

# 1990~2017年白洋淀的时空变化特征

闫欣<sup>1,2</sup>, 牛振国<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

**摘要:**白洋淀是华北平原最大的淡水湖。认知白洋淀景观格局的时空特征及其与环境的关系,对于恢复和提高白洋淀生态系统整体功能、维护雄安新区生态环境安全具有重要指导意义。在对1990~2017年白洋淀进行逐年遥感分类与制图的基础上,重点研究了白洋淀的时空变化特征,分析了其变化的驱动力因素。研究结果显示,2017年,白洋淀中的天然湿地面积约占白洋淀总面积的33%,人工湿地面积约占20%;1990~2017年,白洋淀天然湿地总体在萎缩,人工湿地和非湿地面积在增加;1995年白洋淀景观破碎化程度最严重;白洋淀景观格局的变化与降水量、人类的开发活动和水资源的调度密切相关,湖泊水位与河流的水文连通性不存在线性相关关系,当湖泊水位保持在6.22 m时,白洋淀中的河流具有较好的水文连通性;大气降水量是白洋淀中的天然湿地变化的主要影响因素,补水措施仅能暂时缓解白洋淀的水资源危机。

**关键词:**白洋淀;景观格局;连通性;遥感;雄安新区

**中图分类号:**P941.78 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2019)04-436-09

作为华北平原最大的淡水湖泊,白洋淀对于雄安新区乃至整个京津冀和华北地区的气候调节和区域生态环境涵养都具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>。在气候变暖背景下,随着社会经济的发展,白洋淀周边区域的居民生活和工农业生产的用水量在不断增加,导致入淀水量不断减少,白洋淀明显萎缩甚至多次发生干淀现象。2018年4月,《河北雄安新区规划纲要》指出,要对白洋淀实施生态修复,恢复白洋淀淀泊水面,实现水质达标,远景规划建设白洋淀国家公园,创新生态环境管理。要实现这些目标,就需要揭示白洋淀湿地的时空变化特征及其驱动力因素。

已经开展了很多有关白洋淀景观及其变化的相关研究,这些研究为深入认识白洋淀生态环境变化提供了参考。例如,在以白洋淀湖沼生态系统为对象的研究<sup>[2]</sup>中,分析了1979年、1991年、2000年和2006年4个时期白洋淀湖沼景观指数和景观格局变化过程,但是由于研究区受到高强度

的人类活动的影响,而相邻时期影像的时间跨度大,影像的选择对研究结果具有很大的影响;利用1984~2014年期间的11期遥感影像,对白洋淀景观格局变化特征与驱动力进行了研究<sup>[3]</sup>,但是该研究以水生植物的演变为重点,对湿地类型的转变关注较少;利用1986~2016年期间的12景遥感影像数据,采用综合识别遥感提取技术,提取出白洋淀面积信息,并分析了其变化特征<sup>[4]</sup>;利用20世纪80年代末至2015年的7期遥感影像解译数据,采用GIS空间分析和主成分分析方法,分析了京津冀地区湿地景观时空变化及其驱动力<sup>[5]</sup>;利用245景陆地卫星影像,记录了1984~2016年雄安新区水体的连续变化<sup>[6]</sup>,但是该研究未对具体湿地类型变化进行分析。

一些研究采用转移矩阵、景观指数和马尔科夫模型等方法,开展了湿地景观格局研究。例如,利用2006年、2011年和2016年3期遥感影像,提取了杭州湾南岸湿地信息,并采用转移矩阵、景观指

收稿日期:2018-12-19; 修订日期:2019-06-25

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFA0603004)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA19030203)和国家自然科学基金项目(41271423)资助。

作者简介:闫欣(1995-),女,山东省临沂人,硕士研究生,从事湿地生态与环境遥感研究。E-mail: yanxin@radi.ac.cn

\*通讯作者:牛振国,研究员。E-mail: niuzg@radi.ac.cn

数等方法,分析了研究区的景观格局变化特征<sup>[7]</sup>;利用马尔可夫模型,对1979年至2008年离散时间段的天津海岸带区变化,进行了定量比较,并进行了预测<sup>[8]</sup>;还有一些景观格局研究<sup>[9-16]</sup>,采用了景观指数方法。上述研究大多存在影像数据少、时间不连续和选用的景观指数存在信息冗余的问题。

一方面,由于白洋淀所处区域的人类活动强度很高,历史上表现出了剧烈的景观变化。为深入掌握这些变化规律,需要高时间频率的遥感数据,以提高监测的精度;另一方面,雄安新区的设立,对保护白洋淀提出了更高的要求。为此,本研究以雄安新区的水生态安全为目标,利用除了2012年以外的1990~2017年的逐年遥感影像数据,建立了遥感影像时间序列;采用目视解译与影像对照的方法,对白洋淀中的湿地进行了详细的分类;利用景观指数、表征水文连通性的指标和土地利用类型转移矩阵,分析白洋淀中河流的水文连通情况、景观格局和土地利用类型转移特征;同时,结合历年流域调水与降水量数据,揭示白洋淀变化的驱动因素,以期对雄安新区规划与建设、白洋淀保护和环境恢复提供理论数据。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区

白洋淀(38°44'N~38°59'N, 115°45'E~116°7'E)位于华北平原中部,是海河流域大清河水系中游的143个相互联系的大、小淀泊的总称,行政上分属安新县、雄县、容城县、高阳县和任丘市管辖。

该区气候属暖温带大陆性季风气候,年平均气温为7℃<sup>[17]</sup>,年降水量为550mm,降水主要集中在7~9月,其降水量占年降水量的80%。在一年中,白洋淀既能发生干旱现象又能发生洪涝灾害。白洋淀的入淀河流有8条,分别为潴龙河、瀑

河、唐河、府河、漕河、孝义河、萍河和白沟引河。据调查,白洋淀中有几十种水生植物和上百种浮游植物<sup>[1]</sup>。

### 1.2 数据

本研究利用了1990~2011年的Landsat 5 TM和2013~2017年的Landsat 8 OLI影像数据(表1),影像的条带号为123,行编号为33。因2012年无可用数据,所以可利用影像共计27景。所利用的影像数据的空间分辨率都为30m。Landsat影像具备全球覆盖、长期连续、数据产品免费、时间和空间分辨率适中、科学的数据存档与分发策略等多种优势<sup>[18]</sup>,能够满足本研究长时间序列影像记录的条件与精度要求。

研究中利用的降水量、洪涝和干旱受灾面积、跨流域调水等数据分别来自国家统计局发布的中国统计年鉴、中华人民共和国水利部发布的中国水旱灾害公报和河北省气象局网站等。水位数据为十方院水文站的地表水位数据,检索自保定市水资源公报。

利用ENVI 5.3软件,对27景影像进行辐射定标、大气校正、掩膜处理、图像分类和验证等。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 白洋淀区土地利用分类体系

参照《湿地公约》中的湿地分类和白洋淀的实际情况,建立了三级分类体系,将研究区中的湿地划分为河流、湖泊、沼泽、库塘、沟渠5种类型,将研究区中的非湿地划分为耕地、建设用地两种类型(表2)。

#### 1.3.2 影像分类方法

采用目视解译与对照Google Earth高分辨率影像相结合的方法,分别对上述7种类型典型地物进行样本判别选取,以点的形式创建相应的感兴趣区,每种类型样本均匀分布且数量约为100个,

表1 研究中所用影像信息

Table 1 Information of images used in the study

影像日期	云量	影像日期	云量	影像日期	云量	影像日期	云量
1990-09-02	2.40	1997-06-01	1.60	2004-07-06	0.00	2011-06-08	0.03
1991-05-16	0.00	1998-11-11	0.00	2005-06-07	0.50	2013-05-12	0.62
1992-09-07	0.00	1999-05-06	0.02	2006-06-26	0.00	2014-05-15	0.21
1993-08-25	0.38	2000-05-24	0.00	2007-05-28	0.00	2015-05-18	0.44
1994-09-13	0.00	2001-05-27	0.00	2008-05-30	0.02	2016-05-04	1.46
1995-09-16	0.00	2002-03-27	0.60	2009-03-14	0.01	2017-04-21	4.66
1996-05-13	1.00	2003-05-01	0.00	2010-05-20	0.00		

表2 白洋淀土地利用类型  
Table 2 Land use types in Baiyangdian

一级分类	二级分类	三级分类	描述
湿地	天然湿地	河流	指地表上水量较大且常年流动天然水流的区域
		湖泊	指陆地表面洼地积水形成的比较宽广的水域
		沼泽	指地表及地地下层土壤经常过度湿润,地表生长着湿生植物,有泥炭累积或者虽然没有泥炭累积但是有潜育层存在的土地
	人工湿地	库塘	指为灌溉、水电、防洪等目的建造的人工蓄水设施
		沟渠	指为灌溉或排水而人工开挖的水道
非湿地	建设用地	耕地	指有农作物在生长和暂处于闲置的农田,以种植农作物为主,间有零星果树、桑树或其它树木的土地
		建设用地	指建造建筑物、构筑物的土地,包括城乡住宅和公共设施用地、工矿用地、交通水利设施用地、旅游用地和军事设施用地等

其中,67%用于监督分类,33%用于混淆矩阵精度验证。

采用监督分类的支持向量机分类方法,进行影像遥感分类。研究<sup>[19]</sup>表明,支持向量机方法是湿地遥感分类的有效手段,完全可以满足本研究的遥感分类目的。

利用土地利用类型转移矩阵,分析不同年份间白洋淀区各土地利用类型的变化与转移状况。土地利用类型转移矩阵是通过矩阵的形式,反映该区域在一定时间间隔内各土地利用类型比例的变化情况,行表示期初向期末转移的各土地利用类型比例,列表示期末土地利用类型来源的比例,对角线表示土地利用类型没有改变的比例。

### 1.3.3 河流的水文连通性

对河流的开发和利用会影响河流的水文连通性,保护和恢复河流的水文连通性,对于提高水生态安全具有重要意义<sup>[20]</sup>。

常用的河流水文连通性的评价方法是多指标评价法,评价体系构建采用的指标是节点度数( $\beta$ )、实际结合度( $\gamma$ )等<sup>[21]</sup>。其中,节点度数 $\beta$ 又被称为连接率指标,是指与该节点相关联的边的个数,反映了节点与其它节点连接的难易程度,节点度数越大,连接越容易,连通性越好, $\gamma$ 以拓扑空间为基础,主要揭示节点与连接数的关系,反映网络的复杂程度,便于计算,不反映实际距离、线性程度、连接线的方向和节点的确切位置。 $\gamma$ 是网络的连接数与最大可能连接线数之比。

$\beta$ 和 $\gamma$ 的计算公式为:

$$\beta = 2L/N \quad (1)$$

$$\gamma = L/L_{\max} = L/3(N-2) \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, $L$ 为河网中的河链数; $N$ 为河网节

点数; $L_{\max}$ 为最大可能连接线的数量; $\gamma$ 的取值为0~1,0表示节点没有连线,1表示每个节点都相互连通。对于网络连接来说, $\gamma$ 的取值多为1/3~1, $\gamma$ 接近1/3时,网络呈树状; $\gamma$ 接近1时,网络近似于最大平面网络,即 $\gamma$ 指数越大,表明网络的连接度越好。

### 1.3.4 湿地景观格局分析

通常在斑块水平、斑块类型水平和景观水平上计算景观指数,由于白洋淀斑块类型较多且破碎,单一景观类型的小斑块较多,计算斑块级别的数据量大且意义不大。因此,为了准确掌握白洋淀的景观变化,本研究选取斑块密度、斑块形状指数、聚合度指数和 Shannon 多样性指数<sup>[22]</sup>,利用 Fragstats 4.2 软件,开展白洋淀湿地景观格局分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 白洋淀土地利用变化特征

#### 2.1.1 土地利用类型分布

对27景影像的分类结果精度都大于80%,其中,1996年和1997年影像的分类结果精度大于90%(表3),具有较好的制图精度与用户精度,错分误差较小,可供研究使用。

由图1、表4和表5可知,随着时间的推移,天然湿地在萎缩,非湿地在扩张。1990~1994年天然湿地面积急剧减少;1995~1998年其又明显增加;随后10a,其又持续减少;2009年其又显著增加,随后减少,2013年之后,因降水量和补水量都保持在较大,其又在波动增加。这些变化与降水量有明显关联,其中,1996年和1998年等的特大洪水导致湖泊、河流等的水量迅速增加,而其它年份因受天气干旱的影响,河流和湖泊等的水量明显减少。

表3 影像分类精度

Table 3 Classification accuracy of images

影像日期	分类精度(%)	影像日期	分类精度(%)	影像日期	分类精度(%)	影像日期	分类精度(%)
1990-09-02	80.6	1997-06-01	93.4	2004-07-06	88.3	2011-06-08	82.7
1991-05-16	82.4	1998-11-11	84.3	2005-06-07	88.9	2013-05-12	85.4
1992-09-07	83.0	1999-05-06	80.2	2006-06-26	80.3	2014-05-15	83.6
1993-08-25	80.1	2000-05-24	80.4	2007-05-28	80.5	2015-05-18	85.0
1994-09-13	82.4	2001-05-27	81.7	2008-05-30	86.3	2016-05-04	80.3
1995-09-16	81.1	2002-03-27	85.4	2009-03-14	81.3	2017-04-21	85.1
1996-05-13	91.9	2003-05-01	88.7	2010-05-20	85.1		

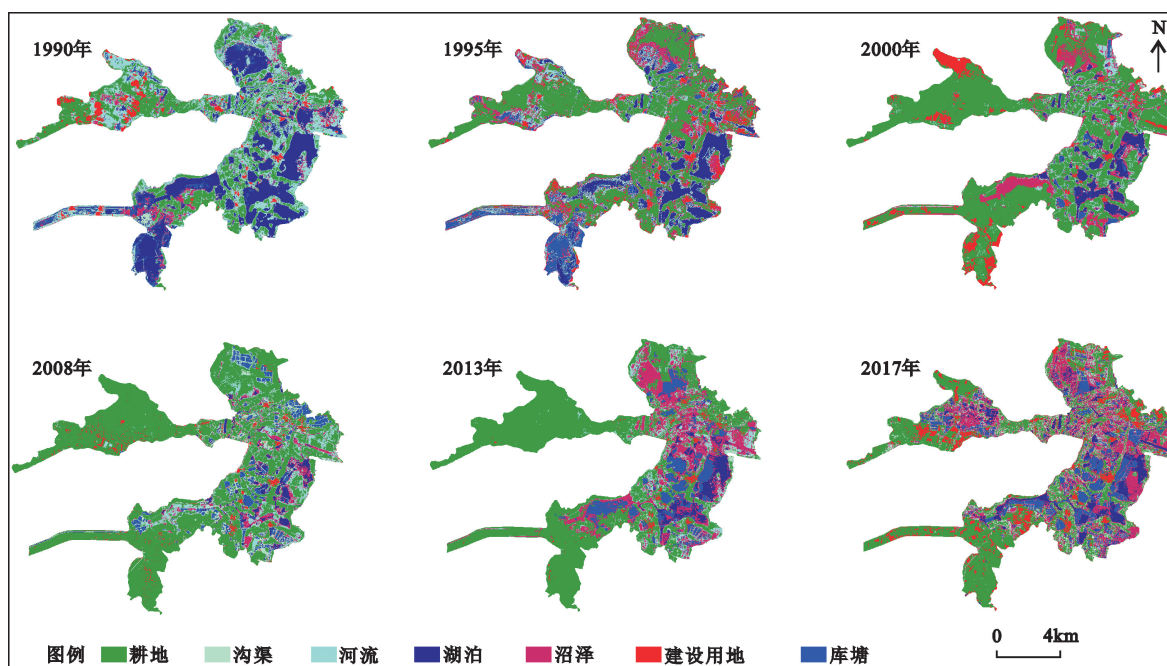


图1 6个时期白洋淀土地利用类型分布图

Fig.1 Map of land use types in Baiyangdian for 6 periods

表4 1990~2011年和2013~2017年白洋淀天然湿地、人工湿地和非湿地面积

Table 4 Areas of natural and constructed wetlands and non-wetlands in Baiyangdian from 1990 to 2011 and from 2013 to 2017

影像日期	面积(km <sup>2</sup> )			影像日期	面积(km <sup>2</sup> )		
	天然湿地	人工湿地	非湿地		天然湿地	人工湿地	非湿地
1990-09-02	175.30	28.69	99.76	2004-07-06	94.82	27.82	181.11
1991-05-16	176.28	41.11	86.36	2005-06-07	58.16	26.35	219.23
1992-09-07	99.41	41.45	162.9	2006-06-26	54.01	39.75	209.98
1993-08-25	87.56	27.10	189.09	2007-05-28	66.92	27.43	209.41
1994-09-13	81.39	46.76	175.6	2008-05-30	53.47	40.05	210.24
1995-09-16	112.59	38.62	152.54	2009-03-14	130.21	24.27	149.26
1996-05-13	159.90	29.58	114.27	2010-05-20	111.53	20.02	172.20
1997-06-01	132.24	15.77	155.75	2011-06-08	68.09	43.09	192.57
1998-11-11	146.55	12.22	144.98	2013-05-12	94.13	32.95	176.68
1999-05-06	118.36	48.21	137.19	2014-05-15	101.04	52.05	150.65
2000-05-24	77.81	9.83	216.11	2015-05-18	84.85	50.63	168.27
2001-05-27	69.66	9.5	224.56	2016-05-04	90.20	45.81	167.74
2002-03-27	71.00	19.98	212.77	2017-04-21	100.06	61.41	142.28
2003-05-01	70.88	34.38	198.49				

表5 1990~2011年和2013~2017年白洋淀各类型湿地面积

Table 5 Areas of various types of the wetlands in Baiyangdian from 1990 to 2011 and from 2013 to 2017

影像日期	面积(km <sup>2</sup> )					影像日期	面积(km <sup>2</sup> )				
	河流	湖泊	沼泽	库塘	沟渠		河流	湖泊	沼泽	库塘	沟渠
1990-09-02	83.00	74.15	18.15	24.46	4.23	2004-07-06	67.75	8.18	18.89	6.77	21.05
1991-05-16	31.2	93.07	52.01	28.76	12.35	2005-06-07	23.48	7.70	26.98	17.52	8.83
1992-09-07	47.96	30.85	20.6	28.49	12.96	2006-06-26	29.13	7.46	17.42	12.94	26.81
1993-08-25	30.83	35.47	21.26	13.58	13.52	2007-05-28	12.59	7.03	47.3	17.58	9.85
1994-09-13	34.98	32.51	13.9	29.21	17.55	2008-05-30	25.87	12.34	15.26	19.09	20.96
1995-09-16	30.22	39.85	42.52	29.42	9.20	2009-03-14	49.96	17.69	62.56	19.17	5.10
1996-05-13	24.00	64.88	71.02	6.14	23.44	2010-05-20	33.44	12.29	65.8	19.39	0.63
1997-06-01	37.06	52.78	42.4	10.99	4.78	2011-06-08	11.28	1.030	55.78	28.48	14.61
1998-11-11	13.27	43.4	89.88	8.49	3.73	2013-05-12	25.75	13.90	54.48	29.63	3.32
1999-05-06	41.05	45.67	31.64	7.86	40.35	2014-05-15	32.28	26.54	42.22	39.67	12.38
2000-05-24	21.18	19.88	36.75	6.71	3.12	2015-05-18	3.45	16.12	65.28	49.22	1.41
2001-05-27	35.12	19.49	15.05	8.06	1.44	2016-05-04	11.26	29.30	49.64	37.28	8.53
2002-03-27	21.81	14.21	34.98	15.44	4.54	2017-04-21	10.01	22.51	67.54	36.87	24.54
2003-05-01	26.46	15.99	28.43	9.30	25.08						

1990~2017年,人工湿地面积总体上在波动增加,人工湿地面积的变化与降水量和补水量无密切关系,但与水位的变化趋势一致。

白洋淀区的湖泊和河流面积的变化幅度较大,对降水量和调水量等水源供给的响应迅速。在1992年之前,湖泊和河流维持着较大的面积,2004年的面积也较大;沼泽面积的变化相对和缓,在1998年、2000年、2007年和2009年至今,沼泽面积占白洋淀面积的40%以上;自2005年以来,库塘面积保持了持续增长的趋势。

### 2.1.2 土地利用类型转变

根据白洋淀各种土地利用类型的逐年面积变化,将1990~2017年划分为1990~2000年、2000~2008年和2008~2017年3个阶段,分析白洋淀各种土地利用类型的转变情况。

由表6可知,1990~2000年期间,白洋淀中的

各类型湿地在向耕地转变。与1990年相比,2000年有78.82%的沼泽、69.24%的河流、57.70%的库塘、55.33%的沟渠和21.99%的湖泊转变为耕地;有31.00%的湖泊转变为沼泽;有19.00%的沟渠和14.41%的库塘转变为建设用地。

表7显示,2000~2008年期间,天然湿地向人工湿地、非湿地转变,人工湿地面积不断增加。与2000年相比,2008年在保持85.34%的原有耕地的同时,有39.17%的河流和27.53%的沼泽转变为耕地,这是天然湿地减少的主要原因;有24.92%的沟渠转变为库塘;有22.67%的湖泊转变为沼泽。

由表8可知,2008~2017年期间,耕地面积减少,湿地面积增加。与2008年相比,2017年有42.03%的沼泽转变为湖泊;有47.33%的河流、35.85%的沟渠和19.66%的耕地转变为沼泽;有42.03%的湖泊、有25.65%的沼泽转变为库塘;有

表6 1990年与2000年间白洋淀各土地利用类型面积所占比例(%)转移矩阵

Table 6 Transfer matrix of area proportions(%) between land use types in Baiyangdian between years of 1990 and 2000

	河流	湖泊	沼泽	库塘	沟渠	耕地	建设用地
河流	14.65	0.13	7.09	0.48	0.40	69.24	8.00
湖泊	4.98	25.66	31.00	7.32	2.38	21.99	6.67
沼泽	9.40	0.25	4.48	1.56	0.48	78.82	5.01
库塘	7.36	2.05	16.67	0.81	1.00	57.70	14.41
沟渠	0.62	4.47	16.15	2.13	2.30	55.33	19.00
耕地	1.85	0.002	1.81	0.33	0.60	92.07	3.34
建设用地	1.45	0.04	5.72	0.25	0.57	64.02	27.95

表7 2000年与2008年间白洋淀各土地利用类型面积所占比例(%)转移矩阵

Table 7 Transfer matrix of area proportions (%) between land use types in Baiyangdian between years of 2000 and 2008

	河流	湖泊	沼泽	库塘	沟渠	耕地	建设用地
河流	30.03	1.13	8.82	6.71	12.87	39.17	1.27
湖泊	5.46	39.15	22.67	21.25	8.88	1.96	0.63
沼泽	23.56	4.34	14.15	8.12	19.66	27.53	2.64
库塘	5.00	21.84	19.87	26.79	12.92	13.10	0.48
沟渠	9.12	18.37	16.73	24.92	16.01	13.67	1.18
耕地	4.14	0.29	0.59	3.69	3.60	85.34	2.35
建设用地	5.00	0.51	2.94	3.30	4.00	70.42	13.83

表8 2008年与2017年间白洋淀土地利用类型面积所占比例(%)转移矩阵

Table 8 Transfer matrix of area proportions (%) between land use types in Baiyangdian between years of 2008 and 2017

	河流	湖泊	沼泽	库塘	沟渠	耕地	建设用地
河流	4.00	12.20	47.33	18.27	7.28	9.80	1.12
湖泊	0.71	47.47	6.04	42.03	0.07	3.27	0.41
沼泽	2.77	42.03	26.91	25.65	0.86	1.46	0.32
库塘	7.08	4.78	15.33	43.18	1.61	17.88	10.14
沟渠	6.94	5.42	35.85	15.80	8.33	23.52	4.14
耕地	2.70	2.46	19.66	5.56	10.05	50.93	8.64
建设用地	2.33	1.07	5.16	3.50	2.74	36.30	48.90

36.30%的建设用地、有23.52%的沟渠和17.88%的库塘转变为耕地。

## 2.2 白洋淀河流的水文连通性

河流的水文连通状况不仅影响水资源的开发利用和区域分配,也影响水功能区的水质状况,良好的河流水文连通性既可以保证白洋淀的洪水调蓄和自我净化功能,又可以保持淀区水流、生物、航运通道畅通。本研究利用ArcGIS 10.2软件,分析了1990~2017年白洋淀河流水文连通状况。

图2显示,1990~2017年期间,指征河流水文连通性的实际结合度与节点度数的变化趋势基本一致,但是其与水位的变化趋势并不一致。当水位为5.5~6.5 m时,白洋淀河流的水文连通性较好;当水位大于7 m时,河流的水文连通性相对较差。2000~2004年白洋淀的水位低于6 m,河流的水文连通性较好。

白洋淀的水位(十方院水文站的监测数据)与白洋淀天然湿地与人工湿地面积之和显著线性相关(图3),即白洋淀的水位越高,白洋淀的湿地面积越大。因此,可以用白洋淀水位的变化近似代表白洋淀湿地面积的变化。1990~2017年的白洋淀水位波动变化(见图2),2000年前,白洋淀的水位多高于7 m;2000~2013年,白洋淀的水位多低

于6 m。《河北雄安新区规划纲要》指出,为了恢复白洋淀的水域面积,要使白洋淀的正常水位保持在6.5~7.0 m。适宜的水位既可以满足防洪、通航、灌溉农田的需求,又可以预留出湖泊的调洪容

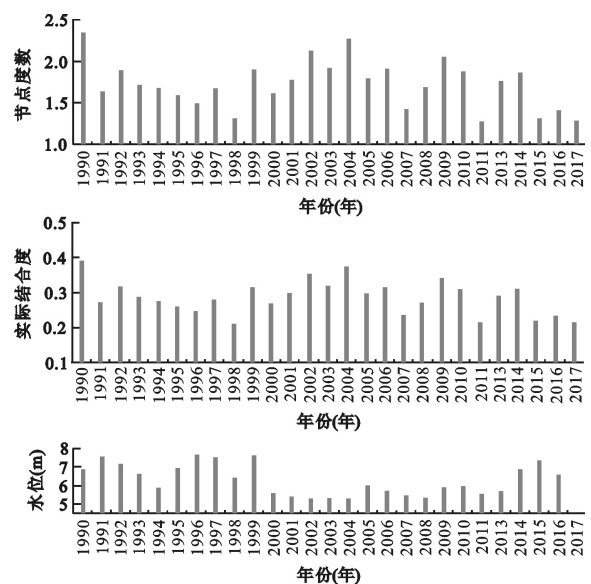


图2 1990~2011年和2013~2017年白洋淀的河流节点度数、实际结合度和水位

Fig.2 Node degrees and actual combination degrees of the rivers and water levels in Baiyangdian from 1990 to 2011 and 2013 to 2017

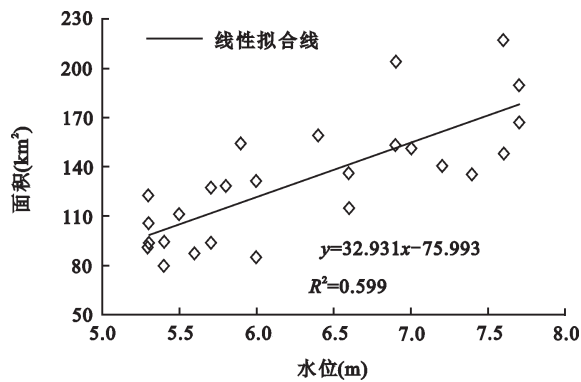


图3 1990~2017年白洋淀湿地面积与水位的关系

Fig.3 Relationship between wetland area and level in Baiyangdian from 1990 to 2017

量。而从图2可以看到,并不是白洋淀水位越高,河流的水文连通性就越好。当实际结合度 $>0.3$ 和节点度数 $>1.8$ 时,白洋淀的平均水位为 $6.22\text{ m}$ ,该水位即为最利于河流水文连通的最佳水位。

### 2.3 白洋淀的景观格局

1990~2017年期间,在4个景观指数中,斑块密度的波动幅度相对最大,香农多样性指数、景观形状指数的波动幅度依次减小,而聚合度指数的波动变化幅度则相对极小。

斑块密度、景观形状指数、香农多样性指数越小,聚合度指数越大,则斑块越聚集,反之,景观破碎度越严重。由表9可以看出,1990~1995年,聚合度指数不断减小,研究区景观破碎化严重;1995~1998年,景观破碎化程度有所减缓;1998~

2007年,研究区景观破碎化程度加重;2007~2015年,景观破碎化程度减轻,聚合度指数显著增大;2015~2017年,景观格局破碎化程度加重,斑块密度、景观形状指数、香农多样性指数都明显增大。2015年研究区的斑块聚集程度较高,景观格局最均衡,景观破碎化程度最低,而1995年研究区的斑块破碎化现象最严重。

### 2.4 白洋淀变化的主要原因

1990年以来,华北地区气候趋向暖干。研究表明,1984年以来,河北省发生的次数较多的气象灾害为暴雨洪涝、冰雹和干旱<sup>[25]</sup>。

降水量的变化不仅影响了入淀河流的径流量,还直接影响白洋淀的水位。1983~1988年,白洋淀连续5 a出现干淀现象,直至1988年大暴雨后,白洋淀才摆脱干淀的状况。表10显示,1990~2000年间,石家庄市共有5 a的年降水量不足500 mm,且在白洋淀仅进行了两次补水,导致白洋淀逐渐转变为耕地;1996年,石家庄市发生了严重的洪涝灾害,年降水量达到 $1\,097.1\text{ mm}$ ,之后,由于持续干旱和工农业用水量大等原因,致使白洋淀水位不断下降,已无法测量水位,基本处于干涸状态。2001~2007年,石家庄市的年降水量都少于500 mm,白洋淀只能依靠频繁调水来缓解水资源的紧张状态。尤其是2014年爆发的厄尔尼诺事件,导致石家庄市的年降水量仅为 $294.8\text{ mm}$ ,白洋淀的干涸状况更加严重。

表9 1990~2017年(不包括2012年)白洋淀的4个景观指数

Table 9 Four landscape indexes of Baiyangdian from 1990 to 2017 (excluding year of 2012)

影像日期	斑块密度 (块/hm <sup>2</sup> )	景观形状 指数	香农多样性 指数	聚合度指数	影像日期	斑块密度 (块/hm <sup>2</sup> )	景观形状 指数	香农多样性 指数	聚合度指数
1990-09-02	46.871 7	77.248 7	1.283 7	91.720 0	2004-07-06	74.754 7	89.100 7	1.259 0	88.790 4
1991-05-16	64.062 2	78.448 1	1.414 5	91.099 9	2005-06-07	77.813 0	73.990 6	1.301 0	88.656 2
1992-09-07	70.743 3	84.828 3	1.523 3	89.315 2	2006-06-26	91.079 1	82.802 0	1.508 6	87.462 4
1993-08-25	91.239 3	83.090 3	1.533 3	88.172 4	2007-05-28	95.363 5	74.585 4	1.357 3	88.444 2
1994-09-13	106.007 0	88.613 9	1.552 6	88.017 3	2008-05-30	83.908 7	77.212 0	1.578 1	88.254 9
1995-09-16	105.803 1	94.640 2	1.528 9	87.988 5	2009-03-14	65.967 6	75.474 9	1.350 9	90.849 5
1996-05-13	73.015 0	80.238 6	1.366 2	90.326 4	2010-05-20	56.715 9	69.052 3	1.223 9	90.792 6
1997-06-01	88.244 6	84.501 6	1.376 4	89.452 1	2011-06-08	84.260 0	76.317 9	1.237 2	89.046 0
1998-11-11	55.275 3	71.169 4	1.128 8	91.907 4	2013-05-12	51.261 2	64.349 7	1.363 4	91.465 8
1999-05-06	62.527 5	84.358 4	1.503 0	90.200 7	2014-05-15	55.740 4	65.272 1	1.540 6	91.756 9
2000-05-24	76.734 2	72.040 8	1.359 7	89.527 6	2015-05-18	46.620 8	69.366 0	1.113 8	91.938 6
2001-05-27	64.970 1	67.007 0	1.326 9	89.361 3	2016-05-04	94.967 3	84.314 4	1.433 3	89.197 0
2002-03-27	82.776 3	70.391 5	1.450 5	89.493 3	2017-04-21	92.675 2	93.180 6	1.435 2	88.555 0
2003-05-01	64.614 5	73.659 4	1.543 1	89.469 6					

表10 1990~2017年石家庄市年降水量和白洋淀的生态补水量  
Table 10 Annual precipitations in Shijiazhuang city and amount of ecological water supplement into Baiyangdian Lake from 1990 to 2017

年份	年降水量(mm)	补水量(m <sup>3</sup> )	年份	年降水量(mm)	补水量(m <sup>3</sup> )	年份	年降水量(mm)	补水量(m <sup>3</sup> )
1990年	695.9	—	1999年	518.3	—	2008年	707.7	15 760
1991年	554.0	—	2000年	595.9	4 060	2009年	698.9	18 250
1992年	441.1	6 210	2001年	303.2	6 674	2010年	432.9	9 341
1993年	420.7	—	2002年	447.4	8 575	2011年	674.2	4 852
1994年	475.1	—	2003年	430.4	11 634	2013年	508.3	—
1995年	687.3	—	2004年	522.2	15 900	2014年	294.8	—
1996年	1 097.1	—	2005年	389.5	4 200	2015年	534.5	4 000
1997年	328.8	5 765	2006年	407.8	15 672	2016年	712.6	7 500
1998年	374.7	—	2007年	430.4	—	2017年	558.5	7 600

20世纪50年代以来,在白洋淀上游共修建了100多座水库,水库的修建直接减少了进入白洋淀的水量。为了使白洋淀能够维持适宜水位,多次从上游水库和通过南水北调等水利设施向白洋淀补水。1990~2017年期间,通过从西大洋水库、安格庄水库和王快水库调水,10 a中共对白洋淀实施了25次生态补水。21世纪初,白洋淀仍然持续发生干淀现象,除了从三大水库为白洋淀调水外,2004年河北省水利局启动“引岳济淀”工程,从邯郸市的岳城水库调水济淀,解决了白洋淀缺水的燃眉之急。为了进一步缓解白洋淀的干淀困局,从2006年开始,对白洋淀实施了5次跨流域的“引黄济淀”补水措施,暂时缓解了白洋淀的干淀危机。

对白洋淀的补水措施并未明显改变白洋淀天然湿地和人工湿地的面积,“引岳济淀”和“引黄济淀”等补水措施仅能暂时缓解白洋淀的水源危机,使白洋淀维持低水位运行,要想在根本上解决白洋淀的生态环境问题,还需要从多方面入手,协同治理白洋淀的水危机问题。

### 3 结论

1990~2017年期间,白洋淀的天然湿地总体上在萎缩,非湿地在扩张。1990~2000年,白洋淀的天然湿地快速萎缩,大量天然湿地转变为耕地;2000~2008年,白洋淀的天然湿地不断向人工湿地转变;2008~2017年,则表现为耕地面积减少、湿地面积增加。

白洋淀河流的水文连通性指数(实际结合度与节点度数)与白洋淀的水位不存在线性相关关系。当白洋淀水位为6.22 m时,河流的水文连通

性最好。

2015年白洋淀的景观格局最均衡,景观破碎化程度最低,而1995年白洋淀的景观破碎化现象最严重。

大气降水量是决定白洋淀天然湿地变化的主要因素。生态补水可以在一定程度上暂时缓解白洋淀的水资源危机。

### 参考文献

- [1]刘克岩,张鲁,张光辉,等. 人类活动对华北白洋淀流域径流影响的识别研究[J]. 水文, 2007, 27(6): 6-10.
- [2]白军红,房静思,黄来斌,等. 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.
- [3]张敏,宫兆宁,赵文吉,等. 近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [4]王凯霖,李海涛,吴爱民,等. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 549-558.
- [5]吕金霞,蒋卫国,王文杰,等. 近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4492-4503.
- [6]Song C, Ke L, Pan H, *et al.* Long-term surface water changes and driving cause in Xiong'an, China: from dense Landsat time series images and synthetic analysis[J]. Science Bulletin, 2018(11): S2095927318301932.
- [7]刘甲红,胡潭高,潘晓骏,等. 2006年以来3个时期杭州湾南岸湿地分布及变化研究[J]. 湿地科学, 2018, 16(4): 502-508.
- [8]Ma C, Zhang G Y, Zhang X C, *et al.* Application of Markov model in wetland change dynamics in Tianjin Coastal Area, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 252-262.
- [9]程敏,张丽云,欧阳志云. 三个时期河北省滨海湿地景观格局及变化[J]. 湿地科学, 2017, 15(6): 824-828.
- [10]Wang B B, Liu J L, Zhang T, *et al.* Spatial and temporal changes of landscape patches in Baiyangdian wetlands in China's Hebei Province[J]. Journal of Agro- Environment Science, 2010,

- 29(10): 1857-1867.
- [11] Lin Wenpeng, Cen Jiawei, Xu Di, *et al.* Wetland landscape pattern changes over a period of rapid development (1985-2015) in the Zhoushan Islands of Zhejiang province, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, **213**:148-159.
- [12] WANG Xuelei, Ning Longmei, Yu Jing, *et al.* Changes of urban wetland landscape pattern and impacts of urbanization on wetland in Wuhan City[J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, **18**(1):47-53.
- [13] 方中祥, 李国庆, 冯龙, 等. 胶州湾湿地景观格局变化特征[J]. *湿地科学*, 2016, **14**(2): 276-281.
- [14] 张莹莹, 蔡晓斌, 杨超, 等. 1974-2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 171-182.
- [15] 徐晓龙, 王新军, 朱新萍, 等. 1996-2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(11): 1897-1911.
- [16] Gao F S, He Q H, Qian Y, *et al.* Dynamic change of landscape pattern in Jiangsu coastal wetland[C]. *International Conference on Remote Sensing*, IEEE, 2011.
- [17] 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 等. 近33年白洋淀景观动态变化[J]. *生态学报*, 2011, **31**(3): 839-848.
- [18] 姜高珍, 韩冰, 高应波, 等. Landsat系列卫星对地观测40年回顾及LDCM前瞻[J]. *遥感学报*, 2013, **17**(5): 1033-1048.
- [19] 张策, 臧淑英, 金竺, 等. 基于支持向量机的扎龙湿地遥感分类研究[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(3): 263-269.
- [20] 周振民, 刘俊秀, 郭威. 郑州市水系格局与连通性评价[J]. *人民黄河*, 2015, **37**(10): 54-57.
- [21] 马爽爽. 基于河流健康的水系格局与连通性研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [22] 陈慧中. 不同地貌类型景观格局分析及尺度效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [23] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(1): 121-125.
- [24] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [25] 孙霞, 俞海洋, 孙斌, 等. 河北省主要气象灾害时空变化的统计分析[J]. *干旱气象*, 2014, **32**(3): 388-392.

## Spatial-temporal Variation Characteristics of Baiyangdian from 1990 to 2017

YAN Xin<sup>1,2</sup>, NIU Zhenguo<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, P.R.China*; 2. *School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

**Abstract:** Baiyangdian is the largest freshwater lake in the North China Plain. Understanding the spatial and temporal characteristics of Baiyangdian landscape and its relationship with the environment is of great guiding significance for restoring and improving the overall function of the Baiyangdian ecosystem and safely maintaining the ecological environment of the Xiong'an New Area. After constructing wetland maps of Baiyangdian by classifying the annual remote sensing images from 1990 to 2017, the spatial-temporal variation characteristics of Baiyangdian were studied, and the driving factors were discussed correspondingly. The results showed that the area of natural wetlands accounted for 33% of the total area of Baiyangdian while the area of constructed wetlands accounted for about 20% in 2017. During the period of 1990-2017, natural wetlands in Baiyangdian shrank as a whole, in contrast, the area of constructed wetlands and non-wetlands increased. The Baiyangdian landscape was most severely damaged in 1995. The changes of the wetland landscape were closely related to precipitation, human development activities and water resources scheduling. There was no linear correlation between water level of the lake and the indexes of hydrologic connectivity of the rivers. When the water level of Lake Baiyangdian was kept at 6.22 m, the rivers of Baiyangdian have better hydrologic connectivity. Precipitation was the main influence factor of the changes of natural wetlands and remedial water replenishment measures could only temporarily alleviate the water crisis of Baiyangdian.

**Keywords:** Baiyangdian; landscape pattern; connectivity; remote sensing; Xiong'an New Area