

不同营养类型水库大型底栖动物的 群落结构特征及其水质评价

吕光俊, 熊邦喜*, 刘 敏, 杨学芬, 覃 亮, 陈 朋, 徐 微, 刘俊利

(华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要: 2006~2007 年对湖北省 4 座不同营养类型水库的大型底栖动物群落结构和多样性进行周年研究, 并进行了水质评价。共采集到底栖动物 39 种, 其中寡毛类 14 种、水生昆虫 19 种、软体动物 6 种。以金沙河的底栖动物种类最多, 达 24 种, 其次为徐家河 19 种, 道观河和桃园河各 10 种。4 座水库优势种类各异, 金沙河为多毛管水蚓 (*Aulodrilus pluriset*)、隐摇蚊 (*Cryptochironomus* sp.)、多足摇蚊 (*Polypedilum* sp.) ; 徐家河为瑞士水丝蚓 (*Limnodrilus helveticus*)、前突摇蚊 (*Procladius* sp.) ; 桃园河为多毛管水蚓 (*Aulodrilus pluriset*)、长跗摇蚊 (*Tanytarsus* sp.) ; 水质污染比较严重的道观河水库优势种类为霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、大红德永摇蚊 (*Tokunagayusurika akamusi*)。各库底栖动物年平均密度和生物量分别为: 金沙河 $316.8 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, $1294.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 道观河 $318.2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, $430.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 徐家河 $330.3 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, $517.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 桃园河 $209 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, $325.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。TN、TP、COD 平均含量变幅分别为 $0.392 \sim 1.018$ 、 $0.011 \sim 0.042$ 、 $3.505 \sim 9.166 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 采用理化分析、Goodnight-Whitley 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数对水库的水质进行了综合评价, 结果表明: 金沙河水库属中营养型; 徐家河和桃园河属中-富营养型; 道观河水库属富营养型。对水库主要的物理化学因子与寡毛类、水生昆虫、软体动物密度, 以及各类底栖动物之间进行矩阵分析, 发现水生昆虫与水深呈负相关关系, 随着水深的增加, 其密度和种类下降, 水深超过 10m, 下降的幅度更明显; 寡毛类有从属于 TN 和 TP 含量的趋势, TP 变化对底栖动物的影响更大; 寡毛类、水生昆虫、软体动物三者之间无相关性。

关键词: 大型底栖动物; 多样性指数; 生物指数; 群落结构; 水质评价; 水库

文章编号: 1000-0933(2009)10-5339-11 中图分类号: Q145, Q178, Q958 文献标识码: A

The community structure of macrozoobenthos and water quality assessment on different trophic types of reservoirs

LÜ Guang-Jun, XIONG Bang-Xi*, LIU Min, YANG Xue-Fen, QIN Liang, CHEN Peng, XU Wei, LIU Jun-Li

College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5339 ~ 5349.

Abstract: The community structure and biodiversity of macrozoobenthos were investigated and water quality was assessed with the four different trophic types of reservoirs in Hubei province from 2006 to 2007. A total of 39 taxa were identified, among which 14 were oligochaetes, 19 were aquatic insects, and 6 were molluscs. Jinshahe Reservoir had 24 species of zoobenthos, Xujiahe Reservoir had 19, and Daoguanhe and Taoyuanhe Reservoir had 10. Dominant species were different from reservoirs. They were *Aulodrilus pluriset*, *Cryptochironomus* sp., *Polypedilum* sp. in Jinshahe reservoir, *Limnodrilus helveticus*, *Procladius* sp. in Xujiahe reservoir, and *Aulodrilus pluriset*, *Tanytarsus* sp. in Taoyuanhe reservoir. However, *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Tokunagayusurika akamusi* were the dominant species in Daoguanhe Reservoir, where the water was polluted seriously. The average density and biomass of zoobenthos were $316.8 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ and $1294.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ in Jinshahe Reservoir, $318.2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ and $430.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ in Daoguanhe Reservoir, $330.3 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ and $517.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ in Xujiahe

基金项目: 国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03B02-04); 湖北省“十一五”重大科技攻关资助项目(2006AA203A03-03)

收稿日期: 2008-06-08; **修订日期:** 2008-12-10

致谢: 加拿大 Université Laval 赵振山博士对写作给予帮助, 谨此致谢。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bangxi8@mail.hzau.edu.cn; gjlv66@163.com

Reservoir, $209 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ and $325.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ in Taoyuanhe Reservoir. The average TN, TP and COD were $0.392 - 1.018 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.011 - 0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $3.505 - 9.166 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Water quality was assessed using both physical and chemical analyses, including Goodnight-Whitley index, Shannon-Wiener index, Margalef index, Simpson index and Pielou index. These analyses indicated that Jinshahe Reservoir was mesotrophic, Xujiuhe and Taoyuanhe Reservoirs were meso-eutrophic and Daoguanhe Reservoir was eutrophic. Comparative analysis of the five indices suggested that the criteria of the Shannon-Wiener and Margalef indices need correction and improvement for water quality assessment of reservoirs, despite they are widely used. Moreover, the Simpson index was found to be unsuitable for water quality assessment in deep reservoirs. Matrix analyses indicated that the density and species of aquatic insects declined with an increase of water depth and that oligochaetes were affected by TN and TP. The influence of TP on zoobenthos was more obvious than that of TN. No correlations were found among species of zoobenthos.

Key Words: macrozoobenthos; biodiversity index; biotic index; community structure; water quality assessment; reservoir

大型底栖动物是水生态系统食物链中重要组成部分,在水库优势类群主要包括水生寡毛类、水生昆虫、软体动物。由于底栖动物个体较大,寿命长,活动能力和活动范围较小,对环境条件反应敏感,可综合反映出污染物对环境和生物产生的影响,其种类组成和群落结构特征可作为水质评价的指示生物^[1~3]。有关底栖动物的群落结构和多样性研究的报道较多^[4~6]。利用底栖动物来评价水环境质量主要集中在河流和湖泊中^[7~9],但有关水库的报道相对较少^[10,11],综合利用多样性指数和生物指数对水库水质生物学评价的报道就更少。本文根据 2006~2007 年在湖北省的 4 座水库 12 个断面,累计 48 次采样的监测数据,把水深、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN、TP 等主要的物理化学因子与寡毛类、水生昆虫、软体动物密度进行了相关性分析,并采用 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Goodnight-Whitley 指数、Pielou 均匀度指数相结合对水库的水质进行评价。旨在探讨 4 座水库大型底栖动物群落结构特征及现存量,各类底栖动物之间,各类底栖动物与主要生态因子的关系,以及 4 座水库的水质类型和适合水库水质评价的生物指数。以便为底栖动物在水库的演替,水库渔业资源的合理利用,水环境保护与水质评价等相关研究积累基础资料。

本研究的 4 座水库地处湖北省境内,地跨 $\text{N}30^\circ19' \sim 32^\circ9'$, $\text{E}113^\circ6' \sim 115^\circ0'$ 。均属长江中游地区的大中型水库。徐家河库容为 7.780 亿 m^3 ,面积 3813.3 hm^2 ,道观河库容为 1.070 亿 m^3 ,面积 500 hm^2 ,金沙河库容为 1.787 m^3 ,面积 1333.3 hm^2 ,均属丘陵型水库;桃园河库容为 0.583 亿 m^3 ,面积 389.0 hm^2 ,属山谷型水库。金沙河、桃园河主要接纳农田地表径流来水;徐家河和道观河除接纳农田地表径流来水之外,还要接纳一定数量的城镇生活污水。4 座水库既是典型的渔业基地,又是重要的旅游景点,除道观河外,其余 3 座水库还是饮用水的供应基地。2000 年以前盛行施肥养鱼,网箱养鱼,大量的无机和有机肥入库后,水库水质均受到了不同程度的污染,加速了水体的富营养化进程。

1 材料与方法

1.1 采样时间和采样点

2006 年 11 月,2007 年 2 月、5 月、8 月中旬对金沙河、道观河、徐家河和桃园河的底栖动物进行采样。样站设置在水库上游、中游和下游,分别用 I、II 和 III 表示,并用 GPSI2 型全球卫星定位系统定位。

1.2 采样方法与样品分析

定量样品采集用 $1/16 \text{ m}^2$ 改良彼得生挖泥器采集底泥,在现场先后用孔径为 0.85 mm 和 0.425 mm 的分样筛分筛底泥,洗净后在解剖盘中将肉眼能看得见的底栖动物分检出,放入装有 10% 的甲醛溶液的广口瓶中,贴上标签(写明地点、编号、日期),带回实验室进行计数、称重和种类鉴定。如果寡毛类和摇蚊幼虫数量太多,分筛过后则将洗净泥沙装入塑料袋中,带回实验室再进行分检。计数时,每个采样点所得的底栖动物应按不同种类准确地统计个体数,在标本已有损坏的情况下,一般只统计头部,不统计零散的腹部、附肢。样品在室内称重时,先将样品表面的水分吸干,再用电子秤(精度为 0.0001)分别称重。最后将所有的样品均换算成

密度($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$)和生物量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)。

1.3 物种多样性指数及生物指数

计算底栖动物的多样性指数和生物指数有 Shannon-Wiener 多样性指数(H)^[12]、Margalef 多样性指数(D)^[13]、Simpson 多样性指数(d)、Goodnight-Whitley 生物指数(I_{GW})^[14]、Pielou 均匀度指数(E)：

$$H = - \sum_{i=1}^s (n_i/N) \log_2 (n_i/N); \quad D = \frac{(S-1)}{\ln N};$$
$$d = \frac{N(N-1)}{\sum_{i=1}^s n_i(n_i-1)}; \quad E = \frac{H}{\ln S}; \quad I_{\text{GW}} = \frac{n'_i}{N}$$

式中, S 样品中生物的种类数, n_i 为样品中第 i 种生物的个体数或密度, N 为样品中生物的总个体数或总密度。 n_i 是寡毛类的个体数或密度。

相应的水质评价标准见表 1^[12~14]。

表 1 底栖动物生物指数和多样性指数的评价标准^[12~14]
Table 1 Evaluation criteria of biological index and diversity index of zoobenthos^[12~14]

指数 Index	标准 Standard			
	清洁 Clean	中污 Mesotrophic	重污 Meso-eutrophic	严重污染 Eutrophic
Goodnight-Whitley, I_{GW}	<60%	60% -	-80%	>80%
Shannon-Wiener, H	>3.0	3.0~2.0	2.0~1.0	<1.0
Margalef, D	>3.0	3.0~2.0	2.0~1.0	<1.0
Simpson, d	>6	6~3	3~2	<2
Pielou, E	>0.5	0.5~0.3	0.3~0	-

1.4 水化因子的分析

$\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 、 TN 的测定方法按资料^[15]进行,TP 用硫酸硝解法测定。

1.5 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 软件进行。实验结果的各项数据为相应水库实测值的算术平均值(除非有特殊说明)。

2 结果与分析

2.1 种类组成与分布

2006~2007 年间在所调查的 4 座水库中,共采集底栖动物 39 种。其中寡毛类 14 种,占 35.9%,水生昆虫 19 种,占 48.7%,软体动物 6 种,占 15.4%(附表)。表 2 是各类底栖动物现存量及所占百分率,从表 2 可以看出,水库底栖动物主要由水生昆虫和寡毛类构成,软体动物少见。由于各水库所处的地理位置,环境条件,养殖方式的不一样,底栖动物也有明显的差别。金沙河 24 种,其中寡毛类 8 种,占 33.3%,水生昆虫 12 种,占 50%,软体动物 4 种,占 16.7%;道观河 10 种,其中寡毛类 4 种,占 40%,水生昆虫 6 种,占 60%;徐家河 19 种,其中寡毛类 11 种,占 57.9%,水生昆虫 6 种,占 31.6%,软体动物 2 种,占 10.5%;桃园河 10 种,其中寡毛类 4 种,占 40%,水生昆虫 5 种,占 50%,软体动物 1 种,占 10%。

2.2 现存量

底栖动物密度年平均变化幅度不大,为 $209\sim330.3\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$,生物量的变化主要受软体动物的影响,变化幅度为 $325.3\sim1294.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。金沙河、道观河、徐家河、桃园河的年平均密度和生物量分别为: $316.8\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1294.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; $318.2\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $430.7\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; $330.3\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $517.4\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; $209\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $325.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从表 2 可以看出金沙河软体动物的密度为 $7.5\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$,仅占 2.4%,但生物量达到了 $762.2\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$,占 58.5%;道观河全年未出现软体动物,也反映了水质状况较差。

表 2 各类底栖动物密度($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$)、生物量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)及所占百分率Table 2 The density($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$), biomass($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) and accounted percentage of zoobenthos

时间 Time	生物类群 Organisms	金沙河 Jinshahe		道观河 Daoguanhe		徐家河 Xujiahe		桃园河 Taoyuanhe	
		密度 Density 生物量 Biomass	(%)	密度 Density 生物量 Biomass	(%)	密度 Density 生物量 Biomass	(%)	密度 Density 生物量 Biomass	(%)
2006-11	寡毛类 Oligochaeta	113.4	33.1	257.2	65.6	167.6	41.1	112.7	52.5
		203.9	13	345.8	61.7	187.8	32.4	119.8	43.8
	水生昆虫 Aquatic insect	220.5	64.3	134.7	34.4	239.8	58.9	101.9	47.5
		348.2	22.3	214.6	38.3	392.4	67.6	153.5	56.2
2007-02	寡毛类 Oligochaeta	8.9	2.6						
		1011.6	64.7						
	水生昆虫 Aquatic insect	117.6	35.5	216.1	65	113	45.5	109.1	46.9
		123	10.8	211.5	46.7	88.7	24.3	148.2	33.7
2007-05	寡毛类 Oligochaeta	208.8	62.9	116.5	35	124.6	50.2	112.6	48.5
		428.7	37.8	241.2	53.3	250.7	69.2	204.6	46.6
	水生昆虫 Aquatic insect	5.3	1.6			10.7	4.3	10.7	4.6
		583	51.4			23.1	6.4	86.5	19.7
2007-08	寡毛类 Oligochaeta	84.3	25.6	209.2	62.9	166.2	43	80.7	35.7
		110.7	8.2	213	53.5	189.7	26.9	80.2	20.8
	水生昆虫 Aquatic insect	236.1	71.7	123.5	37.1	220.3	57	140	61.9
		469.1	34.9	185.1	46.5	514.8	73.1	266.7	19.2
2007-08	寡毛类 Oligochaeta	8.9	2.7					5.5	2.4
		764.1	56.9					38.6	10
	水生昆虫 Aquatic insect	79.1	26.6	139.7	64.8	117.9	42.3	98.4	60.4
		85	7.5	161.2	51.7	129.1	30.6	92.7	45.7
2007-08	寡毛类 Oligochaeta	172.1	70.6	75.8	35.2	155.6	55.8	64.5	39.6
		359.6	31.7	150.5	48.3	280.3	66.3	110.3	54.3
	水生昆虫 Aquatic insect	6.9	2.8			5.3	1.9		
		689.9	60.8			13.1	3.1		

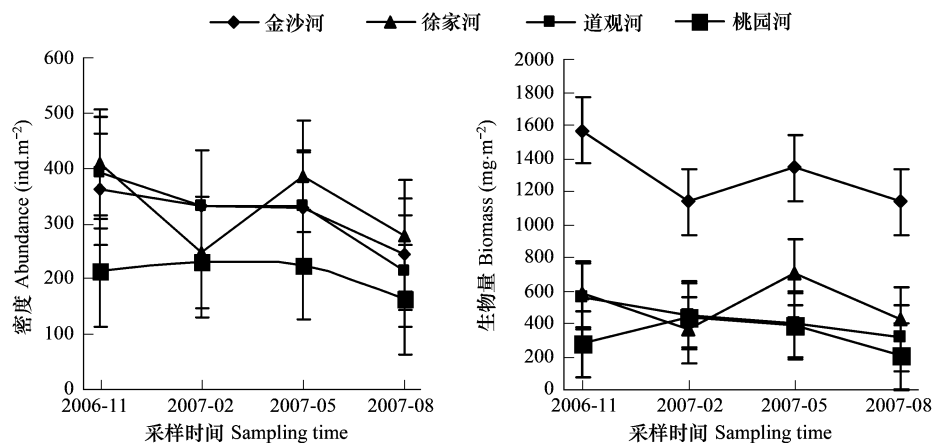


图 1 底栖动物密度和生物量的季节变化

Fig. 1 Seasonal change of density and biomass of zoobenthos

各库底栖动物密度和生物量的季节变化、空间变化都很明显。金沙河、道观河、徐家河的密度和生物量的季节变化均为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季, 桃园河为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季(图 1)。从空间变化来看, 道观河、徐家河、桃园河变化趋势一致, 密度和生物量均为上游 > 中游 > 下游; 金沙河的密度变化与其余 3 水库一致, 生物量为下游 > 上游 > 中游, 原因在于金沙河水库的下游出现了大个体的软体动物(图 2)。

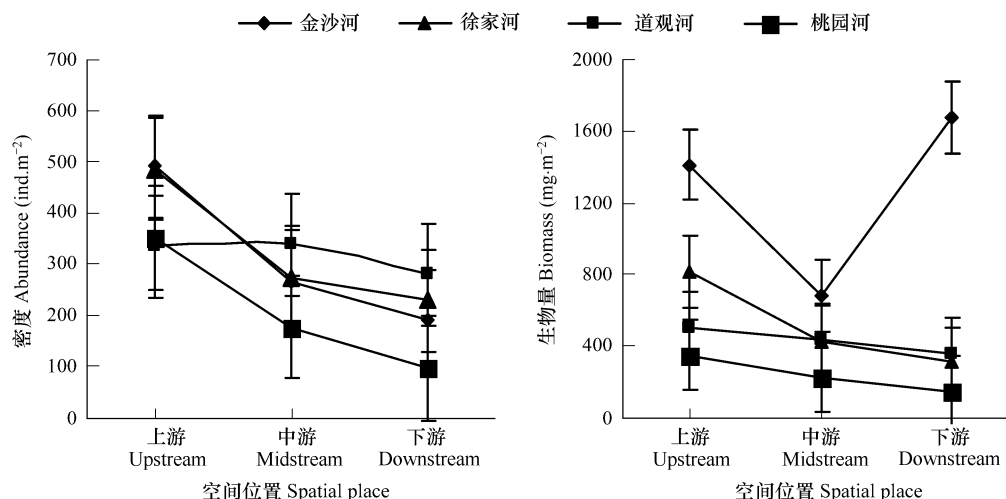


图2 底栖动物密度和生物量的空间变化

Fig. 2 Spatial change of density and biomass of zoobenthos

2.3 优势种群

底栖动物的优势种群在不同的水库是不尽相同的,优势种群的变化主导不同水库底栖动物群落结构的变动,进而也可反映水库环境因子的变化。金沙河的优势种类为多毛管水蚓、隐摇蚊,多足摇蚊;道观河为霍甫水丝蚓、大红德永摇蚊;徐家河为瑞士水丝蚓、前突摇蚊;桃园河为多毛管水蚓、长跗摇蚊。从具体的优势种类,大致可反映出各水库水质状况。从出现的频率来看,道观河的霍甫水丝蚓、大红德永摇蚊分别占寡毛类 69.1%,水生昆虫 71.5%;徐家河的瑞士水丝蚓、前突摇蚊分别占寡毛类 62.3%,水生昆虫 49.9%;桃园河的多毛管水蚓、长跗摇蚊分别占寡毛类的 66.7%,水生昆虫 53.7%;金沙河的优势种类与其余各库相比,出现的频率明显偏低,多毛管水蚓、隐摇蚊分别占寡毛类 36.3%,水生昆虫 28.9%。从图 3 可以看出,各库优势种类密度和生物量的变化趋于一致,徐家河为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季,道观河为秋季 > 冬季 > 春季 > 夏季,桃园河为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季,金沙河底栖动物密度和生物量的优势种类无明显的季节变化。

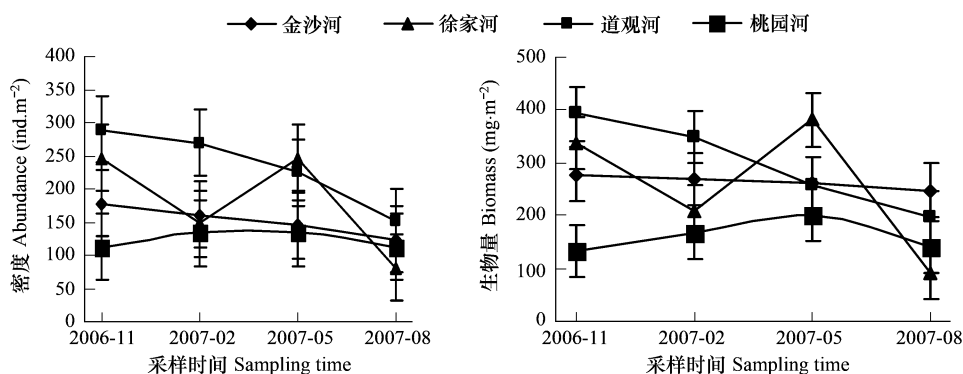


图3 底栖动物优势种类密度和生物量的季节变化

Fig. 3 Seasonal change of density and biomass of the dominant species of zoobenthos

2.4 底栖动物的多样性与生物指数

根据全年 12 个采样点,累计 48 次采样的调查结果,计算出了 Shannon-Wiener (H')、Margalef (D') 和 Simpson (d') 多样性指数,Goodnight-Whitley (I_{CW}) 生物指数以及 Pielou (E') 均匀度指数(表 3)。根据各指数值,结合相应的评价标准(表 1),对 4 座水库进行了水质评价。根据此标准可以认为金沙河属清洁水体,徐家河、桃园河属中度污染水体,道观河属重污染水体。

表 3 底栖动物的生物指数和多样性指数

Table 3 Biological index and diversity index of zoobenthos

水库 Reservoir	时间 Time	指数 Index				
		I_{GW}	d	H	D	E
金沙河 Jinshahe	2006-11	36.8	0.131	2.335	2.971	0.703
	2007-02	35.5	0.105	2.495	3.27	0.751
	2007-05	25.6	0.091	2.458	3.245	0.74
	2007-08	26.5	0.135	2.203	2.875	0.663
	平均 Average	31.1	0.115	2.373	3.09	0.714
道观河 Daoguanhe	2006-11	65.6	0.196	1.588	1.349	0.478
	2007-02	65	0.151	1.459	1.471	0.439
	2007-05	62.9	0.153	1.686	1.378	0.508
	2007-08	64.8	0.165	1.539	1.309	0.463
	平均 Average	64.8	0.166	1.568	1.378	0.472
徐家河 Xujiahe	2006-11	70	0.091	1.875	2.287	0.469
	2007-02	45.5	0.135	2.003	2.663	0.513
	2007-05	42.7	0.131	2.177	2.712	0.588
	2007-08	42.3	0.105	1.969	2.169	0.517
	平均 Average	50.2	0.115	2.006	2.467	0.522
桃园河 Taoyuanhe	2006-11	52.5	0.167	1.603	0.945	0.483
	2007-02	46.9	0.198	2.121	1.771	0.638
	2007-05	35.7	0.764	1.861	1.35	0.56
	2007-08	60.3	1.154	1.87	1.326	0.563
	平均 Average	48.9	0.571	1.864	1.348	0.561

2.5 与物理化学因子的关系

将各类底栖动物的密度与水深、TN、TP 等水化因子(表 4)进行矩阵分析,发现水生昆虫与水深呈显著的负相关,水生昆虫随着水体深度的增加而减少,水深超过 10 米,变化更加明显;寡毛类与 TN、TP 有呈正相关关系的趋势,与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 之间相关性不明显;同时对寡毛类、水生昆虫、软体动物三者之间进行相关性分析,发现它们之间无相关性(表 5、表 6)。

表 4 4 座水库的水质状况

Table 4 Water quality of four reservoirs investigated

指标 Index	金沙河 Jinshahe	道观河 Daoguanhe	徐家河 Xujiahe	桃园河 Taoyuanhe
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.289	0.424	0.167	0.167
$\text{NO}_3^- \text{-N}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.055	0.093	0.06	0.057
TN ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.392	1.018	0.970	0.704
TP ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.012	0.042	0.03	0.011
COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.505	9.166	5.022	5.171
WH (m)	12.53	9.192	15.83	16.38

表 5 金沙河(左下角)和道观河(右上角)底栖动物的密度与环境因子的相关矩阵

Table 5 Matrix analysis of density and environmental factor of zoobenthos in Jinshahe Reservoir (Lower left quarter) and Daoguanhe reservoir (Top right corner)

	水深 Depth	TN	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	寡毛类 Oligochaeta	水生昆虫 Aquatic insect	软体动物 Mollusc
水深 Depth	—	0.312	0.197	0.215	0.223	0.416	-0.814	
TN	0.282	—	0.538	0.512	0.573	0.878 *	0.613	
TP	-0.345	0.289	—	0.393	0.287	0.832 *	0.713	
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.117	0.531	0.379	—	0.169	0.443	0.372	
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.323	0.436	0.287	0.371	—	0.379	0.321	
寡毛类 Oligochaeta	0.339	0.803 *	0.859 *	0.562	0.356	—	-0.349	
水生昆虫 Aquatic insect	-0.834	0.834 *	0.879 *	-0.125	0.277	0.367	—	
软体动物 Mollusc	0.512	-0.417	-0.213	-0.247	0.153	0.191	0.279	—

表 6 徐家河(左下角)和桃园河(右上角)底栖动物的密度与环境因子的相关矩阵

Table 6 Matrix analysis of density and environmental factor of zoobenthos in Xujiahe Reservoir (Lower left quarter) and Taoyuanhe reservoir (Top right corner)

项目 Item	水深 Depth	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	寡毛类 Oligochaeta	水生昆虫 Aquatic insect	软体动物 Mollusc
水深 Depth	-	0.134	0.287	0.197	0.331	-0.145	-0.934	0.431
TN	0.112	-	0.176	0.431	0.339	0.772	0.786	0.141
TP	0.108	0.453	-	0.479	0.177	0.809 *	0.774	0.189
NH ₄ ⁺ -N	0.322	0.567	0.169	-	0.578	0.479	0.234	0.231
NO ₃ ⁻ -N	0.287	0.632	0.224	0.366	-	0.431	0.119	-0.103
寡毛类 Oligochaeta	0.532	0.811 *	0.834 *	0.456	0.356	-	0.456	0.221
水生昆虫 Aquatic insect	-0.773	0.723	0.801 *	0.137	0.278	0.245	-	0.358
软体动物 Mollusc	0.231	0.071	0.123	-0.106	-0.143	0.102	0.174	-

3 讨论

3.1 水环境条件与底栖动物的分布特点

底栖动物长期生活于水体底部,水环境条件直接影响到它们的存活,生长和繁殖,决定底栖动物的组成和数量变动,正是由于底栖动物特殊的生态学习性,它可以反映和监测水环境的质量。从所调查 4 座水库底栖动物种类和密度空间分布来看,上游>中游>下游,随着水体深度的增加,底栖动物的密度和种类下降,水深超过 10m,这种变化幅度更为明显。金沙河上游 23 种,中游 21 种,下游 17 种;道观河上游和中游各 9 种,下游 7 种;徐家河上游 18 种,中游 17 种,下游 14 种;桃园河上游 10 种,中游 8 种,下游 5 种。从附表可以看出,水库平均水深(桃园河(16.38m)>徐家河(15.83m)>金沙河(12.53m)>道观河(9.192m))越深,变化越明显,这种变化主要体现在水生昆虫的种类和数量上,桃园河水生昆虫与水深的负相关指数达到-0.934。一方面随着水体深度的增加,水环境条件发生了相应的改变,如 DO 降低,H₂S、NO⁻²等有毒有害物质增多,影响了底栖动物的生命活动和繁殖;另一方面,下游有机质相对缺乏,底栖动物都喜欢丰富的有机质,有机质丰富的上游、中游,底栖动物自然分布就多。这与陈其羽在研究武汉东湖底栖动物时指出,底栖动物(主要是寡毛类和水生昆虫)的数量有随水深而递减的规律^[16]具有一致性。

为了进一步探讨 4 座水库各类底栖动物与主要水化因子的相关关系,以及各类底栖动物之间的相关性,本文得出了寡毛类,水生昆虫,软体动物之间,以及与 TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 之间的矩阵分析表,从表 5、表 6 可以看出:寡毛类与 TN、TP 相关系数在道观河、徐家河和金沙河分别为 0.878、0.832、0.811、0.834、0.803、0.859,TN 与 TP 相比较,TP 变化对底栖动物的影响更大,底栖动物在这种密度明显地从属于 TN 和 TP 的含量也有人在湖泊中做过研究^[16];水深与水生昆虫负相关系数均在-0.8 以下,桃园河达到了-0.934;NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 与底栖动物相关性不明显,最大相关系数出现在道观河的 NO₃⁻-N 与寡毛类之间,为 0.443,大部分都在 0.4 以下;水生寡毛类,水生昆虫,软体动物三者之间无相关性。

各库底栖动物群落结构的差异也很大。道观河的 TN、TP 达到了 1.018mg·L⁻¹、0.042mg·L⁻¹,是典型的富营养化水体,物种的结构单一,优势种突出,而且优势种是强耐污种类的霍甫水丝蚓、大红德永摇蚊;桃园河是典型的山谷型水库,底栖动物的组成、密度、生物量也符合这一特征;寡污带的长跗摇蚊、劳氏摇蚊,β 中污带的多毛管水蚓等一些较清洁的种类在水质良好的金沙河广泛分布,而且每次采样在金沙河都可采集到方格短卷螺、梨形环棱螺、河蚬等软体动物;徐家河属于典型的中富营养型水体,其优势种类为 β 中污带的瑞士水丝蚓,α 中污带的前突摇蚊。造成这种差异的原因在于物种的地理分布,水环境条件,水库渔业利用方式不同所致。

3.2 生物多样性指数与水质评价

摇蚊科部分种的幼虫如大红德永摇蚊、羽摇蚊和寡毛类少数种如霍甫水丝蚓被广泛用来作为水体污染的

指示生物^[17,18]。Patton 将与特殊的环境条件密切相关的生物定义为环境指示种 (environmental indicators), 这些指示种能接受环境污染持续的影响和具有对污染的效应非常敏感的特性, 故用于评估和测定环境变化^[19]。道观河水库寡毛类个数与大型底栖动物个体数之比为 0.648, 其余 3 座水库均在 0.6 以下, 按照 Goodnight-Whitley 生物指数评价标准, 道观河水库为有机污染, 金沙河、徐家河、桃园河水库水质良好。Wright 认为寡毛类密度在 $100 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下时为无污染; $100 \sim 999 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ 时为轻微污染; $1000 \sim 5000 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ 时为中度污染。金沙河水库寡毛类的平均密度为 $98.6 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, 水质无污染, 道观河、徐家河、桃园河水库寡毛类的平均密度均在 $100 \sim 999 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 为轻污染。按照均匀度指数的评价标准, 金沙河水库水质清洁, 徐家河、桃园河水库为轻污染, 道观河水库为中污染。根据以上 3 种评价方案, 结合水库 TN、TP、COD 情况, 可以看出金沙河水库水质清洁, 属中营养型; 徐家河、桃园河水库水质轻污染, 属中-富营养型; 道观河水库水质中污染, 属富营养型。3 种评价方法都能较好地反映水库的水质状况。

许多学者明确提出了多样性指数可用来反映底栖动物群落结构、组成及功能等方面的内在信息, 同时还可监测环境变化对底栖动物的影响及水环境质量^[20,21]。表 3 给出了 4 座水库底栖动物的 Shannon-Wiener、Margalef 和 Simpson 生物多样性指数, 4 座水库 Simpson 生物多样性指数均在 1 以下, 水质严重污染, 属超富营养型。各库的 Shannon-Wiener 和 Margalef 生物多样性指数也比较低, 水质良好的金沙河水库 Shannon-Wiener 为 2.373, 道观河、桃园河均在 2 以下; 金沙河水库 Margalef 生物多样性指数为 3.09, 其余 3 座水库都在 3 以下, 按照相应的评价标准, 金沙河水库为中度污染, 属富营养型, 道观河、徐家河和桃园河水库为重污染, 属超富营养型。这与前面的多种生物指数评价结果, 以及水库的实际营养状态不一致, 原因在于多样性指数值对样品组成种类的依赖性大^[22], 外加水库的水交换频繁, 水深, 落差大, 在很多采样点采集到的物种数很少, 另外水库水生高等植物缺少, 软体动物生活的环境条件也受到限制。正是由于水库生态环境的特殊性, 广泛用于湖泊水质评价的底栖动物生物多样性指数, 在评价水库水质时, 须加以修正和完善。

4 结论

水生昆虫与水深呈负相关关系, 随着水深的增加, 其密度和种类下降, 水深超过 10m, 下降的幅度更明显, 寡毛类有从属于 TN 和 TP 含量的趋势, TP 对底栖动物的影响较 TN 明显。

通过底栖动物多样性指数与生物指数, 结合 TN、TP、COD 等指标, 对 4 座水库进行水质评价。金沙河水库水质清洁, 属中营养型; 徐家河、桃园河水库水质轻污染, 属中-富营养型; 道观河水库水质中污染, 属富营养型。

References:

- [1] Armitage P D, Moss D, Wright J F, *et al.* The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Research*, 1983, 17: 333–347.
- [2] Dai Y Z, Tang S Y, Zhang J B. The distribution of zoobenthos species and bio-assessment of water quality in Dongting lake. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 1999, 21(4): 83–87.
- [3] Digiovanni M V, Goretti E. Macroinvertebrates in montedoglio reservoir, central Italy. *Hydrobiologia*, 1996, 321: 17–28.
- [4] Xie Z C, Liang Y L, Wu T H. Diversity of zoobenthos in lakes in the medium reaches of chingjiang river. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, 20 (suppl): 103–113.
- [5] Lars Hakanson, Viktor V, Boulion. Modelling production and biomasses of zoobenthos in lakes. *Aquatic Ecology*, 2003, 27(3): 277–306.
- [6] Bakanov A I. Present-day state of zoobenthos in the upper volga reservoirs. *Water Resources*, 2003, 30(5): 559–568.
- [7] Cai X M, Ren C J, Zong Z X. Benthic macroinvertebrate communities in Qinglong River and assessment of its water quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 30(5): 559–568.
- [8] Liu Y, Vermaat J E, Ruyter E D de, Kruijff H A M de. The correlation between macrofauna distribution and nitrogen as well as phosphorus in the pearl river and the Liuxi river. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, 42(1): 95–99.
- [9] Lenatt D R. Water Quality Assessment of Stream using a Qualitative Collection Method for Benthic Macroinvertebrates. *J. North Am. Benthol. Soc.*, 1988, 73: 122–223.
- [10] Wan C Y, Wu X H, Hu C L. Investigation and comprehensive assessment of zoobenthos of reservoirs in Jiangsu Province. *Journal of Lake Sciences*,

2004,16(1):43—48.

[11] Xiao H, Li Z W, Bao J, *et al.* Investigation and biological assessment of zoobenthos community in Daqing reservoir. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(9):181—183.

[12] Shannon C E, Wiener W J. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois, Urbana, 1949. 117.

[13] Margalef D R. *Information theory in ecology*. *Gen Syst*, 1957, 3:36—71.

[14] Goodnight H A, Whitley L S. Oligochaetes as indicators of pollution. *Proceedings 15th annual waste conference*. Purdue University, Lafayette, Indiana, 1960, 139—142.

[15] National environmental protection bureau. *Guide of analytical method on monitoring water and waste water*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 1—199.

[16] Chen Q Y, Liang Y L, Wu T H. Studies on community structure and dynamic of zoobenthos in lake Donghu, Wuhan. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1980, 7(1):41—56.

[17] Iwakuma T, Yasuno M. Fate of the univoltine chironomid, *Tokunagayusurika akamusi* at emergence in lake Kasumigaura, Japan. *Arch Hydrobiol*, 1983, 99:37—59.

[18] Gyorgy Devai. An attempt to trace eutrophication in a shallow lake using chironomids. *Hydrobiologia*, 1983, 103:169—175.

[19] Patton D R. Is the use of “management indicator species” feasible? *Western Journal of Applied Forestry*, 1987, 2:33—34.

[20] Ren S Z. The characteristics of benthic macroinvertebrate community and water quality in Beijing-Tianjin Area. *Acta Ecologica Sinica*, 1991, 11(3):262—268.

[21] Gong Z C, Xie P, Tang H J, *et al.* The Influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25(3):210—216.

[22] Ma X F, Xiong B X, Wang M X. The community structure and biodiversity of macrozoobenthos in Daoguanhe reservoir, Hubei Province. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1):49—55.

参考文献:

[2] 戴友芝,唐受印,张建波. 利用底栖动物群落特征评价洞庭湖污染的研究. *湘潭大学自然科学学报*, 1999, 21(4):83~87.

[4] 谢志才,梁彦龄,吴天惠. 长江中游湖泊底栖动物多样性的研究. *水生生物学报*, 1996, 20(增刊):103~113.

[7] 蔡晓明,任久长,宗志祥. 青龙河底栖无脊椎动物群落结构及其水质评价. *应用生态学报*, 1992, 3(4):364~370.

[8] 刘玉, Vermaat J E, Ruyter E D de, Kruijff H A M de. 珠江、流溪河大型底栖动物分布和氮磷因子的相关分析. *中山大学学报(自然科学版)*, 2003, 42(1):95~99.

[10] 万成炎,吴晓辉,胡传林. 江苏省水库底栖动物调查及其综合评价. *湖泊科学*, 2004, 16(1):43~48.

[11] 肖红,李钟玮,包军,等. 大庆水库底栖动物群落调查及生物学评价. *环境科学管理*, 2006, 31(9):181~183.

[15] 国家环保总局编. *水和废水监测分析方法*. 北京:中国环境科学出版社, 2002. 1~199.

[16] 陈其羽,梁彦龄,吴天惠. 武汉东湖底栖动物群落结构和动态的研究. *水生生物学集刊*. 1980, 7(1):41~56.

[20] 任淑智. 京津及邻近地区底栖动物群落特征与水质等级. *生态学报*, 1991, 11(3):262~268.

[21] 龚志军,谢平,唐汇涓,等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. *水生生物学报*, 2001, 25(3):210~216.

[22] 马徐发,熊邦喜,王明学. 湖北道观河水库大型底栖动物的群落结构及物种多样性. *湖泊科学*, 2004, 16(1):49~55.

附表 四座水库大型底栖动物的种类组成和时空分布(ind·m⁻²)

Species composition and spatio-temporal distribution of macrozoobenthos at the reservoirs													
水库 Reservoirs	种类 Species	2006-11			2007-02			2007-05			2007-08		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
金沙河	霍甫水丝蚓	6.4	16.4	16.4	0	0	10.7	0	0	5.3	0	0	0
	中华颤蚓	16.4	32	16	16.4	16.4	10.7	5.3	10.7	0	5.3	7.2	0
	多毛管水蚓	64.4	32.8	113	64.7	48.4	64.7	32.8	64.8	48.6	14.8	9.6	26.4
	皮氏管水蚓	0	32	0	10.7	0	32.6	0	16	10.7	9.2	3.2	0
	管水蚓	16	0	12.8	6.4	19.2	0	0	0	10.7	17.6	20.8	14.4
	克拉泊水丝蚓	0	0	5.3	12.5	10.7	16	10.7	0	5.3	16.4	16.4	32.7
	普通仙女虫	5.3	0	16	0	16	0	0	0	16	0	0	0
	叉形管盘虫	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0
	直突摇蚊	64.4	32.8	16.4	48.3	32.8	16	32.8	0	0	32.8	16.4	0

续表

水库 Reservoirs	种类 Species	2006-11			2007-02			2007-05			2007-08		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
道观河	褐跗隐摇蚊	32.8	0	0	16	0	0	0	32.8	16	48.9	16	12.8
	隐摇蚊	96.7	64.3	32.8	144	33.6	5.3	112	0	0	129	96	12.8
	细长摇蚊	32.8	16	0	5.3	0	0	0	0	0	0	0	0
	多足摇蚊	112	16	0	80.4	32.8	10.7	128	32.8	16	32.6	32.3	16
	前突摇蚊	48	0	0	16.4	0	0	64	16	0	12.8	11.2	8
	花纹前突摇蚊	0	0	0	10.7	0	0	16	80.3	0	0	0	0
	长跗摇蚊	64	0	5.3	64.7	0	32.8	0	0	0	5.3	5.3	0
	菱跗摇蚊	5.3	0	0	0	10.7	0	32	0	0	0	0	0
	劳氏摇蚊	5.3	0	0	32.8	0	0	0	64.4	32.8	11.2	8	6.4
	异腹鳃摇蚊	0	16	0	0	0	0	32	0	0	9.6	5.3	0
	细髯	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0
	梨形环棱螺	0	5.3	5.3	0	0	0	5.3	0	5.3	3.4	2.3	3.2
	方格短卷螺	0	0	0	0	0	0	5.3	0	0	5.3	0	0
	曲螺属	5.3	0	10.7	5.3	0	5.3	0	0	10.7	0	0	0
	河蚬	0	0	0	0	0	5.3	0	0	0	8.7	2.3	9.6
	霍甫水丝蚓	144	225	208	80.3	160	277	160	112	144	96.3	80.3	144
	苏氏尾鳃蚓	46.7	32.3	16	0	16.4	32.3	32.3	32.3	48.7	16	32.7	16.4
	中华颤蚓	32.3	16.7	16.4	48.7	0	0	16.7	32.3	32.3	0	0	32.7
	印西头鳃虫		32.3	0	0	16.7	16.7	0	16.4	0	0	0	0
徐家河	大红德永摇蚊	112	129	48.7	144	129	16.4	96.3	80.7	32.3	80.4	32.3	16.7
	多足摇蚊	16.4	16.4	0	16	0	0	16	16.4	16.4	16	0	0
	前突摇蚊	32.3	16.4	0	14.4	5.3	16.4	16.4	32.3	0	32.3	16.4	0
	粗腹摇蚊	0	16	0	16	16.4	0	0	0	0	0	0	0
	花纹前突摇蚊	0	16.7	0	16	16.7	0	0	16	0	0	16.7	0
	拟长足摇蚊	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0
	霍甫水丝蚓	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	5.3
	夹杂带丝蚓	5.3	5.3	10.7	0	6.4	9.6	5.3	16	32.3	10.7	10.7	16
	瑞士水丝蚓	64.7	113	160	96	64	11.2	64.7	113	160	32.8	96	80
	中华颤蚓	16	5.3	10.7	0	0	16	0	10.7	5.3	0	10.7	16
	多毛管水蚓	16	10.7	5.3	32	32	0	10.7	0	0	10.7	5.3	0
	皮氏管水蚓	5.3	16	5.3	0	0	0	5.3	0	0	0	0	0
	管水蚓	5.3	0	0	16.4	16.4	24	10.7	5.3	5.3	32.7	10.7	0
	苏氏尾鳃蚓	10.7	0	0	16	0	0	5.3	0	0	0	0	0
	单孔蚓	5.3	0	0	0	5.3	12.7	0	0	10.7	0	0	10.7
	印西头鳃虫	10.7	10.7	0	0	0	0	5.3	0	0	5.3	0	0
	普通仙女虫	0	0	10.7	0	0	0	0	0	16	0	0	0
	中国长足摇蚊	80	48.7	10.7	32	0	0	0	0	0	32	16	0
	前突摇蚊	353	32.8	16	96.3	112	64.4	273	96.3	32.7	0	32.7	0
	花纹前突摇蚊	48.3	16	0	32	0	0	16.4	0.	0	208	96	0
	蛾蜉	16.4	0	0	0	16	0	0	0	32.7	0	0	32.7
	异腹鳃摇蚊	16.4	0	32.7	16	0	0	48.7	0	0	0	0	0
	摇蚊属	32.7	16	0	0	5.3	0	80.7	64.3	16.4	16.4	0	0
	梨形环棱螺	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0
	杜氏蚌	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	16
桃园河	霍甫水丝蚓	0	0	0	32	32.3	16.7	16	32.3	16.4	32.7	16.7	32
	多毛管水蚓	161	64.4	32.3	80	80	32	48.7	80	32	32	48	112

续表

水库 Reservoirs	种类 Species	2006-11			2007-02			2007-05			2007-08		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
	中华颤蚓	32.3	16	32.3	16.4	16.4	16	0	16.4	0	0	0	0
	肥满仙女虫	0	0	0	5.3	0	0	0	0	0	0	0	0
	三代环足摇蚊	80.7	0	0	64.3	0	0	32.7	0	0	16.4	16	0
	前突摇蚊	96	32	0	32.7	0	0	64.7	32.3	16.4	0	0	0
	长跗摇蚊	48.7	32	0	160	48	0	144	64.7	0	96.3	32.8	16
	粗腹摇蚊	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	隐摇蚊	0	16.4	0	16.4	16.4	0	16.4	16.4	0	16	0	0
	光华狭口螺	0	0	0	32	0	0	16.4	0	0	0	0	0

霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*; 中华颤蚓 *Tubifex sinicus*; 多毛管水蚓 *Aulodrilus pluriseti*; 皮氏管水蚓 *Aulodrilus pigueti*; 管水蚓 *Aulodrilus* sp.; 克拉泊水丝蚓 *Limnodrilus claparedianus*; 普通仙女虫 *Nais communis*; 叉形管盘虫 *Aulophorus furcatus*; 直突摇蚊 *Orthocladius* sp.; 褐跗隐摇蚊 *Cryptochironomus fuscimanus*; 隐摇蚊 *Cryptochironomus* sp.; 细长摇蚊 *Tendipes Attenuatus* sp.; 多足摇蚊 *Polypedilum* sp.; 前突摇蚊 *Procladius* sp.; 花纹前突摇蚊 *Procladius choreus*; 长跗摇蚊 *Tanytarsus* sp.; 菱跗摇蚊 *Clinotanytus* sp.; 劳氏摇蚊 *Lavenderdornia* sp.; 异腹鳃摇蚊 *Einfeldia* sp.; 细臀 *Caenis* sp.; 梨形环棱螺 *Bellamya purificata*; 方格短卷螺 *Semisulcospira cancellata*; 曲螺属 *Ancylus* sp.; 河蚬 *Corbicula fluminea*; 苏氏尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi*; 印西头鳃虫 *Branchiodrilus hortensis*; 大红德永摇蚊 *Tokunagayusurika akamusi*; 粗腹摇蚊 *Tanytus* sp.; 拟长足摇蚊 *Paraianytarsus* sp.; 夹杂带丝蚓 *Lumbriculus variegatus*; 瑞士水丝蚓 *Limnodrilus helveticus*; 单孔蚓 *Monopylephorus* sp.; 中国长足摇蚊 *Tanytus chinensis*; 蛾蜉 *Epeorus*; 摇蚊属 *Chironomus* sp.; 杜氏蚌 *Unio douglasiae*; 肥满仙女虫 *Nais inflata*; 三代环足摇蚊 *Cricotopus trifasciatus*; 光华狭口螺 *Stenothyra glabra*; 水库 Reservoir; 种类 Species; 金沙河 Jinshahe; 道观河 Daoguanhe; 徐家河 Xujiahe; 桃园河 Taoyuanhe