

## 新疆博斯腾湖浮游甲壳动物群落结构\*

王松波<sup>1</sup>, 薛庆举<sup>2</sup>, 高 光<sup>2</sup>, 汤祥明<sup>2</sup>, 陈源高<sup>2</sup>, 龚志军<sup>2\*\*</sup>

(1: 中南民族大学化学与材料科学学院, 武汉 430074)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

**摘 要:** 2010 年 6-11 月和 2011 年 1 月, 对博斯腾湖的浮游甲壳动物群落进行了调查, 并分析了环境因子对其群落结构的影响. 结果表明, 不管是在种类数量, 还是在密度和生物量上, 浮游甲壳动物都主要由枝角类组成, 且优势物种存在明显的季节变化. 在夏季, 浮游甲壳动物主要由大型的僧帽溞和短尾秀体溞组成; 在秋冬季, 随着大型种类现存量的减少, 小型的长额象鼻溞优势逐渐增加, 表明不同大小的枝角类间存在着明显的竞争作用. 回归分析显示, 浮游甲壳动物生物量和平均体长均与水温存在显著的线性关系. 相关分析显示, 长额象鼻溞和僧帽溞生物量与透明度显著正相关, 同时与 Chl.a 显著负相关, 表明藻类的大量繁殖对浮游甲壳动物优势种群有抑制作用. 多元统计分析发现, 环境因子总共解释了浮游甲壳动物群落结构总变异的 56.8%, 水温是影响浮游甲壳动物群落演替的最重要因子, 其次是水深. 剑水蚤、僧帽溞和短尾秀体溞易于在高温季节繁茂. 长额象鼻溞喜好在浅水而僧帽溞、短尾秀体溞喜好在深水区域形成密度高峰, 这种分布格局上的差异可能与鱼类的捕食有关.

**关键词:** 博斯腾湖; 浮游甲壳动物; 水温; 水深; 鱼类捕食

## Crustacean zooplankton community structure in Lake Bosten, Xinjiang

WANG Songbo<sup>1</sup>, XUE Qingju<sup>2</sup>, GAO Guang<sup>2</sup>, TANG Xiangming<sup>2</sup>, CHEN Yuangao<sup>2</sup> & GONG Zhijun<sup>2</sup>

(1: College of Chemistry and Materials, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, P. R. China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

**Abstract:** Crustacean zooplankton community in Lake Bosten was monitored and the impacts of environmental factors on crustacean zooplankton community structure were assessed during Jun. – Nov. 2010 and Jan. 2011. Results showed that crustacean zooplankton was mainly dominated by Cladocera, not only in species number, but also in density and biomass, with dominant species succeeding seasonally. In summer, crustaceans were dominated by large-sized *Daphnia cucullata* and *Diaphanosoma brachyurum*. With the decrease of large-sized zooplankton in fall and winter, the percentage of small-sized *Bosmina coregoni* increased, suggesting that competition works between zooplankton of different body size. Regression analyses indicated that crustacean biomass and mean body length were positively correlated with water temperature. Correlation analyses revealed that the biomass of *B. longirostris* and *D. cucullata* was positively correlated with transparency, but negatively with Chl.a, indicating these two dominant species being inhibited by the overgrowth of phytoplankton. Multivariate statistical analyses showed that 56.8% of the total variance in crustacean community structure was explained by environmental factors, with water temperature being the most important factor and water depth the second. High water temperature favoured the development of cyclopoids, *D. cucullata* and *D. brachyurum*. Meanwhile, *B. coregoni* preferred to flourish in shallow stations while *D. cucullata* and *D. brachyurum* in deep stations. The difference in distribution pattern of dominant species might be due to the fish predation.

**Keywords:** Lake Bosten; crustacean zooplankton; water temperature; water depth; fish predation

\* 国家环保公益性行业科研专项项目(200909048)、国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07106-004)和中南民族大学人才引进基金项目(YZZ08007)联合资助. 2011-05-23 收稿; 2011-08-25 收修改稿. 王松波, 男, 1979 年生, 讲师; E-mail: wangsb18@yahoo.com.cn.

\*\* 通讯作者; E-mail: zjgong@niglas.ac.cn.

博斯腾湖位于新疆天山南部的焉耆盆地,湖面面积 1228 km<sup>2</sup>,是我国最大的内陆淡水湖.自 1950s 以来,由于流域内大规模农业开发、工业建设以及人口的不断增加,湖滨湿地退化严重<sup>[1]</sup>,同时大量未经有效处理的污水直接或间接进入博斯腾湖,使湖中盐分、氮、磷、有机质等总量增加,导致湖水矿化度升高、生物多样性减少以及局部地区水质出现富营养化等环境问题<sup>[2-4]</sup>,给当地社会与经济的可持续发展带来了不利影响.

博斯腾湖也是新疆重要的渔业生产基地.从 1960s 开始的人为引种极大促进了渔产量的提高(从 1971 年的 1000 t 左右增加到 2010 年的 6000 t),但也导致了原有土著鱼类的消失.目前新的鱼类群落大概有 30 种,其中能形成生产量的经济鱼类有贝加尔雅罗鱼、鲤、鲫、河鲈、鲢、鳙、池沼公鱼等.根据浮游植物生物量对其理论鱼载力的计算发现:实际鱼载量要远大于理论鱼载力<sup>[5]</sup>.水环境和渔产量及鱼类群落结构的改变也导致作为饵料的浮游生物群落结构发生变化.例如,浮游植物群落由 1977–1983 年间的甲藻和硅藻占优势转变为 1987 年的蓝藻和甲藻占优势;到了 1989 年变为绿藻、蓝藻和甲藻占优势<sup>[6]</sup>.哲水蚤种类和生物量在 1979–1995 年比较丰富,从 1995 年开始减少甚至完全消失<sup>[7]</sup>.

有关博斯腾湖浮游生物资源在 1970s–1980s 末有过 4 次调查,裴新国和闫晓燕比较了在此期间的水生生物种群组成、数量、优势种和初级生产力的变化情况<sup>[6]</sup>,但由于不同年份在采样季节、频率等方面的差异较大,难以进行深入比较.对该湖浮游植物的季节动态变化有两次全面的研究<sup>[8-9]</sup>,但目前还未见有关浮游动物群落结构的详细分析和报道.依托正在进行的国家水专项——《干旱、半干旱地区湖泊水环境综合治理及生态修复技术研究与示范》,通过 2010 年 6–11 月和 2011 年 1 月的 7 次采样,本文分析了博斯腾湖浮游甲壳动物的群落结构以及环境因子对群落结构动态变化的影响.

## 1 研究方法

### 1.1 研究湖泊概况及采样点布设

博斯腾湖湖面海拔 1048 m,东西长 55 km,南北宽 25 km,略呈三角形.大湖面积约 988 km<sup>2</sup>,蓄水量  $9.9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>.大湖西南分布有大小不等的数十个小湖区,小湖区有较大的湖泊,总面积为 240 km<sup>2</sup>.湖水西浅东深,最深 16 m,最浅 0.8–2 m,平均深度约 10 m<sup>[10]</sup>.在本次研究中,共布设了 9 个浮游动物采样点,其中 1#–8# 采样点分布在大湖区,9# 采样点分布在小湖区(图 1).

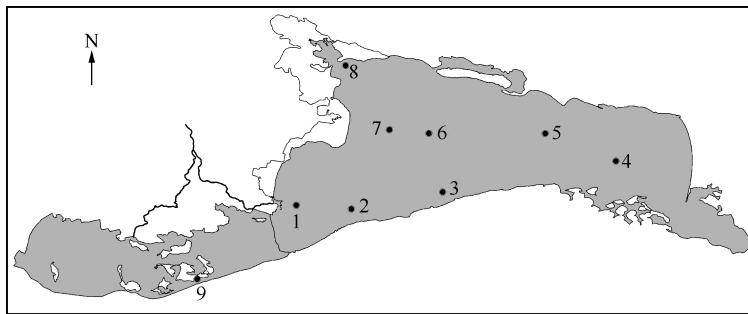


图 1 博斯腾湖浮游动物的采样点分布

Fig. 1 Zooplankton sampling stations in Lake Bosten

### 1.2 环境因子测定

采集浮游动物样品时,现场测定环境指标并采集水化学分析水样.透明度用塞氏盘测定,水深、pH、水温、浊度、盐度、矿化度、电导率及溶解氧现场用 YSI 6600 V2 多参数水质监测仪测定.采集的水样冷冻保存带回实验室,氯离子(Cl<sup>-</sup>)、硫酸根离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、铵氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、正磷酸盐磷(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)用微量流动注射分析仪(Skalar-SAI000)测定;总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl. a)及高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)的测定参考国家标准方法<sup>[11]</sup>.总有机碳(TOC)由 CE440 型元素分析仪测定.水质评价参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002).

1.3 浮游动物样品采集与分析

野外采样在 2010 年 6-11 月和 2011 年 1 月进行, 每月一次. 根据各采样点深浅, 用 5 L 采水器分上、中、下 3 层采集 15 L 水样混合, 然后经 64  $\mu\text{m}$  浮游生物网过滤, 润洗 3 次后将过滤物转移到 50 ml 塑料小方瓶, 用 4% 福尔马林固定. 在实验室内, 浮游甲壳动物样品通过显微镜在 10  $\times$  4 的放大倍数下分批次镜检, 并在每次样品计数完成之后随机测量个体体长. 对于数量多的种类最少测量 30 个, 数量少的则全部测量. 枝角类的大小测定从头部顶端(不含头盔)到壳刺基部的长度; 桡足类则测量从头部顶端到尾叉末端的长度. 生物量根据体长-体重回归方程估算<sup>[12]</sup>. 浮游甲壳动物群落的平均体长(不包括无节幼体)按下式计算: 平均体长 =  $\Sigma X_i L_i / \Sigma X_i$ , 式中,  $X_i$  代表该采样点第  $i$  种浮游甲壳动物的密度,  $L_i$  为其在该点的平均体长.

1.4 统计分析

优势浮游甲壳动物生物量与理化因子之间的相关分析使用 SPSS14.0 软件完成; 种类分布与理化因子之间的关系通过 CANOCO 4.53 软件包进行<sup>[13]</sup>. 在进行统计分析之前, 为满足数据正态分布的要求, 浮游甲壳动物密度和理化因子均进行了  $\lg(x+1)$  转换; 同时考虑到理化因子量纲的不同, 为了避免数值大小的影响, 对数化后的理化数据在使用 CANOCO 分析前进行了标准化处理. 首先对浮游甲壳动物密度矩阵进行除趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA) 以确定物种密度是呈单峰还是线性分布. 如果 DCA 分析的最大梯度长度大于 4, 则意味着物种密度呈单峰分布, 此时选择典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA); 反之则选择线性的冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA). 最后保留在分析中的环境因子经过 CCA 或 RDA 中的向前选择法 (forward selection) 获得.

2 结果与分析

2.1 博斯腾湖水环境特征

表 1 博斯腾湖的环境因子特征  
Tab.1 Characteristics of environmental factors  
in Lake Bosten

环境因子	平均值 $\pm$ 标准差	范围
透明度 (m)	2.5 $\pm$ 1.1	0.3-5.5
水深 (m)	5.7 $\pm$ 3.9	0.8-14.1
水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	17.0 $\pm$ 9.2	0.9-27.4
电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1959 $\pm$ 695	309-3180
矿化度 (mg/L)	1280 $\pm$ 454	218-2068
盐度 (‰)	1.01 $\pm$ 0.36	0.16-1.63
浊度 (NTU)	2.05 $\pm$ 5.32	0-40.20
溶解氧 (mg/L)	9.37 $\pm$ 2.41	5.45-16.10
pH	8.85 $\pm$ 0.27	7.87-9.84
Chl.a ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	2.52 $\pm$ 2.08	0-10.6
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (mg/L)	0.15 $\pm$ 0.06	0.043-0.43
TN (mg/L)	1.00 $\pm$ 0.33	0.32-2.59
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (mg/L)	0.29 $\pm$ 0.09	0.11-0.57
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	5.5 $\pm$ 1.2	2.0-8.6
$\text{Cl}^-$ (mg/L)	296 $\pm$ 142	5-554
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	480 $\pm$ 218	27-919
TOC (mg/L)	12.0 $\pm$ 9.7	1.4-30.0

博斯腾湖水水质最大的一个特征是矿化度很高, 达到 1280  $\pm$  454 mg/L, 同时  $\text{SO}_4^{2-}$  (480  $\pm$  218 mg/L) 和  $\text{Cl}^-$  (296  $\pm$  142 mg/L) 也大大超过地表水环境质量的限值, 盐分污染严重. 电导率和盐度维持在较高的水平, 分别为 1959  $\pm$  695  $\mu\text{S}/\text{cm}$  和 1.01‰  $\pm$  0.36‰. pH 平均值为 8.85, 在各采样点间的变化幅度为 2 个单位. 各采样点的水深变化范围是 0.8-14.1 m, 平均值 5.7 m; 透明度较高, 平均达到了 2.5 m. 溶解氧和铵氮含量均达到了地表水 I 类标准; COD<sub>Mn</sub> 和 TN 达到 III 类标准. Chl.a 和 TOC 的平均值分别为 2.52  $\mu\text{g}/\text{L}$  和 12.0 mg/L (表 1). 总体来看, 该湖水体处于中营养向富营养过渡阶段.

2.2 种类组成和群落结构

浮游甲壳动物共计鉴定到枝角类 10 属 11 种, 分别为僧帽溞 (*Daphnia cucullata*)、长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*)、棘爪网纹溞 (*Ceriodaphnia reticulata*)、短尾秀体溞 (*Diaphanosoma brachyurum*)、虱形大眼溞 (*Polyphemus pediculus*)、透明薄皮溞 (*Leptodora kindtii*)、圆形盘肠溞 (*Chydorus sphaericus*)、矩形尖额溞 (*Alona rectangula*)、点滴尖额溞 (*Alona guttata*)、吻状异尖额溞 (*Disparalona rostrata*)、直额弯尾溞 (*Camptocercus rectirostis*); 桡足类 5 属 5 种, 分别为台湾温剑水蚤 (*Thermocyclops taihokuensis*)、广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*)、真剑水蚤

(*Eucyclops* sp.)、某种哲水蚤 *Calanoida*. 其中优势种(密度百分比 > 10%) 分别为长额象鼻蚤、僧帽蚤、短尾秀体蚤、台湾温剑水蚤和广布中剑水蚤. 哲水蚤仅见到一个幼体出现.

枝角类在群落结构组成上优势明显且主要种类发生明显的季节演替(图 2). 在 6 月,枝角类优势物种为长额象鼻蚤(51.1%),到了 7 月和 8 月则急剧减小(<4%),从 9 月到来年的 1 月又重新占据优势地位. 短尾秀体蚤在采样期间的优势性呈现先增加后减小的变化趋势,最大密度百分比出现在 8 月(48.2%). 僧帽蚤主要在 7 月(28.2%)、8 月(16.6%)、9 月(25.3%)和 1 月(16.6%)占据优势地位. 在采样期间的 6-9 月,剑水蚤主要由台湾温剑水蚤和广布中剑水蚤组成;在此期间,它们也占据着较大的比例(21.5% - 40.0%).

2.3 密度和生物量

在任一采样月份,不管是密度还是生物量,枝角类都占主体(图 3). 最大密度和生物量分别出现在 6 月(25.5ind./L)和 9 月(0.36 mg/L),这应该与 6 月由小个体的枝角类和剑水蚤占优势,而 9 月由个体较大的僧帽蚤和短尾秀体蚤占优势有关. 这也同样可以解释 7-9 月虽然总密度相对 6 月减少了,但生物量依然在增加. 回归分析发现,浮游甲壳动物生物量和平均体长均与水温存在显著的线性关系,水温对两者的解释率分别达到了 71% 和 58% (图 4).

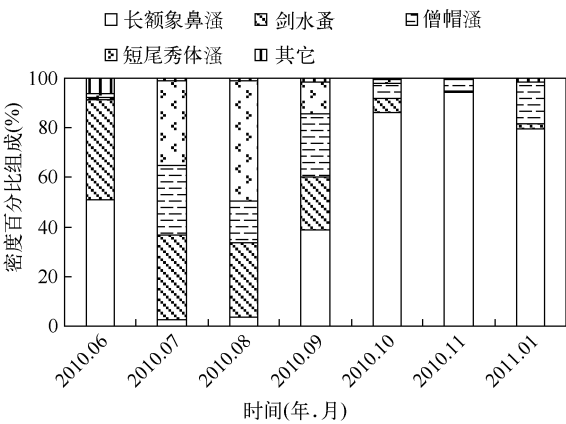


图 2 浮游甲壳动物的密度百分比组成

Fig. 2 Percentage composition of crustacean zooplankton in density

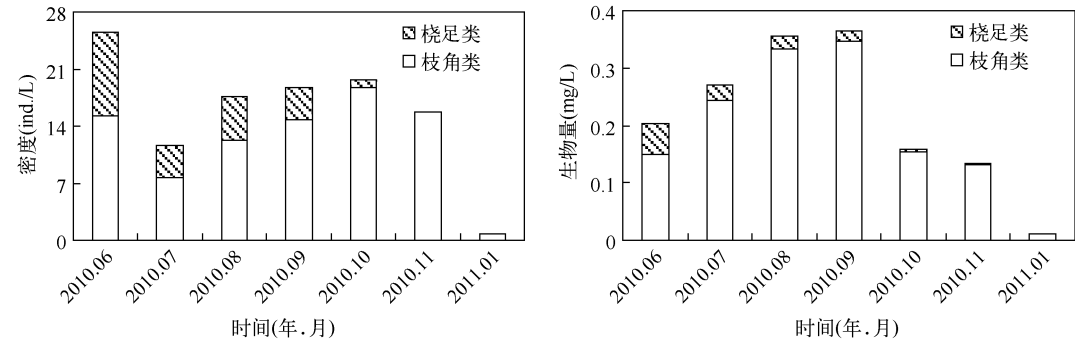


图 3 枝角类和桡足类的密度和生物量组成

Fig. 3 Density and biomass of Cladocera and Copepoda

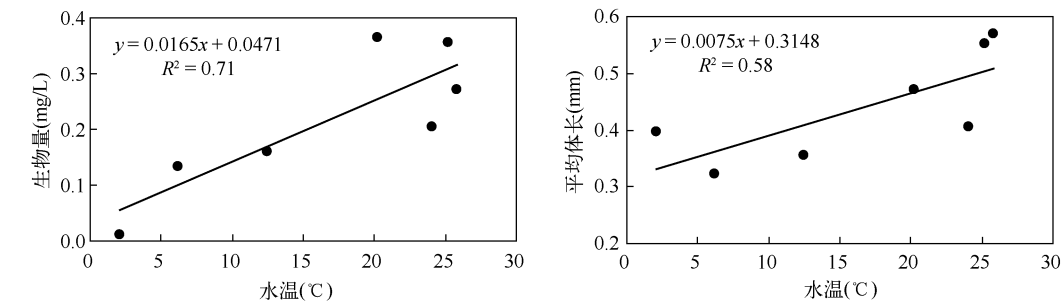


图 4 浮游甲壳动物生物量和平均体长与水温的线性回归分析

Fig. 4 Linear regressions of crustacean zooplankton biomass and mean body length to water temperature

表 2 优势物种生物量与环境因子的相关分析  
Tab. 2 Correlation coefficients between dominant species and environmental factors

环境因子	长额象鼻溥	僧帽溥	短尾秀体溥	剑水蚤
透明度	0.302 **	0.338 **	0.321 **	—
水深	—	0.596 **	0.513 **	0.400 **
水温	—	—	0.433 **	0.700 **
电导率	—	0.394 **	0.316 **	0.249 *
矿化度	—	0.378 *	0.300 **	0.242 *
盐度	—	0.355 **	0.278 *	—
浊度	-0.457 **	-0.419 **	-0.390 **	—
溶解氧	—	-0.236 *	-0.319 **	-0.539 **
pH	—	0.324 **	0.241 *	—
Chl.a	-0.379 **	-0.361 **	—	—
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	—	—	—	—
TN	0.326 **	—	—	—
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	—	—	—	—
COD <sub>Mn</sub>	—	—	—	0.260 *
Cl <sup>-</sup>	0.320 **	0.419 **	0.330 **	—
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.274 *	0.439 **	0.353 **	—
TOC	—	—	—	0.443 **

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; “—”表示无显著相关性.

表 3 RDA 分析经向前选择和蒙特卡罗检验后的因子排序结果

Tab. 3 Results of forward selection and Monte Carlo permutation tests from RDA

环境因子	$\lambda - 1$	$\lambda - A$	$P$	$F$
水温	0.16	0.16	0.002	14.0
水深	0.11	0.10	0.002	10.1
Chl.a	0.08	0.07	0.002	7.84
TOC	0.07	0.06	0.004	6.16
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.07	0.03	0.028	3.88
Cl <sup>-</sup>	0.07	0.02	0.046	3.04
TN	0.04	0.02	0.076	2.69
透明度	0.06	0.02	0.066	2.42
浊度	0.12	0.01	0.306	1.16
pH	0.02	0.01	0.360	1.08
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.01	0.01	0.420	0.86
COD <sub>Mn</sub>	0.02	0.00	0.362	1.02
矿化度	0.06	0.01	0.450	0.79
盐度	0.05	0.01	0.168	1.70
电导率	0.06	0.01	0.228	1.41
溶解氧	0.10	0.01	0.336	1.02
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.03	0.00	0.804	0.32

相关分析显示,优势枝角类生物量与透明度呈显著正相关,与浊度呈显著负相关;长额象鼻溥和僧帽溥生物量与Chl.a之间呈显著负相关.电导率、盐度、矿化度、pH、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等指标的升高有助于僧帽溥和短尾秀体溥生物量的增加( $r$ 为0.240-0.440,  $P < 0.05$ ).剑水蚤在高温和有机质丰富的水体繁茂;水深较大的地方也有利于僧帽溥、短尾秀体溥和剑水蚤维持高的生物量(表2).

2.4 种类分布与环境因子的关系

DCA 分析显示最大的梯度长度为 2.82,意味着浮游甲壳动物与环境因子之间的关系呈线性.为此,我们做了 RDA 分析,结果显示前 4 个轴共解释了浮游甲壳动物群落结构总变异的 55.5%.在单因子对浮游甲壳动物群落影响的重要性上,排在前 6 位的是水温、浊度、水深、溶解氧、Chl.a 和 TOC,分别解释了群落结构总变异的 16%、12%、11%、10%、8%和 7%.经向前选择和蒙特卡罗检验后仅保留了 6 个环境因子,分别为水温、水深、Chl.a、TOC、Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,一共解释了群落结构总变异的 44%(表3).

在种类分布上,僧帽溥和短尾秀体溥易于在相近的环境条件如高温、深水、高 Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量下形成密度高峰;而长额象鼻溥易于在相对较低的温度和较浅的水域形成密度高峰,从而错开和大型枝角类的竞争(图5).台湾温剑水蚤和广布中剑水蚤则喜好在高温和有机质丰富(高的 TOC)的水域形成密度高峰;棘爪网纹溥和虱形大眼溥也具有类似的偏好.

3 讨论

3.1 浮游甲壳动物的种类组成和群落结构

在 1987-1989 年的 12 次季节采样中,共计鉴定到浮游枝角类 11 属 20 种(除去介虫类),桡足类 9 属 16 种<sup>[14]</sup>;在本次研究中则鉴定到枝角类 10 属 11 种,桡足类 5 属 5 种.与前人的研究相比,本次研究中未对全湖多生境进行采样可能是引起种属减少的一个原因.在属的组成上,枝角类有仙达溥属、尾突溥属、大尾溥属和低额溥属 4 个属在本次采样中没有被发现,新鉴定到了透明薄皮溥、异尖额溥和弯尾溥 3 属种;桡足类中的剑水蚤

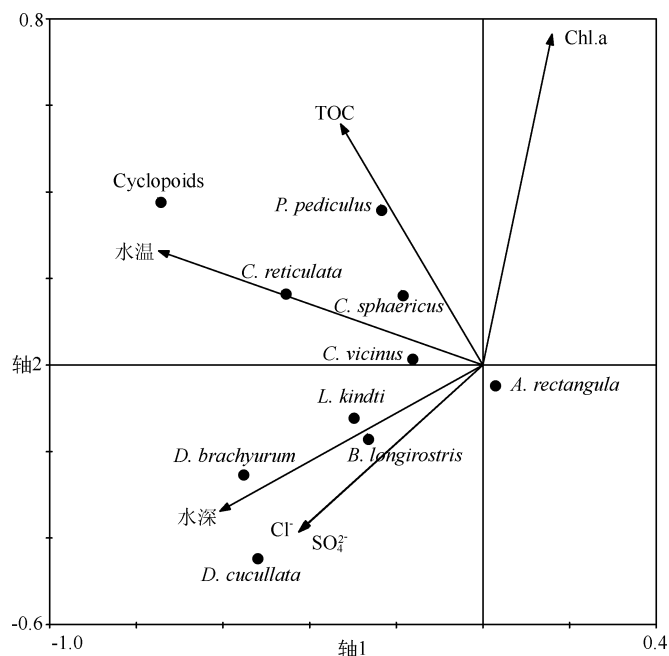


图5 浮游甲壳动物种类分布与环境因子之间的关系

Fig. 5 Species association of crustacean zooplankton with environmental factors

仅有小剑水蚤属未被发现. 在1987-1989年的采样中鉴定到了哲水蚤4属5种, 在本次研究中仅发现一未知的哲水蚤幼体. 在物种的组成上, 变化最大的是哲水蚤. 在1979-1992年间哲水蚤种类保持在4-9种, 从1995年开始减少, 到了2001年就完全消失, 这种变化被认为与池沼公鱼种群数量的大量增加有关<sup>[7]</sup>. 其次变化较大的是网纹溞属, 在之前的研究中由方形网纹溞和钩弧网纹溞组成, 在本次研究中则主要为棘爪网纹溞.

在群落结构组成上, 枝角类占据优势地位, 其优势种类随季节变化. 在6月, 小个体的长额象鼻溞能与剑水蚤很好共存, 到了7月和8月, 随着大个体枝角类僧帽溞和短尾秀体溞种群数量的增大, 长额象鼻溞在群落中的百分比急剧下降; 之后随着大型枝角类优势地位的下降, 小型枝角类重新占据优势地位, 这种变化趋势表明: 小型枝角类在与大型枝角类的竞争中处于不利地位. 由于两者在生态位上的重叠<sup>[15]</sup>, 它们在竞争相同的食物资源时, 由个体大小决定的滤食率可能导致小型种类因食物缺乏而受到抑制<sup>[16]</sup>. 也有研究观察到大型枝角类将小型枝角类排斥出局<sup>[17-18]</sup>.

### 3.2 浮游甲壳动物的现存量

在本次调查中, 除了湖面冰封的1月, 在其余采样月份, 浮游甲壳动物的密度和生物量波动范围不大. 在6-11月, 最大生物量为0.36 mg(FW)/L, 平均值0.21 mg/L. 与同属温带的湖泊相比, Jeppesen等报道了一个近似的0.35-0.90 mg(DW)/L的变动范围<sup>[19]</sup>. 在另一项研究中, Jeppesen等又报道浮游甲壳动物的生物量在0.012-0.850 mg(DW)/L之间变动<sup>[20]</sup>. 对亚热带长江中下游的湖泊研究发现, 浮游甲壳动物的生物量多在0.001-0.881 mg(FW)/L之间变动, 平均值为0.276 mg/L<sup>[21]</sup>. 这些数据表明博斯腾湖浮游甲壳动物的现存量与长江中下游的湖泊比较接近但与温带湖泊相比, 低了将近一个数量级. 这种情况的产生可能与该湖浮游生物食性鱼类如池沼公鱼、鲢、鳙种群数量的不断增加有关<sup>[22]</sup>. 对其理论鱼载力与实际鱼载量的比较也可发现, 该湖浮游生物承受着来自鱼类的强大捕食压力<sup>[5]</sup>.

在本研究中, 植食性的长额象鼻溞和僧帽溞与Chl.a呈显著负相关以及与透明度呈显著正相关的关系表明: 藻类的大量繁殖抑制了优势浮游甲壳动物的发展. 浮游动物对浮游植物的成功控制主要建立在大型滤

食者 *Daphnia* 占优势的基础上,这已被许多研究所证实<sup>[23-24]</sup>.虽然博斯腾湖中的 *Daphnia* 在浮游植物大量生长的季节占优势,但其过低的生物量以及现存的浮游生物食性鱼类的强大捕食压力可能阻碍了生物操纵的实现<sup>[25]</sup>.

### 3.3 环境因子对浮游甲壳动物群落动态的影响

在所测定的环境因子中,水温是影响浮游动物群落演替最重要的因子.在本研究中,僧帽溞和短尾秀体溞易于在水温最高的7月和8月(25–26℃)形成密度高峰;长额象鼻溞在温度低于24℃时均能占据优势地位;剑水蚤主要在温度较高的6–9月(20–26℃)大量出现. Sommer 等在 PEG 模型中阐述了温度在浮游生物群落演替中的重要作用<sup>[26]</sup>. Havens 等也发现温度在决定 Florida 亚热带湖泊中的溞属优势时扮演着重要角色<sup>[27]</sup>.

水深对于大型枝角类僧帽溞和短尾秀体溞的分布也有重要影响,这两种个体喜好栖息在深水水域.博斯腾湖的鱼类组成中有大量的浮游生物食性鱼类,并占据着不同的水层,如池沼公鱼、鲢、鳙等鱼类主要分布在湖水的中上层<sup>[5]</sup>,在这些水层中大型浮游动物将成为优先摄食的对象<sup>[28]</sup>.鱼类对水体空间层次的利用格局可能直接影响了浮游动物的垂直分布,虽然在水深较深的地方,食物资源<sup>[5]</sup>和水温不及中上层优越,但在这里可以有效躲避鱼类的捕食.

Chl.a 和 TOC 与轴 2 显著相关,意味着轴 2 代表食物资源.从图 5 和相关分析可以看出,剑水蚤和虱形大眼溞偏好在食物丰富的环境中形成密度高峰.由于剑水蚤能以小型浮游动物为食<sup>[29]</sup>,即使在大型枝角类占优势的 7–9 月,剑水蚤依然维持着较高的种群密度;但虱形大眼溞却仅能在 6 月和小型的长额象鼻溞共存,到了 7 月则被僧帽溞和短尾秀体溞竞争出局.温度、食物和捕食被认为是影响浮游动物群落变化最重要的 3 个因子.在本研究中,所测定的因子中包含了温度和食物,这些因子仅解释了浮游动物群落结构总变异的 55.5%,还有 44.5% 的变异未被解释.结合博斯腾湖现有的渔业经济活动以及浮游动物现存量,可以认为鱼类捕食在塑造浮游动物群落结构的过程中也起着十分重要的作用.在今后的研究中,需要加强鱼类与浮游动物相互关系的探讨,这不仅有利于认识浮游动物的群落结构动态,也有利于保护水环境和指导渔业生产活动的开展.

## 4 参考文献

- [1] 曾光,高会军,朱刚等.近32年新疆博斯腾湖湿地动态变化及机制分析.国土资源遥感,2010,86(增刊): 213-218.
- [2] 徐海量,陈亚宁,李卫红.博斯腾湖湖水污染现状分析.干旱区资源与环境,2003,17(3): 95-97.
- [3] 袁峡,杨佃华.新疆博斯腾湖水环境问题研究.干旱区研究,2008,25(5): 735-740.
- [4] 杜新宪,许月英.博斯腾湖流域污染治理与生态环境保护对策浅析.干旱环境监测,2009,23(2): 113-121.
- [5] 彭羽,薛达元,郭泳.博斯腾湖生态系统结构及其鱼载力分析.水生态学杂志,2009,2(4): 15-18.
- [6] 裴新国,闫晓燕.博斯腾湖生态环境演变.干旱区研究,1992,9(4): 57-62.
- [7] 赖英.博斯腾湖哲水蚤种群消失与池沼公鱼的关系.水生态学杂志,2009,2(4): 136-139.
- [8] 闫晓燕.博斯腾湖浮游植物种群结构初步评价.干旱区研究,1992,9(1): 47-52.
- [9] 赖英.博斯腾湖浮游植物季节变化的研究.水生态学杂志,2009,2(5): 103-106.
- [10] 博斯腾湖. (<http://baidu.com/view/2412.htm>).
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编辑委员会.水和废水监测分析方法(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析.北京:中国标准出版社,1999.
- [13] Ter Braak CJF, Smilauer P. Biometris-quantitative methods in the life and earth sciences. The Netherlands: Plant Research International, Wageningen University and Research Centre, 2003.
- [14] 闫晓燕.博斯腾湖浮游动物的调查研究.干旱环境监测,1991,5(3): 177-181.
- [15] Geller W, Müller H. The filtration apparatus of Cladocera: filter mesh-sizes and their implications on food selectivity. *Oecologia*, 1981, 49(3): 316-321.
- [16] Knoechel R, Holthy LB. Cladoceran filtering rate: body length relationships for bacterial and large algal particles. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(1): 195-200.
- [17] Romanovsky YE, Feniova IY. Competition among cladocera: effects of different levels of food supply. *Oikos*, 1985, 44:

- 243-252.
- [18] Winder M, Burgi HR, Spaak P. Mechanisms regulating zooplankton populations in a high-mountain lake. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 795-809.
  - [19] Jeppesen E, Jensen JP, Søndergaard M *et al.* Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, 2000, **45**: 201-218.
  - [20] Jeppesen E, Lauridsen TL, Mitchell SF *et al.* Trophic structure in the pelagial of 25 shallow New Zealand lakes: changes along nutrient and fish gradients. *Journal of Plankton Research*, 2000, **22**: 951-968.
  - [21] Wang SB, Xie P, Wu SK *et al.* Crustacean zooplankton distribution patterns and their biomass as related to trophic indicators of 29 shallow subtropical lakes. *Limnologia*, 2007, **37**(3): 242-249.
  - [22] 郭 焱, 张人铭, 蔡林刚等. 博斯腾湖鱼类资源及渔业. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
  - [23] Carpenter SR, Kitchell JF, Hodgson JR *et al.* Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology*, 1987, **68**(6): 1863-1876.
  - [24] Lampert W. The relationship between zooplankton biomass and grazing: a review. *Limnologia*, 1988, **19**(1): 11-20.
  - [25] Wissel B, Freier K, Müller B *et al.* Moderate planktivorous fish biomass stabilizes biomanipulation by suppressing large invertebrate predators of *Daphnia*. *Archiv für Hydrobiologie*, 2000, **149**(2): 177-192.
  - [26] Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in freshwaters. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, **106**(4): 422-477.
  - [27] Havens KE, East TL, Marcus J *et al.* Dynamics of the exotic *Daphnia lumholtzii* and native macro-zooplankton in a subtropical chain-of-lakes in Florida, U. S. A. *Freshwater Biology*, 2000, **45**(1): 21-32.
  - [28] Brooks JL, Dodson SI. Predation, body size, and composition of plankton. *Science*, 1965, **150**(3692): 28-35.
  - [29] Brandl Z. Freshwater copepods and rotifers: predators and their prey. *Hydrobiologia*, 2005, **546**(1): 475-489.