

# 基于景观格局的阿哈湖国家湿地公园 景观生态风险评价

娄 妮<sup>1</sup>, 王志杰<sup>2</sup>, 何嵩涛<sup>1</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 生命科学学院, 贵阳 550025)

**摘 要:**为揭示喀斯特地区城市湿地公园生态风险变化规律及为科学管理阿哈湖国家湿地公园提供理论依据,利用阿哈湖国家湿地公园 2009 年、2013 年、2017 年遥感影像,基于景观格局指数构建生态风险评价模型,采用空间自相关方法,分析了 2009—2017 年阿哈湖国家湿地公园景观生态风险时空变化特征和空间相关性。结果表明:2009—2017 年,研究区内主要景观类型为林地和水域,不同景观类型的面积均发生明显变化,林地面积增加 22.55 hm<sup>2</sup>,建设用地面积增加 17.63 hm<sup>2</sup>,增幅较大,草地面积减少 54.02 hm<sup>2</sup>;研究区总体景观生态风险呈现上升趋势,高风险区和较高风险区面积分别增加 61.12 hm<sup>2</sup>, 112.11 hm<sup>2</sup>,主要集中在研究区北部和南部,较低风险区、低风险区和中风险区域面积减少,低风险区和较低风险区面积分别减少 100.73 hm<sup>2</sup>, 108.80 hm<sup>2</sup>,主要集中在研究区西北部 and 西南部;各时期景观生态风险度的 Moran's *I* 值分别为 0.352 9, 0.498 0, 0.480 1,表现出正空间相关性,空间上趋于聚集。人类活动干扰是导致该区域景观生态风险升高的主要原因。

**关键词:**景观格局; 景观生态风险; 空间自相关; 阿哈湖国家湿地公园

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0233-07

## Assessment on Ecological Risk of Aha Lake National Wetland Park Based on Landscape Pattern

LOU Ni<sup>1</sup>, WANG Zhijie<sup>2</sup>, HE Songtao<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to study the ecological risk change of urban wetland parks in karst area and provide the scientific management of the Aha Lake National Wetland Park, three images for 2009, 2013 and 2017 were obtained, an ecological risk assessment model was constructed through landscape pattern index, and spatial correlation were used to analyze the space-time distribution and evolution regularity of the ecological risk in Aha Lake National Wetland Park. The results showed that, in 2009—2017, the main landscape types of Aha Lake National Wetland Park were forestland and water area, the landscape types had changed, the woodland increased by 22.55 hm<sup>2</sup>, the increment of construction land was larger, and increased by 17.68 hm<sup>2</sup>, the grassland area decreased by 54.02 hm<sup>2</sup>; the areas of high risk and higher risk increased by 61.12 hm<sup>2</sup> and 112.11 hm<sup>2</sup>, respectively, mainly concentrated in the southwest and southeast of the study area; the area of the low risk and lower risk and middle risk areas decreased, and the area of the low risk and lower risk areas decreased by 100.73 hm<sup>2</sup> and 108.80 hm<sup>2</sup>, respectively, mainly concentrated in the northwest and east of the study area. Moran's *I* values of ecological risk degrees of landscape in each period were 0.352 9, 0.498 0, 0.480 1, presented a positive spatial correlation and tended to gather in space. Interference of human activity was the main reason contributing to the rise of ecological risk.

**Keywords:** landscape pattern; landscape ecological risk; spatial autocorrelation; Aha Lake National Wetland Park

生态风险评价可以用来评估生态系统及其组分受人为活动、环境污染和自然灾害等不利影响的程度<sup>[1]</sup>,准确的生态风险评价能有效管理生态风险,也是生态建设、环境修复等工作的重要前提<sup>[2]</sup>。近年来,随着景观生态学空间异质性与景观格局概念的广泛应用<sup>[3]</sup>,景观生态风险评价应运而生。景观生态风险是指在人为或自然因素影响下,景观格局和景观生态过程间产生不良后果的可能性,是生态风险评价在区域尺度上的重要分支<sup>[4]</sup>。景观生态风险评价从景观生态过程和空间格局相互关联的角度出发,可实现多元风险的综合表征和空间可视化,着重生态风险的时空异质性和尺度效应,同时强调景观格局对生态过程和功能的影响。基于多目标多尺度、多等级系统和多重作用关系的景观生态风险评价可以为区域综合风险管理提供决策依据。对于景观生态风险评价,学者们开展了诸多方面的研究<sup>[5]</sup>,评价对象有人类活动较为剧烈的区域和生态敏感区,包括流域<sup>[1]</sup>、沿海地区<sup>[6]</sup>、矿区<sup>[7]</sup>、城市<sup>[8]</sup>和湿地<sup>[9]</sup>等,评价方法有熵值法、综合指数法、模型法、暴露—响应法<sup>[10-13]</sup>等。湿地是水陆相互作用形成的独特生态系统,具有极高的生产力和生物多样性<sup>[14]</sup>,其生态功能对区域气候变化和经济发展有重要作用。近年来,人口数量和社会经济水平快速增长,由于人类对湿地自然资源的不合理开发利用,湿地生态系统受到极大威胁和破坏,其生态环境出现严重问题,如湿地环境污染,生物多样性减少,资源过度开发等,是目前学者关注的热点问题之一,研究湿地生态风险的时空分布特点,便于湿地的生态环境与综合管理,因此,针对湿地的生态风险评价非常有必要<sup>[15]</sup>。目前,对湿地景观的生态风险评价多以河流三角洲地区<sup>[16]</sup>、海岸带湿地<sup>[17]</sup>、自然沼泽区<sup>[18]</sup>、以及湿地重金属污染<sup>[19]</sup>等为研究对象和内容。喀斯特地区生态系统复杂敏感,对喀斯特地区湿地生态风险评价有重要意义,目前有学者研究了关于喀斯特湿地的生态风险评价<sup>[20]</sup>,而对贵州喀斯特城市湿地公园的生态风险评价较少涉及。阿哈湖国家湿地公园位于典型喀斯特地区的贵阳市中心城区,是贵阳市首个国家级湿地公园,近年来,随着城市建设和旅游开发的持续推进,阿哈湖国家湿地公园生态环境存在一定压力,该区域的生态风险研究对可持续发展有重要作用。

本文运用景观生态学原理和地理信息系统,以阿哈湖国家湿地公园为研究对象,以 2009 年、2013 年、2017 年 3 期高分辨率遥感影像为主要数据源,在系统分析景观格局时空变化的基础上,构建基于景观格局的生态风险评价模型,对研究区生态风险变化进行研究,以期揭示其景观生态风险空间分布特征及变化规律,为阿哈湖国家湿地公园管理与贵阳生态文明建设提供理论依据和技术支持。

## 1 研究区概况

阿哈湖国家湿地公园(106°37′—106°40′E, 26°33′—26°30′N)位于贵阳市中心城区西南部(图 1),是在利用阿哈水库资源建成的小车河湿地公园的基础上申报建成的国家级湿地公园。研究区南北长约 6.5 km,东西宽 6 km,总面积 1 218 hm<sup>2</sup>,属于亚热带湿润温和型气候,平均气温为 15.3℃,年均降雨量为 1 129.5 mm。内有河流、沼泽、人工湿地三大湿地类型,其中阿哈水库是贵阳市主城区三大生产生活用水水源地之一,阿哈湖国家湿地公园对贵阳市的气候调节、空气净化、水源涵养具有重要作用。

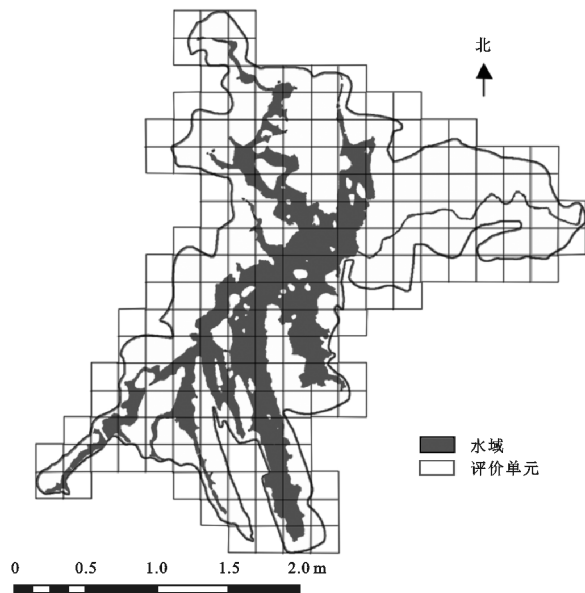


图 1 研究区概况及评价单元划分

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本次研究选择 2009 年 KOMPSAT 影像、2013 年、2017 年 Google Earth 影像三期遥感数据,空间分辨率为 1 m×1 m。利用 ArcGIS 10.2 进行几何校正、影像裁剪等影像预处理,依据《土地利用现状分类(GB/T21010—2017)》,结合影像光谱特征和研究区景观特征,将阿哈湖湿地公园景观类型划分为建设用地、林地、水域、耕地、草地和未利用地等 6 种类型,并采用目视解译法,建立阿哈湖湿地公园景观类型空间属性数据库(附图 3)。

### 2.2 研究方法

2.2.1 景观生态风险评价模型 通过景观干扰度指数和景观脆弱度指数构建景观生态风险评价模型<sup>[21-22]</sup>研究阿哈湖国家湿地公园生态风险的空间分布。景观干扰度指数  $E_i$  用于反映不同景观代表的生态系统受干扰的损失程度,通过景观破碎度  $C_i$ 、景观分离度  $N_i$ 、景观分维度  $F_i$  的权重获得。

景观损失度指数  $R_i$  通过景观干扰度指数  $E_i$  与景观脆弱度指数  $V_i$  构建

$$R_i = E_i \times V_i \tag{1}$$

景观干扰度指数  $E_i$  见公式(2)

$$E_i = aC_i + bN_i + cF_i \tag{2}$$

式中: $C_i, N_i, F_i$  分别代表景观破碎度指数、景观分离度指数、景观分维度指数; $a, b, c$  分别为各个景观指数的权重,结合阿哈湖国家湿地公园的实际情况,根据相关研究<sup>[23]</sup>,分别赋值为 0.5,0.3,0.2,且  $a+b+c=1$ 。景观格局指数的公式与生态学意义见表 1。

表 1 景观格局指数计算方法

景观格局指数	公式	生态学意义
景观破碎度指数 $C_i$	$C_i = n_i / A_i$	描述景观的破碎化程度,可表示景观内部稳定性及人类活动的干扰度 <sup>[24]</sup> ; $n_i$ 表示景观类型 $i$ 的斑块数; $A_i$ 表示景观类型 $i$ 的面积
景观分离度指数 $N_i$	$N_i = \sqrt{\frac{n_i}{A}} \times \frac{A}{2A_i}$	表示景观类型的斑块的在空间上的分离程度,景观分离度大,说明空间分布复杂,破碎化程度高 <sup>[5]</sup> ; $A$ 表示所有景观的总面积
景观分维度指数 $F_i$	$F_i = \frac{2\ln(\frac{P_i}{4})}{\ln A_i}$	可表示景观斑块的形状的复杂程度和空间稳定程度 <sup>[25]</sup> ; $P_i$ 表示某一景观类型 $i$ 的周长

景观脆弱度指数  $V_i$  可表示不同景观类型受外界干扰后的敏感程度,赋值后进行归一化得到。结合相关研究<sup>[26]</sup>对各景观类型赋值如下:未利用地为 6,水域为 5,耕地为 4,草地为 3,林地为 2,建设用地为 1。为方便计算,归一化值区间为[0.1~0.9],结果如下:未利用地 0.90,水域 0.74,耕地 0.58,草地 0.42,林地 0.26,建设用地 0.10。

根据景观类型的面积和景观损失度指数构建生态风险指数 ERI,公式如下:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i \tag{3}$$

式中:ERI<sub>k</sub> 表示景观生态风险评价单元  $k$  的景观风险指数,值越大表示该评价单元的生态风险值越高,值越低,代表该评价单元的生态风险值越低; $A_{ki}$  表示景观生态风险评价单元  $k$  中第  $i$  类景观的面积; $A_k$  是评价单元  $k$  的总面积; $R_i$  是第  $i$  类景观的生态损失指数。

利用景观生态风险模型,将每个评价单元中的值 ERI 作为其中心点的生态风险指数,在 ArcGIS 中采用克里金插值获得阿哈湖国家湿地公园的生态风险分布图。

2.2.2 风险小区划分 为了将景观生态风险指数空间化,在 ArcGIS 中对研究区范围进行网格化作为采集生态风险评价单元的样本,根据有关景观生态学研究<sup>[27-28]</sup>和研究区面积,将研究区划分 3×3 hm<sup>2</sup> 的风险评价单元,共 187 个(图 1),依次计算每一风险小区的生态风险指数,作为样地中心点的生态风险值。

2.2.3 空间分析方法 基于景观格局指数得到的景观生态风险值是一种空间变量,可以在 ArcGIS 中利用克里金插值编制生态风险程度图。同时,选择空间自相关性<sup>[29]</sup>探讨研究区生态风险空间差异。

3 结果与分析

3.1 景观面积变化分析

阿哈湖国家湿地公园主要景观类型为林地,其次

为水域和草地,体现了阿哈湖国家湿地公园的景观组成结构。2009—2017 年,阿哈湖国家湿地公园建设用地、耕地、林地和水域的面积增加,未利用地、草地的面积减少。林地增加面积最多,为 22.55 hm<sup>2</sup>,面积比例从 49.29%增至 51.05%;其次是建设用地,为 17.68 hm<sup>2</sup>,面积比例从 3.63%增至 5.10%。耕地面积比例从 4.86%增至 4.90%,水域面积比例从 30.98%增至 31.62%。草地的面积减少量最多,减少了 54.02 hm<sup>2</sup>,面积比例从 11.07%减少到 6.74%;未利用地从 0.78%减少到 0.59%(图 2)。建设用地、水域两种景观面积持续增加,草地景观面积持续减少,耕地和未利用地景观面积先增后减,林地景观面积呈现先减后增的趋势。结合阿哈湖湿地公园实际情况,将研究区划分为两个阶段,2009—2013 年为快速建设期,2013—2017 年为逐渐稳定期。在快速建设期,各类景观的面积变化剧烈,尤其是林地和草地景观,在该时期,由于湿地公园整体布局的优化和改造,导致两类景观有减少的特征。随着各类改造提升工程的相继完工,2017 年林地景观面积得以恢复到 2009 年之前的水平,甚至略高于 2009 年的水平,说明人类活动对景观格局的干扰程度。同时,建筑用地和耕地两类景观面积的增加,也说明人类活动对湿地公园的干扰持续增加,在一定程度上,可能对阿哈湖湿地公园景观生态风险产生不利影响。

表 2 研究区 2009—2017 年景观类型变化

景观类型	面积/hm <sup>2</sup>			面积构成/%		
	2009 年	2013 年	2017 年	2009 年	2013 年	2017 年
草地	138.40	121.84	84.38	11.07	9.74	6.74
耕地	52.43	60.85	61.3	4.19	4.86	4.90
建设用地	46.05	62.81	63.73	3.63	5.03	5.10
林地	616.21	600.71	638.77	36.69	33.77	37.81
水域	387.28	392.42	395.6	30.98	31.37	31.62
未利用地	9.70	12.38	7.33	0.78	0.99	0.59



3.2 生态风险分析

将生态风险评价单元的景观生态风险值作为其中心点的值,在 ArcGIS 的地统计模块中,采用普通克里金插值法进行空间插值得到各年研究区景观生态风险的空间分布情况。参考相关研究<sup>[30]</sup>,采用相对指标法划分

生态风险值,结合研究区实况,将景观生态风险值划分为 5 种生态风险等级:低生态风险区 $[0.000\leq ERI<0.200]$ 、较低生态风险区 $[0.200\leq ERI<0.300]$ 、中生态风险区 $[0.300\leq ERI<0.400]$ 、较高生态风险区 $[0.400\leq ERI<0.500]$ 、高生态风险区 $[0.500\leq ERI<1.000]$ 。

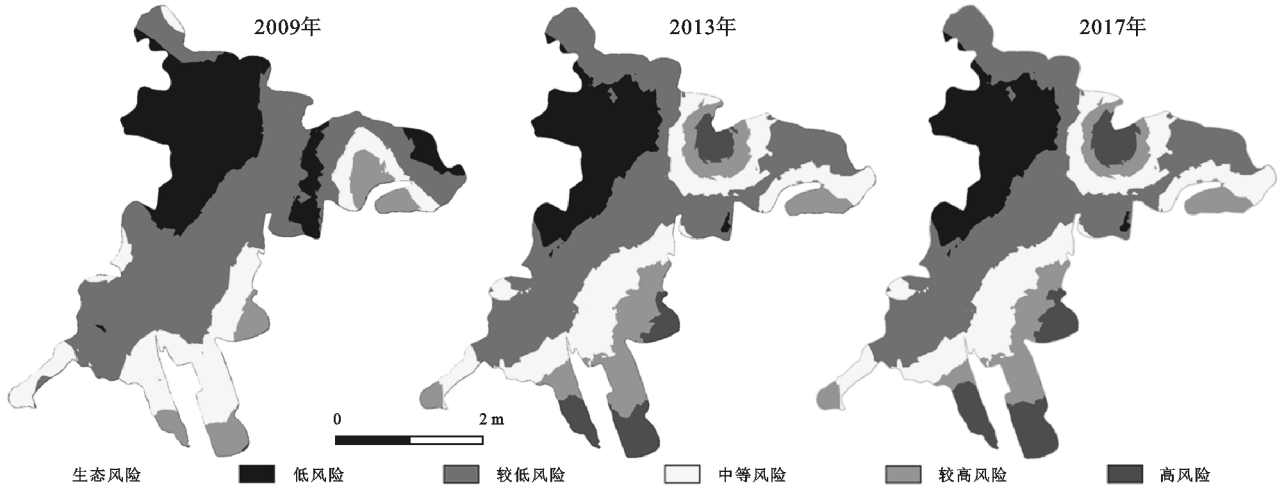


图 2 生态风险空间分布

表 3 风险等级面积及比例

等级	2009 年		2013 年		2017 年	
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
低风险	317.49	25.38	216.00	17.27	216.75	17.33
较低风险	603.38	48.73	429.57	39.37	494.58	39.54
中风险	234.28	18.73	274.98	21.94	275.77	22.04
较高风险	90.57	7.24	178.98	14.31	151.70	12.13
高风险	0.10	0.01	83.92	6.71	112.20	8.97

3.2.1 生态风险分布特征分析 分析 2009—2017 年阿哈湖湿地公园不同景观生态风险等级的分布情况,可以看出(图 2,表 3):阿哈湖国家湿地公园景观生态风险整体以中等风险以及中等以下风险为主,较低风险和低风险等级所占面积较大,占研究区总面积的 61.58%~66.96%,但在研究时期内,研究区景观生态风险呈加剧趋势,较高风险和高风险等级面积持续增加。具体而言:2009 年,阿哈湖国家湿地公园的低风险区和较低风险区面积分别占总面积的 25.38%和 48.23%,其中:低风险区主要集中研究区西北部阿哈寨附近,西北区林地面积大,景观自身稳定性强,阿哈寨以建设用地为主,受人类干扰后损失度低;较低风险区主要集中在大荒坡、研究区中部、北部,主要景观类型为成片的林地。中风险区和较高风险区分别为 7.24%和 0.01%,主要集中在研究区南部、研究区东部和西南部,此区域的景观类型主要为草地、耕地、未利用地和建设用地,景观自身稳定性被破坏,受人为干扰后易损程度大。2013 年,低风险区和较低风险区面积分别为 17.27%和 39.27%,其中,低风险区主要集中在西北部,较低风险区主要分布在西北部、

中部北部,此部分区域主要景观类型为林地、水域和小部分建设用地,景观损失度较低。中风险区面积为 21.94%,主要分布在研究区北部、南部和东部小部分区域,主要景观类型为水域、林地、草地和建设用地。较高风险区和高风险区面积为 14.31%和 6.71%,主要分布在研究区南部和北部,主要景观类型为耕地、草地和部分林地,耕地和草地抗人类干扰能力较差,景观易损程度大。2017 年,低风险区和较低风险区占总面积的 17.33%和 39.54%,主要分布在研究区西北部,此部分区域景观主要以林地为主,自身稳定性强。中风险区区域占总面积的 22.04%,主要分布在研究区北部、南部与东部小范围区域,主要景观类型为水域、林地、草地和建设用地。较高风险区和高风险区占总面积的 12.13%和 8.97%,主要集中在研究区南部和北部,此部分的景观类型主要是耕地和草地。

3.2.2 生态风险变化特征分析 进一步分析研究区不同时期景观生态风险等级的变化,可以发现 2009—2013 年,阿哈湖国家湿地公园各景观生态风险分级的面积变化,低风险区和较低风险区面积有所减少外,其他各风险等级区域面积均呈不同程度的增加趋势。其中:

中风险区、较高风险区和高风险区面积分别增加 3.21%，7.07%和 6.70%，且在研究区南部、北部和东部的部分区域集中，此部分主要景观为耕地和草地，且景观斑块较破碎，导致景观生态风险增加，同时，这一阶段研究区处于快速建设期，公园的开发建设使研究区生态风险增加。2013—2017 年，阿哈湖国家湿地公园，较高风险区面积有所减少，其他各风险等级区域面积均有增加。其中，较高风险区面积减少 2.18%；高风险区面积增加 2.26%，增加幅度较大，主要分布在研究区北部和南部，其主要景观类型是耕地和草地，景观斑块仍处于比较破碎的状态；中风险区面积增加 0.11%；较低风险区面积增加 0.16%，低风险区面积增幅较小，为 0.06%，这一阶段研究区处于逐渐稳定期，景观建设

已趋于完善，研究区低风险、较低风险和中生态风险略有增加，高风险区域生态风险有所增加但增速减缓，主要是人类活动影响所致。

3.3 阿哈湖国家湿地公园生态风险空间相关性分析

3.3.1 生态风险全局相关性分析 空间自相关性可以用来研究一群空间变量的分布特征，主要用于描述研究区域上空间对象的关联程度<sup>[31]</sup>，采用 Moran's *I* 进行空间自相关判断，空间自相关分析包括全局自相关分析和局部自相关分析。利用 GeoDa 软件，根据景观生态风险空间分布数据进行全局自相关分析，得到 Moran's *I* 散点图(图 3)，研究期间，全局 Moran's *I* 值分别为 0.352 9,0.498 0,0.480 1，均大于 0，说明各年研究区内景观生态风险值存在空间正相关关系，存在集聚效应。

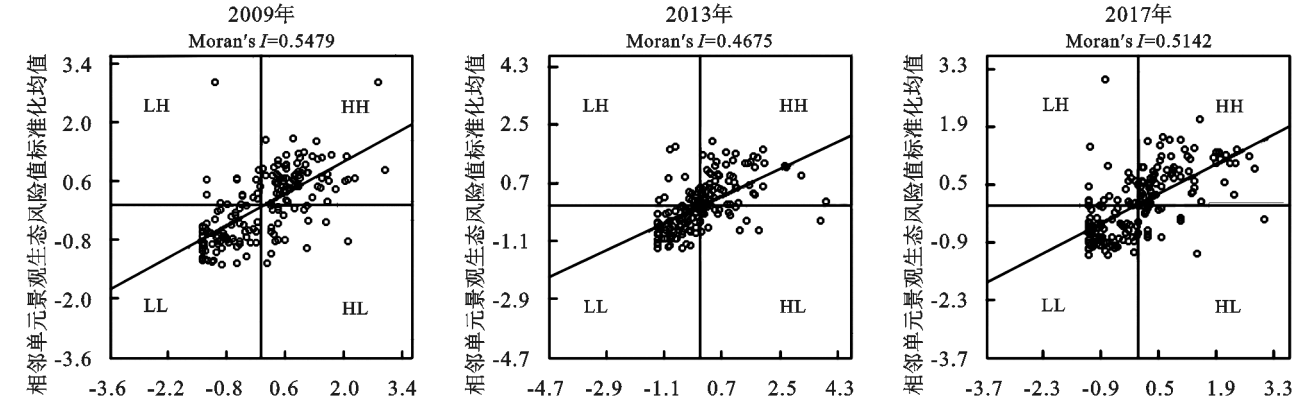


图 3 研究区 2009—2017 年景观生态风险 Moran's 散点图

3.3.2 生态风险局部相关性分析 进一步对阿哈湖国家湿地公园的景观生态风险值进行局部自相关分析，得到局部自相 LISA 聚集图(图 4)。2009—2017 年研究区生态风险的“高一高”值区域聚集于南部，这些景观生态风险区高的地区，相邻地区的景观生态风险程度也比较高。“低—低”值区主要聚集在研究区西北部和东北部，说明这些区域景观生态风险程度低，其相邻地区的景观生态风险程度也较低。对比景观生态风险空间分布情况，发现空间局部自相关“高一高”“低—低”分布区域与景观生态风险空间分

布较一致。2009—2013 年，景观生态风险“低—低”和“高一高”聚集结构趋向集中，2013—2017 年，景观生态风险“低—低”聚集结构略有扩散。结合景观类型分布来看，“低—低”聚集区主要景观类型为林地，与低景观生态风险主要景观类型相符，“高一高”聚集区主要景观类型为耕地、草地和建设用地，与高景观生态风险区和较高景观生态风险区的主要景观类型相符，“高一高”结构聚集区内，建设用地、耕地和草地的分布较分散，加上人类活动干扰程度较大，景观内部稳定性较差。

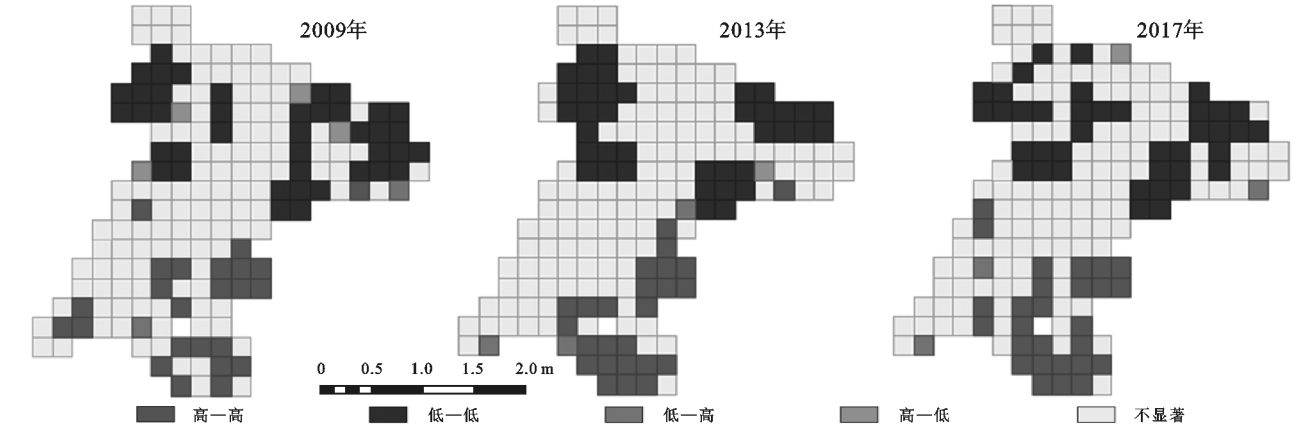


图 4 研究区 2009—2017 年景观生态风险局部空间自相关

## 4 结论与讨论

景观生态风险评价过程复杂,需要综合考虑许多不确定因素,基于景观格局指数构建生态风险指数模型,从景观格局的角度量化阿哈湖国家湿地公园的生态环境问题,对于认识阿哈湖国家湿地公园的生态环境问题、进行科学管理有重要意义。本文利用3期遥感影像探索阿哈湖国家湿地公园的景观格局变化及其生态风险时空特征,得到以下主要结论:(1)林地和水域是研究区主要景观类型,建设用地、耕地、林地和水域的面积增加,未利用地和草地的面积减少;(2)研究区内生态风险空间差异明显,高风险、较高风险集中在北部和南部,低风险、较低风险集中在西北部和西南部;(3)研究期间,整体生态风险呈现上升趋势,生态风险程度表现出正空间相关性。

阿哈湖国家湿地公园所处的贵阳市南明区,由于较强的人类活动干扰,表现出相对较高的生态风险<sup>[32]</sup>。尤其是近年来,随着一系列大规模工程建设项目的实施,人类活动对景观的干扰程度加剧,导致阿哈湖国家湿地公园的景观类型相互转移的频率和强度加大,景观格局时空异质性明显增加,景观生态风险呈加剧的趋势。而研究区西北部的林地景观,因其分布集中,景观的分离度、干扰度和脆弱度小,优势度高,极大地减小了阿哈湖国家湿地公园的景观生态风险程度。同时,由于近年来贵阳市实施的“护林、治水、净气、保土”工程,在一定程度上对研究区的景观生态风险起到减缓作用。有研究显示,建设用地自身生态风险低,但受人类活动影响,建设用地的扩张会增加周边生态风险<sup>[33]</sup>,研究区南部紧靠村寨与大片农家乐,分布在研究区南部的耕地与草地抗人类干扰的能力较差,对景观生态风险的贡献度较高,是导致阿哈湖国家湿地公园整体生态风险程度增高的原因。为降低开发建设带来的生态风险,结合研究区生态风险分析的结果,针对阿哈湖国家湿地公园提出以下管理对策:(1)合理规划耕地,控制草地数量。耕地和草地是研究区内较高风险区与高风险区的主要景观类型,抗人类干扰的能力较差,在较高风险区和高风险区应该合理开展农业活动,优化耕地利用模式。加强草地与其他景观类型的联系,保护草地景观斑块的完整性。(2)减少人类活动对阿哈水库与研究区内林地的影响。水域和林地是研究区南部中风险区主要景观类型,在公园建设中应结合周边环境进行滨水景观营造,同时积极实施“保土”、“护林”工程,增强区域各景观

的有机联系,避免中风险区向较高风险区和高风险区转变。(3)保护低生态风险区。低生态风险区主要分布在研究区西北部,主要景观类型为林地,对阿哈湖国家湿地公园生态系统的稳定性非常重要,对这此区域应该尽量减少开发建设活动,避免对生态环境造成影响,旅游观赏设施的建设不超过环境承载力。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.生态风险评价及研究进展[J].应用生态学报,2007,18(8):1869-1876.
- [3] 彭建,王仰麟,张源,等.土地利用分类对景观格局指数的影响[J].地理学报,2006,61(2):157-168.
- [4] 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.
- [5] Peng J, Wang Y, Zhang Y, et al. Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns[J]. Ecological Indicators, 2010,10(2):217-223.
- [6] 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.
- [7] 郭美楠,杨兆平,马建军,等.伊敏矿区景观生态风险评价研究[J].资源与产业,2014,16(2):83-89.
- [8] 陈晶晶,李天宏.基于PSR模型和投影寻踪法的荆州市景观生态风险评价[J].北京大学学报:自然科学版,2017,53(4):731-740.
- [9] Malekmohammadi B, Rahimi Blouchi L. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system[J]. Ecological Indicators, 2014,41(6):133-144.
- [10] 王瑞杰,裴钱玲琳,李国祥,等.宁波月湖水体中抗生素的分布与生态风险评价[J].湖泊科学,2018,30(6):1616-1624.
- [11] 刘永超,李加林,史小丽,等.1985—2015年美国Tampa Bay流域景观生态风险态势研判[J].水土保持通报,2016,36(3):125-135.
- [12] Liu M, Chen L, Gou Y, et al. Assessment of urban ecological risk from spatial interaction models for Lijiang City[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2011,18(6):537-542.
- [13] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等.基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价:以宁夏红寺堡区为例[J].生态学报,2018,38(8):2672-2682.
- [14] 白军红,杨志峰,崔保山,等.湿地景观格局变化研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):36-45.
- [15] 蔡珍,聂华.湿地生态风险管理[J].湿地科学与管理,2007,3(4):50-53.

[16] 付在毅,许学工,林辉平,等.辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J].生态学报,2001,21(3):365-373.

[17] 陈晔倩,李杨帆,祁新华,等.基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价:闽三角为例[J].生态学报,2018,38(12):4214-4225.

[18] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11):3729-3740.

[19] 张春鹏,李富祥.鸭绿江口湿地滩涂表层沉积物重金属空间分布特征及生态风险评价[J].应用生态学报,2016,27(9):2884-2890.

[20] 胡金龙,周志翔,滕明君,等.基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估:以漓江流域为例[J].应用生态学报,2017,28(6):2003-2012.

[21] 陈鹏,潘晓玲.干旱区内陆流域区域景观生态风险分析:以阜康三工河流域为例[J].生态学杂志,2003,22(4):116-120.

[22] 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.

[23] 巩杰,赵彩霞,谢余初,等.基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J].应用生态学报,2014,25(7):2041-2048.

[24] 肖琳,田光进.天津市土地利用生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(2):469-476.

[25] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等.基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J].生态学报,2007,27(4):1257-1264.

[26] 张雅杰,方媛,贺法法,等.基于土地利用变化模拟的生态风险动态评价[J].测绘空间地理信息,2016,39(1):5-8,12.

[27] 苏海民,何爱霞.基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J].自然资源学报,2010,25(1):91-99.

[28] 谢小平,陈芝聪,王芳,等.基于景观格局的太湖流域生态风险评估[J].应用生态学报,2017,28(10):3369-3377.

[29] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.

[30] 高宾,李小玉,李志刚,等.基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J].生态学报,2011,31(12):3441-3450.

[31] Anselin L. Spatial processes: Models and applications [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1981,147(3):59-60.

[32] 王祺,蒙古,孙宁.基于 RRM 模型和不确定性分析的喀斯特地区生态风险管理:贵阳市案例研究[J].山地学报,2016,34(4):476-484.

[33] 方广玲,香宝,王宝良,等.苏南经济快速发展地区人类活动生态风险评价:以镇江市丹徒区为例[J].应用生态学报,2014,25(4):1076-1084.



(上接第 232 页)

[15] 刘雁,刘吉平,盛连喜.松嫩平原半干旱区湿地变化与局地气候关系[J].中国科学技术大学学报,2015,45(8):655-664.

[16] Antrop M. The preoccupation of landscape research with landuse and land cover[C]// Key topics on landscape ecology. Cambridge, UK:Cambridge University Press, 2007.

[17] Verburg P H. Simulating feedbacks in land use and land cover change models[J]. Landscape Ecology, 2006,21(8):1171-1183.

[18] 郑新奇,付梅臣.景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[19] 樊凯,张建生,裴文娟,等.云南省三大高原湖泊流域土地利用景观格局及其稳定性分析[J].西南农业学报,2018,31(8):1706-1711.

[20] 路春燕,王宗明,刘明月,等.松嫩平原西部湿地自然保护区保护有效性遥感分析[J].中国环境科学,2015,35(2):599-609.