

太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系^{*}

高欣¹ 牛翠娟^{1**} 胡忠军²

(¹北京师范大学生命科学学院,北京 100075; ²上海海洋大学水产与生命学院,上海 201306)

摘要 分别于2009年8月和2010年5月对太湖流域37个采样点的大型底栖动物进行调查采样.共采集到大型底栖动物69种,其中寡毛类15种,占21.7%;软体动物16种,占23.2%;甲壳动物5种,占7.2%;水生昆虫27种,占39.1%;多毛类6种,占8.7%.利用大型底栖动物的物种组成以及物种相对丰度,应用双向指示种(TWINSPAN)和无偏对应分析(DCA)将37个采样点分为4组.第1组的指示种为齿吻沙蚕和河蚬等多毛类及软体动物;第2组的指示种为太湖大螯蜚和方格短沟蜷等多毛类及软体动物;第3组的指示种为霍甫水丝蚓等环节动物;第4组的指示种为正颤蚓和摇蚊幼虫.典范对应分析(CCA)结果表明:电导率和总氮是影响底栖动物分布的主要环境因子,铵氮、COD_{Cr}、透明度、叶绿素a、水深及硝态氮对底栖动物分布也有影响.

关键词 太湖流域 大型底栖动物 群落结构 双向指示种分析 无偏对应分析 典范对应分析
文章编号 1001-9332(2011)12-3329-08 中图分类号 Q178 文献标识码 A

Macrobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin. GAO Xin¹, NIU Cui-juan¹, HU Zhong-jun² (¹College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ²College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2011 22(12): 3329-3336.

Abstract: An investigation was conducted on the macrobenthos at 37 sampling sites in the Taihu River basin in August 2009 and May 2010. A total of 69 macrobenthos species were collected, of which, 15 species (21.7% of the total) were oligochaetes, 16 species (23.2%) were mollusks, 5 species (7.2%) were crustaceans, 27 species (39.1%) were aquatic insects, and 6 species (8.7%) were polychaetes. Based on the species composition and relative abundance, and by using two-way indicators species analysis (TWINSPAN) and detrended correspondence analysis (DCA), the 37 sampling sites were divided into four groups. In the first group, polychaetes and mollusks such as *Nephtys* sp. and *Corbicula fluminea* were the indicator species; in the second group, polychaetes and mollusks such as *Grandidierella aihuensis* and *Semisulcospira libertina* were the indicator species; in the third and fourth groups, the indicator species were the annelids such as *Limnodrilus hoffmeisteri* and the *Tubifex tubifex* and chironomidae larvae, respectively. The canonical correspondence analysis (CCA) indicated that water conductivity and total nitrogen were the main environmental factors affecting the distribution of macrobenthos, and the factors water depth, diaphaneity, COD_{Cr}, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and chlorophyll a also had definite effects.

Key words: Taihu River basin; macrobenthos; community structure; TWINSPAN; DCA; CCA.

大型底栖动物是指不能通过500 μm孔径网筛的底栖动物个体^[1],在淡水湖泊和河流中的优势类群主要包括水栖寡毛类、软体动物和水生昆虫

等^[2].它们既是鱼类的天然食物资源,也在湖泊和河流的物质循环和能量流动等方面发挥着重要作用^[3-4].底栖动物对环境变化较为敏感,由于生存在水底,移动能力较差^[5],生活史相对较长,可以反映水体长期的营养状态或污染程度,近年来越来越多地被应用于生态系统的健康评价以及水质监测当

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-001)资助.

** 通讯作者. E-mail: cjniu@bnu.edu.cn

2011-03-15 收稿 2011-08-09 接受.

中^[6-7].

近些年有关太湖流域大型底栖动物群落的研究多见于对太湖湖盆的调查^[8-11],对太湖全流域的湖泊、水库以及主要河道的底栖动物调查少有报道.本研究于2009年8月和2010年5月对太湖全流域范围内的湖泊、水库以及河流进行了采样调查,旨在初步了解太湖流域大型底栖动物的空间分布特征以及同环境要素之间的相关性,为太湖流域水域生态学的研究提供基础资料.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

太湖流域面积约为3.7万km²,流域内河网水系的总长度约为12万km.太湖流域中部地势低洼,大小湖泊星罗棋布.在众多的湖群中太湖居中,太湖以西的洮滬湖群包括洮湖、滬湖及宜兴三汊等湖泊;太湖以东有阳澄、淀泖湖群,包括阳澄湖、昆承湖、淀

山湖、澄湖等湖泊.另外,在太湖流域上游分布有多个水库,如大溪水库、沙河水库、衡山水库、赋石水库、老石坎水库、对河口水库和青山水库等.

1.2 样点设置

2009年8月的调查共设32个站位(2010年5月增加了4个河道样点和1个水库样点),分别为滴水湖、淀山湖、澄湖、阳澄湖、昆承湖、漕湖、太湖(太湖东山岛3个样点,宜兴和梅梁湾各1个样点)、长漾湖、南湖、西湖、团汊、滬湖、长荡湖、宋剑湖和塘南白荡等15个湖泊,青山水库、对河口水库、赋石水库、天子岗水库、横山水库、大溪水库和泰山水库等7个水库(2010年添加泗安水库),川杨河、白莲泾、女儿泾、浏河、东莱水系和西苕溪等6个河流水系(2010年添加了西界岗河、京杭大运河、蕴藻浜、金汇港)(图1).各站位的基本概况见表1.每个站位每隔2km采集1个样点,共3个平行样点,每个样点采集2个平行样本.

表1 太湖流域主要湖泊、水库、河流基本数据

Table 1 Data of main lakes, reservoirs and rivers in Taihu Basin

名称 Name	缩写 Abbreviation	面积 Area (km ²)	蓄水容积 Volume (10 ⁹ m ³)	最大水深 Maximum depth (m)	平均水深 Average depth (m)	实测水深 Measured depth (m)	底质类型 Bottom type
淀山湖 Dianshanhu	DSH	62.0	1.3	3.6	2.1	2.9	淤泥
澄湖 Chenghu	ChenH	40.6	0.6	3.2	1.5	2.0	淤泥
阳澄湖 Yangchenghu	YCH	118.9	1.7	4.7	1.4	1.7	淤泥
昆承湖 Kunchenghu	KCH	17.9	0.3	4.1	1.7	3.3	粘土 淤泥
漕湖 Caohu	CaoH	80.0	-	-	2.2	3.0	淤泥
太湖 1-东山岛 Taihu 1	TH1					2.4	细沙 淤泥
太湖 2-东山岛 Taihu 2	TH2					2.9	淤泥
太湖 3-东山岛 Taihu 3	TH3	2338.1	44.3	4.8	2.1	2.2	淤泥
太湖 4-宜兴 Taihu 4	TH4					2.7	淤泥
太湖 5-梅梁湾 Taihu 5	TH5					2.4	淤泥
长漾湖 Changyanghu	CYH	9.3	-	-	-	2.5	淤泥
滬湖 Gehu	GeH	146.9	1.6	1.5	1.1	1.6	淤泥
南湖 Nanhu	NanH	1.0	-	5.0	-	2.7	淤泥
长荡湖 Changdanghu	CDH	85.3	1.0	1.3	1.1	1.3	淤泥
宋剑湖 Songjianhu	SJH	2.7	-	-	-	2.0	沙石 粘土
滴水湖 Dishuihu	DiSH	5.6	-	6.2	3.7	3.3	细沙
赋石水库 Fushishuiku	FSSK	12.8	2.2	-	28.0	23.0	淤泥
对河口水库 Duihekou shuiku	DHKSK	-	1.5	-	-	13.2	淤泥
青山水库 Qingshan shuiku	QSSK	-	2.1	35.0	-	5.8	淤泥
大溪水库 Daxi shuiku	DXSK	90.0	1.7	-	13.0	5.4	淤泥
泰山水库 Taishan shuiku	TSSK	0.5	-	-	-	4.3	淤泥
泗安水库 Sishui shuiku	SASK	0.4	0.5	-	-	2.6	淤泥
西苕溪 Xitiaoxi	XTX	-	-	-	-	3.6	细沙
团汊 Tuanjiu	TJ	-	-	-	-	1.5	淤泥
女儿泾 Nuerjing	NEJ	-	-	-	-	1.7	淤泥
川扬河 Chuanyang River	CYRiver	-	-	-	-	2.2	淤泥
金汇港 Jiuhuigang	JinHG	-	-	-	-	2.4	淤泥
京杭运河 Jinghangyunher	JHYH	-	-	-	-	2.7	淤泥
西界岗河 Xijieganher	XJGH	-	-	-	-	1.9	粘土 淤泥 沙砾
白莲泾 Bailianjing	BLJ	-	-	-	-	1.6	淤泥
浏河 Liu River	LiuRiver	-	-	-	-	3.4	淤泥
塘南白荡 Tangnanbaidang	TNBD	-	-	-	-	3.0	淤泥

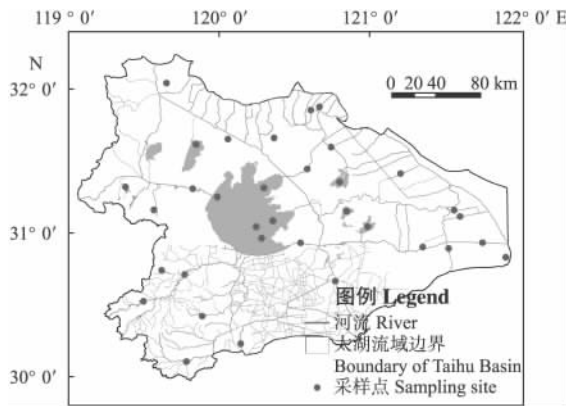


图 1 太湖流域采样站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Taihu Basin.

1.3 采样方法、分类与鉴定

在所选择的湖泊、水库及河流中沿着某一样线每隔 2 km 布设 1 个样点, 每个样点采用 $1/16 \text{ m}^2$ 彼得逊采泥器采集 2 次^[6], 采集的底泥用 $450 \mu\text{m}$ 的尼龙网过滤并清洗, 剩余物装入 500 mL 的塑料瓶中, 并加入 10% ~ 15% 的福尔马林溶液保存. 在实验室, 采用人工挑拣, 并将底栖动物样品转入 20 mL 的玻璃瓶中, 同时加入 8% 的福尔马林溶液保存待检. 采用显微镜或解剖镜下分类、计数, 利用解剖镜和显微镜对底栖动物进行分类鉴定, 样品尽量鉴定到属或种.

1.4 水体理化指标测定方法

采用水生 80 型有机玻璃采水器采集各样点水样品. 水体溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、pH、电导率、盐度、总悬浮物 (total suspended solids, TDS) 采用 YSI 多参数水质监测仪进行测定; 透明度采用 Secchi 盘测定; 悬浮物采用称量差减法测定; 总氮 (TN) 采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用酚二磺酸分光光度法测定, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用对氨基苯环酰胺-萘乙二胺分光光度法测定, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 采用磷钼蓝分光光度法, 总磷 (TP) 采用钼酸铵分光光度法测定, COD_{Mn} 采用测定高锰酸盐的方法测定, COD_{Cr} 采用蒸馏法测定, BOD_5 采用 HACHI 的 BOD 测定仪测定.

1.5 数据处理

大型底栖动物群落划分采用 TWINSpan 及 DCA 结合的方法^[12]. 利用 PCORD 5 进行 TWINSpan 及指示种的分析; DCA 及 CCA 排序分析均使用 Canoco 4.5 进行. 在进行 DCA 及 CCA 排序分析之前均对群落数据及水环境数据进行标准化处理.

2 结果与分析

2.1 底栖动物的空间分布格局

两年共采集到大型底栖动物 69 种, 其中环节动物 15 种, 占 21.7%; 软体动物 16 种, 占 23.2%; 甲壳动物 5 种, 占 7.2%; 水生昆虫 27 种, 占 39.1%; 多毛类 6 种, 占 8.7%.

利用 TWINSpan 和 DCA 分别分析 2009 年太湖流域底栖动物群落组成, 各个分组的样点呈现分散趋势 (图 2A). 太湖东山岛附近的 3 个点位和淀山湖分在第 1 组; 昆承湖、澄湖、太湖梅梁湾和滴水湖分在第 2 组; 青山水库、团次、宋剑湖、塘南白荡、川杨河、阳澄湖、太湖宜兴、白莲泾、浏河、滆湖、漕湖和赋石水库分在第 3 组; 西苕溪、南湖、长荡湖、对河口水库、大溪水库和泰山水库分在第 4 组.

利用 TWINSpan 和 DCA 分别分析 2010 年太湖

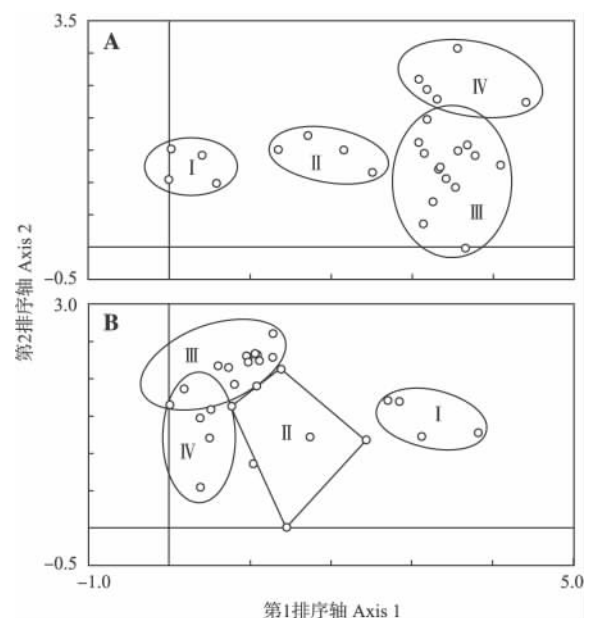


图 2 太湖流域大型底栖动物采样点在 DCA 轴上的分布

Fig. 2 Distribution of sampling sites of Taihu Basin in the DCA axis.

A: 2009 年 8 月 August 2009. I: 第 1 组 Group 1 (TH1, TH2, TH3, DSH); II: 第 2 组 Group 2 (KCH, ChenH, TH5, DiSH); III: 第 3 组 Group 3 (QSSH, TJ, SJH, TNBD, CYRiver, YCH, TH4, BLJ, LiuRiver, GeH, CaoH, FSSK); IV: 第 4 组 Group 4 (XTX, NanH, CDH, DHKSK, DXSK, TSSK). B: 2010 年 5 月 May 2010. I: 第 1 组 Group 1 (TH1, TH2, TH3, TH5); II: 第 2 组 Group 2 (KCH, CYRiver, TH4, ChenH, DSH); III: 第 3 组 Group 3 (HSSK, GeH, TNBD, TJ, YCH, JHYH, LiuRiver, NanH, XJGH, JHG); IV: 第 4 组 Group 4 (DXSK, SASK, CaoH, CYRiver, DHKSK, QSSK, TSSK, XTX). 相关缩写释义见表 1 The paraphrase of abbreviation could be found in table 1.

流域底栖动物群落组成,各个分组的样点呈现分散趋势(图2B)。太湖流域全部样点根据大型底栖动物物种组成的相似性被分为4个组别。太湖东山岛附近的3个样点和太湖梅梁湾分在第1组;昆承湖、川杨河、大治河、太湖宜兴、澄湖和淀山湖分在第2组;横山水库、滬湖、塘南白荡、团次、阳澄湖、京杭运河、浏河、南湖、西界岗河和金汇港分在第3组;大溪水库、泗安水库、漕湖、川杨河、对河口水库、青山水库、泰山水库和西苕溪分在第4组。

综合分析2009—2010年样点分布趋势,将太湖流域底栖动物的空间分布格局划分为4个组。第1组样点主要由太湖1-东山岛、太湖2-东山岛、太湖3-东山岛、太湖5-梅梁湾和淀山湖组成;第2组主要由分布于沿江水系的昆承湖、川杨河以及分布在黄浦江水系的大治河、滴水湖、澄湖、川杨河组成;第3组主要由分布于南溪水系的横山水库、大溪水库、团次、滬湖,分布于沿江水系的浏河、塘南白荡、宋剑湖、阳澄湖,分布于苕溪水系的青山水库、赋石水库以及分布于黄浦江水系的金汇港、白莲泾、南湖和京

杭运河组成;第4组由分布于南溪水系的对河口水库、大溪水库、泰山水库、长荡湖和分布于苕溪水系的西苕溪、泗安水库组成。太湖流域的底栖动物呈斑块状分布于全流域。可能是由于流域范围内大多数的湖泊、水库及河道已被严重地人为开发,失去其应有的自然分布特征。特别是流域范围内的湖泊多被作为人工养殖场、人为清淤挖沙,湖岸带逐渐被石质湖堤占据,以及河道被用作船舶运输通道,导致底栖动物天然的庇护所被破坏。

2.2 底栖动物的指示种

运用PCORD 5对太湖流域底栖动物TWINSPAN和DCA分出的4个组的指示种进行计算,结果见表2。第1组区域内优势种类为软体和多毛类动物,2009年指示种为石纓虫(*Laonome* sp.)、齿吻沙蚕(*Nephtys* sp.)、扇毛虫目1种和杯尾水虱(*Cythurra* sp.);2010年指示种为河蚬(*Corbicula fluminea*)、梨形环棱螺(*Bellamyia purificata*)、光滑狭口螺(*Stenothyra glabra*)和齿吻沙蚕。第2组区域内优势种类为软体和甲壳动物,2009年指示种为铜锈环棱螺(*Bellamyia*

表2 太湖流域大型底栖动物指示种及现存量

Table 2 Standing stock of the indicator species of macrobenthos in Taihu Basin

日期 Date	组别 Group	指示种 Indicator species	指示值 Indicated value	P值 P value	丰度 Average density		生物量 Biomass		
					数值 Value (ind · m ⁻²)	中值 Median (ind · m ⁻²)	数值 Value (g · m ⁻²)	中值 Median (g · m ⁻²)	
2009-08	第1组 Group 1	石纓虫 <i>Laonome</i> sp.	72.7	0.003	11.3±3.8	14.7	0.01±0.00	0.01	
		齿吻沙蚕 <i>Nephtys</i> sp.	88.4	0.001	24.3±20.0	18.0	0.09±0.10	0.06	
		扇毛虫目1种 <i>Flabelligerida</i> sp. 1	75.0	0.003	51.0±50.7	46.0	0.23±0.28	0.17	
		杯尾水虱 <i>Cythurra</i> sp.	50.0	0.003	11.0±13.6	8.0	0.04±0.04	0.03	
	第2组 Group 2	铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	67.0	0.004	9.0±8.3	8.0	16.01±14.99	13.94	
		纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	47.5	0.023	4.0±4.6	4.0	1.77±2.17	1.32	
		方格短沟蜷 <i>Semisulcospira libertina</i>	50.0	0.032	9.0±11.5	6.0	0.84±0.98	0.72	
		太湖大螯蜚 <i>Grandidierella aihuensis</i>	64.5	0.009	57.3±39.1	70.7	0.08±0.13	0.03	
	第3组 Group 3	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	70.4	0.000	663.1±677.7	375.3	0.42±0.42	0.23	
		第4组 Group 4	水丝蚓属1种 <i>Limnodrilus</i> sp. 1	82.4	0.002	27.1±33.8	13.3	0.10±0.14	0.06
			正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	89.4	0.000	47.3±65.5	24.0	0.02±0.03	0.01
			2010-05	第1组 Group 1	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	95.4	0.000	42.7±23.9	33.3
梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>	48.9				0.006	3.3±5.1	1.3	3.76±5.90	1.32
光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i>	74.3	0.001			4.0±4.6	2.7	0.05±0.06	0.03	
齿吻沙蚕 <i>Nephtys</i> sp.	89.7	0.000			36.0±18.0	34.7	0.11±0.07	0.09	
第2组 Group 2	湖球蚬 <i>Sphaerium lacustre</i>	61.9		0.007	79.3±141.1	31.2	3.88±6.68	1.13	
	太湖大螯蜚 <i>Grandidierella aihuensis</i>	65.9		0.006	40.8±75.0	10.8	0.08±0.17	0.02	
	日本旋卷螺赢蜚 <i>Corphium volutator</i>	57.1		0.005	301.2±475.0	2.7	1.03±1.58	0.00	
	石纓虫 <i>Laonome</i> sp.	71.4		0.001	29.0±62.7	5.7	0.08±0.16	0.03	
第3组 Group 3	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	46.4		0.019	678.5±792.3	244.0	0.42±0.42	0.23	
	克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedeianus</i>	44.2		0.006	6257.4±16498.3	508.6	2.35±2.99	0.86	
	第4组 Group 4	花纹前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>		69.0	0.002	40.4±45.2	34.7	0.05±0.06	0.04
		微小摇蚊属1种 <i>Mircochironomus</i> sp. 1		64.8	0.006	35.4±69.6	8.5	0.03±0.05	0.00
中国长足摇蚊 <i>Tanytus chinensis</i>		61.1	0.012	30.0±44.7	22.0	0.08±0.14	0.05		

aeruginosa)、纹沼螺(*Parafossarulus striatulus*)、方格短沟蜷(*Semisulcospira libertina*)、太湖大螯蜚(*Grandidierella aihuensis*); 2010 年为湖球蚬(*Sphaerium lacustre*)、太湖大螯蜚、日本旋卷螺赢蜚(*Corphium volutator*)、石纓虫。第 3 组区域内优势种类为寡毛类水丝蚓。2009 年指示种为霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*); 2010 年指示种为霍甫水丝蚓和克拉泊水丝蚓(*Limnodrilus claparedeianus*)。第 4 组区域内优势种类为寡毛类和摇蚊幼虫。2009 年指示种为水丝蚓属(*Limnodrilus* sp.) 1 种和正颤蚓(*Tubifex tubifex*); 2010 年指示种为花纹前突摇蚊(*Procladius choreus*)、微小摇蚊属 1 种(*Mircochironomus* sp.)、中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)。

部分大型底栖动物种类的丰度及生物量的标准差较平均值大,例如 2010 年克拉泊水丝蚓丰度的标准差(16498.3 ind·m⁻²)是丰度(6257.4 ind·m⁻²)的 2.6 倍,而标准差是中值(508.6 ind·m⁻²)的 32.4 倍。这种差异说明即便是在同一组内,某些大型底栖动物在各个采样点的差异也较大,分布具有一定的空间差异性^[13]。有研究表明,大型底栖动物的物种多样性与营养水平呈相反的变化趋势,即当水体从中营养性向超富营养过渡过程中大型底栖动物多样性明显降低^[2]。在本次调查中,水栖寡毛类作为广布性类群,在全流域都有分布,但两年结果显示,霍甫水丝蚓和克拉泊水丝蚓同时作为第 3 组指示种出现。第 3 组样点主要由分布于南溪水系、沿江水系、苕溪水系以及分布于黄浦江水系的样点组成。南溪水系地处太湖周边经济较发达地区,其中下游地处常州市和武进区^[14];而沿江水系主要作为周边陆域污水排放的承接河流,受到周边城市污水及工业废水的污染^[15];随着城市化进程和工农业经济迅速发展,人口压力不断增加,黄浦江流域水环境污染严重^[16]。2010 年调查结果显示,金汇港的霍甫水丝蚓和克拉泊水丝蚓丰度分别达到 2125.3 和 52994.7 ind·m⁻²。

2.3 底栖动物与环境因子的关系

分别将 2009—2010 年环境因子与底栖动物的组成进行 CCA 分析。从表 2 可以看出,2009 年 8 月不同环境因子对 CCA 轴的贡献不同。前 4 条轴表达了环境因子的 68.4% 的信息,其中第 1 轴的贡献率最大,达到 28.2%。通过对环境因子的 *t* 检验,排除一些贡献小的因子,保留 COD_{Cr}、透明度、铵氮、总氮和电导率等对 CCA 轴贡献率大($P < 0.05$)的因子。

COD_{Cr}与第 1 轴成显著正相关($r = 0.179$) (表

4),主要影响太湖湖盆东山岛的点位和淀山湖、漕湖、女儿泾和长漾湖;透明度主要与第 2 轴成显著正相关($r = 0.240$),主要影响宋剑湖、白莲泾、团坎、大溪水库和泰山水库;氨氮主要影响长荡湖、塘南白荡、川杨河、滬湖、太湖宜兴;总氮和电导率主要影响阳澄湖、澄湖、昆承湖。物种和环境因子间的相互关系表明,COD_{Cr}影响了齿吻沙蚕、刺铗长足摇蚊(*Tanytus punctipennis*)和多巴小摇蚊(*Microchironomus tabarui*)的分布;透明度主要影响了苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓的分布;铵氮主要影响了中华摇蚊(*Chironomus sinicus*)、正颤蚓、疣吻沙蚕(*Tylorrhynchus heterochaetus*)、克拉泊水丝蚓的分布;总氮和电导率分别影响了长角涵螺(*Alocinma longicomisa*)、中华河蚬(*Rhyacodrilus sinicus*)、梨形环梭螺、太湖大螯蜚、河蚬以及软铗小摇蚊(*Microchironomus tener*)的分布。

2010 年 5 月不同环境因子对 CCA 轴的贡献见表 3。前 4 条轴表达了环境因子的 66.8% 的信息,其中第 1 轴的贡献率最大,达 22.5%。排除一些贡献小的因子,得到了电导率、叶绿素 a、水深、总氮和硝态氮对 CCA 轴的贡献率最大($P < 0.05$)。

电导率与第 1 轴成显著正相关($r = 0.572$,表 4),主要影响昆承湖、淀山湖、澄湖、漕湖和青山水库;叶绿素 a 和水深主要与第 2 轴成显著正相关($r = 0.392$ $r = 0.231$),主要影响金汇港、浏河、团坎、川杨河、对河口水库、滬湖、京杭运河、泰山水库和长漾湖;总氮主要影响大溪水库、南湖、西苕溪、横山水

表 3 CCA 分析中各轴的重要值、物种变量以及物种-环境因子的累积百分数

Table 3 Results of canonical correspondent analysis: Eigen value, correlation coefficient between axes and environment, cumulative percentage variance of species data and species-environment correlation

日期 Date	轴 Axis	重要值 Eigen values	物种-环境 因子相关性 Species- environment correlation	物种变量 累计分数 Cumulative percentage variance of species data	物种-环境 变量累计分数 Cumulative percentage variance of species- environment correlation
2009-08	1	0.568	0.904	17.1	28.2
	2	0.329	0.862	26.9	44.6
	3	0.256	0.888	34.6	57.3
	4	0.224	0.818	41.3	68.4
2010-05	1	0.618	0.933	15.7	22.5
	2	0.578	0.912	30.4	43.6
	3	0.378	0.921	40.1	57.3
	4	0.260	0.889	46.7	66.8

表 4 CCA 轴上环境因子的典型相关系数矩阵
Table 4 Weighted correlation matrix of environment factors with CCA axis

环境因子 Environmental factors	2009-08		2010-05	
	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2
COD _{Cr}	0.179	0.129	-	-
透明度 Diaphaneity	-0.210	0.240	-	-
氨氮 NH ₄ ⁺	-0.283	-0.277	-	-
总氮 TN	0.077	-0.250	-0.123	-0.262
电导率 Conductivity	0.304	-0.029	0.572	0.427
叶绿素 a Chlorophyll a	-	-	-0.081	0.392
水深 Depth of water	-	-	-0.284	0.231
硝态氮 NO ₃ ⁻	-	-	0.293	-0.544

库、西界岗河;硝态氮主要影响太湖湖盆的点位.物种和环境因子间的相互关系显示,电导率影响了太湖大螯蜚、长角涵螺、仙女虫属 1 种(*Nais* sp.)、湖球蚬的分布;叶绿素 a 和水深分别影响了参差仙女虫(*Nais variabilis*)、微小摇蚊属 1 种、羽摇蚊群(*Chironomus* gr. *Plumosus*)和水丝蚓属 1 种、疣吻沙蚕、管水蚓属 1 种(*Aulodrilus* sp.)、中国长足摇蚊以及霍甫水丝蚓的分布;硝态氮主要影响了梨形环螺、长角涵螺、齿吻沙蚕、河蚬、光滑狭口螺的分布.

3 讨 论

两年的结果显示,不同季节影响底栖动物结构的环境因子不完全相同,各个环境因子随季节变化而变化,某些环境因子在某一时期是限制因子,随着季节的变动其限制性可能减小或增加,并对底栖动物生长发育产生影响;其次,各类群生物的生活史不同,在不同季节对营养物质的需求不同,决定了不同时期底栖动物不同摄食类群的消长;再次,底栖动物不同类群以及同一类群的不同发育阶段对不同环境因子有着不同程度的适应性和需求^[12].

综合分析两年影响太湖流域大型底栖动物分布的环境因子主要以反映水体有机污染程度的指标为主,如表征水质条件的电导率、COD_{Cr}、总氮等.研究表明,电导率是影响大型底栖动物特别是寡毛类、软体动物的一个重要的环境因子^[17],这与本研究结果较为一致.COD_{Cr}是评定水质污染程度的重要综合指标之一.COD_{Cr}的数值越大,水体污染越严重.许多研究表明,在受污染的河流和湖泊中,COD_{Cr}不仅是影响底栖动物更是影响鱼类等水生生物分布的主要水化学因素^[18-19].氮和磷的含量水平是水体营养程度的一个重要指标.水体中氮、磷等营养元素含量的不同对底栖动物也有影响,其中氮为主要制约因

子.正常情况下,当氮为 10 mg · L⁻¹ 以下时,磷的制约作用才明显^[20],如对东湖 3 个区底栖动物现存量与各区域水中营养元素含量的年平均值进行分析,得出底栖动物现存量与总氮的关系可用直线回归方程表示^[21].总氮在河流和湖泊中作为重要的营养盐指标能够显著地影响大型底栖动物的物种组成和分布^[22-23].

底栖动物现存量与水深的关系因湖泊而异,一般深水带底栖动物现存量与水深之间存在着反向的关系,随着水深的增大,生物量逐渐降低^[24].这是因为深水带的动物现存量很大程度上依赖于自有光层沉降下来的食物的质和量,当食物自有光层沉降到湖底时,分解作用同时进行,湖泊越深,沉降时间越长,食物被微生物矿化程度越高,底栖动物可利用的部分越少,导致底栖动物的现存量越低^[25-26].本次调查结果显示,水深不仅影响了较深的水库(对河口水库的平均实测水深为 13.2 m;赋石水库的平均实测水深为 23.0 m)物种组成,同时也影响了沿江水系的样点,其原因可能是由于沿江水系的样点有机污染程度较为严重,悬浮物浓度、悬浮颗粒阻碍了光照,从而使水体的初级生产力降低,影响了大型底栖动物的生长^[26],导致该组样点主要由耐受能力较强的摇蚊幼虫和水丝蚓组成,因而在排序时出现在同一象限内.

在植物光合作用过程中,绝大部分叶绿素的作用是吸收及传递光能,仅极少数叶绿素 a 分子起转换光能的作用.它们在活体中都是与蛋白质结合在一起,存在于类囊体膜上.富营养化是水体中氮、磷等营养盐含量不断上升,引起水生植物、藻类等大量生长,导致水质恶化的现象^[27].其中,氮、磷是水生生物生长所必需的营养元素^[28],叶绿素 a 是各种藻类及其他植物体的重要组成部分,是表征藻类现存量的重要指标之一^[29-30].藻类的现存量也是评价湖泊和水库富营养化的一个重要指标.研究表明,在太湖有草区域(如贡湖、东太湖等),水体透明度较高,浮游藻类少,叶绿素含量低,其叶绿素含量比无草区低 2.17(5 月)和 1.54(9 月)倍;而无草区的浮游藻类多,叶绿素含量高,如西太湖部分水域 5 月开始出现藻华,7—9 月时藻华十分严重^[10].本次调查结果显示,从 5 月开始,流域叶绿素 a 浓度开始上升,成为影响底栖动物分布的一个主要环境要素.

参考文献

- [1] Ma X-F (马徐发), Xiong B-X (熊邦喜), Wang M-X

- (王明学), *et al.* The community structure and biodiversity of macrozoobenthos in Daoguanhe Reservoir, Hubei Province. *Journal of Lake Sciences (湖泊科学)*, 2004, **16**(1): 49–55 (in Chinese)
- [2] Gong Z-J (龚志军), Xie P (谢平), Tang H-J (唐汇娟), *et al.* The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica (水生生物学报)*, 2001, **25**(3): 210–216 (in Chinese)
- [3] Covich AP, Palmer MA, Crowl TA. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems. *BioScience*, 1999, **49**: 119–127
- [4] Devine JA, Vanni MJ. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 2002, **47**: 1107–1121
- [5] Callisto M, Goulart M, Barbosa FA, *et al.* Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco river (northeastern Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, 2005, **65**: 229–240
- [6] Hu Z-J (胡忠军), Liu Q-G (刘其根), Chen L-J (陈立婧), *et al.* Structural characteristics of chironomid community and their indicative significance in bioassessment of water quality in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2009, **20**(4): 929–936 (in Chinese)
- [7] Cai X-M (蔡晓明), Ren J-C (任久长), Zong Z-X (宗志祥), *et al.* Benthic macroinvertebrate community in Qinglong River and assessment of its water quality. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 1992, **3**(4): 364–370 (in Chinese)
- [8] Hu B-B (胡必彬). Analysis on effect of water pollution in Lake Taihu Basin on water quality of Lake Taihu. *Shanghai Environmental Science (上海环境科学)*, 2003, **22**(12): 1017–1054 (in Chinese)
- [9] Ma T-W (马陶武), Huang Q-H (黄清辉), Wang H (王海), *et al.* The selection of benthic macroinvertebrate-based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2008, **28**(3): 1192–1200 (in Chinese)
- [10] Lei Z-X (雷泽湘), Xu D-L (徐德兰), Wang B-X (王备新), *et al.* Function of submersed and floating-leaved macrophytes in the shallow lake ecological system: A case study of Taihu Lake. *Journal of Henan Normal University (Natural Science) (河南师范大学学报·自然科学版)*, 2010, **38**(2): 136–139 (in Chinese)
- [11] Liu E-S (刘恩生). Changes of fish community, the mechanism of changes and the effects of the changes on environment in Taihu Lake. *Journal of Hydroecology (水生态学杂志)*, 2009, **29**(4): 8–15 (in Chinese)
- [12] Qu X-D (渠晓东), Cao M (曹明), Shao M-L (邵美玲), *et al.* Macroinvertebrates in Jinping reach of Yangtze River and its main tributaries. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(1): 158–162 (in Chinese)
- [13] Gao F (高峰), Yin H-B (尹洪斌), Hu W-P (胡维平), *et al.* Ecological characteristics of macroinvertebrate communities in Chaohu Basin in spring and their relationship with environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(8): 2132–2139 (in Chinese)
- [14] Zhang Y-P (张跃平). A Study on Tolerance Value of Benthic Macroinvertebrates and Biotic Index in Jiangsu Province. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [15] Mao Z-C (茅志昌), Shen H-T (沈焕庭), Chen J-S (陈景山). The sewage discharge of the Liuhe River and its effects on water quality along the south bank in the Luojing reach. *Transactions of Oceanology and Limnology (海洋湖沼通报)*, 2003(2): 37–40 (in Chinese)
- [16] Huang S-F (黄沈发), Gu Y-Z (顾友直), Chen C-H (陈长虹). Study on non-point source pollution control in the Huangpu River Basin. *Shanghai Environmental Science (上海环境科学)*, 1998, **17**(1): 18–20 (in Chinese)
- [17] Miserendino ML. Macroinvertebrate assemblages in Andean Patagonian rivers and streams: Environmental relationships. *Hydrobiologia*, 2001, **444**: 147–158
- [18] Zhang Y (张远), Xu C-B (徐成斌), Ma X-P (马溪平), *et al.* Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报)*, 2007, **27**(6): 919–927 (in Chinese)
- [19] Xia J-H (夏建宏), Lu J-F (陆剑锋), Zhou B-C (周保春), *et al.* The preliminary study on fish communities in Suzhou Creek, Shanghai. *Journal of Lake Sciences (湖泊科学)*, 2009, **21**(4): 538–546 (in Chinese)
- [20] Perrin CJ, Richardson JS. N and P limitation of benthos abundance in the Nechako River, British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, **54**: 2574–2583
- [21] Chen Q-Y (陈其羽), Liang Y-L (梁彦龄), Wu T-H (吴天惠). Studies on community structure and dynamics of zoobenthos in Lake Donghu, Wuhan. *Acta Hydrobiologica Sinica (水生生物学报)*, 1980, **7**(1): 41–56 (in Chinese)

- [22] Wu D-H (吴东浩), Yu H-Y (于海燕), Wu H-Y (吴海燕), *et al.* Estimation of river nutrients thresholds based on benthic macroinvertebrate assemblages: A case study in the upper reaches of Xitiao Stream in Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(2): 483-488 (in Chinese)
- [23] Hu Z-J (胡忠军), Su Y-J (孙月娟), Liu Q-G (刘其根), *et al.* Temporal and spatial distribution of profundal macrozoobenthic community in Lake Qiandao, Zhejiang, China. *Journal of Lake Sciences (湖泊科学)*, 2010, **22**(2): 265-271 (in Chinese)
- [24] Deevey ES. Limnological studies in Connecticut. VI. The quantity and composition of the bottom fauna of thirty-six Connecticut and New York lakes. *Ecological Monographs*, 1941, **11**: 413-455
- [25] Liu B-Y (刘保元), Wang S-D (王士达), Wang Y-M (王永明). An evaluation on pollution in the Xiangjiang River by using zoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica (水生生物学集刊)*, 1981, **1**(4): 337-348 (in Chinese)
- [26] Han J (韩洁), Zhang Z-N (张志南), Yu Z-S (于子山). Study on the macrobenthic abundance and biomass in Bohai Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao (青岛海洋大学学报)*, 2001, **31**(6): 889-896 (in Chinese)
- [27] Su J (苏婧), Xu X-P (薛小平), Tang R-H (唐蕊华), *et al.* Preparation and characterization of monoclonal antibodies for analysis of organophosphorus pesticides. *Environmental Pollution & Control (环境污染与防治)*, 2008, **30**(4): 20-22 (in Chinese)
- [28] Zhou P (周培), Lu Y-T (陆贻通). Study progress on determination of pesticide residue by ELLISA. *Environmental Pollution & Control (环境污染与防治)*, 2002, **24**(4): 248-251 (in Chinese)
- [29] Liu Y (刘媛), Yu X-Y (余向阳), Liang Y (梁颖), *et al.* Recent advances in development of broad specificity antibodies for pesticides. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences (江苏农业学报)*, 2009, **25**(2): 428-432 (in Chinese)
- [30] Banks JN, Chaudhry MQ, Matthews WA, *et al.* Production and characterisation of polyclonal antibodies to the common moiety of some organophosphorous pesticides and development of a generic type ELISA. *Food and Agricultural Immunology*, 1998, **10**: 349-361

作者简介 高欣男,1982年生,博士研究生.主要从事河流及湖泊大型底栖动物群落生态学研究. E-mail: gxbs1112@126.com

责任编辑 肖红
