

DOI: 10.5846/stxb201312243014

徐杭英,于海燕,韩明春,黄平沙,李共国.浙江饮用水源地浮游动物群落特征及环境响应.生态学报,2015,35(21): - .

Xu H Y, Yu H Y, Han M C, Huang P S, Li G G.Characteristics of the zooplankton community and their association with environmental factors in drinking water sources, Zhejiang Province, China.Acta Ecologica Sinica,2015,35(21): - .

浙江饮用水源地浮游动物群落特征及环境响应

徐杭英¹,于海燕¹,韩明春¹,黄平沙²,李共国^{2,*}

1 浙江省环境监测中心,杭州 310007

2 浙江万里学院生物与环境学院,宁波 315100

摘要:2010年1月至2011年10月,对浙江省16个饮用水源地(H1—H8为河网型,K1—K8为水库型)的浮游动物群落进行季节调查。共记录浮游动物优势种(属)21种(轮虫8种、枝角类5种、剑水蚤5种和哲水蚤3种),各类群第一优势种分别为针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)、粗壮温剑水蚤(*Thermocyclops dybowskii*)和汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)。2年间,河网和水库浮游动物平均密度分别为345.2 ind./L和199.4 ind./L,生物量分别为0.667 mg/L和0.421 mg/L。各类群密度百分比均以轮虫和桡足类无节幼体为主,甲壳动物以剑水蚤为主。经逐步回归分析表明,浮游动物群落密度(生物量)与河网水质因子($P < 0.01$)之间相关性比水库($P < 0.05$)更密切,总磷和氨氮分别入选了河网和水库所有有效的回归方程中。通径分析和决策系统分析表明,河网的总磷和叶绿素a含量对浮游动物群落变动具有正效应,溶解氧具有负效应;总磷含量是影响河网群落变动的最重要因子,叶绿素a含量则是影响群落增长最主要的限制因子。河网剑水蚤、无节幼体和轮虫群落的密度(生物量)与水体综合营养指数 $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$)之间有显著的线性回归关系($P < 0.001$),无节幼体密度构成了 $TLLc_{\text{密度}}$ 变动的限制因子,轮虫生物量成为 $TLLc_{\text{生物量}}$ 变动的限制因子,而剑水蚤是一类最重要、稳定的水质指示群落,这对于筛选浮游动物群落的一些拓展性监测指标具有重要的参考作用。

关键词:饮用水源地;浮游动物;逐步回归分析;通径分析; $TLLc$

Characteristics of the zooplankton community and their association with environmental factors in drinking water sources, Zhejiang Province, China

XU Hangying¹, YU Haiyan¹, HAN Mingchun¹, HUANG Pingsha², LI Gongguo^{2,*}

1 Zhejiang Environment Monitoring Center, Hangzhou 310007, China

2 College of Biological and Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China

Abstract: This study aimed to understand the characteristics of zooplankton community structure and their association with environmental factors in different sources of drinking water. A seasonal investigation was conducted on zooplankton from two drinking water sources (8 rivers and 8 reservoirs) in Zhejiang Province, China, from January 2010 to October 2011. A total of 21 dominant species (genus) of zooplankton (8 Rotifera, 5 Cladocera, 5 Cyclopoida, and 3 Calanoida) were recorded. The primary dominant species in each group of zooplankton were *Polyarthra trigla*, *Bosmina longirostris*, *Thermocyclops dybowskii*, and *Sinocalanus dorrii*, respectively. Nine of the dominant species (genera) were at the same time indicator species of water trophic state. The more frequently that indicator species of trophic state occurred, the more comprehensive the trophic level index ($TLLc$) ($P < 0.01$) of the rivers was. Over the 2-year study period, the average density of zooplankton in the rivers and reservoirs was 345.2 ind./L and 199.4 ind./L, respectively, while the biomass was 0.667 mg/L and 0.421 mg/L, respectively. Rotifer and copepod nauplii dominated both the rivers and reservoirs, representing 87.9% and 88.3% density, respectively. Crustaceans were mainly Cyclopoida, which had 2 times the biomass of Calanoida in the

收稿日期:2013-12-24; 网络出版日期:2015-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ligongguo@tom.com

rivers, whereas Calanoida had 2 times the biomass of Cyclopoida in the reservoirs. The river community density (biomass) coefficient of variation ranged between 158.2% and 325.5%, while that of reservoirs ranged between 107.8% and 345.2%. The results of the stepwise regression analysis showed that the correlative coefficient between the density (biomass) of the zooplankton community and the water quality factors was much higher in the rivers ($P < 0.01$) than in the reservoirs ($P < 0.05$). Total phosphorus (TP) and ammonia nitrogen primarily occurred in the rivers and the reservoirs in all effective regression equations, respectively. Path and decision coefficient analysis showed that TP and chlorophyll a (Chl.a) content in the rivers had a positive effect on the population dynamics of the zooplankton community (rotifers, copepod nauplii, and Cyclops), whereas dissolved oxygen content had a negative effect. TP was the most important factor affecting population dynamics of rotifers, copepod nauplii, and Cyclops in the rivers, whereas Chl.a was the most important factor limiting the communities growth. The reservoir fishery resources aquaculture might cause zooplankton abundance to decline, the Calanoida community to gradually disappear, and the water trophic state to transform from nitrogen limitation conditions to phosphorus limitation conditions. The river community (rotifers, copepod nauplii, and Cyclops) density (biomass) had a significant linear regression relationship with the water trophic index $TLLc_{Density}$ ($TLLc_{Biomass}$) ($P < 0.001$). Copepod nauplii density constituted a limiting factor for $TLLc_{Density}$, due to its maximum average coefficient of variation (261.8%). Rotifer biomass constituted a limiting factor for $TLLc_{Biomass}$, due to its maximum average coefficient of variation (257.9%). The average variation coefficient of Cyclops density (biomass) was moderate, with small fluctuations; thus, this group represented the most important and stable water quality indicator. The study results provide an important reference for selecting specific expansion indicators of the zooplankton community in water quality monitoring. None of the zooplankton community density (biomass) groups in the reservoirs had any significant linear regression relationships with the water $TLLc$ ($P > 0.05$).

Key Words: Drinking water sources; zooplankton; stepwise regression analysis; path analysis; comprehensive of trophic level index

饮用水水库占浙江省 51% 城乡饮用水源地, 供水人口达 62%, 但库区污染源和人类活动已对水库水源地水质安全构成威胁^[1]。溪、江、河流型饮用水源地, 水质更易受到富营养化和突发污染事件的影响^[2-3]。近年来的一些研究表明, 利用浮游动物类群的协调性^[4]、群落的扩展性参数^[5-6]等方法均可作为水质监测的指示器, Jeppesen 等^[7]还建议欧盟将浮游动物作为一个敏感的生态质量元素包涵在水环境框架指令 (Water Framework Directive) 中参与评估。但至今尚无一个强有力的浮游动物群落监测指标能与水体营养度相匹配, 在营养水平较低的饮用水源地的相关研究则更少, 其水质评价主要还是以化学监测为主, 生物学评价工作仅限于底栖动物和菌落总数^[8-9]。因此, 本文以地处亚热带的浙江省两类饮用水源地——河网型与水库型为研究对象, 比较和分析了浮游动物群落特征及其对环境变化的响应, 以期对浮游动物群落结构监测水质奠定基础。

1 材料与方法

1.1 站位布设与采样方法

根据浙江省饮用水源地主要由大江、大溪、河流和水库等组成特点, 将由大江、大溪、河流等流速较大的水源地归为河网型, 选取其中 8 个水源地作为河网型采样站 (H1—H8); 水流速较缓的水库 (型) 水源地也选取 8 个采样站 (K1—K8), 共 16 个浮游动物采样站 (图 1)。

于 2010 年 1 月至 2011 年 10 月逐季 (1 月、4 月、7 月和 10 月中旬) 采样, 由全省各地方监测站定点、定时 (上午 9:00—11:00 时) 分别采样与送样, 采样和计数按《淡水浮游生物研究方法》^[10] 进行, 定量样品用 2.5 L 采水器分别于该样站取水口的上、下水层, 各采 10 L 水样, 用 25 号筛绢制成的浮游生物网 (网孔孔径 64

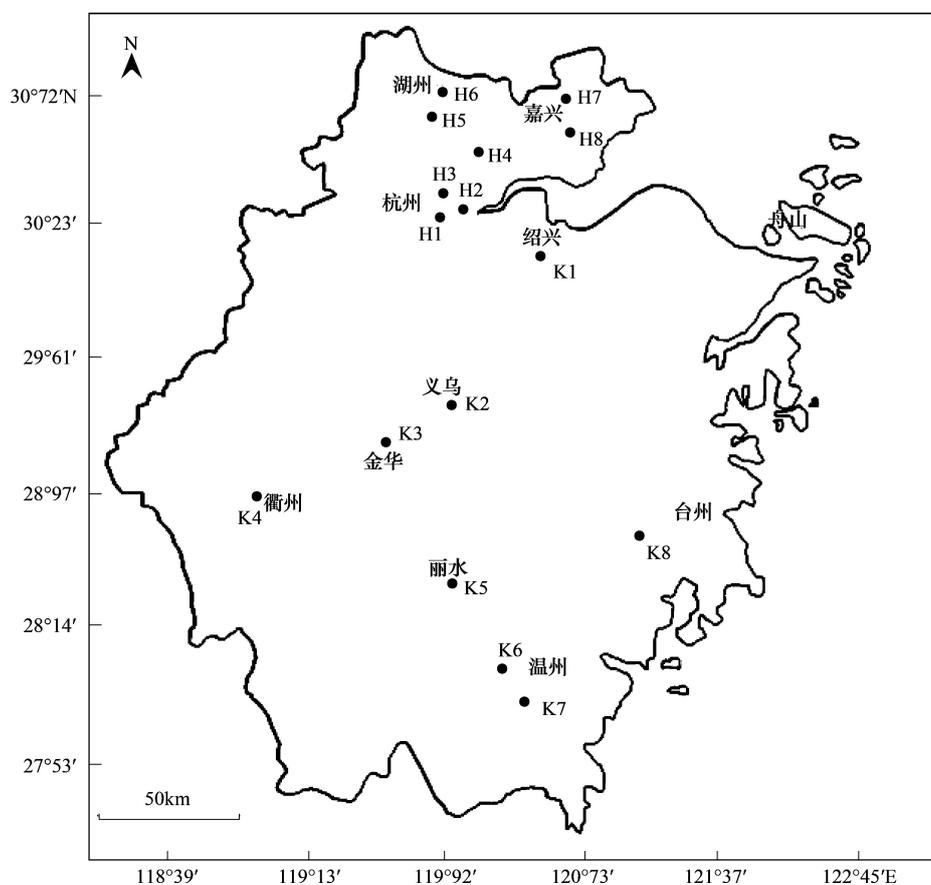


图1 浙江饮用水源地浮游动物采样点分布

Fig. 1 Distribution of zooplankton sampling stations in the drinking water sources, Zhejiang

μm) 过滤浓缩, 当即用福尔马林(约 40% 甲醛溶液) 固定, 终浓度为 5%, 带回实验室镜检。同时测定水体 pH 值、DO (dissolved oxygen)、TN (total nitrogen)、TP (total phosphorus)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (ammonia nitrogen,) 和 Chl. a (chlorophyll a) 等理化参数。

1.2 标本鉴定与计算方法

轮虫、枝角类和桡足类分别按王家楫^[11]、蒋燮治和堵南山^[12]、沈嘉瑞^[13] 鉴定, 生物量计算主要参照章宗涉和黄祥飞^[10]、陈雪梅^[14]。桡足幼体和成体数量按该种桡足类成体出现频率乘以样本总数计算。各类浮游动物的优势种分别按每个种在各自类群中的优势度值(Y) 来确定, 公式为: $Y = (ni/N) \times fi$, ni 为第 i 种的个体数, N 为该类群的总密度, fi 为该种出现的频度。 $Y \geq 0.02$ 时为优势种^[15]。水体综合营养状态指数 (Comprehensive of trophic level index, $TLLc$) 参考王明翠等^[16] 计算。

1.3 统计分析

浮游动物群落与水环境因子之间的逐步回归分析, 分别以浮游动物 Zoop (Zooplankton)、轮虫 Roti (Rotifera)、枝角类 Clad (Cladocera)、剑水蚤 Cycl (Cyclopoida)、哲水蚤 Cala (Calanoida) 和无节幼体 Naup (Nauplius) 的密度(生物量) 为因变量, 以水质 DO、pH、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 Chl. a 含量为自变量, 进行逐步回归分析。水体 $TLLc$ 与群落之间的逐步回归分析, 则以 $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$) 为因变量, 以各类群浮游动物密度(生物量) 为自变量, 进行逐步回归分析^[17]。计算自变量对因变量影响相对重要性的统计数-通径系数, 将相关系数分解为直接作用系数和间接作用系数, 通过对通径系数绝对值的比较就可确定对因变量有显著影响的自变量的主次顺序^[18]。并通过计算决策系数, 把各自变量对响应变量的综合作用进行排序, 以确定主要决策变量和限制变量^[19], 以上计算分析均应用 DPS (Data Processing System) 数据处理系统完成。

2 结果

2.1 饮用水源地理化参数

16 个饮用水源地中,以河网型的 H7、H8 站的 TN、TP 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量最高,均极显著地高于其他各站 ($P < 0.01$),其中,尤其以河网水(除 H4 站)的 TP 含量极显著地高于水库水 ($P < 0.01$);而 H7、H8 站的 DO 含量最低 ($P < 0.01$)。pH 值以 H5、H6 站为最高,Chl.a 含量以 K4 站极显著地高于 H1—H4 站、K1 站(表 1)。另外, TN : TP 比值以 K6、K7 站极显著地高于 H1、H5—H8 站 ($P < 0.01$)。

2.2 群落优势种和富营养化指示种

2010—2011 年间有 21 种(属)浮游动物(轮虫 8、枝角类 5、剑水蚤 5 和哲水蚤 3)达到优势种程度(表 2), 各类群的第一优势种分别为针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、长额象鼻蚤 (*Bosmina longirostris*)、粗壮温剑水蚤 (*Thermocyclops dybowskii*) 和汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*)。2011 年河网型水体轮虫、剑水蚤的优势种均比 2010 年增加了 1 种,而枝角类和哲水蚤的优势种分别减少了 3 种和 1 种;2011 年水库轮虫的优势种比 2010 年增加了 2 种,而枝角类、剑水蚤和哲水蚤的优势种均减少了 1 种。

表 1 2010—2012 年水质参数(平均值±标准差)

Table 1 Water quality parameters in the sampling stations in the drinking water sources during 2010—2012 (mean ± SD)

采样站 Stations	溶解氧 Dissolved oxygen mg/L	pH 值 pH Value	总氮(TN) Total nitrogen mg/L	总磷(TP) Total phosphorus mg/L	氨氮 Ammonia nitrogen mg/L	叶绿素 a Chlorophyll a μg/L	总氮 : 总磷 TN : TP
H1	6.50±1.43 ^{DE}	7.58±0.22	2.630±0.638	0.090±0.025 ^C	0.420±0.256 ^C	0.898±0.333 ^B	29.84±9.48 ^C
H2	6.61±1.34 ^{CDE}	7.62±0.23	2.776±0.668	0.093±0.039 ^C	0.432±0.286 ^C	1.105±0.260 ^B	34.10±14.30 ^{BC}
H3	6.35±1.19 ^{DE}	7.51±0.18 ^C	2.622±0.610	0.088±0.038 ^C	0.416±0.243 ^C	0.671±0.236 ^B	34.04±15.63 ^{BC}
H4	7.18±2.51	7.63±0.29	3.487±0.433 ^B	0.081±0.015 ^{CD}	0.444±0.193 ^C	0.699±0.284 ^B	44.70±11.34 ^{BC}
H5	8.32±2.84	8.05±0.29 ^A	2.477±0.981	0.152±0.053 ^B	0.391±0.321 ^C	3.125±3.282	19.74±13.41 ^C
H6	8.72±2.96	8.01±0.23 ^{AB}	1.786±0.725	0.119±0.039 ^{BC}	0.228±0.167 ^C	4.334±5.236	16.31±8.61 ^C
H7	3.21±0.88 ^F	7.45±0.40 ^C	5.723±1.773 ^A	0.320±0.098 ^A	2.190±1.000 ^A	3.518±2.641	18.90±7.08 ^C
H8	6.14±1.78 ^E	7.48±0.31 ^C	5.099±1.808 ^A	0.320±0.099 ^A	1.009±0.983 ^B	3.648±1.817	16.15±5.24 ^C
K1	8.85±1.01 ^{AB}	7.43±0.21 ^C	0.469±0.426 ^F	0.016±0.003 ^E	0.066±0.077 ^C	1.177±0.695 ^B	31.33±10.32 ^{BC}
K2	8.84±1.50 ^{AB}	7.69±0.77	0.607±0.152 ^F	0.019±0.005 ^E	0.306±0.174 ^C	2.212±2.467	34.44±14.00 ^{BC}
K3	9.28±1.24 ^A	7.76±0.40	0.550±0.457 ^F	0.015±0.006 ^E	0.031±0.012 ^C	2.405±3.061	30.90±40.40 ^{BC}
K4	8.21±1.04	7.41±0.60 ^C	0.788±0.173 ^{EF}	0.026±0.009 ^{DE}	0.085±0.029 ^C	5.972±6.804 ^A	36.13±24.84 ^{BC}
K5	8.19±1.18	7.27±0.56 ^C	0.706±0.183 ^F	0.024±0.011 ^E	0.094±0.034 ^C	1.603±1.796	37.58±26.44 ^{BC}
K6	8.45±0.81	7.39±0.44 ^C	1.939±0.365 ^{CD}	0.008±0.004 ^F	0.083±0.019 ^C	1.198±1.039	291.53±132.40 ^A
K7	7.66±1.09	7.41±0.52 ^C	0.916±0.126 ^{DEF}	0.014±0.010 ^E	0.088±0.049 ^C	3.334±4.353	82.53±26.05 ^B
K8	9.10±0.75 ^{AB}	7.35±0.17 ^C	0.466±0.028 ^F	0.012±0.004 ^F	0.147±0.106 ^C	1.936±1.065	41.88±13.84 ^{BC}

注:不同字母表示存在极显著差异 ($P = 0.01$)

2010 年河网水体中,咸淡水种中华哲水蚤 (*Sinocalanus sinensis*) 仅出现在 10 月份的 H5—H6 站,最高密度达 102.0 ind./L,该两水厂取水口还有较多的中华窄腹剑水蚤 (*Limnoithona sinensis*)。种群平均密度(优势度)较高的还有晶囊轮虫 (*Asplanchna* sp.) 13.9 ind./L (0.017), 主要是 H8 站 7 月种群密度达 392.0 ind./L 所致;矩形龟甲轮虫 (*Keratella quadrata*) 10.4 ind./L (0.017) 和中华窄腹剑水蚤 2.5 ind./L (0.016) 等。2011 年水库中的中华窄腹剑水蚤仅分布在 1 月份的 K5、K6 站,汤匙华哲水蚤则在 K5 站的种群密度达 88.0 ind./L。

表 2 饮用水源地浮游动物优势种的种群密度(ind./L)及其优势度(y)

Table 2 Zooplankton dominant species, population density(ind./L) and dominance(y) in the drinking water sources

种类组成 Species composition	河网 Rivers		水库 Reservoirs	
	2010	2011	2010	2011
	ind./L (y)	ind./L (y)	ind./L (y)	ind./L (y)
轮虫 Rotifera				
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	94.4(0.179)	44.4(0.071)	24.2(0.087)	18.7(0.096)
角突臂尾轮虫 * <i>Brachionus angularis</i>	22.0(0.036)	28.0(0.049)	12.8(0.027)	26.0(0.063)
萼花臂尾轮虫 * <i>B. calyciflorus</i>	9.5(0.020)	75.7(0.152)		9.8(0.030)
裂足臂尾轮虫 * <i>B. diversicornis</i>				14.3(0.034)
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	11.7(0.027)	38.7(0.093)	7.0(0.032)	6.2(0.043)
圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i>			8.7(0.020)	
晶囊轮虫 <i>Asplanchna</i> sp.				8.1(0.025)
三肢轮虫 <i>Filinia</i> sp.		14.5(0.023)		
枝角类 Cladocera				
长额象鼻溞 * <i>Bosmina longirostris</i>	8.7(0.334)	8.4(0.597)	3.9(0.218)	3.9(0.504)
短尾秀体溞 * <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	1.8(0.027)		3.1(0.077)	1.2(0.069)
颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>			2.0(0.078)	
裸腹溞 * <i>Moina</i> sp.	2.5(0.037)			
角突网纹溞 * <i>Ceriodaphnia cornuta</i>	2.0(0.020)			
剑水蚤 Cyclopoida				
台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i>	6.1(0.024)		2.5(0.053)	
粗壮温剑水蚤 <i>T. dybowskii</i>	7.8(0.043)	2.1(0.020)	2.1(0.044)	3.6(0.093)
广布中剑水蚤 * <i>Mesocyclops leuckarti</i>		3.6(0.066)	3.6(0.028)	
近邻剑水蚤 * <i>Cyclops vicinus</i>		2.1(0.065)		
中华窄腹剑水蚤 <i>Limnithona sinensis</i>				3.6(0.035)
哲水蚤 Calanoida				
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	0.7(0.036)	0.5(0.086)	1.1(0.064)	5.5(0.190)
中华哲水蚤 <i>S. sinensis</i>	3.8(0.037)			
右突新镖水蚤 <i>Neodiaptomus schmackeri</i>			0.8(0.039)	
无节幼体 Nauplius				

* 为富营养化指示种

由表 2 可见,河网和水库中具有富营养化指示作用的优势种分别为 8 种和 6 种。此外,富营养化指示种还有其它臂尾轮虫(*Brachionus* spp.)、轮虫属(*Rotaria*)、矩形龟甲轮虫、沟痕泡轮虫(*Pompholyx sulcata*)、暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)、筒弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)和圆形盘肠溞(*Chydorus sphaericus*)等。河网型水源地中,水体 *TLLc* 值随着群落富营养化指示种出现频次的增加而上升,两者之间呈极显著的正相关性 ($P<0.01$),而水库型水源地中此两者无明显相关性(图 2)。

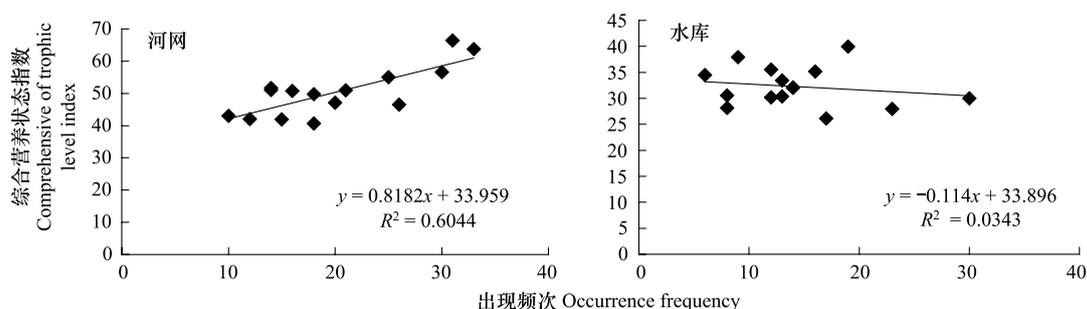


图 2 河网型、水库型水源地富营养状态指示种出现频次与 *TLLc* 之间的相关性

Fig. 2 Relationships between *TLLc* and the occurrence frequency of indicator species of trophic state in the rivers and reservoirs

2.3 浮游动物群落特征

2 年间,河网和水库浮游动物平均密度分别为 345.2 ind./L 和 199.4 ind./L(表 3),其中以体形较小的轮

虫和桡足类无节幼体为主,甲壳动物中则以剑水蚤为主,枝角类次之,哲水蚤最少。各类浮游动物密度在两类水体中的分布,剑水蚤在河网所占的百分比例较高,哲水蚤比例则在水库较高,其他类密度的百分比例相差较小。河网浮游动物密度变幅为 17.2 ind./L(H4 站)—1619.1 ind./L(H8 站);水库变幅 51.3 ind./L(K1 站)—663.2 ind./L(K8 站)。

表 3 2010—2011 年河网和水库各类浮游动物平均密度(ind./L)(±标准差)

Table 3 Each group density (ind./L) of zooplankton in the rivers and reservoirs during 2010—2012 (mean ± SD)

年份 Years	河网 Rivers		占百分比/(%) of all zooplankton	水库 Reservoirs		占百分比/(%) of all zooplankton
	2010	2011		2010	2011	
轮虫 Rotifera	229.3±539.1	234.0±379.0	67.1	165.1±317.7	106.7±224.6	68.2
枝角类 Cladocera	16.5±26.7	11.4±21.4	4.0	10.5±20.2	6.0±7.1	4.1
剑水蚤 Cyclopoida	37.8±92.2	10.2±24.1	7.0	12.0±20.4	10.0±14.8	5.5
哲水蚤 Calanoida	6.1±18.0	1.4±3.0	1.1	2.6±5.3	5.6±17.8	2.1
无节幼体 Nauplius	106.3±343.5	37.4±75.2	20.8	53.4±98.7	26.9±35.1	20.1
合计 Total	396.0	294.4	100	243.6	155.2	100

河网和水库浮游动物平均生物量分别为 0.667 mg/L 和 0.421 mg/L(表 4)。2010 年 7 月的 H7、H8 站温剑水蚤大量繁殖,生物量分别达到 2.660 mg/L 和 2.126 mg/L,2011 年 1 月的 K1、K2 站汤匙华哲水蚤生物量分别达 2.929 mg/L 和 1.396 mg/L。因此,除 2010 年河网的剑水蚤和 2011 年水库的哲水蚤生物量最高外,其余均以轮虫为主。河网剑水蚤生物量所占的百分比例是水库的 2 倍,而水库的哲水蚤生物量所占的百分比例是河网的 2 倍。河网浮游动物年平均生物量变幅为 0.028 mg/L(2011 年 H4 站)—2.456 mg/L(2010 年 H8 站);水库变幅为 0.025 mg/L(2010 年 K7 站)—1.167 mg/L(2010 年 K2 站)。

表 4 2010—2011 年河网和水库各类浮游动物平均生物量(mg/L)(±标准差)

Table 4 Each group biomass (mg/L) of zooplankton in the rivers and reservoirs during 2010—2012 (mean ± SD)

年份 Years	河网 Rivers		占百分比/(%) % of all zooplankton	水库 Reservoirs		占百分比/(%) of all zooplankton
	2010	2011		2010	2011	
轮虫 Rotifera	0.247±0.773	0.185±0.375	32.4	0.173±0.458	0.122±0.268	35.1
枝角类 Cladocera	0.177±0.280	0.097±0.172	20.5	0.114±0.225	0.051±0.055	19.7
剑水蚤 Cyclopoida	0.274±0.632	0.078±0.180	26.4	0.047±0.072	0.065±0.092	13.3
哲水蚤 Calanoida	0.143±0.430	0.031±0.064	13.0	0.054±0.114	0.166±0.573	26.1
无节幼体 Nauplius	0.077±0.226	0.024±0.046	7.6	0.033±0.060	0.016±0.021	5.8
合计 Total	0.918	0.415	100	0.421	0.420	100

各类浮游动物密度(生物量)在河网、水库中的变动很大,河网群落密度的变异系数在 161.8%(2010 年枝角类)—325.5%(2010 年无节幼体),生物量的变异系数在 158.2%(2010 年枝角类)—313.0%(2010 年轮虫)之间;水库群落密度的变异系数在 130.5%(2011 年无节幼体)—317.9%(2010 年哲水蚤),生物量的变异系数在 107.8%(2011 年枝角类)—345.2%(2011 年哲水蚤)之间。这些变异分别来自空间和时间上的差异,统计分析结果表明:2 年间,轮虫密度(生物量)在河网的不同水源地中分别存在显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)的差异,而在不同水库之间无显著差异。另外,2011 年(水库间)、2012 年(河网间)剑水蚤的生物量存在显著($P<0.05$)差异。较大的季节变异多发生于浮游甲壳动物,如 2010 年河网之间的枝角类、2011 年水库之间的枝角类和哲水蚤,它们的密度和生物量有显著($P<0.05$)的季节变化。河网的枝角类、剑水蚤和哲水蚤在 7 月、10 月的密度(生物量)显著大于 1 月、4 月,而水库中的枝角类、剑水蚤和哲水蚤则在 1 月份有较高的种群。

2.4 水质参数对浮游动物群落的影响

经逐步回归分析表明,河网水质参数与浮游动物群落之间的相关性比水库更紧密(表 5),枝角类、哲水蚤

与水质参数之间的回归方程均不理想。TP 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别入选了河网和水库所有回归方程。影响河网各类浮游动物群落年均变动主要由 DO、TP 和 Chl.a 含量综合作用的结果,根据这些因子各相关系数的组成效应,将它们与浮游动物群落密度(生物量)的相关系数剖分为直接作用和通过其它因子的间接影响两部分进行途径分析^[18]。如表 6 所示,水体 TP 含量对群落密度(生物量)变动的直接作用最大,其余依次为 Chl.a 和 DO 含量。其中,TP 含量对群落变动的直接作用大于间接作用,而 Chl.a 和 DO 含量对群落变动的间接作用均大于它们直接作用,且分别表现为正向和负向的综合作用,间接作用效应主要通过 TP 含量而发生。由此可见,河网 TP 含量可以作为一个非常重要的直接影响浮游动物群落密度(生物量)变动的参数。影响水库浮游动物生物量的直接作用和综合作用效应均以 DO 因子为最大,其次为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 因子,且均为正向。

表 5 2010—2011 年河网和水库水质参数对各类浮游动物密度 $N(\text{ind./L})$ 和生物量 $B(\text{mg/L})$ 的逐步回归分析

Table 5 Stepwise multiple regression between zooplankton density (biomass) and the water environmental factors in the rivers and reservoirs during 2010—2012

项目 Items	回归方程式 Regression equation	P 值 P value	复相关系数 R	决定系数 Det. Coe.
河网 Rivers	$N_{\text{Zoop}} = -945.1 + 91.6 \text{ DO} + 6332.3 \text{ TP} - 126.6 \text{ Chl.a}$	0.0001	0.948	0.899
	$B_{\text{Zoop}} = -1.536 + 0.194 \text{ DO} + 8.798 \text{ TP} - 0.214 \text{ Chl.a}$	0.0007	0.867	0.752
	$N_{\text{Roti}} = -172.8 + 3379.5 \text{ TP} - 49.6 \text{ Chl.a}$	0.0001	0.891	0.794
	$B_{\text{Roti}} = -0.125 + 4.431 \text{ TP} - 0.247 \text{ NH}_4\text{-N} - 0.077 \text{ Chl.a}$	0.0013	0.848	0.720
	$N_{\text{Cycl}} = -63.5 + 7.1 \text{ DO} + 438.3 \text{ TP} - 11.7 \text{ Chl.a}$	0.0002	0.901	0.812
	$B_{\text{Cycl}} = -0.059 + 2.300 \text{ TP} - 0.059 \text{ Chl.a}$	0.0002	0.884	0.782
	$N_{\text{Naup}} = -317.1 + 31.9 \text{ DO} + 1761.5 \text{ TP} - 41.0 \text{ Chl.a}$	0.0001	0.921	0.848
	$B_{\text{Naup}} = -0.196 + 0.020 \text{ DO} + 1.074 \text{ TP} - 0.025 \text{ Chl.a}$	0.0001	0.924	0.855
水库 Reservoirs	$N_{\text{Zoop}} = 44.1 + 1380.0 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0068	0.648	0.420
	$B_{\text{Zoop}} = 1.390 + 0.377 \text{ DO} - 0.622 \text{ pH} + 0.228 \text{ TN} + 2.030 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0229	0.785	0.616
	$N_{\text{Roti}} = 21.39 + 1016.1 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0212	0.570	0.325
	$N_{\text{Cycl}} = 52.4 + 8.9 \text{ DO} - 17.2 \text{ pH} + 6.5 \text{ TN} + 39.7 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0476	0.745	0.555
	$B_{\text{Cycl}} = -0.239 + 0.031 \text{ DO} + 0.252 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0182	0.679	0.461
	$N_{\text{Naup}} = 490.7 - 65.8 \text{ pH} + 347.0 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0225	0.665	0.443
	$B_{\text{Naup}} = 0.301 - 0.040 \text{ pH} + 0.210 \text{ NH}_4\text{-N}$	0.0223	0.666	0.443

注:Zoop-浮游动物、Roti-轮虫、Cycl-剑水蚤、Cala-哲水蚤和 Naup-无节幼体

表 6 影响浮游动物密度(生物量)变动的主要水质因子的相关与途径分析

Table 6 Correlation and path analysis between the density (biomass) of zooplankton and main water quality parameters

因子 Factors	相关系数 Correlative coefficient	直接作用系数 Direct path coefficient	间接作用系数总和 Total of indirect path coefficient	间接作用系数 Indirect path coefficient		
				→DO	→TP	→Chl.a
DO	-0.435(-0.269)	0.330(0.514)	-0.765(-0.783)		-0.774(-0.794)	0.009(0.011)
TP	0.887(0.742)	1.375(1.411)	-0.488(-0.669)	-0.185(-0.290)		-0.303(-0.379)
Chl.a	0.364(0.261)	-0.486(-0.608)	0.850(0.869)	-0.006(-0.010)	0.856(0.879)	

鉴于各水质因子变量对群落变动的直接影响和总影响排序可能会不同,在此引入决策系数的概念,即用决策系数把各自变量对响应变量的综合作用进行排序,以确定主要决策变量和限制变量^[19]。经计算,河网前述 3 个因子变量对群落密度的决策系数为:TP(0.549)>DO(-0.396)>Chl.a(-0.590);对群落生物量的决策系数为:TP(0.103)>DO(-0.541)>Chl.a(-0.687)。TP 的决策系数为正值、且最大,说明对群落密度(生物量)变动的综合作用最大,是影响群落动态最主要的决策因素;而 DO 和 Chl.a 对应的决策系数为负值,说明是群落变动主要的限制因子。其中,Chl.a 的决策系数最小,是影响群落增长最主要的限制因子。影响水库群落动态最主要的决策因素是 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量,pH 值是其主要的限制因子。

2.5 浮游动物群落对水体营养状态的响应

各类群浮游动物密度 N (ind./L) 和生物量 B (mg/L) 对河网水体 $TLLc$ 的逐步回归分析结果如下:

$$TLLc_{\text{密度}} = 43.850 + 0.005 N_{\text{Roti}} + 0.306 N_{\text{Cycl}} - 0.034 N_{\text{Naup}} \quad (P = 0.0002, R = 0.9138, \text{决定系数} = 0.835)$$

$$TLLc_{\text{生物量}} = 45.510 - 0.008 B_{\text{Roti}} + 0.018 B_{\text{Cycl}} + 0.072 B_{\text{Naup}} \quad (P = 0.0001, R = 0.9222, \text{决定系数} = 0.850)$$

相关系数和通径分析见表 7, 剑水蚤群落密度对 $TLLc_{\text{密度}}$ 变动的直接作用最大, 其余依次为无节幼体和轮虫。

表 7 影响河网综合营养指数 $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$) 变动的主要群落的相关与通径分析

Table 7 Correlation and path analysis between the $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$) and main group of zooplankton in the rivers

因子 Factors	相关系数 Correlative coefficient	直接作用系数 Direct path coefficient	间接作用系数总和 Total of indirect path coefficient	间接作用系数 Indirect path coefficient		
				→轮虫 Rotifera	→剑水蚤 Cyclopoida	→无节幼体 Nauplius
轮虫 Rotifera	0.726 (0.603)	0.228 (-0.319)	0.498 (0.922)		0.952 (0.297)	-0.454 (0.625)
剑水蚤 Cyclopoida	0.900 (0.892)	1.262 (0.495)	-0.362 (0.397)	0.173 (-0.191)		-0.535 (0.588)
无节幼体 Nauplius	0.836 (0.842)	-0.559 (0.713)	1.395 (0.129)	0.186 (-0.279)	1.209 (0.408)	

其中, 无节幼体和轮虫对 $TLLc$ 变动的间接作用大于直接作用, 且均为正效应, 间接作用效应主要通过剑水蚤 (繁殖产卵和为其提供食物) 而发生; 无节幼体生物量对 $TLLc_{\text{生物量}}$ 变动的直接作用最大, 其余依次为剑水蚤和轮虫。其中, 轮虫对 $TLLc_{\text{生物量}}$ 变动的间接作用大于直接作用, 且综合作用结果为正效应, 间接作用效应主要通过无节幼体 (食物竞争) 而发生。由此, 可将剑水蚤和无节幼体视作对于水体富营养化响应非常重要的群落。同样经计算前述 3 个因子变量对 $TLLc_{\text{密度}}$ 的决策系数为: 剑水蚤 (0.678) > 轮虫 (0.280) > 无节幼体 (-1.248), 影响 $TSLc_{\text{密度}}$ 变动最主要的决策因素是剑水蚤密度, 主要的限制因子是无节幼体密度; 对 $TLLc_{\text{生物量}}$ 的决策系数为: 无节幼体 (0.693) > 剑水蚤 (0.678) > 轮虫 (-0.487), 影响 $TLLc_{\text{生物量}}$ 变动的主要决策因素是无节幼体和剑水蚤的生物量, 主要的限制因子是轮虫生物量。2010—2011 年水库各类群浮游动物密度 (N) 和生物量 (B) 对水体 $TSLc$ 的逐步回归分析均无效 ($P > 0.05$)。

进一步的季节变化分析表明, 冬季 (1 月) 轮虫、春季 (4 月) 无节幼体和夏季 (7 月) 剑水蚤密度 (生物量) 与河网 $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$) 值之间均有极显著的正相关性 ($n = 16, P < 0.01$), 秋季 (10 月) 哲水蚤 (2010 年)、轮虫 (2011 年) 的密度 (生物量) 与 $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$) 值之间分别有显著的负、正相关性 ($n = 8, P < 0.05$)。水库仅冬季 (1 月) 无节幼体、春季 (4 月) 枝角类和哲水蚤 (负相关) 密度 (生物量) 与水体 $TLLc_{\text{密度}}$ ($TLLc_{\text{生物量}}$) 值之间有显著的相关性 ($n = 16, P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 饮用水源地浮游动物群落特征

河网和水库在浮游动物的优势种组成上有明显的差异, 如河网中特有的富营养化指示种有角突网纹溞、裸腹溞和近邻剑水蚤, 而水库则出现一些清水性环境指示种类, 如圆筒异尾轮虫、颈沟基合溞等 (表 2)。年间变化表现为轮虫优势种类增加了, 而浮游甲壳动物优势种类在减少的趋势, 预示着饮用水源地富营养化的加重^[20]。随着富营养化水平的提高, 对环境敏感的哲水蚤种群下降直至消失, 伴随着剑水蚤群落的上升^[6]。浙江饮用水源地中, 河网剑水蚤所占的生物量百分比是哲水蚤的 2 倍, 水库则恰好与之相反。河网浮游动物中具富营养化指示功能的优势种较多, 群落平均密度和生物量也分别比水库高出 73.1% 和 58.4% (表 3、表 4)。由此可见, 饮用水源地浮游动物的群落特征与其水环境质量密切相关。另外, 在枯水大潮期, 海水入侵不同程度地影响着钱塘江饮用水源地诸多取水口的水质 (如含氯度)^[21], 中华哲水蚤是东海桡足类优势种, 该种群在 H5—H6 站 10 月份的出现可作为饮用水受钱塘江潮汐影响的指示生物。中华窄腹剑水蚤是我国河流中发现的土著种类, 对咸度剧变的适应性强, 具有较强的生态入侵能力, 可成为抽水水库的优势浮游甲

壳类^[22]。

3.2 浮游动物群落与水环境因子的关系

河网水体的 TN 含量极高,平均值(3.363 ± 1.65 mg/L)超过 V 类水标准的 1.68 倍。除 H7、H8 站 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量极显著地高(表 1),提示该两站不断受到新近有机物的污染外,其他各站 $\text{NH}_4\text{-N}$ (0.392 ± 0.246 mg/L)和 TP (0.102 ± 0.042 mg/L)含量均达到或接近 II 类水标准;水库 TN (0.809 ± 0.510 mg/L)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (0.113 ± 0.110 mg/L)分别低于 III 类、II 类水质浓度限值,TP (0.017 ± 0.009 mg/L)含量则达到 I 类水标准。可见,饮用水源地的 TN 含量过度,TP 含量相对较低。除 H5—H8 站外,其它饮用水源地的氮磷比均大于 30,为磷限制型水体^[23],这可能导致河网 TP 是影响浮游动物群落最大的水质因子,并且 Chl.a、DO 因子均通过 TP 分别对群落产生正、负向效应的原因。Jayalakshmy 等^[24]认为海水中 DO 含量是影响海洋哲水蚤乳点水蚤 (*Pleuromamma*) 种群丰度最大的水质因子,这与本文的研究结果相似,即在营养水平较低的水库中,DO 含量对浮游动物生物量的直接作用和综合作用效应均最大。但决策分析表明,影响水库群落生物量变动最主要的决策因素是 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量,而并非磷限制型水体中的 TP,这是否与水库中极低的 TP 含量,而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度适中有关,还有待于进一步研究。另外,K3 站(部分水域)2010 年首次开展渔业资源增殖放流,投放约 9 t 滤食性的花白鲢后,浮游动物密度的季节波动明显加剧,哲水蚤种群也随之消失。尽管水体的 Chl.a 含量下降了 56.8%,而 TN 平均含量却从 2010 年的 0.088 mg/L 上升到 2011 年的 0.898 mg/L,相应的氮磷比从 6.47 上升到 68.65,氮磷比变动的标准差甚至超过了平均值(表 1),一年之际水体也由氮限制型转变为磷限制型。可见,人类的生产活动对饮用水源地群落和水质影响之甚。

3.3 浮游动物群落对饮用水源地富营养的响应

在贫营养的岩溶湖泊水体中,浮游甲壳动物的种类数、密度和生物多样性指数均低于非岩溶湖泊中^[25],这与营养水平较低的水库中浮游动物优势种类略少、密度和生物量小于营养水平较高的河网相一致;Guimares 等论述了一种温剑水蚤 (*Thermocyclops decipiens*) 具有富营养化指示作用,可作为水生生物监测工具^[26]。Beaugrand^[27]通过划分海洋哲水蚤物种组合指标(依据适合生存温度、空间的异质性),并记录其长期的南北迁移变化,以监测海洋生态系统对气候变化的响应,认为该物种组合指标含有丰富的信息,并具有敏感性。本研究获得的轮虫、剑水蚤和无节幼体群落对河网综合营养指数 $TLLc$ 响应拟合的回归方程($P < 0.001$),也可看作是一个群落组合指标。其中,剑水蚤密度(生物量)的变异系数处于中等水平,且密度(236.3%—243.9%)和生物量(230.7%—230.8%)变异系数波动范围均极小,促使其成为一类最重要和稳定的水质指示群落;而河网无节幼体密度的平均变异系数(261.8%)最大,构成了 $TLLc_{\text{密度}}$ 变动的限制因子,轮虫生物量的平均变异系数(257.9%)最大,成为 $TLLc_{\text{生物量}}$ 变动的限制因子。另外,浮游动物群落内部之间的捕食模式,即剑水蚤对纤毛虫原生动植物和枝角类的捕食率显著高于轮虫,臂尾轮虫有较高的生物多样性归因于其披有被甲的保护^[28],以及无节幼体和轮虫对 $TLLc_{\text{密度}}$ 变动的间接作用效应(主要)分别通过剑水蚤的繁殖产卵和捕食轮虫而实现(表 7),这从另一侧面说明了剑水蚤是浮游动物中最稳定的群落。哲水蚤具有与轮虫和剑水蚤呈现逆向的分布格局,它们在营养水平较低的水体中更丰富,而轮虫和剑水蚤则在营养较高的水体中分布更多^[20,29]。水库中哲水蚤占浮游动物生物量百分比例是河网的 2 倍,并且最大的群落变异表现为生物量上的波动(表 4),可见个体差异较大的后生浮游动物作为水质监测器在一定程度上会影响其稳定性,这也是许多学者试图要解决的问题,如依据各种功能特性划分的物种组合指标^[27]、对群落基础数据进行转换而成的拓展性指标^[5-6],诸如轮虫富营养指示种生物量%、甲壳动物富营养指示种生物量%、枝角类与桡足类的数量($N_{\text{Clad}}/N_{\text{Cope}}$)或剑水蚤与哲水蚤的生物量($B_{\text{Cycl}}/B_{\text{Cala}}$)之比,甲壳动物与轮虫的生物量之比($B_{\text{Crust}}/B_{\text{Roti}}$)等指标的提出,本研究结果“剑水蚤是最重要、稳定的水质指示群落”对于筛选上述拓展性指标具有重要的指导作用。

参考文献 (References):

[1] 周芬,卢晓燕.浙江省水库饮用水源地安全保障措施研究.中国农村水利水电,2009,(8):37-40.

- [2] 秦伯强, 王小冬, 汤祥明, 冯胜, 张运林. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机—原因与对策. 地球科学进展, 2007, 22(9): 896-906.
- [3] 王东宇, 张勇. 2006 年中国城市饮用水源突发污染事件统计及分析. 安全与环境学报, 2007, 7(6): 150-155.
- [4] Bini L M, da Silva L C F, Velho L F M, Bonecker C C, Lansac-Tôha F A. Zooplankton assemblage concordance patterns in Brazilian reservoirs. Hydrobiologia, 2008, 598(1): 247-255.
- [5] Paturej E, Goździewska A. Zooplankton-based assessment of the trophic state of three coastal lakes—Lebsko, Gardno, and Jamno. The Bulletin of the Fisheries Institute, 2005, 166(3): 7-25.
- [6] Vandysh O I. Zooplankton as an Indicator of the state of lake ecosystems polluted with mining wastewater in the Kola Peninsula. Russian Journal of Ecology, 2004, 35(2): 110-116.
- [7] Jeppesen E, Nöges P, Davidson T A, Haberman J, Nöges T, Blank K, Lauridsen T L, Søndergaard M, Sayer C, Laugaste R, Johansson L S, Bjerring R, Amsinck S L. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD). Hydrobiologia, 2011, 676(1): 279-297.
- [8] 张钰, 谷孝鸿. 江苏五市饮用水源地底栖动物调查及水质评价. 淮阴工学院学报, 2006, 15(3): 57-59.
- [9] 朱岩. 常州市饮用水源地环境质量生物学评价. 科技资讯, 2007, (34): 131-132.
- [10] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [11] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961: 23-284.
- [12] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志(淡水枝角类). 北京: 科学出版社, 1979: 79-273.
- [13] 沈嘉瑞. 中国动物志(淡水桡足类). 北京: 科学出版社, 1979: 53-420.
- [14] 陈雪梅. 淡水桡足类生物量的测算. 水生生物学集刊, 1981, 7(3): 397-408.
- [15] 李强, 安传光, 马强, 徐霖林, 赵云龙. 崇明东滩潮间带潮沟浮游动物的种类组成及多样性. 生物多样性, 2010, 18(1): 67-75.
- [16] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
- [17] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统—实验设计、统计分析及数据挖掘. 北京: 科学出版社, 2002: 636-644.
- [18] 陈鹏, 叶辉, 刘建宏. 云南瑞丽桔小实蝇成虫种群数量变动及其影响因子分析. 生态学报, 2006, 26(9): 2801-2809.
- [19] 袁志发, 周静萍, 郭满才, 雷雪芹, 解小莉. 决策系数——通径分析中的决策指标. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(5): 131-133.
- [20] 王晓辉, 望甜, 林秋奇, 韩博平. 华南地区典型抽水型水库后生浮游动物群落的种类组成与结构. 生态学报, 2009, 29(1): 456-465.
- [21] 孙浙英, 孙志林, 许丹. 钱塘江饮用水源地含氯度受潮汐与径流影响分析. 人民长江, 2013, 44(9): 11-14.
- [22] 望甜, 王晓辉, 韩博平. 一座抽水水库中中华窄腹剑水蚤种群动态及其对浮游甲壳类群落结构的影响. 湖泊科学, 2009, 21(1): 112-118.
- [23] 彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 15-47.
- [24] Jayalakshmy K V, Saraswathy M, Nair M. Effect of water quality parameters on the distribution of *Pleuromamma* (Copepoda—Calanoida) species in the Indian Ocean: a statistical approach. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 155(1-4): 373-392.
- [25] Stankovic I, Ternjej I, Mihaljevic Z, Furac L, Kerovec M. Crustacean plankton community (Crustacea: Copepoda and Cladocera) in gypsum karst lakes and their relation to abiotic parameters. Hydrobiologia, 2011, 666(1): 145-153.
- [26] Landa G G, Barbosa F A R, Rietzler A C, Maia-Barbosa P M. *Thermocyclops decipiens* (Kiefer, 1929) (Copepoda, Cyclopoida) as indicator of water quality in the state of Minas Gerais, Brazil. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2007, 50(4): 695-705.
- [27] Beaugrand G. Monitoring marine plankton ecosystems. I: Description of an ecosystem approach based on plankton indicators. Marine Ecology Progress Series, 2004, 269: 69-81.
- [28] Kumar R. Effects of *Mesocyclops thermocyclopoides* (Copepoda: Cyclopoida) predation on the population growth patterns of different prey species. Journal of Freshwater Ecology, 2003, 18(3): 383-393.
- [29] Nogueira M G. Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), São Paulo, Brazil. Hydrobiologia, 2001, 455(1-3): 1-18.