landscape patterns in the watershed of karst lake is explored with the purpose of providing a scientific basis for the ecological safety in karst watershed in this study. The data of remote sensing image in the watershed of Puzhehei karst lake was collected in

1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2015 respectively. With the remote sensing and geographic information system, those images were classified and interpreted based on the actual situation of this area. In addition, landscape patterns and the dynamic characteristics were analyzed and the pattern of future wetland landscape was simulated and predicted with CA-Markov model.

Results show that landscape patterns of the watershed of Puzhehei karst wetland changed significantly from 1990 to 2015, during which construction land and agricultural land continued to increase, but woodland, wetland and unused land continued to decrease. The number of blocks (NP) rose from 861 to 889. Generally speaking, agricultural land is increasing year by year, but the growth rate is slow and the wetland landscape area is decreasing.

Besides, from 1990 to 2015 the degree of landscape fragmentation in the Puzhehei watershed was generally augmented, and the number of landscape patches, patch density and number index of maximum patches also increased. The number of patches reached a maximum of 936, and the patch density index increased from 2.596 in 1990 to 2.822 in 2000, and then decreased to 2.689 in 2015. The number of maximum patches increased from 58.345 in 1990 to 62.036 in 2015, which means that the impact of human activities on the landscape pattern in the Puzhehei watershed made the landscape structure more complex and the fragmented.

Finally, the dominant patch area of landscape types gradually increased from 1990 to 2015. The diversity index decreased from 1.064 to 0.966, and the edge density increased from 47.552 to 48.063. But the landscape shape index decreased from 30.175 to 29.625. Due to the continuous reduction of forest land and wetland in 2000, the landscape shape index increased and both the edge density and landscape shape index peaked at 49.987 and 31.012 respectively, which made the landscape structure complex.

In the next 20 years, the landscape type change in Puzhehei watershed will generally show an increase in construction land, agricultural land and wetland, but a decrease in forest land, garden land and unused land. This trend can be reflected from the previous data: construction land increased from 2.79% to 2.97%, agricultural land from 60.12% to 60.74%, wetlands from 6.67% to 7.02%, but of forest land dropped from 26.70% to 26.40%. Accordingly, the land use pattern of Puzhehei watershed will change significantly. By 2030, the existing construction land will be expanded mainly around the scenic area of sinkholes as well as new in the villages and new towns around the National Wetland Park. Construction land will spread to the surrounding areas along with the main traffic roads. It is predicted that wetland, construction land and agricultural land will experience the largest change. The research findings can provide suggestions and reference for the ecological protection of the watershed Puzhehei karst lake.

Key words CA-Markov model, wetland of karst lake, landscape pattern, simulation and prediction

(编辑 张玲 杨杨)