

北京密云水库底栖动物群落结构及其时空变化

李永刚¹, 胡庆杰¹, 曲疆奇², 宗海明¹, 王 健¹, 张清靖²

(1.北京市密云区水产技术推广站, 北京 101500;

2.北京市水产科学研究所, 渔业生物技术北京市重点实验室, 北京 100068)

摘要:为了研究南水北调中线调水工程运行对密云水库底栖动物群落结构及其生物多样性的影响, 2014-2016年在密云水库设置了7个采样点每月采样1次(冰封期除外), 进行底栖动物调查, 分析了底栖动物群落结构、密度、生物量、优势种及其生物指数变化。结果显示, 调查期间共检出底栖动物17种, 其中摇蚊幼虫12种, 环节动物5种。底栖动物平均密度为455.0个/m², 平均生物量为2.70 g/m², 其中优势种为红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)和克拉泊水丝蚓(*Limnodrilus clapedianus*)。底栖动物群落呈现出明显的时空变化, 11月密度和生物量达最大值, 分别为808.9个/m²、6.94 g/m²; 8月出现最小值, 分别为180.4个/m²、0.72 g/m²。水平分布上, 水库中心底栖动物密度和生物量达最大值, 分别为916.7个/m²、6.08 g/m²; 白河坝为最小值, 分别为307.1个/m²、0.70 g/m²。底栖动物Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数均在4月达最大值, 分别为1.43、1.13、1.14; 9月出现最小值, 分别为0.38、0.27、0.31; 3项指数在潮河口达最大值, 分别为1.08、0.64、1.01, 在潮河坝、白河坝指数相对较低。同时分析了随着密云水库水深增加, 底栖动物群落的结构变化。研究表明, 受调水的影响, 目前密云水库底栖动物群落结构不稳定, 处于重构期。

关键词:底栖动物; 群落结构; 生物多样性; 时空变化; 密云水库

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2018)05-0031-08

密云水库作为北京城市供水唯一的地表饮用水源地, 水质状况一直是人们关注的焦点。底栖动物作为水域生态系统中重要生物群落, 在水体底部起着加速沉积物分解、促进泥水界面物质交换和水体自净的作用(陈振楼等, 2005), 同时也是生态系统物质循环和能量流动的重要环节(宋海亮等, 2007); 若水质状况发生改变, 必然引起底栖动物群落结构改变, 破坏生态平衡(王丽珍等, 2007)。因此, 通过研究底栖动物群落结构与时空变化及其对水域环境的指示性, 可以了解水生态系统的健康状况水平(闫云君等, 2005; 熊飞等, 2008)。

通过研究底栖动物群落结构及其时空变化情况, 可以科学揭示水质长时期的变化规律, 弥补单凭理化因子对水质进行瞬时评价的不足(吕光俊等, 2009; 王琴等, 2010; 黄旭雷等, 2015)。有关底栖动物研究成果已被广泛应用于水域生态环境监测、水

质状况评价(王银东等, 2005; 闫云君等, 2007)。目前, 对密云水库水域生态研究主要集中在浮游生物(杜桂森等, 2001; 刘霞等, 2003; 杜桂森等, 2004; 刘静等, 2004)、水质理化指标方面(赵萌等, 2001; 王晓燕等, 2002; 王晓燕等, 2003; 徐清等, 2005; 荆卫红, 2008; 黄生斌等, 2008; 于一雷等, 2008); 对底栖动物的研究很少(赵萌等, 2001)。因此, 在南水北调来水调入密云水库调蓄过程中, 开展密云水库底栖动物群落结构及其时空变化研究, 对掌握其水质状况及其长期变化过程具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样点设置

采样时间为2014-2016年, 考虑到密云水库水域形状、河流入口、大坝位置、库湾、敞水区、水深等多种因素, 共计设置采样点7个, 如图1所示。

1.2 样品采集

1.2.1 采样方法 底栖动物采样用改良彼得生采泥器(采样面积0.042 m²)采集, 每个采样点每次平行采集2次。将所采集的底泥连同底栖动物一并带回实验室, 当天进行分检。

1.2.2 样本处理 将带回实验室的样本用2种孔径(500 μm, 42 μm)不同的金属筛进行筛选, 挑出肉

收稿日期: 2017-07-11

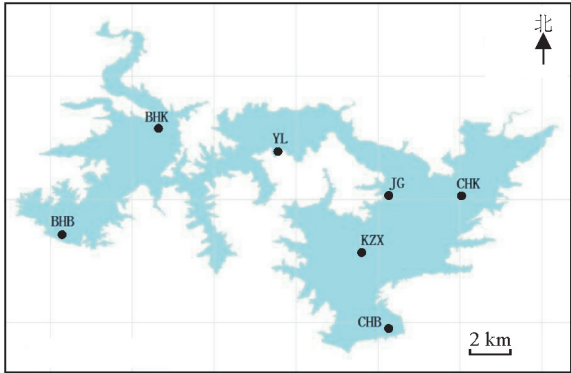
基金项目:北京市科技计划项目(D151100005915003); 北京市自然科学基金项目(J150003, 5162007); 北京市农林科学院所级创新团队(JNKST201611)。

作者简介:李永刚, 1973年生, 男, 高级工程师, 主要从事水生态环境保护研究。E-mail: shuichan2250@163.com

通信作者:张清靖。E-mail: qingjingzhang2007@aliyun.com

眼可见的生物放入样品瓶中,用福尔马林溶液(4%)固定。大型底栖动物用镊子夹取,小型底栖动物用吸管吸取。

底栖动物种类鉴定依据分类学特征,在显微镜下进行观察,随后分类计数、称重,并依据采样面积换算成密度(个/m²)与生物量(g/m²)。称量时将底栖动物放在滤纸上轻轻翻动,吸去体表附着水分后,用分析天平(精确度 0.0001 g)分类称重、记数。



1.BHB-白河坝;2.BHK-白河口;3.YL-燕落;4.JG-金沟;
5.CHK-潮河口;6.KZX-库中心;7.CHB-潮河坝

图1 密云水库采样点设置

1. Baihe River dam;2. Baihe River cove;3. Yanluo 4. Jinggou;
5. Chaohe River cove;6. reservoir center;7. Chaohe River Dam

Fig.1 Location of sampling sites in Miyun Reservoir

1.3 数据分析

底栖动物群落特征的生物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数描述:

$$H=-\sum_{i=1}^S(n_i/N)\cdot\log_2(n_i/N)$$
$$J=-\sum_{i=1}^S(n_i/N)\cdot\ln(n_i/N)/\ln S$$
$$D=(S-1)/\ln S$$

式中:H 为 Shannon-Wiener 多样性指数;J 为 Pielou 均匀性指数;D 为 Margalef 丰富度指数; n_i 为样品中第*i*种生物个体数;N 为样品中所有种类的总个体数;S 为样品的种类数。

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落结构

本次调查共定量采集到底栖动物 17 种(表 1)。其中,摇蚊幼虫 12 种,占种类数的 88.2%;环节动物 5 种,占种类数的 11.8%。优势种为红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)和克拉泊水丝蚓(*Limnodrilus claparedianus*),均为水域富营养化指示种。

表 1 密云水库底栖动物种类组成
Tab.1 Species composition of zoobenthos in Miyun Reservoir

底栖动物门类	采样年份		
	2014	2015	2016
节肢动物门 Arthropoda			
昆虫纲 Insecta			
双翅目 Diptera			
摇蚊科 Chironomidae			
长足摇蚊亚科 Tanypodinae			
花翅前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>	+		+
前突摇蚊 B 种 <i>Procladius</i> sp.B	+	+	
杂色大粗腹摇蚊 <i>Macropelopia nebulosa</i>	+		
菱附摇蚊 A 种 <i>Conchapelopia</i> sp.A	+	+	+
刺狭长足摇蚊 <i>Tanypus punctipennis</i>	+	+	
摇蚊亚科 Chironominae			
流水长跗摇蚊属 B 种 <i>Rheotanytarsus</i> sp.B	+		
罗甘小突摇蚊 <i>Micropsetra logani</i>	+		
梯形多足摇蚊 <i>Polypedilum scalaenum</i>	+		+
分齿恩非摇蚊 <i>Einfeldia dissidens</i>	+	+	+
平狭枝角摇蚊 <i>Cladopelma edwardsi</i>	+	+	+
溪流摇蚊 <i>Chironomus riparius</i>	+	+	+
直突摇蚊亚科 Orthocladiinae			
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	+	+	+
环节动物门 Annelida			
寡毛纲 Oligochaeta			
寡毛目 Oligochaeta			
颤蚓科 Tubificidae			
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	+
中华河蚓 <i>Rhyacodrilus sinicus</i>	+	+	+
克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedianus</i>	+		+
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>			+
蛭纲 Hirudinea			
吻蛭目 Rhynchobdellida			
扁蛭科 Glossiphoniidae			
扁蛭 <i>Glossiphonia</i> sp.			+

2.2 底栖动物的密度与生物量

2.2.1 采样时段的总体变化 2014-2016 年密云水库底栖动物密度和生物量变化见表 2。由表 2 可知,3 年来密云水库底栖动物平均密度为 455.0 个/m²。其中摇蚊幼虫平均密度为 237.3 个/m²,占总密度的 52.2%;环节动物平均密度为 217.7 个/m²,占总密度的 47.8%。底栖动物平均生物量为 2.70 g/m²,其中摇蚊幼虫平均生物量为 1.92 g/m²,占总生物量的 71.1%,环节动物平均生物量为 0.78 g/m²,占总生物量的 28.9%。采样调查期间,密云水库摇蚊幼虫与环节动物密度大小有所波动;摇蚊幼虫生物量要远大于环节动物生物量,摇蚊幼虫生物量是环节动物的 2.5 倍。

2.2.2 季节变化 密云水库底栖动物密度和生物量的季节变化见图 2。如图 2 可见,8 月和 9 月的底栖动物密度、生物量均处于最低水平,其均值分别为 180.4 个/m²、0.72 g/m² 和 235.5 个/m²、1.07g/m²;

在此期间,环节动物的密度和生物量均大于摇蚊幼虫。10 月、11 月摇蚊幼虫密度与生物量快速增加,且大于环节动物,10 月摇蚊幼虫和环节动物的密度、生物量分别为 397.7 个/m²、3.37 g/m² 和 262.5 个/m²、0.78 g/m²;11 月,二者的密度、生物量分别为 602.3 个/m²、6.20 g/m² 和 206.6 个/m²、0.74 g/m²。

2.2.3 时空变化 密云水库底栖动物密度和生物量水平分布见图 3。可见密云水库中心是底栖动物分布相对集中的水域,密度与生物量大于其他水域,其值分别为 916.7 个/m²、6.08 g/m²;其次是潮河口水域分布相对集中。潮河坝和白河坝底栖动物密度、生物量都较低,其平均值分别为 277.9 个/m²、1.15 g/m²和307.1 个/m²、0.70 g/m²。

2.3 多样性指数

密云水库底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数平均为 0.73,Margalef 丰富度指数平均为 0.60,Pielou 均匀度指数平均为 0.52。由密云水库底栖动物累计 3 年多样性指数均值来看(表 3),潮河口底栖动物生物指数高于其他采样点,潮河坝和白河坝生物指数均值均较低。从调查结果可以看出,潮河坝和白河坝水域采集到的种类均为寡毛类,经常采集到的种类包括克拉泊水丝蚓(*Limnodrilus clapedianus*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、中华河蚓(*Rhyacodrilus sinicus*);而苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)出现水草分布较多的、底质为淤泥的浅水水域,扁蛭(*Glossiphonia* sp.)仅偶尔出现。

表 2 密云水库底栖动物密度和生物量变化

Tab.2 Variation in density and biomass of zoobenthos in Miyun Reservoir

采样 时间	密度及占比			生物量及占比		
	合计/个·m ⁻²	摇蚊幼虫/%	环节动物/%	合计/g·m ⁻²	摇蚊幼虫/%	环节动物/%
2014-05	633.2±622.2	43.3	56.7	4.40±5.42	66.3	33.7
2014-06	440.2±469.6	14.9	85.1	1.29±1.69	43.0	57.0
2014-07	359.1±186.4	52.7	47.3	0.89±0.66	42.7	57.3
2014-08	158.3±95.5	31.7	68.3	0.51±0.48	38.5	61.5
2014-09	208.5±123.6	7.4	92.6	0.64±0.27	33.9	66.1
2014-10	501.9±588.2	67.7	32.3	2.39±2.95	90.6	9.4
平均	383.5±179.7	40.6	59.4	1.69±1.49	63.5	36.5
2015-07	702.7±643.0	78.5	21.5	3.21±3.43	46.5	53.5
2015-08	189.2±101.1	23.8	76.2	.84±0.58	48.1	51.9
2015-09	355.2±315.0	19.6	80.4	1.77±2.18	45.0	55.0
2015-10	818.5±468.6	55.7	44.3	5.90±4.06	77.5	22.5
2015-11	1227.8±1116.4	79.2	20.8	11.44±12.92	91.2	8.8
平均	658.7±407.4	63.6	36.4	4.63±4.26	76.4	23.6
2016-04	436.3±128.9	68.1	31.9	2.21±0.77	69.8	30.2
2016-05	532.8±255.9	22.5	77.5	1.83±0.81	45.3	54.7
2016-06	436.3±238.5	37.2	62.8	2.38±1.26	45.1	54.9
2016-07	67.6±13.6	53.3	46.7	0.63±0.37	66.8	33.2
2016-08	193.7±287.1	7.0	93.0	0.80±0.99	47.6	52.4
2016-09	142.9±52.7	21.6	78.4	0.81±0.34	41.8	58.2
2016-10	382.9±199.6	54.1	45.9	3.17±2.07	83.6	16.4
2016-11	390.0±163.3	59.4	40.6	2.43±1.39	81.1	18.9
平均	322.8±165.7	42.5	57.5	1.78±0.94	64.6	35.4

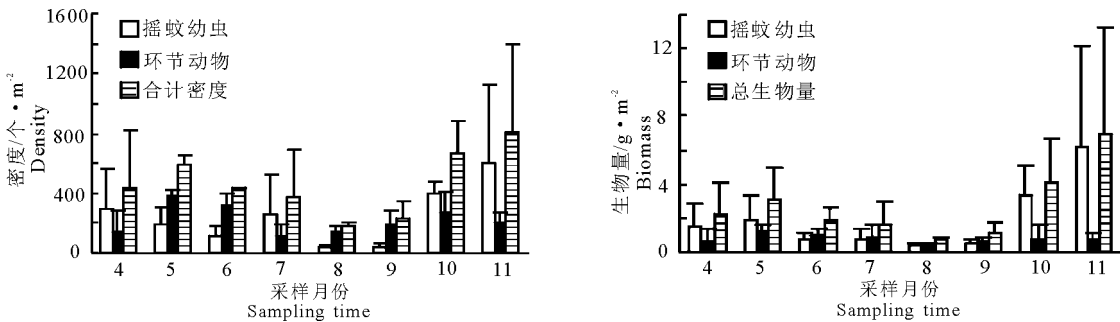


图 2 密云水库底栖动物密度、生物量季节变化

Fig.2 Seasonal variation in density and biomass of zoobenthos in Miyun Reservoir

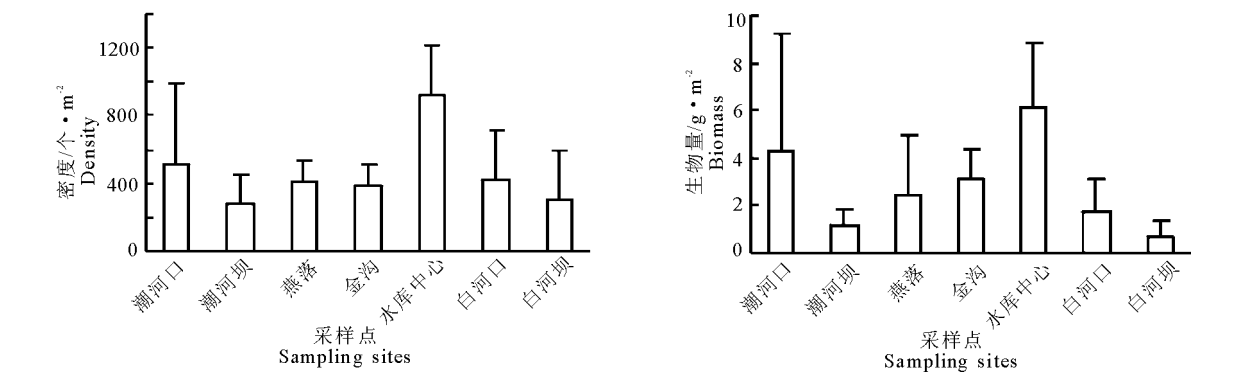


图3 密云水库底栖动物密度、生物量水平分布

Fig.3 Spatial distribution of zoobenthos density and biomass in Miyun Reservoir

表3 密云水库底栖动物多样性指数空间分布

Tab.3 Spatial distribution of zoobenthos diversity indices in Miyun Reservoir

年份	指数	潮河口	潮河坝	燕落	金沟	库中心	白河口	白河坝
2014	<i>H</i> 均值	1.22±0.81	0.23±0.56	0.75±0.74	0.45±0.50	0.64±0.38	0.81±0.72	0.56±0.62
	范围	0.00~2.11	0.00~1.38	0.00~1.79	0.00~1.00	0.00~1.06	0.00~1.84	0.00~1.58
	<i>J</i> 均值	0.62±0.36	0.15±0.36	0.47±0.41	0.57±0.83	0.54±0.32	0.76±0.76	0.37±0.35
	范围	0.00~1.00	0.00~0.87	0.00~0.92	0.00~2.07	0.00~0.97	0.00~2.07	0.00~0.79
	<i>D</i> 均值	1.23±0.81	0.17±0.42	0.62±0.67	0.55±0.63	0.38±0.21	0.65±0.55	0.41±0.37
	范围	0.00~1.95	0.00~1.03	0.00~1.67	0.00~1.44	0.00~0.56	0.00~1.37	0.00~0.87
2015	<i>H</i> 均值	1.12±0.27	0.49±0.45	1.09±1.02	0.55±0.66	0.73±0.69	0.99±0.72	0.00
	范围	0.86~1.58	0.00~0.92	0.00~2.15	0.00~1.58	0.00~1.38	0.00~1.79	0.00
	<i>J</i> 均值	0.75±0.26	0.49±0.45	0.55±0.50	0.44±0.45	0.46±0.44	0.59±0.41	0.00
	范围	0.37~1.00	0.00~0.92	0.00~0.95	0.00~1.00	0.00~0.87	0.00~1.00	0.00
	<i>D</i> 均值	1.08±0.45	0.38±0.40	0.80±0.73	0.52±0.75	0.38±0.33	0.88±0.56	0.00
	范围	0.68~1.82	0.00~0.91	0.00~1.44	0.00~1.82	0.00~0.58	0.00~1.44	0.00
2016	<i>H</i> 均值	0.90±0.78	0.56±0.48	1.01±0.64	1.30±0.71	0.98±0.37	0.68±0.77	0.29±0.49
	范围	0.00~1.92	0.00~1.00	0.00~1.73	0.00~2.26	0.00~1.67	0.00~1.70	0.00~1.00
	<i>J</i> 均值	0.56±0.45	0.56±0.48	0.60±0.34	0.95±0.78	0.72±0.25	0.41±0.44	0.29±0.49
	范围	0.00~0.95	0.00~1.00	0.00~0.86	0.00~2.72	0.00~0.92	0.00~0.85	0.00~1.00
	<i>D</i> 均值	0.73±0.61	0.49±0.51	0.82±0.58	0.94±0.53	0.67±0.29	0.39±0.42	0.41±0.70
	范围	0.00~1.44	0.00~1.44	0.00~1.82	0.00~1.44	0.00~1.17	0.00~0.91	0.00~1.44

密云水库底栖动物多样性指数季节变化如图4所示。可见多样性指数季节变化明显,其中,4月的生物指数较高,随后呈波浪型降低;9月生物指数最低;10-11月,多样性指数有所升高。

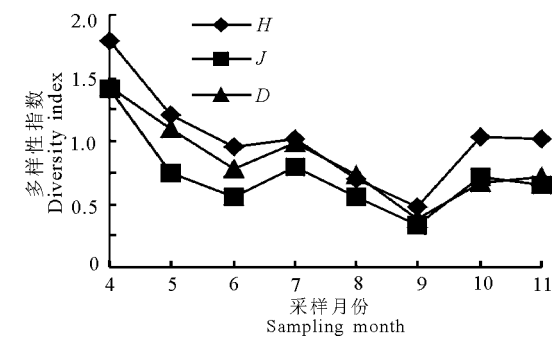


图4 密云水库底栖动物生物指数季节变化

Fig.4 Seasonal variation of zoobenthos diversity indices in Miyun Reservoir

3 讨论

3.1 密云水库底栖动物群落结构变化

本次调查表明,密云水库底栖动物群落结构正在发生着深刻变化,2014年的底栖动物种类为16种,2015年和2016年均均为10种。2014年检出的前突摇蚊属(*Procladius*)、长足摇蚊属(*Tanypus*)和长跗摇蚊族(*Tanytarsini*)种类有被替代的情况,即肉食性摇蚊种类有所减少,亚冷水性、清洁水体指示种长跗摇蚊族种类分布减少。其中,摇蚊族(*Chironomini*)、寡毛类(*Oligochaeta*)种类数变化较小,直突摇蚊亚科的红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)连续3年均可采集到,在密云水库分布相当广泛,除潮河坝和白河坝外,其他采样点均有分布。结合同时期密云水库的现场采样可见,进入4月以后,摇蚊幼虫陆续开始繁殖,库湾处及风浪较小水域

可见大量羽化完成后、参与交配的摇蚊成虫;随着季节更替和水温升高,摇蚊幼虫陆续进入繁殖高峰期。此时期可观察到刚刚孵化出的幼小摇蚊幼虫个体呈“S”型在水面表层游动,数量众多时可以徒手捞到,常见幼小摇蚊幼虫种类有梯形多足摇蚊(*Polypedilum scalaenum*)、平铗枝角摇蚊(*Cladopelma edwardsi*)、分齿恩非摇蚊(*Einfeldia dissidens*)和溪流摇蚊(*Chironomus riparius Meigen*);同时,底泥样本中可见摇蚊幼虫刚蜕皮完成后的透明、完整空壳。10-11月,采样时经常可见大量的亚冷水性、富营养化指示种红裸须摇蚊幼虫,有时呈聚集分布,数量较多,因此这一时期摇蚊幼虫密度与生物量迅速增加,红裸须摇蚊成为此时期的绝对优势种,11月的底栖动物密度和生物量均处于高峰期。

密云水库的环节动物在4月进入繁殖期,在此期间可以明显在显微镜下观察到河蚰属(*Rhyacodrilus*)指环状蚰蚱和水丝蚰属(*Limnodrilus*)指环状蚰蚱、松鼠尾状精英,此时水丝蚰属(*Limnodrilus*)阴茎鞘易观察,不少刚孵化的克拉泊水丝蚰(*Limnodrilus claparedianus*)、霍甫水丝蚰(*Limnodrilus hoffmeisteri*)个体大小与中华河蚰(*Rhyacodrilus sinicus*)相似,二者肉眼观察时不易区别,随着个体不断生长,水丝蚰属体长要明显大于河蚰属;同时,河蚰属身体后部明显变细,水丝蚰属身体后部逐渐变细;进入5月以后,环节动物个体数量明显增加。

密云水库底栖动物群落结构时空变化明显,水库中心底栖动物密度与生物量均大于其他采样点,潮河坝和白河坝密度与生物量都较低。根据调查情况分析,水库中心受外部因素干扰较少,水体环境相对稳定,有利于底栖动物生存与繁殖,底栖动物种类相对较多;潮河口水域开阔,水位较浅,有水草分布,河流入水冲击有所减缓,比较有利于底栖动物生存

与繁殖;而白河口河道较窄,水位较深,河流对底质冲击力较强,不利于底栖动物生存与繁殖,摇蚊幼虫对水流冲击的耐受性要强于环节动物,这与张敏(2012)的研究结论基本一致。潮河坝和白河坝水域的水色呈蓝绿色,底质为细腻且略带臭味的黑色淤泥,加之采样点的水深为30~40m,这样的环境条件不利于底栖动物的生存与繁殖,此处分布的底栖动物全部为耐污性强的克拉泊水丝蚰、霍甫水丝蚰和中华河蚰,未采集到摇蚊幼虫个体,这与胡忠军等(2010)以及王宝强等(2015)的研究结论基本一致。

结合赵萌等(2001)1996-1998年对密云水库底栖动物调查结果可知,当时采集到摇蚊幼虫、环节动物、软体动物3大类,底栖动物密度为2478.1个/m²,生物量为19.76g/m²,优势类群为水蚯蚓(密度)和软体动物(生物量)。本次调查结果显示,底栖动物密度为455.0个/m²,其中摇蚊幼虫占52.2%,环节动物密度占47.8%;生物量为2.70g/m²,其中摇蚊幼虫占71.1%,环节动物占28.9%。将本次结果与历史数据比较可以发现,底栖动物密度和生物量大幅度减少,其中软体动物在本次连续3年调查中均未采集到,可见密云水库的螺、蚌类随着水库生态环境改变出现了逐渐衰退现象。然而,螺、蚌对水生态环境具有净化作用和生态指示性,被广泛应用于生态环境修复过程中(刘其根等,2005;边学森,2007;王涛等,2010;徐海军,2010),一旦环境条件发生改变,就会对其种群结构、密度、生物量产生深刻影响。

3.2 密云水库与其他水体底栖动物比较

通过与其他水库研究结果比较可以看出,克拉泊水丝蚰(*Limnodrilus claparedianus*)、霍甫水丝蚰(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和刺铗长足摇蚊(*Tanypus punctipennis*)等耐污种类出现可以对水库水质起到指示性作用(表4)。

表 4 密云水库与其他水库底栖动物比较

Tab.4 Comparison of zoobenthos community characteristics in Miyun Reservoir with other reservoirs

水库名称	底栖动物密度/	底栖动物生物量/	Shannon-Wiener	Pielou	调查	数据
	个·m ⁻²	g·m ⁻²	指数	均匀度指数	年份	来源
密云水库	455.0	2.70	0.73	0.52	2014-2016	本次调查
官厅水库	5037.0	39.80	2.03	0.56	2007	陈立斌等,2012
汤河水库	3097.0	18.26	0.62	0.31	2007-2008	丘春刚等,2009
于桥水库	159.6	3.31	2.66	-	2012	马秀娟,2012
丹江口水库	6057.9	17.36	1.40	-	2007-2008	张敏等,2010
新安江水库	793.8	2.25	1.30	-	2008-2009	查玉婷,2012

密云水库底栖动物密度和生物量均远远低于官厅水库、汤河水库及丹江口水库,而这3座水库呈富

营养化趋势或部分水域呈富营养化,其密度、生物量处于于桥水库与新安江水库之间,而这2座水库呈

寡-中营养水平。密云水库底栖动物 Shannon-Wiener 生物多样性指数较其他水库偏低,这与密云水库所处独特地理位置密切相关。首先,密云水库位于燕山山脉群山丘陵之中,同时水库库容大、水位深,因此与其他浅水型和平原型水库相比,在深水水库每个采样点底栖动物种类数较少,在一些时间段不少采样点仅采到 1 个种类,同时摇蚊幼虫夏季大量羽化婚飞,故种类与数量大幅度减少,此时 Shannon-Wiener 指数偏低,马徐发等(2004)在研究中得出类似的结论。Shannon-Wiener 指数主要考察某一采样点物种种类数及其各种类间数量均衡程度,这样可能出现某采样点物种种类多,但种类间数量分布不均衡时,存在 Shannon-Wiener 指数偏低的情况,即当底栖动物呈聚集分布且种类间数量差异悬殊时,该指数往往偏低。

影响底栖动物群落结构及密度、生物量、生物多样性的因素较多(Luczak et al, 1997; Buss et al, 2002; Richardson et al, 2002; Thomsen et al, 2002; Duran et al, 2006)。通过比较密云水库 2014-2016 年底栖动物种类组成可以看出,调查中底栖动物种类数明显减少,这与密云水库水深迅速增加密切相关,以上结论与王宝强等(2015)和马秀娟(2012)研究结论一致。自从 2014 年底南水北调中线工程正式通水后,密云水库蓄水量由 2014 年 11 月的 8.8 亿 m^3 逐渐增加,截止到 2017 年 6 月蓄水量增加到 17.3 亿 m^3 ,水深增加近 10 m。综合以上研究结果表明,随着水深增加,底栖动物种类数、密度和生物量均减少,水位增加幅度加大可能是造成底栖动物群落结构改变的主要原因。水位升高,除对底栖动物产生影响外,同时表现在 3 年以来,密云水库的燕落、潮河口、白河口水域以菹草(*Potamogeton crispus*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)为代表水生植物分布面积减少,而水草与底栖动物等生物的生长与繁殖关系密切,同时由于水生植物根系结构复杂,增加了基底的环境结构异质性(Capehart et al, 1989; Ricklefs et al, 1993; Zbikowski et al, 2007)。通常情况下,水生高等植物丰富的水体,底栖动物种类数、密度和生物量也较高。

4 小结

目前,随着密云水库蓄水量和水位持续增加,逐渐给密云水库生态系统产生了一些深刻影响,对底栖动物群落影响非常显著。因此,继续加强对密云水库底栖动物群落结构及时空变化的研究,进一步

掌握底栖动物种类更替、群落重建等变化规律,对揭示南水北调来水对密云水库的生态环境影响具有深远意义。

参考文献

- 边学森, 2007. 太湖不同水域背角无齿蚌中有机氯农药和多氯联苯的积累和分布研究[D]. 南京: 南京农业大学.
- 查玉婷, 2012. 分水江水库和新安江水库底栖动物生态学研究[D]. 上海: 上海海洋大学.
- 陈立斌, 赵文, 殷守仁, 等, 2012. 官厅水库底栖动物的群落结构及时空格局[J]. 大连海洋大学学报, 27(1): 44-52.
- 陈振楼, 刘杰, 许世远, 等, 2005. 大型底栖动物对长江口潮流沉积物-水界面无机氮交换的影响[J]. 环境科学, 26(6): 43-50.
- 杜桂森, 刘晓端, 刘霞, 等, 2004. 密云水库水体营养状态分析[J]. 水生生物学报, 28(2): 191-196.
- 杜桂森, 王建厅, 武殿伟, 等, 2001. 密云水库的浮游植物群落结构与密度[J]. 植物生态学报, 25(4): 501-504.
- 胡忠军, 孙月娟, 刘其根, 等, 2010. 浙江千岛湖深水区大型底栖动物时空变化格局[J]. 湖泊科学, 22(2): 265-271.
- 黄生斌, 叶芝菡, 刘宝元, 2008. 密云水库流域非点源污染研究概述[J]. 中国生态农业学报, 16(5): 1311-1316.
- 黄旭蕾, 李天宏, 蒋晓辉, 2015. 基于大型底栖无脊椎动物指数的黄河水质评价研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 53(3): 553-561.
- 荆卫红, 2008. 密云水库入库支流潮河省界断面水质特征及影响因素分析[J]. 海河水利, (1): 13-16, 25.
- 刘静, 杜桂森, 刘晓端, 等, 2004. 密云水库的浮游生物群落[J]. 西北植物学报, 24(8): 1485-1488.
- 刘其根, 2005. 围网养殖对漏湖底栖动物群落结构及生物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 11(5): 566-570.
- 刘霞, 杜桂森, 张会, 等, 2003. 密云水库的浮游植物及水体营养程度[J]. 环境科学研究, 16(1): 27-29.
- 吕光俊, 熊邦喜, 刘敏, 等, 2009. 不同营养类型水库大型底栖动物的群落特征及其水质评价[J]. 生态学报, 29(10): 5339-5348.
- 马秀娟, 2012. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构研究[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 马徐发, 熊邦喜, 王明学, 等, 2004. 湖北道观河水库大型底栖动物的群落结构及物种多样性[J]. 湖泊科学, 16(1): 49-55.
- 邱春刚, 赵文, 陈立斌, 等, 2009. 汤河水库底栖动物群落结构及时空格局的研究[J]. 大连水产学院学报, (S1): 114-119.
- 宋海亮, 吕锡武, 李先宁, 等, 2007. 投放底栖动物强化水耕植物过滤法的净水效果[J]. 中国环境科学, 27(1): 58-61.

- 王宝强,刘学勤,彭增辉,等,2015. 三峡水库底栖动物群落结构特征与蓄水前资料比较[J]. 水生生物学报, 39(5): 966 - 972.
- 王丽珍,刘永定,陈亮,等,2007. 滇池底栖无脊椎动物群落结构及水质评价[J]. 水生生物学报, 31(4):590 - 593.
- 王琴,王海军,崔永德,2010. 武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价[J]. 水生生物学报, 34(4):739 - 746.
- 王涛,李林,彭亮,等,2010. 背角无齿蚌摄食率及对水中叶绿素 a 消除量的研究[J]. 水生生物学报, 34(4):779 - 786.
- 王晓燕,王一句,蔡新广,等,2002. 北京密云水库流域非点源污染现状研究[J]. 环境科学与技术, 25(4):1 - 3.
- 王晓燕,郭芳,蔡新广,等,2003. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷[J]. 城市环境与城市生态, 16(1):31 - 33.
- 王银东,熊邦喜,杨学芬,2005. 武汉市南湖大型底栖动物的群落结构[J]. 湖泊科学, 17(4):327 - 333.
- 熊飞,李文朝,潘继征,2008. 高原深水湖泊抚仙湖大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 生物多样性, 16(3):288 - 297.
- 徐海军,2010. 淡水贝类作为水域环境的修复工具种的可行性研究[D]. 苏州:苏州大学.
- 徐清,刘晓端,王辉锋,等,2005. 密云水库沉积物内源磷负荷的研究[J]. 中国科学(D辑), 35(S1):281 - 287.
- 闫云君,李晓宇,2007. 汉江流域上游支流大型底栖动物群落结构特征与生物多样性[J]. 湖泊科学, 19(5):585 - 591.
- 闫云君,李晓宇,梁彦龄,2005. 草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较[J]. 湖泊科学, 17(2):176 - 182.
- 于一雷,王庆锁,2008. 密云水库及其主要河流入库河段水质的季节变化[J]. 中国农业气象, 29(4):432 - 435.
- 张敏,邵美玲,蔡庆华,等,2010. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 22(2):281 - 290.
- 赵萌,王秀琳,秦秀英,等,2001. 密云水库水生生物调查[J]. 中国水产科学, 8(1):53 - 58.
- Buss D F, Baptista D F, Silveira M P, et al, 2002. Influence of water chemistry and environmental degradation on macroinvertebrate assemblages in a river basin in south-east Brazil[J]. Hydrobiologia, 481(1): 125 - 136.
- Capehart A A, Hacknty C,1989. The potential role of roots and rhizomes in structuring salt marsh benthic communities[J]. Estuaries,12:119 - 122.
- Duran M, 2006. Monitoring water quality using benthic macroinvertebrates and physicochemical parameters of Behzat stream in Turkey[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 15(5): 709 - 717.
- Luczak C, Janquin M A, Kupka A, 1997. Simple Standard procedure for the routine determination of organic matter in marine sediment[J]. Hydrobiologia, 345(1):87 - 94.
- Richardson S M, Hanson J M, Lock A, 2002. Effects of impoundment and water-level fluctuations on macrophyte and macroinvertebrate communities of a dammed tidal river[J]. Aquatic Ecology, 36(4):493 - 510.
- Ricklefs R E, Schluter D, 1993. Species Diversity in Ecological Communities[M]. Chicago: The University of Chicago Press.
- Thomsen A G, Friberg N, 2002. Growth and emergence of the stonefly *Leuctra nigra* in coniferous forest streams with contrasting pH[J]. Freshwater Biology, 47(6): 1159 - 1172.
- Zbikowski J, Kobak J, 2007. Factors influencing taxonomic composition and abundance of macrozoobenthos in extralittoral zone of shallow eutrophic lakes[J]. Hydrobiologia, 584:145 - 155.

(责任编辑 万月华)

Community Structure and Spatial-temporal Variation of
Zoobenthos in Miyun Reservoir, Beijing

LI Yong-gang¹, HU Qing-jie¹, QU Jiang-qi², ZONG Hai-ming¹, WANG Jian¹, ZHANG Qing-jing²

(1. Beijing Miyun District Fisheries Technology Promotion Station, Beijing 101500, P.R.China;
2. Beijing Key Laboratory of fishery Biotechnology, Beijing Fisheries
Research Institute, Beijing 100068, P.R.China)

Abstract: Miyun Reservoir is the only surface drinking water resource for Beijing City and its water quality has received much attention. The community structure and spatiotemporal variation of zoobenthos is important for a full understanding of the water quality status and trends in Miyun Reservoir. To study the influence of the South-to-North Water Transfer Project on the community structure of zoobenthos in Miyun Reservoir, a monthly investigation of zoobenthos was carried out at seven sampling sites from 2014 to 2016, except for ice cover period, focusing on species composition, density, biomass, dominant species and biodiversity. A total of 17 zoobenthos species were observed in Miyun Reservoir, including the larvae of 12 Chironomid species and 5 species of Annelida. Dominant species included *Prosilocerus akamusi* and *Limnodrilus claparedianus*, both indicators of eutrophic water. The average zoobenthos density and biomass were 455.0 ind/m² and 2.70 g/m² and there was distinct spatiotemporal variation. Temporally, zoobenthos density and biomass peaked in November (808.9 ind/m² and 6.94 g/m²), while minimum values (180.4 ind./m² and 0.72 g/m²) occurred in August. Spatially, zoobenthos density and biomass were highest (916.7 ind./m², 6.08 g/m²) at the reservoir center and lowest (307.1 ind/m², 0.70 g/m²) at the Baishe River Dam. Biodiversity was highest in April, with respective Shannon-Wiener diversity, Pielou evenness, Margalef richness index values of 1.43, 1.13, 1.14, and lowest in September, with respective values of 0.38, 0.27, 0.31. The highest biodiversity indices (1.08, 0.64, 1.01) were observed in Chaohe River cove and values were relatively low at Chaohe River Dam and Baihe River Dam. The results indicate that the zoobenthos community structure in Miyun Reservoir is depth dependent and that the community structure is unstable as zoobenthos continue responding to the South-to-North Water Transfer Project.

Key words: zoobenthos; community structure; biodiversity; spatial-temporal variation; Miyun Reservoir