

DOI: 10.5846/stxb201501140110

张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 阿多. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Zhang M, Gong Z N, Zhao W J, A D. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制

张 敏^{1,2,3}, 宫兆宁^{1,2,3,*}, 赵文吉^{1,2,3}, 阿 多^{1,2,3}

1 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048

2 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048

3 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048

摘要: 湿地是水陆相互作用形成的独特生态系统, 其景观格局极易受到气候变化和人类活动的影响。利用 1984—2014 年的 11 期遥感影像数据, 综合运用 GIS 技术和景观格局指数方法, 对白洋淀湿地景观格局变化特征及其驱动力机制进行了分析。结果表明, 1984—2014 年期间, 挺水植物和沉水植物呈减少趋势, 农田和居民点持续快速增长, 纯水体为“增加-减少-再增加”的趋势, 林地和裸土地变化幅度不大。其中挺水植物一直是白洋淀最主要的景观类型, 占研究区总面积比例达到 37% — 61%。农田的平均斑块面积最大, 挺水植物的最大斑块指数和分维度指数最高, 挺水植物和农田的聚集度指数最大, 居民点、林地和裸土地空间分布离散, 破碎化程度高, 连通性差。1989—2004 年白洋淀景观多样性指数呈减少趋势, 景观格局趋于不稳定, 同期聚集度指数上升, 湿地连通性增加; 1984—1989 年和 2004—2014 年期间白洋淀多样性指数上涨, 聚集度指数逐年下降, 景观异质性增加。人口和社会经济发展是影响白洋淀景观格局变化的主要因素。

关键词: 景观格局指数; 驱动力; 白洋淀; 湖泊湿地

Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014

ZHANG Min^{1,2,3}, GONG Zhaoning^{1,2,3,*}, ZHAO Wenji^{1,2,3}, A Duo^{1,2,3}

1 College of Resources Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry, Beijing 100048, China

3 Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal, Beijing 100048, China

Abstract: Wetlands, unique ecosystems formed by the interaction of land and water, are susceptible to climate change and human activity. Landscape developmental processes are an important subject in the fields of geography and ecology. Landscape pattern index is an indicator of landscape structure, composition, and spatial configuration. In this paper, we discuss changes in landscape patterns in Baiyangdian wetland during 1984-2014, and the driving forces behind these changes, based on Landsat Thematic Mapper (TM) and GF-1 remote sensing images. A landscape classification system was formulated, and landscape pattern indices were selected at the landscape and class levels to reflect patterns in structural composition and spatial configuration and to analyze the evolution of the landscape. Our results showed that the area of emergent and submerged plants had decreased, and farmland and residential areas increased rapidly. Open water showed an “increasing-decreasing-increasing” tendency, while forest and bare land area did not change significantly in the study period. The wetland area (emergent plants + submerged plants + open water) decreased from 1984 to 2014, with an average area of 25,008 ha before 1998 and 21,573 ha after 1998. Emergent plants were the main cover type in

基金项目: 国家国际科技合作专项资助(2014DFA21620); 国家留学基金项目

收稿日期: 2015-01-14; 网络出版日期: 2015-00-00

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

Baiyangdian, covering 37%—61% of the total study area, followed by farmland, submerged plants, and open water. Interconversion among emergent plants, submerged plants, and open water occurred with changes in the hydrologic regime. Over the past three decades, farmland has had the largest average patch area, followed by emergent plants. Emergent plants had the highest patch area index and dimension index, indicating that this was a dominant cover type in the study area. In addition, the cohesion indices of farmland and emergent plants were highest and showed a smoothing trend, while residential areas, forestland, and bare land showed a discrete distribution, high degree of fragmentation, and inferior connectivity. Shannon's diversity indices showed a decreasing trend in Baiyangdian from 1989 to 2004, during which the landscape pattern tended to be unstable, and cohesion indices and wetland connectivity increased. Shannon's diversity indices, cohesion indices, and landscape heterogeneity increased between 1984 and 1989 and between 2004 and 2014. Population and economic development are major factors affecting changes in landscape patterns in Baiyangdian.

Key Words: landscape pattern index; driving forces; Baiyangdian; lake wetland

湿地是水陆相互作用形成的独特生态系统^[1],是动植物重要的生存环境和自然界最富生物多样性的生态景观之一,与人类生存发展息息相关^[2]。然而,近年来由于全球气候变化和人类活动的干扰,湿地面积正在大幅度的持续缩减。据世界经济合作与发展组织(OECD)的统计,1900年以来全球已有接近50%的湿地消失^[3],而如今,在人类活动和环境变化的双重压迫下,越来越多的湿地正面临严重的危机。湿地景观格局是指大小和形状不一的湿地景观斑块在空间上的排列,是各种生态过程在不同程度上综合作用的结果,对景观的功能和过程有着重要影响^[4]。从20世纪70年代开始,景观生态学被逐渐引入到湿地研究中,湿地景观格局的动态变化就一直是湿地生态研究的热点。湿地景观格局的变化尤其是湿地转换为农田或者干化导致的其他景观变化对湿地生态系统的能量流动、物质循环以及物种迁移等都会产生很大影响^[5]。研究湿地景观格局的长时间变化特征,对湿地景观规划管理和湿地可持续发展具有重要意义^[6]。

常用的湿地景观格局演变研究方法有:定性描述法、景观生态叠置法和景观格局数量分析方法^[7],其中景观格局数量分析方法在国内外相关研究中应用较为广泛,主要包括景观格局指数和景观动态变化模型。宫兆宁等结合景观格局指数和斑块空间质心模型对北京湿地景观格局演变特征进行分析,结果表明北京湿地的聚集度和优势度指数均呈先增加后减少再小幅回升的趋势,多样性指数则相反^[8];杜清等利用景观格局指数探讨新疆喀什噶尔河流域景观格局变化特征,结果表明20年里喀什噶尔河流域耕地和水域湿地分布趋于集中,景观优势度增强,而林地和草地正好相反^[9]。刘吉平^[10]、李宁云^[11]、刘娜^[12]等也利用景观格局指数分别对三江平原、滇西北纳帕海湿地、洞庭湖的景观格局变化特征进行了研究。

白洋淀湿地是华北平原仅存的为数极少的湖泊型湿地之一,具有缓洪滞沥、蓄水灌溉、调节局部地区气候、改善生态环境、补充地下水、保护生物多样性等多种生态功能^[13]。但是近年来,在人类活动和气候变化的综合作用下白洋淀的水文条件发生变化,入淀水量显著减少,湿地生态功能逐渐减退,出现水源不足、湿地萎缩、泥沙淤积、干淀频繁、生物多样性减少等危机^[14-15]。由于多年干淀和外源调水等原因,白洋淀自然景观发生了显著变化,研究其景观格局变化过程对揭示白洋淀生态环境变化规律,明晰生态环境退化的根本原因具有重要意义。尽管已有部分学者对白洋淀的景观格局动态变化进行了研究^[16-20],但时间尺度尚未涉及近十年,且大都只对3—5期数据进行分析,研究时间节点间隔大,无法详尽得知几十年来白洋淀的景观格局变化特征。因此本文借助1984—2014年间11期遥感影像数据提取研究区景观格局分布,综合运用景观格局指数方法和GIS技术分析白洋淀近30年的景观格局变化特征,并探索引起其变化的驱动力因子。

1 研究区概况

白洋淀是华北平原最大的天然淀泊,属于海河流域大清河水系中游,在太行山前的永定河和滹沱河冲积扇交汇处的扇缘洼地上汇水形成。位于河北省保定市安新县境内,少部分在沧州地区,四周以堤坝为界,地理

位置处于 $115^{\circ}38' - 116^{\circ}07'E, 38^{\circ}43' - 39^{\circ}02'N$ (图 1), 白洋淀湿地总面积 31867.2hm^2 。该区域属于东部季风区暖温带半干旱地区, 大陆性气候特点显著; 多年平均气温 $7.3 - 12.7^{\circ}\text{C}$, 气温年较差大; 年平均降水量 563.9mm , 降水主要集中在 6—9 月份; 年平均蒸发量 1369mm , 蒸发量远大于降水量^[21]。白洋淀入淀河流有潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、萍河、瀑河和白沟银河八条河流, 下游出口由枣林庄闸和赵北口溢流堰控制。白洋淀植物种类繁多, 生物多样性丰富, 有大型水生植物 47 种, 浮游植物 406 种。研究区是候鸟迁徙内陆途中的重要通道, 丰富的植物资源为各类动物提供了充足的食物资源和栖息场所, 具有重要的研究价值。

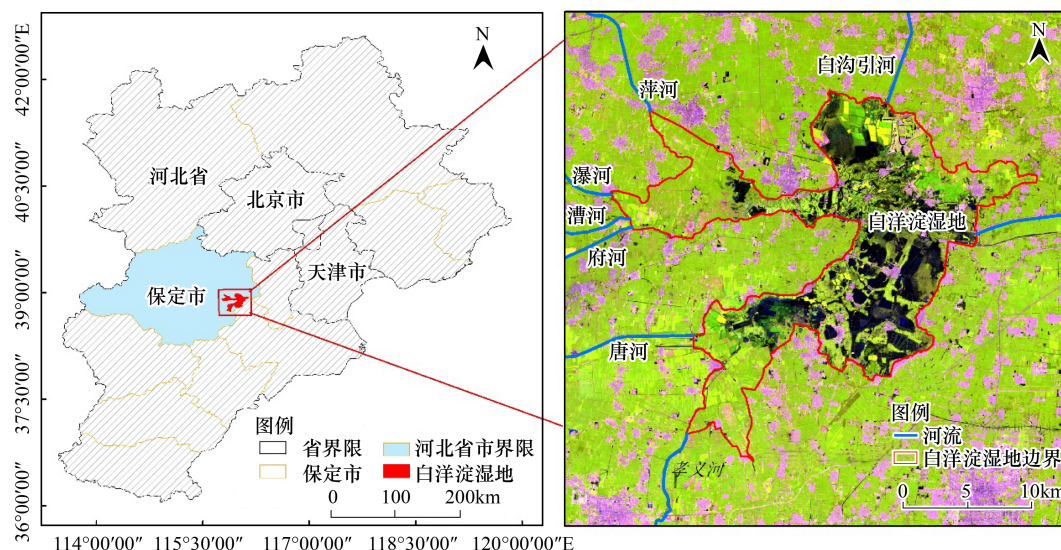


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Location of the study area

2 研究资料与研究方法

2.1 数据源与预处理

为了准确的揭示研究区景观格局动态演变特征, 每隔 2—4 年选取一景遥感影像, 且尽量选择降水量变化明显的年份; 为了便于水生植物的识别, 遥感影像时相选择在水生植物的生长期 (6—9 月份) 内; 另外考虑到遥感影像的质量和易获取性, 最终选取 1984 年 8 月 16 日、1988 年 9 月 28 日、1992 年 9 月 7 日、1994 年 9 月 13 日、1998 年 7 月 22 日、2000 年 9 月 13 日、2004 年 9 月 8 日、2006 年 6 月 26 日、2009 年 9 月 22 日、2011 年 6 月 8 日的 Landsat TM 影像以及 2014 年 9 月 18 日高分一号影像。其中 Landsat TM 影像分辨率为 30 米, 高分一号卫星影像分辨率为 16 米。为了减少分辨率对景观格局指数计算的影响, 本文将各时期的遥感影像分辨率统一重采样为 30m。

图像预处理主要包括几何校正及影像裁剪。以 2014 年 9 月 4 日 Landsat OLI 为基准影像, 对研究所使用的影像进行几何校正, 总误差控制在 0.5 个像元内; 最后利用白洋淀边界对影像进行裁剪。所有的空间数据的投影参考系统都统一使用通用横轴墨卡托投影, 参考椭球体为 WGS84。

2.2 景观类型分类信息提取

湿地水生植物主要包括沉水植物、浮水植物和挺水植物, 研究区中比较典型的沉水植物有狐尾藻、金鱼藻、马来眼子菜、篦齿眼子菜等; 浮水植物主要有满江红、浮萍等; 挺水植物主要有芦苇、香蒲和莲。经野外调查发现, 研究区中浮水植物的种类和数量较少, 因其也生长于水中, 与沉水植物混杂在一起, 出现同谱异物现象, 从影像上难以区分, 因此将浮水植物归入沉水植物一并提取; 另外参考《土地利用现状分类》, 结合影像数据特征, 最终确定将研究区划分为纯水体、挺水植物、沉水植物、林地、居民点、农田和裸土地 7 种景观类型。

在确定了湿地景观格局分类体系之后, 结合实地调查、Google Earth 软件等, 利用 eCognition 8.7 对研究区

11 期影像进行面向对象分类。在分类过程中,影像分割是基于可调整的色彩和形状的同质或异质标准来进行的,不同空间分辨率的影像分割尺度参数不同^[22-23]。分割完成后,根据遥感图像分类的要求,检测和提取目标地物的光谱、形状、大小、结构、纹理、布局等特征,设置相应的分类阈值,构建分类决策树。对于高空间分辨率的卫星影像,面向对象方法能够获得较高的分类精度,然而对于中等分辨率的 Landsat 系列卫星影像,其分类效果有限。因此,研究采用人机交互的目视解译方式,结合 2000 年全国土地利用分类图对面向对象分类结果进行编辑、修改,手动将面向对象分类错分、漏分的对象赋予正确的属性,并生成最终的景观格局分布图。

2.3 景观格局指数的选取

在众多景观格局的分析方法中,景观指数的应用最为广泛。景观格局指数能够高度浓缩景观空间格局信息,反映其结构组成和空间配置等方面的特征^[24]。使用 Fragstats3.4 计算研究区景观格局指数,在类型水平上选择平均斑块面积(Mean Patch Size, MPS)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、面积加权平均斑块分维数(Area-weighted Mean Patch Fractal Dimension, AWMPFD)和聚集度指数(Patch Cohesion Index, COHESION),在景观水平上选择斑块个数(Number of Patches, NP)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)、香农多样性指数(Shannon's Diversity Index, SHDI)和聚集度指数(Contagion, CONTAG),这些指数的概念、计算方法及生态学意义参见有关参考文献^[24]。

3 结果与分析

3.1 白洋淀湿地景观类型组分变化分析

表 1 为 1984—2014 年白洋淀各景观类型的面积变化,可以看出,30 年来挺水植物一直是白洋淀最主要的景观类型,其面积占研究区总面积比例达到 37%—61%,其次为农田、沉水植物、纯水体等;挺水植物和沉水植物呈减少趋势,农田和居民点呈持续快速增长趋势,纯水体为“增加-减少-再增加”的趋势,林地和裸土地变化幅度不大,选取典型年份的景观格局制图可以直观看出(图 2)。从 1984 年到 2014 年,白洋淀湿地面积(即挺水植物+沉水植物+纯水体)波动较大,1988 年达到最大值 27020.15hm²,比 1984 年增加了 28.37%,到 1992 年小幅度减少后持续增加到 1998 年的 26162.93hm²;1998 年之后湿地面积大幅度缩减,到 2004 年仅 19935.23hm²,之后湿地面积小幅度波动,直到近两年才有所增加(图 3)。湿地面积总体呈下降趋势,由 1998 年前的平均 25008hm²下降到 1998 年后的平均 21573hm²。在研究时段内景观格局变化最明显的时期是 1984—1988 年和 2000—2004 年,这主要是由于 1984 年和 2004 年白洋淀处于干淀时期,纯水体面积大量缩减,挺水植物和沉水植物向着纯水体退缩的方向扩展,而远离水体的挺水植物又被大量开垦为耕地。

表 1 1984—2014 年白洋淀湿地景观类型面积变化(hm²)

Table 1 The changes in area of each type of landscape in Baiyangdian wetland during the period 1984—2006 (hm²)

年份 Year	挺水植物 Emergent plant	沉水植物 Submerged plant	纯水体 Pure water	农田 Farmland	林地 Forest	居民点 Residential	裸土地 Bare land
1984	19351.10	836.62	860.61	9058.44	414.85	698.42	647.38
1988	11639.92	7201.94	8178.29	3577.36	88.11	963.98	217.82
1992	17094.01	4784.24	3029.97	5498.22	60.98	916.99	483.01
1994	18216.42	3764.58	3921.07	4738.24	224.24	871.21	131.66
1998	18067.96	4096.81	3998.16	4653.53	38.51	845.57	166.88
2000	17178.22	3232.33	2794.37	7285.44	68.67	1038.02	270.37
2004	16400.96	2021.56	1512.71	10240.07	307.68	1283.25	101.19
2006	15318.56	2910.75	2290.79	9793.07	161.15	991.02	402.08
2009	15001.22	2730.43	1920.61	10706.74	114.49	1135.78	258.15
2011	13093.66	3594.17	3277.88	9913.85	106.16	1311.77	569.93
2014	13196.78	2522.52	5851.68	8073.30	237.25	1924.81	61.08

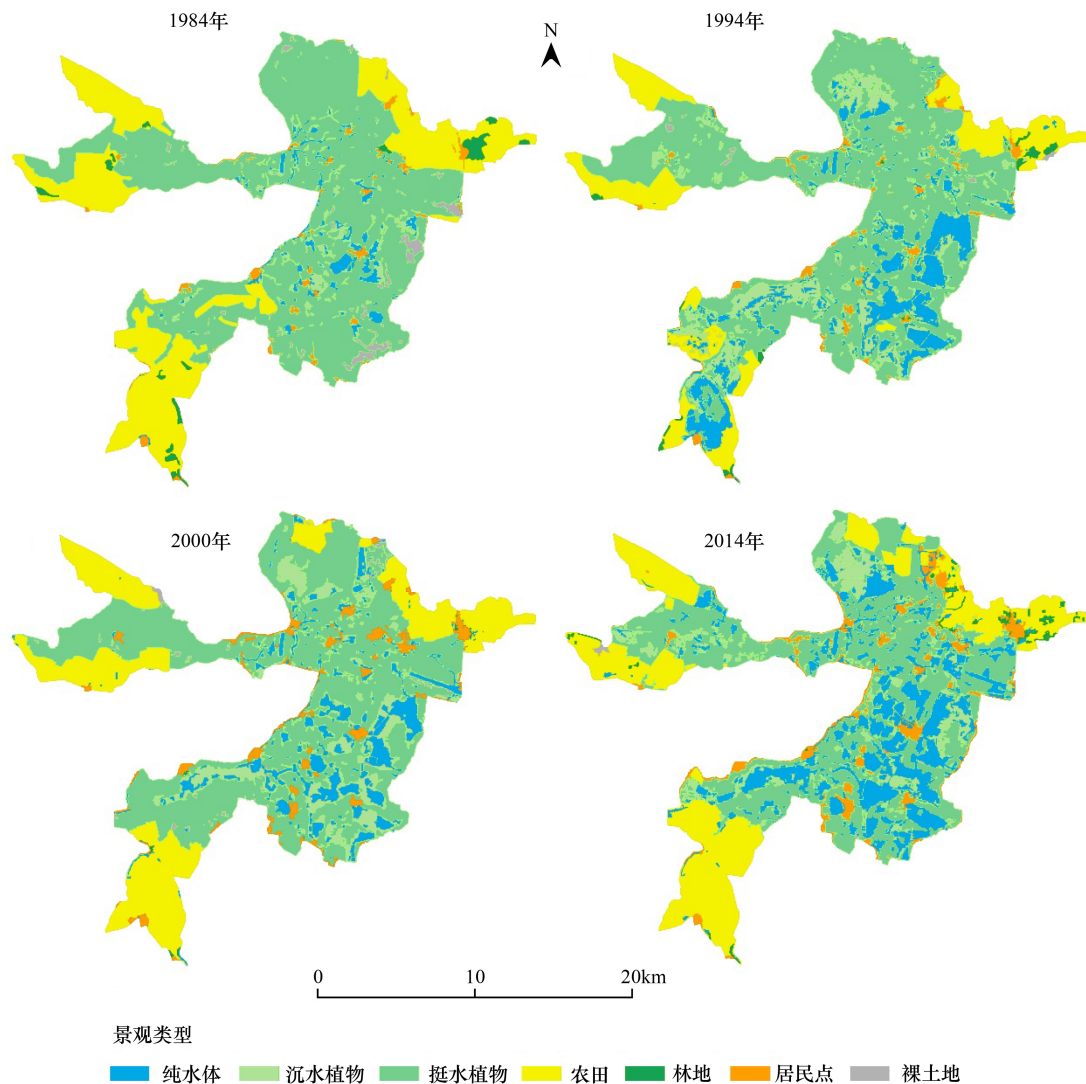


图 2 白洋淀湿地 1984 年 (a)、1994 年 (b)、2000 年 (c)、2014 年 (d) 景观格局变化

Fig.2 The landscapes pattern of Baiyangdian wetland in 1984 (a), 1994 (b), 2000 (c), and 2014 (d)

将研究时段按不同年代划分为 1984—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年、2010—2014 年四个时间段,求取各时段内景观类型平均面积作为该时段的景观类型面积,由图 4 可以看出,白洋淀湿地面积在 20 世纪 90 年代最大,之后不断缩减。挺水植物和沉水植物都呈现出减少的趋势,纯水体前三个时段不断减少,到第四个时段才有所回升。在湿地面积持续缩减的同时,农田和居民点面积不断扩张,尤其是进入到 21 世纪之后,扩张速度尤为迅速。林地和裸土地面积较少,变化不明显。

由图 3 可知,1998 年前湿地面积远大于 1998 年之后,因此将研究时段分为 1984—1998 年和 1998—2014 年两个时段分析景观格局的转移方向。由表 2 可知,1984—2014 年期间,湿地景观类型(挺水植物、沉水植物、纯水体)的缩减面积主要转换为农田和居民点,并在 1998—2014 年期间转换面积最大,分别达到 3705.05hm²和 1017.79hm²。除转换为农田和居民点外,湿地景观类型之间的相互转换也较为激烈,其中挺水植物向沉水植物和纯水体的过渡最为明显,转换面积分别为 2013.37hm²和 3688.59hm²。另外,753.89hm²的沉水植物转换为挺水植物(185.35hm²)和纯水体(568.54hm²);155.85hm²的纯水体转换为挺水植物(102.77hm²)和沉水植物(53.08hm²)。同时,1984—2014 年期间,大量的农田转换为挺水植物(1130.90hm²)、沉水植物(220.21hm²)和纯水体(575.54hm²)。挺水植物、沉水植物、纯水体和农田之间的相互转换与湿地水位变化密

切相关,说明白洋淀湿地景观格局的变化强烈依赖于水资源的空间配置。

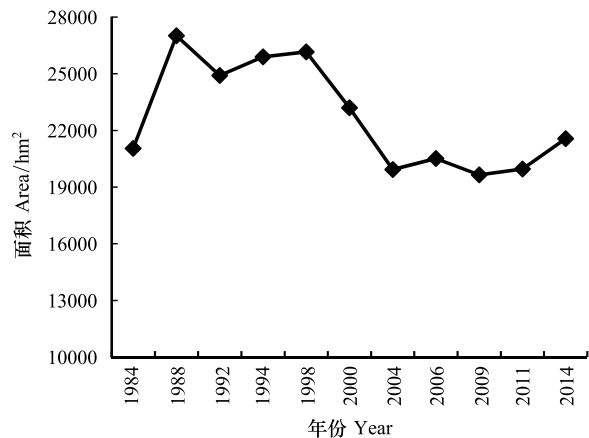


图3 1984—2014 年白洋淀湿地面积动态变化
Fig.3 The changes of wetland area in Baiyangdian from 1984 to 2014

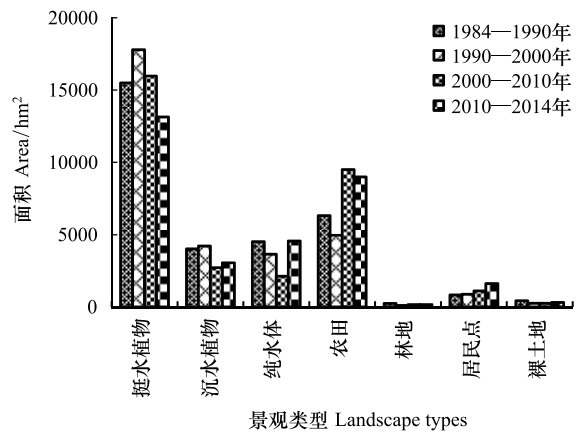


图4 白洋淀各时段景观类型平均面积变化
Fig.4 The changes of average area of each period of landscape from 1984 to 2014

表 2 1984—2014 年白洋淀湿地各时段景观类型面积转移矩阵 (hm²)

Table 2 Matrix of area transformation of landscape types in Baiyangdian wetland during the period 1984—2014 (hm²)

时段 Times	景观类型 Landscape types	1	2	3	4	5	5	6
1984—1998	1	14044.02	3061.02	2005.97	32.43	0.00	196.44	11.22
	2	133.07	179.13	523.82	0.00	0.00	0.6	0.00
	3	41.40	132.58	668.71	2.84	1.96	13.12	0.00
	4	3552.86	531.13	398.21	4291.70	21.01	111.20	152.33
	5	84.86	3.67	0.95	295.85	13.43	15.83	0.26
	6	113.64	36.62	14.36	26.46	1.34	505.33	0.67
	7	98.11	152.66	386.14	4.25	0.77	3.05	2.40
1998—20014	1	11148.61	959.12	1655.56	3405.68	43.66	808.13	47.2
	2	1357.99	967.3	1414.46	200.54	9.56	144.37	2.59
	3	530.69	585.55	2702.89	98.83	5.53	65.29	9.38
	4	60.58	7.47	53.94	4222.97	165.62	141.05	1.92
	5	0.00	0.00	2.53	23.69	6.63	5.67	0.00
	6	74.05	2.43	10.61	20.72	6.20	731.56	0.00
	7	24.86	0.65	11.69	100.87	0.05	28.75	0.00
1984—2014	1	11561.98	2013.37	3688.59	1137.77	9.71	881.74	57.95
	2	185.35	72.68	568.54	0.00	0.00	9.60	0.44
	3	102.77	53.08	631.95	5.75	0.00	66.95	0.11
	4	1130.90	220.21	575.54	6628.46	196.52	304.40	2.41
	5	42.42	0.50	29.98	275.98	25.89	40.08	0.00
	6	48.34	6.42	15.09	12.21	4.96	611.4	0.00
	7	125.02	156.26	342.01	13.12	0.16	10.64	0.17

1:挺水植物 Emergent plant; 2:沉水植物 Submerged plant; 3:纯水体 Pure water; 4:农田 Farmland; 5:林地 Forest; 6:居民点 Residential; 7:裸土地 Bare land

3.2 白洋淀湿地景观格局变化特征分析

3.2.1 类型水平上景观格局变化特征

图 5 显示了在斑块类型水平上各时期景观格局指数的变化趋势。平均斑块面积 (MPS) 在一定程度上揭

示了景观的破碎化程度。从图 5(a)中可以看出农田的 MPS 最大,其次为挺水植物。1994 年农田的 MPS 达到最低值 315.66hm^2 ,之后持续波动增长,到 2009 年增加到 1586.36hm^2 ,为多年最高值。挺水植物 MPS 最大值为 1984 年的 691.08hm^2 ,到 1989 年迅速降低到 77.67hm^2 ,之后缓慢增长到 2004 年达到一个小峰值,为 309.42hm^2 ,随后逐年降低。纯净水体的最大值出现在 1989 年,最小值在 2004 年。纯净水体、沉水植物、裸土地、居民点和林地的 MPS 较小,景观斑块破碎且分布零散。

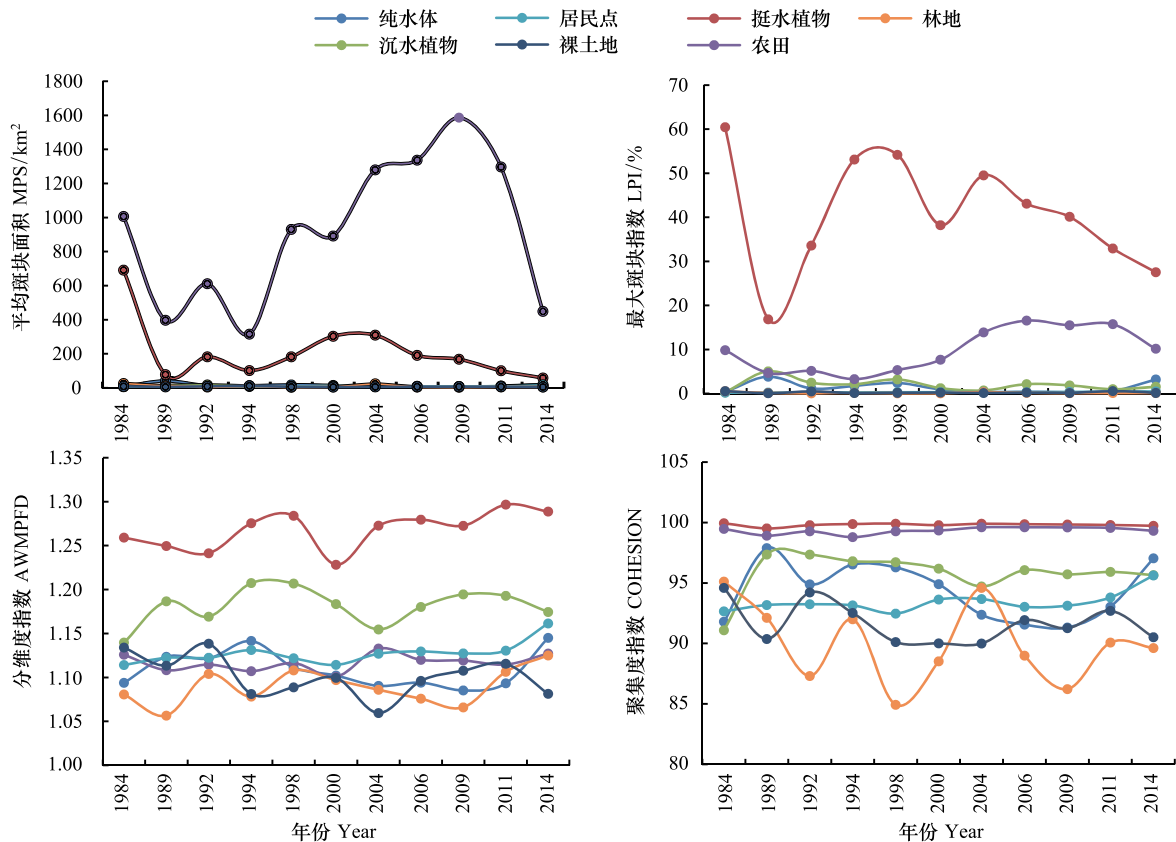


图 5 1984—2014 年白洋淀湿地各景观类型的平均斑块面积 (a)、最大斑块指数 (b)、分维度指数 (c) 和聚集度指数 (d)

Fig.5 Average patch area (a), largest patch area (b), dimension indices (c) and cohesion indices (d) of types of Landscape in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014

最大斑块指数 (LPI) 反映了各景观类型最大面积斑块占景观总面积的比例,是优势度的一种度量方式。图 5(b) 显示了 1984—2014 年期间各景观类型的 LPI。1984—2014 年间,挺水植物的 LPI 一直是最大的,其次是农田。在一定程度上说明了挺水植物和农田是研究区内的优势景观类型,且挺水植物是最占优势的景观类型,在研究区内连片分布。挺水植物的 LPI 在 1984 年达到最大值 60.47%,到 1989 年急速下降到 16.83%,而后逐渐增长到 1998 年达到另一峰值 54.19%,之后逐年降低。农田的 LPI 从 1984 年逐渐降低到 1994 年达到最低值,之后一直保持增长势态,近两年才有所缓解。说明 1998 年之后挺水植物的对景观的控制作用逐渐减弱,而农田的景观优势度正在逐渐提升。在 1984 年和 2004 年两个干淀时期纯净水体和沉水植物的 LPI 达到谷点,这主要是由于干淀期水位较低,大斑块纯净水体和沉水植物被分割为小斑块。

分维度指数反映了斑块的形状复杂性,其取值范围在 1.0 — 2.0 之间,值越大,就表示该景观类型越复杂。分维度指数 = 1.0,表示景观斑块的形状为正方形,分维度指数 = 2.0,表明景观斑块的形状最复杂。图 5 (d) 显示了白洋淀各景观类型的分维度指数,挺水植物的分维度指数最高,达到 1.30,表明挺水植物的景观斑块形状最复杂,其次是沉水植物。与 1984 年相比,2014 年纯净水体、挺水植物、沉水植物、林地、居民点的分维度指数都有所增加,而农田和裸土地有所减小。说明受气候和人类活动的影响,居民点扩张不规则,纯净水体、

挺水植物、沉水植物和林地的形状也越来越不规则,而农田和裸土地形状趋于规则。

聚集度指数度量景观中不同斑块类型的聚集程度,值越大反映同一景观类型斑块的高度聚集。由图 5 (e)可以看出,挺水植物和农田的聚集度指数最大,且走势平稳,变化不大;纯净水体、沉水植物、居民点、林地和裸土地聚集度指数相对较低,说明空间分布离散,破碎化程度高,连通性低。从 1984 年到 2014 年,纯净水体、沉水植物聚集度先增加后减少,最后增加;居民点聚集度持续增加,林地和裸土地呈较强的波动状态且聚集度最差。

3.2.2 景观水平上景观格局变化特征

图 6 为不同时期白洋淀湿地景观水平上的景观指数, 1984—2014 年期间,斑块个数呈先增加后减少之后又增加的趋势,其中 2011 年斑块个数达到最大值(1117 个),1984 年最小(464 个),说明 1984—2014 年白洋淀景观破碎度呈先增加再减少之后又增加的趋势,并在 2011 年破碎化达到峰值,1984 年达到最小值。1984—2014 年景观形状指数呈先增加后减少之后又增加的趋势,在 1989 年达到最大值 25.05,最小值出现在 1984 年,为 13.26,2014 年相较于 1984 年增加了 80.39%,景观形状变得复杂。1984—2014 年白洋淀的聚集度指数呈先减少再增加最后又减少的趋势,其最大值出现在 1984 年为 68.11,最小值出现在 1989 年,值为 54.23,随后缓慢增长到 2004 年的 63.41,之后便逐年下降,说明 1984—2014 年期间景观连通性在 1984 年达到最大值,空间格局分布最均匀,到 1989 年连通性迅速下降,之后出现缓慢上升后再下降的趋势。香农多样性指数经历了一个先增加、后减少、最后增加的波动过程,其波动过程正好与聚集度指数相反,说明 1984 年白洋淀生物多样性单一,1989—2004 年香农多样性指数下降,斑块类型趋于单一,景观丰富度降低,2004 年之后多样性指数逐渐升高,景观丰富度增加。整体来看,1984—2014 年期间多样性指数增加,说明各景观类型所占比例趋于均衡化,作为优势景观类型的湿地对整个景观的控制作用减小,景观异质性增加。

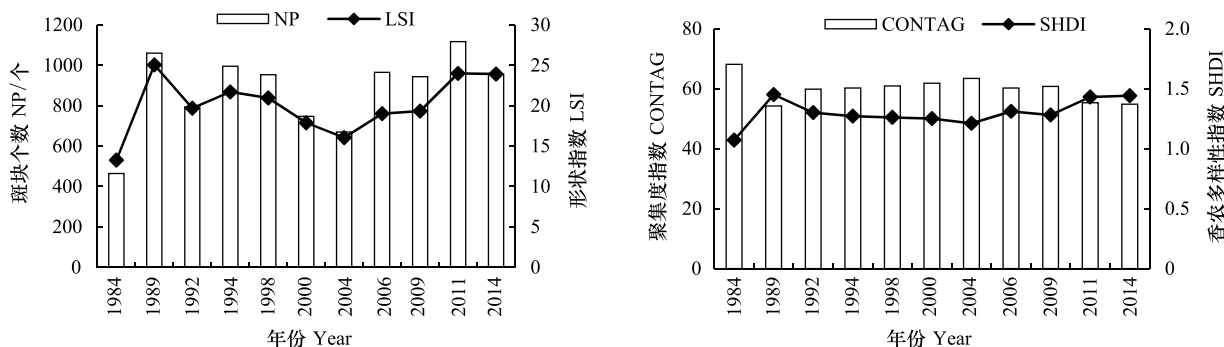


图 6 1984—2014 年白洋淀湿地景观水平上的景观格局指数变化

Fig.6 Changes in landscape pattern indices of Baiyangdian wetland at the scale of landscape from 1984 to 2014

3.3 白洋淀湿地景观格局变化驱动力分析

3.3.1 气候因素

由图 7 可以看出,从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初白洋淀湿地的降水量持续减少,直到近两年才有缓慢的增加,而蒸散发量(图 8)却基本持平,变化幅度不大,从而导致白洋淀湿地水位下降,纯净水体面积严重退缩,湿地景观格局发生变化。从研究所选用的几个时间节点能够直观的看出降水量对湿地景观格局的影响,1988 年、1994 年的降水量 763.8mm 和 848.5mm,远远超过十年滑动平均降水量 511.63mm 和 510.09mm,水域面积的扩张为水生植物提供充沛的水源。而 1984 年、1992 年、2000 年白洋淀降水量仅 290.2mm、375.4mm、242.1mm,当年湿地面积也较上年有了明显的减少。在 2004 年,尽管当年降水量超过了十年平均降水量,但由于前几年降水量都很少,因此相对于 2000 年湿地面积还是有所减少。对降水量与湿地面积(纯净水体 + 沉水植物 + 挺水植物)、纯净水体面积、纯净水体+沉水植物面积的相关性进行分析发现(图 9),湿地面积、纯净水体面积、纯净水体+沉水植物面积与降水量存在正相关关系,而相关系数则是纯净水体面积($R^2 = 0.41$) > 纯净水体+沉水植

物面积($R^2 = 0.356$) > 湿地面积($R^2 = 0.277$),说明降水量对纯水体的影响比水生植物大,尤其是挺水植物受降水量的影响相对较小,其面积的变化更大程度上受到其他因素的干预。特别是步入 21 世纪之后,湿地面积平均比 2000 年之前减少了 18.36%,除降水量的原因,更多的是人类对湿地的破坏以及城镇扩张等因素造成的影响。

另外,温度作为气候因素的重要方面,也对湿地景观格局有着一定的影响,从图 7 可知,从 20 世纪 70 年代至今,白洋淀湿地小环境平均温度一直在上升。随着温度的上升,水面蒸发量也会相应的增加,也会对湿地景观格局造成一定的影响。

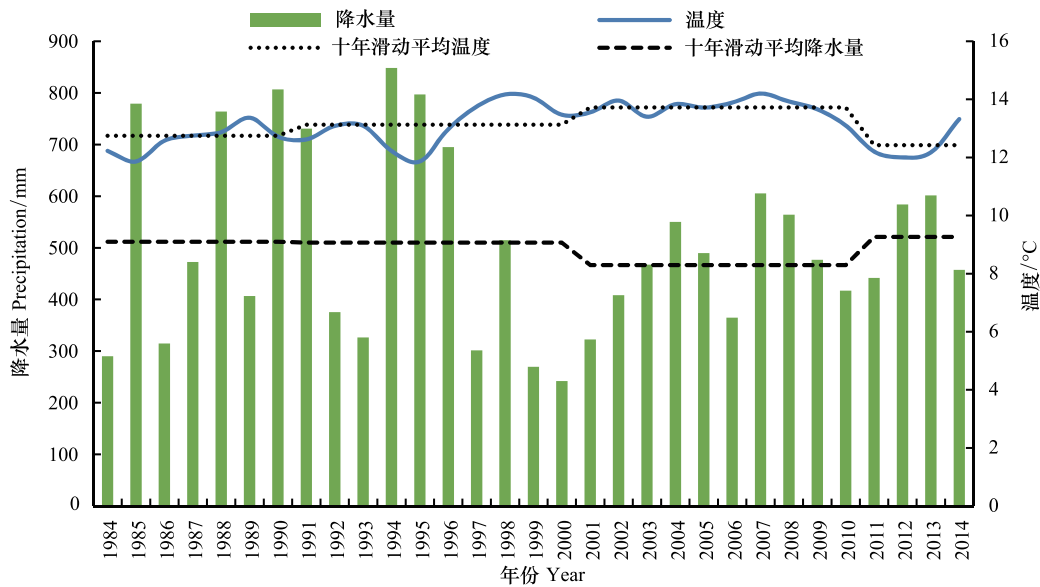


图 7 1984—2014 年白洋淀湿地降水量和温度变化

Fig.7 Changes of precipitation and temperature in Baiyangdian wetland in the period 1984—2014

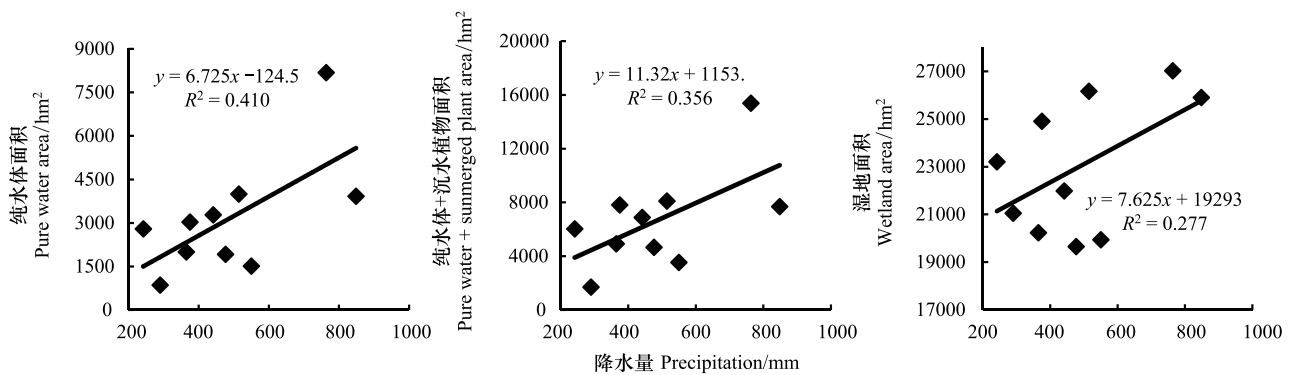


图 8 白洋淀湿地蒸散发量变化(据文献[25])

Fig.8 Changes of evapotranspiration in Baiyangdian

3.3.2 入淀水量

白洋淀属于平原半封闭式潜水型湖泊,不具备多年调节能力,其淀区水量主要来源除了天然降水和上游河流的汇入。白洋淀入淀河流有潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、萍河、瀑河和白沟引河八条河流,从 20 世纪 60 年代初开始,为了根治海河,白洋淀上游河流建起了百余座水库,大型水库有安各庄水库、西大洋水库、王快水库、横山岭水库、龙门水库及口头水库。水库的大量兴建减少了上游河道径流量,改变了水资源的时空分布,使入淀水量越来越少(图 10),目前仅府河常年有水入淀,孝义河、瀑河仅部分季节有水入淀,其余河流

基本长期断流。入淀水量的持续减少,使得白洋淀湿地水量供给不足,导致白洋淀纯水体面积持续减少并多次出现干淀。

3.3.3 人口和社会经济

白洋淀流域的人口增长和经济发展是影响上游入淀水量减少的主要原因。近年来,白洋淀上游和周边经济发展迅速,人口数量逐年增长,到 2013 年保定市常住人口达到 1140.74 万人,与 1984 年的 89.68 万人相比增加了 1051.06 万人,随着人口的快速增加,人们对水资源的需求也在不断增长,导致白洋淀入淀水量减少。为了说明经济发展对白洋淀湿地景观格局影响,将保定市 GDP 与湿地面积、农田和居民点面积作相关性分析(图 11),结果发现,白洋淀湿地面积与 GDP 成负相关关系($R^2 = 0.594$),农田面积和居民点面积与 GDP 成正相关关系,决定系数分别为 0.558 和 0.675。随着社会经济增加,农田和居民点面积不断扩张,上游工农业用水量增加,同时淀区用水量也在不断增加,导致白洋淀水位下降,湿地面积减少,从而影响到白洋淀湿地景观格局变化。

3.3.4 政策

政府政策制度对景观格局变化有着强制性的影响^[26]。为了防止白洋淀出现干淀,自 1981 年起开始给白洋淀补水,“输水救淀”已成为政府的一项决策^[27],近年来政府加大了白洋淀补水力度,在白洋淀流域上游水库蓄水量严重不足时,多次启用跨流域引水。1984 年以来,白洋淀先后 23 次引水济淀,入淀水量约 12.1 亿 m^3 ,2004 年 3 月实施了“引岳济淀”,入淀水量 1.6 亿 m^3 ;2006 年 12 月又实施了“引黄济淀”,入淀水量 1.0 亿 m^3 ;2008 年 1 月再次实施“引黄济淀”,补水量达 1.58 亿 m^3 ^[28]。引水入淀对白洋淀的生态环境保护起到一定的促进作用,能够缓解白洋淀的干淀问题,保证白洋

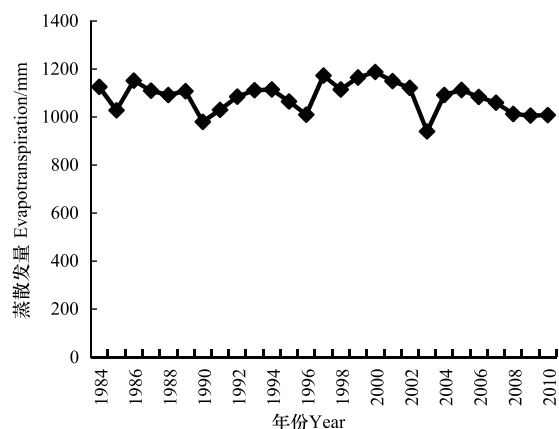


图 9 1984—2014 年白洋淀湿地面积 (a)、纯水体面积 (b)、纯水体+沉水植物面积 (c) 与降水量相关性分析

Fig.9 Regression analyses between the wetland area (a), water area (b), water + submerged plants (c) and precipitation in Baiyangdian

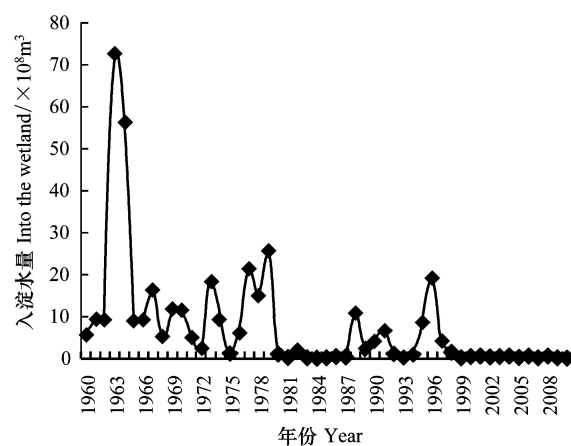


图 10 白洋淀湿地入淀水量变化(据文献[25])

Fig.10 Changes of the inflow to Baiyangdian

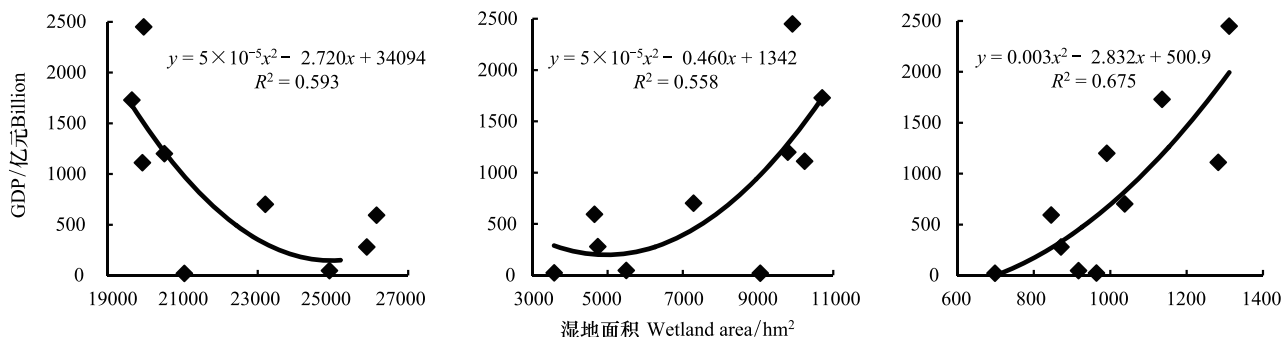


图 11 1984—2014 年白洋淀湿地面积 (a)、农田面积 (b)、居民点面积 (c) 与 GDP 相关性分析

Fig.11 Regression analyses between the wetland area (a), farmland area (b), settlement area (c) and GDP in Baiyangdian

淀的最低生态水位,防止湿地的进一步沼泽化或干化,对湿地景观向陆地景观的转变起到一定的抑制作用。

综上所述,降水量、入淀水量、社会经济发展和政策等因素都会对白洋淀的水位造成影响,随着水位的变化,水生植物、纯水体与耕地之间相互转换,从而导致湿地景观格局发生变化。其中,人口和社会经济因素是白洋淀湿地景观变化的主要驱动力,随着人口增加和社会经济的发展,城市生活用水和工农业用水量增加,导致白洋淀水位下降,从而影响到白洋淀湿地景观格局变化。

4 结论

本文利用 1984—2014 年的长时间序列遥感影像,提取白洋淀湿地 11 年的景观格局,进而分析白洋淀湿地近 30 年来的景观格局演变特征及其驱动力机制。研究表明:

(1) 1984—2014 年期间,白洋淀湿地的景观格局发生了较大的变化,挺水植物和沉水植物呈减少趋势,农田和居民点持续快速增长,纯水体为“增加-减少-再增加”的趋势,林地和裸土地变化幅度不大。湿地面积(挺水植物+沉水植物+纯水体)先增加,再减少,之后又小幅度增加,总体呈下降趋势。挺水植物一直是研究区最主要的景观类型,其面积占研究区总面积的比例达到 37%—61%,其次为农田、沉水植物、纯水体等。1984—2014 年期间,在枯水年大量的湿地景观类型转换为农田,而丰水年则是大面积农田转换为湿地景观类型;同时随着水位的消长,挺水植物、沉水植物和纯水体三者之间的相互转换较为激烈。

(2) 景观格局指数分析结果显示,纯水体、沉水植物、居民点的景观破碎化程度较高,挺水植物和沉水植物斑块形状最复杂,挺水植物和农田的聚集程最大,而居民点、纯水体、裸土和林地的聚集度指数低,斑块空间分布分散,连通性差。1984—2014 年白洋淀湿地斑块个数、景观形状指数和香农多样性指数都呈先增加后减少之后又增加的变化趋势,最小值均出现在 1984 年,斑块个数的最大值出现在 2011 年,而景观形状指数和香农多样性指数的最大值出现在 1989 年;三者均在 2004 年均出现低谷。景观连通性的变化趋势正好相反,为先减少后增加之后又减少。

(3) 白洋淀湿地景观格局演变是自然与社会经济等因素综合作用的结果,其中人口和社会经济发展是影响白洋淀景观格局变化的主要因素,与湿地主要景观格局的相关性达到 0.5 以上。随着人口增加和社会经济的发展,城市生活用水和工农业用水量增加,导致白洋淀水位下降,湿地退缩,从而影响到白洋淀湿地景观格局变化。

5 讨论

前人在白洋淀景观格局变化的相关研究中大都是基于 3—5 期影像数据进行分析,只能体现景观格局的大致演变趋势,无法详尽得知在时间尺度上白洋淀景观格局的演变特征。本文每隔 2—4 年选取一期遥感影像,共使用 11 期数据参与白洋淀景观格局演变分析,有效的弥补了以往基于 3—5 期影像数据分析的不足,充分反映出白洋淀近 30 年来景观格局的细部变化特征。在降水量突变或人工扰动较大的年份,如 1988 年、1992 年、1998 年、2004 年、2006 年、2009 年,湿地景观格局变化会比较明显,如果仅选用几期数据进行分析则不能完全体现出这种变化。因此,在进行景观格局演变分析时,影像数据的时相选择是非常重要的,直接关系到研究结果的准确性与可靠性。

本次研究采用定性分析与定量线性回归相结合的方式分析景观格局演变的驱动力机制,研究表明,降水量、入淀水量、经济和相关政策均对景观格局产生一定的影响,然而这种方法却不能体现每种驱动力因子的贡献大小^[29],因此,在后续研究中,将进一步探索利用数理统计模型定量分析白洋淀湿地景观格局演变的驱动力机制。

白洋淀湿地的景观格局自调节能力差,完全依赖于水位的高低。近年来,为了解决白洋淀的缺水问题,政府多次从各水库或跨流域调水,对白洋淀的湿地恢复起到巨大的作用。2009 年引黄工程完成时,白洋淀核心区水质已达到 III 类标准^[30],水质明显好转,地下水水位下降趋势也得到了明显遏制。因此对于目前白洋淀

的生态环境来说外源调水是必不可少的,刘越等对白洋淀生态水位及补水方案进行了研究,表明白洋淀生态适宜水位为 7.5 — 8.7m,当 10 月份水位降到 6.5m 时,调水入淀量应不少于 1.45 亿 m^3 ,当 10 月份水位降到 7.5m 时,调水入淀量不少于 0.45 亿 m^3 ^[31]。但外源调水不能从根本上解决白洋淀的缺水问题,不利于白洋淀湿地的可持续发展。造成白洋淀水源缺乏的主要原因是人为干扰过度^[32],因此应该有效的控制上游水量的使用,减少人类活动对白洋淀湿地的压力,使上游来水量增加,从而恢复湿地生态系统的内循环,实现湿地的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Zhao W Z, Liu B, Zhang Z H. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (2): 215-223.
- [2] Copeland H E, Tessman S A, Girvetz E H, Roberts L, Enquist C, Orabona A, Patla S, Kiesecker J. A geospatial assessment on the distribution, condition, and vulnerability of Wyoming's wetlands. *Ecological Indicators*, 2010, 10(4): 869-879.
- [3] Lienert J, Diemer M, Schmid B. Effects of habitat fragmentation on population structure and fitness components of the wetland specialist *Suertia perennis* L. (*Gentianaceae*). *Basic and Applied Ecology*, 2002, 3(2): 101-114.
- [4] 张丽, 赵丹丹, 刘吉平, 陈智文, 刘家福. 近 30 年吉林市景观格局变化及气候效应. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2015, 45(1): 265-272.
- [5] 刘红玉, 吕宪国, 张世奎. 湿地景观变化过程与积累环境效应研究进展. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 60-70.
- [6] 龚天宇, 邵全琴, 刘纪远, 孙朝阳, 曹巍. 中国南方不同土地利用/覆被类型对气温升温的影响. *地理研究*, 2012, 31(8): 1465-1478.
- [7] 白军红, 欧阳华, 杨志峰, 崔保山, 崔丽娟, 王庆改. 湿地景观格局变化研究进展. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 36-45.
- [8] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 赵文吉. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析. *地理学报*, 2011, 66(1): 77-88.
- [9] 杜清, 徐海量, 赵新风, 张鹏, 凌红波, 王希义. 新疆喀什噶尔河流域 1990-2010 年土地利用/覆被及景观格局的变化特征. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1548-1555.
- [10] 刘吉平, 赵丹丹, 田学智, 赵亮, 刘家福. 1954-2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力. *生态学报*, 2014, 34(12): 3234-3244.
- [11] 李宁云, 袁华, 田昆, 彭涛. 滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响. *生态学报*, 2011, 31(24): 7388-7396.
- [12] 刘娜, 王克林, 段亚峰. 洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响. *生态学报*, 2012, 32(15): 4641-4650.
- [13] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. *生态学报*, 2005, 25(5): 1033-1040.
- [14] 尹健梅, 程伍群, 严磊, 陈秀凤. 白洋淀湿地水文水资源变化趋势分析. *水资源保护*, 2009, 25(1): 52-58.
- [15] 刘春兰, 谢高地, 肖玉. 气候变化对白洋淀湿地的影响. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(2): 245-250.
- [16] 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. *地理研究*, 2013, 32(9): 1634-1644.
- [17] 王京, 卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜, 裴亮. 近 40 年来白洋淀湿地土地覆被变化分析. *地球信息科学学报*, 2010, 12(2): 292-300.
- [18] 王滨滨, 刘静玲, 张婷, 陈秋颖. 白洋淀湿地景观斑块时空变化研究. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10): 1857-1867.
- [19] 林皓波, 吴新玲, 刘菲, 边静. 白洋淀湿地资源的遥感监测. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(4): 127-130.
- [20] 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 白杨. 近 33 年白洋淀景观动态变化. *生态学报*, 2011, 31(3): 839-848.
- [21] 王婷婷, 崔保山, 刘佩佩, 蓝艳, 韩祯, 张永涛. 白洋淀漂浮植物对挺水植物和沉水植物分布的影响. *湿地科学*, 2013, 11(2): 266-270.
- [22] 莫利江, 曹宇, 胡远满, 刘森, 夏栋. 面向对象的湿地景观遥感分类——以杭州湾南岸地区为例. *湿地科学*, 2012, 10(2): 206-213.
- [23] Su W, Li J, Chen Y H, Liu Z G, Zhang J S, Low T M, Suppiah I, Hashim S A M. Textural and local spatial statistics for the object-oriented classification of urban areas using high resolution imagery. *International journal of remote sensing*, 2008, 29(11): 3105-3117.
- [24] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [25] 袁勇, 严登华, 王浩, 王青. 白洋淀湿地入淀水量演变归因分析. *水利水电技术*, 2014, 44(12): 1-4, 23-23.
- [26] 张敏, 宫兆宁, 江浏光艳. 2000-2010 年成都市土地利用空间格局变化分析. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 37(5): 735-743.
- [27] 杨春霄. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析. *地下水*, 2010, 32(2): 110-112.
- [28] 周奕帆, 阎广聚. 引水补源对维系白洋淀生态影响对策研究. *水科学与工程学报*, 2012, (6): 29-32.
- [29] 吴美琼, 陈秀贵. 基于主成分分析法的钦州市耕地面积变化及其驱动力分析. *地理科学*, 2014, 34(1): 54-59.
- [30] 王朝华, 王子璐, 乔光建. 跨流域调水对恢复白洋淀生态环境重要性分析. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(3): 138-141.
- [31] 刘越, 程伍群, 尹健梅, 王秀艳. 白洋淀湿地生态水位及生态补水方案分析. *河北农业大学学报*, 2010, 33(2): 107-109.
- [32] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 于静洁, 王中根. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响. *地理学报*, 2012, 67(1): 62-70.