白洋淀生态环境的演变

陈博, 赵立宁*, 董四君*

河北大学生命科学学院, 保定 071002

* 联系人, E-mail: liningzhao@hbu.edu.cn; sjdong@hbu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-07; 接受日期: 2021-07-05; 网络版发表日期: 2021-09-15

国家自然科学基金(批准号: 21777158)和科技部重点专项(批准号: 2018YFE0103300)资助

摘要 白洋淀位于河北省中部, 是海河平原上最大的湖泊, 现存有大小淀泊143个, 享有“华北之肾”“华北明珠”等赞誉. 白洋淀目前水体处于中度污染、轻度富营养化状态, 大部分地区水质达地表水IV类标准且季节性变化明显. 结合已有调查研究数据、历史文献等, 对白洋淀近70年来的生态环境演变进行了详尽阐述. 随着工业、经济的快速发展, 自20世纪50年代以来, 淀区生态环境受到严重破坏. 白洋淀沉积物中重金属Cd污染由20世纪的中度潜在风险等级发展为重度潜在生态风险等级; 府河中可被检测到的微塑料、抗生素含量和种类逐年增加; 随着环境因子的改变、人类活动的增加, 白洋淀中本土植物、动物及微生物群体的多样性、丰度等情况均受到影响. 本文通过探讨白洋淀中植物、动物及微生物的多样性及丰度等情况, 并结合白洋淀中污染物的分布特征及来源, 解析了环境因素对其生态效应造成的影响, 为白洋淀污染治理及生态服务功能提升提供了科学数据及理论支持.

关键词 白洋淀, 生态环境, 微塑料, 抗生素, 重金属

1 白洋淀的总体概况

白洋淀(38°44'~38°59'N, 115°45'~116°06'E)位于太行山前永定河和滹沱河冲积扇交汇处的扇缘洼地上^[1], 属海河流域大清河南支水系, 是华北地区最大的淡水湖泊. 其主要接纳瀑河、唐河、漕河、潞龙河、孝义河、清水河、府河、萍河及白沟引河九大河流入湖, 后经海河、大清河汇入渤海(图1). 淀区正常蓄水量4亿吨, 湿地总面积约366平方千米, 呈西北高、东南低地势, 海拔跨度约2500 m^[2,3]. 流域四季分明, 属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候^[3~5], 年平均

温度为12.82℃、年平均降水量约524.8 mm, 降水多集中在夏季. 据统计, 20世纪50~90年代期间, 白洋淀年平均入淀水量分别为18.27, 17.31, 11.43, 1.47和8.47亿立方米, 整体呈下降趋势, 干淀的现象多次出现^[6~9]; 1997~2010年间, 该流域连续14年的3年滑动平均值为负值, 出现极端干旱现象, 持续时间约178个月, 1988年大雨使白洋淀湖区恢复. 白洋淀水体呈碱性, pH值范围7.8~8.5^[10]; 淀区沉积物呈中性偏碱性并具备弱还原性, 总氮(total nitrogen (TN)), 1608.04~2350.68 mg/kg)、总磷(total phosphorus (TP)), 363.84~2439.62 mg/kg)、有机质(11.42~21.06 g/kg)含量在我

引用格式: 陈博, 赵立宁, 董四君. 白洋淀生态环境的演变. 中国科学: 生命科学, 2021, 51: 1274–1286

Chen B, Zhao L N, Dong S J. Evolution of the ecosystem in Baiyangdian Lake (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2021, 51: 1274–1286, doi: [10.1360/SSV-2021-0306](https://doi.org/10.1360/SSV-2021-0306)

图 1 白洋淀整体水系图. S1: 白沟河; S2: 南拒马河; S3: 萍河; S4: 瀑河; S5: 漕河; S6: 唐河; S7: 孝义河; S8: 潞龙河; S9: 府河; S10: 赵王新河

Figure 1 Distribution of river system in Baiyangdian Lake. S1: Baigou River; S2: South Juma River; S3: Ping River; S4: Pu River; S5: Cao River; S6: Tang River; S7: Xiaoyi River; S8: Zhulong River; S9: Fu River; S10: Zhaowangxin River

国湖泊中处于较高水平^[2]. 据生态环境部2020年8月公布的数据显示, 白洋淀目前的水体处于中度污染、轻度富营养化状态. 淀区水质从入口到湖心呈现逐渐变好的趋势, 大部分地区水质达地表水IV类标准且季节性变化明显.

2017年4月1日, 中共中央、国务院印发通知决定设立河北雄安新区, 新区在建设的过程中要突出生态优先、绿色发展的理念^[11], 打造优美的生态环境, 建设蓝绿相间、文明友好的生态城市^[12]. 河北省水利厅先后印发了《白洋淀生态补水工作方案》《白洋淀入淀河流生态环境流量方案》以及《白洋淀上游河道水量调度方案》, 建立了多水源的生态补水机制; 制定了《河北雄安新区规划纲要》《京津冀协同发展六河五湖综合治理与生态修复总体方案》以及《白洋淀生态环境治理和保护规划(2018-2035年)》等方案, 确定了白洋淀生态水位目标. 新区的设立, 是恢复白洋淀生态环境重大的历史机遇, 白洋淀作为新区的核心水系以及后花园, 是雄安新区规划建设的重中之重.

2 白洋淀的污染物

2.1 白洋淀水质

20世纪50年代, 白洋淀区域水质清澈、水量丰富、水生动植物种类繁多. 60年代开始, 随着保定市工业的快速发展, 入淀河流府河的发源地日趋枯竭, 上游的补充水源也逐渐消失. 大量市政污水和未经处理的化纤、造纸、石油、化工、印染废水等工业废水的排入, 使得淀区的生态环境受到了严重破坏. 2015年, 白洋淀入淀区域化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)总量约11585.7吨; TP入淀总量约342.8吨; 氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)年入淀总量约为534.5吨^[13]. 2018年, 白洋淀水质检测结果大部分为劣V类指标, 超过其限制指标的1.76~2.35倍. 除TN外, 主要污染因子是COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$. 不同月份各采样点中劣V类水体所占的比例最大, 约54.17%, V类水体所占比例约为12.5%, IV类水体所占比例为25%, III类水体所占比例为8.33%. 府河水质呈季节性变化, 在4月和7月份, 府河水体中TN超标倍数最大; 然而在10月份, 府河综合水质全年最

优^[14]。造成这一现象的原因可能是农业面源污染, 耕种时化肥、农药的大量使用, 导致过多的氮、磷元素进入水体^[15]。从上游山区到山区平原区, 白洋淀地下水的硝酸盐浓度呈现增加的趋势, 主要与人类的行为和活动有关, 如厕所粪污水以及农田化肥的过量使用^[16,17]。

2.2 白洋淀新兴污染物的研究

(1) 白洋淀中重金属的研究情况。湖泊区域的重金属污染程度可以通过检测沉积物中重金属含量来体现^[18]。在全国各湖泊中, 滇池和洱海重金属含量处于较高水平, 白洋淀、太湖、洞庭湖重金属含量次之(图2)^[19-23]。近年来, 白洋淀沉积物中重金属Cu、Ni、Cr的含量相对稳定; Zn和Pb在2008年前后达到峰值, 在此之后处于下降的趋势, 这可能与当地企业的迭代以及近些年白洋淀多次补水有关^[19,24]。白洋淀沉积物中重金属Cd污染极为严重, 潜在生态风险系数较高, 在2000年以前风险系数均值为47.84, 处于中度潜在生态风险等级; 在2000~2010年期间风险系数均值为119.75, 处于较重潜在生态风险等级; 在2010年之后风险系数达到了152.09, 处于重度潜在生态风险等级^[25]。在世界卫生组织确立的17个优先研究的食品污染物中, Cd排第三位, 其可随食物链传递并容易在生物体内蓄积, 具有隐蔽性和不可逆性等特点^[26], 被视为水环境污染物中最危险的物质之一, 且水生生物对Cd有较强的蓄积能力^[27]。目前对于白洋淀重金属镉的研究较少, 但对于Cd的治理迫在眉睫。

(2) 白洋淀中微塑料的研究情况。微塑料(microplastics, MPs, 粒径<5 mm)是一种新型且较为持久的环境污染物, 微/纳米塑料在全世界范围水环境中有着广泛的分布^[28,29]。孝义河和府河属于白洋淀的两大支流, 其微塑料丰度在我国主要河流中处于相对较高水平, 远高于太湖、北江、南矾山等地(表1)^[30-45]。目前府河中已被检测出5种微塑料, 分别为聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、聚酰胺(polyamide plastic, PA)和聚苯乙烯(polystyrene, PS)。白洋淀府河沉积物中MPs的平均丰度为(558.4±233.3)个/kg, 最大丰度值达1049个/kg。依据MPs的形态特征, 可将府河入淀口段沉积物中的MPs形态划分为碎片状、纤维状、薄膜状和球状; 丰度最高的MPs为碎片

图2 我国部分湖泊重金属含量^[19-23]
Figure 2 Heavy metal content of some lakes in China^[19-23]

表1 微塑料在我国主要河流分布情况
Table 1 Distribution of microplastics in major rivers in China

名称	沉积物中微塑料丰度	参考文献
孝义河	820~1280个/kg	[30]
府河	673~1333个/kg	[30]
太湖	11~234.6个/kg	[31]
青海湖	50~1292个/m ²	[32]
乐安河	1121~2871个/kg	[33]
象山湾	1739±2153个/kg	[34]
鄱阳湖口与长江连通段	356~1452个/kg	[35]
滇池	317.92~723.23个/kg	[36]
湛江湾潮滩	61~989个/m ²	[37]
北运河	(120±11)~(268±31)个/kg	[38]
青岛海水浴场	1.91×10 ³ ~4.35×10 ³ 个/m ²	[39]
黄海桑沟湾潮滩	14.0~1246.8个/kg	[40]
连云港海州湾	(0.33±0.26)个/g	[41]
海南东部	8~370个/kg	[42]
赣江枯、丰水期	10~1280个/kg、20~1150个/kg	[43]
黄河	15~615个/kg	[44]
黄浦江	(35.46±8.7)~(74.22±15.2)个/kg	[45]

状, 占总数的66.1%; 粒径为0.1~0.5 mm的MPs占比最大(44.7%), 其次是0.5~1 mm的MPs(30.0%), MPs被鱼等水生生物摄入后, 可以被动物组织吸收^[46,47]。现有调查结果表明, 府河入淀口沉积物中MPs的数量分布与该区域的人口密度以及人类活动等环境特点密切相关^[48]。

新区设立以来, 在“引黄入冀补淀”工程、上游水库补水等措施的实施下, 白洋淀水质得到了很大程度改善。然而通过补水换水办法难以清除湿地沉积物和周边农田的MPs污染物, 且微/纳米塑料污染仍可能会

加剧。因此,在雄安新区建设初期阶段,对区域内MPs的地理分布特征和生物转化规律进行全面调查,以及对MPs的生态毒理效应^[49,50]、摄入的途径、毒性靶点进行的科学研究是新区实现生态文明建设的一个十分重要的需求。

(3) 白洋淀中抗生素的研究情况. 我国抗生素产量达12万吨/年,未被机体吸收的抗生素母体化合物或代谢产物排出机体^[51-53],最终进入环境^[54]. 目前已在白洋淀水体中检测出的有机污染物种类高达42种,其中70%属于有机或医药的合成原料及中间体^[14]. 河北省作为我国重要的医药大省,是全国的医药加工和制造基地^[55,56]. 据统计,河北省抗生素原料药产量达37.7万吨/年,约占全国总产量的32.1%^[57]. 大量未经有效处理的抗生素废水进入淀区,水体沉积物和生物体内均已检出抗生素^[58]. 府河水体中抗生素含量最高,大约为588.56~1840.99 ng/L;淀区近岸及旅游区抗生素含量次之,大约为15.90~432.06 ng/L;淀中水体中的抗生素含量最低,由此说明府河水体中的抗生素可能是白洋淀地区污染来源之一^[58]. 喹诺酮类抗生素(quinolones, QNs)通过抑制细菌体内的DNA复制,达到治疗、预防畜禽和水生生物疾病的目的. 白洋淀水体中QNs的质量浓度范围为153.39~1550.07 ng/L^[59],高于巢湖^[60]、大通湖^[61]、洪湖^[62]、鄱阳湖^[63]以及长江南段^[64]大部分水域和太湖贡湖湾^[65]. 在白洋淀水体中共检测出10种喹诺酮类抗生素,分别为吡哌酸(pipemidic acid, PIP)、马波沙星(marbofloxacin, MAR)、氟罗沙星(fleroxacin, FLE)、氧氟沙星(ofloxacin, OFL)、诺氟沙星(norfloxacin, NOR)、环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)、恩诺沙星(enrofloxacin, ENR)、奥比沙星(orbifloxacin, ORB)、恶唑草酸(oxolinic acid, OXO)、氟甲喹(flumequine, FLU),其含量情况见图3^[59]. 水体中总QNs与周围环境有密切的联系,在大淀周围大量的水产养殖,含抗生素兽药的滥用也是白洋淀水体中抗生素的主要来源。

3 白洋淀中本土植物的研究情况

3.1 白洋淀中的浮游植物

浮游植物是水环境中主要的生产者,在食物链中有着不可替代的作用. 所处生活条件的改变可能会影响其群落组成结构. 绿藻门是白洋淀水域中最有代表

图3 白洋淀水体中喹诺酮类抗生素含量^[59]

Figure 3 Quinolones antibiotic species detected in the water of Baiyangdian Lake^[59]

性的浮游植物类群;硅藻门是白洋淀中净水区域和养殖区域第二优势类群的浮游植物;蓝藻门是白洋淀临村落区的第二优势类群^[66]. 1958~2020年间,白洋淀浮游植物的物种数量整体呈下降趋势^[8]. 1984年,由于入淀水量锐减、淀内水大量蒸发,白洋淀出现了干淀的现象,水生生物几乎灭绝. 随后,由于持续的大暴雨以及入淀河流上游山洪的出现,白洋淀水量再一次增加,白洋淀内浮游植物的种类和数量均达到干淀前的水平^[67]. 1990~2013年,白洋淀浮游植物物种数锐减且逐渐由硅藻门转变为蓝、绿藻门,可能是工农业的快速发展使得大量的未经处理的污染物和营养物质排入水体中所导致. 截至2018年,白洋淀中浮游植物总计为102种,其中硅藻门的比例有所增加,而蓝、绿藻门呈现下降趋势^[8].

3.2 白洋淀中沉水植物

湖泊水位的异常变化可以干扰沉水植被的丰富度^[68]. 沉水植物的种类随着水位降低而减少,物种的丰富度、均匀性增加;在高水位条件下,则呈现相反的趋势^[69,70]. 恢复沉水植物的关键是改善限制其生活的环境因子,例如,在后海^[71]、太湖^[72]和滇池^[73]等湖泊对沉水植物进行的水下光场变化恢复实验,已取得了较好的效果. 白洋淀水下光衰减系数的空间分布均呈东低西高的趋势,这与总悬浮物(total suspended solid, TSS)、叶绿素a(*Chl.a*)空间变化趋势一致. 受人为干扰越大的区域光衰减系数越高,受人为干扰较小的区域,则与之相反^[74]. 当水环境发生恶化时,沉水植物也具有一定的适应性,例如,在水体中氮、磷含量过多的情况下,沉水植物会在体内产生抗氧化酶^[75]和形态重塑来抵御环境对其造成的危害^[76],大多数的沉水植

物即使在高浓度的氮、磷环境下也能很好地生长, 但是当氮、磷浓度过高时, 水体富营养化可对其生长产生负面效应, 导致沉水植物、浮游植物及无脊椎动物等数量失衡^[75,77]。健康的湖泊生态系统应具备维持植物多样性及丰度的功能, 这有利于在水位波动的情况下维持生态系统的稳定。在浅水湖泊的湿地中, 水位的剧烈波动或大幅度波动可能会淹没植物, 对沉水植物的物种多样性和覆盖率产生不利影响^[78]。由于水位波动幅度较大, 湖泊中植物的物种丰富度降低^[79], 而中低水位波动的湖泊则呈现出相反的现象^[80]。因此, 在白洋淀的水体治理中应该考虑水位和水的波动性对沉水植物的影响。

3.3 白洋淀中挺水植物

挺水植物一般生活在浅水中, 体型较大, 根和茎通常在水下泥土中^[81]。挺水植物主要为单子叶植物, 如芦苇、美人蕉、风车草等^[82]。挺水植物能够吸收水体中的污染物和营养盐, 抑制藻类生长^[83], 但深水对多种挺水植物的生长和繁殖有抑制作用^[84,85]。在白洋淀中, 荷的数量在挺水植物中占较大比例。荷在水较深的地方仍然保持密集分布, 可能是在一定范围内水的深度与挺水植物的数量呈现正相关。淀区水深小于1.55 m的范围内, 随着水深的增加, 挺水植物的生物量呈现出增加的趋势^[86]。目前对于白洋淀挺水植物的研究较少, 缺少挺水植物物种的数量调查等相关研究。

4 白洋淀中本土动物的研究情况

4.1 白洋淀中浮游动物的研究情况

浮游动物的重要作用体现在物质循环和能量流动等方面。20世纪90年代初, 白洋淀枝角类动物大约有24~46种^[87~89]。淀区水产养殖业发达, 大多数鱼苗从外地引进, 导致新的浮游动物出现。其中, 轮虫类种类数量最多, 为33种, 占整体种类的64.46%^[90]。浮游动物的生物密度和生物质量随着TN、TP和NH₃-N含量的增高而增加, 最低的地点是采蒲台, 其次是枣林庄, 最高的是南刘庄。在王家寨和烧车淀两个地点, 浮游动物的生物质量与其他点趋势相同, 生物密度却与之相反。TP与浮游动物生物密度和生物质量无相关性, 而NH₃-N对浮游植物的作用却与其相关^[91]。

4.2 白洋淀中底栖动物的研究情况

底栖动物通常是成群生活在水体中, 全部或者大部分时间栖息在海底。它们一般位于坚硬的基体和松软泥沙的基底中。有一部分底栖动物是定居生活, 也有部分底栖动物是附着在植物或者其他底栖动物的体表上。1958~1994年间, 白洋淀底栖无脊椎动物数量呈先增加后减少的趋势^[8,92]。2018~2019年持续的大量补水使得白洋淀水质较好, 底栖动物物种数有所回升, 但是河道清淤工程也对底栖动物产生了一定影响^[93]。底栖生物有加速底质分解, 将内源污染物直接转换成生物能或细胞蛋白, 稳固底泥的物理、化学性质的作用。适量放置贝类可以缓解白洋淀水体中内源污染的情况。在中、富营养化水体的交界处可以增加河蚬等贝类数量, 同时合理控制捕捞强度, 可以更好地提高白洋淀的经济效益、生态效益和社会效益^[94]。

4.3 白洋淀鱼类的研究情况

在全世界范围内淡水鱼类总计有9966种, 其中我国淡水鱼类有1043种^[95], 占世界淡水鱼类资源的10.47%。1958年, 白洋淀水域中鱼类共有54种; 70年代, 淀内新增鲢科、鳊科等鱼类, 鲤鱼数量大约占白洋淀鱼类总数的66.0%^[96]。20世纪中期, 白洋淀上游修建了大、中、小型水库, 阻截顺河入淀的鱼类, 造成入淀鱼类数量减少; 同时, 白洋淀下游修建了拦河闸, 阻止溯河鱼类进入白洋淀。21世纪, 由于旅游业的大规模发展, 白洋淀的栖息环境进一步恶化, 白洋淀水体被严重污染, 鲫鱼的数量增加成为白洋淀中鱼类的优势物种。2001~2002年调查发现, 白洋淀共有鱼类33种^[8]。鳊鱼、乌鳢、鲤、鲢、鳙等进行人工养殖的鱼类, “围网隔淀”似“划地为牢”的养殖方式, 在一定程度上破坏了白洋淀的自然环境; 养殖过程中无规划的投放饵料也使得水体被严重污染。2015年, 白洋淀中鱼类种数降至23种, 网箱养殖的经济鱼类鲤科仍为主要优势种, 大约占整体种类35%。近年来青鳉的出现说明白洋淀的生态栖息地正在逐渐好转。

4.4 白洋淀中鸟类的研究情况

根据2017年8月和2018年2月对雄安新区鸟类种数的调查结果, 白洋淀现存鸟类共计72种, 其中1种是国家Ⅰ级重点保护鸟类, 5种是Ⅱ级重点保护鸟类, 3种是

CITES公约附录 II 的鸟种^[97]. 白洋淀夏候鸟的种类处在波动的状态, 这与白洋淀的生态环境密切相关^[98]. 以往对白洋淀鸟类调查比较少, 因此在雄安新区建设的过程中应该加大对本底生物调查的力度.

5 白洋淀中微生物研究的情况

5.1 白洋淀水体与微生物的关系

微生物能够通过同化和异化作用影响白洋淀地区水环境中无机盐、有机污染物等物质的分布、迁移和转化, 从而对水环境中的微生物群落结构产生显著的影响^[99]. 外源污染以及内源污染导致白洋淀地区水体严重的富营养化及微生物群落的改变. 变形菌门中包含多数与氮、磷代谢相关的菌群, 在氮、磷的代谢及转化过程中发挥着不可替代的作用^[100]. 王鹏等人^[101]研究了水体黑臭前后微生物的种群变化, 发现硫酸盐还原菌为优势菌. 白洋淀水域生活污水和养殖废水的输入是淀内正常水体朝黑臭水体转变的主要原因. 通过测定后壁菌的数量可以体现河流被污染的情况, 人类的社会活动以及含氮磷污染物大量的排放, 为后壁菌门菌群提供了良好的生活环境, 对白洋淀的水体造成了破坏.

5.2 白洋淀养殖区、土壤与微生物的关系

养殖区是白洋淀中典型的功能分区. 由于白洋淀中南部存在长时间的网箱养殖历史, 饵料的过度投放造成了严重的内源污染^[102,103]. 三角帆蚌可以明显减少水体中蓝细菌数量并增加其他微生物的生态位, 从而增加水体中微生物的多样性和功能菌群的丰度. 三角帆蚌能够较好地控制藻类的过度繁殖, 使水体中脱氮除磷功能菌群的数量增加, 且对于修复富营养化风险较大的水体有显著的效果^[104]. 因此, 在白洋淀地区可以适当养殖三角帆蚌来控制藻类的数量. 对养殖区微生物的特征进行研究, 有利于分析该区域氮、磷等元素迁移转化的作用机制. 白洋淀湿地植物根际土壤电子传递系统不仅受水位和气温等环境因素的影响, 还可能与土壤中TN和 NH_4^+ 的含量有密不可分的关系

^[105]. 在研究白洋淀湿地土壤因子变化时, 除了考虑环境因素外, 还应充分考虑土壤微生物等一些敏感指标的变化, 从而为评价土壤微生物群落和土壤质量变化提供理论依据.

6 展望

自20世纪50年代以来, 随着城市化、工业化进程加速以及经济的快速发展, 工业废水和生活污水排放量增多, 其携带的各类污染物质通过多种途径汇聚到湖泊等水环境中, 造成严重危害. 一方面, 环境因素的变化、工业经济的快速发展及人类行为活动的干预, 造成白洋淀生态环境被破坏; 另一方面, 随着雄安新区的建立, 白洋淀作为新区的核心水系, 淀区水环境质量关系着新区的建设, 更关系着京津冀协同发展战略的稳步推进. (i) 结合历史数据分析白洋淀重金属Cd、抗生素、微塑料等污染物的变化趋势, 结果表明, 各类污染物质被检测浓度逐年增加, 表现出较强的生态危害, 是主要的污染因子, 应加强重金属、抗生素、微塑料等污染物质的入湖污染控制和底泥污染治理; (ii) 白洋淀区域的污染状况与人类活动密切相关, 应考虑人口密度和人类活动强度等环境特点对淀区表层水体和纵向沉积物中污染物的影响, 加强对入淀河周围甚至整个淀区生活垃圾、工业固体废弃物和医疗废物管理以及淀区旅游餐饮污染治理; (iii) 白洋淀区域在种植时使用的肥料以及喂养鱼类饲料中各元素均可对白洋淀水体产生影响, 应加大科学种植、养殖的宣传与推广, 集中开展水产养殖等设施的清洗; (iv) 应加强对饮用水水源地的保护及淀区工业废水和生活污水排放的管控, 加强开展水污染应急处理工作, 及时监测淀区水质变化, 防范水污染事故的发生; (v) 加大科研投入, 系统地解析白洋淀流域的重金属污染时空分布特征, 分析新型污染物等对白洋淀流域微生物群落时空分布的影响, 阐明微生物群落对新污染物的响应机制, 为白洋淀流域的生态环境治理提供科学依据, 并为白洋淀生态环境的修复及生态服务功能的提升提供参考.

参考文献

- 1 Wen Z G. Crisis and solution on environmental protection for wetland of Baiyangdian Lake (in Chinese). *Environ Protect*, 2003, 9: 33–35 [温志

- 广. 白洋淀湿地生态环境面临的危机及解决措施. 环境保护, 2003, 9: 33–35]
- 2 Zhang Z R. Contamination characteristics and release mechanism of sediments in Lake Baiyangdian (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Baoding: Hebei University, 2013 [张振冉. 白洋淀沉积物污染特征及扰动释放研究. 硕士学位论文. 保定: 河北大学, 2013]
 - 3 Li M, Yan S R, Liu Q, et al. Analysis on streamflow processes response to extreme meteorological drought in the Baiyangdian Basin, China (in Chinese). Environ Eng, 2020, 38: 14–20 [李苗, 严思睿, 刘强, 等. 白洋淀流域径流过程对极端气象干旱的响应分析. 环境工程, 2020, 38: 14–20]
 - 4 Liu M F, Gao Y C, Gan G J. Analysis of annual runoff trends and meteorological influences in Baiyangdian watershed (in Chinese). Resour Sci, 2011, 33: 1438–1445 [刘茂峰, 高彦春, 甘国靖. 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析. 资源科学, 2011, 33: 1438–1445]
 - 5 Chen Y. Hydrochemical characteristics and hydrogeochemical processes of groundwater-pore water in the plain area of Baiyangdian Basin (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: China University of Geosciences, 2018 [陈毅. 白洋淀流域平原区地下水—孔隙水的水化学特征和水文地球化学过程. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2018]
 - 6 Yang Y, Yin X, Yang Z, et al. Detection of regime shifts in a shallow lake ecosystem based on multi-proxy paleolimnological indicators. Ecol Indic, 2018, 92: 312–321
 - 7 Yang C X. Analysis of the variation of Baiyangdian water inflow and the influencing factors (in Chinese). Groundwater, 2010, 32: 110–112 [杨春霄. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析. 地下水, 2010, 32: 110–112]
 - 8 Yi Y J, Lin C Q, Tang C H. Trends in hydrological, environmental and ecological evolution of Baiyangdian since 1960s (in Chinese). Lake Sci, 2020, 32: 1333–1347+1226 [易雨君, 林楚翹, 唐彩红. 1960s以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势. 湖泊科学, 2020, 32: 1333–1347+1226]
 - 9 Ren W, Xu G B. Natural precipitation inflow of Baiyangdian based on GA-Grey waveform prediction model (in Chinese). South-North Water Divers Water Conserv Sci Technol, 2017, 15: 9–14+49 [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. 南水北调与水利科技, 2017, 15: 9–14+49]
 - 10 Sun T Y. Study on the health evaluation of Baiyangdian ecosystem (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 [孙天翊. 白洋淀生态系统健康评价研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2019]
 - 11 Li P Q, Yuan X Y, Xu Y M, et al. Research on the problems and countermeasures of ecological security pattern in Xiongan New Area (in Chinese). Pract Rural Technol, 2020, 11: 185–186 [李佩琪, 袁晓雨, 徐艺萌, 等. 雄安新区生态安全格局存在问题及对策研究. 农村实用技术, 2020, 11: 185–186]
 - 12 Yang J Y, Wu T, Pan X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiongan New Area based on remote sensing ecological index (in Chinese). J Appl Ecol, 2019, 30: 277–284 [杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估. 应用生态学报, 2019, 30: 277–284]
 - 13 Chang L P. Research on water pollution characteristics of Baiyangdian and water quality enhancement technology based on plant purification (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 [常利朋. 白洋淀水质污染特征及基于植物净化的水质提升技术研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2019]
 - 14 Chen J. Research on water quality characteristics and screening of toxic organic pollutants in Baoding Fu River (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Baoding: Hebei University, 2019 [陈杰. 保定府河水质特征研究及有毒有机污染物筛查. 硕士学位论文. 保定: 河北大学, 2019]
 - 15 Yang J, Stokol M, Kroeze C, et al. Nutrient losses to surface waters in Hai He basin: a case study of Guanting reservoir and Baiyangdian lake. Agric Water Manage, 2019, 213: 62–75
 - 16 Wang S Q, Tan K D, Zheng W B, et al. Regional variation in the distribution and sources of nitrate in shallow groundwater of Baiyangdian basin (in Chinese). Chin J Ecol Agric, 2021, 29: 230–240 [王仕琴, 檀康达, 郑文波, 等. 白洋淀流域浅层地下水硝酸盐分布及来源的区域分异特征. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29: 230–240]
 - 17 Xin J, Liu Y, Chen F, et al. The missing nitrogen pieces: a critical review on the distribution, transformation, and budget of nitrogen in the vadose zone-groundwater system. Water Res, 2019, 165: 114977
 - 18 Xiang Y X. Redox characteristics of Baiyangdian surface sediments and the transformation characteristics of heavy metals and nitrogen forms (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020 [向语兮. 白洋淀表层沉积物氧化还原特征及重金属、氮形态转化特征研究. 硕士学位论文. 北京: 中国矿业大学, 2020]
 - 19 Li J, Song P, Li H, et al. Regional characteristics and ecological risk evaluation of heavy metals in sediments of northern lakes and reservoirs (in Chinese). China Environ Sci, 2020, 40: 4927–4935 [李捷, 宋鹏, 李慧, 等. 北方湖库沉积物重金属区域特征及生态风险评价. 中国环境科学, 2020, 40: 4927–4935]

- 2020, 40: 4927–4935]
- 20 Liu W, Jilili A, Ma L. Elemental geochemical characteristics of surface sediments in Bosten Lake and evaluation of heavy metal pollution (in Chinese). *J Earth Environ*, 2019, 10: 128–140 [刘文, 吉力力·阿不都外力, 马龙. 博斯腾湖表层沉积物元素地球化学特征及重金属污染评价. *地球环境学报*, 2019, 10: 128–140]
 - 21 Jiang H M, Zheng X P, Li W. Heavy metal sources and ecological risk assessment of major lakes in China (in Chinese). *China Popul-Resource Environ*, 2018, 28: 108–112 [姜会敏, 郑显鹏, 李文. 中国主要湖泊重金属来源及生态风险评估. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28: 108–112]
 - 22 Wang W, Fan X K, Huang C G, et al. Monitoring and comparative analysis of heavy metals in water bodies of five major lakes in Jiangsu Province (in Chinese). *Lake Sci*, 2016, 28: 494–501 [王伟, 樊祥科, 黄春贵, 等. 江苏省五大湖泊水体重金属的监测与比较分析. *湖泊科学*, 2016, 28: 494–501]
 - 23 Liu, J N. Contamination characteristics and evaluation of heavy metals in sediments of five major freshwater lakes in China (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: Zhongnan University of Forestry Science and Technology, 2011 [刘嘉妮. 中国五大淡水湖沉积物中重金属的污染特征及评价. 硕士学位论文. 长沙: 中南林业科技大学, 2011]
 - 24 Wang L C, Hou B D, Wang X, et al. Analysis of the encounter between the abundance of Baiyangdian recharge water source and the high and low recharge demand (in Chinese). *Water Resour Hydropower Technol*, 2021, 52: 79–87 [王丽川, 侯保灯, 王欣, 等. 白洋淀补水水源丰枯与补水需求高低遭遇分析. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52: 79–87]
 - 25 Mao X, Liu L J, Song L, et al. Ecological and environmental evolution processes and influencing factors of Baiyangdian in the past 70 years (in Chinese). *Earth Sci*, 2020, doi: 10.3799/dqkx.2020.203 [毛欣, 刘林敬, 宋磊, 等. 白洋淀近70年生态环境演化过程及影响因素. *地球科学*, 2020, doi: 10.3799/dqkx.2020.203]
 - 26 Cui Z G, Yuan X Z, Cui Y, et al. Bioconcentration and release patterns of Pb and Cd in the scallop *Patinopecten yessoensis* (in Chinese). *Progr Fish Sci*, 2015, 36: 116–124 [崔正国, 苑旭洲, 崔毅, 等. 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)对铅和镉的生物富集与释放规律. *渔业科学进展*, 2015, 36: 116–124]
 - 27 Wang L J, Wu C Y. Morphological analysis of cadmium in aquatic products and its hazards (in Chinese). *Fujian Fish*, 2014, 36: 78–84 [王丽娟, 吴成业. 水产品中镉的形态分析及其危害. *福建水产*, 2014, 36: 78–84]
 - 28 Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the “Plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 7137–7146
 - 29 McCormick A, Hoellein T J, Mason S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environ Sci Technol*, 2014, 48: 11863–11871
 - 30 Shan S W. Microplastic distribution in the water environment and fish in Baiyangdian and upstream rivers (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Baoding: Hebei University, 2021 [单世伟. 白洋淀及上游河流环境及鱼类体内微塑料分布研究. 硕士学位论文. 保定: 河北大学, 2021]
 - 31 Su L, Xue Y, Li L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China. *Environ Pollut*, 2016, 216: 711–719
 - 32 Xiong X, Zhang K, Chen X, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake—Qinghai Lake. *Environ Pollut*, 2018, 235: 899–906
 - 33 Zhou L Y, Jian M F, Yu H P, et al. Distribution characteristics of bottom sediment microplastics and their sources in the Le'an River-Poyang Lake section (in Chinese). *J Soil Sci*, 2018, 55: 1222–1232 [周隆胤, 简敏菲, 余厚平, 等. 乐安河—鄱阳湖段底泥微塑料的分布特征及其来源. *土壤学报*, 2018, 55: 1222–1232]
 - 34 Chen M, Jin M, Tao P, et al. Assessment of microplastics derived from mariculture in Xiangshan Bay, China. *Environ Pollut*, 2018, 242: 1146–1156
 - 35 Li W H, Jian M F, Liu S L, et al. Fugitive relationships between microplastics and heavy metal contaminants in sediments of Poyang Lake Lake-Yangtze River (in Chinese). *Environ Sci*, 2020, 41: 242–252 [李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 等. 鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系. *环境科学*, 2020, 41: 242–252]
 - 36 Zhang Q. Fugitive patterns of plastic pollution in the shore, water and sediment of Dianchi Lake (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Kunming: Yunnan Normal University, 2021 [张权. 滇池岸滩、水体及沉积物塑料污染赋存规律. 硕士学位论文. 昆明: 云南师范大学, 2021]
 - 37 Yao S Q, Lin Z X, Feng M J, et al. Characteristics of microplastic pollution in tidal sediments of Zhanjiang Bay (in Chinese). *Guangdong Chem Ind*, 2021, 48: 60–64 [姚思琦, 林宗轩, 冯明骏, 等. 湛江湾潮滩沉积物微塑料污染特征. *广东化工*, 2021, 48: 60–64]

- 38 Hu J M, Zuo J X, Li D, et al. Composition and distribution of microplastics in river water and sediment of urban rivers in Beijing (in Chinese). *Environ Sci*, 2021, doi: 10.13227/jkx.202102107 [胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 等. 北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布. *环境科学*, 2021, doi: 10.13227/jkx.202102107]
- 39 Luo Y D, Lin Q H, Jia F L, et al. Distribution characteristics of microplastics in four seawater bathing sites in Qingdao (in Chinese). *Environ Sci*, 2019, 40: 2631–2638 [罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 等. 青岛4个海水浴场微塑料的分布特征. *环境科学*, 2019, 40: 2631–2638]
- 40 Xiong K X. Study on the characteristics of microplastic pollution in Hai Sanggou Bay and its influencing factors (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019 [熊宽旭. 海桑沟湾微塑料污染特征及其影响因素研究. 硕士学位论文. 舟山: 浙江海洋大学, 2019]
- 41 Li Z, Gao Q M, Yang J L, et al. Distribution characteristics of microplastics in surface waters and sediments of Haizhou Bay, Lianyungang (in Chinese). *Environ Sci*, 2020, 41: 3212–3221 [李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征. *环境科学*, 2020, 41: 3212–3221]
- 42 Zhang Q Z, Diao X P, Xie J, et al. Distribution characteristics of microplastics in water bodies and sediments in mariculture areas of eastern Hainan (in Chinese). *J Hainan Univ (Nat Scie Ed)*, 2020, 38: 159–165 [张钦洲, 刁晓平, 谢嘉, 等. 海南东部海水养殖区水体、沉积物中微塑料的分布特征. *海南大学学报(自然科学版)*, 2020, 38: 159–165]
- 43 Lv Y N. Study on the pollution of microplastics in water and sediment system of Ganjiang River (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Qufu: Qufu Normal University, 2020 [吕雅宁. 赣江水和沉积物体系中微塑料的污染研究. 硕士学位论文. 曲阜: 曲阜师范大学, 2020]
- 44 Gong X L, Zhang D Y, Pan X L. Microplastic pollution and characterization in Yellow River sediments (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2020, 37: 790–798 [龚喜龙, 张道勇, 潘响亮. 黄河沉积物微塑料污染和表征. *干旱区研究*, 2020, 37: 790–798]
- 45 Zhang Y K, Fan L, Li Z J, et al. Distribution of microplastics in tidal sediments of Huangpu River (in Chinese). *J Shanghai Sec Inst Technol*, 2020, 37: 193–199 [张宇恺, 樊丽, 李竹珺, 等. 黄浦江潮滩沉积物中微塑料的分布. *上海第二工业大学学报*, 2020, 37: 193–199]
- 46 Browne M A, Niven S J, Galloway T S, et al. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity. *Curr Biol*, 2013, 23: 2388–2392
- 47 Rochman C M, Hoh E, Kurobe T, et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci Rep*, 2013, 3: 3263
- 48 Zhou Z Y, Wang S Q, Zhang P Y, et al. Abundance and distribution characteristics of microplastics in sediments of Baiyangdian-Fuhe inlet section (in Chinese). *J Environ Eng*, 2021, 15: 360–367 [周泽妍, 王思琦, 张盼月, 等. 白洋淀-府河入淀口段沉积物中微塑料的丰度及分布特征. *环境工程学报*, 2021, 15: 360–367]
- 49 Fan X P. Preliminary investigation of the toxicological effects of polystyrene nanoparticles on mice (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 [范兴培. 聚苯乙烯纳米颗粒对小鼠毒理效应的初步探究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020]
- 50 Chen Y L. Current status of microplastic contamination in suburban vegetable soils in Wuhan and its ecotoxicological study on *Eisenia equi* (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020 [陈玉玲. 微塑料在武汉城郊菜地土壤中的污染现状及其对赤子爱胜蚓的生态毒理研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2020]
- 51 Chen W, Geng Y, Hong J, et al. Life cycle assessment of antibiotic mycelial residues management in China. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 79: 830–838
- 52 Carvalho I T, Santos L. Antibiotics in the aquatic environments: a review of the European scenario. *Environ Int*, 2016, 94: 736–757
- 53 Yang S F, Lin C F, Lin A Y, et al. Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions. *Water Res*, 2011, 45: 3389–3397
- 54 Zhang L, Qin S, Shen L, et al. Bioaccumulation, trophic transfer, and human health risk of quinolones antibiotics in the benthic food web from a macrophyte-dominated shallow lake, North China. *Sci Total Environ*, 2020, 712: 136557
- 55 Liu C Y, Li G. Comparative analysis of the competitiveness of pharmaceutical manufacturing industry in Hebei Province (in Chinese). *Hebei Enterprise*, 2018, 9: 105–106 [刘超颖, 李桂. 河北省医药制造业竞争力分析比较. *河北企业*, 2018, 9: 105–106]
- 56 Guo J C. Research on the evaluation of R&D capability of pharmaceutical manufacturing industry in Hebei Province (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shenyang: Liaoning University, 2018 [郭建超. 河北省医药制造业研发能力评价研究. 硕士学位论文. 沈阳: 辽宁大学, 2018]
- 57 Zhao W F, Bao X L, Zhang Y, et al. Current situation and problems of disposal of fermented antibiotic residues in Hebei Province (in Chinese). *Anhui Agric Sci*, 2013, 41: 12417–12421 [赵卫凤, 鲍晓磊, 张媛, 等. 河北省发酵类抗生素菌渣处置现状及存在的问题. *安徽农业科学*,

- 2013, 41: 12417–12421]
- 58 Li W H, Shi Y L, Gao L H, et al. Study on the contamination level and distribution characteristics of antibiotics in Baiyangdian area (in Chinese). In: Chinese Chemical Society. Abstracts of the 28th Annual Meeting of the Chinese Chemical Society, Session 2. Chengdu. 2012 [厉文辉, 史亚利, 高立红, 等. 白洋淀地区抗生素的污染水平及分布特征研究. 见: 中国化学会. 中国化学会第28届学术年会第2分会场摘要集. 成都. 2012]
 - 59 Shen L N, Zhang L L, Qin S, et al. Study on the characteristics of quinolone antibiotic contamination in Baiyangdian and its correlation with environmental factors (in Chinese). *J Environ Sci*, 2019, 39: 3888–3897 [申立娜, 张璐璐, 秦珊, 等. 白洋淀喹诺酮类抗生素污染特征及其与环境因子相关性研究. *环境科学学报*, 2019, 39: 3888–3897]
 - 60 Tang J, Shi T, Wu X, et al. The occurrence and distribution of antibiotics in Lake Chaohu, China: Seasonal variation, potential source and risk assessment. *Chemosphere*, 2015, 122: 154–161
 - 61 Liu X H, Lu S Y. Characteristics and risks of antibiotic fugacity in surface waters of Datong Lake (in Chinese). *China Environ Sci*, 2018, 38: 320–329 [刘晓晖, 卢少勇. 大通湖表层水体中抗生素赋存特征与风险. *中国环境科学*, 2018, 38: 320–329]
 - 62 Wang Z, Du Y, Yang C, et al. Occurrence and ecological hazard assessment of selected antibiotics in the surface waters in and around Lake Honghu, China. *Sci Total Environ*, 2017, 609: 1423–1432
 - 63 Ding H J, Zhong J Y, Wu Y X, et al. Characteristics of antibiotic pollution and ecological risk analysis of urban lake water bodies in Nanchang City, Poyang Lake Basin (in Chinese). *Lake Sci*, 2017, 29: 848–858 [丁惠君, 钟家有, 吴亦潇, 等. 鄱阳湖流域南昌市城市湖泊水体抗生素污染特征及生态风险分析. *湖泊科学*, 2017, 29: 848–858]
 - 64 Feng M J, Zhang Q, Song N H, et al. Fugitive characteristics and risk assessment of antibiotics in water source water of Nanjing section of Yangtze River (in Chinese). *Environ Sci*, 2019, 40: 5286–5293 [封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 等. 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估. *环境科学*, 2019, 40: 5286–5293]
 - 65 Wu X Y, Zou H, Zhu R, et al. Characteristic analysis and ecological risk evaluation of antibiotic pollution in the waters of Gonghu Bay, Taihu Lake (in Chinese). *Environ Sci*, 2016, 37: 4596–4604 [武旭跃, 邹华, 朱荣, 等. 太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价. *环境科学*, 2016, 37: 4596–4604]
 - 66 Jin L, Li L Y, Zhou Y, et al. Evaluation of phytoplankton communities and water quality in three typical waters of Baiyangdian (in Chinese). *J Hebei Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, 37: 329–336 [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. *河北大学学报(自然科学版)*, 2017, 37: 329–336]
 - 67 Zhang Y K, Tian Y M, Zhang X S. Status of phytoplankton in Baiyangdian (in Chinese). *J Aquat Biol*, 1995, 4: 317–326 [张义科, 田玉梅, 张雪松. 白洋淀浮游植物现状. *水生生物学报*, 1995, 4: 317–326]
 - 68 Randsalu-Wendrup L, Conley D J, Carstensen J, et al. Paleolimnological records of regime shifts in lakes in response to climate change and anthropogenic activities. *J Paleolimnol*, 2016, 56: 1–14
 - 69 Vonesh J R, Buck J C. Pesticide alters oviposition site selection in gray treefrogs. *Oecologia*, 2008, 158: 589
 - 70 Yu L F Y. Responses of the threatened aquatic plant *Ottelia alismoides* to water level fluctuations. *Fund Appl Limnol*, 2009, 174: 295–300
 - 71 Wang S H, Zhao D F, Liao R H. A study on the light intensity and light compensation depth of submerged plants in the backwater of Beijing (in Chinese). *Water Treat Technol*, 2006, 6: 31–33 [王韶华, 赵德锋, 廖日红. 关于北京后海水体光照强度及沉水植物光补偿深度的研究. *水处理技术*, 2006, 6: 31–33]
 - 72 Song Y Z, Wang M, Zhao Q H, et al. Inversion of light compensation depth of submerged plants in Taihu Lake and analysis of influencing factors (in Chinese). *J Agric Environ Sci*, 2011, 30: 2099–2105 [宋玉芝, 王敏, 赵巧华, 等. 太湖沉水植物光补偿深度反演及影响因子分析. *农业环境科学学报*, 2011, 30: 2099–2105]
 - 73 Ren J C, Zhou H, Sun Y T. Vertical distribution of light intensity and light compensation depth of submerged plants in Dianchi (in Chinese). *J Peking Univ (Nat Sci Ed)*, 1997, 2: 76–79 [任久长, 周红, 孙亦彤. 滇池光照强度的垂直分布与沉水植物的光补偿深度. *北京大学学报(自然科学版)*, 1997, 2: 76–79]
 - 74 Yan J, Wang Y, Wang Y B, et al. Phytoremediation technology of Baiyangdian submerged water based on light compensation depth (in Chinese). *J Environ Eng*, 2020, 14: 2853–2865 [严俊, 王颖, 王一博, 等. 基于光补偿深度的白洋淀沉水植物修复技术. *环境工程学报*, 2020, 14: 2853–2865]
 - 75 Xiong H F, Tan Q L, Liu Y L. Physiological response of bittercress under different nutrient status (in Chinese). *J Huazhong Agric Univ*, 2009, 28: 442–445 [熊汉锋, 谭启玲, 刘艳玲. 不同营养状态下苦菜的生理响应. *华中农业大学学报*, 2009, 28: 442–445]

- 76 Short F T. Effects of sediment nutrients on seagrasses: literature review and mesocosm experiment. *Aquat Bot*, 1987, 27: 41–57
- 77 Jones J I, Young J O, Eaton J W, et al. The influence of nutrient loading, dissolved inorganic carbon and higher trophic levels on the interaction between submerged plants and periphyton. *J Ecol*, 2002, 90: 12–24
- 78 Coops H, Beklioglu M, Crisman T L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems—workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 2003, 506–509: 23–27
- 79 Ferreira L V, Stohlgren T J. Effects of river level fluctuation on plant species richness, diversity, and distribution in a floodplain forest in Central Amazonia. *Oecologia*, 1999, 120: 582–587
- 80 Keddy P A, Reznicek A A. Great lakes vegetation dynamics: the role of fluctuating water levels and buried seeds. *J Great Lakes Res*, 1986, 12: 25–36
- 81 Liang S X, Zhang Z R, Wang Y X, et al. Effect of typical water-holding plants on water purification in Baiyangdian (in Chinese). *Sci Technol Eng*, 2013, 13: 3048–3052 [梁淑轩, 张振冉, 王云晓, 等. 白洋淀典型挺水植物净化水质效果. 科学技术与工程, 2013, 13: 3048–3052]
- 82 Huang M. Simulation study on the removal and enrichment of Cu^{2+} in high concentration surface water by tidewater plant ecological floating bed (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chongqing: Chongqing University, 2016 [黄隼. 挺水植物生态浮床对高浓度地表水中 Cu^{2+} 的去除与富集模拟研究. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2016]
- 83 Li J W. Water purification capacity of three native water-holding plants and their application in biofloating islands (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shanghai: East China Normal University, 2010 [李静文. 三种乡土挺水植物水质净化能力及其在生物浮岛上的应用. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学, 2010]
- 84 Yuan G X, Wu A P, Ge D B, et al. Effects of different water depth gradients on the growth and reproduction of four species of water-holding plants (in Chinese). *J Environ Sci*, 2011, 31: 2690–2697 [袁桂香, 吴爱平, 葛大兵, 等. 不同水深梯度对4种挺水植物生长繁殖的影响. 环境科学学报, 2011, 31: 2690–2697]
- 85 Wang Q L, Chen J R, Liu H, et al. Growth response of two species of water-holding plants to water level changes (in Chinese). *J Aquat Biol*, 2012, 36: 583–587 [王秋林, 陈静蕊, 刘晖, 等. 两种挺水植物对水位变化的生长响应. 水生生物学报, 2012, 36: 583–587]
- 86 Wang T T, Cui B S, Liu P P, et al. Influence of floating plants on the distribution of submerged plants and water-holding plants in Baiyangdian (in Chinese). *Wetland Sci*, 2013, 11: 266–270 [王婷婷, 崔保山, 刘佩佩, 等. 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: 266–270]
- 87 Xu M Q, Zhu J. Development of eutrophication in Baiyangdian from changes in zooplankton species diversity (in Chinese). In: *Advances in Biodiversity Research—Proceedings of the First National Workshop on Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization*. Beijing. 1994 [许木启, 朱江. 从浮游动物种类多样性变化看白洋淀富营养化的发展. 见: 生物多样性研究进展——首届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 北京. 1994]
- 88 Shen J R, Song D X, Chen G X. Studies on the Beijing branchiopods (in Chinese). *J Zool*, 1964, 2: 210–224 [沈嘉瑞, 宋大祥, 陈国孝. 北京枝角类的研究. 动物学报, 1964, 2: 210–224]
- 89 Yan S M, Mao W D, Gao Y Q, et al. The branchial hornworms of Baiyangdian in Hebei Province after water storage (in Chinese). *J Zool*, 1992, 4: 8–12 [阎书民, 毛卫东, 高艳芹, 等. 河北省白洋淀蓄水后的枝角类. 动物学杂志, 1992, 4: 8–12]
- 90 Zhu H, Liu X G, Chen X L, et al. Characterization of zooplankton community and water quality evaluation of blowfish sediment (in Chinese). *J Aquat Biol*, 2020, 44: 1313–1321 [朱浩, 刘兴国, 陈晓龙, 等. 鲢鳙淀浮游动物群落特征及水质评价. 水生生物学报, 2020, 44: 1313–1321]
- 91 Xing X G. Community ecology of rotifers, branchiopods and copepods in Baiyangdian (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Baoding: Hebei University, 2007 [邢晓光. 白洋淀轮虫、枝角类、桡足类的群落生态学研究. 硕士学位论文. 保定: 河北大学, 2007]
- 92 Wen L Q. Changes in the water ecology of Baiyangdian and the influencing factors (in Chinese). *Environ Sci*, 1995, S1: 50–52 [文丽青. 白洋淀水生态环境的变迁及影响因素. 环境科学, 1995, S1: 50–52]
- 93 Wang D S, Men B, Zhang M Y. On water-solid interlacing zone and scientific dredging planning in shallow lakes: the case of Baiyangdian in Xiongan New Area (in Chinese). *J Environ Sci*, 2020, 40: 1550–1559 [王东升, 门彬, 张美一. 论浅水湖泊中的水固交错带与科学清淤规划——以雄安新区白洋淀为例. 环境科学学报, 2020, 40: 1550–1559]
- 94 Cai D B, Xiao G H, Zhao C L, et al. Composition of benthic fauna in Baiyangdian sediment and its indication of water quality (in Chinese). *Hebei Fish*, 2010, 3: 27–28 [蔡端波, 肖国华, 赵春龙, 等. 白洋淀底栖动物组成及对水质的指示作用. 河北渔业, 2010, 3: 27–28]
- 95 Chen L, Xie G D, Lu C H, et al. Impacts of hydropower projects on fishes: a case study of Baiyangdian Lake over the recent 50 years (in Chinese). *Resour Sci*, 2011, 33, 8: 1475–1480 [陈龙, 谢高地, 鲁春霞, 等. 水利工程对鱼类生存环境的影响——以近50年白洋淀鱼类变化

为例. 资源科学, 2011, 33, 8: 1475–1480]

- 96 Zhao C L, Xiao G H, Luo N T, et al. Analysis of fish composition in Baiyangdian Lake (in Chinese). Hebei Fish, 2007, 11: 49–50 [赵春龙, 肖国华, 罗念涛, 等. 白洋淀鱼类组成现状分析. 河北渔业, 2007, 11: 49–50]
- 97 Zhou B, Ma L K, Hou J H, et al. Bird resources and their diversity in Xiongan New Area (in Chinese). J Zool, 2018, 53: 528–538 [周博, 冯来坤, 侯建华, 等. 雄安新区鸟类资源及其多样性. 动物学杂志, 2018, 53: 528–538]
- 98 Wang Y H, Wu T T, Fan J G, et al. Summer bird communities and taxa diversity in Baiyangdian (in Chinese). J Hebei Univ (Nat Sci Ed), 2018, 38: 443–448 [王义弘, 吴婷婷, 范俊功, 等. 白洋淀夏季鸟类群落及类群多样性. 河北大学学报(自然科学版), 2018, 38: 443–448]
- 99 Liu X D, Huang Y, Wang Y H, et al. Characterization of microbial community structure in sediments of the Niyang River, Tibet (in Chinese). Environ Sci, 2020, 41: 3249–3256 [刘晓丹, 黄毅, 王永花, 等. 西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析. 环境科学, 2020, 41: 3249–3256]
- 100 Li E C. Biological denitrification of coking nanofiltration concentrated water and its microbial flora structure analysis (in Chinese). J Environ Eng, 2019, 13: 2461–2467 [李恩超. 焦化纳滤浓水的生物脱氮及其微生物菌群结构分析. 环境工程学报, 2019, 13: 2461–2467]
- 101 Wang P, Liu M, Weng Y S, et al. Study on the changes of microbial populations in river water bodies before and after black odor (in Chinese). Anhui Agric Sci, 2019, 47: 47–51 [王鹏, 刘梅, 翁益松, 等. 河道水体黑臭前后微生物种群变化研究. 安徽农业科学, 2019, 47: 47–51]
- 102 Qi C Y. High-yield technology of grass carp farming in Baiyangdian net boxes (in Chinese). Today Anim Husband Vet Med, 2019, 35: 56 [齐朝阳. 白洋淀网箱养殖草鱼高产技术. 今日畜牧兽医, 2019, 35: 56]
- 103 Du Y H, Liu C, Chen K N, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus fugacity in Baiyangdian Lake sediment and its endogenous load (in Chinese). Lake Sci, 2018, 30: 1537–1551 [杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷. 湖泊科学, 2018, 30: 1537–1551]
- 104 Li Q G, Wei T, Zhang G M, et al. Exploration of the effect of triangular sail mussel on nitrogen and phosphorus release and microorganisms in Baiyangdian sediment (in Chinese). Environ Sci Res, 2020, 33: 2318–2325 [李乾岗, 魏婷, 张光明, 等. 三角帆蚌对白洋淀底泥氮磷释放及微生物的影响探究. 环境科学研究, 2020, 33: 2318–2325]
- 105 Zhao Y, Wang F. Study on the activity of inter-root soil microbial electron transfer system (ETS) of reed in Baiyangdian Lake wetland (in Chinese). J Safe Environ, 2016, 16: 363–367 [赵颖, 王飞. 白洋淀湿地芦苇根际土壤微生物电子传递体系(ETS)活性的研究. 安全与环境学报, 2016, 16: 363–367]

Evolution of the ecosystem in Baiyangdian Lake

CHEN Bo, ZHAO LiNing & DONG SiJun

School of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China

Baiyangdian Lake, which is also known as the “Kidney of North China” and “Pearl of North China,” is the largest among 143 lakes of different sizes in Haihe plain located in central Hebei province. The water quality in Baiyangdian Lake is moderately and mildly eutrophic; it reaches the surface water Class IV standard with seasonal variations. Combined with data from previous studies, ecological changes in Baiyangdian Lake over the past 70 years are elaborated herein. With the rapid development of industrial economies, the environment of Baiyangdian Lake has been damaged dramatically since the 1950s. The potential risk level of cadmium in Baiyangdian Lake sediments varies from moderate to severe. The contents and varieties of microplastics and antibiotics detected in Baiyangdian Lake have also increased. The diversity and abundance of native plants, animals, and microorganisms have been influenced by multiple environmental factors and human activities. In this paper, the distribution characteristics and sources of pollutants are summarized by discussing the diversity and abundance of plants, animals, and microorganisms in Baiyangdian Lake. This study would provide important scientific data and theoretical support for the pollution control and ecological service function improvement of Baiyangdian Lake.

Baiyangdian Lake, ecological environment, microplastics, antibiotics, heavy metals

doi: [10.1360/SSV-2021-0306](https://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSV-2021-0306)