

白洋淀浮游动物生物多样性及水生态评价

王乙震, 罗阳, 周绪申, 张世禄, 崔文彦
(水利部海河水利委员会 海河流域水环境监测中心, 天津 300170)

摘要: 为研究白洋淀浮游动物生物多样性和水生态状况, 2012年6月和10月对浮游动物进行了采样调查。结果表明: 白洋淀共鉴定出浮游动物37种, 其中枝角类最多, 占总数的51.4%; 各监测站点浮游动物密度为2480~7580 ind/L, 平均密度4160 ind/L; 生物量为0.46~1.81 mg/L, 平均生物量1.24 mg/L。Margalef多样性指数为1.83~3.51。浮游动物损失指数表明, 整个白洋淀地区浮游动物状况相对于历史数据均有不同程度变差。用浮游动物多样性指数评价水质状况, 白洋淀处于中度污染水平; 综合浮游动物生物量评价水体营养级别标准, 考虑到富营养化指示物种的存在, 综合评价白洋淀水体处于富营养状态。

关键词: 浮游动物; 生物量; 浮游动物损失指数; 生物多样性; 白洋淀

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0094-07

Zooplankton biodiversity and water ecological evaluation in Baiyangdian lake

WANG Yizhen, LUO Yang, ZHOU Xushen, ZHANG Shilu, CUI Wenyan

(Haihe River Water Environmental Monitoring Center, Haihe River Water Conservancy
Commission, Ministry of Water Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: In order to study the biodiversity of zooplankton and water ecological status in Baiyangdian lake, the paper investigated the zooplankton structure and aquatic ecology in June and October of 2012. The result showed that there are a total of 37 zooplankton species in Baiyangdian lake, most of which belong to cladocera which occupy 51.4% of the total. The total density of zooplankton at different sampling site varies from 2480 ind./L to 7580 ind./L, with an average of 4160 ind./L. The biomass of zooplankton at different sampling site varies from 0.46 mg/L and 1.81 mg/L, with an average of 1.24 mg/L. Margalef index is in the range of 1.83–3.51. Zooplankton loss index showed that the conditions of zooplankton in Baiyangdian lake shows a decrease tendency and with different degree in each sampling sites compared with the historical condition. Baiyangdian lake is in a moderate pollution level and in a eutrophication state according to the comprehensive evaluation.

Key words: zooplankton; biomass; zooplankton loss index; bio-diversity; Baiyangdian lake

浮游动物是浮游生物的一部分, 在淡水生态系统中起着重要的作用。作为浮游水生态系统的初级消费者, 浮游动物不仅是水体生态系统食物链中一个重要环节, 在物质转化、能力流动和信息传递等生态过程中起着至关重要的作用, 其种类和数量变化会影响其他水生生物的分布和丰度, 而且浮游动物与水体质量密切相关, 很多浮游动物对水环境的变化非常敏感, 水环境的变化直接影响其群落结构和功能, 部分浮游动物还能积累和代谢一定量的污染物质, 起到净化水质的作用^[1-2]。

白洋淀是华北地区最大的淡水湖, 由143个大淀泊和3700多条壕沟组成, 总面积366 km², 其中水面占44%、陆地占56%, 有潞龙河、唐河、漕河、瀑河、府河、萍河、白沟河等河流入淀。白洋淀素有“华北明珠”、“北国江南”之称, 是华北地区最大的一块湿地, 已被列入中国重要湿地名录。白洋淀在拦洪蓄水、调节气候、改善生态环境等方面发挥着重要作用。

近年来, 随着经济的快速发展和人口的不断增加, 白洋淀水质状况逐渐恶化。目前, 白洋淀淀区及

收稿日期: 2015-06-20; 修回日期: 2015-07-24

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFA71340); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-002)

作者简介: 王乙震(1986-), 男, 湖北英山人, 工程师, 硕士, 主要从事水环境监测相关研究工作。

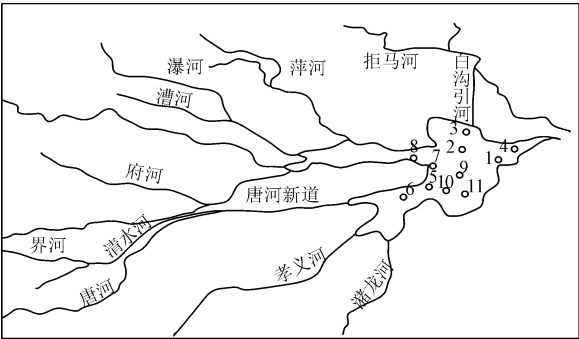
周边分布有 39 个村庄,居住约 24.3 万人,每天产生大量的生活污水;另外,来自白洋淀上游保定市的大量生活污水和工业污水经府河直接入淀^[3],对白洋淀水体造成极大污染。根据 2012 年白洋淀水质监测结果,白洋淀内各断面水质为 IV ~ 劣 V 类,主要超标项目为氨氮、高锰酸盐指数、化学需氧量和五日生化需氧量。

自 20 世纪 50 年代以来,针对白洋淀水生生物各种类群的分布与变化特征,已经有广泛深入的研究,同时积累了大量丰富的资料^[4]。近 10 年来,白洋淀水体环境状况发生了很大变化,虽然白洋淀浮游动物的研究已经有部分报道^[5],但是研究并没有进一步全面、系统开展。结合海河流域重要河湖健康评估工作,分别于 2012 年 6 月和 10 月份对白洋淀浮游动物群落的生态学特征及水生态状况进行了两次调查研究,主要目的是利用浮游动物群落结构及水生态状况来评价海河流域重要湖泊 - 白洋淀的健康状况和污染现状,识别人类活动对白洋淀系统功能的影响,为白洋淀有效保护和合理开发决策提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 采样点布设及采样时间

结合白洋淀实际情况,白洋淀布设监测点位 11 个,分别是:关城、安新桥、端村、郭里口、泥李庄、王家寨、圈头、光淀张庄、前塘、采蒲台、枣林庄;各监测点位位置及经纬度如图 1 所示。



1. 光淀张庄;2. 王家寨;3. 郭里口;4. 枣林庄;5. 端村;6. 关城;
7. 泥李庄;8. 安新桥;9. 圈头;10. 采蒲台;11. 前塘

图 1 白洋淀入淀断面及监测点位示意图

1.2 样品处理

浮游动物的采集和鉴定参考《水库渔业资源调查规范》(SL167 - 96)^[6]的方法进行。浮游动物(如轮虫、枝角类、桡足类)定性样品使用 13 号浮游生物网,在水面下 0.5 m,作“∞”形拖动约 5 min 后捞取,收集

于 40 mL 标本瓶中,加福尔马林固定。定量样本使用 25 号浮游生物网,用有机玻璃采水器在水面下 0.5 m 采水样 10 L 浓缩后,加入鲁哥氏液固定。

1.3 浮游动物计数及生物量计算

参考《水库渔业资源调查规范》(SL167 - 96)^[6],计算浮游动物密度及生物量。单位体积浮游动物的数量按下式计算:

$$N = vn/VC$$
 (1)

式中: N 为 1 L 水样中浮游动物的数量,ind/L; V 为采样体积,L; v 为浓缩后的体积,mL; C 为计数样品体积,mL; n 为计数所获得的个体数,ind。

1.4 物种多样性指数

物种丰富度指数是常用的浮游生物多样性指数,用物种丰富度指数评判水体水质状况的标准见表 1。

丰富度指数(M)^[7]采用 Margalef 的计算公式:

$$M = (S - 1)/\ln N$$
 (2)

式中: S 为样品中总种数; N 为所有物种个体数。

表 1 浮游生物物种丰富度指数 M 水质评判标准

水质标准	清洁	轻度污染	β - 中污染	α - 中污染	重污染
丰度指数	6	6 ~ 4	4 ~ 2	2 ~ 1	1 ~ 0

1.5 浮游动物生物损失指数

根据水利部水资源司发布的湖泊健康评估指标、标准与办法(试点工作用)^[8],浮游动物状况采用其生物损失指数进行评价,浮游动物生物损失指数指评估湖泊浮游动物种数现状与历史参考系种数(不包括外来种)的差异状况,反映湖泊生态系统中物种受损状况。浮游动物生物损失指数越大,表明该地区浮游动物的状况越好。计算公式为:

$$ZOE = ZO/ZE$$
 (3)

式中: ZOE 为浮游动物损失指数; ZO 为评估湖泊调查获得的浮游动物种类数量(剔除外来物种); ZE 为 1980 s 以前评估湖泊浮游动物种类数量。

2 结果与分析

2.1 浮游动物种类组成及分布特征

2012 年 6 月和 10 月对白洋淀 11 个监测站点的调查,共鉴定出浮游动物 37 种。其中,枝角类 19 种,占总数的 51.4%;其次是桡足类 14 种,占 37.8%;由于轮虫个体小,鉴定困难,本次只鉴定出轮虫 4 种,占总数的 10.8%。表 2 是白洋淀各监测站点浮游动物名录。

浮游动物中,枝角类优势种有筒弧象鼻溞、尖额溞、多刺裸腹溞、透明溞,筒弧象鼻溞较为丰富;桡足类优势种有温剑水蚤、近邻剑水蚤及无节幼体;轮虫

分属龟甲轮属、臂尾轮属和须足轮属,较为多见的种为螺形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫、角突臂尾轮虫、钩状狭甲轮虫,其中,臂尾轮属最为丰富。

表 2 白洋淀各监测站点浮游动物名录

浮游动物名录		光淀	张庄	王家寨	郭里口	枣林庄	端村	关城	泥李庄	安新桥	圈头	采蒲台	前塘
枝角类	透明薄皮溞 <i>Leptodora lilljeborg</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	短尾秀体溞 <i>D. brachyurum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	僧帽溞 <i>D. cucullata</i>	+	+	+	+						+	+	+
	蚤状溞 <i>D. pulex</i>	+	+	+	+							+	+
	透明溞 <i>D. hyalina</i>		+	+	+						+	+	+
	宽尾网纹溞 <i>Ceriodaphnia laticaudata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	老年低额溞 <i>Simocephalus vetulus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	筒弧象鼻溞 <i>B. coregoni</i>	+	+	+	+	+					+	+	+
	颈沟基合溞 <i>B. longirostris</i>	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
	微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	多刺裸腹溞 <i>M. macroopa</i>	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
	光滑平直溞 <i>Pleuroxus laevis</i>	+	+	+	+	+		+			+	+	+
	圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>	+	+	+	+		+			+	+	+	+
	卵形盘肠溞 <i>C. ovalis</i>	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
桡足类	肋形尖额溞 <i>Alona costata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	点滴尖额溞 <i>A. guttata</i>	+	+	+	+	+				+	+	+	+
	矩形尖额溞 <i>A. rectangula</i>	+	+	+	+							+	+
	方形尖额溞 <i>A. quadrangularis</i>	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+
	大型中镖水蚤 <i>Sinodiaptomus sarsi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	汤匙华哲水蚤 <i>S. dorrii</i>	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+
	台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	等刺温剑水蚤 <i>T. kawamarai</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	蒙古温剑水蚤 <i>T. mongolicus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	白色大剑水蚤 <i>Macrocyclus albidus</i>	+	+	+	+		+	+		+	+	+	+
	广布中剑水蚤 <i>M. leuckarti</i>	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
	英勇剑水蚤 <i>Cyclops strenuus</i>	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
	近邻剑水蚤 <i>C. vicinus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	锯缘真剑水蚤 <i>Eucyclops serrulatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	锯齿真剑水蚤 <i>E. macruroides</i>	+	+	+	+		+			+	+	+	+
	如愿真剑水蚤 <i>E. speratus</i>	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+
轮虫	叶片剑水蚤 <i>Cyclops vicinus lobosus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	有爪猛水蚤 <i>Onychocamptsc sp.</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>			+	+	+					+	+	+
	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	+	+	+	+						+	+	+
	钩状狭甲轮虫 <i>Colurella uncinata</i>	+	+	+	+						+	+	+

注:“+”表示在该监测站点检出。

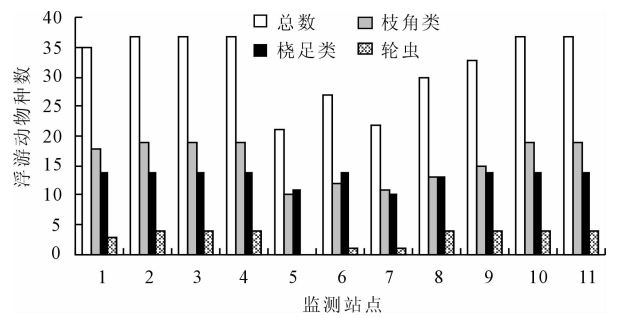
图 2 是白洋淀各监测站点浮游动物结构组成。由图 2 可知,在各采样站位,浮游动物群落结构组成和比例存在差异,但是除端村和关城外,均以枝角类最多。整个白洋淀区域,浮游动物种类总数最多的监测点是王家寨、郭里口、枣林庄、采蒲台和前塘,均有 37 种。桡足类在各个采样点检出数量水平基本

持平。轮虫在各个采样点检出种类最少,且在端村未检出。

2.2 浮游动物密度变化

表 3 是白洋淀各监测点位浮游动物密度及生物量情况。由表 3 可知,白洋淀浮游动物为 2 480 ~ 7 580 ind/L 不等,平均密度为 4 160 ind/L;浮游动

物生物量为 0.5 ~ 1.8 mg/L, 平均生物量为 1.24 mg/L。各监测点位中, 安新桥浮游动物密度最高, 达到 7 580 ind/L, 其次是关城, 为 4 350 ind/L; 浮游动物生物量最高的监测点位是光淀张庄, 达到 1.8 mg/L, 其次是枣林庄, 为 1.55 mg/L。



1. 光淀张庄; 2. 王家寨; 3. 郭里口; 4. 枣林庄; 5. 端村; 6. 关城; 7. 泥李庄; 8. 安新桥; 9. 圈头; 10. 采蒲台; 11. 前塘

图 2 白洋淀各监测站点浮游动物组成

浮游动物群落结构受诸多因素影响, 如光照、温度、透明度、营养盐、污染程度等^[9]。夏品华等^[10]利用典范对应分析方法, 同时结合多个环境因子, 在同一排序图上反映群落、生物种类与环境三者或两两间的关系, 结果表明温度、氨氮和电导率对浮游动物

表 3 白洋淀各监测点位浮游动物密度及生物量

监测点位	密度/(ind · L ⁻¹)	生物量/(mg · L ⁻¹)	监测点位	密度/(ind · L ⁻¹)	生物量/(mg · L ⁻¹)
光淀张庄	2480	1.81	王家寨	2820	1.37
郭里口	3750	1.31	枣林庄	4250	1.55
端村	5420	1.32	关城	4350	1.08
泥李庄	3250	0.70	安新桥	7580	0.46
圈头	4210	1.23	采蒲台	3520	1.48
前塘	4130	1.33	平均	4160	1.24

表 4 是不同年代白洋淀浮游动物种类及数量的变化。由表 4 可以看出, 与历史资料相比, 白洋淀浮游动物种类个数自 20 世纪 50 年代起持续降低, 从 1958 年的 95 种降至 2012 年的 37 种; 白洋淀浮游动物数量大幅增加, 目前浮游动物数量约是 50 年代的 12.8 倍。一般认为, 浮游生物可表征复杂水生态系统的结构特征和功能^[15]。敏感性物种更容易受到环境因素的影响和污染物的毒害, 生态系统的敏感性取决于最敏感的物种^[16]。浮游动物中节肢动物门, 种类丰富且数量庞大, 在生态环境中具有重要的指示作用, 如剑水蚤和大型溞对污染物比较敏感, 可作为水体污染的指示物^[17-18]。白洋淀淀区及周边村庄人口众多, 每天向淀内排放大量的生活污水, 来

的时空分布影响极显著。Abrantes 等^[11]认为水体理化因素可通过控制浮游植物的生长间接影响浮游动物的动态。大量证据表明, 藻毒素对不同种类的浮游动物的影响存在差异^[12]。Hansson 等^[13]研究表明, 瑞典南部的 6 个湖泊中浮游动物总量与毒素浓度呈负相关; 溞属和哲水蚤与高浓度的毒素负相关, 但剑水蚤、象鼻溞属和轮虫等小型、相对低效的浮游植物掠食者却与之成正相关。桡足类对食物具有高度选择性, 能通过大小和味觉来区分食物颗粒^[14]。象鼻溞能在被动滤食的同时主动捕获颗粒, 能区分蓝藻和其他食物颗粒, 因而桡足类和象鼻溞能够避免食用有害蓝藻对自身能量的影响^[13]。泥李庄和安新桥两个监测站点位于府河入淀口, 主要承接来自保定的城市污水和工业废水, 这两个监测站点水质类别为劣 V 类, 主要超标项目为氨氮和化学需氧量, 污染以氨氮和有机污染为主, 导致浮游动物生物密度较高和生物量较低。另外, 由于个体、种类以及生长发育期的影响, 也会使浮游动物生物量大小相差很大。同时, 根据常规监测和藻类监测数据, 白洋淀蓝藻也会对浮游动物的群落结构产生一定影响。

自白洋淀上游保定市的大量生活污水和工业污水经府河直接入淀, 同时白洋淀淀内养殖业也产生大量的污染负荷。近年来, 很多有机污染物如有机氯农药^[3]、多环芳烃^[19]、抗生素^[20]等均在白洋淀各介质中被检测到。这些因素均导致白洋淀水质状况逐渐恶化, 造成浮游动物物种种类数量减少以及密度剧增。

表 4 不同年份白洋淀浮游动物种类及数量的变化^[1]

浮游动物	1958	1975	1993	2012 *
浮游动物种数 (种)	95	79	74	37
浮游动物数量/(ind · L ⁻¹)	3247	3804	6940 [#]	4160

注: * 表示本研究调查结果, #包括原生动植物数量。

2.3 浮游动物损失指数

白洋淀浮游动物相关研究结果较为丰富。沈嘉瑞等^[21]研究白洋淀枝角类,共发现枝角类 39 种,沈嘉瑞等^[22]发现桡足类 23 种,许木启^[1]在府河-白洋淀的浮游动物调查中,共发现枝角类 24 种,桡足类 16 类,轮虫 26 种,原生动物 63 种。

根据水利部水资源司湖泊健康评估指标、标准与办法(试点工作用)(水利部水资源司 2011)^[8],白洋淀各监测点位浮游动物损失指数如表 5 所示。由表 5 可见,就浮游动物类群而言,白洋淀桡足类状

况跟历史数据相比,损失较少;其次是枝角类;由于轮虫个体小,鉴定困难,本次调查仅鉴定出 4 种,或存在未检出种类,因而计算出的轮虫类浮游动物损失指数也较小。

在白洋淀各监测站点中,王家寨、郭里口、枣林庄、采蒲台、前塘等 5 个站点的枝角类状况要好于其他站点;各站点桡足类浮游动物状况基本类似,最差的是泥李庄。整体而言,相对于历史数据,整个白洋淀地区浮游动物状况均有不同程度的恶化,浮游动物状况最差点是端村。

表 5 白洋淀各监测点位浮游动物损失指数

类群	浮游动物损失指数 ZOE										
	光淀张庄	王家寨	郭里口	枣林庄	端村	关城	泥李庄	安新桥	圈头	采蒲台	前塘
枝角类	0.46	0.49	0.49	0.49	0.26	0.31	0.28	0.33	0.26	0.49	0.49
桡足类	0.61	0.61	0.61	0.61	0.48	0.61	0.43	0.57	0.61	0.61	0.61
轮虫类	0.12	0.15	0.15	0.15	0.00	0.04	0.04	0.15	0.15	0.15	0.15
平均	0.40	0.42	0.42	0.42	0.24	0.32	0.25	0.35	0.34	0.42	0.42

2.4 浮游动物多样性指数变化

白洋淀各监测站点浮游动物多样性指数评价水质状况结果见表 6。结果表明,白洋淀浮游动物 Margalef 丰富度指数的范围为 1.83~3.51,Margalef 丰富度指数最小值出现在端村,最大值出现在王家寨,但各监测站点间 Margalef 丰富度指数相差不大,表现出稳定的多样性水平;另外,就评价等级而言,除端村为 α -中污染外,其他各监测站点均为 β -中污染。

从水质状况来看,一般认为水体水质状况越好,浮游动物的种类较多,所以多样性指数就越大;若水体水质污染越严重,不耐污的敏感物种将减少或消失,耐污种的种类和个数将增加,物种多样性指数就越低。本研究中得出的浮游动物种类数与各阶段历史数据^[1]相比要低很多,表明白洋淀水体水质比历史水质状况污染要严重。由浮游动物 Margalef 丰富度指数衡量水体污染程度,白洋淀处于中度污染水平。

表 6 白洋淀各监测点位浮游动物多样性指数

监测点位	Margalef 丰富度指数	评价等级	监测点位	Margalef 丰富度指数	评价等级
光淀张庄	3.36	β -中污染	王家寨	3.51	β -中污染
郭里口	3.42	β -中污染	枣林庄	3.38	β -中污染
端村	1.83	α -中污染	关城	2.43	β -中污染
泥李庄	2.02	β -中污染	安新桥	2.58	β -中污染
圈头	3.01	β -中污染	采蒲台	3.44	β -中污染
前塘	3.39	β -中污染			

2.5 浮游动物对营养状态的指示

国内外利用浮游动物群落结构和生物量变化评价水环境已有相当长的历史^[23-25],综合考虑浮游动物的种类、密度及多样性指数可对水体富营养化状态和污染情况作出比较客观的评价^[26]。何志辉^[27]综合国内 211 个内陆水域调查结果,对中国湖泊水

库营养型分类做过比较详细的讨论,提出一个以浮游动物生物量评价水体营养级别的标准;天津市环境保护科学研究所^[28]根据于桥水库调查提出了非结冰期浮游动物生物量年均值表示法,该方法在何志辉营养级别基础上增加超富营养型。以上两个浮游动物生物量评价水体营养级别标准如表 7 所示。

武国正等^[29]用该方法评价乌梁素海富营养状况,也得出可靠结论,依照这两个标准,白洋淀平均生物量为 1.2 mg/L,变动范围为 0.5 ~ 1.8 mg/L(见表 3),属于中营养型。

表 7 浮游动物生物量评价水体营养级别标准

级别	贫营养型	中营养型	富营养型	超富营养型	文献
生物量/ (mg · L ⁻¹)	0.16 ~ 2.19 (平均 0.96)	0.28 ~ 17.60 (平均 2.10)	0.59 ~ 9.52 (平均 3.59)		[26]
	<1	1.1 ~ 3.4	3.5 ~ 8.0	>8.0	[27]

另外,在白洋淀各监测站点中,均不同程度地检测到了臂尾轮虫和龟甲轮虫的存在,这两种轮虫均为富营养化指示种^[30]。有研究表明^[31-36],臂尾轮虫属常存在于富营养水体中。臂尾轮虫和龟甲轮虫的出现,可表明白洋淀水体达到富营养水平。综合以上评价标准,白洋淀处于富营养状态。

3 结 语

2012 年 6 月和 10 月份对白洋淀浮游动物群落的生态学特征及水生态状况进行的两次调查研究,共鉴定出浮游动物 37 种,其中,枝角类 19 种,占总数的 51.4%;其次是桡足类 14,占总数的 37.8%;最少的是轮虫类 4 种,占总数的 10.8%。白洋淀浮游动物平均密度为 4160 ind/L,平均生物量为 1.24 mg/L。浮游动物损失指数表明,整个白洋淀地区浮游动物状况相对于历史数据均有不同程度变差。用浮游动物多样性指数评价白洋淀水质状况,白洋淀处于中度污染水平。同时,综合考虑白洋淀浮游动物生物量评价水体营养级别标准和富营养化指示物种的存在,白洋淀水体处于富营养状态。

由于作者鉴定水平有限,一些种类未统计完全,其它生态组分如底栖动物、鱼类、藻类、大型水生植物、两栖类等对水环境状况也有较好的反映,其对水污染适应和耐受程度也有所差异,在以后的研究中也将会逐步开展。

参考文献:

[1] 许木启. 从浮游动物群落结构域功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果[J]. 水生生物学报,1996,20(3): 212-219.

[2] 王新华,王宏鹏,纪炳纯. 天津市团泊水库浮游动物研究与水环境评价[J]. 四川动物,2008,27(5):807-809.

[3] Dai Guohua, Liang Xinhui, Liang Gang, et al. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface water and sediments from Baiyangdian Lake in North China[J]. Journal of Environ-

mental Sciences, 2011,23(10):1640-1649.

[4] 许木启,朱江,曹宏. 白洋淀原生动动物群落多样性变化与水水质关系研究[J]. 生态学报,2001,21(7):1114-1120.

[5] 易磊,刘存歧,邢晓光. 白洋淀浮游甲壳动物的生物多样性研究[J]. 水生态学杂志,2010,3(4):38-43.

[6] 水利部,中国科学院水库渔业研究所. SL167-96 水库渔业资源调查规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,1996.

[7] Margalef D R, Information theory in ecology[J]. Gensystem, 1958(3):36-71.

[8] 水利部水资源司. 湖泊健康评估指标、标准与办法(试点工作用)[R]. 北京:水利部水资源司,2011.

[9] 王璐璐,董芳,李芳芳,等. 大辽河水系夏季后生浮游动物群落结构及水生态评价[J]. 生态学杂志,2013,32(2):389-395.

[10] 夏品华,马健荣,李存雄,等. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学研究,2011,24(4):378-386.

[11] Abrantes N, Antunes S C, Pereira M J, et al. Seasonal succession of cladocerans and phytoplankton and their interactions in a shallow eutrophic lake: Lake Vela, Portugal[J]. Acta Oecologica, 2006,29:54-64.

[12] Christofersen K, Riemann B, Klysner A, et al. Potential role of fish predation and natural populations of zooplankton in structuring a plankton community in eutrophic lake water[J]. Limnol Oceanogr, 1993,38:561-573.

[13] Hansson L A, Gustafsson S, Rengefors K, et al. Cyanobacterial chemical warfare affects zooplankton community composition[J]. Freshwater Biology, 2007,52(7): 1290-1301.

[14] Demott W R, Moxter E. Foraging cyanobacteria by copepods: responses to chemical defenses and resource abundance[J]. Ecology, 1991,72(5):1820-1834.

[15] Baranthouse L W. Qualifying population recovery rates for ecological risk assessment[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004,23(2):500-508.

[16] 苏海磊,吴丰昌,李会仙,等. 我国水生生物水质基准推导的物种选择[J]. 环境科学研究, 2012,25(5): 506-511.

[17] 李巧,涂景,熊忠平,等. 节肢动物生物指示研究综

- 述[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 151 - 161.
- [18] Zhang Tong, Jin Hongjun, Zhu Huailan. Qualify criteria of acrylonitrile for the protection of aquatic life in China [J]. *Chemosphere*, 1996, 32(10): 2083 - 2093.
- [19] Hu Guocheng, Luo Xiaojun, Li Fengchao, et al. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: Concentrations, sources profiles and potential risk [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(2): 176 - 183.
- [20] Li Wenhui, Shi Yali, Gao Lihong, et al. Occurrence of antibiotics in water, sediments, aquatic plants, and animals from Baiyangdian Lake in North China [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1307 - 1315.
- [21] 沈嘉瑞, 张崇洲. 河北省白洋淀的枝角类[J]. 动物性杂志, 1964, 6(3): 128 - 132.
- [22] 沈嘉瑞, 宋大祥. 河北省白洋淀的桡足类[J]. 动物学报, 1965, 17(2): 168 - 183.
- [23] 王新华, 纪炳纯, 罗阳, 等. 引滦工程上游浮游动物及其水质评价[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 243 - 245.
- [24] Saksena D N. Rotifers as indicators of water quality [J]. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 1987, 15(5): 481 - 485.
- [25] Branco C W C, Rocha M I A, Pinto G F S, et al. Limnological features of Funil Reservoir (Brazil RJ) and indicator properties of rotifers and cladocerans of the zooplankton community [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2002, 7(2): 87 - 92.
- [26] 孟伟, 杨荣金, 舒俭民, 等. 突发环境污染事件对湖泊浮游动物的影响[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 87 - 91.
- [27] 何志辉. 中国湖泊和水库的营养分类. 大连水产学院学报, 1987(1): 1 - 10.
- [28] 天津市环境保护科学研究所. 于桥水库富营养化及防治研究[R]. 天津: 天津市环境保护科学研究所, 1991.
- [29] 武国正, 李畅游, 周龙伟. 乌梁素海浮游动物与底栖动物调查及水质评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 76 - 81.
- [30] 潘双叶, 陈元, 翁燕波, 等. 东钱湖浮游生物调查以及水质生态学评价[J]. 中国环境监测, 2008, 24(6): 96 - 100.
- [31] 王凤娟, 胡子全, 汤洁, 等. 用浮游动物评价巢湖东湖区的水质和营养类型[J]. 生态科学, 2006, 25(6): 550 - 553.
- [32] Zhang Xiong, Geng Hong. Effect of *Microcystis aeruginosa* on the rotifer *Brachionus calyciflorus* at different temperatures [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 88(1): 20 - 24.
- [33] Weithoff G, Walz N. Influence of the filamentous cyanobacterium *Planktothrix agardhii* on population growth and reproductive pattern of the rotifer *Brachionus calyciflorus* [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 313 - 314(1): 381 - 386.
- [34] Viayeh R M, Špoljar M. Structure of rotifer assemblages in shallow waterbodies of semi - arid northwest Iran differing in salinity and vegetation cover [J]. *Hydrobiologia*, 2012, 686(1): 73 - 89.
- [35] Tasevska O, Jersabek C D, Kostoski G, et al. Differences in rotifer communities in two freshwater bodies of different trophic degree (Lake Ohrid and Lake Dojran, Macedonia) [J]. *Biologia*, 2012, 67(3): 565 - 572.
- [36] Kulikova T P, Syarki MT. Effect of Anthropogenic Eutrophication on Zooplankton Distribution in Kondopoga Bay of Lake Onega [J]. *Water Resources*, 2004, 31(1): 85 - 91.

(上接第 93 页)

- [4] 吴阿娜, 车越, 徐启新, 等. 上海地区河流健康评价方法探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 90 - 94.
- [5] Satty T L. Fundamentals of decision marking and priority theory with the analytic hierarchy process [M]. Princeton: RWS Publications, 1994: 35 - 127.
- [6] 周振民, 刘海滢, 张青. 基于 ANP 的河流健康评估指标体系研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 57 - 60.
- [7] 崔东文. RBF 与 GRNN 神经网络模型在河流健康评价中的应用——以文山州区域中小河流健康评价为例[J]. 中国农村水利水电, 2012(3): 56 - 61.
- [8] 樊引琴, 刘婷婷, 李娜, 等. 物元分析法在黄河水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 166 - 169.
- [9] 于志慧, 许有鹏, 张媛, 等. 基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析——以湖州市区不同城市化水平下的河流为例[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3188 - 3193.
- [10] 蔡文. 物元模型及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社 1994.
- [11] 傅新平, 胡伶俐. 基于物元分析法的综合交通系统服务水平评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(4): 580 - 583.
- [12] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057 - 1061.