

DOI: 10.5846/stxb201801280224

张梦嫚, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, 38(12): - .

Zhang M M, Wu X Q. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变

张梦嫚^{1,2}, 吴秀芹^{1,2,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位研究站, 北京 100083

2 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要: 水文连通性是表征湿地格局和功能稳定性的重要指标, 连通性的降低通常意味着湿地生态功能的退化, 内部能量流动和养分循环的扰乱。选取京津冀最具典型性的白洋淀湿地为案例, 将形态学空间格局分析模型 (MSPA, Morphological Spatial Pattern Analysis) 与连通性指数 (IIC, Integral Index of Connectivity; PC, Probability of Connectivity) 相结合, 从时空两方面分析了白洋淀湿地水文连通性的变化, 总结出水文连通性变化的空间形态演变规律。结果表明, 1990—2015 年间, 白洋淀湿地整体连通性较差, 以 2005 年为节点呈现先降低后逐步恢复的趋势; 根据 MSPA 功能类型的变化, 将白洋淀湿地空间形态演变分为消退期与恢复期两个阶段。消退期主要表现为核心斑块逐步分裂为分支、环岛、桥接、孤岛等细碎斑块, 然后逐渐消退的过程; 恢复期各类型主要表现为核心湿地面积逐渐增加, 分支向桥接转变的过程。其中核心湿地的面积由 1990 年的 8974.90 hm², 最低下降到 2005 年 2092.97 hm², 到 2015 年又恢复到 4122.14 hm²。整体而言, 核心湿地的变化对白洋淀湿地水文连通性变化起主导作用。白洋淀湿地水文连通性降低的影响因素主要有上游补给水量的多少, 土地利用变化以及气候变化等因素。研究将 MSPA 模型与连通性指数相结合的方法, 能较好揭示湿地水文连通性变化过程中水文形态组织和运行变化的规律, 可为其他地区湿地相关研究提供方法上的借鉴。

关键词: 水文连通性; 形态学空间格局分析模型 (MSPA); 白洋淀湿地; 连通性指数; 空间形态

Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years

ZHANG Mengman^{1,2}, Wu Xiuqin^{1,2,*}

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Hydrological connectivity is an important stability indicator of the pattern and function of wetlands. A decrease in hydrological connectivity of wetlands usually indicates the degradation of ecological functions, and the disruption of internal energy flow and nutrient circulation. Baiyangdian Lake is the most typical and representative wetland in Beijing, Tianjin, and Hebei provinces. Based on morphological spatial pattern analysis ((MSPA) and connectivity indices, we chose Baiyangdian Lake as a study case for analyzing the changes in its hydrological connectivity at the spatial and temporal scales, and for summarizing the morphological and spatial processes. The results show that the hydrological connectivity of the Baiyangdian wetland was generally weak from 1990 to 2015, which reduced between 1990 and 2005, but gradually recovered thereafter. The mechanism of spatial and temporal evolution of the Baiyangdian wetland can be divided into two stages according to the changes in landscape function type of the MSPA: the period of degradation between 1990 and 2005, and the period of recovery between 2005 and 2015. During the period of degradation, the core wetlands were partly divided

基金项目: 十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0503002)

收稿日期: 2018-01-28; 修订日期: 2018-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

into fine patches such as branches, loops, bridges, and islets, and then disappeared gradually. During the recovery period, the core wetlands extended, whereas the branches converted to bridges. The core wetland area decreased from 9,974.90 hm² in 1990 to 2,209.97 hm² in 2005 and increased thereafter to 4,122.14 hm² in 2015. The changes in area and morphology of core wetlands dominated the changes in hydrological connectivity of the Baiyangdian wetland. The driving factors for the decrease of hydrological connectivity in Baiyangdian wetland are mainly the amount of upstream recharge water, land use changes, and climate change. The present study shows that the MSPA model combined with connectivity indices can explain the organization and operation mechanism of wetland hydrological connectivity well, which would provide essential background for other related studies.

Key Words: hydrological connectivity; Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA); Baiyangdian wetland; index of connectivity; spatial morphology

湿地生态系统是自然界具有较高生态脆弱性的一类功能单位,其水文连通性对维持整个生态系统稳定性与效益综合性至关重要。湿地生态系统功能是由诸如收集、储存、过滤或排放水、沉积和溶解等一系列水文过程来相互联系累计实现的^[1]。从生态水文角度看,水文连通是指物质、能量、有机物以水为媒介在水循环岛各要素之间的相互转移^[2]。对湿地水文连通性进行量化,有利于确定湿地保护和恢复的优先次序,评估湿地的排水或恢复的最佳位置^[3]。

为了消除人类活动对湿地生态系统造成的不利影响,越来越多的学者致力于湿地生态系统水文连通性的研究,从而找到优化恢复湿地生态系统服务功能的方法^[4]。目前对连通性的理论认识已经达到了相当高的水平^[5-7],但是研究方法往往很单一,通常有地统计学连通性方法^[8]、渗滤理论^[9-10]、图论或网络理论^[11-13]以及连通性指数等方法^[14-19]。其中连通性指数,如 IIC(整体连通性指数)与 PC(可能连通性指数),进一步将图的结构与生态过程阈值、斑块性质等要素紧密联系^[20],在研究中被广泛应用,取得了一定的成果,但也存在指数高度概括,只能提供单一数值,缺少空间分布信息的缺陷^[21]。

近年来,基于形态学的格局分析方法 MSPA 被成功用于分析多种景观形态变化,表现出较强的适用性。MSPA 将一系列图像处理技术应用到栅格图层中,从而将目标地物分为核心、桥接等不同景观类别,通过不交叉的形态学类型,来研究不同地物的形态学机制,但主要集中于森林、绿色基础设施以及生态网络格局的构建与优化^[22-27],湿地中应用的还比较少^[28],仅有的研究则局限在湿地斑块破碎化等方面。

为深入探究湿地的水文连通性演变机制,本文以白洋淀 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年及 2015 年六期 Landsat TM 影像为数据源,通过 MSPA 模型与 IIC、PC 指数相结合的方法,从整体和局部结构功能上对湿地水文连通性进行全方位的量化与评估,识别了其水文连通性“消退-恢复”空间形态演变过程,并对其水文连通性变化的驱动因素进行了探讨,研究结果可为京津冀地区湿地保护和修复提供理论参考。

1 研究区概况

白洋淀湿地(115°45′—116°09′E,38°43′—38°45′N),大部分位于保定市安新县、容城县、雄县境内,小部分位于高阳县北部和任丘市西部。属东部季风区暖温带半干旱地区(干燥度 1.40),大陆性气候特征显著,平均气温 7.3—12.7℃,多年平均蒸发量为 1637 mm,远大于平均降水量 523 mm。四季分明,降雨集中在夏季。

白洋淀是华北地区最大的天然湖泊湿地,由太行山东麓永定河冲积扇与潞龙河冲积扇相夹持而成,为冲积平原洼地,占地 31905 hm²。大清河水系的拒马河、萍河、南北瀑河、漕河、府河、唐河、孝义河、潞龙河的洪沥水汇入白洋淀(图 1),经调蓄后由枣林庄枢纽控制下泄^[29]。白洋淀上游水库、堤坝等水利设施截留了绝大部分地表径流,只有大清河北支拒马河有少量天然入淀水流。到目前很长一段时间,白洋淀水量几乎都是靠人工调水补给来维持。淀区内有大小不等的 143 个淀泊和 3700 多条沟壕,零星分布有 36 个纯水村,常驻农村居民达 10 万人以上。河淀相连,村镇园田镶嵌虽造就了白洋淀湿地独特的风景文化,但是也加剧了其生态

缺水,湿地破碎化严重的窘境。目前随着雄安新区的建立,白洋淀位于新区腹地必定受到多方的关注,对其生态水文连通性进行深入探究变得尤为重要。

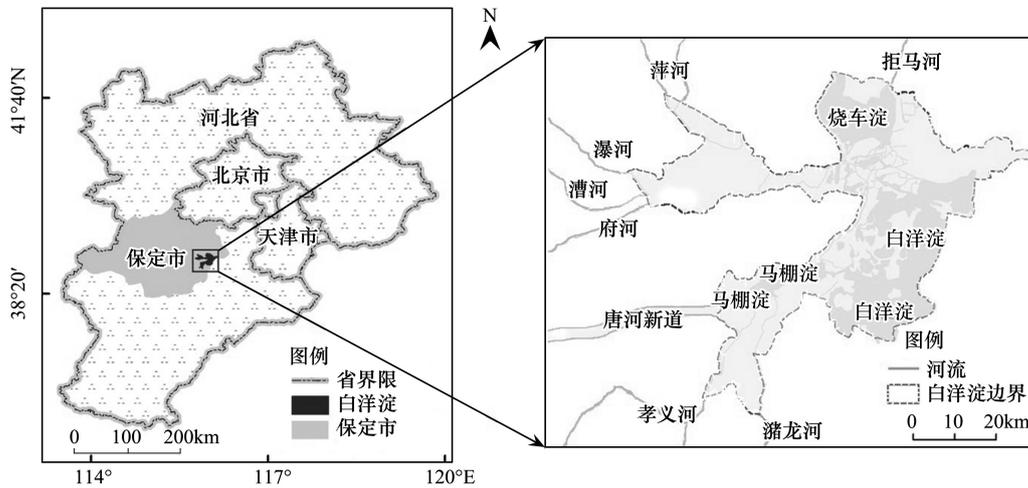


图 1 研究区域位置示意图

Fig.1 Location of the study area

2 数据与研究方法

2.1 数据源与预处理

本文选用白洋淀湿地保护区 2015 年、2010 年、2005 年、2000 年、1995 年和 1990 年 6 个时期 6—9 月份的 Landsat TM 卫星遥感数据(轨道号 133/33)为主要数据源,基本无云层干扰。利用 ENVI 5.1 软件,对按照研究区剪裁好的影像进行大气校正等预处理,按照研究目的与白洋淀地类特点将研究区监督分类为水域、耕地、挺水植被与建设用地四类。为了保证研究精度,以影像为参照,对碎屑像元斑块以及局部错分、漏分的像元,进行手动修改,最终得到白洋淀土地利用栅格图。利用同时期更高分辨率 Google earth 历史影像进行精度验证,6 期分类图像精度都在 91% 以上。

2.2 研究方法

2.2.1 水文连通性评价指数

采用整体连通指数(IIC)数与可能连通指数(PC)对湿地连通性进行整体评价。根据前人研究^[14]与白洋淀水体斑块缓冲变化情况,将斑块连通阻力距离阈值设置为 500、1、2、4、8 km 5 个等级。为了让 PC 计算结果与 IIC 具有可比性,将连接可能性设为 0.5^[30]。最后通过 Conefor26 软件对 IIC、PC 指数进行计算。

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}^* \times a_i \times a_j}{A_L^2}$$

式中, n 表示景观中斑块总数, a_i 和 a_j 分别表示斑块 i 和斑块 j 的面积, nl_{ij} 表示斑块 i 和斑块 j 之间的连接数, A_L 是景观的面积 p_{ij}^* 为斑块 i 与斑块 j 之间全部路径概率的乘积最大值。IIC 与 PC 的值都是介于 0 到 1 之间,且值越大代表斑块连接性越好。

2.2.2 基于形态学空间格局分析模型(MSPA)的景观分类

MSPA 基于数学形态学原理,依赖于腐蚀、膨胀、开启、闭合等基本形态学操作^[31],将栅格二值影像的前景像素分为 7 种互斥类型:核心(core)、孤岛(islet)、边缘(edge)、穿孔(perforation)、桥接(bridge)、环岛(loop)、分支(branch),如图 2 所示。根据不同 MSPA 景观分类的定义与特征(表 1),判断其在湿地连通性方面的指示意义。

利用 ArcGIS 10.2 在分类好的白洋淀湿地各时期土地利用图中提取出水域部分,作为 MSPA 分析的前景,其他部分作为背景。像元大小为 30 m,采用 8 邻域算法。考虑到湿地水域平水期与洪水期之间的缓冲范围,故将边缘宽度设为 2 个像元的大小,即 60 m。

3 白洋淀湿地水文连通性时空变化分析

3.1 基于连通指数的 1990—2015 年水文连通性变化

距离阻力阈值为两个斑块之间的距离在所选范围内有连接的临界值,两斑块之间距离超过距离阈值则表示不连接,距离阈值越大计算所得的连通指数越大。研究表明(图 3),1990—2015 年以来,各阶段所选阈值下 IIC 都没有超过 0.1,说明研究区域内整体连通性较差。从时间变化上看,白洋淀水体 PC 与 IIC 值都表现出呈先降低后增高的变化趋势,其中 1990 年水文连通性最高,其次是 2015 年,2005 年的水体连通性最差,白洋淀水体连通性整体表现为:1990 年>2015 年>1995 年>2000 年>2010 年>2005 年。

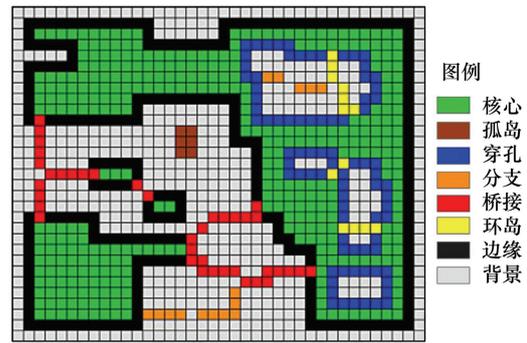


图 2 形态学空间格局分析模型分类示意图^[32]

Fig. 2 Example illustrating Morphological Spatial Pattern Analysis^[32]

表 1 MSPA 的景观类型及其含义

Table 1 Definition of landscape type based on MSPA

类型 Type	特征及定义 Features and Definitions
核心区 Core	指大量湿地像元的聚集,且与边界有一定距离
孤岛 Islet	指不相连且聚集数量少而不能作为核心类的湿地像元集合
穿孔 Perforation	位于核心湿地内部,外部为“边缘湿地”
桥接 Bridge	指连接至少两个不同核心类的非核心湿地像元集,并表现出狭长的廊道特征
环岛 Loop	指连接一处核心类的狭长湿地像元集合,同样也具有廊道的特征
分支 Branch	指非核心类区域且只有一端与边缘类、桥接类、环岛类或穿孔类相连的湿地集合
边缘 Edge	指核心类和非湿地之间的缓冲区

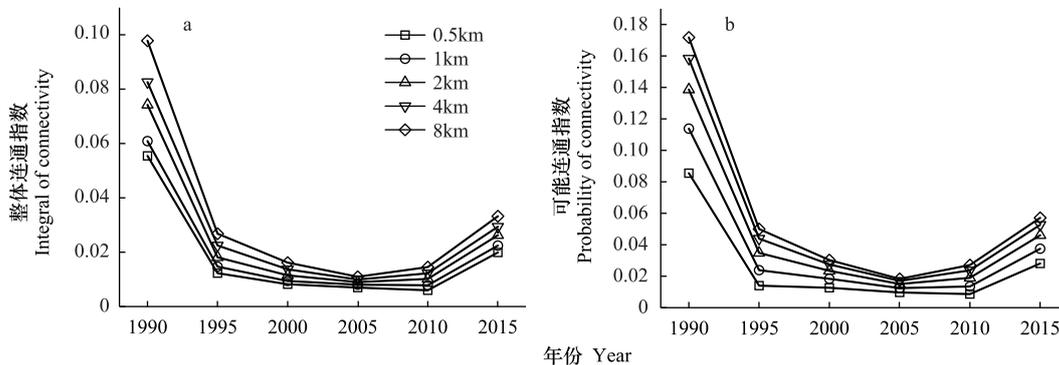


图 3 1990—2015 年白洋淀湿地不同阈值情况下整体连通指数和可能连通指数变化

Fig. 3 IIC and PC changes of Baiyangdian Wetland from 1990 to 2015

3.2 基于 MSPA 的 1990—2015 年水文连通性变化

经过 MSPA 分析得到各时期白洋淀湿地水文连通性功能类型格局(图 4)以及面积、频率变化统计表(表 2)。

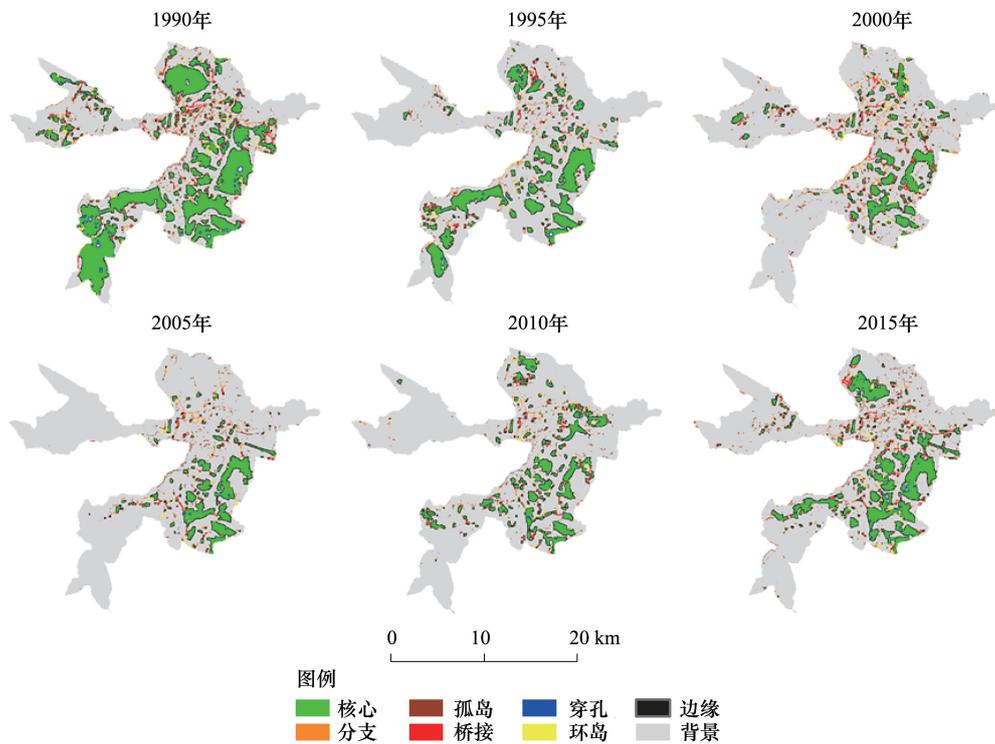


图 4 1990—2015 年白洋淀湿地 MSPA 类型分布图

Fig.4 MSPA types distribution maps of Baiyangdian wetland from 1990 to 2015

表 2 1990—2015 年白洋淀湿地各类 MSPA 类型面积及出现频率变化

Table 2 Area and frequency of each MSPA classes in Baiyangdian wetland from 1990 to 2015

类型 Type	1990 年		1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积 Area/ hm ²	出现频率 Frequency										
核心 Core	8974.90	206	4402.90	155	2399.26	207	2092.97	125	2577.93	175	4122.14	195
孤岛 Islet	459.43	47	373.29	370	596.63	1027	408.39	406	335.00	336	638.10	636
穿孔 Perforation	159.53	34	76.57	21	32.76	9	22.33	7	28.71	8	82.95	29
边缘 Edge	2753.41	466	1923.88	268	1578.45	356	1218.77	176	1809.02	337	2006.83	346
环岛 Loop	271.19	103	153.14	57	194.62	57	114.86	37	191.43	60	194.62	64
桥接 Bridge	555.15	120	252.05	57	475.39	105	172.29	36	303.10	77	424.34	90
分支 Branch	743.39	1061	532.82	782	730.63	946	494.53	572	449.86	714	580.67	831
前景 Foreground	13917.00	2464	7714.65	1710	6007.73	2707	4524.14	1359	5695.06	1707	8049.65	2191

(1) 核心湿地是前景湿地中较大的生境斑块,在湿地连通性功能中起着生态源地的作用,其面积的减小以及破碎化通常会导致连通性的下降。边缘湿地指核心湿地与非水体区域之间的的过渡地带,往往具有物质和能量交换丰富的特征^[21]。结果显示(图 5),1990—2015 年间,核心湿地、边缘湿地与前景区呈现出相同的面积变化趋势,皆在前期减少,在 2005 年达到最低点后反呈增加趋势;从 1990 年到 2015 年核心区占前景比例先减小后增大,边缘区占前景比例先增大后减小。无论从空间还是面积上,整体指示了核心湿地 1990—2015 年间展现出逐步破碎化后又恢复的特征,结合湿地水文连通性变化也可以看出核心湿地的变化对其的主导作用。

(2) 分支、桥接和环岛三种类型在湿地连通性功能中都起着类似廊道的作用。其中,桥接类在湿地水文景观中多表现为大型河道、沟渠,是两个不同核心斑块间联系的通道。分支类表示核心湿地与其他水文湿地类型间的连接,是核心区斑块与其外围水文景观进行物种扩散和能量交流的通道^[33],在湿地水文景观中多表

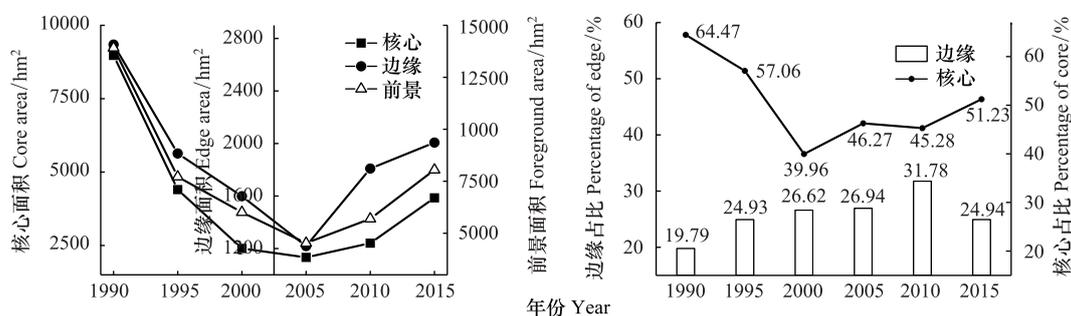


图 5 1990—2015 年白洋淀湿地核心及边缘湿地面积及占比统计图

Fig.5 Statistical charts of core and edge area and proportion in Baiyangdian wetland from 1990 to 2015

现为大型河道、沟渠的分支。环岛类为核心类内部相连的捷径,一定程度上有助于核心湿地内部的连通。三种类型对水文连通性的贡献性:桥接湿地>分支湿地>环岛湿地。在研究的 6 个时期,分支湿地明显都占有较大的比重,其次为桥接湿地,环岛湿地所占比例最小。1990—2015 年间,3 种湿地类型面积峰值和尾值所在年份基本一致,都呈现类似 W 形的变化趋势。其中,1990—2005 年间,在核心湿地持续减少的背景下,3 种廊道类型经历了下降到升高再下降的过程,且核心湿地在退化过程中部分转化为了 3 种廊道湿地,但由于核心湿地的主导作用,廊道湿地的增加并没有导致连通性的增加;而在 2005—2015 年间,3 种廊道湿地面积与核心湿地同步增加,对水文连通性的升高起到了辅助作用(图 6)。

(3) 孤岛湿地为相互联系较小的小斑块,在湿地景观中表现为单独的小水洼或池塘,但是其内部物质、能量与外界交流的可能性较小。穿孔湿地为核心湿地内部的边缘地带,在湿地景观中为核心湿地中间包围水中高地的区域,在一定程度上阻碍了核心湿地内部的连通。从 1990 年到 2015 年,孤岛湿地是唯一面积有所增加的类型,增加了 38.89%,所占前景比例先增大后减小。过多孤岛的出现,增加了斑块个数,导致研究区域内的整体连通性的降低。穿孔湿地面积虽然减少了 48%,所占前景比例变化趋势与孤岛呈相反趋势,但穿孔类型占前景比例是最小的,最高不超过 1.15%,对白洋淀湿地水文连通性影响不大(图 7)。

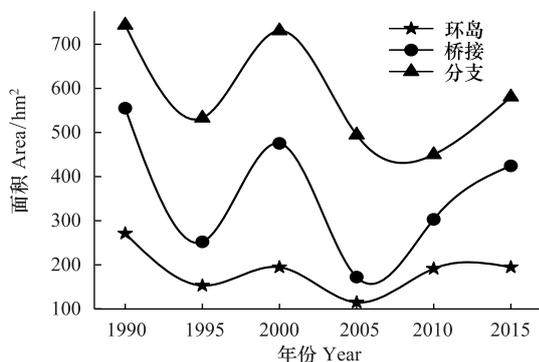


图 6 白洋淀湿地廊道类面积变化

Fig.6 Area of corridor class in Baiyangdian wetland

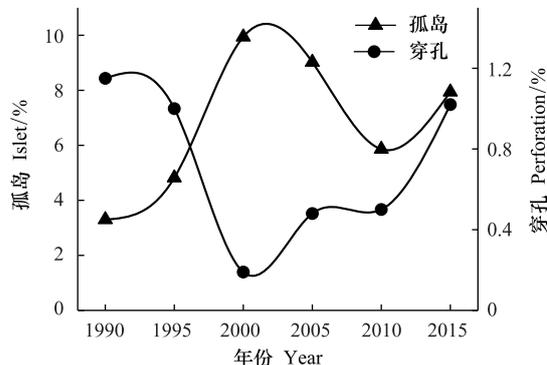


图 7 白洋淀湿地孤岛和穿孔湿地占比统计图

Fig.7 Statistics of islet and perforation in Baiyangdian wetland

3.3 水文连通性“消退-恢复”空间形态演变

根据连通性指数与 MSPA 模型的白洋淀水文连通性评价结果,将 1990—2015 年白洋淀湿地的水文连通性空间形态演变分为消退与恢复两个阶段。

水文连通性消退阶段(1990—2005 年):① MSPA 各类型面积逐渐减少,首先表现为细小斑块消退,随后较大核心斑块分裂为小型核心斑块或分支、孤岛等类型后继续消退;② 消退与分裂的主要类型为核心湿地,形态上有向破碎化、细长化转变的趋势;③ 在细小核心斑块消退的同时也伴随着分支、桥接、环岛、孤岛的等类型

的减少,在核心湿地斑块分裂期,以上类型又会有所增加;④在核心湿地面积减小的过程中,边缘湿地占前景比例持续增加,反映了核心斑块的不规则化趋势;⑤穿孔个数与面积和核心湿地面积成正比。

水文连通性恢复阶段(2005—2015年):①核心区面积逐渐增大,个数逐渐增多,占前景比例也逐渐增加,形态由细长状向饱和型发展;②环岛逐渐被饱和起来的中心斑块所吞并,分支湿地逐渐向桥接湿地转变;③孤岛面积和个数在恢复前期减少,后期增加;④穿孔和边缘湿地面积逐渐增加,前者占前景比例逐渐增大,后者占前景比例逐渐减少。

4 白洋淀湿地水文连通性变化的驱动因素

4.1 上游水利工程截水导致水储量减少

核心湿地面积在决定白洋淀湿地水文连通性优劣中起主要作用,然而白洋淀湿地上游多条主要补给河流上修建了众多大中型水利设施,拦截大部分来水。其中有 6 座大型水库和 8 个中型水库,控制流域面积 10302.9 km²,水库总库容达 34.86 亿 m³。除了水库之外,还引水建渠调走了大量水源用于灌区灌溉和城镇生产生活用水^[29]。据有关资料显示,除个别年份汛期外,九条河几乎没有生态水流入白洋淀。核心湿地面积发生大幅减小和增加的地区主要在白洋淀湿地的边缘部分,其中北部、西部以及西南等白洋淀上游来水地区尤其突出。为解决白洋淀湿地资源性缺水这一长期棘手的问题,1988 年后多次对白洋淀湿地进行生态补水,主要是利用上游的西大洋、王快、安各庄等水库进行调水,同时也有引岳济淀、引黄济淀等工程。而水是控制湿地植被和土壤形成和发展的关键因素,特别是在干旱环境中^[34]。可以看到进行补水后的白洋淀湿地连通性以及相应的生态功能有所恢复。

4.2 土地利用的变化加剧湿地面积萎缩

土地利用变化与社会经济发展密切相关,人类对土地资源的改造利用对湿地生态系统的各个方面都产生了重要影响^[35]。根据 Landsat TM 影像解译结果(表 3),从 1990 年到 2015 年白洋淀湿地新增建设用地面积 1488.99 hm²,增长了一倍还要多,其中水体区域转为建设用地 409.11 hm²,沼泽地转为建设用地 1100.28 hm²,增加的建设用地主要来源于农村居民点的扩张;湿地土壤肥沃,具有最大的耕种潜力。耕地面积在研究期增长了 5523.47 hm²,增长面积是原来的 2.5 倍,水体区域与沼泽地分别向耕地转移土地 2864.22 hm²和 3566.61 hm²。同时根据实地调研结果,发现白洋淀湿地内存在着大量填湖造地修建住宅的行为,还有道路的修建加剧了湿地的破碎化,从而使连通性下降。

建设用地和耕地的扩张也导致了用水量的急剧增加,人们的生产生活用水主要是依赖大规模抽取地下水,农业也主要采取大水漫灌的方式。这种无节制的地下水抽取模式加之气候干旱等因素,使地下水埋深持续增长,渗流情况异常严重。下垫面的变化导致蓄水能力下降,这样使一般降水难以形成有效的地表径流,也降低了水库补水的效率,使湿地各斑块难以构建有效的连通性。

表 3 1990—2015 年白洋淀湿地土地转移矩阵/hm²

Table 3 Transition matrix of land use during 1990—2015 in Baiyangdian wetland

1990	2015				
	建设用地 Construction land	水体 Water	沼泽地 Marsh land	耕地 Arable land	总计 Total
建设用地 Construction land	832.45	46.06	215.81	132.49	1226.81
水体 Water	409.11	6796.90	3831.13	2864.22	13901.36
沼泽地 Marsh land	1100.28	1110.80	8789.24	3566.61	14566.93
耕地 Arable land	373.95	77.78	587.94	1119.67	2159.52
总计 Total	2715.80	8031.54	13424.11	7682.99	31854.61

4.3 气候变化对湿地连通性的影响

候变化对白洋淀湿地连通性的影响具有长期性、缓慢的特征。湿地系统特别容易受到气候和水供应变化

的影响,特别是在干旱地区,这种变化威胁着湿地的持续存在^[32]。1990—2015年,年平均气温整体呈先上升后下降的趋势,年降水量则先减小后增加,在1999年最低仅为292.95 mm(图8)。温度升高使蒸发量增加,降水量的降低更加剧整个流域来水减少,气候变化通常影响湿地的景观格局,包括对湿地水文连通性的影响。

5 结论和讨论

本文通过数学形态学方法和连通性指数的结合,揭示了景观和像元水平的湿地水文连通性变化的过程,并总结了白洋淀湿地水文连通性的空间形态演变机制及驱动因素。

(1) 基于连通性指数,白洋淀湿地水文连通性以2005年为节点,在1990—2015年间呈现先降低后升高的趋势。

(2) 基于 MSPA 模型,将白洋淀湿地空间形态分为核心、孤岛、边缘、穿孔、桥接、环岛、分支7种类型,依据各个类型综合变化特征,将白洋淀湿地水文连通性空间形态演变分为消退期与恢复期两个阶段。其中消退期主要表现为核心斑块逐步分裂为分支、环岛、桥接、孤岛等细碎斑块,然后逐渐消退的过程;恢复期各类型主要表现为核心湿地面积逐渐增加,分支向桥接转变的过程。核心湿地的变化对白洋淀湿地水文连通性变化起主导作用。

(3) 白洋淀湿地水文连通性变化的主要因素有:上游众多水利工程拦截大部分来水,导致上游补给水量大大减少;建设用地、耕地面积的扩张加剧湿地面积萎缩;下垫面的变化导致渗流现象严重;降水量的减少以及温度的升高导致流域来水减少以及蒸发量的增加。

根据 MSPA 分类原理与现有的研究成果^[26-28],像元大小对 MSPA 景观分类结果有显著影响,像元过大会导致部分核心区域被分类为其他类型。本文基于30m分辨率的 landsat 影像,将白洋淀水体区域分为7种形态类型,综各种类型的时空变化,主要从整体上对白洋淀湿地的水文连通性进行了评价,但对个别小区域的连通性功能尚没有谈及。例如孤岛湿地相当于生态网络中的“生态跳岛”,可为水鸟等物种提供暂时的栖息地,在生态功能可以起着生态媒介的作用^[27],但是在基于 MSPA 模型与连通性指数的连通性分析中往往会忽略孤岛湿地这一连通作用,而强调由于其造成的斑块个数的增多致使的整体连通性的降低。故在今后的研究中可同过多种尺度对比研究,需深入研究不同尺度对连通性变化及空间形态演变机制的影响。并且与湿地类型的生态服务功能相结合,在基于生态服务价值的基础上,对各景观形态类型建立更加全面的连通性功能评估体系。

根据湿地形态学演变机制,湿地的保护应避免湿地破碎化尤其是保证核心湿地的完整性。退化湿地修复过程中,应尽量减少孤岛湿地的存在或通过廊道湿地的修复与打造将其并入核心湿地。此外,应减少人为活动对湿地造成的破坏,避免白洋淀湿地水域以及沼泽地被其他用地代替,尤其是白洋淀边缘地区耕地的扩张和中部各个农村居民点建设用地对湿地的蚕食。

参考文献 (References):

- [1] Cohen M J, Creed I F, Alexander L, Basu N B, Calhoun A J K, Craft C, D'Amico E, DeKeyser E, Fowler L, Golden H E, Jawitz J W, Kalla P, Kirkman L K, Lane C R, Lang M, Leibowitz S G, Lewis D B, Marton J, McLaughlin D L, Mushet D M, Raanan-Kiperwas H, Rains M C, Smith L, Walls S C. Do geographically isolated wetlands influence landscape functions? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(8): 1978-1986.
- [2] Grill G, Lehner B, Lumsdon A E, MacDonald G K, Zarfl C, Reidy L C. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(1): 015001.

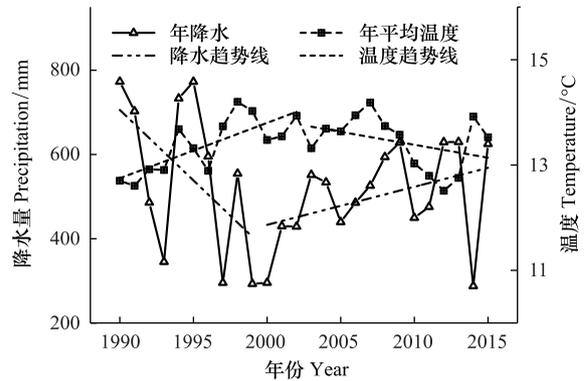


图8 1990—2015年白洋淀年降水量及温度变化

Fig.8 Annual precipitation and temperature variation in Baiyangdian wetland from 1990 to 2015

- [3] Golden H E, Creed I F, Ali G, Basu N B, Neff B P, Rains M C, McLaughlin D L, Alexander L C, Ameli A A, Christensen J R, Evenson G R, Jones C N, Lane C R, Lang M. Integrating geographically isolated wetlands into land management decisions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(6): 319-327.
- [4] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2685-2689.
- [5] Bracken L J, Turnbull L, Wainwright J, Bogaart P. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(2): 177-188.
- [6] 富伟, 刘世梁, 崔保山, 张兆苓. 景观生态学中生态连接度研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6174-6182.
- [7] Singh M, Tandon S K, Sinha R. Assessment of connectivity in a water - stressed wetland (Kaabar Tal) of Kosi - Gandak interfan, North Bihar Plains, India. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(13): 1982-1996.
- [8] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. *Water Resources Research*, 2001, 37(1): 83-97.
- [9] Tischendorf L, Fahrig L. How should we measure landscape connectivity? *Landscape Ecology*, 2000, 15(7): 633-641.
- [10] Lehmann P, Hinz C, McGrath G, Tromp-van Meerveld H J, McDonnell J J. Rainfall threshold for hillslope outflow: an emergent property of flow pathway connectivity. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2006, 3(5): 1047-1063.
- [11] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology*, 2001, 82(5): 1205-1218.
- [12] 沈洁, 赵军, 尚钊仪. 基于空间自回归模型的景观格局变化对河网水系连通性影响分析. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 2015(3): 124-135.
- [13] 傅强, 顾朝林. 基于 CL-PIOP 方法的青岛市生态网络结构要素评价. *生态学报*, 2017, 37(5): 1729-1739.
- [14] 孙贤斌, 刘红玉. 土地利用变化对湿地景观连通性的影响及连通性优化效应——以江苏盐城海滨湿地为例. *自然资源学报*, 2010, 25(6): 892-903.
- [15] 崔桢, 沈红, 章光新. 3 个时期莫莫格国家级自然保护区景观格局和湿地水文连通性变化及其驱动因素分析. *湿地科学*, 2016, 14(6): 866-873.
- [16] 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.
- [17] 李谦, 戴靓, 朱青, 杨桂山, 吴绍华. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究. *地理科学*, 2014, 34(6): 733-739.
- [18] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [19] Saura S, Estreguil C, Mouton C, Rodríguez-Freire M. Network analysis to assess landscape connectivity trends: application to European forests (1990-2000). *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 407-416.
- [20] 韩筱婕. 基于城市热岛减缓的湖泊湿地景观功能连通性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [21] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 高云, 姚思瑶. 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究. *生态学报*, 2015, 35(2): 526-536.
- [22] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94(3/4): 186-195.
- [23] Clay E, Moreno-Sanchez R, Torres-Rojo J M, Moreno-Sanchez F. National assessment of the fragmentation levels and fragmentation-class transitions of the forests in Mexico for 2002, 2008 and 2013. *Forests*, 2016, 7(3): 48.
- [24] Hernando A, Velázquez J, Valbuena R, Legrand M, García-Abril A. Influence of the resolution of forest cover maps in evaluating fragmentation and connectivity to assess habitat conservation status. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 295-302.
- [25] Cheng L, Xia N, Jiang P H, Zhong L S, Pian Y Z, Duan Y W, Huang Q H, Li M C. Analysis of farmland fragmentation in China Modernization Demonstration Zone since "Reform and Openness": a case study of South Jiangsu Province. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11797.
- [26] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [27] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1608-1616.
- [28] Jiang P H, Cheng L, Li M C, Zhao R F, Huang Q H. Analysis of landscape fragmentation processes and driving forces in wetlands in arid areas: A case study of the middle reaches of the Heihe River, China. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 240-252.
- [29] 邱琳. 白洋淀干淀原因与对策分析. *水科学与工程学报*, 2017, (4): 38-41.
- [30] Saura S, Pascual-Hortal L. *Conefor Sensinode 2.2 User's Manual*. 2007: 23-24.
- [31] Pedrolí B, Pinto-Correia T, Cornish P. Landscape-What's in it? Trends in European landscape science and priority themes for concerted research. *Landscape Ecology*, 2006, 21(3): 421-430.
- [32] European Commission Joint Research Centre. <http://forest.jrc.ec.europa.eu/download/software/guidos/mspa/>.
- [33] 邱瑶, 常青, 王静. 基于 MSPA 的城市绿色基础设施网络规划——以深圳市为例. *中国园林*, 2013, 29(5): 104-108.
- [34] Milzow C, Burg V, Kinzelbach W. Estimating future ecoregion distributions within the Okavango Delta Wetlands based on hydrological simulations and future climate and development scenarios. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 89-100.
- [35] Kong W, Sun O J, Xu W, Chen Y. Changes in vegetation and landscape patterns with altered river water-flow in arid West China. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(3): 306-313.