

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

引用本文:

王欢欢, 白洁, 刘世存, 等. 白洋淀近30年水质时空变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1051–1059.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0196>

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>

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

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1060–1069 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0198>

丹江口水库水质评价及水污染特征

朱媛媛, 田进军, 李红亮, 江秋枫, 刘琰

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 139–147 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.019>

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>

基于多元统计分析方法的西苕溪流域水质时空变化研究

王刚, 李兆富, 万荣荣, 李恒鹏

农业环境科学学报. 2015(9): 1797–1803 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.024>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王欢欢, 白洁, 刘世存, 等. 白洋淀近30年水质时空变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1051–1059.

WANG Huan-huan, BAI Jie, LIU Shi-cun, et al. Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1051–1059.



开放科学 OSID

白洋淀近30年水质时空变化特征

王欢欢¹, 白洁¹, 刘世存¹, 田凯¹, 赵彦伟^{1*}, 李春晖²

(1. 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; 2. 水沙科学教育部重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 运用综合污染指数法、累积距平法、Mann-Kendall 检验法、分层聚类法, 研究了白洋淀水质时空变化特征。结果表明: 白洋淀近30年(1988—2016年)综合污染指数呈现波动变化, 2015年水质最差, 水质平均污染指数(WQI)达2.229; 在年内变化上, 综合污染指数7月最高, 2月最低, 夏季>秋季>春季>冬季, 且TN污染指数最高; 在空间分布上, 南刘庄所在的西北部淀区水质最差, 其次是东部和南部的光淀张庄、枣林庄、圈头、端村、采蒲台, 北部的王家寨、烧车淀水质较好。

关键词: 白洋淀; 水质; 时空变化; 综合污染指数法; 时间序列分析; 分层聚类

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)05-1051-09 doi:10.11654/jaes.2020-0196

Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years

WANG Huan-huan¹, BAI Jie¹, LIU Shi-cun¹, TIAN Kai¹, ZHAO Yan-wei^{1*}, LI Chun-hui²

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Baiyangdian Lake is known as north China's kidney. Therefore, its spatial and temporal variations in water quality are of great significance for ensuring local ecological restoration. In this study, a comprehensive pollution index, cumulative anomaly method, Mann-Kendall test, and hierarchical cluster analysis were used to investigate the spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake. The results showed that the comprehensive pollution index fluctuated in recent years (1988—2016). In 2015, the water quality was the worst with a water quality index value of up to 2.229. In terms of its temporal variation trends within each year, the highest comprehensive pollution index value was found in July, while the lowest was found in February. Seasonally, summer was the worst pollution duration, followed by autumn, spring, and winter. Furthermore, the TN concentration was the highest among all the monitoring indicators. With respect to the spatial distribution, the water quality of Nanliuzhuang (northwest region) was the worst, followed by that of Zhangzhuangzi, Zaolinzhuang, Quantou, Duancun, and Caiputai (east and south regions). In contrast, the water quality of Wangjiazhai and Shaochedian (north region) was better.

Keywords: Baiyangdian Lake; water quality; spatial and temporal variation; comprehensive pollution index; time series analysis; hierarchical cluster analysis

收稿日期: 2020-02-25 录用日期: 2020-03-26

作者简介: 王欢欢(1996—), 女, 浙江杭州人, 硕士研究生, 从事环境评价、规划与管理研究。E-mail: 13868112371@163.com

*通信作者: 赵彦伟 E-mail: aweil974@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)

湖泊是一种重要自然资源,具有重要生态服务功能^[1],其水质影响着周边生产生活和区域经济发展^[2]。近年来,我国湖泊水污染问题突出,对社会经济发展造成不利影响^[3],因此亟需进行湖泊综合治理。水质综合评价是湖泊水环境治理的必要基础工作,对水质时空变化进行客观全面的分析,有助于更为准确地界定水质特征,为湖泊水质改善与生态修复提供依据。

白洋淀是海河平原上最大的浅水湖泊,被誉为“华北明珠”,也是雄安新区生态安全的重要依托。近几十年来,白洋淀入淀水量逐年减少^[4],流域工农业、旅游业与养殖业快速发展,但大量处理或未经处理的城市污水通过孝义河、府河进入淀区^[5],淀区水环境污染形势严峻,成为制约雄安新区建设发展的主要瓶颈。目前,白洋淀水质研究多集中在水质评价、水质对水生生物的响应等方面。部分学者采用集对分析法^[6]、主成分分析法^[7]、原生动物群落评价法^[8]等方法评价了白洋淀水质状况,也有学者研究了水生生物与水质的关系^[9-11],而关于水质时空变化研究尚缺乏。张婷等^[12]、龙幸幸等^[13]做了相关研究,但研究中选取指标较少,不足以全面表征水质,且仅研究1~2年府河入淀口水质空间变化,时间序列短。针对长时间序列,考虑多项指标的淀区水质时空变化研究相对较少,这就难以阐明白洋淀水质全面、动态的变化信息,无法对白洋淀水质改善与综合治理提供充分支持。

本文采用多元统计分析方法,针对近30年白洋淀水环境问题,采用综合污染指数法、累积距平法、Mann-Kendall 检验法等多种方法,分析水质单因子指数与综合指数的年际、年内变化特征,运用分层聚类法揭示了水质空间分布特征,为白洋淀水环境改善决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀(115°38′~116°07′E,38°43′~39°02′N)是华北平原唯一的天然湖泊,主要位于河北省保定市安新县内(图1)。淀区主要由143个淀泊和3700多条沟壕组成,总面积366 km²,水面面积150 km²,平均水位7.5 m,平均水深2.3 m。白洋淀原有9条入淀河流,现除府河、孝义河常年有水外,其余河流基本断流或季节性断流,入淀水量逐年减少。自20世纪80年代以来,干淀现象多次出现,水资源短缺严重,承载污染负荷大,水质状况不容乐观。

1.2 数据来源

本文主要采用1988—2016年水质监测数据。1988—2009年水质数据为逐月监测数据,来源于环境质量公报及相关监测资料,由于受部分时段干淀等的影响,缺少1990、1993、1994、1995年水质监测数据,2010—2015年水质数据为逐年数据,来源于相关文献^[5,9-10,14],2016年水质数据为逐月监测数据,通过实地监测获得。

1.3 研究方法

1.3.1 污染指数计算

污染指数包括单因子污染指数、综合污染指数与年内水质指数。

单因子污染指数是一种常用的水质评价方法,是利用实测数据和标准对比分类评价水质,评价标准采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准,计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{C_{si}} \quad (1)$$

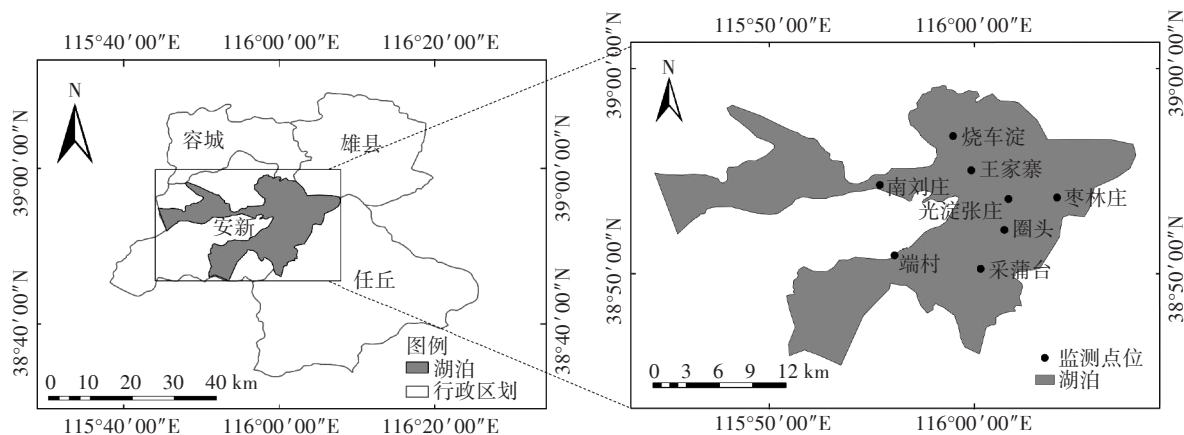


图1 白洋淀地理位置及监测点位分布图

Figure 1 Location of Baiyangdian and distribution of monitoring points

式中: C_i 为第 i 个水质因子的监测浓度值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_{si} 为第 i 个水质因子的标准浓度值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

综合污染指数法是评价水质的一种重要方法,可更全面、综合评价水质污染状况。本文采用水质平均污染指数(WQI)进行水质综合评价,计算公式^[15]为:

$$WQI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中: n 为污染物个数; P_i 为第 i 个水质因子的平均污染指数。

年内水质变化采用综合污染指数法中的代数叠加法^[16],计算公式为:

$$P = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (3)$$

式中: P 为综合污染指数; m 为月份数或季数; n 为水质指标个数; $\sum P_i$ 为综合污染指数; $\sum P_{ij}$ 为某类污染物分指数; P_{ij} 为多年月均值或多年季节均值。

1.3.2 时间序列分析方法

时间序列分析包括趋势、季节、循环、不规则变化分析,广泛应用于水文、气象、地质、经济、环境等领域,常用方法包括累积距平法和 Mann-Kendall 检验法等。累积距平法是一种由曲线判断变化趋势的分析方法^[17],能直观准确地描述水质年际变化阶段性特征。Mann-Kendall 检验法是一种非参数秩次检验,不需要样本保持一定分布,不受少量异常值影响,适用于顺序变量,在揭示趋势变化及突变特征中极为有用^[18-19]。本文采用累积距平法分析白洋淀水质变化趋势,采用 Mann-Kendall 检验法分析水质突变特征。

1.3.3 空间分析方法

聚类分析是一种模式识别技术,其中层次聚类分析(HCA)应用最为广泛^[20-21],该方法通过变量之间相

似程度,将相似程度大的优先聚合到一起,再逐步聚合,达到聚类目的^[22]。本文基于 SPSS 软件,采用 HCA 作为空间分析方法,利用平方欧氏距离法(Squared Euclidean distance)分析各监测点位水质特征的空间相似性和差异性。

2 结果与分析

2.1 时间变化

2.1.1 年际变化

(1) 污染指数变化

对 8 个监测点位的年均值求平均值后得到白洋淀年均值,根据式(1)计算白洋淀 1988—2016 年 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、TP、 BOD_5 、DO、pH 7 项水质指标的污染指数,白洋淀主要超标污染物为 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、TP、 BOD_5 ,对这 5 项指标进行分析的结果见图 2。由图可见, COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、TP、 BOD_5 的平均污染指数范围分别为 0.963~2.260、0.003~5.227、1.006~6.607、0.145~2.600、0.535~3.331,变异系数分别为 0.220、0.859、0.341、0.793、0.607。总体来看, $\text{NH}_4\text{-N}$ 年际变化最大, COD_{Mn} 年际变化最小,TN 污染情况最严重, BOD_5 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 污染情况较轻。

根据式(2)计算出白洋淀综合污染指数为 0.832~2.229(图 2),总体呈上升趋势,近两年略有下降,变异系数为 0.257。1988—1997 年水质相对较好,其中,1992 年 WQI 达到最小值 0.833,水质最好。21 世纪以来,除 2010 年 WQI 为 0.850 外,其余年份 WQI 均大于 1,污染严重。近 30 年来,2015 年白洋淀水质最差,WQI 达到最大值 2.229。

(2) 趋势分析

1988—1996 年间监测时间序列不连续,无法进行趋势分析,故采用累积距平法绘制 1996—2016 年

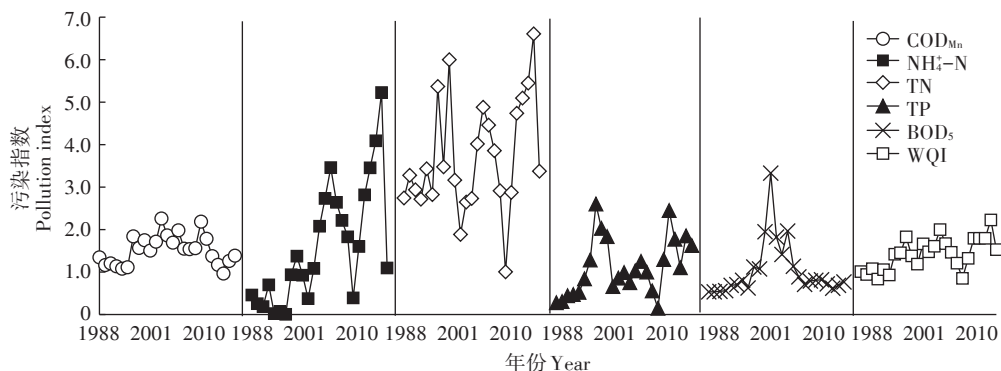


图2 白洋淀污染指数年际变化

Figure 2 Interannual variation of water pollution index in Baiyangdian

各水质指标和综合污染指数累积距平曲线(图3),分析水质变化趋势。由图3(a)~图3(e)可见,COD_{Mn}总体呈先上升后下降趋势,自2012年起,COD_{Mn}污染指数逐渐降低,污染负荷减小;NH₄⁺-N总体呈现先下降后波动上升趋势,NH₄⁺-N由污染相对较低状态上升至较严重状态,近期略有下降;TN、TP波动大,总体呈现先波动下降后上升趋势;BOD₅呈波动上升后下降趋势,近几年平均污染指数相对较低。

由图3(f)可见,WQI总体表现为波动。1996—2001年,综合污染指数累积距平曲线呈现波动下降趋势,表明此阶段白洋淀水质相对较好;2002—2016年,综合污染指数总体呈上升趋势,可能是生产生活污染排放增加^[23]与入淀水量减少^[24]所致。

(3)突变检验分析

1988—1996年间监测时间序列不连续,无法进行突变分析,故从1996年开始分析。对白洋淀1996—2016年各项指数进行Mann-Kendall突变检验分析,得到突变诊断曲线图(图4)。图中,UF为Mann-Kendall统计值正向序列,UB为逆向序列,(-1.96, 1.96)为95%显著水平置信区间。由图可见,COD_{Mn}污染指数在1996—2013年增加,2014—2016年有所减少;两条统计曲线在位于置信区间内有唯一交点,说明COD_{Mn}污染指数在2012年开始发生突变。NH₄⁺-N污染指数总体呈增加趋势,2004年以后显著增加,2000年NH₄⁺-N污染指数突变开始,突变显著。TN污染指数呈现波动变化,突变不显著。TP污染指数总体呈

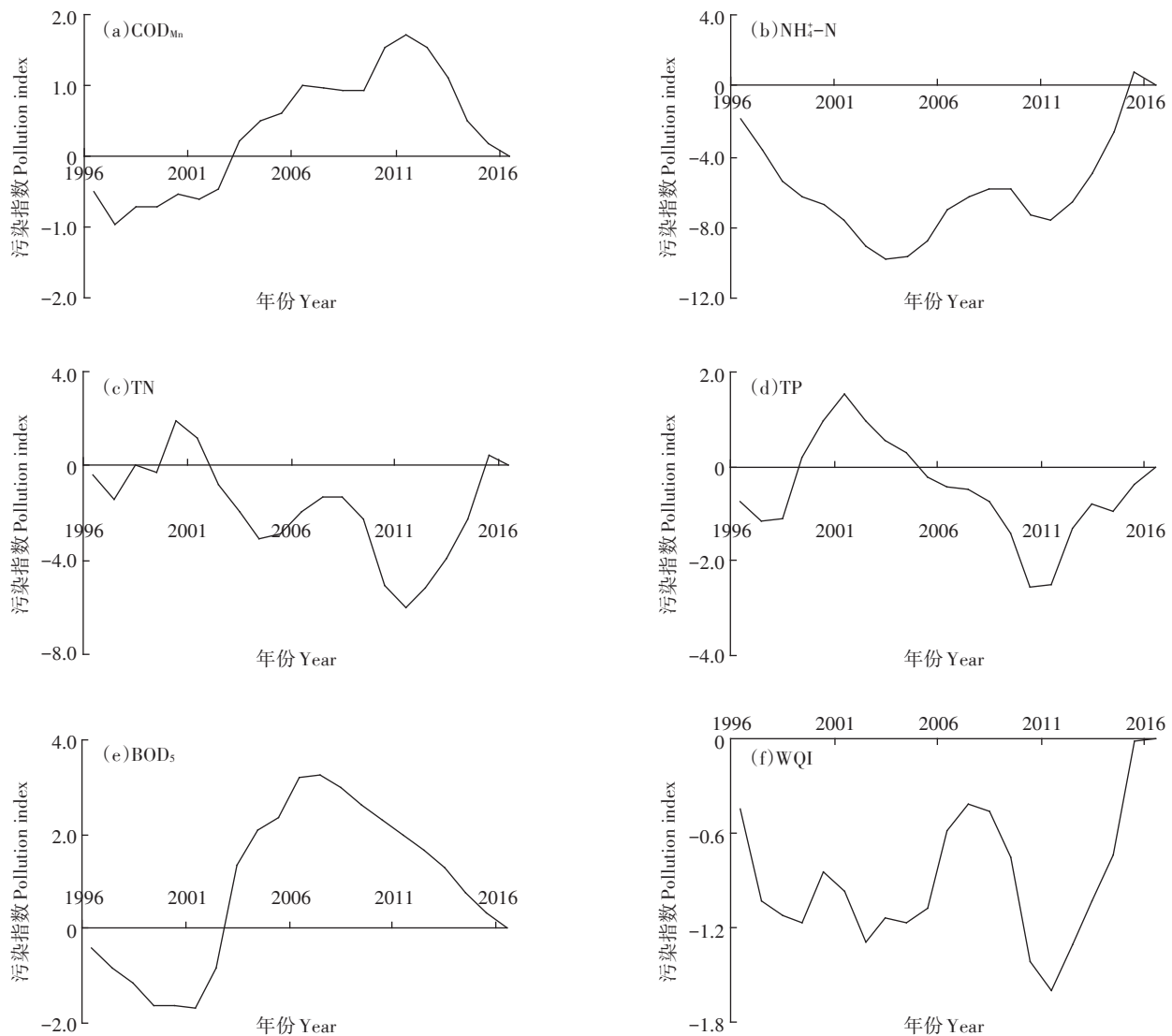


图3 污染指数累积距平曲线

Figure 3 Cumulative anomaly curve of water pollution index

现增加趋势,突变不显著。 BOD_5 污染指数在1996—2013年增加,2002—2008年增加趋势显著,2012年产生突变。综合污染指数大体呈现增加趋势,2005—2008年增加趋势显著;两条统计曲线有多个交点,且都位于置信水平线内,突变不显著。突变检验分析与趋势分析结果一致。

2.1.2 年内变化

利用1988—2016年水质监测数据的多年月均值和季节均值,根据式(3)计算白洋淀各水质指标和综合污染指数年内水质变化,结果如图5和表1所示。从图5可以看出, COD_{Mn} 、 BOD_5 水质指标月变

化不大;4、9、11、12月 $\text{NH}_4\text{-N}$ 污染指数较大,1月污染指数最小;TN年内变化较大,3、4、9—12月污染指数较大,其余月份污染指数较小;TP最大污染指数出现在7月。总体而言,7月水质最差,2月水质最好,污染指数从低到高为 BOD_5 、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、TN。

从表1可以看出,夏季污染最严重,综合污染指数最高为13.75,冬季综合污染指数最低为11.35,综合污染指数从高到低为夏、秋、春、冬。TN污染指数最高, BOD_5 污染指数最低,污染指数从低到高分别是 BOD_5 、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、TN。

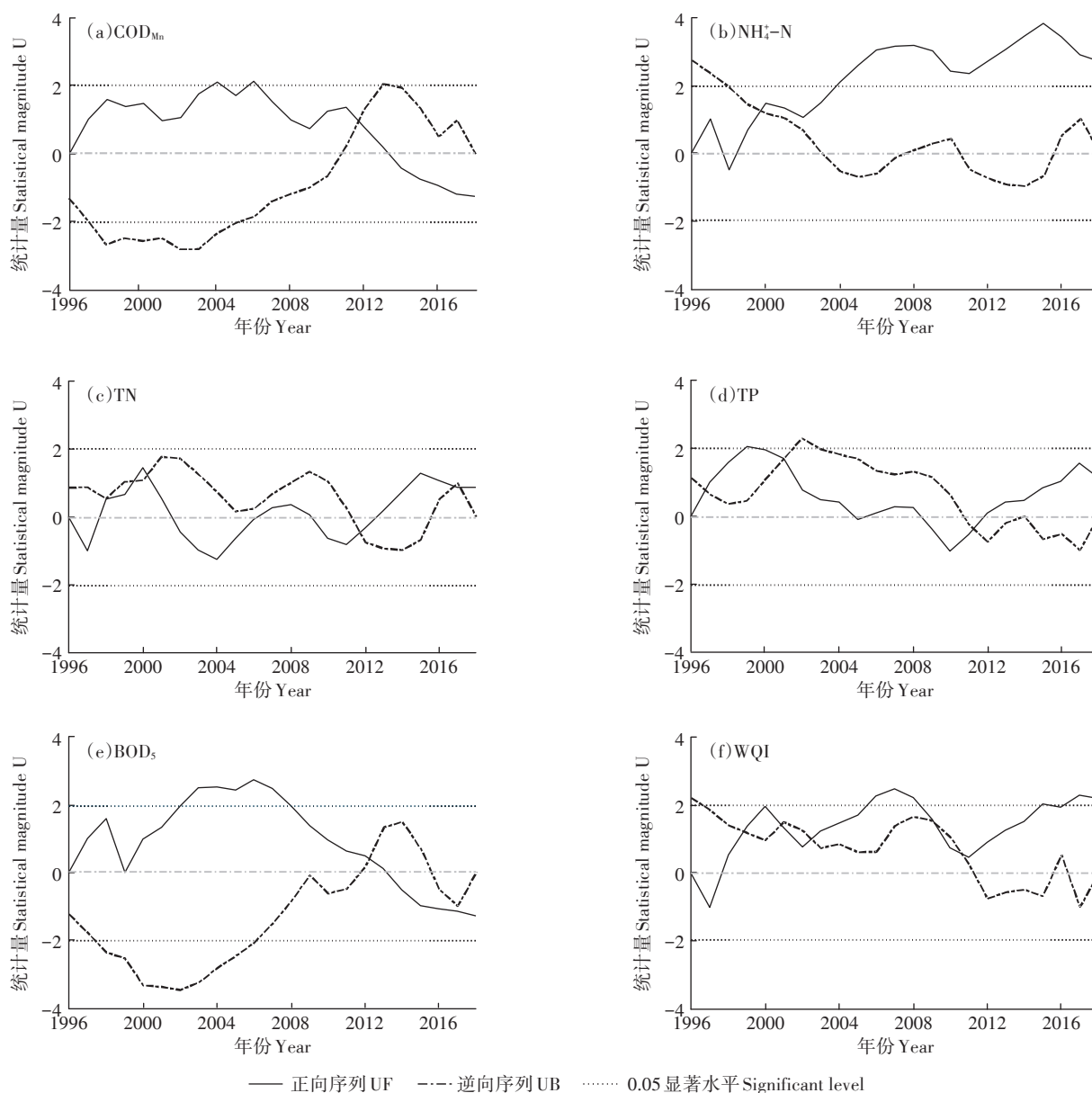


图4 污染指数突变诊断曲线

Figure 4 Mutation diagnosis curve of water pollution index

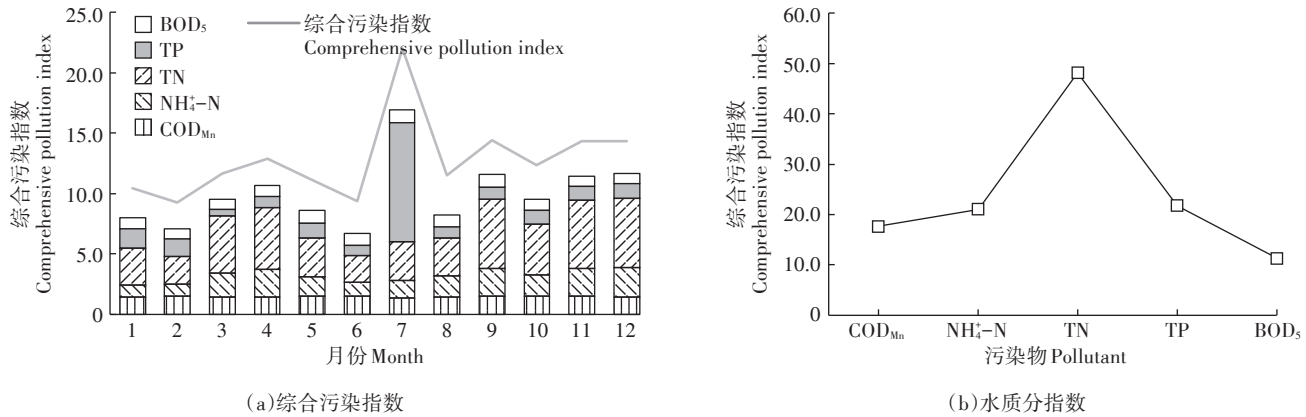


图5 白洋淀综合污染指数和水质分指数月变化

Figure 5 Monthly variation of comprehensive pollution index and individual indexes of water quality in Baiyangdian

表1 水质分指数和综合污染指数季节变化

Table 1 Seasonal variation of comprehensive pollution index and individual indexes of water quality in Baiyangdian

季节 Season	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	BOD ₅	ΣP _i
春	1.44	1.97	4.37	0.88	0.95	11.88
夏	1.44	1.46	2.84	3.87	0.99	13.75
秋	1.53	2.11	5.17	1.09	0.96	13.68
冬	1.47	1.47	3.66	1.42	0.89	11.35
ΣP _i	5.88	7.01	16.04	7.26	3.79	

2.2 空间变化

对近30年各监测点位水质指标污染指数均值进行空间聚类分析。结果表明,白洋淀8个监测点位存在空间相似性和差异性(图6)。如图所示,8个点位可分为三类:第一类点位为南刘庄;第二类点位包括王家寨和烧车淀;第三类点位包括光淀张庄、枣林庄、圈头、端村、采蒲台。第一类点位位于白洋淀西北部府河入淀口,府河水质较差,不满足V类标准要求,对南刘庄区域影响较大。第二类点位位于北部,水质相

对较好。第三类点位位于东部和南部,该区域淀中村较多,受到一定程度的居民排污、水产养殖等人为干扰,水质一般。

3 讨论

水质年际变化分析显示,水质总体为波动变化,WQI在2000、2006、2015年为高值,近两年略有下降。其中,1988—2000年间,水质呈下降趋势,主要缘于入淀流量的减少与污染负荷的增加;在2002—2009年间,多次进行生态补水^[25],2006—2010年水质有所改善,尤其是2015年“水十条”发布后,淀区污染治理力度加大,水质状况明显好转。张婷等^[12]研究也发现2006年白洋淀水质差,Zhao等^[26]研究表明白洋淀2000—2010年综合污染指数变化具有波动性,2000年综合污染指数高。以上研究结果与本文结论基本一致,但不完全相同。可能与水质指标选取不同有关,张婷等选取了DO、BOD₅、COD_{Mn}3项指标,Zhao等选取了pH、DO、BOD₅、TN、NH₄⁺-N、TP6项指标,而本文选择指标多,共7项指标,导致年际变化分析有所差异;也可能与选取时间序列不同有关,张婷等、Zhao等分别分析了1973—2007年和2000—2010年的年际

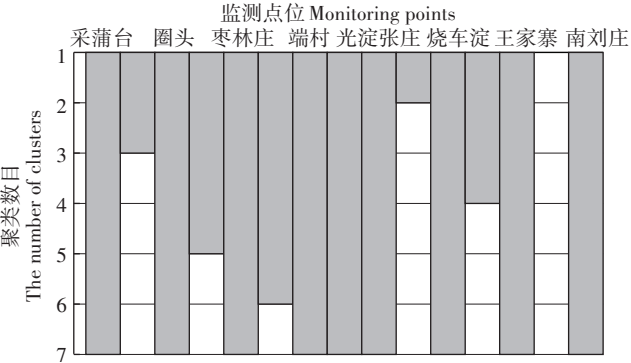


图6 空间聚类结果

Figure 6 Results of spatial clustering

变化,本文分析了1988—2016年年际变化,污染累积效应与污染物种类、污染时间有关,选取时间序列不同,可能导致结果有所差异。

水质年内变化分析结果表明,夏季水质最差,冬季水质最好。造成这一现象的原因可能是湖泊水体交换缓慢,气候条件对水质影响显著。夏季非点源污染负荷大,水温高,水中溶解氧消耗快,旅游与人为活动强烈,水文扰动会加快淀区底泥污染释放,影响水质。张婷等^[12]认为综合污染指数从高到低依次为春、夏、冬、秋,与本文长时间序列研究结果不一致,单就2006年看,研究结果一致。原因可能是选取的水质指标、研究时间序列不同。张婷等选取了TP、 NH_4^+-N 、 COD_{Mn} 、 BOD_5 4项指标,研究了2006年年内变化,选取指标较少,时间序列较短;本文选取7项指标,研究了1988—2016年变化,对年内水质变化特征的分析更为全面。目前,白洋淀水质变化机理研究不够,内源与外源的贡献率与贡献强度及水质年内变化的驱动机制等问题还需进一步研究。

水质空间分析结果表明,白洋淀东部水质总体好于西部,以烧车淀和王家寨为代表的北部水质最好,光淀张庄、枣林庄等所处的东部和南部水质次之,南刘庄所在的西北部水质最差。这可能是由于淀区地势自西北向东南倾斜,水流沿着地势向东流动,中东部围堤围埝多,流速减缓,同时淀中芦苇、香蒲等水生植物密度高,对水体污染物有一定去除效果,提升了水体自净作用,使得水质由西向东逐渐好转。同时,近年来多次利用外调水源补淀^[27],其中引黄济淀工程较为稳定,入淀后主要在东部对污染物进行稀释,提升了东部水质。此外,淀区北部荷花等挺水植物茂盛,淀中村少,人为干扰小,水质相对较好。Zhao等^[28]研究发现西北部污染最严重,北部和西南部为中度污染,中部和东部污染较轻,该结果与本文结果不完全相同,可能与选取时间序列、监测点位、监测指标不一致有关,Zhao等对2007—2008年13个点位数据进行了短时间序列研究,本文对1988—2016年8个点位数据进行研究,可以更加充分地反映污染趋势与分布。

1988—2016年,白洋淀水质总体呈现下降趋势,主要污染物为 COD_{Mn} 、 NH_4^+-N 、TN、TP、 BOD_5 ,与马牧源等^[10]、孟睿等^[29]的研究结果一致。水质下降的主要原因有:(1)入淀河流水质较差,多为劣V类;(2)入淀水量减少,淀泊自净能力下降;(3)淀中村生活污水直接入淀,旅游活动、养殖业污染排放^[30-32]。近年采取调水补淀、排污企业整治、城镇污水处理设施建设、淀

中村污染治理、水产养殖清理等系列措施治理白洋淀,水环境得到了一定程度的改善,但仍需进一步强化与管理。对白洋淀西北部区域应逐步恢复入淀河流流量,控制入淀河流污染;对东部和南部区域应严控淀中村与养殖污染;对整个淀区应加大补水量,优化补水时空分配,实施综合治理。

4 结论

(1)从年际变化上看,1988年至今,白洋淀水质年际变化具有波动性, NH_4^+-N 的变异系数最大为0.859, COD_{Mn} 、 NH_4^+-N 、 BOD_5 污染指数大体呈现上升趋势,综合污染指数波动上升,但在近两年略有下降。 COD_{Mn} 、 NH_4^+-N 、 BOD_5 分别在2012、2000、2012年产生突变,其余指标突变不显著。

(2)从年内变化上看,7月综合污染指数最高,2月综合污染指数最低,污染指数从低到高为 BOD_5 、 COD_{Mn} 、 NH_4^+-N 、TP、TN;在季节分布上,综合污染指数呈现出夏>秋>春>冬,污染指数从低到高分别为 BOD_5 、 COD_{Mn} 、 NH_4^+-N 、TP、TN。

(3)淀区水质在空间分布上具有差异性,白洋淀东部水质总体好于西部,以烧车淀和王家寨为代表的北部水质最好,光淀张庄、枣林庄等所处的东部和南部水质次之,南刘庄所在的西北部水质最差。

参考文献:

- [1] Tockner K, Stanford J A. Riverine flood plains: Present state and future trends[J]. *Environmental Conservation*, 2002, 9(3): 308-330.
- [2] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799-810.
YANG Gui-shan, MA Rong-hua, ZHANG Lu, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 799-810.
- [3] 贾军梅, 罗维, 杜婷婷, 等. 近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2255-2264.
JIA Jun-mei, LUO Wei, DU Ting-ting, et al. Valuation of changes of ecosystem services of Tai Lake in recent 10 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2255-2264.
- [4] Yang Y, Yin X A, Yang Z F. Environmental flow management strategies based on the integration of water quantity and quality, a case study of the Baiyangdian Wetland, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 150-161.
- [5] 杨丽伟, 陈诗越. 白洋淀水环境质量评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 457-462.
YANG Li-wei, CHEN Shi-yue. Assessment of water environment quality of Baiyang Lake[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(3): 457-462.

- [6] Wu F F, Wang X. Eutrophication evaluation based on set pair analysis of Baiyangdian Lake, north China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1030-1036.
- [7] 李 橙, 王月峰, 杨 晶, 等. 主成分分析法在白洋淀污染评价上的应用[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(35): 12616-12618.
LI Cheng, WANG Yue-feng, YANG Jing, et al. Application of principal component analysis in evaluation of Baiyangdian Lake pollution[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(35): 12616-12618.
- [8] 李凤超, 沈韞芬, 刘存歧, 等. 应用原生动物群落评价枯水期白洋淀的水质现状[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 785-789.
LI Feng-chao, SHEN Yun-fen, LIU Cun-qi, et al. Assessment of the water quality using protozoan communities during low water period in Baiyangdian Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 785-789.
- [9] 武士蓉, 徐梦佳, 赵彦伟, 等. 白洋淀湿地水质与水生物相关性研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3160-3165.
WU Shi-rong, XU Meng-jia, ZHAO Yan-wei, et al. Correlation between water quality and aquatic life in Baiyangdian Wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(11): 3160-3165.
- [10] 马牧源, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 白洋淀附着藻类的初级生产力及其与水质的关系[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 443-456.
MA Mu-yuan, CUI Li-juan, ZHANG Man-yin, et al. Primary production of periphyton and their relationship to water quality in Baiyangdian Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 443-456.
- [11] 杨雨风, 易雨君, 周 扬, 等. 白洋淀底栖动物群落影响因子研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2): 21-27.
YANG Yu-feng, YI Yu-jun, ZHOU Yang, et al. Influence factors of benthic macroinvertebrate community in Baiyangdian Lake[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(2): 21-27.
- [12] 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[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 261-267.
- [13] 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. Analysis of spatial variation of water quality around the entrance of Fu River in Baiyangdian[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 35-38.
- [14] 阳小兰, 张茹春, 毛 欣, 等. 白洋淀水体氮磷时空分布与富营养化分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 370-373.
YANG Xiao-lan, ZHANG Ru-chun, MAO Xin, et al. Spatial and temporal distribution and eutrophication analysis of nitrogen and phosphorus in Baiyangdian water body[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(24): 370-373.
- [15] 蒋火华, 朱建平, 梁德华, 等. 综合污染指数评价与水质类别判定的关系[J]. 中国环境监测, 1999(6): 46-48.
JIANG Huo-hua, ZHU Jian-ping, LIANG De-hua, et al. The relationship between comprehensive pollution index assessment and water quality type distinguishing[J]. *Environmental Monitoring in China*, 1999(6): 46-48.
- [16] 薛巧英, 刘建明. 水污染综合指数评价方法与应用分析[J]. 环境工程, 2004, 22(1): 64-66, 69.
XUE Qiao-ying, LIU Jian-ming. Methods and analyses of water pollution comprehensive index assessment[J]. *Environmental Engineering*, 2004, 22(1): 64-66, 69.
- [17] Ran L S, Wang S J, Fan X L. Channel change at Toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 231-247.
- [18] 朱龙腾, 陈远生, 燕然然, 等. 1951年至2010年北京市降水和气温的变化特征[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1287-1297.
ZHU Long-teng, CHEN Yuan-sheng, YAN Ran-ran, et al. The change characteristics of precipitation and temperature in Beijing from 1951 to 2010[J]. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1287-1297.
- [19] 高 伟, 陈 岩, 徐 敏, 等. 抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(5): 635-642.
GAO Wei, CHEN Yan, XU Min, et al. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980—2011)[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(5): 635-642.
- [20] 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1098-1107.
HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, et al. Preliminary analysis of spatiotemporal variation of water quality and its influencing factors in the Jiulong River watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4): 1098-1107.
- [21] Ajorlo M, Abdullah R, Yusoff M, et al. Multivariate statistical techniques for the assessment of seasonal variations in surface water quality of pasture ecosystems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(10): 8649-8658.
- [22] 耿 红, 宣莹莹, 蔡夏童, 等. 太原市2014年春节期间常规大气污染物浓度变化及聚类分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 965-974.
GENG Hong, XUAN Ying-ying, CAI Xia-tong, et al. Mass concentration variation and cluster analysis of urban air pollutants in Taiyuan, Shanxi Province during Chinese New Year of 2014[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 965-974.
- [23] 孙天瞳. 白洋淀水环境保护立法问题研究[D]. 保定: 河北大学, 2019.
SUN Tian-tong. Study on legislation of water environmental protection in Baiyangdian Lake[D]. Baoding: Hebei University, 2019.
- [24] 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.
- [25] 程朝立, 赵军庆, 韩晓东. 白洋淀湿地近10年水质水量变化规律分析[J]. 海河水利, 2011(3): 10-11, 18.
CHENG Zhao-li, ZHAO Jun-qing, HAN Xiao-dong. Analysis on the change law of water quality and quantity in Baiyangdian Wetland in recent 10 years[J]. *Haihe Water Resources*, 2011(3): 10-11, 18.
- [26] Zhao Y, Yang Z F, Li Y X. Investigation of water pollution in Baiyang-

- dian Lake, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 737–748.
- [27] 李琳琳, 王国清, 秦攀, 等. 白洋淀水环境状况与治理保护对策[J]. 科技导报, 2019, 37(21): 14–25.
- LI Lin-lin, WANG Guo-qing, QIN Pan, et al. Water environmental quality of Baiyangdian Lake and its treatment and protection counter-measures[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(21): 14–25.
- [28] Zhao Y, Xia X H, Yang Z F, et al. Assessment of water quality in Baiyangdian Lake using multivariate statistical techniques[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1213 – 1226.
- [29] 孟睿, 何连生, 席北斗. 白洋淀污染的主成分分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(12): 100–103.
- MENG Rui, HE Lian-sheng, XI Bei-dou. Principal component analysis of Baiyangdian Lake pollutions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(12): 100–103.
- [30] 张笑归, 刘树庆, 窦铁岭, 等. 白洋淀水污染防治对策[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 27–31.
- ZHANG Xiao-gui, LIU Shu-qing, DOU Tie-ling, et al. Strategies for controlling water environmental pollution in the area of Baiyangdian Lake[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(2): 27–31.
- [31] 徐梦佳, 朱晓霞, 赵彦伟, 等. 基于底栖动物完整性指数(B-IBI)的白洋淀湿地健康评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1808–1814.
- XU Meng-jia, ZHU Xiao-xia, ZHAO Yan-wei, et al. Health assessment of Baiyangdian Wetland based on B-IBI index[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9): 1808–1814.
- [32] 徐菲, 赵彦伟, 杨志峰, 等. 白洋淀生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6904–6912.
- XU Fei, ZHAO Yan-wei, YANG Zhi-feng, et al. Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6904–6912.