

太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价*

吴召仕^{1,2}, 蔡永久^{1,2}, 陈宇炜^{1**}, 邵晓阳³, 高俊峰¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036)

摘要: 2010年4月和7月对太湖流域五水系(苕溪、南河、洮涌、黄浦江和沿江水系)73个采样点的大型底栖动物进行了两次调查,分析各水系底栖动物群落结构及其与环境因子之间的关系,并评价各水系的水质状况。所有采样点共记录底栖动物88种,隶属于3门8纲48科。全流域主要河流大型底栖动物的平均密度和生物量分别为5888.91 ind./m²和105.18 g/m²。寡毛类占平均密度的94.19%,腹足类在生物量中所占比例最高,为72.50%,霍甫水丝蚓在五水系中均处优势地位。相似性分析结果表明沿江水系与苕溪、南河、洮涌和黄浦江水系,苕溪与洮涌水系底栖群落具有显著差异。霍甫水丝蚓是导致这五个水系群落结构差异的最主要原因,其次是铜锈环棱螺、苏式尾鳃蚓、羽摇蚊、钩虾属一种、红裸须摇蚊、河蚬、小摇蚊属一种、摇蚊亚科一种、侧叶雕翅摇蚊、中国长足摇蚊和长角涵螺。典范对应分析表明高锰酸盐指数、正磷酸盐磷、总氮、硝态氮与大型底栖动物群落显著相关。*BPI*和*Wright*指数评价结果发现五水系整体处在中污染状态。

关键词: 太湖流域;水系;底栖动物;生物评价

Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu Basin

WU Zhaoshi^{1,2}, CAI Yongjiu^{1,2}, CHEN Yuwei¹, SHAO Xiaoyang³ & GAO Junfeng¹

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(3: College of Life and Environment Sciences, Hangzhou Normal university, Hangzhou 310036, P. R. China)

Abstract: Aimed at characterizing the assemblage structure of macrozoobenthos, identifying the key influencing environmental factors and evaluating the water quality in terms of biological indexes, we investigated macrozoobenthos at 73 sites of the five river systems (Rivers Tiaoxi, Nanhe, Taoge, Huangpu and Yanjiang) within Taihu Basin during April and June of 2010. Total 88 species from 48 families, 8 classes and 3 phyla have been found in the investigations. The mean density of macrozoobenthos was 5888.91 ind./m², in which the proportion of oligochaetes was 94.19%. The mean biomass of macrozoobenthos was 105.18 g/m², of gastropods with 72.50% in total biomass. *Limnodrilus hoffmeisteri* was the dominant species in all river systems. One-way analysis of similarity (ANOSIM) showed that macrozoobenthos assemblages in the Yanjinag River system differed significantly from other four river systems, and those of Tiaoxi and the Taoge River systems differed significantly. *L. hoffmeisteri* was primarily responsible for dissimilarities of macrozoobenthos assemblages among the five river systems, followed by *Bellamyia aeruginosa*, *Branchiura sowerbyi*, *Chironomus plumosus*, *Gammarus* sp., *Prosilocerus akamusi*, *Corbicula fluminea*, *Microchironomus* sp., Chironominae sp., *Glyptotendipes lobiferus*, *Tanytus chinensis* and *Alocinma longicornis*. Canonical Correspondence Analysis showed that COD_{Mn}, PO₄-P, TN and NO₃-N were strongly correlated with the macrozoobenthos assemblages. The results of bioassessment using the *BPI* and the *Wright* Indexes indicated that the five river systems were mostly at status of intermediate polluted.

Keywords: Taihu Basin; river systems; macrozoobenthos; bioassessment

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07526-007)和科技部科技基础工作专项项目(2006FY110600)联合资助。2011-01-24 收稿;2011-04-13 收修改稿。吴召仕,男,1987年生,硕士研究生;E-mail:zswu1987@163.com.

** 通讯作者;E-mail:ywchen@niglas.ac.cn.

太湖流域自然条件优越,交通便利,工业发达,在我国的社会经济发展中占有重要地位.但随着工农业发展,大量污染物质进入湖泊,致使太湖流域水体污染严重,严重影响湖区工农业生产和居民的生活饮用水安全.

河流生态系统的研究起源于水生昆虫学和渔业生物学^[1],对大型底栖无脊椎动物的研究一直是河流生态学研究的重要部分.大型底栖动物是水生生态系统碎屑食物链的重要生物类群之一.研究表明其在水生生态系统的作用包括加速水底碎屑分解,调节泥水界面物质交换,维持水生生态系统的生物完整性等^[2-3].此外,底栖无脊椎动物具有个体较大、寿命较长、活动范围小以及对环境条件改变反应敏感等优点,因此常被作为评价水质的指示生物^[4],在水质生物评价中应用也比较广泛,如水生生态系统健康评价等^[5-6].

目前针对太湖流域大型底栖动物的研究大多集中在太湖等湖泊或某一水系^[7-8],对全流域大型底栖动物的研究较少.本文于2010年4月和7月对太湖流域各主要河道的大型底栖动物进行两次调查,分析苕溪、南河、洮滬、黄浦江以及沿江五个主要水系的底栖动物群落结构及分布状况,初步探讨不同水系间底栖动物差异的原因,并用底栖动物群落来评价各水系的水质状况.

1 研究区域与方法

太湖流域面积36900 km²,以太湖为中心,河流与湖泊相互交错形成我国著名的水网地区.太湖流域也是全国河道密度最大的地区,河道总长约12 × 10⁴ km,河道密度达3.25 km/km².流域分上游水系和下游水系两个部分.上游主要为西部山丘区独立水系,有苕溪水系、南河水系及洮滬水系等;下游主要为平原河网水系,主要有以黄浦江为主干的东部黄浦江水系(包括吴淞江)、北部沿江水系和南部沿杭州湾水系.苕溪水系入湖水量约占太湖上游来水总量的50%,南河和洮滬水系则分别占到25%和20%.黄浦江水系面积约为14000 km²,包含太湖、淀山湖、澄湖等湖泊,是太湖流域最具代表性的平原河网水系,也是全流域目前唯一敞口的入江河流,在流域排水方面起着重要作用.沿江水系主要由北部沿长江河道组成.

1.1 采样点布设

本研究在太湖流域主要河道共布置73个采样点,其中,苕溪13个、南河6个、洮滬12个、黄浦江32个、沿江10个(图1),所设采样点主要位于平原区,且绝大多数都受到不同程度人类活动的影响,底质多为淤泥和硬底.

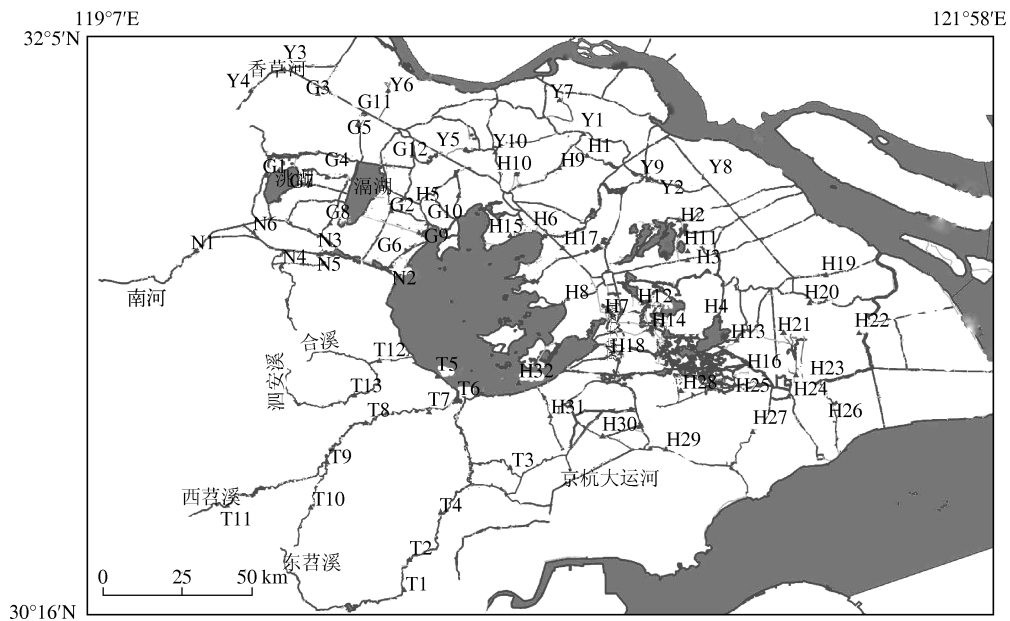


图1 采样点位示意图(T表示苕溪水系,N表示南河水系,G表示洮滬水系, H表示黄浦江水系,Y表示沿江水系)

Fig.1 Schematic location of the macrozoobenthos sampling sites in Taihu Basin

1.2 底栖动物样品采集与处理

分别于2010年4月和2010年7月对太湖流域河道进行采样. 样品采集用改良的彼得生采泥器(1/16 m²), 泥样用60目尼龙网筛洗, 剩余物置于白磁盘中, 将底栖动物活体逐一挑出. 获得的样品用7%的福尔马林溶液保存. 在实验室中对样品进行种类鉴定和个体计数. 用滤纸吸除底栖动物表面固定液, 置于Sartorius电子天平(量程120 g、精度0.1 mg)上称重, 并将结果折算成单位面积的密度和生物量.

1.3 环境因子测定

现场使用YSI 6600V2型多参数水质监测仪测定水体表层水温、pH、电导率(Cond)、溶解氧(DO). 同时采集水样并冷冻保存, 带回实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃-N)、正磷酸盐磷(PO₄-P)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总悬浮颗粒物(SS). 测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[9].

1.4 数据处理

1.4.1 优势种 由于不同种类底栖动物密度和生物量差异较大, 因此本文采用相对重要性指数(IRI)来确定各水系中的优势种^[10-11], IRI综合考虑大型底栖动物的密度、生物量以及分布状况, 其计算公式为:

$$IRI = (W + N) \times F \quad (1)$$

式中, W 为某一类生物量占各水系大型底栖动物总生物量的百分比; N 为该种类的密度占各水系大型底栖动物总密度的百分比; F 为该物种在各水系中出现的相对频率.

1.4.2 群落相似性分析 根据底栖动物的密度, 利用分析软件PRIMER 5.0^[12-13], 采用相似性分析(ANOSIM)检验五个水系的底栖动物群落组成的差异显著性, 进一步利用相似百分比分析(SIMPER)找出对五水系底栖动物群落差异贡献最大的种类. 在利用One-way ANOSIM分析4月和7月所采的底栖动物群落是否存在差异时, 发现二者之间不存在显著差异, 故在数据分析中采用4月和7月的平均值. 此外, 不同水系之间的底栖群落数据不满足方差分析的正态性要求, 故分析物种密度在不同水系间的差异性时, 采用Kruskal-Wallis非参数检验方法.

1.4.3 典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA) CCA结合对应分析(Correspondence Analysis)、相互平均(Reciprocal Averaging)和多元回归, 分析研究对象与环境之间的关系^[14]. 本文运用Canoco 4.5软件分析水温、pH、Cond、DO、TN、TP、NH₃-N、NO₃-N、PO₄-P、COD_{Mn}、SS和五水系底栖动物群落的关系. CCA分析时物种数据进行平方根转换, 环境因子进行lg(x+1)转换(pH除外). 环境因子的筛选采用向前引入法(forward selection), 保留能通过蒙特卡罗置换检验的显著因子(Monte Carlo test, 9999 random permutations, $P < 0.05$).

1.4.4 水质生物学评价 相对重要性指数(BPI)和Wright指数是两种常见的评价水体水质的指数.

$$BPI = \frac{\lg(N_1 + 2)}{\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2)} \quad (2)$$

表1 BPI和Wright指数评价标准

Tab. 1 The standard of BPI and Wright indexes

BPI 指数	Wright 指数
小于 0.1 为清洁	寡毛类密度在 100 ind./m ² 以下为无污染
[0.1, 0.5) 为轻污染	100 - 999 ind./m ² 时为轻微污染
[0.5, 1.5) 为 β-中污染	1000 - 5000 ind./m ² 时为中度污染
[1.5, 5.0] 为 α-中污染	5000 ind./m ² 以上为重度污染
大于 5.0 为重污染	

式中, N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数; N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外其他水生昆虫个体数; N_3 为软体动物个体数.

Wright^[15]从寡毛类的密度来评价水体水质, 本文同时运用这两种方法来评价太湖流域的水质状况. 其评价方法标准见表1.

2 结果与分析

2.1 理化指标

理化分析结果表明不同水系之间水质差异较大(表2). 苕溪、南河以及洮漏水系的电导率明显低于黄浦江和沿江水系(超过 560 μs/cm), 而苕溪和南河水系的 DO 高于其他 3 个水系. 从 TN、TP 来看, 苕溪含量最

低,沿江水系最高.这说明沿江水系的营养水平要高于其它四个水系,苕溪水系营养水平最低.

表2 五水系水体理化特征*

Tab.2 Physicochemical characteristics of the five river systems

理化参数	苕溪	南河	洮滆	黄浦江	沿江
水温(℃)	22.51 (17.95-27.40)	19.58 (18.95-20.78)	19.85 (18.42-21.03)	21.91 (20.65-25.85)	20.99 (19.88-25.68)
pH	6.58 (6.39-6.78)	9.10 (8.94-9.40)	9.06 (8.82-9.22)	7.78 (5.75-9.06)	8.78 (8.41-9.44)
电导率(μs/cm)	249.12 (152.40-390.92)	191.00 (122.62-262.42)	210.14 (138.13-266.28)	580.22 (175.70-937.86)	563.65 (153.67-925.00)
DO(mg/L)	10.42 (5.91-16.33)	11.12 (5.15-36.78)	5.98 (3.19-8.19)	7.73 (3.32-12.06)	4.73 (2.05-6.72)
浊度(NTU)	117.86 (5.54-602.56)	31.08 (14.40-59.90)	40.27 (11.05-105.15)	42.46 (9.10-261.50)	70.05 (2.80-338.45)
SS(mg/L)	48.53 (9.63-141.00)	63.39 (29.23-153.70)	98.60 (25.60-370.67)	37.32 (15.83-83.25)	46.06 (15.33-77.97)
TN(mg/L)	3.27 (1.55-5.14)	3.79 (2.91-5.50)	4.58 (2.36-26.00)	4.30 (1.11-8.22)	5.53 (3.73-6.77)
TP(mg/L)	0.19 (0.07-0.63)	0.22 (0.10-0.43)	0.27 (0.13-0.42)	0.27 (0.06-0.87)	0.30 (0.19-0.44)
NH ₃ -N(mg/L)	1.38 (0.01-2.61)	1.34 (0.51-2.99)	2.02 (0.85-3.08)	2.27 (0.36-4.20)	2.87 (1.41-3.70)
NO ₃ -N(mg/L)	1.50 (0.72-2.54)	2.73 (1.59-5.46)	3.99 (2.26-7.46)	2.50 (0.77-6.28)	3.49 (2.30-5.28)
PO ₄ -P(mg/L)	0.13 (0.05-0.32)	0.08 (0.01-0.27)	0.10 (0.01-0.21)	29.49 (0.12-167.15)	0.09 (0.02-0.17)
COD _{Mn} (mg/L)	4.58 (2.86-6.95)	4.52 (3.31-4.94)	4.55 (2.94-6.66)	5.08 (2.47-8.38)	4.76 (3.80-6.05)

*表中数值为各理化参数的平均值(范围).

2.2 种类组成及优势种

调查共发现大型底栖动物 88 种,隶属于 3 门 8 纲 48 科.不同水系间种类数量和组成具有较大差异.黄浦江水系发现的物种最多(47),以寡毛类和摇蚊幼虫为主;苕溪次之(37),其中水生昆虫 26 种;南河种类数最少(15)(表 3).

霍甫水丝蚓的 IRI 值均处在第一位,且与其它物种的 IRI 值相差较大,可见霍甫水丝蚓在五个水系中均处于优势地位,但其在苕溪和黄浦江水系的 IRI 值明显低于其它三个水系.铜锈环棱螺在各水系(除苕溪外)IRI 也较高(表 4).值得注意的是,三种对水质要求较高的蜉蝣目昆虫也为苕溪水系的优势种类,而在其它水系很少甚至未出现.

表3 五种常见底栖动物类群在各水系中的物种数
Tab.3 Number of species of the five common groups in the five river systems

组成	物种数				
	苕溪	南河	洮滆	黄浦江	沿江
寡毛类	5	4	6	11	3
腹足类	3	3	4	7	2
双壳类	0	2	5	4	2
水生昆虫*	26	0	0	2	0
摇蚊幼虫	7	5	7	12	7
其它	6	1	5	11	5

*水生昆虫是指除摇蚊幼虫以外的水生昆虫,文中均以水生昆虫表示.

表4 五水系中主要大型底栖动物的 IRI*
Tab. 4 IRI of the dominated species in the five river systems

物种	IRI					
	苕溪	南河	洮滬	黄浦江	沿江	
寡毛类	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	46.97	107.07	103.37	47.37	97.59
	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	8.50			2.63	1.53
腹足类	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>		49.11	25.87	35.50	34.73
	长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>				1.90	
双壳类	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>		1.48	1.49	2.28	3.38
水生昆虫	扁蜉属一种 <i>Heptagenia</i> sp.	2.19				
	宽基蜉属一种 <i>Choroterpes</i> sp.	2.12				
	四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.	1.20				
摇蚊幼虫	小摇蚊属一种 <i>Microchironomus</i> sp.				2.74	
	红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>				1.37	
	羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	1.76				
	摇蚊亚科一种 <i>Chironominae</i> sp.	3.64				
其它	钩虾属一种 <i>Gammarus</i> sp.	1.15			1.57	

* 此表仅列出 IRI > 1 的物种.

2.3 密度与生物量

全流域主要河流大型底栖动物的平均密度和生物量分别为 5888.91 ind./m² 和 105.18 g/m². 寡毛类占平均密度的 94.19%, 腹足类占平均生物量的 72.50%. 沿江水系总密度最高(21648.80 ind./m²), 其次是洮滬(3025.33 ind./m²) 和南河水系(2966.33 ind./m²). 苕溪水系最低(254.12 ind./m²) (表5), 仅为沿江水系密度的 1.17%, 远远小于其他四个水系. 从相对密度来看, 寡毛类占绝对优势, 在苕溪水系中所占比例最少(40%), 在南河、洮滬以及沿江水系中都在 90% 以上, 其中在沿江水系中高达 97.8%. 水生昆虫在苕溪水系中占到 37.3%, 而在其他水系所占比例均小于 1%. 摇蚊幼虫在黄浦江水系中所占比例最多(26.7%), 其次是苕溪水系(19.6%). 腹足类和双壳类在各水系中所占密度均较低(<9%) (图2).

表5 五种常见类群大型底栖动物在各水系中的平均密度和平均生物量
Tab. 5 Average density and biomass of the five common groups in the five river systems

类群	平均密度(ind./m ²)					平均生物量(g/m ²)				
	苕溪	南河	洮滬	黄浦江	沿江	苕溪	南河	洮滬	黄浦江	沿江
寡毛类	101.65	2814.72	2778.58	868.91	21171.20	0.43	12.12	10.53	1.30	34.64
腹足类	0.92	37.61	33.92	138.53	172.00	0.01	53.56	36.54	118.18	172.78
双壳类	0	15.69	39.67	20.85	68.00	0	6.15	20.30	11.85	42.49
水生昆虫	94.78	0	0	0.19	0	0.49	0	0	0.01	0
摇蚊幼虫	49.91	54.86	136.50	413.63	216.00	0.03	0.14	0.45	1.74	0.80
其它	6.87	43.44	36.67	107.84	21.60	0.20	0.12	0.09	0.89	0.08

最高生物量同样出现在沿江水系(250.78 g/m²), 其次为黄浦江水系(133.98 g/m²). 苕溪水系生物量最低(1.16 g/m²), 与密度相似, 远远低于其他水系(表5). 从相对生物量来看, 腹足类由于个体较大, 因而在南河、洮滬、黄浦江以及沿江水系中比例都至少达到 50%, 最高值出现在黄浦江水系(88.2%). 寡毛类密度较高, 因而在各水系的生物量中占到一定比例, 但腹足类的密度百分比在黄浦江水系达到最大, 导致黄浦江

水系中寡毛类的生物量百分比比较低.水生昆虫的生物量在苕溪水系中所占比例最大,其它水系中的生物量百分比同样均小于1%(图2).

2.4 各水系群落结构差异分析

ANOSIM 检验结果表明沿江水系与其它四个水系的底栖群落结构均存在显著差异(与苕溪、南河、洮涌、黄浦江水系的 P 值分别为 <0.0001 、 0.0435 、 0.047 、 0.0006),此外,群落结构的显著差异还表现在洮涌和苕溪水系之间($P=0.018$).SIMPER 分析发现,霍甫水丝蚓是造成五水系之间底栖群落结构差异的主要原因,其次是铜锈环棱螺、苏式尾鳃蚓、羽摇蚊、钩虾属一种、红裸须摇蚊、河蚬、小摇蚊属一种、摇蚊亚科一种、侧叶雕翅摇蚊、中国长足摇蚊和长角涵螺(表6).其中许多种类只出现在部分水系,而在各水系均出现的种类中,大部分种类的密度在各水系间均存在显著差异(Kruskal-Wallis 非参数检验, $P < 0.05$).这种结果表明底栖群落的差异主要源于不同种类底栖动物在各水系间的分布和密度差异.

2.5 底栖动物群落与环境因子关系

DCA 分析结果表明第一轴的轴长较长(4.42),因此更宜使用单峰模型 CCA 排序分析.通过蒙特卡罗置换检验最终筛选出能够最大程度解释不同水系底栖动物群落组成变化的环境变量组合——TN、 COD_{Mn} 、 PO_4-P 及 NO_3-N ($P < 0.05$).蒙特卡罗检验表明 CCA 第一轴和所有排序轴均显著($P \leq 0.0007$).前二个排序轴的特征值分别为 0.334 和 0.306,分别解释了底栖动物群落变异的 6.4% 和 5.8%,解释的物种-环境变异百分比分别为 35.8% 和 32.7%.从排序图可以看出, COD_{Mn} 和 PO_4-P 与第一轴相关性较高, TN 和 NO_3-N 与第二轴相关性较高(图3),筛选出的环境变量反映了水体的营养状态和污染程度.排序图中五水系各样点在排序图中彼此分离,黄浦江水系由于分布范围最广,采样点最多,在图中可分为两组.

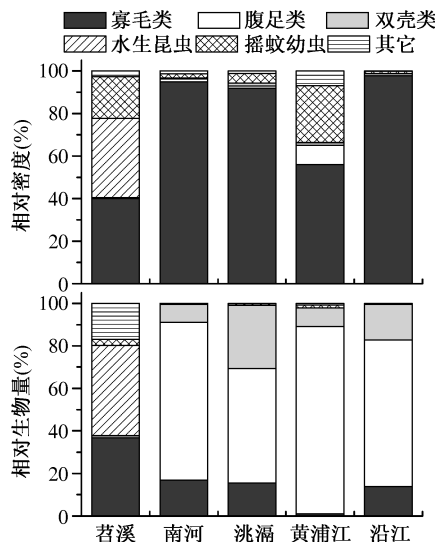


图2 五种常见大型底栖动物类群的相对密度和相对生物量

Fig. 2 Relative abundance and biomass of the five common groups in the five river systems

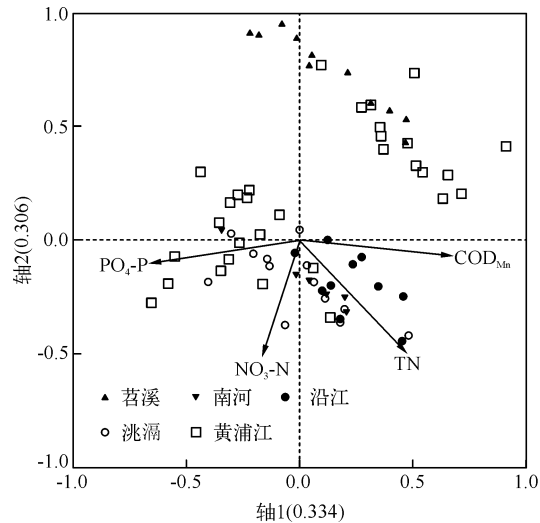


图3 各水系底栖动物 CCA 排序图

Fig. 3 CCA ordination of macrozoobenthos assemblages in the five river systems

2.6 水质生物学评价

BPI 和 $Wright$ 评价结果表明五水系处在轻污染及以上的状态(表7).总体而言,太湖流域主要河流污染均较为严重,沿江水系污染最为严重,苕溪水系水质最好.两种方法显示沿江水系重污染程度点位分别达到 50% 和 40%.根据 $Wright$ 的标准,苕溪水系处在无污染或轻微污染的状态,南河和洮涌则有不到 30% 的采样点处在中污染程度以上.黄浦江水系更多的是处在轻微污染至中污染状态.与 $Wright$ 指数评价结果相比, BPI 的评价结果略严重,在苕溪水系表现最为明显. BPI 评价结果显示苕溪水系整体处在中污染状态,而

Wright 指数评价结果表明该水系处在轻微污染状态.

表 6 SIMPER 结果分析
Tab. 6 Results of SIMPER analysis

物种	贡献率 (%)	各水系密度百分比 (%)				
		苕溪	南河	洮滂	黄浦江	沿江
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	48.35	34.86	90.66	94.71	45.40	95.56
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	5.05	0	1.21	0.98	5.47	0.79
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	3.06	3.33	0.20	0.31	3.68	2.14
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	2.85	2.79	0.68	2.15	1.22	0.05
钩虾属一种 <i>Gammarus</i> sp.	2.27	0.36	1.42	0.91	3.39	0.06
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	2.26	0	0	0.35	9.80	0.18
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	2.11	0	0.46	1.25	0.73	0.31
小摇蚊属一种 <i>Microchironomus</i> sp.	1.61	0	0.32	0.02	12.53	0
摇蚊亚科一种 <i>Chironominae</i> sp.	1.28	10.72	0	0	0.04	0
侧叶雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes lobiferus</i>	1.25	0	0.63	0.18	0.38	0.11
中国长足摇蚊 <i>Tanytus chinensis</i>	1.18	0	0.12	0.84	1.93	0
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	1.16	0	0	0.02	3.16	0

表 7 BPI 生物学指数和 Wright 评价各水系水质状况*
Tab. 7 Bioassessment of water quality for the five river systems using BPI and Wright indexes

水系	BPI 指数					Wright 指数			
	清洁	轻污染	β -中污染	α -中污染	重污染	无	轻微	中	重
苕溪			5(38.46)	8(61.54)		8(61.54)	5(38.46)		
南河			2(33.33)	4(66.67)		4(66.67)	1(16.66)		1(16.67)
洮滂			4(33.33)	5(41.67)	3(25)	2(16.67)	7(58.33)	1(8.33)	2(16.67)
黄浦江		1(3.12)	12(37.50)	18(56.26)	1(3.12)	9(28.12)	19(59.38)	3(9.38)	1(3.12)
沿江		1(10.00)	3(30.00)	1(10.00)	5(50.00)	1(10.00)	2(20.00)	3(30.00)	4(40.00)

* 表中括号内值为该水质状况在该水系所占百分比.

3 讨论

3.1 不同水系底栖动物群落及与环境因子的关系

本次调查表明太湖流域主要河流底栖动物群落较为简单,多样性较低.在调查中,许多采样点仅能采集到少数几个种类,且多为寡毛类和摇蚊幼虫.密度分析表明寡毛类在各水系均处于优势地位,其优势种主要为颤蚓科的种类,众多研究表明颤蚓类能适应污染较严重和氧含量较低的环境^[16-18],而这种环境下耐污能力较差的水生昆虫和双壳类所占比重较低.

各水系间密度与生物量差异较大,密度变化范围为 254.12 - 21648.80 ind./m²,生物量则为 1.15 - 250.78 g/m².苕溪的密度和生物量都为最低,分别占密度和生物量最高的沿江水系的 1.47% 和 0.46%.

五水系中霍甫水丝蚓均处在优势地位,霍甫水丝蚓在南河、洮滂和黄浦江水系中都至少占总密度的 90%.铜锈环棱螺在南河、洮滂、黄浦江以及沿江水系均为优势种,并且都仅次于霍甫水丝蚓. ANOSIM 检验发现五个水系在群落组成上存在显著差异, SIMPER 分析找出的对各水系底栖群落造成差异贡献率最大的 9 个物种,通过非参数检验发现,其在五水系中的密度存在显著差异,验证了 SIMPER 分析的结果.

CCA 分析得出四个环境因子(COD_{Mn}、TN、NO₃-N 和 PO₄-P)与五个水系底栖动物群落显著相关,这四个因子主要反映了水体的污染水平和营养状态.很多研究结果表明水质状况与底栖群落结构显著相关.吴东浩研究发现氨氮是影响西苕溪底栖动物分布的关键环境因子^[18].龚志军在研究东湖中发现随着营养状态的增加,底栖动物多样性逐渐降低,而寡毛类和摇蚊幼虫的数量呈增加的趋势^[19].我们在调查太湖梅梁湾时也发现,从营养状态较低的湖心至污染严重的河流入湖口,颤蚓类数量呈现不断增加的趋势,其在河口密度可超过 20000 ind./m².本研究中各水系水质差异较大,主要表现为水质理化指标差异较大.水质的差异直接或间接影响底栖动物群落结构,包括影响底层氧含量、有机质含量等.氧含量往往直接决定底栖动物的分布和密度,而过量外源营养输入往往导致沉积物中有机质含量升高,进而导致氧含量较低.而在 CCA 分析中,水中 DO 并没有与底栖群落显著相关,这主要是因为 DO 测的是一个瞬时值,而并不能反映长时间的状况,相反 COD_{Mn} 和 TN 等因子更能代表水体的污染水平和营养状态,因而在 CCA 分析中其与底栖群落相关性更好.值得注意的是,CCA 分析中四个环境因子对底栖群落变异的解释率较低,前二轴共解释了 12.2%.这说明还有其它环境因素影响底栖群落结构,如生境的异质性,在调查中发现许多河道到两岸均为水泥和石头堤坝,同自然堤岸相比显著降低了生境的复杂性,并限制了水生植物的生长.河道水流的速度也会影响底栖动物的种类组成,流速较慢的河道更有利于有机质的沉积,不利于沉积物表层的复氧,相对而言较快的流速可能更有助于提高水底的氧含量,从而可供更多的个体共存.此外堤岸坡度、稳定性、底质的组成都可能影响底栖动物的组成,因此在今后的研究中应对底栖动物栖境条件进行量化,以分析其与底栖群落之间的关系.

3.2 水质评价

本文选用 *BPI* 和 *Wright* 两种标准来评价太湖流域水质状况,两种评价方法侧重点不同,造成评价结果的差异.*BPI* 综合考虑了底栖动物的多个类群,包括寡毛类、水蛭、摇蚊幼虫、多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外的水生昆虫以及软体动物;而 *Wright* 在评价时则只考虑了耐污的寡毛类密度.此外,国内底栖动物水质生物评价研究仍有待发展,特别是建立适合我国底栖动物水质生物评价标准的研究.但这两种评价方法均在一定程度从底栖动物层面上反映了水体的水质状况.

评价结果表明,太湖流域整体处在中污染水平.苕溪水系污染程度最轻,水质最好.评价结果与各水系的密度和生物量在一定程度上表现出一致性,苕溪水系的密度和生物量最低,水质最好;而沿江水系密度和生物量均为最高,水质污染状况最为严重;其它三水系的密度、生物量以及污染状况均处在中间状态.从类群组成上来看,苕溪水系中的水生昆虫占到 37.3%,水生昆虫的有些种类只适宜在清水中生存,耐污能力差^[20].沿江水系水质最差,同样为耐污种的寡毛类和摇蚊幼虫共占其总密度百分比的 98.8%;南河和洮涌水系水质次于苕溪,黄浦江水系由于其采样面积最大,采样点最多,分布范围较广,这使得两种方法在评价水质时,黄浦江水系表现为少数采样点处在无污染或重污染状态,整体处于中污染水平.从化学指标来看,TN、TP 在苕溪水系中最低,在沿江水系中最高;黄浦江和沿江水系的电导率都是其它水系的 2 倍以上.

苕溪水系是太湖上游最大水系,发源于天目山,上游人类干扰较小,但从上游至下游水质逐渐恶化,污染来源包括工农业点源污染和农田等肥料流失、生活污水排放等,主要表现为 N、P 含量上^[21].与苕溪水系一样,南河和洮涌水系,也是入湖水系,这两个水系的入湖水量分别占到总水量的 25% 和 20%,但受人类活动影响较大,如河道周边畜禽养殖业的发展对流域造成的污染.沿江与黄浦江水系所处地区交通便利、资源丰富、人口稠密、工业发达,流域经济高速发展,生活污水和工业废水等污染物的排放对该地区的流域生态系统影响很大^[22].沿江水系由于入江口门全部建闸控制,污染物不能及时排出,在该区域停留时间长,进一步加大了对生态系统健康的危害.

鉴于 *BPI* 和 *Wright* 评价结果与五水系的化学指标以及他人的研究等具有很好的一致性,本文认为这两种方法能很好地反映太湖流域的健康状况,太湖流域水质状况目前整体处在中污染状态.

致谢:季江、邓建明、刘苑、张波、杜应旸、徐徽、刘霞、侍成军、罗行行、朱海军等协助样品采集及预处理,特此感谢!

4 参考文献

- [1] 蔡庆华,吴刚,刘建康.流域生态学:水生态系统多样性研究和保护的一个新途径.科技导报,1997,5:

- 24-26.
- [2] Lindegaard C. The role of zoobenthos in energy flow in two shallow lakes. *Hydrobiologia*, 1994, **275/276**: 313-322.
- [3] Vanni MJ. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**: 341-370.
- [4] 王备新, 杨莲芳. 大型底栖无脊椎动物水质快速生物评价的研究进展. 南京农业大学学报, 2001, **24**(4): 107-111.
- [5] 夏爱军, 陈校辉, 蔡永祥等. 长江江苏段底栖动物群落结构现状及其水质的初步评价. 海洋渔业, 2006, **28**(4): 272-277.
- [6] Beck MW, Hatch LK. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity. *Environmental Reviews*, 2009, **17**: 21-44.
- [7] 谢建军. 太湖上游南溪水系水质生物评价研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [8] 李 强. 西苕溪大型底栖无脊椎动物的空间分布及生物完整性研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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: 784.
- [10] Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK. Food habits of albacore, bluefin tuna and bonito in California waters. *Fish Bulletin*, 1971, **152**: 1-105.
- [11] 韩 洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构. 生态学报, 2004, **24**(3): 531-537.
- [12] Clarke KR. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 1993, **18**: 117-143.
- [13] 周 红, 张志南. 大型多元统计软件 PERIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. 青岛海洋大学学报, 2003, **33**(1): 58-64.
- [14] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004: 157-164.
- [15] 刘建康主编. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [16] Anlauf KJ, Moffitt CM. Models of stream habitat characteristics associated with tubificid populations in an intermountain watershed. *Hydrobiologia*, 2008, **603**(1): 147-158.
- [17] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. 生物多样性, 2010, **18**(1): 50-59.
- [18] 吴东浩, 张 勇, 于海燕等. 影响浙江西苕溪底栖动物分布的关键环境变量指示种的筛选. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 693-699.
- [19] 龚志军, 谢 平, 唐汇涓等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. 水生生物学报, 2001, **25**(3): 210-216.
- [20] 李 强, 杨莲芳, 吴 璟等. 西苕溪 EPT 昆虫群落分布与环境因子的典范对应分析. 生态学报, 2006, **26**(11): 3817-3825.
- [21] 于兴修, 杨桂山, 欧维新. 非点源污染对太湖上游西苕溪流域水环境的影响. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 49-55.
- [22] 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析. 湖泊科学, 2002, **14**(2): 106-110.