

# 千岛湖浮游甲壳动物垂直分布与昼夜垂直移动

王先云<sup>①</sup> 王丽卿<sup>①\*</sup> 盖建军<sup>②</sup> 陈来生<sup>③</sup> 任丽萍<sup>③</sup> 洪荣华<sup>③</sup>

(<sup>①</sup> 上海海洋大学水产与生命学院 农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室 上海 201306;

<sup>②</sup> 江苏省水产技术推广站 南京 210036; <sup>③</sup> 淳安县水产科学所 浙江 淳安 311700)

**摘要:**2004年6月、9月、12月及2005年3月于千岛湖温馨岛站点(29°38'10.5"N, 119°01'54.1"E)进行浮游甲壳动物垂直分布分层采样,分析千岛湖浮游甲壳动物的垂直分布特征及优势种昼夜垂直移动状况。结果显示,千岛湖浮游甲壳动物主要分布在10~21 m水层,不同季节中心水层分布深度12月>9月>6月>3月;浮游动物昼夜垂直移动春(3月)、夏(6月)两季幅度较大,秋(9月)、冬(12月)季节幅度较小;浮游甲壳动物优势种在各个水层都有分布,密集区大都集中在中上层(10~21 m),不同种类昼夜垂直移动幅度有所不同;昼夜垂直移动显著的种类有特异荡镖水蚤(*Neurodiaptanus incongruens*)、近邻剑水蚤(*Cyclops vicinus*)、球状许水蚤(*Schmackeria forbesi*)、透明溞(*Daphnia hyaline*)、长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*),不显著的种类为右突新镖水蚤(*Neodiaptomus schmackeri*)、短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum*)。光照、温度、饵料是影响千岛湖浮游甲壳动物垂直分布及昼夜垂直移动的主要因素。

**关键词:**千岛湖;浮游甲壳动物;垂直分布;昼夜垂直移动

中图分类号:Q958 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2010)05-95-104

## Vertical Distribution and Diel Vertical Migration of Planktonic Crustaceans in Qiandao Lake

WANG Xian-Yun<sup>①</sup> WANG Li-Qing<sup>①\*</sup> GAI Jian-Jun<sup>②</sup> CHEN Lai-Sheng<sup>③</sup>

REN Li-Ping<sup>③</sup> HONG Rong-Hua<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquacultural Ecology Certified by the Ministry of Agriculture,

College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

<sup>②</sup>Jiangsu Province Aquatic Product Technique Promoting Station, Nanjing 210036;

<sup>③</sup>Chun'an Fisheries Research Institute, Chun'an 311700, China)

**Abstract:** The vertical distribution and vertical migration of dominant crustacean species was studied by sampling water at different depths at the Wenxin Island site (29°38'10.5"N, 119°01'54.1"E) in Qiandao Lake in June, September and December of 2004 and March of 2005. The planktonic crustaceans dominantly distributed at the depth of 10 - 21 meter from the surface. Different seasons had different The distribution depths of planktonic crustaceans varied seasonally and they sampled from deep to shallow in December, September, June and March. The vertical distribution range was greater in spring and summer than that was in autumn and winter. The dominant species of planktonic crustaceans mainly distributed in the upper middle

基金项目 上海市重点学科建设项目 (No. S30701);

\* 通讯作者, E-mail: lqwang@shou.edu.cn;

第一作者介绍 王先云,女,硕士研究生;研究方向:水域生态学;E-mail: xxshxwy@163.com。

收稿日期:2010-02-23, 修回日期:2010-07-04

water depth (10–21 m) though they were found at all the water samples. The ranges of the vertical distribution varied with species and time. An obviously diel vertical migration was detected in species *Neurodiaptanus incongruens*, *Cyclops vicinus*, *Schmackeria forbesi*, *Daphnia hyaline* and *Bosmina longirostris*. The trend of vertical movement in *Neodiaptomus schmackeri*, *Diaphanosoma brachyurum* was not identified clearly. Illumination, temperature and diet resource were the principal environmental factors driving the diel vertical migration.

**Key words:** Qiandao Lake; Planktonic crustaceans; Vertical distribution; Diel vertical migration

浮游动物昼夜垂直移动 (diel vertical migration, DVM) 是海洋和淡水生态系统常见的生态学现象。垂直移动不仅有利于浮游动物的生存、繁衍和扩大分布范围,而且能够促进不同水层物质和能量的交换,改变各水层的理化和生物环境。浮游甲壳动物是浮游动物的重要组成部分,是昼夜垂直移动的主要参与者。浮游甲壳动物昼夜垂直移动的研究主要侧重于海洋浮游甲壳动物,国外学者就大西洋飞水蚤 (*Calanus finmarchicus*) 进行了较为详尽的研究<sup>[1-2]</sup>,国内对渤海、东海、北黄海、南黄海中华哲水蚤 (*C. sinicus*) 的垂直移动进行了相关报道<sup>[3-6]</sup>,但是淡水浮游甲壳动物昼夜垂直移动研究较少<sup>[7-9]</sup>,有关千岛湖浮游动物昼夜垂直移动仅见于蚤状溞 (*Daphnia pulex*) 的相关报道<sup>[7]</sup>。本调查于 2004~2005 年对千岛湖浮游甲壳动物群落数量的垂直分布、季节变化以及优势种的垂直分布、昼夜垂直移动类型等进行了研究和分析,并探讨了其与环境因子的相互关系,以期为千岛湖浮游动物的动力学、生态学提供基础数据资料。

## 1 材料与方法

**1.1 站点设置和样品采集** 温馨岛采样点位于 29°38'10.5"N, 119°01'54.1"E, 平均水深为 36 m (图 1)。于 2004 年 6 月、9 月、12 月及 2005 年 3 月分别代表夏、秋、冬、春季对浮游甲壳动物进行了 24 h 连续垂直分层采样,采样时间间隔为 2 h; 采样水层为表层、4 m、8 m、12 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m 10 个水层; 样品采集和室内处理按《淡水浮游生物研究方法》<sup>[10]</sup>, 用 5 L 采水器采集各水层水样 20 L, 用

260 μm 浮游生物网过滤浓缩后,现场用 5% 福尔马林溶液固定,带回实验室进行镜检分析。

**1.2 数据处理** 浮游动物密度分布水层中心位置  $d$  (单位: m) 计算公式为:

$$d = \frac{\sum (A_i d_i)}{\sum A_i}$$

式中  $A_i$  为第  $i$  水层浮游动物密度,  $d_i$  为水层水深。本文  $d_i$  取各采集水层的水深中点值。

浮游甲壳动物密度 (ind/L) = 某浮游甲壳动物总计数个数 / 水样体积 (20 L)。

物种优势度  $D = N_i \times f / N$ , 其中  $N_i$  为某种类的平均密度,  $N$  为总平均密度,  $f$  为出现频率。

本文所用统计分析软件 Excel 2003 和 Matlab 2006。

**1.3 理化指标测定方法** 在每次采样的同时,对站点的水深、透明度、水温、pH 以及当天的天气情况进行监测和记录,同时采集 1 L 水样带回实验室分析总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP); 采集 5 m、10 m 混合水样和 15 m、25 m 混合水样分别用于上层和中层叶绿素 a (chlorophyll a, Chl-a) 含量测定。透明度用 Secchi 盘测定; 温度用 WMZ-03 温度指示仪 (太仓市三顺纺织仪器有限公司) 测得; pH 用 PHB-2 型便携式 pH 计 (上海三信仪表厂) 现场测定; TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB11894-1989) 测定, TP 采用磷钼酸铵比色法 (GB11893-1989) 测定; 叶绿素 a 采用分光光度法 (单色法) 测定<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

**2.1 千岛湖水水质状况** 调查期间,千岛湖温馨岛平均水深为 36 m, 变幅为 30~43 m, 随汛期

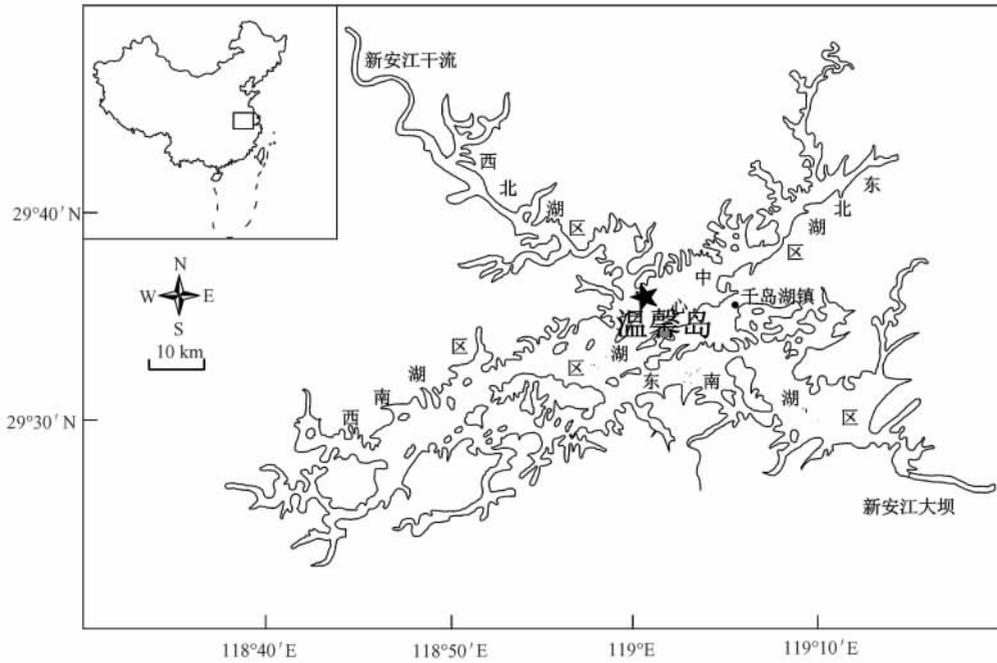


图 1 千岛湖采样点位置

Fig. 1 Location of sampling site in Qiandao Lake

★ 采样点温馨岛。★ The sampling site—Wenxin Island.

发生变化;透明度平均为 5.8 m,3 月和 12 月明显高于 6 月和 9 月;水体 TN 含量平均为 0.835 mg/L,3 月最低;TP 平均为 0.006 5 mg/L,12 月最低;5 m + 10 m 上层混合水体平均叶绿素 a

含量(1.31 mg/m<sup>3</sup>)高于 15 m + 25 m 中层混合水体(1.01 mg/m<sup>3</sup>),6 月份上层水体叶绿素 a 含量尤其高于中层水体,其他月份中、上层水体叶绿素相差不大(表 1)。

表 1 千岛湖温馨岛水域理化因子变化情况

Table 1 Changes of physic-chemical factors of water body at Wenxin Island, Qiandao Lake

月份 Month	水深(m) Depth	透明度(m) Transparency	总氮(mg/L) Total nitrogen	总磷(mg/L) Total phosphorus	叶绿素 Chlorophyll a(mg/m <sup>3</sup> )	
					10 m + 5 m	15 m + 25 m
6	30	4.9	0.97	0.007	2.07	0.40
9	34	5.5	0.97	0.008	1.42	1.96
12	43	6.4	0.97	0.003	0.87	1.05
3	38	6.4	0.43	0.008	0.88	0.64

分层水温测定结果表明(图 2),各水层的水温呈现特殊变化,3 月和 12 月各水层温度相对稳定,平均水温分别为 10.8℃ 和 14.9℃;6 月和 9 月各水层之间存在明显温差,表层最高水温分别达 25℃ 和 27.6℃,与底层温差可达 11℃ 和 15.2℃。6 月份 4 m 水层到 15 m 水层

水温下降 8.5℃;9 月份从 15 m 到 25 m 水温下降 11.4℃,6 月份 4 ~ 15 m 水层水温下降幅度较大(0.94℃/m),9 月明显存在温跃层(1.14℃/m)。

2.2 千岛湖浮游甲壳动物优势种 调查期间共采集浮游甲壳动物 10 科 22 属 33 种(见附

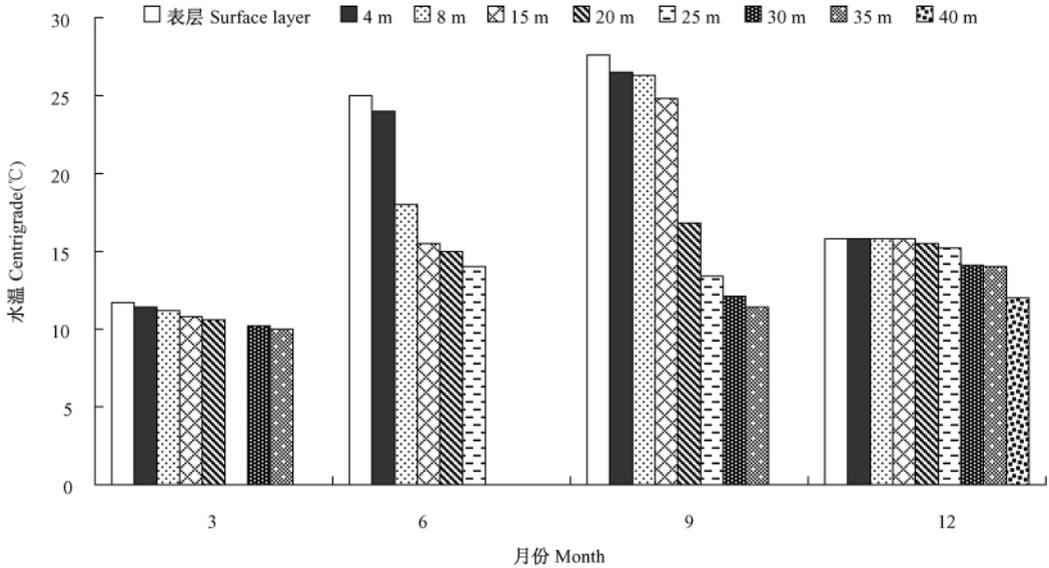


图 2 千岛湖不同季节水层温度变化

Fig. 2 Seasonal variation of water temperature at different depths

图中 3 月份 25 m 水层数据缺失。The water temperature data of 25 m depth in March was lost.

录), 优势种为短尾秀体溞 *Diaphanosoma brachyurum* (优势度  $D = 0.2$ )、透明溞 *Daphnia hyalina* ( $D = 0.13$ )、长额象鼻溞 *Bosmina longirostris* ( $D = 0.06$ )、右突新镖水蚤 *Neodiaptomus schmackeri* ( $D = 0.06$ )、特异荡镖水蚤 *Neurodiaptamus incongruens* ( $D = 0.05$ )、近邻剑水蚤 *Cyclops vicinus* ( $D = 0.02$ ) 和球状许水蚤 *Schmackeria forbesi* ( $D = 0.05$ )。

**2.3 千岛湖浮游甲壳动物数量垂直分布** 千岛湖浮游甲壳动物密度中心分布水层主要在 10~21 m, 不同季节具体采样时刻的中心水层变化如图 3 所示。一般来说, 12 月份分布的中心水层最深, 平均为 18.4 m; 9 月份次深, 平均为 16.0 m; 3 月份最浅, 平均为 15.4 m; 6 月份次浅, 平均为 15.6 m。同一季节, 一昼夜内不同采样时刻, 浮游甲壳动物分布的中心水层也不同, 具有明显的垂直移动现象。对 4 个采样月份垂直移动过程分析发现, 3 月、6 月移动幅度较大, 9 月、12 月移动幅度较小; 晚上移动幅度小, 清晨和傍晚移动幅度大; 其移动规律如下。

3 月, 清晨上浮, 白天下潜。自凌晨 4:00 时开始上浮, 中心水层从 17.1 m 上移至 6:00

时的 10.6 m; 8:00 时开始下潜, 10:00~14:00 时期间处于 16.3~14.7 m 水层, 基本保持稳定; 到 14:00 时以后开始下潜, 强度较大, 至 16:00 时, 下潜至 21.0 m 水层, 在两小时之内, 浮游甲壳动物中心水层下移了 6.3 m。浮游动物垂直移动范围在 10.6~21.0 m 之间, 移动幅度差值将近 10 m。

6 月, 清晨下潜、白天上浮。从 4:00~6:00 时出现上浮后急速下潜, 至 8:00 时, 浮游甲壳动物数量分布中心水层从 6:00 时的 13.4 m 下移至 19.8 m; 8:00 时以后开始上浮, 至 16:00 时一直处于上浮过程; 夜间 (18:00 时至翌日 2:00 时) 浮游甲壳动物中心水层分布位置在 13.3~16.3 m 窄幅移动。6 月浮游动物垂直移动范围为 12.3~19.8 m, 幅度为 7.5 m。

9 月, 昼夜垂直移动不明显。清晨 4:00 时开始上浮, 一直至 16:00 时, 维持上浮趋势, 但是移动幅度较小。夜间 (18:00 至翌日 2:00 时) 浮游甲壳动物中心水层分布在 15.3~17.1 m, 基本保持稳定。9 月浮游动物垂直移动不明显, 中心水层分布变幅为 13.3~18.3 m, 幅度为 5 m。

12 月, 上午上浮、午后下潜。夜间浮游甲

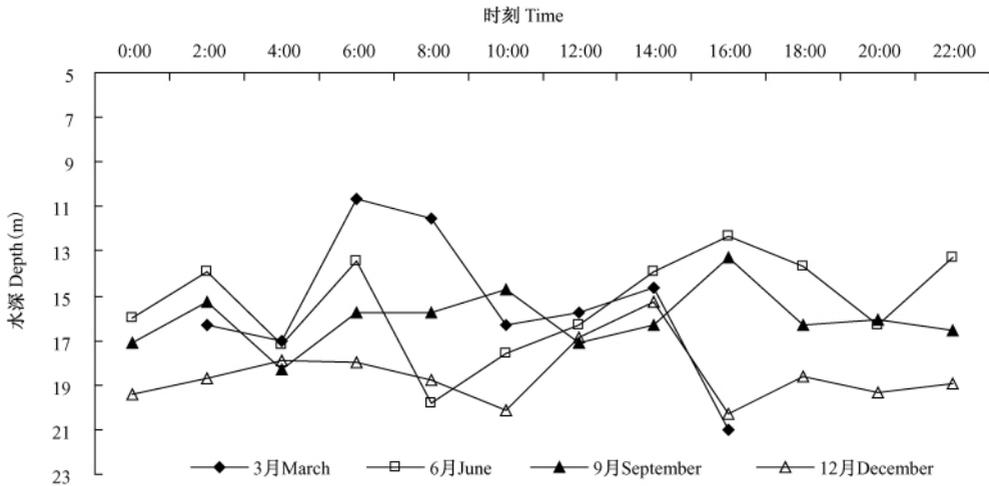


图 3 千岛湖不同季节浮游甲壳动物昼夜垂直分布

Fig. 3 Seasonal depth variation of planktonic crustaceans in Qiandao Lake

壳动物中心水层位置分布较稳定,基本分布在 17.9 ~ 19.4 m 水层,移动不明显。上午在 10:00 时后出现急速上浮,持续至 14:00 时,上浮幅度为 4.8 m,而后再急速下潜,至 16:00 时为 20.3 m。12 月浮游动物垂直移动水层为 15.3 ~ 20.3 m,移动幅度为 5 m。

2.4 千岛湖优势浮游甲壳动物数量中心水层分布 浮游动物的昼夜垂直移动主要由优势种

群决定,对千岛湖 7 种优势浮游甲壳动物数量中心水层分布昼夜变化(图 4)进行分析,可将千岛湖浮游甲壳动物昼夜垂直移动类型分为:昼夜垂直移动显著(垂直移动幅度 > 4 m)与昼夜垂直移动不显著(垂直移动幅度 < 4 m)两大类。昼夜垂直移动显著的种类有特异荡镖水蚤、近邻剑水蚤、球状许水蚤、透明溞、长额象鼻溞,昼夜垂直移动不明显的种类为右突新镖水蚤

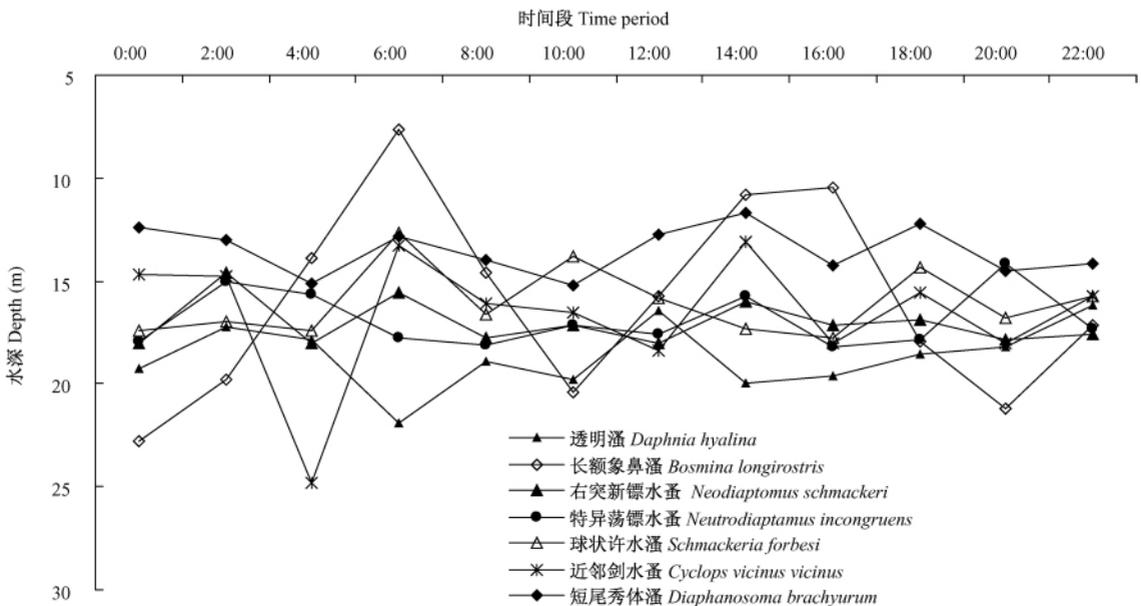


图 4 千岛湖浮游甲壳动物优势种密度中心水层分布昼夜垂直变化

Fig. 4 Depth variation of dominant species of planktonic crustaceans in Qiandao Lake

蚤、短尾秀体蚤。

#### 2.4.1 昼夜垂直移动规律显著类型

1) 清晨下潜,白天上浮型:透明蚤属于这个类型,中心水层分布范围为 16.2 ~ 21.9 m,昼夜垂直移动幅度达 5.7 m。透明蚤在清晨 2:00 ~ 6:00 时之间下潜,6:00 时开始上浮,至 12:00 时上浮至最浅水层,之后又窄幅下潜。

2) 午夜上浮、清晨上午下潜、中午上浮:长额象鼻蚤虽然个体只有 0.4 ~ 0.6 mm,但昼夜垂直移动特征非常明显,移动幅度高达 15.7 m。午夜 0:00 时开始上浮,至 6:00 时一直呈直线上浮趋势;6:00 ~ 10:00 时急速下潜,而后又开始上浮,16:00 时开始下潜,夜间(18:00 ~ 0:00 时)垂直移动不明显。

3) 清晨移动显著,白天和夜间移动不明显:近邻剑水蚤和球状许水蚤属于这个类型。近邻剑水蚤垂直分布变幅达 11.7 m,凌晨 2:00 时出现急剧下潜,4:00 时分布水层最深,为 24.8 m;之后中心分布水层上移至 6:00 时的 13.3 m;6:00 ~ 12:00 出现窄幅下移趋势。18:00 时至翌日 2:00 时相对处于一个比较平稳的水层。球状许水蚤垂直移动范围较小,变幅为 5 m,4:00 时出现上浮现象,10:00 时开始出现持续下潜,夜间 18:00 时至翌日 2:00 时基本处于相对平稳的水层。

4) 午后下潜,夜间上下移动明显,白天不显著:特异荡镖水蚤昼夜垂直移动幅度较小,为 4.0 m。午后(14:00 时)开始下移,16:00 时开始上浮,至 20:00 时达最浅水层(14.2 m);之后明显下移直至 0:00 时;0:00 时开始上浮,2:00 时后又开始下潜;上午 6:00 ~ 12:00 时维持在一个比较稳定的水层。整体表现为夜间上下移动明显,白天特别是上午不显著的特点。

2.4.2 昼夜垂直移动规律不显著类型 短尾秀体蚤中心水层移动范围为 3.5 m,经历下潜-上浮-下潜-上浮-下潜-上浮-下潜,在 14:00 时移到最浅水层,没有明显规律可循。

右突新镖水蚤垂直移动现象与短尾秀体蚤类似,移动幅度较小,幅度为 3.5 m。除凌晨 0:00 时出现上浮至 2:00 时达最浅水层,其余时

间垂直移动不明显,主要在 17 m 左右水层分布活动。

2.5 千岛湖浮游甲壳动物优势种的昼夜垂直移动 综合分析调查水域 4 次采样结果,发现浮游甲壳动物优势种在各个水层都有分布,密集区大都集中在中上层,但不同时间在不同水层的数量分布有所不同,表现出昼夜垂直移动现象(图 5)。

透明蚤清晨和白天在各个水层均有分布,昼夜垂直移动幅度较小,密集区域大都在 8 ~ 20 m 水层上下移动,夜间分布相对集中,密集度较大;长额象鼻蚤昼夜垂直移动幅度较大,白天密集区域主要集中在表层水域(0 ~ 8 m),傍晚和夜间各水层数量分布相对均匀;球状许水蚤密集区域在 0 ~ 28 m 都有出现,白天密集区域主要集中在上 0 ~ 12 m 等层水域,傍晚和夜间密集区域主要分布在 0 ~ 24 m 的中、上层水域。特异荡镖水蚤密集区域在 0 ~ 28 m 水层上下波动,分布相对均匀;短尾秀体蚤昼夜垂直移动幅度较小,分布相对集中,主要集中于 0 ~ 16 m 中、上层水域;近邻剑水蚤与右突新镖水蚤垂直分布类型相似,近邻剑水蚤 16:00 时出现明显密集区域,右突新镖水蚤 14:00 时出现明显密集区域,其他时间在各个水层分布相对比较均匀,白天的密集程度稍大于夜间。

### 3 讨论

3.1 浮游甲壳动物中心水层分布与饵料生物分布的关系 已有学者研究认为,浮游甲壳动物为在有限的时间内获得最大的捕食收益,追逐丰富的饵料不停地做垂直移动<sup>[12]</sup>;滞留在饵料丰富的水层,可以保持较高的繁殖力<sup>[13]</sup>;Kessler 等<sup>[14]</sup>也认为饵料水平能够在一定程度上影响浮游动物的垂直移动;另外,研究发现浮游动物虽然在表层最容易获得食物,但也容易受到凶猛动物的攻击<sup>[13]</sup>;而在底层由于光线较暗使得凶猛动物的视觉模糊,浮游动物被凶猛动物捕食的准确性大大下降<sup>[15-16]</sup>。因此,浮游动物往往做垂直移动,既能获得足够的饵料,又能躲避凶猛动物的攻击;林雅蓉等<sup>[17]</sup>认为互相

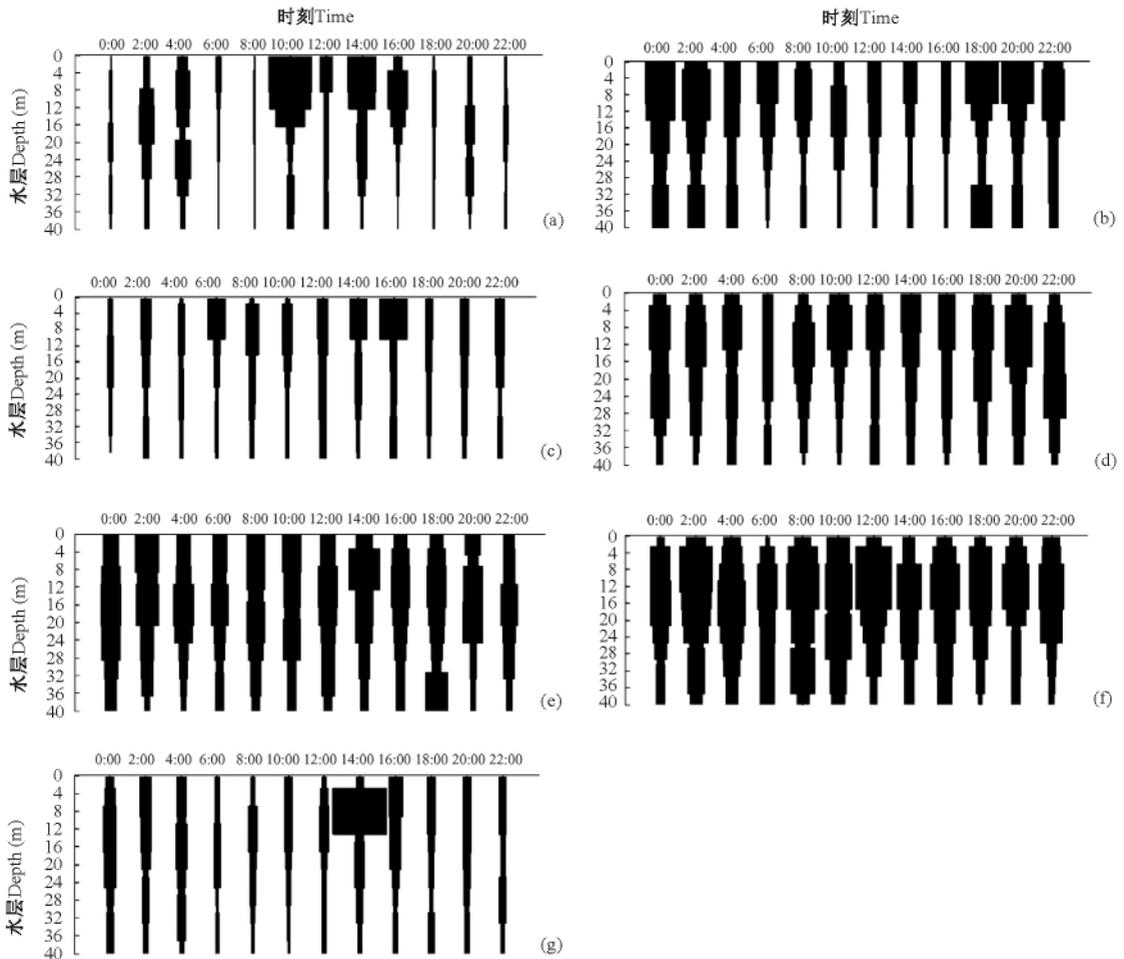


图 5 千岛湖优势浮游甲壳动物昼夜垂直移动

Fig. 5 Vertical migration of dominant crustaceans species in Qiandao Lake

(a) 长额象鼻溠 *Bosmina longirostris*; (b) 短尾秀体溠 *Diaphanosoma brachyurum*; (c) 近邻剑水蚤 *Cyclops vicinus vicinus*

(d) 球状许水蚤 *Schmackeria forbesi*; (e) 特异荡镖水蚤 *Neotriaptomus incongruens*; (f) 透明溠 *Daphnia hyalina*;

(g) 右突新镖水蚤 *Neotriaptomus schmackeri*.

依存的食物关系是影响垂直分布的重要因素之一。千岛湖是大型深水湖泊,平均水深 34 m,透明度 5.8 ~ 7.0 m,水质清澈,连续几年来一直保持中度营养型<sup>[18-19]</sup>,浮游甲壳动物作为千岛湖滤食性浮游动物的重要组成部分在物质与能量的传递过程中起着重要作用。作为浮游动物的饵料,千岛湖浮游藻类生物量集中分布在 10 ~ 21 m 水层,夏秋季节尤以 12 ~ 16 m 水层较为丰富<sup>[20]</sup>,12 月份 15 m + 25 m 水层叶绿素含量高于 10 m + 5 m 水层叶绿素含量(本文)。本研究结果显示的千岛湖浮游甲壳动物数量中

心水层分布范围也是 10 ~ 21 m,6 月、9 月中心水层变幅分别为 12.3 ~ 19.8 m、13.3 ~ 18.3 m;12 月份浮游甲壳动物的数量中心水层分布为 15.3 ~ 20.3 m。由此可知,千岛湖浮游甲壳动物密度中心分布水层与饵料生物(浮游藻类)的分布是一致的。

3.2 浮游甲壳动物垂直移动和环境因子(光照、水温)的关系 有研究提出,昼夜垂直移动是一个多因子控制的现象<sup>[21-23]</sup>,是浮游生物在各种环境压力下将种群存活最大化的策略<sup>[24]</sup>,Reichwaldt 等认为光强的变化是引起浮游动物

垂直分布的直接原因和主要原因<sup>[25-26]</sup>,而温度<sup>[24,27]</sup>在一定程度上影响浮游动物的垂直迁移。

千岛湖浮游甲壳动物虽在各个水层均有分布,但不论是浮游甲壳动物群落数量还是各优势种种群数量,其中心水层位置都在10~21 m范围内波动(图3),该水层深度位于透明度所在深度以下,这与南黄海浮游动物垂直分布的研究结果不同<sup>[6]</sup>。6月份透明度较小(表1),垂直移动幅度较大(图3);透明度的降低引起藻类分布的垂直变化,进而对水体深层的溶氧产生影响,从而引起浮游生物强烈的垂直移动变化<sup>[20]</sup>。由图3发现,千岛湖不同季节浮游甲壳动物昼夜垂直移动过程中,清晨和白天(6:00~16:00时)表现出明显的垂直移动现象,夜间(18:00~4:00时)分布水层相对稳定;由图4、图5发现,千岛湖浮游甲壳动物优势种密度中心水层分布也表现出清晨和白天的移动幅度强于夜间,昼夜垂直移动表现出白天密集度大于夜间密集度,并且所有的优势种浮游甲壳动物都出现午后时间下潜的趋势,表现出明显、统一的避光性,这些现象都说明光照是影响千岛湖浮游甲壳动物垂直分布的主要因素之一。

由千岛湖水温的垂直分布可以看出,3月、12月各水层水温相对稳定,不存在温跃层,6月、9月上下水层温差较大,9月存在明显的温跃层,6月温差突变位于4~15 m水层,9月的温跃层位于15~25 m水层。有研究表明,温跃层水温变化梯度太大,它对浮游动物的垂直迁移有阻隔作用<sup>[28]</sup>。6月、9月表层水温接近30℃,浮游甲壳动物在如此高温条件下,常常出现滞育现象,不利于种群的生长、繁殖<sup>[29]</sup>,因此大多数种类都栖息在远离表层的水体。6月浮游动物的密度中心分布水层在12.3~19.8 m之间,基本位于温度突变层下层,9月浮游动物的密度中心分布水层在13~19 m之间,基本位于温跃层之间,由此可见,温度的剧烈变化及温跃层的存在对千岛湖浮游甲壳动物垂直移动确实有一定的阻碍作用,使其不能够随意跨越跃

层在跃层上下自由垂直移动,千岛湖浮游甲壳动物主要集中分布在温度突变水域、温跃层水域或者下层水域,同时有少部分个体能够穿越跃层到达其他水层。3月浮游动物垂直移动数量中心水层跨度很大,达10 m,12月浮游甲壳动物数量中心水层主要集中在饵料丰富的水层,这两个月浮游动物数量中心水层分布受水温影响较小。由以上现象可以看出,温度(尤其是温跃层)也是一个影响千岛湖浮游甲壳动物昼夜垂直移动变化的重要环境因素。

### 3.3 浮游甲壳类垂直移动与生物自身的关系

千岛湖浮游甲壳动物优势种组成中个体较大的如桡足类的各个种类以及枝角类的透明溞、短尾秀体溞等,其密度中心分布层主要在下层(>12 m),个体比较小的种类如长额象鼻溞密度中心水层在上部水层(<12 m)亦有分布(图4)。透明溞在9月份能够穿过温跃层的阻碍,发生较大强度垂直移动,可能也是因为透明溞个体比较大,活动能力更强;长额象鼻溞个体大小只有0.4~0.6 mm,但在各个水层也能采到,垂直移动幅度也非常大(图5)。一般情况下浮游动物的个体越大,游泳能力则越强,其昼夜垂直移动的幅度越大<sup>[4]</sup>,但这不一定是绝对的。在千岛湖优势种群中,个体较小的种类如长额象鼻溞昼夜移动幅度亦很明显,个体较大的特异荡镖水蚤昼夜移动幅度不明显。由此可见,浮游动物的昼夜垂直移动不仅与其自身个体大小有关,而且与种类的习性有关,只不过当水体存在较强的温跃层时,大型种类比中、小型种类穿越跃层的能力更强。

此外,水生动物(如鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*、鳙 *Aristichthys nobilis*)的摄食压力、种群密度等也是影响浮游动物垂直分布和昼夜垂直移动的因素之一<sup>[30]</sup>;也有学者认为避免捕食者是引起浮游动物垂直移动的根本原因<sup>[31]</sup>。具体这些因素如何对浮游动物的垂直移动产生影响、发挥作用还有待进行深入的研究。

### 参 考 文 献

[1] Lincoln R. A laboratory investigation into the effects of

- hydrostatic pressure on the vertical migration of planktonic Crustacea. *Marine Biology*, 1970, 6(1): 5 - 11.
- [2] Russell F S. The vertical distribution of marine macroplankton. 12. Some observations on the vertical distribution of *Calanus finmarchicus* in relation to light intensity. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom (New Series)*, 1934, 19: 569 - 584.
- [3] 韩希福, 王军萍. 渤海中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) 种群垂直移动生态适应性模型研究. *生态学报*, 2001, 21(5): 820 - 826.
- [4] 王克, 王荣, 高尚武. 东海浮游动物昼夜垂直移动的初步研究. *海洋与湖沼*, 2001, 32(5): 534 - 540.
- [5] 刘晓丹, 王真良. 北黄海中中华哲水蚤各期幼体昼夜垂直移动的初步研究. *海洋学报*, 1991, 13(2): 247 - 253.
- [6] 左涛, 王荣, 王克, 等. 夏季南黄海浮游动物的垂直分布与昼夜垂直移动. *生态学报*, 2004, 24(3): 524 - 530.
- [7] 朱爱娇, 姚建良, 薛俊增. 千岛湖蚤状溞垂直分布格局及其季节与昼夜变化. *海洋湖沼通报*, 2007(4): 120 - 128.
- [8] 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 抚仙湖浮游甲壳动物群落结构与空间分布. *湖泊科学*, 2009, 21(3): 408 - 414.
- [9] 邓道贵, 谢平, 周琼, 等. 巢湖微囊藻和浮游甲壳动物昼夜垂直迁移的初步研究. *生态科学*, 2006, 25(1): 8 - 12.
- [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, 358 - 388.
- [11] 王建, 王骥. 浮游植物叶绿素与脱镁叶绿素的测定方法. *武汉植物学杂志*, 1984, 2(2): 321 - 328.
- [12] 郑重, 李少菁. 海洋浮游生物斑块分布的研究. *海洋科学*, 1988, (2): 58 - 62.
- [13] Lampert W. The adaptive significance of diel vertical migration of zooplankton. *Functional Ecology*, 1989, 3(1): 21 - 27.
- [14] Kessler K, Lampert W. Depth distribution of *Daphnia* in response to a deep-water algal maximum: the effect of body size and temperature gradient. *Freshwater Biology*, 2004, 49(4): 392 - 401.
- [15] Ohman M. The demographic benefits of diel vertical migration by zooplankton. *Ecological Monographs*, 1990, 60(3): 257 - 281.
- [16] Aksnes D, Blindheim J. Circulation patterns in the North Atlantic and possible impact on population dynamics of *Calanus finmarchicus*. *Ophelia*, 1996, 44(1): 7 - 28.
- [17] 林雅蓉. 东海毛颚动物夏季垂直分布. *生态学报*, 1985, 5(2): 175 - 186.
- [18] 王教团, 裘哲勇, 周朝卫, 等. 千岛湖水环境综合评价、预测及防治对策. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 431 - 435.
- [19] 罗献宝, 文军, 骆东奇, 等. 千岛湖水水质变化特征与趋势分析. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 208 - 212.
- [20] 刘其根. 千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响. 上海: 华东师范大学博士学位论文, 2005, 51 - 90.
- [21] Han B, Straskraba M. Modeling patterns of zooplankton diel vertical migration. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20(8): 1463 - 1487.
- [22] Liu S, Sun S, Han B. Diel vertical migration of zooplankton following optimal food intake under predation. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(9): 1069 - 1077.
- [23] Liu S, Sun S, Han B. Viewing DVM via general behaviors of zooplankton: A way bridging the success of individual and population. *Journal of Theoretical Biology*, 2006, 238(2): 435 - 448.
- [24] Han B, Straskraba M. Control mechanisms of diel vertical migration: theoretical assumptions. *Journal of Theoretical Biology*, 2001, 210(3): 305 - 318.
- [25] Ringelberg J. Changes in light intensity and diel vertical migration: a comparison of marine and freshwater environments. *Journal of the Marine Biological*, 2009, 75(1): 15 - 25.
- [26] Reichwaldt E, Wolf I, Stibor H. The effect of different zooplankton grazing patterns resulting from diel vertical migration on phytoplankton growth and composition: a laboratory experiment. *Oecologia*, 2004, 141(3): 411 - 419.
- [27] Ringelberg J, Gool E V. On the combined analysis of proximate and ultimate aspects in diel vertical migration (DVM) research. *Hydrobiologia*, 2003, 491(1): 85 - 90.
- [28] Hansen K V. On the diurnal migration of zooplankton in relation to the discontinuity layer. *ICES Journal of Marine Science*, 1951, 17(3): 231 - 241.
- [29] Tande K. Ecological investigations on the zooplankton community of Balsfjorden, northern Norway: generation cycles, and variations in body weight and body content of carbon and nitrogen related to overwintering and reproduction in the copepod *Calanus finmarchicus* (Gunnerus). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1982, 62(2): 129 - 142.
- [30] Kelso W, Rutherford D, Davidson N. Diel vertical migration of cladocerans and copepods in the Atchafalaya River Basin floodplain. *Journal of Freshwater Ecology*, 2003, 18(2): 259 - 268.
- [31] Pearre Jr S. Eat and run the hunger/satiation hypothesis in vertical migration: history, evidence and consequences. *Biological Reviews*, 2003, 78(1): 1 - 79.

## 附录 千岛湖采样期间浮游甲壳动物种类

## Appendix Planktonic crustaceans species examined in Qiandao Lake during investigation

	种 Species
桡足类 Copepoda	
哲水蚤目 Calanoida	球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i> 指状许水蚤 <i>S. inopinus</i> 特异荡镖水蚤 <i>Neurodiaptomus incongruens</i> 肥胖荡镖水蚤 <i>N. tumidus</i> 右突新镖水蚤 <i>Neodiaptomus schmackeri</i> 长江新镖水蚤 <i>N. yangtsekiangensis</i>
剑水蚤目 Cyclopoida	中华窄腹剑水蚤 <i>Limnithona sinensis</i> 锯缘真剑水蚤 <i>Eucyclops serrulatus</i> 近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus vicinus</i> 草绿刺剑水蚤 <i>Acanthocyclops viridis</i> 广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i> 台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i> 透明温剑水蚤 <i>T. hyalinus</i> 粗壮温剑水蚤 <i>T. dybowskii</i>
枝角类 Cladocera	
薄皮溞科 Leptodoridae	透明薄皮溞 <i>Leptodora kindi</i>
仙达溞科 Sidae	晶莹仙达溞 <i>Sida crystallina</i> 短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i> 长肢秀体溞 <i>D. leuchtenbergianum</i> 多刺秀体溞 <i>D. sarsi</i>
溞科 Daphniidae	透明溞 <i>Daphnia hyalina</i> 棘爪低额溞 <i>Simocephalus exspinosus</i> 棘体网纹溞 <i>Ceriodaphnia setosa</i> 棘爪网纹溞 <i>C. reticulata</i> 平突船卵溞 <i>Scapholeberis mucronata</i>
裸腹溞科 Moinidae	微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i> 直额裸腹溞 <i>M. rectirostris</i>
象鼻溞科 Bosminidae	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i> 脆弱象鼻溞 <i>B. fatalis</i> 筒弧象鼻溞 <i>B. coregoni</i> 颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>
盘肠溞科 Chydoridae	直额弯尾溞 <i>Camptocercus rectirostris</i> 点滴尖额溞 <i>Alona guttata</i> 圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>