

DOI: 10.20103/j.stxb.202307211562

张凤,张双伟,刘晓健,刘吉平,宗思迪,王发斌.三江平原孤立沼泽湿地保护优先性评价与保护策略.生态学报,2024,44(20):9122-9134.

Zhang F, Zhang S W, Liu X J, Liu J P, Zong S D, Wang F B. Conservation priority evaluation and strategy for isolated marsh in the Sanjiang Plain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9122-9134.

三江平原孤立沼泽湿地保护优先性评价与保护策略

张 凤¹, 张双伟¹, 刘晓健¹, 刘吉平^{1,*}, 宗思迪¹, 王发斌²

1 吉林师范大学 地理科学与旅游学院, 四平 136000

2 吉林师范大学 数学与计算机学院, 四平 136000

摘要:随着人们生活生产、经济开发等活动加剧,导致湿地面积减少,湿地破碎化严重,形成大量孤立湿地。研究基于压力-状态-响应理论和层次分析法构建了湿地保护优先性评价模型,对三江平原沼泽湿地进行评价。评价结果表明,2000—2020年三江平原自然沼泽湿地保护优先性空间分布由东北高西南低的格局转向东高西低的格局,而孤立沼泽湿地由东北高西南低的格局向分散无空间分布趋势格局转换,2000—2020年自然沼泽湿地和孤立沼泽湿地保护优先性质心都由东北向西南移动;2000—2020年三江平原的孤立沼泽湿地与非孤立沼泽湿地保护优先性强度均呈降低趋势,孤立沼泽湿地降低的幅度较大;保护区外孤立沼泽湿地的保护优先性强度高于保护区内孤立沼泽湿地。基于孤立沼泽湿地变化规律、驱动力和保护优先性评价结果,提出三江平原孤立沼泽湿地的保护策略,即对现有重要孤立沼泽湿地进行优先保护,对已丧失的重要孤立沼泽湿地进行恢复。加强保护区外孤立沼泽湿地的保护力度,特别是保护区外 6km 缓冲区内的孤立沼泽湿地保护。

关键词:孤立沼泽湿地;保护优先性;PSR 模型;保护策略;三江平原

Conservation priority evaluation and strategy for isolated marsh in the Sanjiang Plain

ZHANG Feng¹, ZHANG Shuangwei¹, LIU Xiaojian¹, LIU Jiping^{1,*}, ZONG Sidi¹, WANG Fabin²

1 College of Geographical Science and Tourism, Jilin Normal University, Siping 136000, China

2 College of Mathematics and Computer Science, Jilin Normal University, Siping 136000, China

Abstract: With the intensification of human activities, production, economic development and other activities, wetland area is shrinking, wetland fragmentation is becoming popular, and a large number of isolated wetlands are accordingly formed. Based on pressure-state-response theory and analytic hierarchy process (AHP), a wetland conservation priority model was constructed to evaluate the marshes in the Sanjiang Plain. The results showed that: 1) The spatial distribution of natural wetland conservation priority in the Sanjiang Plain shifted from a pattern of high-in-northeast and low-in-southwest to that of high-in-east and low-in-west from 2000 to 2020, while the isolated marshes changed from a pattern of high-in-northeast and low-in-southwest to that of dispersed and irregularly spatial distribution; 2) The conservation priorities of natural marshes and isolated marshes have moved from northeast to southwest, and the conservation priority intensity of isolated marshes and non-isolated marshes in Sanjiang Plain showed a decreasing trend from 2000 to 2020. The reduction magnitudes of isolated marsh was larger in 2020 than that in 2000; 3) The protection priority of isolated marshes outside the protected area was higher than that of isolated marshes inside the protected area; 4) The driving force and conservation priority of isolated marsh, the protection strategy of isolated marshes in the Sanjiang Plain was then proposed based on the evaluation results. The strategy includes two aspects: one is to place priority to the protection of the existing important

基金项目:吉林省科学技术厅项目(20230508029RC);国家自然科学基金项目(42271125);吉林省教育厅社会科学研究项目(JJKH20240530SK)

收稿日期:2023-07-21; **网络出版日期:**2024-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujpjl@163.com

isolated swamp wetland, and to restore the lost important isolated swamp wetland; and other is to strengthen the protection of isolated marshes outside the protected area, especially the protection of the isolated marshes within the 6 km buffer zone outside the protected areas.

Key Words: isolated marshes; conservation priority; pressure-state-response model; conservation strategy; Sanjiang Plain

湿地与森林、海洋并称为全球三大生态系统,其中湿地是陆地生态系统和水生生态系统交互作用的生态过渡带,具有重要的生态环境功能^[1]。随着全球气候变化、社会经济快速发展、人口增长以及环境污染的加剧,全球各国的湿地遭受了严重的破坏和威胁^[2],天然湿地面积锐减,湿地破碎化加剧^[3],形成大量地理上孤立的湿地^[4]。

三江平原作为湿地变化较剧烈的区域,区域水环境较好,提供了珍稀濒危水禽的栖息地,有着举足轻重的地位^[5]。近几十年来受人类活动的强烈干扰,三江平原由过去以大片湿地为基底的景观转变为现在以农田为基底的景观,由于湿地的丧失导致了生物多样性下降、土地荒漠化等一系列生态破坏现象的出现^[6-7]。除自然保护区和人类活动较少的地区外,在三江平原地区很少看到大面积湿地分布,主要以零星分布的孤立湿地为主,由于一些孤立湿地面积较小,离人类活动区域较近,很容易逐渐退化甚至消失^[8]。这些孤立湿地面积虽小,但对于保持当地生物多样性和生态平衡起着举足轻重的作用,它能支持小的本地种群^[9],同时可以增强湿地生物连通性^[10-11]。三江平原湿地原有的持水、蓄水功能下降,导致该地区的旱涝灾害频繁^[12]。针对三江平原湿地退化的问题,需要对湿地进行恢复以及保护^[13],而通过什么模式才能更有效的恢复与保护湿地是目前研究的热点。

目前湿地的恢复与保护策略主要针对大片非孤立湿地的,在保护过程中均未考虑到孤立湿地与非孤立湿地功能的差异,导致孤立湿地的保护力度不够^[14-16]。而孤立湿地作为三江平原重要的湿地类型之一,其气候功能、水文功能和生境功能对调节和改善区域生态环境质量、净化湿地水体和保护生物多样性等方面具有重要意义。因此如何针对孤立湿地进行保护优先性评价,并提出针对孤立湿地的保护策略是目前迫切需要解决的问题。鉴于此,本文将三江平原孤立沼泽湿地从自然沼泽湿地(包括孤立沼泽湿地和非孤立沼泽湿地)中识别出来,选取 2000 年、2010 年、2020 年三期数据进行分析,基于压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型及层次分析法构建沼泽湿地的保护优先性评价模型,找出孤立沼泽湿地保护优先性的变化趋势,探讨保护区分布对沼泽湿地保护效果的影响,并提出有针对性的保护建议与对策,为孤立沼泽湿地的有效恢复与保护提供借鉴与指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省的东北部,黑龙江省松花江下游及其与乌苏里江汇合处^[17],地理坐标为 45°01'—48°27'N,129°11'—135°05'E。总面积为 108830km²,是我国平原地区沼泽分布最大、最集中的地区之一,主要包括佳木斯市、鹤岗市、双鸭山市、七台河市、鸡西市所属的 21 个县(市)和牡丹江市所属的穆稜县、哈尔滨市所属的依兰县(图 1)。

三江平原地区西南高、东北低,湿地植被类型主要以苔草沼泽为主,其次为芦苇沼泽。区域气候为温带湿润、半湿润大陆性季风气候,1 月均温在 -18℃ 以下,7 月均温 21—22℃,年降水量 500—650mm。土壤以白浆土、草甸土、沼泽土以及黑土为主。植被种类属于长白植物区系,自然植被以沼泽化草甸和沼泽植被为主^[18]。

三江平原境内先后建立 4 个国营农场管理局,52 个大型国营农场,农业生产规模巨大,以种植业和牧业为主,其他产业比重相对较小^[19]。人均耕地面积和人均粮食产量是全国水平的 5 倍^[20]。三江平原主要农作物为水稻、玉米和大豆,其中玉米和大豆种植面积各占其农作物总种植面积的 51.3% 和 23.4%,而水稻种植面

积约占其所种植农作物总面积的 24.7%,是世界上最大的优质粳稻种植区之一^[21]。

1.2 数据来源及处理

主要数据包括三江平原地区 2000 年、2010 年和 2020 年的沼泽湿地分布图,以及研究区的自然(年平均气温、年降水量、海拔、坡度、坡向、地貌类型、土壤类型等)、社会经济(人口密度、GDP)等相关数据。

所选三江平原土地利用数据的时间范围为 2000—2020 年,时间跨度均匀,2000 年、2010 年数据来自地理空间数据云的 Landsat TM 遥感数据,2020 年数据来自 Landsat OLI 遥感数据,分辨率为 30m,时间为 6—9 月。对 Landsat TM 遥感数据及 Landsat OLI 遥感数据用 ERDAS 软件分别采用 4、3、2 波段和 5、4、3 波段进行标准假彩色合成,在人工解译的基础上结合高分辨率遥感影像与野外验证点考察,2000 年、2010 年和 2020 年验证精度分别为 86.3%,88.1%,90.4%。气温和降水数据通过中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获得,三江平原 DEM 数据通过马里兰大学地球科学研究中心(<https://glcfapp. umiacs. umd. edu>)获得,利用 ArcGIS 10.2 软件对 DEM 数据进行边界裁剪。在 ArcGIS 10.2 软件下将三江平原 DEM 图通过 Slope 命令获得坡度。地貌、土壤数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),在 ArcGIS10.2 软件中对其进行边界裁剪,得到三江平原地貌类型和土壤类型数据。人口数据、GDP 数据通过查找研究时间跨度所需的统计年鉴获得。

在 GIS 技术支持下,通过空间分析命令,将三江平原的沼泽湿地数据与水文数据做叠加处理和缓冲分析,借助邻域分析来识别孤立沼泽湿地^[22]。

1.3 研究方法

层次分析法(AHP)是将与评价有关的因素分成目标层、准则层、指标层等层次,在此基础之上进行定性和定量分析的评价方法。该方法是应用网络系统理论和多目标综合评价方法,提出的一种层次权重分析方法,使用计算软件 yaahp0.5.3 实现,当判断矩阵一致性比例值(CR)在 0-0.1 之间,通过一致性检验,否则需对判断矩阵进行重新调整。这种方法的特点是在对复杂问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的评价方法^[23]。

为了对孤立沼泽湿地恢复进行进一步分析,基于 PSR 模型及层次分析法构建了湿地的保护优先性评价模型,对自然沼泽湿地进行保护优先性的评价,并找出保护优先性的变化趋势,选取 2000 年、2010 年、2020 年三期数据进行分析,以期对湿地保护优先性评价分析提供有意义的依据。湿地保护优先性评价模型的计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n a_i \times b_i \quad (1)$$

式中, P 表示湿地保护优先性评价价值, a_i 表示湿地中第 i 个驱动因子的权重, b_i 表示第 i 个驱动因子的赋分值。在湿地保护优先性评价过程中,结合层次分析法确定各评价指标的权重,将专家的主观判断给予量化,综合考



图 1 三江平原区域范围略图

Fig.1 Map of the Sanjiang Plain

考虑各评价因子的相对重要性,削弱主观性赋权,使计算结果准确和更合理^[24]。

标准差椭圆是空间统计方法中能够精确地揭示地理事物空间格局特征的常用方法,通过质心、周长、面积等基本参数,定量描述地理要素空间分布的中心性、空间形态等特征^[25]。椭圆的质心表示地理事物空间分布的相对位置,可以反映地理事物分布的中心性;椭圆的周长面积比值越大,表示地理事物越分散。

本文使用区域沼泽湿地保护优先性强度(Regional Marsh Protection Priority Strength, RMPPS)来表征区域沼泽湿地保护优先性的整体强度,其计算公式如下:

$$\text{RMPPS} = \sum_{i=1}^n a_i \times s_i / S \quad (2)$$

式中, RMPPS 表示区域沼泽湿地保护优先性强度, a_i 表示该区域内第 i 个沼泽湿地保护优先性评价价值, s_i 表示该沼泽湿地的面积, S 表示区域总面积。RMPPS 值越大表示区域沼泽湿地保护优先性强度越大。

2 结果与分析

2.1 评价指标的选取

基于 PSR 模型对三江平原自然沼泽湿地保护优先性的评价指标进行选取,该模型以因果关系为基础,体现了人类与环境之间的相互作用关系^[26],分别为压力指标、状态指标和响应指标,其中压力指标主要是指为自然沼泽湿地带来影响和胁迫作用的指标;状态指标主要是反映沼泽湿地自身的变化;响应指标主要指受到压力后,湿地的各项指数所发生的一系列变化。根据以上理论,结合三江平原沼泽湿地变化的驱动因子及实际情况,并参考相关文献^[27-31],选取了 13 个评价指标(表 1)。

表 1 三江平原自然沼泽湿地保护优先性评价指标

Table 1 Priority evaluation indices of natural marsh protection in the Sanjiang Plain

	压力 Pressure	状态 State	响应 Response
评价因子 Evaluation factor	年平均气温	坡度	斑块重要值
	年降水量	地貌适宜性	局部空间自相关指数
	距居民点距离	土壤适宜性	NDVI 指数
	人口密度	斑块面积	
	GDP	斑块周长面积比	

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

(1) 气候因子

气候变化会对湿地的各项功能产生影响^[32],由于沼泽湿地需要在冷湿的环境下才能更好的发育,因此年平均气温与湿地保护优先性呈负相关,年降水量与其呈正相关,选取二者作为压力指标。

(2) 人为因子

距居民点距离、人口密度以及 GDP 作为人为因子,与湿地保护优先性有密切关系,随着经济活动增加,人口密度增加,都会对湿地保护优先性产生影响,选取这三个人为因子作为压力指标。

(3) 土壤、地貌适宜性

湿地土壤凭借其独特的生态功能,可以为湿地生物提供生存场所也可以通过下渗的方式与地下水进行联系,实现其涵养水源的功能^[33],不同地貌上的湿地保护优先性难易程度各不相同,将二者对沼泽湿地保护优先性的适宜程度作为一种状态指标。

(4) 地形因子

不同地形对于湿地恢复潜力影响不同,地形的陡缓对于湿地上生存的动植物有不同影响,将坡度作为状态指标之一,可以反映出不同坡度上湿地面积分布。

(5) 斑块面积、周长面积比

湿地斑块面积大小与湿地保护优先性存在正相关,周长面积比与其存在负相关,比值越大形状约不规则,将二者作为状态指标,反映湿地自身变化。

(6) 斑块重要值

湿地的斑块重要值反映湿地连通性,对景观连接度起很大作用,是比较重要的响应指标。

(7) NDVI 指数

植被是生态系统的重要组成部分,具有涵养水源、保持水土等方面的功能,因此植被覆盖度也是对沼泽湿地保护的一种响应,选取 NDVI 指数作为响应指标。

(8) 局部空间自相关指数

局部空间自相关指数分析了每个区域与周边地区间的空间差异程度,数值越高,相关性越好,作为响应指标,反映湿地斑块之间的相关性。

2.2 评价指标权重的确定

在湿地保护优先性评价过程中,选取层次分析法确定各评价指标的权重^[34],它是将专家的主观判断给予量化,并且综合考虑了各评价因子的相对重要性,削弱了主观性赋权,使计算结果准确和更合理,是一种简单易行、行之有效的分析方法^[35]。对所选的评价指标进行权重赋值,具体步骤如下:(1)构建层次结构模型;(2)构造两两比较的判断矩阵;(3)一致性检验,最后得出各指标权重值,如表 2—表 5。

表 2 目标层-准则层判断矩阵及排序

Table 2 Judgment matrix and sorting of target layers and criterion layers

沼泽湿地保护优先性评价 Marsh protection priority evaluation	响应指标 Response index	压力指标 Pressure index	状态指标 State index	权重 Weight
响应指标 Response index	1.000	2.000	3.000	0.5396
压力指标 Pressure index	0.500	1.000	2.000	0.2970
状态指标 Status index	0.333	0.500	1.000	0.1634

表 3 准则层-对象层(压力指标)判断矩阵及排序

Table 3 Criterion layers-object layers (pressure indices) judgment matrix and ranking

压力指标 Pressure index	距居民点距离	人口密度	国内生产总值	年平均气温	年降水量	权重 Weight
距居民点距离 Distance from settlement	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	0.4174
人口密度 Population density	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	0.2634
国内生产总值 GDP	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	0.1602
年平均气温 Annual average temperature	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	0.0975
年降水量 Annual total precipitation	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	0.0615

表 4 准则层-对象层(状态指标)判断矩阵及排序

Table 4 Criterion layers-object layers (state indices) judgment matrix and ranking

状态指标 State index	土壤适宜性	地貌适宜性	坡度	斑块面积	斑块周长面积比	权重 Weight
土壤适宜性 Soil suitability	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	0.4174
地貌适宜性 Geomorphologic suitability	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	0.2634
坡度 Slope patch	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	0.1602
斑块面积 Area patch	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	0.0975
斑块周长面积比 Perimeter area ratio	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	0.0615

表 5 准则层-对象层(响应指标)判断矩阵及排序

Table 5 Criterion layers-object layers (response indices) judgment matrix and ranking

响应指标 Response index	斑块重要值	NDVI 指数	空间局部自相关指数	权重 Weight
斑块重要值 Patch importance value	1.000	2.000	3.000	0.5396
NDVI 指数 NDVI index	0.500	1.000	2.000	0.2970
空间局部自相关指数 Spatial local autocorrelation index	0.333	0.500	1.000	0.1634

由表 2—表 5 可知,4 个判断矩阵一致性比例值 CR 均在 0—0.1 之间,通过一致性检验,并得出每个评价指标的最终权重值,见表 6。

表 6 各评价指标的权重

Table 6 The weights of each evaluation index

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	对象层 Object layer	权重 Weight
沼泽湿地保护优先性评价 Marsh protection priority evaluation	压力	年平均气温	0.0289
		年降水量	0.0183
		距居民点距离	0.1240
		人口密度	0.0782
		GDP	0.0476
		状态	0.0262
	响应	地貌适宜性	0.0430
		土壤适宜性	0.0682
		斑块面积	0.0159
		斑块周长面积比	0.0101
		斑块重要值	0.2912
		局部空间自相关指数	0.0882
		NDVI 指数	0.1602

2.3 评价指标的分级与计算

综合各参考文献的研究结果^[27—30]与研究区的实际情况,采用专家打分法^[31—35]对三江平原自然沼泽湿地保护优先性评价指标进行分级,并赋值与计算,潜力值在 1—10 内取值,得到表 7—表 9。

(1) 气候

通过分析 2000—2020 年三江平原年平均气温、年降水量的数据以及研究区域的实际情况,对其进行赋值。年平均气温越高,蒸发量越大,湿地保护优先性越低,年降水量越多越有利于保护沼泽湿地,湿地保护优先性越大;分别将二者分为 5 级。

(2) 人为因子

距居民点距离、人口密度以及 GDP 属于人为因子,由于 2000—2020 年社会经济不断发展,社会进步等原因,三年的 GDP 无法统一分级,因此根据各年经济情况分成不同等级。三项人为因子数值越大说明人类活动越强烈,湿地保护优先性越低;反之,湿地保护优先性越高,分别将三者分为 5 级。

(3) 土壤、地貌适宜性

不同土壤类型、地貌类型上湿地保护的难易程度各不相同,泥炭土、沼泽土相对于其他土壤类型有利于湿地发育,平原、洼地上利于湿地的发育,分别将二者分为 5 级。

(4) 地形因子

地形的陡缓对于湿地保护优先性影响不同,坡度越低,地形越缓,越利于湿地发育,将坡度分为 5 级。

(5) 斑块面积、周长面积比

表 7 湿地保护优先性评价模型-压力指标赋值表

Table 7 Evaluation model of wetland conservation priority-pressure index assignment table

尺度 Scale	评价指标 Evaluation index	权重 Weight	分级 Grading	潜力值 Potential value	尺度 Scale	评价指标 Evaluation index	权重 Weight	分级 Grading	潜力值 Potential value
压力 Pressure	年平均气温/℃	0.0289	<2	10	压力 Pressure	2020 年 GDP/亿元	0.0476	90—110	4
			2—3	8				>110	2
			3—4	6				<80	10
			4—5	4				80—160	8
			>5	2				160—240	6
	年降水量/(mm/a)	0.0183	<500	2		240—500	4		
			500—600	4		>500	2		
			600—700	6		2010 年 GDP/亿元	0.0476	<40	10
			700—900	8				40—60	8
			>900	10				60—80	6
	距居民点距离/km	0.1240	<2	2		2000 年 GDP/亿元	0.0476	<8	10
			2—5	4				8—13	8
			5—10	6				13—18	6
			10—15	8				18—27	4
			>15	10				>27	2
	人口密度/(人/km ²)	0.0782	<30	10					
			30—60	8					
			60—90	6					

表 8 湿地保护优先性评价模型-状态指标赋值表

Table 8 Evaluation model of wetland conservation priority-status index assignment table

尺度 Scale	评价指标 Evaluation index	权重 Weight	分级 Grading	潜力值 Potential value	尺度 Scale	评价指标 Evaluation index	权重 Weight	分级 Grading	潜力值 Potential value				
状态 Status	坡度/ (°)	0.0262	<1	10				白浆土	8				
			1—3	8				草甸土	7				
			3—5	6				河流湖泊	6				
			5—7	4				水稻土	5				
			>7	2				黑土	3				
	地貌适宜性	0.0430	河(湖)漫滩	10				斑块面积/ km ²	0.0159	<1	2		
			河流(湖泊)阶地	9						1—10	4		
			河流洼地	7						10—50	6		
			河流湖泊水库	6						50—100	8		
			洪积冲积平原	5						>100	10		
			侵蚀剥蚀台地	4						斑块周长 面积比	0.0101	<10	10
			熔岩台地	3								10—25	8
			侵蚀剥蚀低山	2								25—50	6
	土壤适宜性	0.0682	泥炭土	10						50—100	4		
			沼泽土	9						>100	2		

表 9 湿地保护优先性评价模型-响应指标赋值表

Table 9 Wetland conservation priority evaluation model-response index assignment table

尺度 Scale	评价指标 Evaluation index	权重 Weight	分级 Grading	潜力值 Potential value	尺度 Scale	评价指标 Evaluation index	权重 Weight	分级 Grading	潜力值 Potential value
响应 Response	斑块重要值	0.2912	<0.5	2		NDVI 指数	0.1602	0.6—0.8	8
			0.5—1	4				>0.8	10
			1—1.7	6				<0.5	2
			1.7—11.5	8				0.5—0.6	4
			>11.5	10				0.6—0.8	6
	局部空间自相关指数	0.0882	<0.2	2				0.8—0.9	8
			0.2—0.4	4				>0.9	10
			0.4—0.6	6					

湿地斑块面积大小与湿地保护优先性存在正相关,斑块周长面积比与其存在负相关,将二者分为 5 级。

(6) 斑块重要值

湿地的斑块重要值反映湿地连通性,斑块重要值越大,湿地保护优先性越高,将其分为 5 级。

(7) NDVI 指数

植被覆盖度与沼泽湿地保护优先性存在正相关,NDVI 指数值越大,湿地保护优先性越高,将其分为 5 级。

(8) 局部空间自相关指数

局部空间自相关指数与湿地保护优先性存在正相关,数值越高,相关性越好,将其分为 5 级。

2.4 湿地保护优先性评价

根据湿地保护优先性评价模型的计算结果,将计算得出的综合权重值与 2000 年、2010 年、2020 年的自然沼泽湿地矢量图相连接,综合考虑 2000 年、2010 年、2020 自然沼泽湿地的保护优先性评价价值,通过自然断点分级法按综合权重值进行重分类,按照保护优先性评价的优先级分为 5 级,5 级为湿地保护优先性等级高 ($P \in [5.79, 8.89]$),4 级为湿地保护优先性等级较高 ($P \in [5.05, 5.79]$),3 级为湿地保护优先性等级中等 ($P \in [4.57, 5.05]$),2 级为湿地保护优先性等级较低 ($P \in [4.12, 4.57]$),1 级为湿地保护优先性等级低 ($P \in [3.04, 4.12]$),评价结果见图 2。

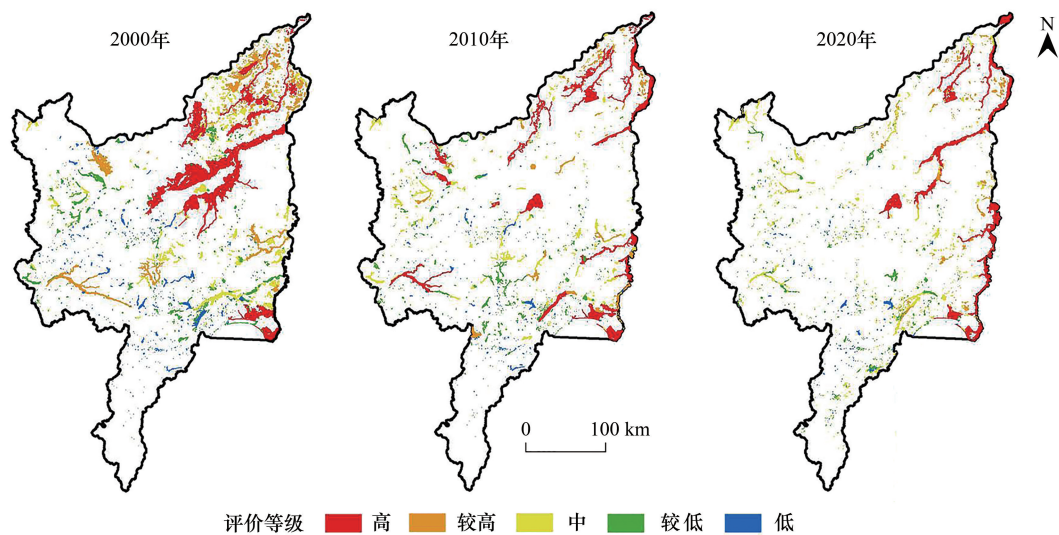


图 2 2000—2020 年三江平原自然沼泽湿地保护优先性评价等级空间分布图

Fig.2 Spatial distributions of priority evaluation levels of natural marsh protection in the Sanjiang Plain in 2000, 2010 and 2020

由图 2 可知,2000—2020 年三江平原自然沼泽湿地保护优先性空间分布由东北高西南低的格局(2000 年和 2010 年)向东高西低的格局转换(2020 年),保护优先性等级高的沼泽湿地主要分布在河流和湖泊沿岸和保护区内。2000—2020 年不仅自然沼泽湿地面积逐渐减少,保护优先性等级高的自然沼泽湿地面积也在逐渐减少。

从自然沼泽湿地保护优先性评价空间等级分布图中提取出孤立沼泽湿地保护优先性评价数据,制作孤立沼泽湿地保护优先性评价等级空间分布图(图 3)。由图 3 可知,2000—2020 年三江平原孤立沼泽湿地保护优先性空间分布由东北高西南低的格局(2000 年)向分散无空间分布趋势格局转换(2010 年和 2020 年),且保护优先等级高和较高的孤立沼泽湿地数量和面积在逐渐减少。

从孤立沼泽湿地保护优先性的空间动态变化来看,不管是自然沼泽湿地还是孤立沼泽湿地,2000—2020 年湿地保护优先性的质心都由东北向西南移动(图 4),孤立沼泽湿地移动幅度较大,为 90km,自然沼泽湿地移动了 72km,说明保护等级高的东北部孤立沼泽湿地和非孤立沼泽湿地丧失较多。

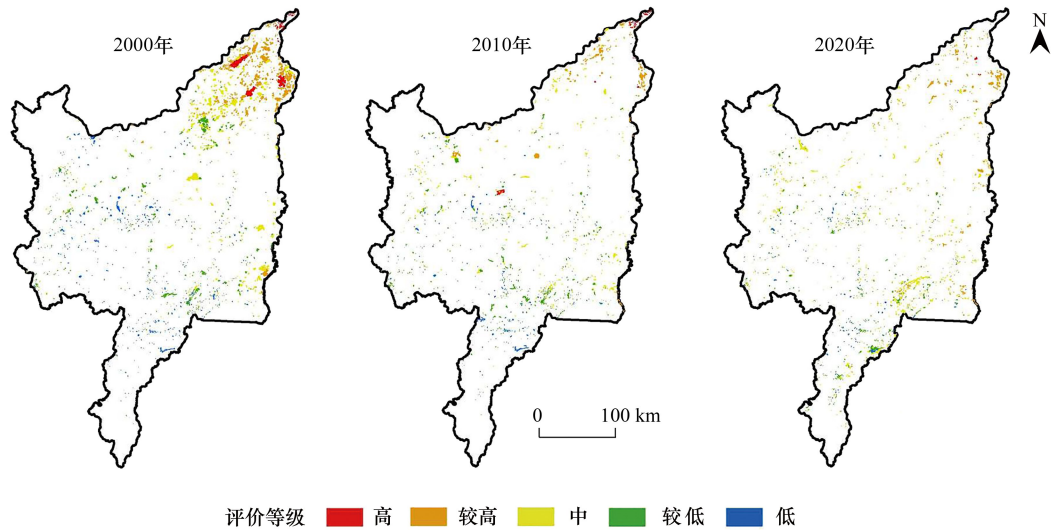


图3 2000—2020年三江平原孤立沼泽湿地保护优先性评价等级空间分布图

Fig.3 Spatial distributions of priority evaluation levels of isolated marsh conservation in the Sanjiang Plain in 2000, 2010 and 2020

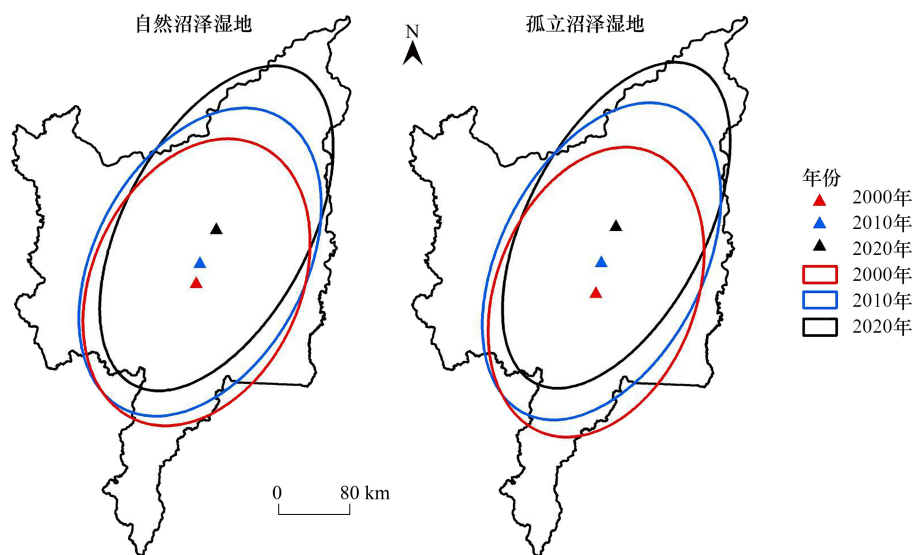


图4 2000—2020年三江平原湿地保护优先性评价质心分布图

Fig.4 Centroid distributions of wetland conservation priority evaluation in the Sanjiang Plain in 2000, 2010 and 2020. Left is for natural marsh wetland and right for the isolated marsh wetland

从三江平原湿地保护优先性评价分级结果来看,2000—2020年各等级的自然沼泽湿地面积逐渐减少(表10),其中以高等级的自然沼泽湿地面积丧失最多,与2000年相比,2020年保护优先性高、较高、中等、较低和低等级的自然沼泽湿地分别丧失了2329.51km²、1414.27 km²、541.35 km²、486.78 km²和308.74 km²,而不同等级的自然沼泽湿地面积变化动态度以较高等级最大为78.69%,以高等级的面积动态度最小为50.42%。而各等级孤立沼泽湿地面积均呈减少趋势,较高等级减少最多为420.52 km²。2000—2020年三江平原孤立沼泽湿地和非孤立沼泽湿地的RMPPS值均呈降低趋势,其中孤立沼泽湿地降低了69.22%,非孤立沼泽湿地降低了53.88%,孤立沼泽湿地降低的幅度较大,且非孤立沼泽湿地的RMPPS值均高于孤立沼泽湿地(图5)。从数量来看,除较高等级和中等等级的自然沼泽湿地数量增加外,其它等级的自然沼泽湿地数量均呈减少趋势;除

中等等级的孤立沼泽湿地数量增加外,其它等级的孤立沼泽湿地数量均呈减少趋势,特别是高等级的孤立沼泽湿地减少幅度最大,由 2000 年的 105 个减少到 2020 年的 10 个。

表 10 三江平原湿地保护优先性评价分级统计表

Table 10 Statistics of priority evaluation of wetland protection in the Sanjiang Plain

年份 Year	要素 Factors	高 High	较高 Relatively high	中等 Medium	较低 Relatively low	低 Low
2000	自然沼泽湿地数量/个	114	598	640	995	726
	自然沼泽湿地面积/km ²	5052.93	1797.28	1090.84	822.03	428.64
	孤立沼泽湿地数量/个	105	510	554	812	612
	孤立沼泽湿地面积/km ²	212.40	618.99	525.65	256.02	115.93
2010	自然沼泽湿地数量/个	117	272	535	935	319
	自然沼泽湿地面积/km ²	2875.63	570.74	637.82	548.33	159.13
	孤立沼泽湿地数量/个	103	218	423	770	275
	孤立沼泽湿地面积/km ²	36.70	167.71	168.84	186.98	64.56
2020	自然沼泽湿地数量/个	32	632	1304	854	273
	自然沼泽湿地面积/km ²	2505.13	383.01	549.49	335.26	119.90
	孤立沼泽湿地数量/个	10	486	999	673	224
	孤立沼泽湿地面积/km ²	4.97	198.47	226.84	100.14	32.59

根据保护区内外孤立沼泽湿地与非沼泽孤立沼泽湿地的 RMPPS 结果,分析孤立沼泽湿地与非孤立沼泽湿地保护优先性保护强度。整体来看保护区内非孤立沼泽湿地 RMPPS 明显高于保护区外非孤立沼泽湿地,而保护区外孤立沼泽湿地的 RMPPS 整体高于保护区内孤立沼泽湿地(图 6)。2000—2020 年保护区内非孤立沼泽湿地的 RMPPS 呈现先下降后上升的变化趋势,而保护区外非孤立沼泽湿地则呈现持续下降的变化趋势;保护区内外的孤立沼泽湿地 RMPPS 均呈现先下降后上升的变化趋势。其中 2000 年保护区内外非孤立沼泽湿地 RMPPS 差值最大,约为 0.81;2010 年最小,仅为 0.33。而 2000—2020 年保护区内外孤立沼泽湿地 RMPPS 差值变小,由 0.07 变为 0.02。在保护区内沼泽湿地受到一定程度的保护,其聚集程度相较于保护区外沼泽湿地较高,保护区内湿地多以非孤立沼泽湿地为主。而保护区外湿地受人类活动影响较大,相比于保护区内湿地斑块更加破碎,形成大量的孤立沼泽湿地。因此在保护区内部非孤立沼泽湿地的保护优先级高于保护区外部的非孤立沼泽湿地,而在保护区外部,应注重保护 RMPPS 较高的孤立沼泽湿地。

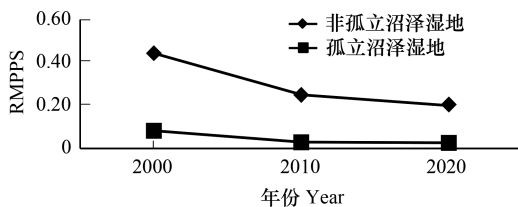


图 5 2000—2020 年三江平原孤立沼泽湿地和非孤立沼泽湿地的 RMPPS 值

Fig.5 RMPPS values of isolated marsh and non-isolated marsh in the Sanjiang Plain from 2000 to 2020

RMPPS: 区域沼泽湿地保护优先性强度 Regional marsh protection priority strength

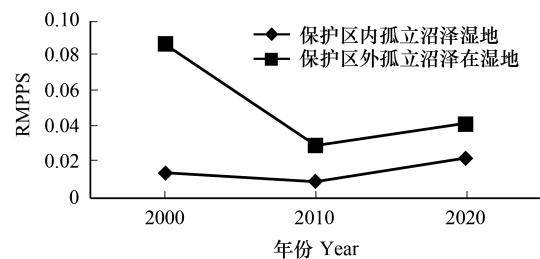


图 6 2000—2020 年三江平原保护区内外孤立沼泽湿地 RMPPS 值

Fig.6 RMPPS value of isolated marsh within and outside the Sanjiang Plain Reserve from 2000 to 2020

以 2km、4km、6km、8km、10km 与 12km 为缓冲阈值对三江平原保护区建立缓冲区,对各距离缓冲区内孤立沼泽湿地进行筛选并计算其 RMPPS 值。结果显示,2000 年以保护区为中心 4—6km 缓冲区内孤立沼泽湿地 RMPPS 逐渐升高,而后呈现下降趋势。2010 年与 2020 年孤立沼泽湿地 RMPPS 总体上都呈现变化幅度

较小的下降趋势,但 2010 年 RMPPS 的最高值出现在 4—6km 处,而 2020 年出现在 2—4km 处。说明 2000 年与 2010 年 6km 为保护区外孤立沼泽湿地 RMPPS 值的阈值,保护区 6km 缓冲区内为具有优先性的孤立沼泽湿地斑块,而 2020 年具有优先性的孤立沼泽湿地多集中于保护区 4km 缓冲区内。相比于 2010 年与 2020 年,2000 年保护区外孤立沼泽湿地 RMPPS 较大(图 7)。

2.5 孤立沼泽湿地保护策略

2.5.1 对现有重要孤立沼泽湿地进行优先保护,对已丧失的重要孤立沼泽湿地进行恢复

通过 ArcGIS 10.2 的空间分析,将 2000 年和 2010 年评价等级为高等级、且 2020 年已丧失的孤立沼泽湿地提取出来作为重点恢复孤立沼泽湿地,将 2000 年和 2010 年评价等级为高等级、且 2020 年已退化的孤立沼泽湿地(2020 年孤立沼泽湿地存在但面积变小,保护优先性等级降低)提取出来作为重点修复孤立沼泽湿地,将 2020 年评价等级为高等级的孤立沼泽湿地作为目前重点保护小区(图 8)。

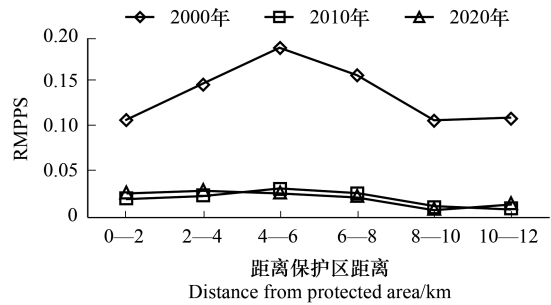


图 7 2000—2020 年三江平原与保护区不同距离孤立沼泽湿地 RMPPS 值

Fig.7 RMPPS value of isolated marshes at different distances in the Sanjiang Plain and protected areas in 2000, 2010 and 2020

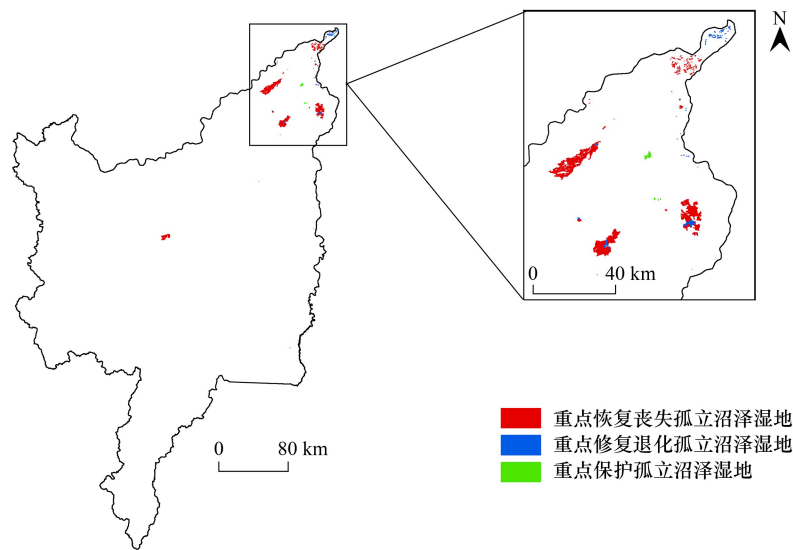


图 8 三江平原重点保护和恢复(修复)孤立沼泽湿地分布图

Fig.8 Distribution of key protected and restored isolated marshes in the Sanjiang Plain

在三江平原共有 10 个孤立沼泽湿地需要重点保护,均分布在三江平原的东北部(图 8)。重点恢复丧失孤立沼泽湿地除 1 个分布在三江平原中部外,其余均分布在三江平原的东北部,而重点修复退化孤立沼泽湿地也均分布在三江平原的东北部(图 8)。说明三江平原东北部区域是孤立沼泽湿地丧失和退化较严重的区域,同时该区孤立沼泽湿地具有重要保护价值,所以应加强该区孤立沼泽湿地的保护与恢复。

2.5.2 加强保护区外孤立沼泽湿地的保护力度,特别是距离保护区较近的孤立沼泽湿地

由于 2000—2020 年保护区外孤立沼泽湿地 RMPPS 远大于保护区内,因此应加强保护区外孤立沼泽湿地的保护力度,特别是保护区外 6km 缓冲区内孤立沼泽湿地的保护。根据湿地资源保护的实际情况,在保护区外孤立沼泽湿地保护优先等级高的区域建立湿地保护小区、合理利用示范试验区或湿地公园等,使湿地野生动植物及其栖息地,以及湿地独特的生态系统得到有效保护。有重点地选择一些有代表性的退化孤立沼泽湿

地,开展湿地恢复、重建的示范区建设,减缓降低人为因素对湿地的负面影响。在示范区内加大退耕还林、还草、还湖力度,维护孤立沼泽湿地的独特功能。

2.5.3 加强孤立沼泽湿地恢复的理论研究,构建孤立沼泽湿地恢复模式

近几十年来受人类活动强烈干扰,三江平原经历了自然沼泽湿地-旱田-人工湿地(水田)-恢复湿地的过程,湿地结构功能发生剧烈变化,目前三江平原自然保护区外的湿地主要以孤立沼泽湿地类型为主。研究表明三江平原孤立沼泽湿地面积从 1975 年的 1805km²减少到 2020 年的 776km²,数量从 1975 年的 3674 个减少到 2020 年的 2393 个,孤立沼泽湿地数量和面积的均呈现大幅度减少趋势,因此迫切需要进行孤立沼泽湿地的保护与恢复^[36]。由于孤立沼泽湿地具有自己独特的功能(生物迁徙的“踏脚石”功能、特有种的保护功能等),是非孤立沼泽湿地不可替代的,但是目前对孤立沼泽湿地保护与恢复的理论等方面均未能进行系统的研究,阻碍了孤立沼泽湿地恢复的实践。因此为了更好的保护与恢复孤立沼泽湿地,应进一步加强孤立沼泽湿地恢复理论的研究,找出孤立沼泽湿地小气候、水文、生物、土壤之间的关系,探究孤立沼泽湿地系统内部的物流、能流和信息流,以及孤立沼泽湿地系统稳定性与自我调节的原理,为孤立沼泽湿地的恢复提供科学依据。同时加强孤立沼泽湿地恢复的应用与实践,通过孤立沼泽湿地的恢复实验与实践,找出适合不同类型、不同退化程度、不同形状、不同景观部位的孤立沼泽湿地恢复模式。

3 结论

(1)2000—2020 年三江平原的自然沼泽湿地与孤立沼泽湿地保护优先性空间格局变化差异较大。2000—2020 年三江平原自然沼泽湿地保护优先性空间分布由东北高西南低的格局转向东高西低的格局,而孤立沼泽湿地由东北高西南低的格局向分散无空间分布趋势格局转换。2000—2020 年自然沼泽湿地和孤立沼泽湿地保护优先性质心都由东北向西南移动,自然沼泽湿地移动 72km,孤立沼泽湿地移动 90km。

(2)2000—2020 年三江平原的孤立沼泽湿地与非孤立沼泽湿地保护优先性强度变化较大,均呈降低趋势,孤立沼泽湿地降低的幅度较大,且非孤立沼泽湿地的保护优先性强度均高于孤立沼泽湿地。保护区内非孤立沼泽湿地保护优先性强度明显高于保护区外非孤立沼泽湿地,而保护区外孤立沼泽湿地的保护优先性强度高于保护区内孤立沼泽湿地。

(3)三江平原孤立沼泽湿地的保护对策为:对现有重要孤立沼泽湿地进行优先保护,对已丧失的重要孤立沼泽湿地进行恢复;加强保护区外孤立沼泽湿地的保护力度,特别是保护区外 6km 缓冲区内孤立沼泽湿地的保护;加强孤立沼泽湿地恢复的理论研究,构建孤立沼泽湿地恢复模式。

参考文献(References):

- [1] 闫丹丹. 松花江下游沿江湿地水文连通性恢复研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [2] 胡文秋. 基于 RS 和 GIS 的退化湿地生态系统恢复力研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.
- [3] 刘兴土. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能. 湿地科学, 2007, 5(1): 64-68.
- [4] 刘吉平, 李艾玉, 田学智, 赵亮. 三江平原孤立湿地的形成及主要类型. 湿地科学, 2014, 12(2): 141-147.
- [5] 刘吉平, 杜保佳, 盛连喜, 田学智. 三江平原沼泽湿地格局变化及影响因素分析. 水科学进展, 2017, 28(1): 22-31.
- [6] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 齐月, 闫冰, 刘高慧, 高晓奇, 李俊生. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化. 生态学报, 2017, 37(8): 2551-2562.
- [7] 陈雪梅. 近 60 年三江平原湿地动态变化及驱动力分析[D]. 四平: 吉林师范大学, 2014.
- [8] 刘吉平, 梁晨, 马长迪. 孤立湿地功能研究进展. 地理科学, 2018, 38(8): 1357-1363.
- [9] Lawler J J. Climate change adaptation strategies for resource management and conservation planning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162: 79-98.
- [10] Naujokaitis-Lewis I, Fortin, Marie-Josée. Spatio-temporal variation of biotic factors underpins contemporary range dynamics of congeners. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1201-1213.
- [11] Nick M. Haddad, David R. Bowne, Alan Cunningham, Brent J. Danielson, Tim Spira. Corridor use by diverse taxa. *Ecology*, 2003, 84(3):

609-615.

- [12] 闫敏华, 邓伟, 马学慧. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化. 地理学报, 2001, 56 (2): 159-170.
- [13] 李红艳, 王维峰. 浅谈三江平原退耕还湿工程的深远意义. 现代化农业, 2005(2): 1-3.
- [14] 穆泳林, 梁晨, 李晓文, 白军红, 崔保山, 智烈慧, 梁芳源, 李鹏, 程维金, 肖之炎. 基于系统保护规划的海河流域湿地保护优先格局与保护空缺识别. 生态学报, 2021, 41(10): 3836-3845.
- [15] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, Zhang K J. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [16] 梁晨, 穆泳林, 智烈慧, 梁芳源, 李晓文, 白军红, 李鹏. 珠江流域湿地保护优先格局构建与保护空缺识别. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2021, 57(1): 142-150.
- [17] 满卫东, 刘明月, 李晓燕, 王宗明, 贾明明. 1990—2015 年三江平原生态功能区生态功能状况评估. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 136-141.
- [18] 张春华, 王宗明, 宋开山, 张柏, 刘殿伟. 基于马尔可夫过程的三江平原土地利用动态变化预测. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 210-216, 122.
- [19] 王清波, 李传宝, 付东风, 金辛. 三江平原湿地保护面临的问题及可持续发展战略研究. 环境科学与管理, 2017, 42(8): 172-174.
- [20] 郭笑怡, 高燕, 张延玲, 朱振华, 张洪岩. 基于遥感与 GIS 的三江平原耕地质量评价与生产力分析. 东北师大学报: 自然科学版, 2013, 45(2): 139-145.
- [21] 杜国明, 张扬, 李全峰. 21 世纪以来三江平原农作物种植结构演化研究. 农业现代化研究, 2019, 40(5): 736-744.
- [22] Lane C R, D'Amico E. Identification of putative geographically isolated wetlands of the conterminous United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 2016, 52(3): 705-722.
- [23] 杨澍, 初禹, 杨湘奎, 娄本君. 层次分析法(AHP)在三江平原地质环境质量评价中的应用. 地质通报, 2005, 24(5): 485-490.
- [24] 王秀丽, 杨柳, 李恒凯. 基于 PSR-AHP 模型的稀土矿区生态安全评价. 中国稀土学报, 2018, 36(4): 504-512.
- [25] Lauren M S, Mark V J. *Spatial statistics in ArcGIS*. Berlin: Springer, 2010.
- [26] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111-120.
- [27] 马长迪. 松嫩平原西部沼泽湿地景观格局演变及其对恢复潜力的影响[D]. 四平: 吉林师范大学, 2018.
- [28] 苏巾芳, 张群, 裘鸿菲. 基于层次分析法的武汉市后官湖国家湿地公园生态旅游资源使用后评价研究. 园林, 2019(11): 13-19.
- [29] 程朝霞, 李光耀, 韩瑞婷. 基于 AHP 模型的运城盐湖湿地及周边景观综合评价. 天津农业科学, 2019, 25(8): 69-72.
- [30] 张丽, 闫旭飞, 寇晓军. 北京湿地恢复潜力分析——基于 GIS 潜在湿地恢复潜力值模型. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(4): 388-391, 328.
- [31] 刘东, 付强. 基于 AHP 的三江平原地下水人工补给方法研究. 中国农村水利水电, 2008(7): 5-7, 21.
- [32] Lahmer W, Pfützner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2001, 26(7/8): 565-575.
- [33] 谢亚军, 谢永宏, 陈心胜, 李峰. 湿地土壤水源涵养功能研究进展. 湿地科学, 2012, 10(1): 109-115.
- [34] Maltby E. *Waterlogged wealth: why waste the world's wet places*. UK: An Earth scan aperback, 1986.
- [35] 马立广, 曹彦荣, 李新通. 基于层次分析法的拉市海高原湿地生态系统健康评估. 地球信息科学学报, 2011, 13(2): 234-239.
- [36] 宗思迪. 1975—2019 年三江平原孤立湿地动态变化及保护策略研究[D]. 四平: 吉林师范大学, 2020.