

白洋淀生态环境变化及影响因素分析

刘世存, 王欢欢, 田凯, 赵彦伟, 陈家琪, 李春晖

引用本文:

刘世存, 王欢欢, 田凯, 等. 白洋淀生态环境变化及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1060–1069.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0198>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生态补水驱动下白洋淀生态系统服务演变趋势

杨薇, 孙立鑫, 王烜, 闫胜军, 赵彦伟

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1077–1084 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0241>

流域水环境承载力评价——以白洋淀流域为例

白洁, 王欢欢, 刘世存, 田凯, 赵彦伟, 李春晖

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1070–1076 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0197>

白洋淀近30年水质时空变化特征

王欢欢, 白洁, 刘世存, 田凯, 赵彦伟, 李春晖

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1051–1059 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0196>

土地利用变化与社会经济因素对湖南典型水库水质变化的影响

杨泽栋, 秦治恒, 白中科, 郝易成

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2270–2277 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1754>

桂林会仙岩溶湿地水体中有机氯农药分布特征及混合物环境风险评估

符鑫, 梁延鹏, 覃礼堂, 曾鸿鹄, 莫凌云, 王敦球, 覃璐玫

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 974–983 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1339>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘世存, 王欢欢, 田 凯, 等. 白洋淀生态环境变化及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1060–1069.

LIU Shi-cun, WANG Huan-huan, TIAN Kai, et al. Ecological environmental changes and influencing analysis in Baiyangdian Lake[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1060–1069.



开放科学 OSID

白洋淀生态环境变化及影响因素分析

刘世存, 王欢欢, 田 凯, 赵彦伟*, 陈家琪, 李春晖

(水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘 要:为明确白洋淀生态环境变化, 归纳总结了其水文、水量、水质、水生生物和景观格局变化, 采用相关性分析法和曲线回归法分别分析了各生态环境要素的相关性与生态环境退化的影响因素。结果表明: 白洋淀入淀水量逐年减少, 蒸发量增加, 水质下降, 水生生物种类和数量减小, 湿地景观向非湿地景观转化的比例增大, 景观破碎化程度增加; 水文要素、水质与水生生物之间存在一定相关性, 流域用水增加及气候变化共同导致的入淀水量减少, 是水质下降、湿地面积减少和浮游动物种类减少的重要影响因素。未来应加强生态补水, 优化流域社会经济发展, 推进流域水污染深度治理, 实施湿地生态修复与连通性建设, 改善生态环境状况。

关键词: 白洋淀; 生态环境; 水文; 水质; 水生生物; 影响因素

中图分类号: X321 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)05-1060-10 doi:10.11654/jaes.2020-0198

Ecological environmental changes and influencing analysis in Baiyangdian Lake

LIU Shi-cun, WANG Huan-huan, TIAN Kai, ZHAO Yan-wei*, CHEN Jia-qi, LI Chun-hui

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to know the changes of Baiyangdian ecological environment, they changes in hydrology, water quantity, water quality, aquatic organisms, and landscape pattern in Baiyangdian Lake were summarized, and the correlation among the ecological environmental factors and influencing factors of ecological environmental degradation were analyzed by correlation analysis and curve regression analysis. The results showed that the water quantity, water quality, aquatic organism species, and aquatic organism quantity of Baiyangdian Lake decreased each year, while evaporation, the proportion of the wetland landscape transformed into non-wetland landscape, and the degree of landscape fragmentation increased. There were some correlations among the changes in aquatic organisms, hydrology elements, and water quality. The decrease in water inflow caused by the increase in water use and climate change in the watershed may be an important factor affecting water pollution, wetland area decrease, and zooplankton species decline. We should establish a stable ecological water supply mechanism, optimize the socio-economic development model, implement the deep treatment of waste water, strengthen the ecological restoration of wetlands and wetland channel hydrological connectivity, and improve the ecological environment of Baiyangdian Lake in the future.

Keywords: Baiyangdian Lake; ecological environment; hydrology; water quality; aquatic organism; influencing factor

收稿日期: 2020-02-25 录用日期: 2020-04-15

作者简介: 刘世存(1995—), 女, 吉林白城人, 硕士研究生, 从事环境规划管理研究。E-mail: m18143142797@163.com

*通信作者: 赵彦伟 E-mail: awei1974@bnu.edu.cn

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001); 北京市科技计划课题(Z181100009618030)

Project supported: The Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2018ZX07110001); Beijing Municipal Science & Technology Commission(Z181100009618030)

湿地是陆地生态系统和水生生态系统之间的转换区,是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,具有抵御洪水、调节径流、改善气候、控制污染、美化环境和维护区域生态平衡等方面的生态服务功能价值,被誉为“地球之肾”和“物种的基因库”^[1]。白洋淀是华北平原唯一常年积水的浅水型淡水湖泊,也是华北平原最大、最典型的淡水湖泊湿地,被誉为“华北明珠”,对维持华北地区生态平衡和保持生物多样性发挥着生态安全屏障作用^[2-3]。白洋淀也是雄安新区生态建设的重要依托,是雄安新区“千年大计”的重要组成部分,因此雄安新区的发展对白洋淀的生态环境有更高的要求。长期以来,流域水土资源的过度开发导致白洋淀入淀水量减少、淀区湿地面积锐减、富营养化加剧、生物多样性降低,淀区严重退化^[4-5]。因此,分析白洋淀生态环境的变化趋势,明确主要影响因子,可为白洋淀水污染治理、水生态保护与修复提供依据,也可以为雄安新区的生态环境建设与管理提供重要参考。

国内外学者对湿地生态环境变化进行了比较系统的研究。刘曼晴等^[6]、谢冬明等^[7]、Shsaeed等^[8]分析了湿地蒸散量、水位及湿地的变化,Gong等^[9]、Mallik等^[10]和James等^[11]分别分析了湿地演变的驱动力与景观变化的驱动机制,丰富了湿地研究的方法与内容体系。作为华北平原最大的天然湿地,白洋淀湿地变化的研究也受到关注。部分学者^[12-15]对白洋淀的潜在蒸散量、水位变化趋势、白洋淀水质时空变化、入淀水量变化及影响因素等进行了研究,刘丰等^[16]、方宏阳等^[17]、朱金峰等^[18]和张敏等^[19]分析了白洋淀土地利用与景观转化,研究了湿地土地变化的驱动机制,取得了丰富的研究成果。总体上,研究者针对白洋淀的生态环境要素进行了较为深入的研究,但受制于数据等原因,研究的时间序列较短,基本为10~20 a,难以明确长时间的生态环境变化趋势,且对各要素之间的关系及白洋淀生态环境退化的影响因素缺乏更进一步的研究,制约了研究成果的应用效果。

本文归纳总结了白洋淀水文、水质、入淀水量、水生生物与景观格局等要素的变化趋势,研究了生态环境各要素之间的相关性,探讨了白洋淀生态环境退化的影响因素,为白洋淀生态环境综合治理提供更为系统的依据,支撑雄安新区的生态环境建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀位于海河流域大清河水系中游,地理位置

为115°38′~116°09′E,38°43′~39°01′N(图1)。淀区由保定市、沧州市交界的143个相互联系的大小淀泊和3700多条沟壕组成,总面积366 km²,四周以堤坝为界。白洋淀多年平均气温7.3~12.7℃,年平均降水量563.9 mm,年平均蒸发量1369 mm。白洋淀植物种类繁多,生物多样性丰富,是候鸟迁徙内陆途中的重要通道,位置极为重要,但受自然与人为多因素影响,淀区生态环境退化严重。

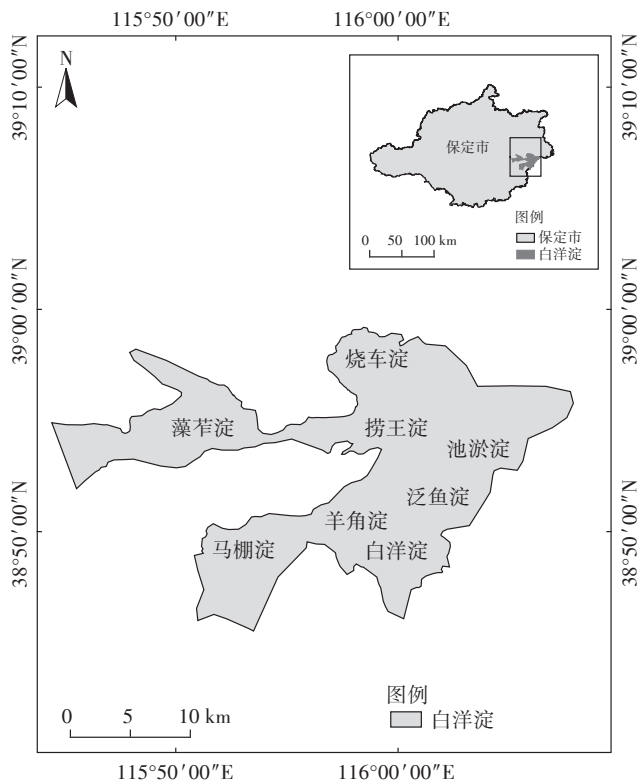


图1 白洋淀地理位置

Figure 1 Location of Baiyangdian

1.2 数据来源

本研究主要数据来源于中国知网和Web of Science数据库收录的白洋淀生态环境相关文献。文中图表数据来源包括三部分:水文、水质、水量、水生生物和景观格局要素变化的图表数据来自已有研究文献,相关性分析和回归分析的数据来自环境质量报告书与相关生态环境调查研究报告等,其他数据来自国家统计局网站和中国气象数据网等。

1.3 研究方法

归纳对比法(Inductive comparison method)的目的是通过对客观事物的比较,将个别事物加以综合,以获得一般结论,进而认识事物的本质和规律,形成经验积累和对类似情况的深刻认识^[20]。本文采用归

纳对比法对所选文献进行整理归纳,横向对比不同学者对同一生态环境要素的研究结论,得到长期变化趋势,纵向对比分析不同生态环境要素变化,归纳各要素间影响与作用的关系。

相关性分析(Correlation analysis)指对两个或多个具备相关性的变量进行分析,衡量变量因素的相关密切程度,基于 Pearson 系数的相关性分析可用来判断两组符合正态分布的定距变量间线性关系大小^[21]。本文通过相关性分析比较相关系数大小,以判断各要素间相关性的强弱。

曲线回归(Curvilinear regression)是对非线性关系变量进行回归分析的方法,其原理是以最小二乘法分析曲线关系数据变化特征^[22]。研究采用本方法,尝试建立各生态环境要素与其影响因子间定量关系,根据回归系数 R^2 判断模型拟合效果, R^2 或调整 R^2 越接近于1,模型拟合效果越好。

2 结果与讨论

2.1 生态环境变化分析

2.1.1 水文特征变化

结合相关研究,1956—2015年,流域降水量在波动中呈下降趋势(图2a),且降水量存在一定的丰平枯周期变化规律,其中16 a为降水变化的主周期^[23-24]。1960—2016年,白洋淀年平均蒸发量呈上升趋势(图2b)。1988—2011年淀区最高水位在波动中呈下降趋势,由1988年的8.42 m下降到2011年的6.61 m^[25],下降幅度为1.81 m(图2c)。如果保持白洋淀生态功能不受影响,最低水位应保持在7.3 m,水位低于6.5 m时会出现干淀,湿地存在较大的退化风险^[26]。可见,在1988—2011年期间,湿地长期处于低水位运行状态,面临着严重的干淀及生态风险。

2.1.2 入淀水量变化

1952年至今,天然入淀水量呈明显下降趋势^[27]。20世纪70年代之前,入淀水量与降水量基本呈同步变化,1970—1996年在波动中下降^[28]。这种趋势一直在持续,2010—2016年平均入淀水量仅为60年代的5.71%(图3)。为解决入淀水量下降问题,白洋淀实施了多次人工补水,作为一个替代水源,人工补水很大程度上缓解了干淀危机。1981—2007年,从上游的西大洋水库等向白洋淀补水21次,共补水 $6.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,2000—2007年补水较为频繁,入淀水量也有明显的升高。“引黄济淀”是一个重要的应急补水水源,2006—2011年,进行4次补水,最高补水量约

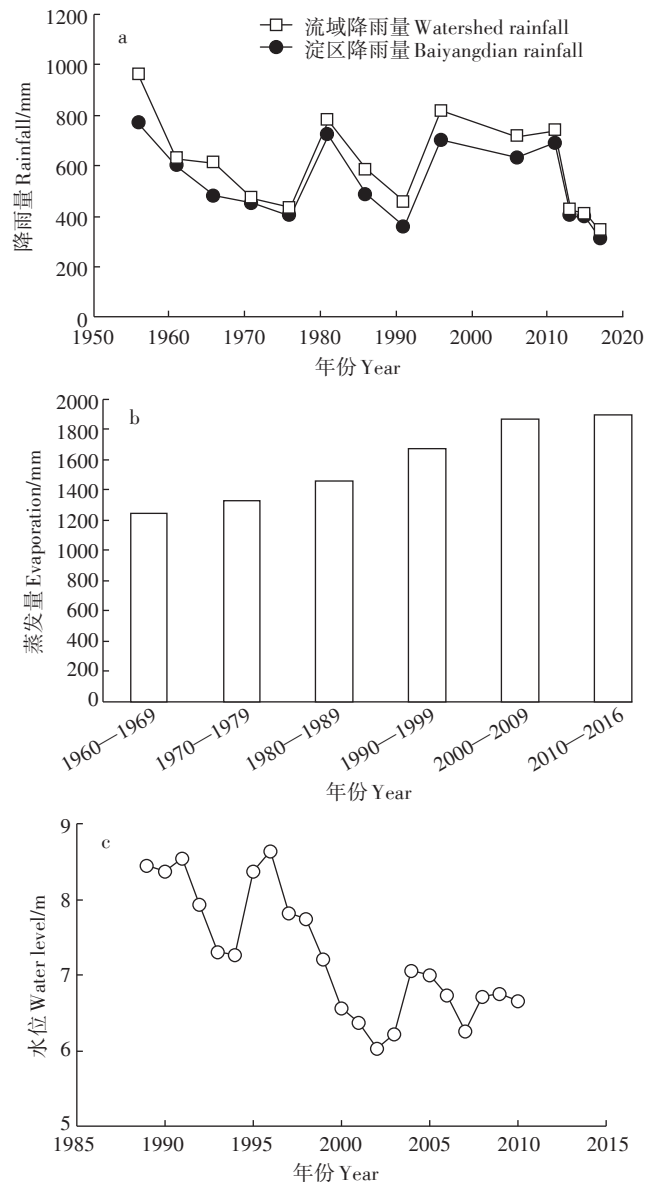


图2 水文要素变化

Figure 2 Variation of hydrological elements

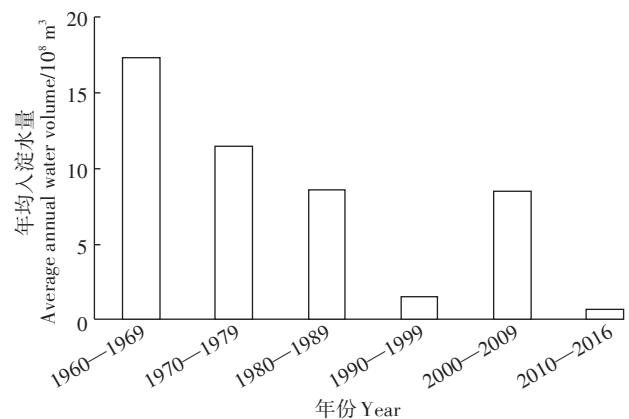


图3 年平均入淀水量变化

Figure 3 Changes in annual average input of water quantity

1.2 亿 m^3 。随着雄安新区的成立,白洋淀的生态补水更为稳定,形成“引黄济淀”“两库连通”“南水北调”等多源补水态势。

2.1.3 水质变化

时间上,20世纪80年代以来,淀区水污染日趋严重,大部分水域呈中度营养化,水质在Ⅲ类到Ⅳ类之间,淀区内采蒲台和端村水质部分年份甚至达到劣Ⅴ类^[29]。其中,1988—2016年各水质指标浓度均呈先上升后下降趋势,整体升高,其中总氮浓度明显高于其他指标(图4)。在年内,总磷和总氮在4月之后升高,在8月达到极值^[30]。空间上,白洋淀的水质状况具有一定分异性,府河入淀口水域污染程度自入淀口向淀区中心呈辐射状降低^[31]。在淀区内,水质状况较差的是端村、圈头和采蒲台附近水域,1988—2016年平均水质在Ⅳ到Ⅴ类之间^[32],这可能是受到孝义河和府河的排水以及居民生活污水排放等因素的影响。

2.1.4 水生生物变化

(1) 浮游动植物变化

1958年浮游植物有129属,1975年有92属,1980年下降到64属,2006年浮游植物平均密度较2005年下降了22%,2009年较2005年上升2.14倍^[33]。在水质较好的净水区,水体中氮磷等营养盐浓度较低,生物需氧量和溶氧量相对较高,水质稳定,浮游植物的多样性指数最高。自然因素叠加人为干扰(村落排污、底泥疏浚等)及浮游动物的下行效应^[34]使浮游动物种类持续降低,数量略有提高,目前浮游动物数量约为20世纪60年代的1.28倍(图5)。

(2) 水生高等植物变化

水生高等植物可分为沉水植物、挺水植物、漂浮植物和浮叶根生植物。与20世纪90年代相比,沉水植物中许多优势群落生物量下降甚至群落消失。目

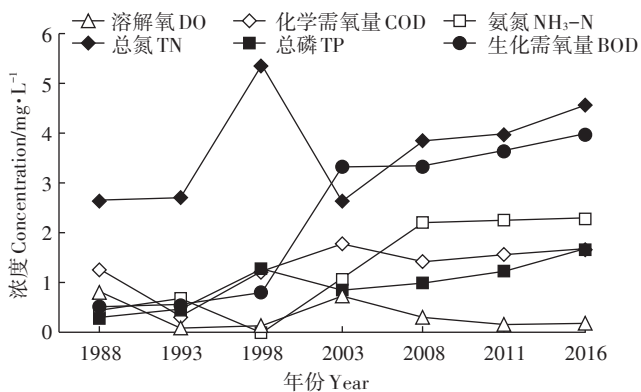


图4 主要水质指标变化

Figure 4 Changes in major water quality indicators

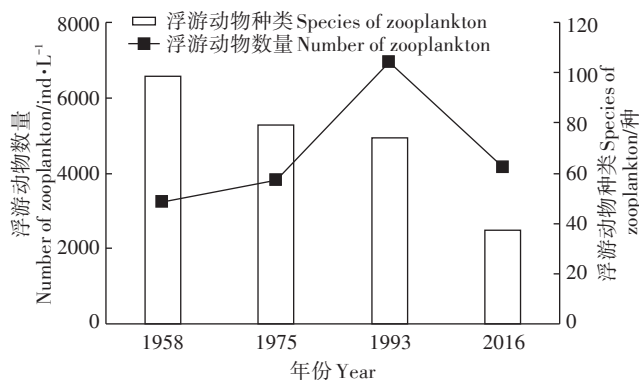


图5 浮游动物种类和数量变化

Figure 5 Changes in zooplankton species and numbers

前,在端村、圈头和采蒲台等水质较差区域,以优势耐污种金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)和轮藻(*Chara braurii* Gmel)为主;在光淀张庄、枣林庄等水质较好区域,以清洁种大茨藻(*Najas marina*)和小茨藻(*Najas Minor*)为主^[35]。芦苇(*Phragmites australis*)是白洋淀最重要的挺水植物,受水位变化影响,1987—2005年芦苇面积变化经历了“落-起-落”的过程,当地表水位低于6.9 m时,苇地面积随水位升高而增加,当水位高于6.9 m时,苇地面积随水位升高而降低^[36]。1953—2003年,白洋淀芦苇年产量在波动中呈上升趋势,主要分布在安新镇、圈头乡、端村镇^[37]。

(3) 鱼类变化

历史上,白洋淀鱼类资源种类多,经济鱼类产量高。1958年鱼类共有17科54种,以鲤、黑鱼、黄颡(甲甲)为主;1980年有14科40种;受1983—1988年连续干淀影响,1989年下降到11科24种。1989—1990年重新蓄水后,由黄河水系向北迁移鱼类及黑龙江水系向南迁移鱼类在此交汇,形成特有的混杂类型。近年仍然维持减少趋势。2001年和2002年调查有21种,隶属于7目9科25属。受到淀区水量、水质及养殖活动的影响,鱼类明显减少,尤其经济鱼类种数下降,自然鱼类的种群呈现低龄、小型化趋势^[38-39]。

2.1.5 景观格局变化

白洋淀的景观类型以芦苇地、耕地和水体为主。1974—2018年,芦苇地面积在波动中减少,水体面积下降,裸地减少(图6a),居民地和耕地面积增加^[40]。其中,1974—1983年,居民地面积增加了3.3 km^2 ^[41]。从整体看,湿地景观向非湿地景观转化的比例加大,湿地退化趋势显著^[19]。

芦苇地、耕地和水域是白洋淀优势斑块类型,总

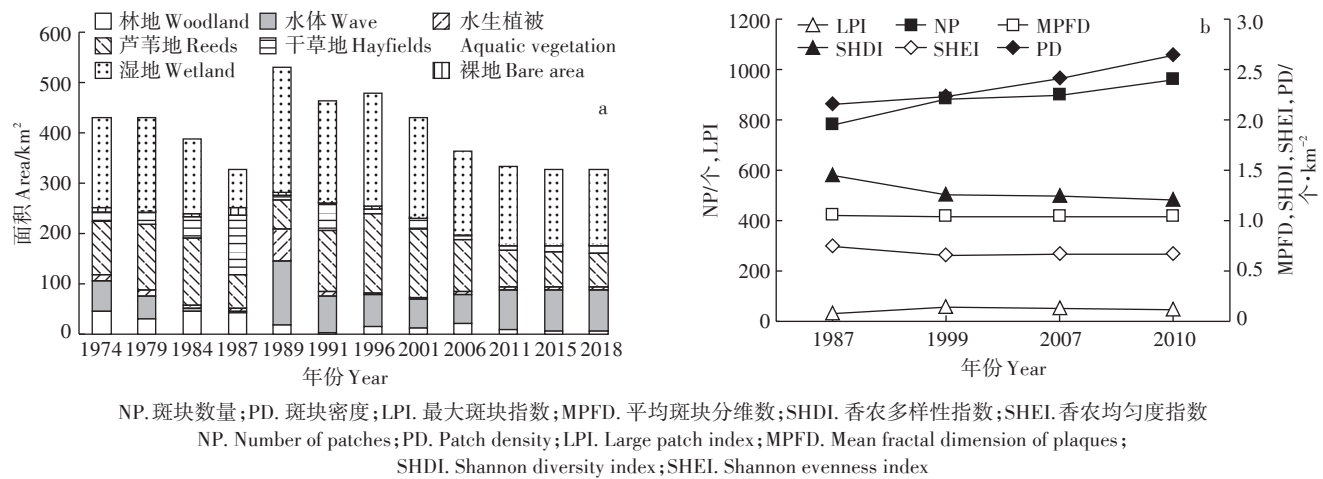


图6 景观类型与景观格局指数变化

Figure 6 Changes of landscape pattern and landscape pattern indexes

占比高达 86.62%~93.06%^[41]。1987—2010 年斑块数由 778 个增加到 957 个,斑块密度由 2.15 个·km⁻²增大到 2.64 个·km⁻²,均增加约 23%,最大斑块指数从 31.53 增加到 42.86,在 1999 年升高到 53.38(图 6b)。总体上看,台地开垦、围淀造田等人为活动使淀区的优势斑块增大,整体景观更加破碎化^[17,41]。

2.2 生态环境变化的影响因素分析

2.2.1 生态环境要素间相关性

选取“水位”“总磷浓度”“浮游动物种类”“芦苇湿地面积”和“耕地面积”指标,分别代表水文、水质、水生生物、景观格局要素,进行了生态环境要素间相关性分析(表 1)。由表可见,水文与水质、水生生物要素密切相关,相关系数分别为-0.865 和 0.800,且影响显著性较大。水质与水生生物存在一定相关性,水质下降时,水生生物种类减少,影响显著性较小。景观

格局要素与水文要素的相关性较强,相关系数为 0.800。

2.2.2 生态环境退化的影响因素

(1)气候条件变化的影响

以“降水量”和“蒸发量”代表气候条件,“总磷浓度”代表水质,“湿地与水面面积”和“浮游动物种类”代表水生态,采用曲线回归分析方法,得到降水量、蒸发量变化与水质、水生态指标的关系(图 7)。由图可见,随着年均降水量的增加,总磷浓度显著下降(图 7a),湿地与水面面积增长(图 7b),浮游动物的种类也会增加(图 7c),表明年均降水量变化对水质和水生态有较为明显的影响。而随着年均蒸发量的增加,湿地和水面面积快速下降(图 7d),但浮游动物种类变化并不明显。庄长伟等^[42]、Gao 等^[23]的研究也表明,由气温升高等导致的降水量下降和蒸发量上升,叠加

表 1 各要素间相关性分析结果

Table 1 Results of the correlation analysis among the ecological environment factors

表征指标 Characteristic index	斯皮尔曼检验 Spearman test for correlation	水位 Water level	总磷浓度 TP concentration	浮游动物种类 Species of zooplankton	湿地面积 Area of wetland	耕地面积 Area under cultivation
水位	相关系数	1.000	—	—	—	—
	Sig 值(双侧)	—	—	—	—	—
总磷浓度	相关系数	-0.865	1.000	—	—	—
	Sig 值(双侧)	0.039	—	—	—	—
浮游动物种类	相关系数	0.800	-0.623	1.000	—	—
	Sig 值(双侧)	0.050	0.049	—	—	—
湿地面积	相关系数	0.800	-0.138	0.000	1.000	—
	Sig 值(双侧)	0.050	0.954	1.000	—	—
耕地面积	相关系数	-0.594	0.052	-0.714	-0.300	1.000
	Sig 值(双侧)	0.046	0.713	0.176	0.624	—

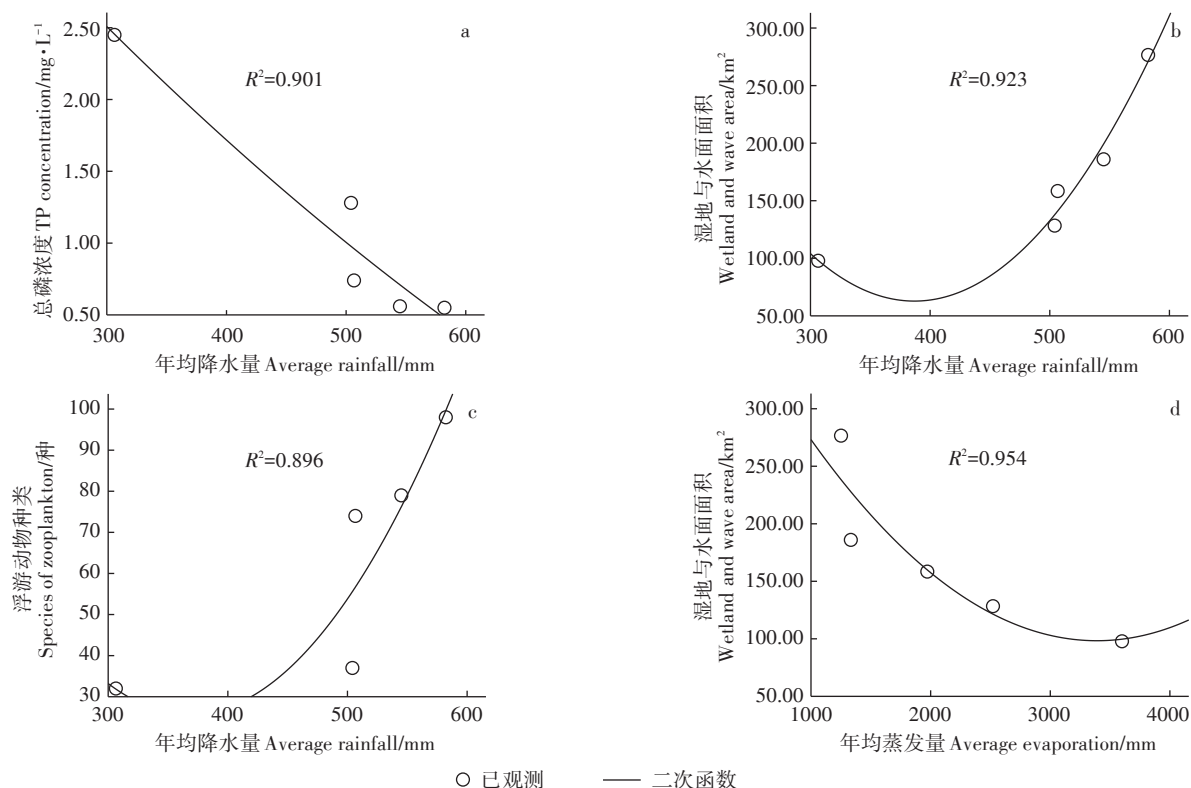


图7 气候条件指标与水质、水生态指标关系

Figure 7 Relationship between climatic conditions and water quality and water ecological indexes

人类活动影响,引起白洋淀水位降低、入淀水量减少、湿地与水面面积下降、水质下降,浮游动物的种类和数量也受到影。刘志伟等^[43]对青藏高原湿地近30年的生态环境变化、董晓玉等^[44]对青海湿地变化和梁益同等^[45]对洪湖湿地变化的研究也得出类似结论。

(2) 入淀水量变化的影响

以“总磷”浓度代表水质要素,“湿地与水面面积”和“浮游动物种类”代表水生态要素,采用曲线回归分析法,得到入淀水量变化与水质、水生态的关系(图

8)。由图可见,随着入淀水量增加,总磷浓度下降(图8a),湿地与水面面积上升(图8b),而浮游动物种类对水量变化的响应并不显著。表明水量仍然是白洋淀湿地变化的重要驱动因子,增加补水量是提升水环境质量的有效方法,但水生态是多种干扰源综合作用的结果,其响应具有滞后性。李涛^[46]对河北省平原湿地和夏热帕提·阿不来提等^[47]对黄河上游河道湿地变化的驱动因子的研究也得到基本一致的结论。

(3) 社会经济和人口数量的影响

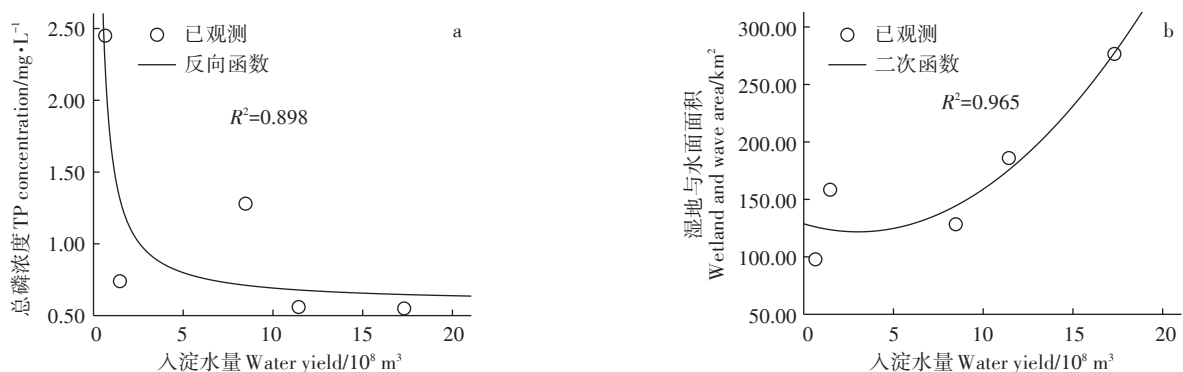


图8 入淀水量与水质、水生态指标关系

Figure 8 Relationship between water quantity and water quality and water ecological indexes

保定市是白洋淀流域的主要城市,总面积占白洋淀上游总面积的78%,是GDP的主要贡献区。以保定市的GDP和人口代表上游的社会经济活动强度,采用曲线回归分析法,得到社会经济和人口变化对白洋淀水质、水生态的关系(图9)。由图可见,随着GDP的增长,浮游动物种类下降(图9a),湿地与水面面积呈减少趋势(图9b),总磷浓度迅速上升(图9c)。随着人口数量的增加,浮游动物种类减少(图9d),湿地与水面面积下降(图9e),总磷浓度上升(图9f)。说明流域社会经济增长与人口增长是水质、水生态变化的重要驱动因子,这缘于社会经济发展与人口增长导致的用水量与废水排放量的增长,以及对湿地人为侵占等活动的增加,魏帆等^[48]在围垦等人类活动对环渤海海湿

地变化的影响研究中,也得到基本一致的结论。

2.3 生态环境保护与修复对策

白洋淀为浅湖型湿地,蒸发渗漏量大而蓄水量有限,受流域与淀区人为活动与自然的双重影响,呈现出多要素协同退化的趋势,对未来雄安新区的“水城共融”的生态城市建设施加了巨大的压力。结合生态环境变化影响因素的研究结果,水位是白洋淀变化与退化的主要驱动因子,未来应首先建立稳定的生态补水配置与运行机制,依靠“南水北调”“引黄济淀”“两库连通”等跨流域调水工程,实施多源生态补水,并尽快落实流域地下水超采综合治理措施,有效控制流域及淀区地下水位下降,减少淀区对地下水的回补,共同支撑提升淀区生态水位。同时,流域与淀区人类活

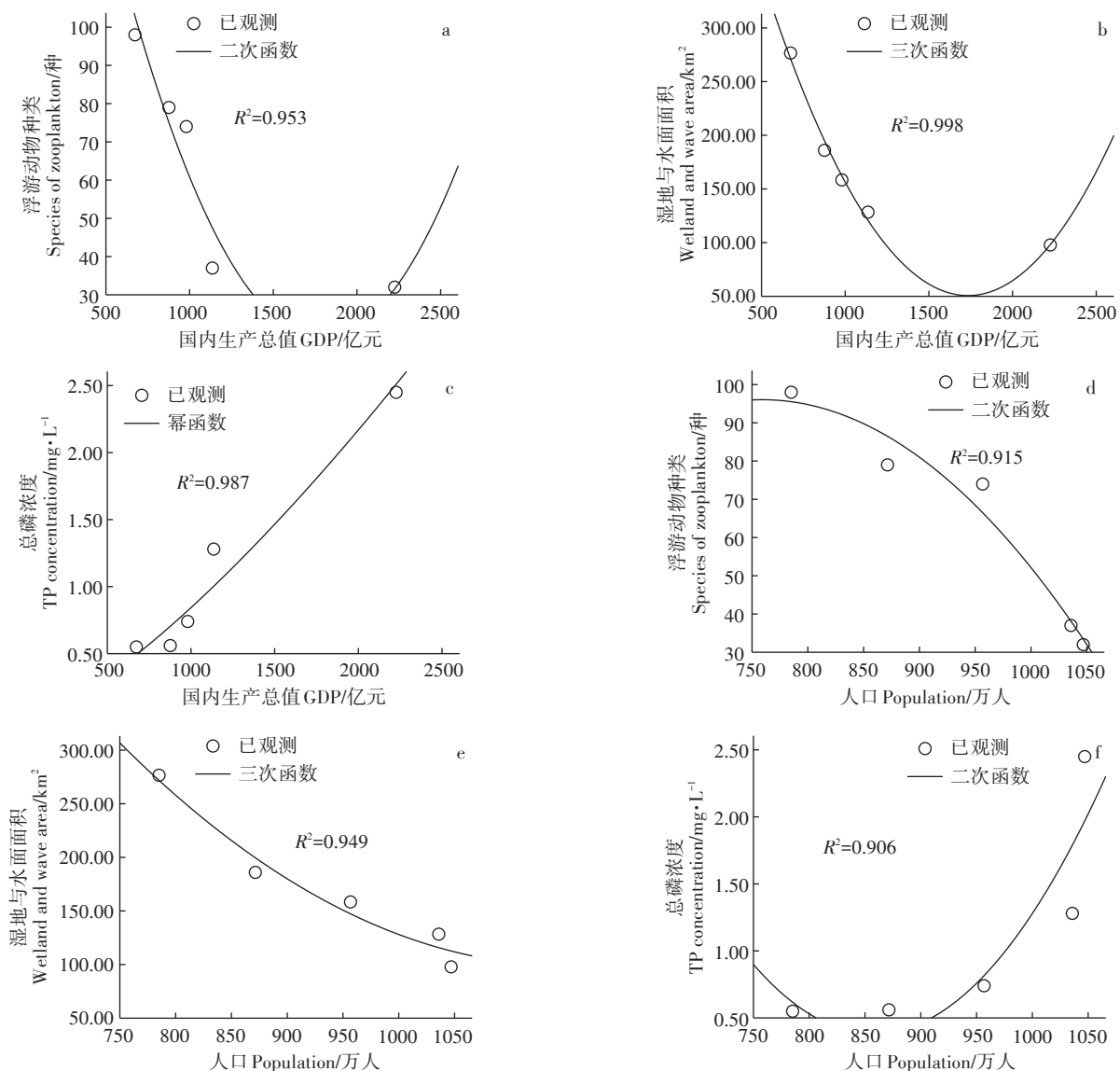


图9 社会经济和人口与水质、水生态的关系

Figure 9 Relationship between social economy and population and water quality and water ecological indexes

动是其退化的另一个驱动力,应结合大清河流域综合整治与雄安新区建设,升级流域社会经济发展模式,加强产业升级改造,逐步实施淀区淀中村生态移民工程,控制唐河污水库对下游及周边地下水的污染,实施流域水污染深度治理;由各生态环境要素的相关性分析可见,水文、水质与水生态要素密切相关,湿地水生态系统的修复也有利于水源涵养与水质净化等水文水质指标改善,应逐步实施退耕还湿,加强湿地生态修复与湿地沟渠连通性建设,逐步恢复生态功能,树立雄安新区生态环境标杆。

3 结论

(1)白洋淀生态环境变化主要体现在降水量下降,蒸发量增加,天然入淀水量减少,人工补水量增加,水位下降,水环境质量下降;同时,浮游动植物种类下降,数量增多;部分沉水植物优势群落减少甚至消失;鱼类种类呈下降趋势;湿地和水面面积景观减少,居民地和耕地景观增加,湿地景观向非湿地景观转化比例加大,景观破碎化增加。

(2)生态环境各要素间存在一定相关性,水质与水生生物存在一定相关性,景观格局与水文要素相关性较强,和其他要素相关性较弱。

(3)降水量减少和蒸发量增加是水质与生态环境退化的驱动因子;入淀水量减少使总磷浓度升高,水质下降,湿地与水面面积减少;经济发展与人口增长是水质、水生态退化的重要驱动力。自然条件与流域人类活动共同驱动白洋淀湿地生态环境变化。

(4)未来应建立稳定的生态补水与运行机制,优化流域社会经济发展模式,强化流域水污染治理,逐步退耕还淀,加强湿地生态修复,提升湿地沟渠连通性,改善白洋淀生态环境状况。

参考文献:

- [1] 崔保山, 杨志峰. 湿地学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 4-5.
CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. Wetland science[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006: 4-5.
- [2] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 10-11.
WU Jian-guo. Landscape ecology pattern, process, scale and hierarchy [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 10-11.
- [3] 刘春兰, 谢高地, 肖玉. 气候变化对白洋淀湿地的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 162(2): 245-250.
LIU Chun-lan, XIE Gao-di, XIAO Yu. Impact of climatic change on Baiyangdian Wetland[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 162(2): 245-250.
- [4] 李晓春, 崔惠敏. 白洋淀湿地生态现状评价及保护对策[J]. 河北农业大学学报(农林教育版), 2013, 15(5): 101-104, 108.
LI Xiao-chun, CUI Hui-min. Evaluation of ecological status and protection countermeasures of Baiyangdian Wetland[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei(Agriculture and Forestry Education)*, 2013, 15(5): 101-104, 108.
- [5] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报, 2005, 12(5): 1033-1040.
ZHAO Xiang, CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 12(5): 1033-1040.
- [6] 刘曼晴, 胡德勇, 于琛, 等. 辽河三角洲湿地生长季蒸散量时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 701-710.
LIU Man-qing, HU De-yong, YU Chen, et al. Temporal and spatial change characteristics of growing season evapotranspiration and its cause analysis in Liaohe River delta wetland, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 701-710.
- [7] 谢冬明, 陈亚云, 田磊, 等. 鄱阳湖湿地 1954—2016 年水位变化分析[J]. 江西水利科技, 2018, 44(3): 157-159.
XIE Dong-ming, CHEN Ya-yun, TIAN Lei, et al. Water level change in Poyang Lake wetlands from 1954 to 2016[J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2018, 44(3): 157-159.
- [8] Shsaheed A S. Remote sensing and GIS application in wetland change analysis: Case study of Kallar Kahar[J]. *Tech and Dev*, 2012, 31(3): 251-259.
- [9] Gong Z N, Li H, Zhao W J, et al. Driving forces analysis of reservoir wetland evolution in Beijing during 1984—2010[J]. *Journal of Geographical Science*, 2013, 23(3): 753-768.
- [10] Mallik S M, Arif M, Asif I, et al. Remote sensing & GIS based spatio-temporal change analysis of wetland in Dhaka City, Bangladesh[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2011, 34(3): 781-787.
- [11] James N B, Sendra J B, Delgado M G, et al. Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico using geographically weighted regression[J]. *Applied Geography*, 2010, 30(2): 576-591.
- [12] 贾秋兰, 赵玉兵, 王小娟, 等. 1972—2012 年白洋淀湿地潜在蒸散量变化分析[J]. 农学报, 2018, 8(5): 10-14.
JIA Qiu-lan, ZHAO Yu-bing, WANG Xiao-juan, et al. The change of potential evapotranspiration of Baiyangdian Marsh from 1972 to 2012[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(5): 10-14.
- [13] 尹健梅, 程伍群, 严磊, 等. 白洋淀湿地水文水资源变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 52-54, 58.
YIN Jian-mei, CHENG Wu-qun, YAN Lei, et al. Change of water resources in the Baiyangdian Wetland[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(1): 52-54, 58.
- [14] 张婷, 刘静玲, 王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 261-267.
ZHANG Ting, LIU Jing-ling, WANG Xue-mei. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 261-267.
- [15] 袁勇, 严登华, 王浩, 等. 白洋淀湿地入淀水量演变归因分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 1-4, 23.

- YUAN Yong, YAN Deng-hua, WANG Hao, et al. Attributive analysis on evolution of inflow to Baiyangdian Wetland[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(12):1-4, 23.
- [16] 刘 丰, 刘静玲, 张 婷, 等. 白洋淀近20年土地利用变化及其对水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10):1868-1875.
- LIU Feng, LIU Jing-ling, ZHANG Ting, et al. Land use change and its effects on water quality in Baiyangdian Lake of north China during last 20 years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1868-1875.
- [17] 方宏阳, 栾清华, 赵志轩, 等. 变化环境下白洋淀湿地演变驱动机制分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8):107-111.
- FANG Hong-yang, LUAN Qing-hua, ZHAO Zhi-xuan, et al. Analysis of driving mechanism of Baiyangdian Wetland evolution under changing environment[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2012, 30(8):107-111.
- [18] 朱金峰, 周 艺, 王世新, 等. 1975—2018年白洋淀湿地变化分析[J]. 遥感学报, 2019, 23(5):971-986.
- ZHU Jin-feng, ZHOU Yi, WANG Shi-xin, et al. Analysis of changes of Baiyangdian Wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(5):971-986.
- [19] 张 敏, 宫兆宁, 赵文吉. 近30年来白洋淀湿地演变驱动因子分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2):499-507.
- ZHANG Min, GONG Zhao-ning, ZHAO Wen-ji. Analysis of driving forces of Baiyangdian Wetland evolution during 1984—2013[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(2):499-507.
- [20] 彭漪涟. 逻辑学基础教程[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2009: 23-24.
- PENG Yi-lian. Basic course in logic[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2009:23-24.
- [21] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009:45-47.
- CHEN Xi-ru. Probability theory and mathematical statistics[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2009:45-47.
- [22] 向书坚, 张学毅. 统计学[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016:67-68.
- XIANG Shu-jian, ZHANG Xue-yi. Statistics[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016:67-68.
- [23] Gao Y C, Liu M F, Gan G J. Analysis of annual runoff trend and meteorological impact factors in Baiyangdian Basin[J]. *Resources Science*, 2011, 33(8):1438-1445.
- [24] 刘丹丹, 吴现兵, 程伍群, 等. 白洋淀流域降水特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5):113-117.
- LIU Dan-dan, WU Xian-bing, CHENG Wu-qun, et al. Analysis of characteristics of precipitation in Baiyangdian Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(5):113-117.
- [25] 王学东, 田美影, 马雪姣, 等. 白洋淀气候变化及对生态系统的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2):76-80.
- WANG Xue-dong, TIAN Mei-ying, MA Xue-jiao, et al. Climate change in the Baiyang Lake and its impact on ecological system[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(2):76-80.
- [26] 任国玉, 郭 军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 12(6):942-956.
- REN Guo-yu, GUO Jun, XU Ming-zhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 12(6):942-956.
- [27] 李英华, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 2004, 14(1):62-68.
- LI Ying-hua, CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. Impact of changes in hydrological characteristics of Baiyangdian Lake on wetland ecological environment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 14(1):62-68.
- [28] 任 旺, 徐国宾. 基于GA-灰色波形预测模型的白洋淀天然入淀水量[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5):9-14, 49.
- REN Wang, XU Guo-bin. Analysis on the natural flow into Baiyangdian Lake based on the GA-grey wave forecasting model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(5):9-14, 49.
- [29] 曹建智, 张 健. 人工神经网络在白洋淀水质评价中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2016, 10(8):261-262.
- CAO Jian-zhi, ZHANG Jian. Application of artificial neural network in Baiyangdian water quality evaluation[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2016, 10(8):261-262.
- [30] 陈 芳. 白洋淀水质时空变化分析及应对措施[J]. 河北水利, 2011, 19(2):24, 43.
- CHEN Fang. Analysis of spatial and temporal variation of Baiyangdian water quality and countermeasures[J]. *Hebei Water Resources*, 2011, 19(2):24, 43.
- [31] 龙幸幸, 杨路华, 夏 辉, 等. 白洋淀府河入淀口周边水质空间变异特征分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9):35-38.
- LONG Xing-xing, YANG Lu-hua, XIA Hui, et al. Spatial variability characteristics analysis of water quality surrounding Fuhe River entrance in Baiyangdian Lake[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2016, 34(9):35-38.
- [32] 刘 鑫, 史 斌, 孟 晶, 等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征[J]. 环境科学, 2020, 3(9):1-14.
- LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, et al. Spatio-temporal variation characteristics of water eutrophication and sediment pollution in Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 2020, 3(9):1-14.
- [33] 李 峰, 谢永宏, 杨 刚, 等. 白洋淀水生植被初步调查[J]. 应用生态学报, 2008, 14(7):1597-1603.
- LI Feng, XIE Yong-hong, YANG Gang, et al. Preliminary survey on aquatic vegetations in Baiyangdian Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 14(7):1597-1603.
- [34] 金 磊, 李林钰, 周 杨, 等. 白洋淀三大典型水域浮游植物群落及水质评价[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2017, 37(3):329-336.
- JIN Lei, LI Lin-yu, ZHOU Yang, et al. Phytoplankton community and water quality analysis of three typical waters in Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(3):329-336.
- [35] 徐 杰, 何 萍, 王 钦, 等. 夏季白洋淀沉水植物分布与水环境

- 因子的关系[J]. 湿地科学, 2013, 11(4):488-494.
- XU Jie, HE Ping, WANG Qin, et al. Relationship between distribution of submerged macrophyte and water environment factors in Baiyangdian Lake in summer[J]. *Wetland Science*, 2013, 11(4):488-494.
- [36] 徐卫华, 欧阳志云, Irisvan D, 等. 白洋淀地区近16年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J]. 水土保持学报, 2005, 17(4):181-184, 189.
- XU Wei-hua, OUYANG Zhi-yun, Irisvan D, et al. Reed land change and its relationship to water level in Baiyang Lake since 1987[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 17(4):181-184, 189.
- [37] 李建国, 李贵宝, 刘芳, 等. 白洋淀芦苇资源及其生态功能与利用[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 20(5):37-40.
- LI Jian-guo, LI Gui-bao, LIU Fang, et al. Reed resource and its ecological function & utilization in Baiyangdian Lake[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2004, 20(5):37-40.
- [38] 韩希福, 王所安, 曹玉萍, 等. 白洋淀重新蓄水后鱼类组成的生态学分析[J]. 河北渔业, 1991, 12(6):8-11.
- HAN Xi-fu, WANG Suo-an, CAO Yu-ping, et al. Ecological analysis of fish composition in Baiyangdian Lake after recharge[J]. *Fisheries in Hebei*, 1991, 12(6):8-11.
- [39] 曹玉萍, 王伟, 张永兵. 白洋淀鱼类组成现状[J]. 动物学杂志, 2003, 15(3):65-69.
- CAO Yu-ping, WANG Wei, ZHANG Yong-bing. Present situation of fish stocks in Baiyangdian Lake[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2003, 15(3):65-69.
- [40] 王京, 卢善龙, 吴炳方, 等. 近40年来白洋淀湿地土地覆被变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(2):2292-2300.
- WANG Jing, LU Shan-long, WU Bing-fang, et al. Land cover change in Baiyangdian Wetland[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010, 12(2):2292-2300.
- [41] 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.
- BAI Jun-hong, FANG Jing-si, HUANG Lai-bin, et al. Landscape Pattern evolution and driving forces of Baiyangdian Lake marsh wetland system[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(9):1634-1644.
- [42] 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.
- ZHUANG Chang-wei, OUYANG Zhi-yun, XU Wei-hua, et al. Landscape dynamics of Baiyangdian Lake from 1974 to 2007[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3):839-848.
- [43] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 等. 近30年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3):856-862.
- LIU Zhi-wei, LI Sheng-nan, WEI Wei, et al. Research progress on alpine wetland changes and driving forces in Qinghai-Tibet Plateau during the last three decades[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3):856-862.
- [44] 董晓玉, 李长慧, 杨多林, 等. 气候变化对湿地影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(23):7-10.
- DONG Xiao-yu, LI Chang-hui, YANG Duo-lin, et al. Study on the impacts of climate change on wetlands[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(23):7-10.
- [45] 梁益同, 蔡晓斌, 陈伟亮. 气候变化对洪湖湿地的影响研究[J]. 气象科技进展, 2018, 8(5):34-35.
- LIANG Yi-tong, CAI Xiao-bin, CHEN Wei-liang. Impact of climate change on Honghu Wetland[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(5):34-35.
- [46] 李涛. 河北省重要自然湿地退化与关联因子研究[D]. 河北: 河北师范大学, 2013.
- LI Tao. Study on degradation and correlation factors of important natural wetlands in Hebei Province[D]. Hebei: Hebei Normal University, 2013.
- [47] 夏热帕提·阿不来提, 刘高焕, 刘庆生, 等. 近30年刘家峡以下黄河上游河道湿地演变规律与驱动力分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(8):1116-1131.
- Xarapat·Ablat, LIU Gao-huan, LIU Qing-sheng, et al. Channel wetland evolution analysis from Liujiaxia to Togtoh County of Inner Mongolia in the last three decades[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(8):1116-1131.
- [48] 魏帆, 韩广轩, 张金萍, 等. 1985—2015年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5):1527-1537.
- WEI Fan, HAN Guang-xuan, ZHANG Jin-ping, et al. Evolution of coastal wetland under the influence of sea reclamation in Bohai Rim during 1985—2015[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5):1527-1537.