

淮北采煤塌陷区小型湖泊浮游甲壳动物群落结构的季节变化*

邓道贵, 邢荣龙, 马睿, 张赛, 孟小丽, 杨威

(淮北煤炭师范学院生命科学院资源植物生物学安徽省重点实验室, 淮北 235000)

摘要: 2005年3月至2007年2月对淮北采煤塌陷区小型湖泊——南湖浮游甲壳动物进行了连续两年的调查。共记录浮游甲壳动物15种, 其中枝角类9属9种、桡足类5属6种。透明蚤(*Daphnia hyalina* Leydig)和汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii* Brehm)为冬、春季优势种; 象鼻蚤(*Bosmina* sp.)、短尾秀体蚤(*Diaphanosoma brachyurum* Liéven)、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti* Claus)和球状许水蚤(*Schmackeria forbesi* Poppe et Richard)为夏、秋季优势种。浮游甲壳动物密度和生物量分别为0.4–60.6 ind./L和0.01–1.25 mg/L, 夏、秋季较高, 冬、春季较低。枝角类的密度和生物量在2005年和2006年10月均达到最大值, 分别为44 ind./L和1.01 mg/L。哲水蚤的密度最大值(20.0 ind./L)出现在2005年4月, 而剑水蚤(21.7 ind./L)出现在2005年8月。无节幼体在各月份均有较高密度, 其最高密度(46.6 ind./L)和生物量(0.14 mg/L)出现在2006年3月。温度和浮游植物是影响南湖浮游甲壳动物群落结构季节变化的重要因素。

关键词: 采煤塌陷区; 南湖; 浮游甲壳动物; 群落结构; 淮北

Seasonal variations on community structure of crustacean zooplankton in a small lake of an excavating coal subsidence region in Huaibei City

DENG Daogui, XING Ronglong, MA Rui, ZHANG Sai, MENG Xiaoli & YANG Wei

(School of Life Science, Huaibei Coal Industry Teachers College, Anhui Key Laboratory of Resource and Plant Biology, Huaibei 235000, P. R. China)

Abstract: The community structure and seasonal variations of crustacean zooplankton in Lake Nanhu, a small lake of an excavating coal subsidence region in Huaibei City, were investigated during March 2005 to February 2007. A total of 15 species was recorded, among which 9 species (9 genera) were cladoceran and 6 species (5 genera) were copepoda. *Daphnia hyalina* and *Sinocalanus dorrii* were the dominant species in winter and spring, while *Bosmina* sp., *Diaphanosoma brachyurum*, *Mesocyclops leuckarti* and *Schmackeria forbesi* were the dominant species in summer and autumn. The density and biomass of crustacean zooplankton ranged between 0.4–60.6 ind./L and between 0.01–1.25 mg/L, respectively. They were much higher in summer and autumn and relatively lower in winter and spring. The maximum cladoceran density (approximately 44 ind./L) and biomass (1.01 mg/L) occurred in Octobers of 2005 and 2006. The maximum calanoid density (20.0 ind./L) appeared in April 2005, while that of cyclopoid density (21.7 ind./L) occurred in August 2005. A high abundance of nauplii was observed in each month, and its maximal density (46.6 ind./L) and biomass (0.14 mg/L) occurred in March 2006. Temperature and phytoplankton were the important factors affecting seasonal variations of crustacean zooplankton in Lake Nanhu.

Keywords: Excavating coal subsidence region; Lake Nanhu; crustacean zooplankton; community structure; Huaibei City

安徽省淮北市是我国著名的能源基地, 年产原煤 1800×10^4 t。淮北煤矿始建于1958年, 20世纪60年代初出现塌陷, 至1998年底, 全市因煤矿坍塌形成湿地面积约 80 km^2 , 其中, 永久性人工湖泊 30 km^2 ^[1]。塌陷区水面相对比较集中, 面积从小于 0.1 km^2 到大的近 2 km^2 不等, 多呈封闭型小型水体。大水面水位基本稳定, 水源补充主要有径流和地下矿井外排水^[2]。塌陷区湿地土壤类型为碱化砂礓黑土, 水体硬度大, pH 值为

* 国家自然科学基金项目(30840025)、安徽省教育厅自然科学研究项目(2006JK228B)和淮北市科技计划项目(0635)联合资助。2009-08-31 收稿; 2009-10-19 收修改稿。邓道贵, 男, 1969年生, 博士, 教授; E-mail: dengdg@263.net.

8.4-8.6, 钙和镁的含量分别是 46.9mg/L 和 25.0mg/L. 由于塌陷湿地周边人口稠密, 工业化程度较高, 其水体污染主要来自城镇企业和居民生活^[1].

淮北采煤塌陷湖泊属温带半湿润季风气候区, 碱性大、硬度高、形成时间短、封闭性好是该塌陷区湖泊的典型特点. 国内对采煤塌陷水体的浮游生物调查仅有少量报道^[3-4], 而淮北采煤塌陷水域的浮游生物群落结构和季节变化未有研究. 本文研究淮北南湖浮游甲壳动物群落结构及生物量的季节变化, 探讨水体理化因子对淮北南湖浮游甲壳动物群落结构季节变化的影响. 该研究结果将对深入探讨煤炭及其废弃物(如煤矸石)对水体生态系统结构与功能的影响提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究地点

南湖(33°54'N, 116°48'E)位于安徽省淮北市市郊, 为煤矿塌陷后形成的典型封闭型小型湖泊, 水生植被较少. 1995 年被建成国家城市湿地公园, 水域面积约 2.1km², 是淮北市城市供水的重要水源地, 同时具有渔业养殖、旅游开发的功能. 自 2005 年 3 月至 2007 年 2 月, 每月从南湖湖心采集样品. 采样期间, 冬季湖岸边缘出现积冰; 夏季(7、8 月)出现稀薄蓝藻水华, 主要由铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* Kütz)引起.

1.2 理化指标的测定

水温和透明度在采样时用温度计、Secchi 透明度盘现场测得. 总氮(TN)和总磷(TP)的测定方法参考文献[5].

1.3 浮游植物和浮游甲壳动物的样品采集与处理

用 2.5L 改良的 Patalas' 有机玻璃采水器从表层至底层每隔 1m 采集混合水样. 用 Lugol's 氏液固定的 1L 浮游植物水样带回实验室, 沉淀 48h 后, 小心吸取上清液, 浓缩至 50ml, 并加数滴福尔马林保存.

用 5L 改良的 Patalas' 有机玻璃采水器采集浮游甲壳动物, 每隔 1m 采集混合水样, 每个采样点采集水样 20-30L. 水样通过 64μm 的浮游生物网过滤收集浮游甲壳动物, 收集的标本用 4% 的福尔马林固定.

浮游植物和浮游动物的观察计数及生物量的估算参照章宗涉等的研究方法^[6].

1.4 PCA 分析

运用 Statistica 6.0 软件对南湖理化指标、浮游植物和浮游甲壳动物间的关系进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA). 数据均用 $\ln(x+1)$ 形式作标准化^[7].

2 结果

2.1 南湖的理化指标

两年采样期间, 南湖水温呈现明显一致的季节变化, 春季开始上升, 到夏末(8 月)达最大值(约 31℃), 而后逐渐下降, 冬季较低, 最小水温(约 3.1℃)出现在 1 月, 水温平均为 17.6 ± 9.4℃. 透明度在春、夏季相对较高, 秋、冬季相对较低, 最大值(1.80m)出现在 1 月, 最小值为 0.42m. 水深平均为 5.5m, 变动范围较小(4.3-6.0m). 湖水中总氮和总磷的平均值分别为 0.56mg/L(平均值 0.13-1.41mg/L)和 0.06mg/L(平均值 0.02-0.13mg/L), 季节变动差异较大.

2.2 浮游植物

在南湖, 冬季以小型绿藻(小球藻属 *Chlorella* sp.、栅藻属 *Scenedemus* sp.)为优势种类, 隐藻(尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta* Uterm.、隐藻属 *Cryptomonas* sp.)也占有一定比例; 随着水温的上升, 春季绿藻继续以小型种类(小球藻属 *Chlorella* sp.、栅藻属 *Scenedemus* sp.)为主, 小型硅藻(梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana* Kütz.)得到快速发展; 夏季以群体蓝藻(铜绿微囊藻 *M. aeruginosa*)和群体绿藻(美丽胶网藻 *Dictyosphaerium pulchellum* Wood)等大型种类为主, 小型甲藻(裸甲藻属 *Gymnodinium* sp.)也具有较高的种群密度; 秋季以丝状蓝藻(颤藻属 *Oscillatoria* sp.、小席藻 *Phormidium tenue* Gom.)替代群体微囊藻占优势. 并在夏秋季形成稀薄的表面水华. 浮游植物生物量的变动范围是 0.37-5.04mg/L, 其平均值为 1.99mg/L. 生物量的最大值(5.04mg/L)出现在 2006 年 7 月份, 而最小值(0.37mg/L)出现在 2006 年 1 月份. 在南湖的大多数月份中, 小型藻类(≤20μm)的生物量始终高于大型藻类(>20μm)的生物量(图 1). 但在春末夏初时, 大型藻类快

速生长,其生物量在7月或8月达到最大值.随后,当水体环境适合小型藻类快速生长时,大型藻类生物量呈明显的下降趋势(图1).

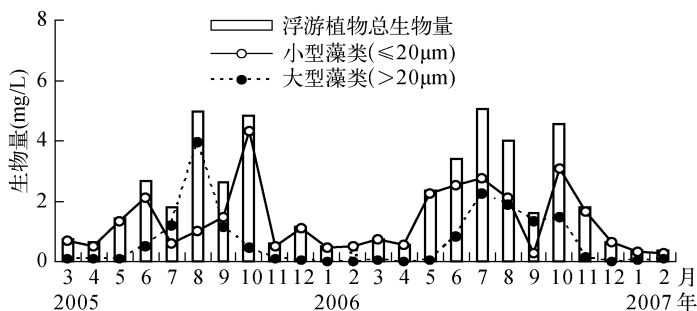


图1 南湖浮游植物生物量的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of phytoplankton biomass in Lake Nanhu

2.3 南湖浮游甲壳动物密度与生物量的季节动态

研究期间,南湖浮游甲壳动物共计15种,其中枝角类9属9种、桡足类5属6种(表1).

表1 南湖浮游甲壳动物的种类、密度和生物量

Tab. 1 Species, density and biomass of crustacean zooplankton in Lake Nanhu

种类	年平均密度 (ind./L)	年平均生物量 (mg/L)
枝角类		
象鼻溞 <i>Bosmina</i> sp.	5.77	0.132
透明溞 <i>Daphnia hyalina</i> Leydig	1.09	0.021
短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i> Liéven	2.69	0.037
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i> Kurz	0.57	0.010
卵形盘肠溞 <i>Chydorus ovalis</i> Kurz	<0.01	<0.001
尖额溞属 <i>Alona</i> sp.	<0.01	<0.001
角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i> Sars	<0.01	<0.001
透明薄皮溞 <i>Leptodora kindti</i> Focke	0.01	0.001
底栖泥溞 <i>Ilyocryptus sordidus</i> Liéven	<0.01	<0.001
枝角类年总均值	10.34	0.201
桡足类		
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i> Brehm	2.60	0.097
球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i> Poppe et Richard	0.99	0.061
指状许水蚤 <i>S. inopionus</i> Burckhardt	0.05	0.003
广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i> Claus	2.79	0.017
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i> Uljanin	<0.01	<0.001
右突新镖水蚤 <i>Neodiaptomus schmackeri</i> Poppe et Richard	0.01	0.001
无节幼体 nauplius	15.56	0.046
桡足类年总均值(不含无节幼体)	6.94	0.181

南湖浮游甲壳动物的密度和生物量的范围分别为0.4-60.6ind./L和0.01-1.25mg/L.其最大值(60.6ind./L和1.25mg/L)均出现在2005年10月,最小值(0.4ind./L和0.01mg/L)均出现在2005年3月.浮游甲壳动物的密度和生物量一般在温暖季节(夏季和秋季)相对较高,冬季最低(图2).枝角类和剑水蚤在夏、秋季密度较高,而哲水蚤在春季有较高的密度.枝角类的密度和生物量在2005年和2006年10月均达到最高值,分别约为44ind./L和1.01mg/L.哲水蚤生物量最大值(0.76mg/L)出现在2005年4月.无节幼体的密度和生物量的平均值范围分别为0.4-46.6ind./L和0.001-0.14mg/L,季节变动较大,其最大值(46.6ind./L;0.14mg/L)出现在2006年的3月.

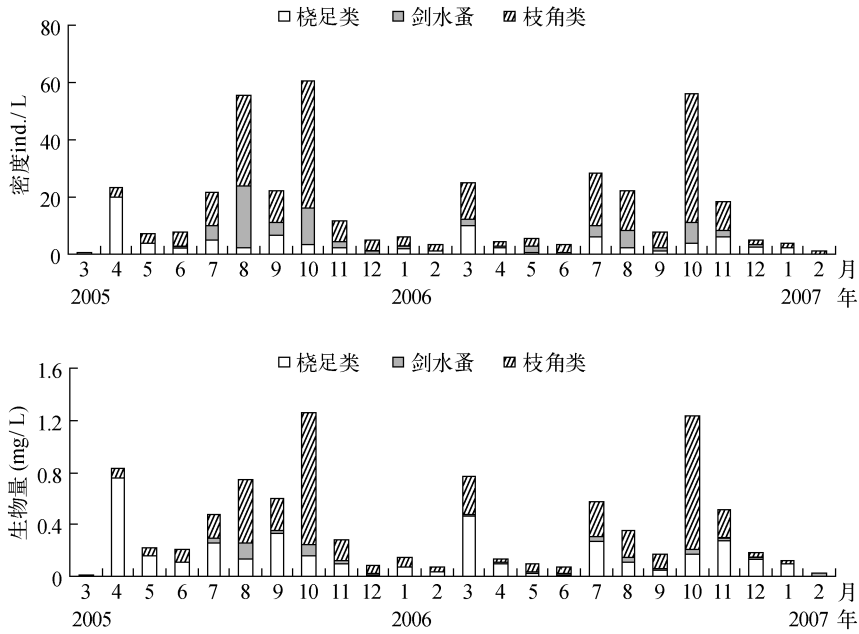


图2 南湖浮游甲壳动物的密度和生物量的季节动态

Fig. 2 Seasonal variations of density and biomass of crustacean zooplankton in Lake Nanhu

表2 南湖枝角类、桡足类密度与环境因子和浮游植物的相关性分析

Tab. 2 Relationship between the density of cladoceran and copepoda and environmental factors and phytoplankton in Lake Nanhu

参数	桡足类密度 (ind./L)	枝角类密度 (ind./L)
水温 (°C)	0.601 **	0.517 **
透明度 (m)	-0.244	-0.265
水深 (m)	0.392	0.144
总氮 (mg/L)	-0.316	-0.226
总磷 (mg/L)	0.231	0.325
浮游植物生物量 (mg/L)	0.648 **	0.731 **

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

统计分析显示,南湖枝角类密度与浮游植物生物量 ($r = 0.731, n = 24, P < 0.01$) 和温度 ($r = 0.517, n = 24, P < 0.01$) 呈显著的相关性,而桡足类密度与浮游植物生物量 ($r = 0.648, n = 24, P < 0.01$) 和温度 ($r = 0.601, n = 24, P < 0.01$) 也呈显著的相关性(表2)。

2.4 南湖浮游甲壳动物优势种密度与生物量的季节动态

根据每种浮游甲壳动物的密度和生物量的季节动态和年平均值(表1,图3),南湖浮游甲壳动物优势种包括象鼻溞、短尾秀体溞、透明溞、广布中剑水蚤、汤匙华哲水蚤和球状许水蚤。

象鼻溞在秋季出现较高的密度和生物量,其最大值(约为43.8 ind./L和1.0 mg/L)出现在2005年和2006年的10月,而在冬、春季节处于较低的水平。透明溞的密度和生物量的变动范围分别是0-3.6 ind./L和0-

0.07 mg/L,表现为冬、春季较高,其它季节较低(图3)。

短尾秀体溞和广布中剑水蚤在夏、秋季出现较高的密度和生物量,两者最大值(短尾秀体溞:21.3 ind./L和0.29 mg/L;广布中剑水蚤:21.7 ind./L和0.13 mg/L)均出现在2005年8月,而在冬、春季明显偏低。汤匙华哲水蚤常年存在南湖水体中,其密度和生物量季节波动较大,春季相对较高,其最大值(19.3 ind./L和0.72 mg/L)出现在2005年的4月。球状许水蚤的密度和生物量季节波动较大,在夏、秋季相对较高(图3)。

2.5 南湖浮游生物之间的主成分分析

主成分分析(PCA)显示,南湖浮游甲壳动物存在明显的季节演替变化(图4)。第I、IV象限包括透明溞和汤匙华哲水蚤,为冬、春季优势种;第II象限包括短尾秀体溞、微型裸腹溞和透明薄皮溞,为夏季优势种;第III象限包括广布中剑水蚤、象鼻溞和球状许水蚤,为秋季优势种。广布中剑水蚤、短尾秀体溞和微型裸腹

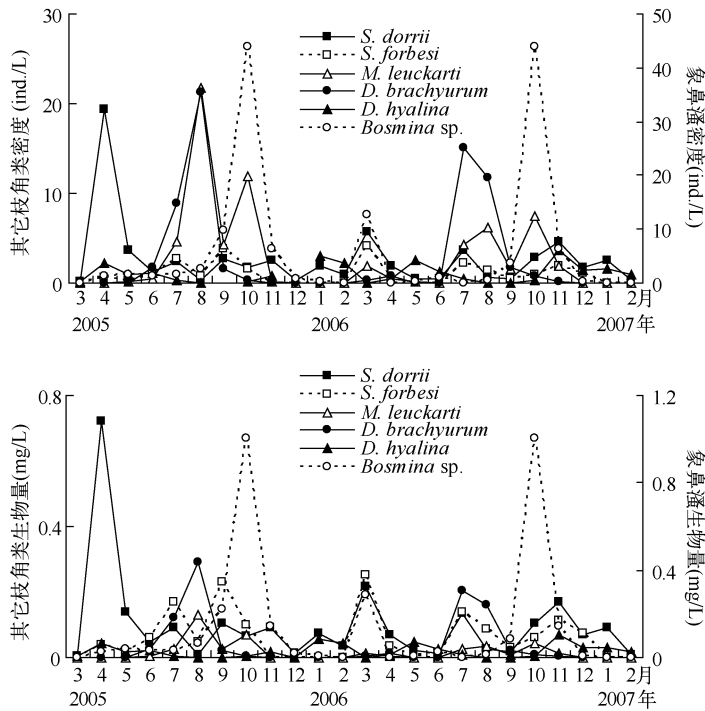


图3 南湖浮游甲壳动物优势种密度与生物量的季节动态

Fig. 3 Seasonal variations of density and biomass of dominant crustacean zooplankton in Lake Nanhu

蚤与蓝藻、裸藻、隐藻及轮虫密切相关，广布中剑水蚤还与温度、绿藻密切相关；球状许水蚤和象鼻蚤与硅藻相关；而透明蚤与浮游植物、理化因子无明显的联系。

3 讨论

在淮南采煤塌陷区，王振红等通过分析生态环境对塌陷水体的影响及不同时期采煤塌陷水体浮游生物的种类变化后发现，随着水体营养水平的提高，浮游植物经历了从塌陷初期以硅藻-裸藻占优势，到中期以绿藻-蓝藻为主，到水体富营养化后再以硅藻-裸藻占优势，浮游动物种类则呈现明显的下降趋势，并认为采煤塌陷区水体浮游生物的季节演替不同于一般的湖泊^[3]。何春桂观察到淮南采煤塌陷水体南大塘的枝角类数量和生物量一年内在5月和8月出现两个高峰，主要由秀体蚤、象鼻蚤和裸腹蚤为主^[4]。本研究发现，南湖已呈现中富营养化状态，其浮游甲壳动物的季节演替与典型温带湖泊 PEG (Plankton Ecology Group) 的模式相一致^[8]，即大的牧食性种类（如透明蚤）在春季占优势，而小的牧食者（如象鼻蚤、短尾秀体蚤、广布中剑水蚤）在夏季

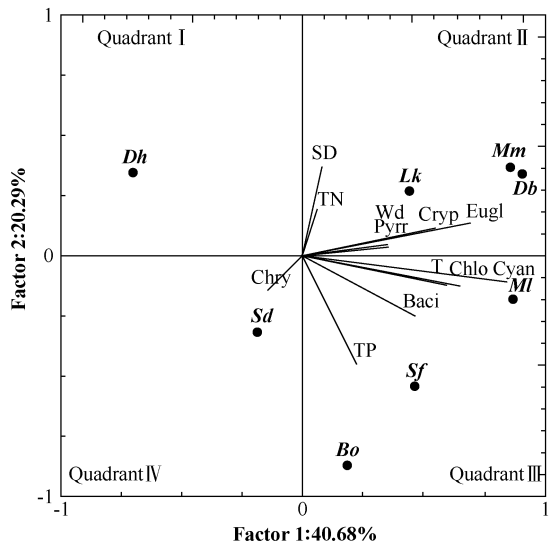


图4 南湖浮游甲壳动物和环境因子间的主成分分析（水深-Wd,透明度-SD,水温-T,总氮-TN,总磷-TP,象鼻蚤-Bo,短尾秀体蚤-Db,透明蚤-Dh,微型裸腹蚤-Mm,透明薄皮蚤-Lk,汤匙华哲水蚤-Sd,球状许水蚤-Sf,广布中剑水蚤-ML,蓝藻-Cyan,绿藻-Chlo,硅藻-Baci,隐藻-Cryp,裸藻-Eugl,金藻-Chry,甲藻-Pyrr)

Fig. 4 Principal Component Analysis between crustacean zooplankton and environmental variables

和秋季占优势,然后是一些桡足类(如汤匙华哲水蚤)在冬季达到较高的密度.我们认为,开采时间和营养水平的不同影响采煤塌陷区水体浮游甲壳动物群落结构的季节变化.

通常,蓝藻水华造成大型枝角类消失或减少,引起小型枝角类、桡足类和轮虫等占优势^[9-10].在南湖的大多数月份中,小型藻类($\leq 20\mu\text{m}$)的生物量始终高于大型藻类($> 20\mu\text{m}$)的生物量.但在春末夏初时,大型藻类(以蓝藻和绿藻为主,其中蓝藻以群体微囊藻、丝状颤藻和小席藻占绝对优势;绿藻以群体胶网藻为优势种)快速生长,其生物量在7月或8月达到最大值(图1),并形成稀薄的表面水华.与之相对应的是,一些小型浮游甲壳动物(如象鼻溞、短尾秀体溞和广布中剑水蚤)在夏秋季节明显占优势,而较大型的种类(如透明溞)种群密度较低.

群体蓝藻对大型枝角类(如溞属)生长生殖的影响主要依赖于群体的大小及其生物量的高低.Thompson等观察到透明溞能够摄食小群体的微囊藻($< 64\mu\text{m}$),而大群体的微囊藻却严重抑制其滤食率^[11].另有研究显示,蚤状溞能够显著摄食60-100 μm 的群体微囊藻,但不能利用100-150 μm 的微囊藻^[12].Deng等也观察到,当群体微囊藻($< 112\mu\text{m}$)生物量大于50mg/L时,隆线溞不能完成正常的生长发育^[7].在竞争实验中,Chen等的研究表明,微囊藻的群体大小和生物量决定了小型枝角类和大型溞属的竞争结果^[13-14].丝状蓝藻对浮游甲壳动物的影响则主要取决于其密度大小.Dawidowicz等发现,当丝状蓝藻的密度达到 8×10^7 filaments/L时,大型溞将停止生长、种群密度明显下降^[15].Hambright等观察到,在Kinneret湖,小型牧食者(如象鼻溞和网纹溞)比大型溞属种类更容易避免丝状藻类的抑制作用^[16].在Valencia湖,当Lyngbya和Oscillatoria浓度超过 9×10^7 filaments/ m^2 时,所有的枝角类消失了^[9].在南湖,2005年和2006年群体和丝状藻类的密度在6月至10月期间呈上升趋势,变动范围分别为 $0.46 \times 10^6 - 2.05 \times 10^6$ colonies + filaments/L和 $1.63 \times 10^6 - 9.32 \times 10^6$ colonies + filaments/L.我们认为如此高的密度是导致夏秋季节南湖小型浮游甲壳动物占优势的重要原因.

淮北采煤塌陷区湿地土壤类型为碱化砂礓黑土,水体钙和镁的含量分别为46.9mg/L和25.0mg/L^[1].南湖为典型的煤矿塌陷而成的封闭永久性湖泊,水的主要来源为地下水,水体交换少.淮北采煤塌陷区水体中钙和镁的含量明显高于同地区的其它湖泊^[17-19],这可能是南湖浮游甲壳动物密度(16.7ind./L)明显低于巢湖(140.3ind./L)、太湖(141.3ind./L)和东湖(96ind./L)的原因之一^[6,18-19].Ramírez-Olvera等也曾报道,水体矿化度或硬度的差异影响了不同水库中浮游甲壳动物的多样性和丰度^[20].另有报道,淮南采煤塌陷区的碱性水体对浮游动物的群落结构和物种多样性产生了较大的影响^[3-4].

4 参考文献

- [1] 施葵初. 安徽湿地. 合肥:合肥工业大学出版社,2003.
- [2] 陶卓. 淮北市塌陷区渔业可持续发展探讨. 安徽农学通报,2004,10(5):70-71.
- [3] 王振红,桂和荣,罗专溪等. 采煤塌陷塘浮游生物对矿区生态变化的响应. 中国环境科学,2005,25(1):42-46.
- [4] 何春桂. 采煤塌陷区水域浮游动物群落特征研究——以淮南谢二矿塌陷塘为例[学位论文]. 淮南:安徽理工大学,2006.
- [5] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社,2000.
- [6] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京:科学出版社,1991.
- [7] Deng DG, Xie P, Zhou Q et al. Field and experimental studies on the combined impacts of cyanobacterial blooms and small algae on crustacean zooplankton in a large, eutrophic subtropical Chinese lake. *Limnology*, 2008, 9:1-11.
- [8] Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W et al. The PEG model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, 106:433-471.
- [9] Infante A, Riehl W. The effect of cyanophyta upon zooplankton in a eutrophic tropical lake (Lake Valencia, Venezuela). *Hydrobiologia*, 1984, 113:293-298.
- [10] Fulton RS, Paerl HW. Toxic and inhibitory effects of the bluegreen alga *Microcystis aeruginosa* on herbivorous zooplankton. *Journal of Plankton Research*, 1987, 9:837-855.
- [11] Thompson JM, Ferguson AJD, Reynolds CS. Natural filtration rates of zooplankton in a closed system the derivation of a community grazing index. *Journal of Plankton Research*, 1982, 4:545-560.

- [12] Jarvis AC, Hart RC, Combrink S. Zooplankton feeding on size fractionated *Microcystis* colonies and *Chlorella* in a hypertrophic lake (Hartbeespoort Dam, South Africa): implications to resource utilization and zooplankton succession. *Journal of Plankton Research*, 1987, **9**:1231-1249.
- [13] Chen FZ, Xie P. The effects of fresh and decomposed *Microcystis aeruginosa* on cladocerans from a subtropic Chinese lake. *Journal of Freshwater Ecology*, 2003, **18**(1):97-104.
- [14] Chen FZ, Xie P, Qin BQ. Different competitive outcomes among four species of cladocerans under different alga combinations of colonial *Microcystis* spp. and green alga *Scenedesmus obliquus*. *Hydrobiologia*, 2007, **581**:209-215.
- [15] Dawidowicz P, Gliwicz ZM, Gulati RD. Can *Daphnia* prevent a blue-green algal bloom in hypertrophic lakes? A laboratory test. *Limnologia*, 1988, **19**:21-26.
- [16] Hambright KD, Zohary T, Easton J *et al.* Effects of zooplankton grazing and nutrients on the bloomforming, N₂-fixing cyanobacterium *Aphanizomenon* in Lake Kinneret. *Journal of Plankton Research*, 2001, **23**:165-174.
- [17] 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清等. 巢湖——富营养化研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [18] 孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [19] 刘建康. 东湖生态学研究(一). 北京: 科学出版社, 1990.
- [20] Ramírez-Olvera MA, Díaz-Argüero M, López-López E. Planktonic crustacean assemblages in a system of three reservoirs in the Mexican central plateau; seasonal and spatial patterns. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, **19**(1):25-34.