

# 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析\*

邱小琮<sup>1,2\*\*</sup> 赵红雪<sup>2</sup> 孙晓雪<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; <sup>2</sup>宁夏大学生命科学学院, 银川 750021)

**摘要** 为了探明沙湖浮游动物密度、生物量、分布与水环境因子之间的关系, 运用多元逐步回归分析、通径分析和典范对应分析方法对 2009 年 4 月、7 月、10 月、2010 年 1 月测定的沙湖浮游动物密度、生物量数据与水环境因子进行多元分析。结果表明: 沙湖浮游动物密度与叶绿素 a 含量、总氮、总磷之间呈显著线性相关, 影响沙湖浮游动物密度的主要水环境因子依次为叶绿素 a 含量、总氮、总磷; 浮游动物生物量与叶绿素 a 含量、总氮、透明度、化学需氧量(COD<sub>Mn</sub>)之间呈显著线性相关, 影响浮游动物生物量的主要水环境因子依次为叶绿素 a 含量、总氮、透明度、化学需氧量; 叶绿素 a 含量和总氮对浮游动物的直接影响作用最强, 其他水环境因子主要通过影响叶绿素 a 含量间接影响浮游动物密度及生物量。浮游动物与水环境因子的 CCA 排序结果将分别适应不同水环境的 16 种浮游动物分为 3 组, 叶绿素 a 含量、化学需氧量、水温 and 总磷是影响沙湖浮游动物群落特征及时空分布的主要水环境因子。

**关键词** 浮游动物; 密度; 生物量; 多元逐步回归分析; 通径分析; 典范对应分析

**中图分类号** X173 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)4-0896-06

**Relationships between zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake, Ningxia of Northwest China: A multivariate analysis.** QIU Xiao-cong<sup>1,2\*\*</sup>, ZHAO Hong-xue<sup>2</sup>, SUN Xiao-xue<sup>2</sup> (<sup>1</sup> School of Civil and Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; <sup>2</sup> School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 896–901.

**Abstract:** Multiple stepwise regression analysis, path analysis and canonical correspondence analysis were employed to study the relationships between the zooplankton density, biomass, and distribution and the water environmental factors in Shahu Lake, Ningxia of Northwest China in April, July, and October 2009 and January 2010. The zooplankton density had significant linear correlations with the chlorophyll a, total nitrogen (TN), and total phosphorous (TP) concentrations in the Lake, and the significance was in the order of chlorophyll a, TN and TP. The zooplankton biomass had significant linear correlations with chlorophyll a and TN concentrations, SD, and COD<sub>Mn</sub>, and the significance was in the order of chlorophyll a, TN, SD and COD<sub>Mn</sub>. The chlorophyll a and TN concentrations had the strongest direct effect on the zooplankton, whereas the other water environmental factors had indirect effect on the zooplankton by influencing chlorophyll a concentration. Based on canonical correspondence analysis, the 16 zooplankton species adapted to different water environments in the Lake were divided into 3 groups. Chlorophyll a, COD<sub>Mn</sub>, temperature and TP were the main water environmental factors affecting the community structure and the spatiotemporal distribution of the zooplankton in the Lake.

**Key words:** zooplankton; density; biomass; multiple stepwise regression analysis; path analysis; canonical correspondence analysis.

浮游动物在水域生态系统中起着极其重要的作用, 浮游动物以浮游植物、细菌、碎屑等为食, 又是鱼

类和其他水生动物的食物, 对水生生态系统物质循环和能量流动起关键作用, 并对水生生态系统的容纳量及生物资源补充量影响显著(李超伦和王克, 2002)。浮游动物对各种水环境因子的变化非常敏

\* 宁夏自然科学基金项目(NZ0829、NZ0929)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: qxc7175@126.com

收稿日期: 2011-10-27 接受日期: 2012-01-18

感,其种类分布和数量变化与水环境状况密切关联,浮游动物群落结构及生物多样性受到诸多因素的影响,包括温度、pH、溶解氧、栖息地大小、水深、营养状态等非生物因子以及捕食、食物状况、竞争、大型水生植物的生长状况等生物因子(Aoyagui & Bonecker, 2004; Hessen *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2008)。浮游动物不同类群对环境变化的敏感性和适应能力各不相同,利用浮游动物群落结构和生物量变化以及优势种分布情况对监测评价水环境质量具有重要的应用价值(王新华等, 2008)。

沙湖是中国西部地区著名的风景名胜区,地处贺兰山麓(106°18'45"E, 38°45'N),是宁夏最大的天然半咸水湖泊,总面积45.1 km<sup>2</sup>,其中湖水面积8.2 km<sup>2</sup>,平均水深2.2 m,含盐量4.3 g·L<sup>-1</sup>。沙湖自然景观秀丽独特,1998年被列为国家级自然风景保护区。近年来随着当地工农业经济的发展,过量营养盐进入沙湖,目前沙湖水体已呈现出富营养化状况(赵红雪等, 2010)。本研究于2009年4月、7月、10月、2010年1月分析和测定了沙湖浮游动物的密度、生物量及相关水环境因子指标,并通过多元分析,研究探讨沙湖浮游动物密度、生物量、分布与水环境因子之间的关系,以期对沙湖富营养化治理与合理开发利用提供基础数据和生物学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样点的布设与采样时间

根据沙湖的自然条件和形状,在沙湖设置了5个采样点(图1),分别为I老渔场、II进水口、III十一队、IV中心和V鸟岛。于2009年4月(春)、7月(夏)、10月(秋)、2010年1月(冬)对沙湖水体进行取样调查。样品的采集时间为每月的中下旬,9:00—11:00进行。

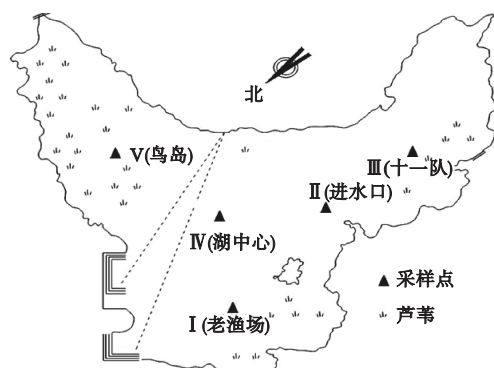


图1 沙湖采样点分布示意图

Fig. 1 Locations of sampling sites in Shahu Lake

### 1.2 浮游动物的标本采集与鉴定

轮虫定性用25号浮游生物网拖取,枝角类和桡足类定性用13号网拖取,现场用5%甲醛固定。定量样品用采水器采10 L水,用25号浮游生物网过滤浓缩,后加入5%甲醛固定(金相灿和屠清瑛, 1990)。实验室内进行浮游动物定性、定量分析。

### 1.3 水环境指标测定

水样的采集:用5 L有机玻璃桶状采水器采集每个站点离表层0.5 m和离水底0.5 m的混合水样。总氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷用钼酸铵分光光度法,化学需氧量用碱性高锰酸钾法,叶绿素a含量测定采用分光光度法(陈宇炜和高锡云, 2000)。

### 1.4 统计分析

**1.4.1 逐步回归分析** 分别以浮游动物密度(ZD)、生物量(ZB)为因变量,以水温(WT)、pH、透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD<sub>Mn</sub>)和叶绿素a含量(Chla)为自变量,进行逐步回归分析,建立回归方程(唐启义和冯明光, 2002)。

**1.4.2 通径分析** 计算自变量对因变量影响相对重要性的统计数——通径系数,并可将通径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(明道绪, 2008)。用DPS 9.50软件完成。

**1.4.3 典范对应分析** 采用Canoco 4.5软件对物种数据和环境数据进行CCA分析,物种数据经过筛选,本文用于排序的物种要求满足下面两个条件:该物种出现在样点的次数>3(若按百分率计算:该物种在各样点出现的频率≥25%);该物种在至少一个样点的相对密度≥0.5%。共筛选出16种浮游动物符合标准。采用生物量来反映浮游动物种类与环境的关系,数据矩阵经过lg(x+1)转换,水环境因子除pH值外,都进行lg(x+1)转换(Flores & Barone, 1998),排序结果用物种-环境因子关系的双序图表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游动物与水环境因子的逐步回归分析

各种水环境因子对浮游动物密度、生物量影响作用各不相同,逐步回归分析可以筛选出与浮游动物密度、生物量相对重要的水环境影响因子(表1),

表 1 沙湖浮游植物密度、生物量及主要水环境因子指标

Table 1 Seasonal variation of density, biomass of zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake				
指标	春季	夏季	秋季	冬季
密度(10 <sup>4</sup> cells · L <sup>-1</sup> )	413. 80±154. 25	457. 00±107. 07	623. 60±195. 71	212. 80±26. 39
生物量(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 91±0. 30	1. 09±0. 25	1. 20±0. 47	0. 41±0. 09
叶绿素 a 含量(μg · L <sup>-1</sup> )	9. 94±1. 13	23. 03±4. 58	17. 33±3. 73	5. 32±0. 97
WT(℃)	13. 4±0. 3	22. 5±0. 4	14. 7±0. 7	1. 2±0. 1
pH	8. 60±0. 20	8. 67±0. 12	8. 63±0. 09	8. 75±0. 11
SD(cm)	59. 4±15. 2	29. 0±7. 4	25. 0±8. 4	66. 4±9. 6
TN(mg · L <sup>-1</sup> )	1. 638±0. 129	1. 412±0. 145	1. 602±0. 169	1. 262±0. 188
TP(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 236±0. 024	0. 222±0. 022	0. 207±0. 021	0. 171±0. 029
化学需氧量(mg · L <sup>-1</sup> )	9. 98±1. 862	12. 78±2. 80	14. 85±3. 26	10. 63±1. 85
N/P	6. 96±0. 35	6. 37±0. 43	7. 75±0. 56	7. 41±0. 54

建立最优多元线性回归方程,并进行方程显著性检验。根据逐步回归方程的诊断依据,确立沙湖的浮游动物密度、生物量与水环境因子的逐步回归分析结果见表 2。2 个逐步回归方程的相关系数  $R$  值分别为 0. 940 和 0. 928, Durbin-Watson 统计量都接近 2,故逐步回归方程有效。

浮游动物密度的回归方程有叶绿素 a 含量、总磷、总氮 3 个因子入选,浮游动物生物量的回归方程有叶绿素 a 含量、透明度、总氮、化学需氧量 4 个因子入选。

为了清楚各水环境因子对浮游动物密度、生物量作用的大小,进一步作通径分析。

2.2 浮游动物与水环境因子的通径分析

叶绿素 a 含量对浮游动物密度的直接作用最大,其次为总氮和总磷,总磷的直接作用表现为负向

表 2 浮游动物与水环境因子的逐步回归方程  
Table 2 Stepwise multiple regression between zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake

逐步回归方程		$R$	$P$
浮游动物密度	$\ln ZD = 1. 2813 + 0. 7743 \ln Chla + 2. 1803 \ln TN - 1. 1429 \ln TP$	0. 940	0. 0001
浮游动物生物量	$\ln ZB = -0. 4876 + 0. 5509 \ln Chla - 0. 2860 \ln SD + 1. 6404 \ln TN - 0. 3063 \ln COD_{Mn}$	0. 928	0. 0001

表 3 浮游动物密度与水环境因子间的通径系数  
Table 3 Path coefficient analysis between density of zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake

因子	直接作用 $P_i$	间接作用 $r_{ij}P_j$		
		通过 $\ln Chla$	通过 $\ln TN$	通过 $\ln TP$
$\ln Chla$	0. 814		0. 311	-0. 283
$\ln TN$	0. 669	0. 379		-0. 346
$\ln TP$	-0. 436	0. 528	0. 530	
决定系数	0. 884			

作用。总磷通过叶绿素 a 含量和总氮的间接作用较强,且表现为正向作用(表 3)。

对浮游动物生物量的直接作用大小排列依次为叶绿素 a 含量、总氮、透明度、化学需氧量,透明度和化学需氧量对浮游动物生物量的直接影响为负向作用(表 4)。

2.3 浮游动物与水环境因子的典范对应分析

从表 6 可知,CCA 排序的全部特征值解释了浮游动物群落变异程度的 79. 3%,前两个排序轴的特征值分别为 0. 230 和 0. 079,共解释了浮游动物群

表 4 浮游动物生物量与水环境因子间的通径系数  
Table 4 Path coefficient analysis between biomass of zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake

因子	直接作用 $P_{iy}$	间接作用 $r_{ij}P_{jy}$			
		通过 $\ln Chla$	通过 $\ln SD$	通过 $\ln TN$	通过 $\ln COD_{Mn}$
$\ln Chla$	0. 516		0. 204	0. 208	-0. 094
$\ln SD$	-0. 263	-0. 400		-0. 139	0. 081
$\ln TN$	0. 448	0. 240	0. 081		-0. 061
$\ln COD_{Mn}$	-0. 142	0. 343	0. 150	0. 193	
决定系数	0. 862				

表 5 CCA 分析中浮游动物种类代码  
Table 5 Codes of zooplankton species for CCA

代码	种类	代码	种类
S1	方块鬼轮虫 <i>Trichotria tetractis</i>	S9	月形单趾轮虫 <i>Monostyla lunaris</i>
S2	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	S10	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>
S3	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	S11	腹尾轮虫 <i>Gastropus</i> sp.
S4	矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i>	S12	异尾轮虫 <i>Trichocera</i> sp.
S5	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	S13	长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>
S6	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	S14	长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>
S7	前额犀轮虫 <i>Rhinoglena frontalis</i>	S15	近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus vicinus</i>
S8	月形腔轮虫 <i>Lecane luna</i>	S16	无节幼体 <i>Nauplius</i>

表 6 沙湖浮游动物种类和环境因子间 CCA 分析的统计信息

Table 6 Summary statistics for the axes of CCA performed on zooplankton in Shahu Lake

项目	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.230	0.079	0.051	0.004
种类与环境因子间相关性	0.946	0.941	0.795	0.522
物种累积百分数	50.1	67.2	78.3	79.3
物种与环境间关系累积百分数	62.7	83.8	97.7	98.9
4 个排序轴特征值总和	0.460			
全部典范特征值总和	0.396			

落变异程度的 67.2%。16 个物种与 8 个水环境因子排序轴(第一排序轴和第二排序轴)的相关系数都达到了 0.94 以上,表明排序能够较好地反映浮游动物与水环境因子间的关系。从表 7 看出,对于物种,第一排序轴、第二排序轴间相关系数仅为 -0.062,表示这两个排序轴几乎相互垂直;对于水环境因子,前两个排序轴的相关系数 0,说明排序结果是有效的(ter Braak,1986;郝占庆等,2003)。

利用 Canoco 4.5 软件对 5 个采样点四季测得的 8 个水环境因子数据及表 5 中的 16 种浮游动物生物量数据进行了 CCA 排序。

由表 7 和图 2 可知,叶绿素 a 含量、透明度、化学需氧量是第一排序轴的重要影响因素,透明度与第一排序轴相关性最大,呈极显著正相关;其次,化学需氧量、叶绿素 a 含量与第一排序轴呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.606 和 -0.551,其他因子的相关性较小。与第二排序轴极显著相关的水环境

表 7 前 2 个排序轴同环境因子之间的相关系数  
Table 7 Correlation coefficients of water environmental factors with the first two axes of CCA

	SPECAX1	SPEC X2	ENVIAX1	ENVIAX2
SPECAX1	1			
SPECAX2	-0.062	1		
ENVIAX1	0.946 **	0	1	
ENVIAX2	0	0.941 **	0	1
Chla	-0.551 **	-0.592 **	-0.583 **	-0.629 **
WT	-0.144	-0.849 **	-0.152	-0.902 **
pH	-0.080	0.066	-0.085	0.070
SD	0.709 **	0.351	0.749 **	0.373
TN	0.175	-0.187	0.185	-0.199
TP	0.050	-0.593 **	0.053	-0.630 **
N/P	0.127	0.683 **	0.134	0.726 **
COD <sub>Mn</sub>	-0.606 **	-0.018	-0.640 **	-0.019

SPECAX1:物种排序轴 1;SPEC X2:物种排序轴 2;ENVIAX1:环境因子排序轴 1;ENVIAX2:环境因子排序轴 2。\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。

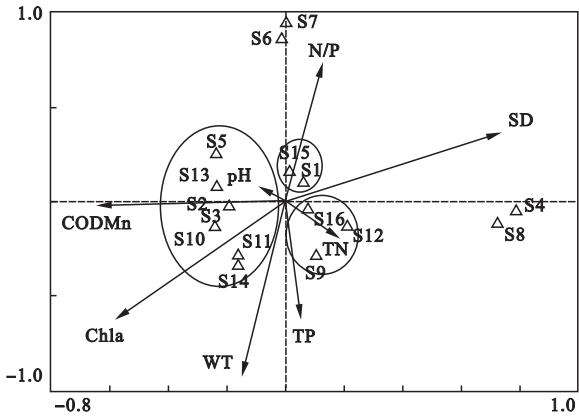


图 2 16 种浮游动物与水环境因子的 CCA 排序图  
Fig.2 CCA ordination biplot between zooplankton species and water environmental factors

因子有叶绿素 a 含量、水温、总磷、氮磷比,其中相关性最大的为水温,相关系数为 -0.849,呈极显著负相关;其次,氮磷比与第二排序轴呈极显著正相关,相关系数为 0.683;叶绿素 a 含量、总磷与第二排序轴呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.592 和 -0.593。对浮游动物影响较大的水环境因子主要是:透明度、化学需氧量、叶绿素 a 含量、水温、总磷及氮磷比。

利用 CCA 对 5 个采样点四季测得的 8 个水环境因子数据及 16 种浮游动物生物量数据进行排序,排序结果将 16 种主要浮游动物分为 3 个组(图 2)。组 1 包括曲腿龟甲轮虫、角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、前节晶囊轮虫、长肢多肢轮虫、长三肢轮虫、腹尾轮虫共 7 种。组 2 由方块鬼轮虫、近邻剑水蚤 2 种组成。组 3 包括月形单趾轮虫、异尾轮虫、无节幼体共 3 种。

3 讨论

3.1 沙湖浮游动物密度、生物量与水环境因子的关系

水温被认为是影响浮游动物生长、发育、群落组成和数量变化等的极为重要的环境因子,也是影响浮游动物水平分布的一个重要因素(Lutz & Winfried 1997;Sarma *et al.*,2005;陈光荣等,2010)。沙湖水温对浮游动物的密度和生物量影响显著,但并未入选逐步回归方程,说明沙湖水温主要是通过影响叶绿素 a 含量来间接影响浮游动物的密度和生物量。

水体的 pH 值是影响浮游动物分布的一个因



素,不同的浮游动物,其适宜的 pH 值不同,因而分布也不同。由于沙湖水体整体偏碱性,pH 值的空间变化较小,故对浮游动物的影响较小。

透明度能从一定程度上反映水体中浮游植物的量,浮游植物越多,水体透明度越低;反之,则透明度越高。枝角类的种类丰度与透明度间呈显著的线性关系(张世羊等,2009),轮虫现存量与透明度在特定时间段呈现一定负相关性(王丽卿和郑小燕,2009)。沙湖透明度对浮游动物的影响属于间接作用,并且呈负相关关系,主要通过叶绿素 a 含量影响浮游动物的生物量。

水体中的氮、磷等营养盐对浮游动物有重要影响,随着总磷含量的增加,浅水湖泊中浮游动物的种类丰度显著下降(Jeppesen *et al.*, 2000)。惠州西湖氮、磷的含量对浮游动物的种类、密度和生物量的分布有一定影响,磷酸盐与浮游动物的密度和生物量呈正相关性(陈光荣等,2008)。抚仙湖枝角类密度与总磷、溶解性总磷显著正相关(潘继征等,2009)。总氮对沙湖浮游动物密度、生物量的影响显著,并且呈正相关关系。总磷对沙湖浮游动物密度的直接影响为负向作用,并且其间接作用大于直接作用,主要通过叶绿素 a 含量间接影响浮游动物密度,最终表现为正向作用。

沙湖秋季的化学需氧量较高,有机物污染较严重,化学需氧量通过叶绿素 a 含量对浮游动物生物量的间接作用较强,抵消了负向的直接作用,结果表现为与浮游动物生物量呈正向相关。

叶绿素 a 含量是衡量浮游植物的主要指标,浮游动物主要以浮游植物为食,水体中浮游植物的密度与浮游动物的生长繁殖密切相关(王庆等,2010)。武汉东湖浮游动物的密度和生物量由叶绿素 a 的含量决定(蔡庆华,1995)。广东省城市湖泊浮游动物总丰度与叶绿素含量呈极显著正相关(陈光荣等,2010)。沙湖叶绿素 a 含量对浮游动物密度、生物量的直接正向作用显著,同时总氮、总磷、透明度、化学需氧量等水环境因子还通过叶绿素 a 含量对浮游动物产生间接影响。

沙湖浮游动物密度、生物量受多个因子共同影响,各个因子的贡献不尽相同,综合分析,叶绿素 a 含量和总氮是沙湖浮游动物生长的主要影响因子。

### 3.2 水环境因子对沙湖浮游动物分布的影响

沙湖浮游动物与水环境因子排序图反映出不同种类的浮游动物对不同水环境的适应性,分属不同

科属的长三支轮虫和腹尾轮虫、方块鬼轮虫和近邻剑水蚤、螺形龟甲轮虫和前额犀轮虫在排序图中的位置相近,表现在生态适应上的相似性。而龟甲轮属的矩形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫和螺形龟甲轮虫在 CCA 排序轴中的位置较远,表现出其对生态环境要求的差异性。

CCA 排序图中,化学需氧量、叶绿素 a 含量、水温与组 1 呈正相关,是影响该组浮游动物分布的主要水环境因子,根据物种垂直投影与水环境因子变量延长线上的投影点的位置,该组轮虫在化学需氧量较高时具有最适值,说明对于有机污染有较强的耐受力。组 2 中的方块鬼轮虫、近邻剑水蚤在四季均有分布,与氮磷比和透明度呈正相关,与化学需氧量、叶绿素 a 含量、水温呈负相关,该组对水环境的耐受力较弱。组 3 中的月形单趾轮虫、异尾轮虫、无节幼体与水体的总氮、总磷表现出较强的相关性,氮、磷含量的季节变化及空间差异是这三类浮游动物时空分布差异的主要影响因素,其中月形单趾轮虫、异尾轮虫在总氮含量较高时,具有最适值,表明二者对氮具有较高的耐受力。

不同水体影响浮游动物分布的环境因子不同,水温、氨氮、电导率、pH 是影响红枫湖水库冬春季轮虫分布的主要环境因子(夏品华等,2011);透明度、水温和叶绿素浓度是影响南方某水库轮虫群落结构季节变化和空间分布的主要水环境因素(王庆等,2010)。水温、pH、水深、总磷、化学需氧量和溶解氧是影响湖北西凉湖浮游动物群落结构的环境因子(吴利等,2011)。沙湖地处西北内陆干旱半干旱地区,水质偏碱性,季节变化明显,叶绿素 a 含量、化学需氧量、水温、透明度、总磷是影响沙湖浮游动物群落结构及时空分布的主要因素。

### 参考文献

- 蔡庆华. 1995. 武汉东湖浮游生物间相互关系的多元分析. 中国科学院研究生院学报, 12(1): 97-102.
- 陈光荣, 雷泽湘, 谭 镇, 等. 2010. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响. 水生态学杂志, 3(4): 28-32.
- 陈光荣, 钟 萍, 张修峰, 等. 2008. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. 湖泊科学, 20(3): 351-356.
- 陈宇炜, 高锡云. 2000. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定. 湖泊科学, 12(2): 185-188.
- 郝占庆, 郭水良, 叶 吉. 2003. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析. 植物生态学报, 27(6): 733-741.

- 金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社.
- 李超伦, 王克. 2002. 植食性浮游桡足类摄食生态学研究进展. 生态学报, **22**(4): 593–596.
- 明道绪. 2008. 田间试验与统计分析(第2版). 北京: 科学出版社.
- 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 2009. 抚仙湖浮游甲壳动物群落结构与空间分布. 湖泊科学, **21**(3): 408–414.
- 唐启义, 冯明光. 2002. 实用统计分析及其DPS数据处理系统. 北京: 科学出版社.
- 王庆, 刘丽君, 杨宇峰. 2010. 南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应. 生态学报, **30**(13): 3385–3395.
- 王丽卿, 郑小燕. 2009. 淀山湖轮虫现状及水质生态分析//中国工程院第77场工程科技论坛·2008水产科技论坛——渔业现代化与可持续发展论文集. 北京: 海洋出版社: 350–359.
- 王新华, 王宏鹏, 纪炳纯. 2008. 天津市团泊水库浮游动物研究与水环境评价. 四川动物, **27**(5): 807–809.
- 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 2011. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, **23**(4): 619–625.
- 夏品华, 马健荣, 李存雄, 等. 2011. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析. 环境科学研究, **24**(4): 378–386.
- 张世羊, 周巧红, 成水平, 等. 2009. 复合养殖系统中浮游动物种类丰度及其影响因素. 中国环境科学, **29**(7): 745–750.
- 赵红雪, 邱小琮, 杨艳梅, 等. 2010. 宁夏沙湖水体富营养化分析与评价. 湖北农业科学, **49**(10): 2414–2417.
- Aoyagui ASM, Bonecker CC. 2004. Rotifers in different environments of the Upper Paraná River floodplain (Brazil): Richness, abundance and the relationship with connectivity. *Hydrobiologia*, **522**: 281–290.
- Flores LN, Rossella Barone R. 1998. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, **369/370**: 163–178.
- Hessen DO, Faafeng BA, Smith VH, *et al.* 2006. Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes. *Ecology*, **87**: 433–443.
- Jeppesen E, Jensen JP, Sondergaard M, *et al.* 2000. Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: Changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, **45**: 201–218.
- Lutz A, Winfried L. 1997. Effects of elevated temperatures on threshold food concentrations and possible competitive abilities of differently sized cladoceran species. *Oikos*, **79**: 469–476.
- Sarma SSS, Nandini S, Gulati RD. 2005. Life history strategies of cladocerans: Comparisons of tropical and temperature taxa. *Hydrobiologia*, **542**: 315–334.
- ter Braak CJF. 1986. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, **67**: 1167–1179.
- Wu ZB, Liu AF, Zhang SY. 2008. Short-term effects of drawing water for connectivity of rivers and lakes on zooplankton community structure. *Journal of Environmental Sciences*, **20**: 419–423.
- 
- 作者简介** 邱小琮,男,1971年生,教授,博士研究生,主要从事水环境调控及水域生态学研究。E-mail: qxc7175@126.com
- 责任编辑** 李凤芹
-