

# 白洋淀水环境状况与治理保护对策

李琳琳<sup>1,2</sup>, 王国清<sup>3</sup>, 秦攀<sup>1,2</sup>, 赵健<sup>1</sup>, 万正芬<sup>1</sup>, 艾绍碧<sup>1</sup>, 程永前<sup>1</sup>, 卢少勇<sup>1,2\*</sup>

1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012
2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875
3. 中国环境科学学会, 北京 100082

**摘要** 由于连年干旱和人类活动的干扰, 白洋淀面临生态缺水、水环境污染、水体富营养化及水生生物多样性破坏等生态危机。近几年, 白洋淀水体多为V类或劣V类, 处于轻度富营养状态, 主要污染指标为化学需氧量与总磷。研究表明, 白洋淀生态环境遭到破坏, 失去自净与生态修复能力的主要原因有: 上游修建大量水利工程截断水源, 导致入淀水量减少; 工业废水与生活污水大量流经府河汇入白洋淀; 淀区养殖业与旅游业发展加快了污染进程; 而紧绕白洋淀规划的雄安新区对入淀污染负荷有潜在贡献。针对白洋淀生态环境现状与水体恶化原因, 为使白洋淀恢复生态自净与循环能力, 提出了污染源治理与生态保护对策。

**关键词** 白洋淀; 水环境; 环境治理

白洋淀是华北最大的淡水湖<sup>[1-2]</sup>, 俗称“华北之肾”<sup>[2]</sup>和“华北明珠”<sup>[3-4]</sup>。它由大小不等的143个湖泊<sup>[5]</sup>、36个岛村、3700多条沟壕<sup>[6]</sup>连接而成, 以水体为主, 水域间苇田、台地、村庄交错相间<sup>[7]</sup>, 总面积366 km<sup>2</sup>。白洋淀为典型大陆性季风气候, 降雨量季节变化明显<sup>[8]</sup>, 年平均降雨量为556 mm, 其中85%集中在6—9月份<sup>[9]</sup>。属海河流域, 是大清河水系中重要的蓄水枢纽<sup>[10-11]</sup>, 拒马河、府河、唐河、瀑河、漕河、孝义河、萍河、白沟引河、潴龙河等9条河

流汇入<sup>[12-13]</sup>, 俗称“九河下梢”<sup>[14]</sup>。行政区隶属于保定和沧州地区的安新、容城、雄县、高阳和任丘5个县(市)<sup>[1]</sup>, 其中85%在安新县境内(图1)。目前新设立的河北雄安新区, 可能将白洋淀作为核心水源。但近年来, 白洋淀受人口快速增长、经济活动增加、区域气候变化等影响<sup>[15-16]</sup>, 入淀水量大幅减少<sup>[17]</sup>, 自净能力明显减弱<sup>[18]</sup>, 生态系统平衡遭破坏<sup>[19]</sup>, 极大影响和制约了白洋淀生态功能。

收稿日期: 2017-07-19; 修回日期: 2019-07-16

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC09B02); 科技基础性工作专项重点项目(2015FY110900-06)

作者简介: 李琳琳, 博士研究生, 研究方向为河流与湖泊生态修复, 电子信箱: stulilinlin@163.com; 卢少勇(通信作者), 研究员, 研究方向为流域过程与外源控制, 电子信箱: sylu@craes.org.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.21.002

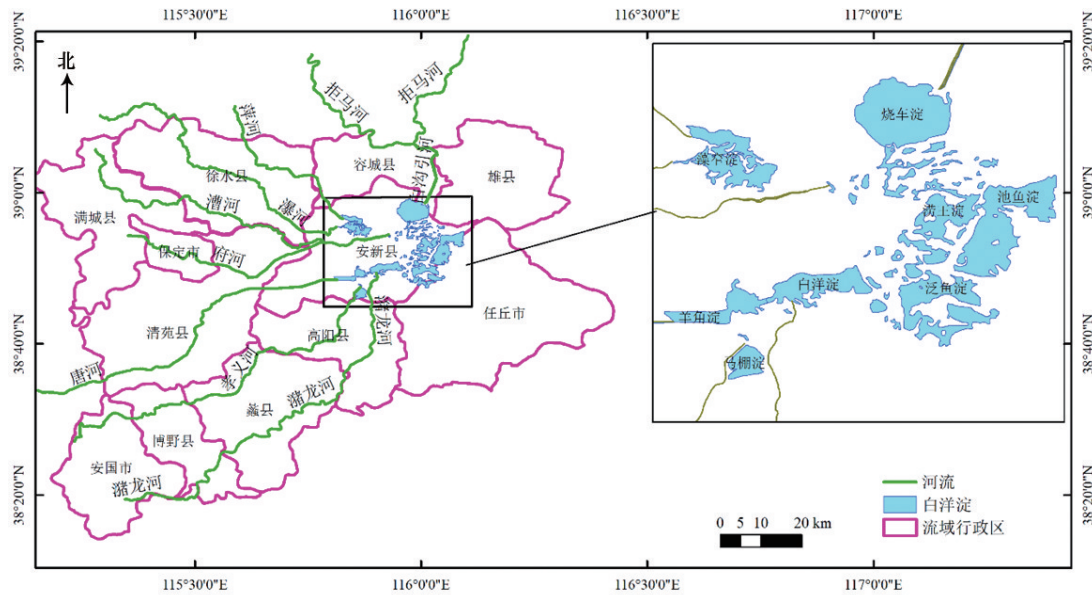


图1 白洋淀位置示意

Fig. 1 Location of Baiyangdian Lake

## 1 生态环境现状

由于气候干旱和人类大规模经济活动,白洋淀生态环境出现严重问题<sup>[20]</sup>,主要表现为生态缺水、水污染和富营养化严重<sup>[21-22]</sup>、生态系统脆弱及水生生物多样性破坏等<sup>[23-25]</sup>。

### 1.1 水资源短缺

从20世纪50年代开始,由于连年干旱、工农业用水量持续增加,上游9条入淀河流修建百余座水库,阻隔河淀,入淀水量不断减少<sup>[26]</sup>。同时,上游水土流失和淀内围堤造田使白洋淀泥沙淤积加速<sup>[27]</sup>。据统计,白洋淀流域的年水土流失量为1600多万t,年均侵蚀土层厚0.63 mm<sup>[28]</sup>。泥沙随水流入淀,白洋淀范围和容积日益缩小,入淀水量由五六十年代的10亿m<sup>3</sup>,缩减为80年代的2亿m<sup>3</sup><sup>[29]</sup>,并多次干淀。其中20世纪60年代1次,20世纪70年代3次<sup>[30-31]</sup>,1984—1988年连续5年<sup>[32]</sup>,1997—2004年连续8年。

为防止淀区连续干淀,维持白洋淀基本生态功能,1981年开始给白洋淀补水<sup>[33-34]</sup>,从上游水库紧急“输水救淀”,而补水的主要来源为保定市王快水库、西大洋水库和安各庄水库(图2)<sup>[35]</sup>。自1981年

以来,共实施生态补水29次(图2),其中在大清河水系内,从王快、西大洋、安各庄水库调水23次<sup>[15,36]</sup>,累计入淀水量约9.34亿m<sup>3</sup>;从岳城水库跨河系引水3.9亿m<sup>3</sup>,入淀水量1.59亿m<sup>3</sup>;“引黄济淀”5次,累计入淀水量约6.6亿m<sup>3</sup><sup>[37-38]</sup>。虽经多次补水,缓解了白洋淀当时生态危机<sup>[38]</sup>,但海河流域自身就是资源性缺水地区<sup>[39]</sup>,仅靠本流域水资源无法满足用水需求,并不能从根本上解决白洋淀因长期生态缺水造成的生态环境与功能退化问题,一旦本区域用水不足,输水中断,淀区依然有干淀危险,加快外流域调水工程建设,十分必要。

### 1.2 水环境污染压力较大

白洋淀水环境污染包括两方面,外源输入及淀区污染。入白洋淀的9条河流中,潞龙河、唐河、清水河和萍河长期断流<sup>[40]</sup>;漕河、孝义河和瀑河仅雨季有水;府河成为白洋淀主要来水<sup>[41-42]</sup>。但府河上游聚集化纤、造纸、蓄电池、胶片等大批高耗水、重污染工业企业<sup>[37]</sup>,长期作为工业污水排放主渠,水质劣V类,主要超标指标为高锰酸盐指数、化学需氧量和总磷<sup>[43]</sup>。自2006年以来,白洋淀因来水不足,未能及时稀释水中污染物,污染物浓度过高<sup>[44]</sup>,多次发生大面积死鱼事件。2016年8月,留村某渔

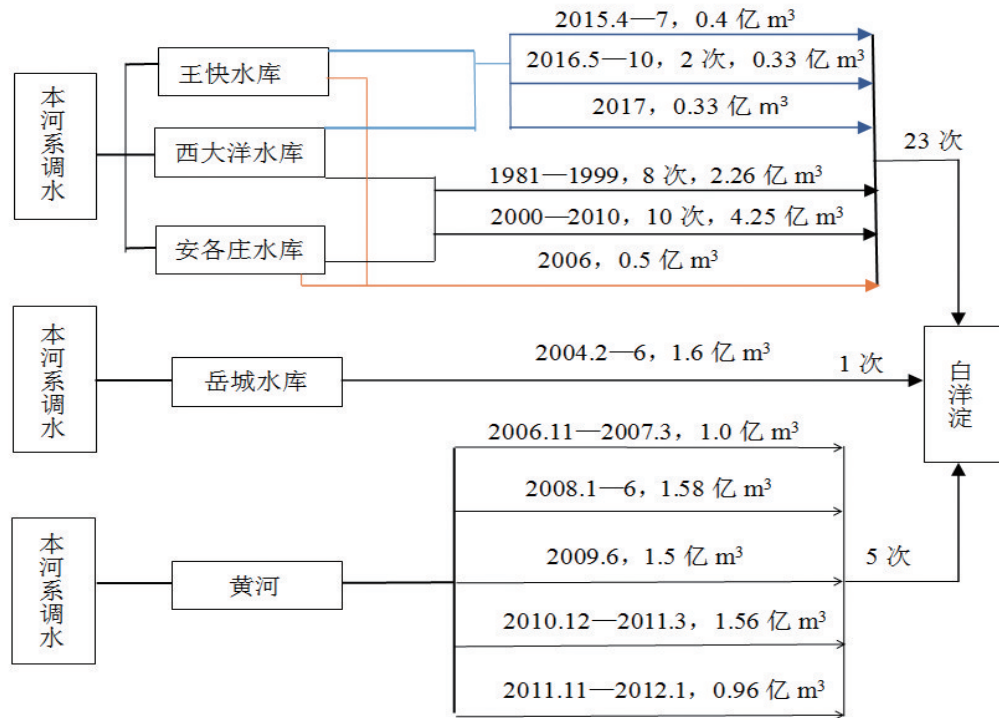


图2 白洋淀历史补水示意

Fig. 2 Historical water supplement of Baiyangdian Lake

场死鱼量超 30 t, 直接经济损失 30 余万元。上游污水处理厂管网不完善, 部分尚未处理污水直入府河, 最后入淀。而淀区自身污染包括淀区内居民生活污水、粪便、垃圾污染<sup>[45]</sup>, 水产养殖饵料污染和淀区内农药化肥不合理施用造成的污染等<sup>[46]</sup>。

据《河北省生态环境状况公报》和《中国生态环境状况公报》(表 1), 白洋淀自 2004 年后一直富营养化, 2004 和 2005 年富营养化水平较低, 处于贫-中富营养化水平, 2006 年和 2007 年变为重度富营养化, 2010 年后一直维持在轻度富营养化水平, 主要污染物为化学需氧量、氨氮、总磷和高锰酸盐指数。流域内工业和生活排水, 是化学需氧量的主要来源, 还含大量氮、磷等, 易引起水体富营养化。另外, 淀区内生活污水、粪便、垃圾的不合理处置及水产养殖饵料等都是导致水体富营养化的重要污染源<sup>[46]</sup>。

### 1.3 无序围埝, 影响行洪

除了生态缺水和上游排污, 白洋淀的无序围

埝, 对白洋淀的生态环境也构成了破坏。旅游是白洋淀周边各县市大力发展的产业, 2005 年, 淀区旅游业总产值共计 4 亿元。为发展旅游业, 环淀四县一市纷纷在白洋淀开展“圈地运动”, 导致白洋淀水域面积不断缩小并被割裂。白洋淀著名景点鸳鸯岛、荷花大观园, 都是违规建筑。全淀区目前有 100 多处非法建筑, 都是当地围埝造成。大量违规建筑把白洋淀分割得七零八落, 令其自净能力大大降低。

不仅旅游业大幅“圈地”, 种植业与养殖业也大搞围埝, 但因缺乏科学规划和有效管理<sup>[47-48]</sup>, 大部分围埝占据主行洪道, 截断或束窄行洪断面, 严重影响了防、泄洪。经统计, 白洋淀围埝总面积为 2700 hm<sup>2</sup>, 其中占主行洪道的近 2000 hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。圈头至光淀张庄、寨南一线, 在 8.0~9.0 m 水位下行洪断面缩小很多; 同口以下, 缩小行洪断面 50%; 梁沟至采蒲台间, 仅几个窄深的航道沟能行洪<sup>[6]</sup>。利用 2012 年“7·21”暴雨洪水分析时, 根据白洋淀水位

表1 1998—2016年白洋淀水质与富营养化状况

Table 1 Water quality and eutrophication state of Baiyangdian Lake from 1998 to 2016

年份	淀区水位	水质状况	富营养化状况	主要污染物
1998	约7.8 m	中度污染	—	化学需氧量、高锰酸盐指数、总磷
1999	平均水位6.8 m, 接近干淀	水质较差	—	化学需氧量、高锰酸盐指数、总磷
2002	干淀	—	—	—
2004	—	75%IV类, 25%V类或劣V类	贫-中富营养化	化学需氧量和高锰酸盐指数
2005	—	87.5%IV类, 12.5%劣V类	贫-中富营养化	化学需氧量和高锰酸盐指数
2006	—	劣V类	重度富营养	化学需氧量、高锰酸盐指数和氨氮
2007	—	50%IV类, 50%V类或劣V类	重度富营养	化学需氧量、高锰酸盐指数和氨氮
2008	—	12.5%劣V类, 37.5%V类, 50.0%IV类	中度富营养	化学需氧量、高锰酸盐指数和氨氮
2009	—	12.5%劣V类, 87.5%IV类	轻度富营养	化学需氧量、高锰酸盐指数和氨氮
2010	—	III类-劣V类	中度富营养	化学需氧量和高锰酸盐指数
2011	—	IV类-劣V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷和高锰酸盐指数
2012	—	IV类-劣V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷和高锰酸盐指数
2013	—	V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷和高锰酸盐指数
2014	—	劣V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷和高锰酸盐指数
2015	—	劣V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷
2016	—	V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷
2017	—	V类	轻度富营养	化学需氧量、总磷
2018	—	IV类	轻度富营养	化学需氧量、总磷

—容积曲线查得的库容通常比实际入淀量高出近1倍正是这个原因<sup>[5]</sup>。

#### 1.4 水生生物多样性降低

白洋淀曾有“物种基因库”的美誉,淀区内物种资源丰富,野生鱼类、鸟类以及浮游动植物等高达600多种,在维持生态平衡方面发挥着极其重要的作用。但受生态环境恶化影响,淀区内生物多样性遭受严重破坏,淀内原有的54种鱼类仅存35种,溯河鱼类和顺河鱼类基本消失或绝迹;同时鱼类资源趋向小型化、低龄化和杂型化发展<sup>[49]</sup>。因鱼虾等食物减少,栖息于淀内的鸟类也日益减少,过去在白洋淀繁衍生息的大雁、鹈鹕、天鹅水雉、丹顶鹤、野鸭等30多种鸟类的存有量日益减少,部分更是有绝迹迹象<sup>[50]</sup>。近年来,受干淀及水污染影响,水生生物种类损害更严重<sup>[51]</sup>。浮游生物由129个属减少到92个;原生动动物由38个属减少到25个<sup>[6]</sup>,轮虫由60种减少到49种,枝角类由29种减少到23种<sup>[52]</sup>;底栖无脊椎动物由原来的35种减少到25种;维管束植物更是在数量上锐减,现已零星分布。

## 2 水环境恶化原因

### 2.1 上游经济发展增大入湖污染负荷

白洋淀流域上游经济发展,增加的工业入湖污染负荷,是白洋淀淀区生态环境恶化的重要因素<sup>[53]</sup>。快速的经济的发展导致工业排污量翻倍。白洋淀上游建有大批造纸、皮革、制鞋、印染、橡胶、羽绒等高耗水、高耗能、高污染、高排放的企业与作坊,且历史上偷排、漏排严重。目前,虽然上游已经关停或限改了140多家高排污工业企业,保定市区内3家老化的污水处理厂也已整改,但是仍有大量的工业废水排入白洋淀。尤其是作为工业污染主要来源的保定市,重点污染企业的日均污水排放量约40万t,其中80%排入府河;这些重点污染企业排放的工业废水是化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)的主要污染来源, COD日排放量高达46 t。南部高阳县、蠡县、博野县与安国市等地区的不少企业,因孝义河枯竭将污水私自排放入河,导致河道内囤积大量污染物,而孝义河作为王

快水库给白洋淀输水的重要河道,在补水时将河道污染物一起汇入白洋淀。西部徐水县与满城县造纸与制酒企业聚集,工业废水主要排入瀑河与漕河,在非农灌季节和汛期进入白洋淀。

经济发展同时导致人口数量增加与居民用水量增大<sup>[54]</sup>。1950—2016年保定市人口由原来的5.2百万增加到10.3百万<sup>[51]</sup>。为满足城市生活用水,白洋淀上游建设了6座大型水库及90多座中小型水库蓄水,导致入淀水量剧减,同时生活污水排放量由原来的 $4.6 \times 10^5$ 万t增加到 $9.1 \times 10^5$ 万t,部分未能处理的生活污水沿河道入淀<sup>[55]</sup>。雄安新区作为未来重点规划发展区,目前人口130万,但是新区若承接非首都功能,加上创新创业人才涌入,人口可能达200万~300万,增加生活污水日排放量约17万~41万t。新区现在仅有3座日处理量为5万t的污水处理厂,远不能满足人口增加带来的城市污水增长量的处理需求。

## 2.2 淀区及周边岛村生活源加深污染程度

白洋淀与其他湖泊不同的是,淀区与岛村交错,紧绕淀区与水域居住约30万人口(图3)。而岛

村人民每天产生生活污水3万t,生活垃圾100多t<sup>[56]</sup>,近年来,虽采取处理措施治理淀内自身污染,但岛村人民生活垃圾随意丢弃和生活污水随处倾倒现象依然存在<sup>[6]</sup>。淀区垃圾不能及时分类与收集运输,导致渗滤液随雨水冲刷入淀,对淀内水质造成很大污染<sup>[57]</sup>。入淀水量最大的府河,临河村落生活污水与生活垃圾的人均排放量分别为26.3 L/d和0.41 kg/d,且生活垃圾中含有大量氮、磷;而生活污水和人粪尿则是 $COD_C$ 的重要来源,年入河负荷分别为10.9 t和2.30 t<sup>[58]</sup>。

## 2.3 农业与畜禽养殖业面源加重污染压力

白洋淀较为突出的农业面源污染主要来源于种植业和养殖业。近年来经济的快速发展,导致农业灌溉需水量和产污量增加。人口增加导致粮食需求增大,大面积开垦耕地造成淀区水土流失严重<sup>[27-28]</sup>,据统计,白洋淀流域的年水土流失为1600多万t,导致河道淤积变浅、土壤肥力下降,并直接影响地表水水质<sup>[5]</sup>。另一方面,农药、化肥不合理施用及随意性农灌,使白洋淀面源污染加重。2014年河北省的农药使用量为8.63万t<sup>[59]</sup>,较1995年增



图3 白洋淀污染来源示意

Fig. 3 Schematic diagram of pollution sources in Baiyangdian Lake

加了18.70%,且呈逐年上升趋势;而1995—2014年化肥施用量(折纯)由220.68万t增加到335.61万t,单位面积的化肥施用量同样在逐年增加,但是化肥的平均利用率很低,仅有30%~35%<sup>[57]</sup>,过量施肥十分严重。过量施用的氮素化肥成为目前地下水硝酸盐污染的重要来源之一,而过量施用的磷肥随雨水冲刷入淀,加剧水体富营养化<sup>[60]</sup>程度。

岛村居民养殖业发展已久,包括水产和畜禽养殖。水产养殖方式有网围、网栏、网箱(简称“三网”)、围堤、池塘5种,其中“三网”养殖是主要方式,大于75%。但“三网”养殖与淀内湖水交换频繁,过量的投饵全部进入湖体,而饵料中又含大量营养物质,成为导致白洋淀水体富营养化的重要来源<sup>[47]</sup>。白洋淀畜禽养殖以养鸭为主,约占淀区总畜禽养殖量的99%。但畜禽养殖模式与粪便无害化处理技术落后,粪便资源化利用水平低下。淀区养殖模式多为散养,但规模很大。养殖户常跨越禁养区或者限养区养殖,粪便直排入湖或随意堆砌湖边随雨水再次入淀<sup>[61]</sup>。此外畜禽养殖饲料的低利用率,也导致淀区鸭粪便中氮磷含量很高,总氮与总磷的平均含量约为18.5和14.3 g/kg。2011年安新县水产畜牧局统计数据,白洋淀鸭存栏量为17万多只<sup>[62]</sup>。若以每天每只鸭的排便量0.09 kg,饲养周期5个月,每年2个饲养周期计,则畜禽养殖业每年将产生总氮和总磷污染负荷85 t和66 t。

#### 2.4 旅游业发达,但环保意识薄弱

2002年后白洋淀自然湿地保护区,再次成为旅游度假胜地,随着旅游业大力发展,白洋淀的流动人口增加<sup>[53]</sup>,尤其是旅游旺季,仅1天内就接待游客5万人,远超接待能力,超负荷运行。淀区周围因旅游业而开设的宾馆饭店达300余家,连锁店、超市、专卖店等商业门店1000余家。因此而产生的生活污水和垃圾,增加了淀区污染负荷。

此外,淀区保护宣传教育滞后,缺乏湿地生态环境保护、价值和重要性的认识。在处理经济发展与生态保护关系时,重经济轻生态、重局部轻全局、重眼前轻长远等观念助长了以牺牲环境为代价的发展和掠夺式经营<sup>[6]</sup>。只顾抓眼前经济利益,不计成本引进或批准排污严重超标的小企业,加重了环

境污染。无政府状态的滥砍滥伐,掠夺性开发现象时有发生。

### 3 治理与保护对策

#### 3.1 本区输水与跨流域调水相结合

白洋淀水污染最核心的原因,在于缺乏天然水补给。解决生态水资源短缺,是解决白洋淀问题的关键。因海河流域本身为资源性缺水地区,仅依靠本区域输水,不能完全解决问题。以目前白洋淀人口160万,耕地面积366 km<sup>2</sup>,生活与工业用水量之比为3.87:1,以及《河湖生态环境需水计算规范》,计算得到目前白洋淀需要生活用水量1.0亿m<sup>3</sup>,农业用水量0.61亿m<sup>3</sup>,工业用水量0.56亿m<sup>3</sup>,若淀区水位维持在6.75 m以上,至少需要生态需水量2.58亿m<sup>3</sup>。以2035年作为未来年评估,雄安新区人口预计达到531万,预计需要生活需水量3.4亿m<sup>3</sup>,工业用水量0.70亿m<sup>3</sup>,农业需水量0.71亿m<sup>3</sup>,白洋淀生态需水量2.58亿m<sup>3</sup>,淀区周边8条主要河道生态需水量2.8亿m<sup>3</sup><sup>[63]</sup>。原补水方案——将上游王快和安各庄水库共0.96亿m<sup>3</sup>水输入白洋淀,保证入淀水量达0.5亿m<sup>3</sup>,目前引黄入冀补淀工程已经开始启用补水,2018年11月29日至2019年3月16日第一阶段调水工作完成,总引水量3.25亿m<sup>3</sup>,向白洋淀提供生态补水约0.8亿m<sup>3</sup>,还不能完全满足水量需求,需加快建设南水北调中线工程<sup>[64]</sup>。此外,引黄入冀补淀工程未来预计新增引黄水量6.2亿m<sup>3</sup>,将大大缓解白洋淀缺水危机。同时,对上游建成的100多座水利工程,利用率不高的进行拆除,增加入淀水量。

#### 3.2 加强污染源的治理

白洋淀区的污水源主要包括上游工业、生活源汇入和淀区生活、农业、畜禽养殖业排污。对于上游工业源,主要是加强源头控制。目前白洋淀最大的工业污染源在于上游保定市和满城县的工业企业排污,虽河北省政府已经关停或限改了142家排污企业,但每天仍然有大量未处理污水通过府河或漕河入淀<sup>[65]</sup>。对于污染企业,建立一份详细的污染源清单,明确每一家企业的污水排放量,扩建污水

处理厂及铺设污水管网,确保所有工业污水全部收集进厂。同时进行污水处理厂提标改造,提高污水排放标准,并在所有污水排口安装24小时实时监控系統,保障所有入河污水处理厂出水均为达标排放水,严厉杜绝偷排、漏排现象发生。对于上游城镇生活污水,在确保污水全部收集进污水处理厂的同时增建一批再生水厂,在保障污水全部达标排放的同时,有效利用中水进行农业灌溉、景观使用或者家庭冲厕,提高水资源利用率,缓解淀区水资源紧张问题。对将要规划开发的雄安新区,因人才大量涌入可能新增的17万~41万t污水,提前设计扩建污水处理厂和再生水厂,保障生活污水全部达标排放。

对淀区及周围村镇,加强生活污水与生活垃圾治理。规划美丽乡村建设,临近水村整体规划连片整治,划定生态保护区,保护区内禁止污水排放与垃圾堆砌。在远离水域的区域建设大型公共厕所与垃圾回收站,排水管网铺设至水村每家每户;路面硬化,杜绝污水直接排入地下;对于岛村居民每年产生的3万t生活污水和100多t生活垃圾,建设化粪池和大型沼气装置,全部集中化处理。对淀区农业污染,改进耕作方式,推广绿色无公害农业,减少农药、化肥使用,减少污染排放,节约水资源。对淀区养殖污染,应划定养殖区,优化养殖模式,网箱、网栏、网围等清除,土方、围埝等清理,科学规划管理,合理控制养殖规模和容量,发展有机与生态养殖;粪便资源化处置,减少养殖污染,控制水体富营养化。对于淀区内源污染,在测定淀区及河道底泥污染及释放风险的基础上,提出疏浚或钝化方案,减少内源污染量。最后,在污水全部收集处理的基础上,加强污水处理厂技术改造,逐年削减污染物排放量,而且切实做好污染防治系统的长效监管。

### 3.3 生态修复与生物多样性保护

为控制和减少白洋淀水产养殖污染,改善水体生态环境,应加强生态修复技术。加强上游水土保持和绿化工作,提高植被覆盖度、涵养水源、防治水土流失<sup>[66]</sup>。在淀区周围建设河滨带、生态浮床、芦苇湿地或绿化工程<sup>[67]</sup>,既增加淀区植物多样性<sup>[68]</sup>,又可利用水生植物消耗氮磷,控制水体富营养化,

净化水体<sup>[69]</sup>。积极研究当地土著有益微生物,通过降解有机污染物改善养殖环境,以修复养殖水域生态环境<sup>[6]</sup>;积极引进白洋淀现已绝迹的名贵鱼种和鸟类。

## 4 结论

白洋淀生态环境面临严峻考验,淀区生态缺水严重、环境污染负荷高、生物多样性遭到破坏。为解决淀区生态危机,需要宏观调控与精准监控相结合,既要加强污染源控制,加快生态调水工程建设,又要推进淀区实时监控系統监测、加强生态修复和湿地建设,以综合管理与治理手段推动白洋淀生态环境治理与修复。

### 参考文献(References)

- [1] 林皓波, 吴新玲, 刘菲, 等. 白洋淀湿地资源的遥感监测[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(4): 127-130.  
Lin Haobo, Wu Xinling, Liu Fei, et al. Wetland resources monitoring for Baiyangdian Lake by remote sensing technology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(4): 127-130.
- [2] Yang Y, Chen H, Yang Z. Assessing changes of trophic interactions during once anthropogenic water supplement in Baiyangdian Lake[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1169-1179.
- [3] 王亚斌. 白洋淀湿地生态环境监测方法研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(9): 118-120.  
Wang Yabin. Technique and method of ecological environment monitoring in Baiyangdian wetland[J]. Environmental Science & Management, 2013, 38(9): 118-120.
- [4] 李亚鹏. 白洋淀的水环境质量与保护对策研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.  
Li Yapeng. Baiyangdian Marsh's water environment quality and protection research[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2006.
- [5] 吴新玲. 白洋淀水环境保护分析[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(2): 191-192.  
Wu Xinling. The analysis and protection of Baiyangdian Marsh's water environment quality[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2013, 41(2): 191-192.

- [6] 李云虎, 刘秉良. 白洋淀湿地生态环境现状与保护对策[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 350-353.  
Li Yunhu, Liu Bingliang. Present situation and protection countermeasures of ecological environment in Baiyangdian wetland[J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(10): 350-353.
- [7] 冷玉洁, 魏建强, 彭锋. 浅析白洋淀水污染的防治措施[J]. 黑龙江科技信息, 2008(11): 116.  
Leng Yujie, Wei Jianqiang, Peng Feng. Prevention and control measures of water pollution in Baiyangdian Lake[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008(11): 116.
- [8] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477.  
Gao Yanchun, Wang Jinfeng, Feng Zhiming. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467-477.
- [9] Yang Z, Mao X. wetland system network analysis for environmental flow allocations in the Baiyangdian Basin, China[J]. Ecological modelling, 2011, 222(20): 3785-3794.
- [10] 刘丹丹. 白洋淀水资源量变化及其原因分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.  
Liu Dandan. Variation of water resources quantity and its reason analysis in Baiyangdian wetland[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014.
- [11] Cui B, Li X, Zhang K. Classification of hydrological conditions to assess water allocation schemes for Lake Baiyangdian in North China[J]. Journal of hydrology, 2010, 385(1): 247-256.
- [12] 林波. 湿地生态系统健康评价方法及其应用——以白洋淀湿地为例[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.  
Lin Bo. The assessment of wetland ecosystem health by means of LDI and WRAP, a case study in Baiyangdian wetland, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forest, 2010.
- [13] Mao X, Yang Z. Functional assessment of interconnected aquatic ecosystems in the Baiyangdian Basin—An ecological-network-analysis based approach[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(23/24): 3811-3820.
- [14] 王旭东. 白洋淀富营养化评价与数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
Wang Xudong. Study on eutrophication assessment and numerical simulation for Baiyangdian Lake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [15] Zhuang C, Ouyang Z, Xu W, et al. Impacts of human activities on the hydrology of Baiyangdian Lake, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(7): 1343-1350.
- [16] 李祥, 寿绍文, 白艳辉, 等. 1960—2013年白洋淀湿地气候变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 75-83.  
Li Xiang, Shou Shaowen, Bai Yanhui, et al. Characteristics of climate change from 1960 to 2013 in Baiyangdian wetland[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(1): 75-83.
- [17] 王朝华, 吕丹彤. 引岳济淀对白洋淀水环境影响分析[J]. 海河水利, 2005(2): 24-25.  
Wang Chaohua, Lü Dantong. Analysis on the influence of yuecheng reservoir to Baiyangdian Lake water transfer on the water environment quality[J]. Haihe Water Resources, 2005(2): 24-25.
- [18] 王亚琼, 薛培英, 耿丽平, 等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 304-309.  
Wang Yaqiong, Xue Peiyong, Geng Liping, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments-submerged macrophytes-water systems of Baiyangdian Lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 304-309.
- [19] 胡国成, 许木启, 许振成, 等. 府河-白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 146-153.  
Hu Guocheng, Xu Muqi, Xu Zhencheng, et al. Pollution characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediment from fuhe river and Baiyangdian Lake, North China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(1): 146-153.
- [20] 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, 25(5): 1033-1040.  
Zhao Xiang, Cui Baoshan, Yang Zhifeng. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1033-1040.
- [21] 赵颖, 张丽, 王飞. 白洋淀水文变化对土地利用类型的影响[J]. 中国水土保持, 2017(5): 52-55.  
Zhao Ying, Zhang Li, Wang Fei. Effects of hydrological changes on land use types in Baiyangdian Lake[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(5): 52-55.
- [22] 朱静, 吴亦红, 王靖飞. 白洋淀总氮控制模型研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增刊1): 75-79.  
Zhu Jing, Wu Yihong, Wang Jingfei. Study on total nitrogen control model of Baiyangdian Lake[J]. Environmen-

- tal Science & Technology, 2016, 39(Suppl 1): 75-79.
- [23] Hu S, Liu C, Zheng H, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5): 895-905.
- [24] 董娜. 白洋淀湿地生态干旱及两库联通补水分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- Dong Na. Analysis of ecological drought and supplementing water to Baiyangdian wetland from two reservoirs linking system[D]. Baoding: Agriculture University of Hebei, 2009.
- [25] Dong L, Yang Z, Liu X. Phosphorus fractions, sorption characteristics, and its release in the sediments of Baiyangdian Lake, China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2011, 179(1/2/3/4): 335-345.
- [26] 王永源. 近代以来白洋淀流域学术研究综述[J]. 天中学刊, 2017, 32(3): 136-139.
- Wang Yongyuan. The literature review of the academic researches of Baiyangdian since modern times[J]. Journal of Tianzhong, 2017, 32(3): 136-139.
- [27] 张明阳. 基于RS、GIS和景观格局分析的白洋淀流域生态环境变化研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2004.
- Zhang Mingyang. Study on ecological environment change of Baiyangdian watershed based on RS, GIS and landscape pattern[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2004.
- [28] 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.
- Zhang Min, Gong Zhaoning, Zhao Wenji, et al. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [29] 吴俊斌. 南水北调中线工程环境影响初步评价[J]. 人民长江, 1994(3): 7-12.
- Wu Junyu. Preliminary evaluation on environmental impact of middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Yangtze River, 1994(3): 7-12.
- [30] 温志广. 白洋淀湿地的生态功能及其保护[J]. 邢台学院学报, 2003, 18(4): 30-32.
- Wen Zhiguang. On ecological function of Baiyangdian wetland and its protection[J]. Journal of Xingtai University, 2003, 18(4): 30-32.
- [31] 温志广. 白洋淀湿地生态环境面临的危机及解决措施[J]. 环境保护, 2003(9): 33-35.
- Wen Zhiguang. Crisis and solution on environmental protection for wetland of Baiyangdian Lake[J]. Environmental Protection, 2003(9): 33-35.
- [32] 王强, 刘静玲, 杨志峰. 白洋淀湿地不同时空水生植物生态需水规律研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1447-1454.
- Wang Qiang, Liu Jingling, Yang Zhifeng. Environmental water demand of Baiyangdian Lake at different times and places[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(7): 1447-1454.
- [33] 张赶年, 曹学章, 毛陶金. 白洋淀湿地补水的生态效益评估[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 605-611.
- Zhang Gannian, Cao Xuezhong, Mao Taojin. Ecological benefit assessment of water supplement to Baiyangdian wetland[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(5): 605-611.
- [34] 张铁军, 张海生. 白洋淀缺水分析及补水对策[J]. 海河水利, 2009(5): 11-12.
- Zhang Tiejun, Zhang Haisheng. Water shortage analysis and replenishment strategy in Baiyangdian Lake[J]. Haihe Water Resources, 2009(5): 11-12.
- [35] 程磊. 白洋淀水环境现状分析[J]. 水科学与工程技术, 2016(5): 50-52.
- Cheng Lei. Analysis of Baiyangdian water environment situation[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2016(5): 50-52.
- [36] Yang W, Yang Z, Qin Y. An optimization approach for sustainable release of e-flows for lake restoration and preservation: Model development and a case study of Baiyangdian Lake, China[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2448-2455.
- [37] 李书友, 冯亚辉. 白洋淀生态环境的现状与治理保护[J]. 东北水利水电, 2008, 26(10): 54-56.
- Li Shuyou, Feng Yahui. Present situation of ecological environment of Baiyangdian Lake and its treatment and protection[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2008, 26(10): 54-56.
- [38] 徐丽娟, 魏建强. 白洋淀生态补水存在问题及对策[J]. 工程与建设, 2014(3): 305-306.
- Xu Lijuan, Wei Jianqiang. Problems and countermeasures of ecological water replenishment in Baiyangdian Lake[J]. Engineering and Construction, 2014(3): 305-306.
- [39] 丁志宏, 杨晓勇, 韩瑞光. 海河流域水资源承载能力与合理配置问题探讨[J]. 海河水利, 2012(2): 13-17.
- Ding Zhihong, Yang Xiaoyong, Han Ruiguang. Discussion on water resources carrying capacity and rational al-

- location in Haihe River Basin[J]. *Haihe Water Resources*, 2012(2): 13-17.
- [40] 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 Xingxing, Yang Luhua, Xia Hui, et al. Spatial variability characteristics analysis of water quality surrounding Fuhe River Entrance in Baiyangdian Lake[J]. *Water Resources & Power*, 2016, 34(9): 35-38.
- [41] 冯亚辉, 李书友. 白洋淀生态补水分析与研究[J]. *水利科技与经济*, 2013, 19(6): 37-39.
- Feng Yahui, Li Shuyou. Analysis and research on Baiyangdian Lake ecological replenishment[J]. *Water Conservancy Science & Technology & Economy*, 2013, 19(6): 37-39.
- [42] Xu F, Yang Z F, Chen B, et al. Impact of submerged plants on ecosystem health of the plant-dominated Baiyangdian Lake, China[J]. *Ecological modelling*, 2013, 252: 167-175.
- [43] 张浩, 刘明喆, 郭丽峰, 等. 海河流域“五湖”水生态评价与修复研究[J]. *中国水利*, 2017(2): 19-20.
- Zhang Hao, Liu Mingzhe, Guo Lifeng, et al. Ecological assessment and recovery of five lakes in Haihe River Basin[J]. *China Water Resource*, 2017(2): 19-20.
- [44] 张铁坚, 王朦, 彭艳侠, 等. 白洋淀上游城市内河浮游动物群落调查与水质评价[J]. *环境工程*, 2016, 34(3): 166-169.
- Zhang Tiejian, Wang Meng, Peng Yanxia, et al. Survey of zooplankton communities and evaluation of water quality[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(3): 166-169.
- [45] 梁淑轩, 张振冉, 秦哲, 等. 白洋淀沉积物理化特性及营养盐分布特征[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 294-298.
- Liang Shuxuan, Zhang Zhenran, Qin Zhe, et al. On the physico-chemical characteristic features and the nutrient distribution in the sediments of Lake Baiyangdian[J]. *Journal of Safety & Environment*, 2016, 16(1): 294-298.
- [46] 董谦, 张培, 薛宝颖, 等. 基于低碳农业经济理论的白洋淀湿地农业面源污染治理[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(22): 11900-11901.
- Dong Qian, Zhang Pei, Xue Baoying, et al. Treatment of agricultural area-pollution in Baiyangdian Lake wetlands based on the theory of low-carbon agricultural economy[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(22): 11900-11901.
- [47] 边蔚. 白洋淀水产养殖污染负荷与控制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Bian Wei. Study on pollution load and control of aquaculture in Baiyangdian Lake[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013.
- [48] 边蔚. 白洋淀水产养殖污染关键控制指标研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2009.
- Bian Wei. Study on the key control targets of Baiyangdian aquaculture pollution[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2009.
- [49] 梁宝成. 白洋淀生态环境面临的问题及对策[J]. *河北水利*, 2005(3): 32-33.
- Liang Baocheng. Problems and countermeasures of ecological environment in Baiyangdian Lake[J]. *Hebei Water Resources*, 2005(3): 32-33.
- [50] 张素珍, 马静, 李贵宝. 白洋淀湿地面临的生态问题及可持续发展对策[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(4): 53-56.
- Zhang Suzhen, Ma Jing, Li Guibao. The ecological problems and sustainable development countermeasures of the Baiyangdian wetland[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2007, 5(4): 53-56.
- [51] 高芬. 白洋淀生态环境演变及预测[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- Gao Fen. Variation and prediction of the ecological environment of Baiyangdian wetland[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2008.
- [52] 崔秀丽, 侯玉聊. 白洋淀生态演变的原因、趋势与保护对策[J]. *保定学院学报*, 1999(2): 86-89.
- Cui Xiuli, Hou Yuliao. The opinion on the ecological environment protection of Baiyangdian lake[J]. *Journal of Baoding Teachers College*, 1999(2): 86-89.
- [53] 张俊, 罗阳, 周绪申, 等. 白洋淀生态环境问题探讨[C]// 中国水文科技新发展—2012中国水文学学术讨论会论文集. 南京: 中国水利学会, 2012: 939-943.
- Zhang Jun, Luo Yang, Zhou Xushen, et al. Discussion on ecological environment of Baiyangdian Lake[C]// Chinese Hydrological Symposium. Nanjing: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2012: 939-943.
- [54] 江波, 肖洋, 马文勇, 等. 1974—2011年白洋淀土地覆盖时空变化特征[J]. *湿地科学与管理*, 2016, 12(1): 38-42.
- Jiang Bo, Xiao Yang, Ma Wenyong, et al. Spatiotemporal characteristics of the land cover change in baiyangdian lake from 1974 to 2011[J]. *Wetland Science & Man-*

- agement, 2016, 2(1): 38-42.
- [55] 董娜. 白洋淀湿地生态干旱及两库联通补水分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.  
Dong Na. Analysis of ecological drought and supplementing water to Baiyangdian wetland from two reservoirs linking system[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009.
- [56] 齐丽艳. 白洋淀水域环境质量演变评价及防治对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.  
Qi Liyan. Study on evaluation of environmental quality evolution and control measures in Baiyangdian waters [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [57] 陈龙珠. 面向白洋淀流域治理的农村环境政策研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2011.  
Chen Longzhu. Study on rural environmental policy about drainage area governance of Baiyangdian basin [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.
- [58] 孙添伟, 陈家军, 王浩, 等. 白洋淀流域府河干流村落非点源负荷研究[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5): 568-572.  
Sun Tianwei, Chen Jiajun, Wang Hao, et al. Study on non-point source pollution loads in villages along the Fuhe River, Baiyangdian watershed[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(5): 568-572.
- [59] 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局. 河北农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.  
Office of the People's Government of Hebei, Hebei Statistical Bureau. Hebei Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishers, 2015.
- [60] 张国印, 刘蕾, 孙世友, 等. 河北省农业环境面源污染现状及影响因素与对策建议[J]. 河北农业科学, 2017, 21(3): 93-95.  
Zhang Guoyin, Liu Lei, Sun Shiyu, et al. Status, influencing factors and countermeasures of non-point source pollution of agricultural environment in Hebei province [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2017, 21(3): 93-95.
- [61] 刘嘉莉. 白洋淀鸭养殖粪便排放规律及源头减排效果研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.  
Liu Jiali. Study on the law of manure emissions and the effect of reduction by duck farm controlled into the Baiyangdian from the source[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.
- [62] 祝欢, 田在峰, 赵智亮, 等. 白洋淀淀内畜禽养殖污染负荷削减技术研究[C]//华北五省市环境科学学会第十七届年会. 太原: 河北环境科学, 2011.  
Zhu Huan, Tian Zaifeng, Zhao Zhiliang, et al. Study on pollution reduction technology of livestock and poultry in Baiyangdian Lake[C]//Seventeenth Annual Meeting of the Environmental Science Society of Five Provinces and Municipalities in North China. Taiyuan: Hebei Environmental Sciences, 2011.
- [63] 杨瑞祥, 侯保灯, 鲁帆, 等. 雄安新区水资源承载力分析及提升途径研究[J/OL]. (2001-03-16) [2001-09-20]. <http://r.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=&dbname=CAPJLAST&filename=WJ20190416000&pcode=SS-TT>.
- Yang Ruixiang, Hou Baodeng, Lu Fan, et al. Preliminary analysis and promotion of water resources carrying capacity for Xiongan New Area[J/OL]. (2001-03-16) [2001-09-20] <http://r.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=&dbname=CAPJLAST&filename=SJWJ20190416000&pcode=SS-TT>.
- [64] 杨柳, 逢勇, 李幸. 引黄入冀补淀工程对地表水环境影响预测[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 131-136.  
Yang Liu, Pang Yong, Li Xing. Prediction of effect of Yellow River-to-Baiyangdian Water Transfer Project on surface water environment[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 131-136.
- [65] 李上达, 寇建林. 白洋淀污染成因及对策[J]. 河北水利, 2007(7): 36.  
Li Shangda, Kou Jianlin. Causes and countermeasures of pollution in Baiyangdian Lake[J]. Hebei Water Resources, 2007(7): 36.
- [66] 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 Zhaoning, Zhao Wenji. Analysis of driving forces of baiyangdian wetland evolution during 1984-2013[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(2): 499-507.
- [67] 张帆. 白洋淀优势沉水植物对富营养化水体净化规律及影响效应的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.  
Zhang Fan. Study on the regular pattern of purification from eutrophic water in Baiyangdian Lake by Potamogeton pectinatus[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012.
- [68] 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 Linyu, 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.  
[69] 任文君. 沉水植物对白洋淀湿地环境净化效果的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.

Ren Wenjun. Purification efficiency of submerged macrophytes for the wetland environment in Baiyangdian Lake [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.

## Water environmental quality of Baiyangdian Lake and its treatment and protection countermeasures

LI Linlin<sup>1,2</sup>, WANG Guoqing<sup>3</sup>, QIN Pan<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>, WAN Zhengfen<sup>1</sup>, AI Shaobi<sup>1</sup>, CHENG Yongqian<sup>1</sup>, LU Shaoyong<sup>1,2\*</sup>

1. State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongting, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Beijing 100012, China
2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
3. Chinese Society for Environmental Sciences, Beijing 100082, China

**Abstract** According to previous study the ecological environment of Baiyangdian Lake has been destroyed and the reasons for the loss of self-purification and ecological restoration ability are complicated, including construction of dams and reservoirs, industrial wastewater and domestic sewage flowing into the lake, regional aquaculture, tourism development, etc. On the other hand, the construction of Xiong'an New District closely around Baiyangdian will make a potential pollution contribution. In view of the present situation of Baiyangdian ecological environment and the cause of water deterioration, in order to restore the ecological self-purification and recycling ability of the Lake, the countermeasures of pollution source control and ecological protection are put forward.

**Keywords** Baiyangdian Lake; water environmental quality; environmental treatment ●



(责任编辑 傅雪)