2015-02-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.06007 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2015, 21 (1): 96-100

长江江苏段底栖动物群落结构与多样性分析*

李 娣[1,2] 牛志春[2] 王 霞[2] 吕学研[2] 蔡 琨[2] 于红霞[1]**
[1]南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室 南京 210023
[2]江苏省环境监测中心 南京 210036

摘 要 底栖动物是长江水生生态系统的重要组成部分，研究其结构域和多样性对长江水资源开发和保护具有重要意义. 分别于2013年5月和9月对长江干流江苏段17个采样点底栖动物群落结构和生境状况进行调查，并用Shannon-wiener多样性指数对底栖动物多样性进行评价，用聚类法分析采样点底栖动物群落相似性. 结果显示：17个采样点共采集到底栖动物36种，其中南京和常州段底栖动物平均密度较高，其他区域平均密度较低. 多样性分析结果表明，南京和常州段底栖动物多样性较高，优势种为齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）、大鳌蜚属一种（*Grandidierella chaohuensis* sp.）、钩虾属一种（*Gammarus* sp.）、颤蚓属一种（*Tubifex* sp.）和霍甫水丝蚓（*Limnodrilus hoffmeisteri*）；南通段底栖动物多样性最低，优势种为颤蚓属一种（*Tusbifex* sp.）. 聚类分析将17个采样点分为4组，相似性分析检验表明各聚类组底栖动物群落具有显著差异（$P < 0.05$）. 本研究表明，水生植被、流速、底质类型和航道可能是影响底栖动物群落结构重要原因之一. 图2 表2 参33

关键词 长江；江苏；底栖动物群落；多样性；影响因素
CLC Q958.885.11

Distribution and diversity of macrobenthic communities in the Jiangsu Reach of the Yangtze River*

LI Di[1,2], NIU Zhichun[2], WANG Xia[2], LÜ Xueyan[2], CAI Kun[2] & YU Hongxia[1]**
[1]*State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University*, Nanjing 210023, China
[2]*Jiangsu Environmental Monitoring Center*, Nanjing 210036, China

Abstract Macrobenthic communities are an important part of aquatic ecological system in the Yangtze River. Studies on macrobenthic community structure and diversity have important significance for development and protection of water resources in the Yangtze River. In this research, macrobenthic communities and their habitat in the Jiangsu Reach of the Yangtze River were investigated at 17 sites in May and September of 2013. Shannon-wiener diversity index was used to assess the diversity of macrobenthic communities. The results showed that there were 36 species at these 17 sites; the abundance and diversity of macrobenthic community were the highest in the Nanjing Reach and the Changzhou Reach, the lowest in the Nantong Reach of the Yangtze River. *Nephthys* sp., *Grandidierella chaohuensis* sp., *Gammarus* sp., *Tubifex* sp. and *Limnodrilus hoffmeisteri* were the dominant taxa in the Jiangsu Reach of the Yangtze River. Cluster analysis based on species abundance yielded four groups among the 17 sites. One-way analysis of similarity (ANOSIM) suggested significant differences in macrobenthic community structure among the four groups ($P < 0.05$). The results indicated that factors including aquatic plants, water flow velocity, sediment types and channels can influence the distribution and diversity of macrobenthic communities in the Jiangsu Reach of the Yangtze River.

Keywords Yangtze River; Jiangsu; macrobenthic community; diversity; influence

底栖动物是指生活史的全部或大部分时间生活于水体底部的水生动物群，是很好的水环境质量指示生物[1-2]. 早在20世纪初期，国外开始研究底栖动物群落与水质状况的关联[3]；美国、欧盟等发达国家和地区在利用底栖动物进行水质评价方面进行了大量的研究[4-7]. 其中在1978年英国学者Hawkes提出BMWP计分系统（Biological Monitoring Working Party），并得到了广泛的应用；欧盟制定了河流无脊椎动物预测和分类系统（RIVPACS）；澳大利亚发展了河流评价计划（AUSRIVAS）；美国EPA制定了3个与底栖动物有关的快速生物评价条例. 在20世纪80年代初期，我国在利用底栖动物进行相关水质生物学评价方面做了大量的工作，如王备新等建立了我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值评价体系[8]；任淑智利用Shannon种类多样性指数与底栖动物指示生物类群评价水质类别，发现其结果与水化学评价结果相一致[9]；熊金林等研究了湖北梁子湖水系污染程度不同的4个

收稿日期 Received: 2014-06-04 接受日期 Accepted: 2014-08-13
*国家水体污染控制与治理科技重大专项（2012ZX07506-003）资助 Supported by the National Major Special Project on Water Pollution Control of China (2012ZX07506-003)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: yuhx@nju.edu.cn)

湖泊底栖动物群落结构与物种多样性，发现物种多样性与湖泊受污染程度呈负相关[10]. 然而利用多参数方法分析区域内底栖动物群落结构变化与生境间关系的研究甚少[11].

长江是我国第一大河，拥有丰富的水生资源，随着长江流域，尤其是长江下游江苏段经济的发展和人口的增长，水质污染现象日趋严重[12]，水生生物的生存环境质量逐渐下降. 近年来，对长江底栖动物群落结构的研究主要集中在河口地区，如章飞军等发现盐度决定长江口潮下带大型底栖动物群落结构最重要的环境因子[13]，严娟等发现生物量、栖息密度、总氮和总磷等是影响长江口潮间带大型底栖动物次级生产力的主要影响因子[14]. 对长江下游江苏段底栖动物群落结构的研究还鲜见报道. 鉴于此，我们对长江干流江苏段底栖动物群落结构和生境状况进行调查研究，并初步探讨导致长江干流江苏段不同区域内底栖动物群落结构差异性的原因，旨在为长江下游生态资源的保护和管理提供科学依据和技术支持.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

长江干流江苏段沿江所辖的区域包括南京、扬州、镇江、常州、泰州、南通6个市. 该区域作为我国三大经济核心地区之一，随着经济的快速发展，区域环境压力也不断增加. 长江干流江苏段自苏皖交界慈湖河口起，下至苏沪交界浏河口，全长400多km. 在长江干流江苏段主要饮用水源地设置17个采样点（Y1-Y6属于南京段，Y7-Y8属于扬州段，Y9属于镇江段，Y10-Y11属于泰州段，Y12-Y13属于常州段，Y14-Y17属于南通段），进行底栖动物群落和生境状况调查（图1）.

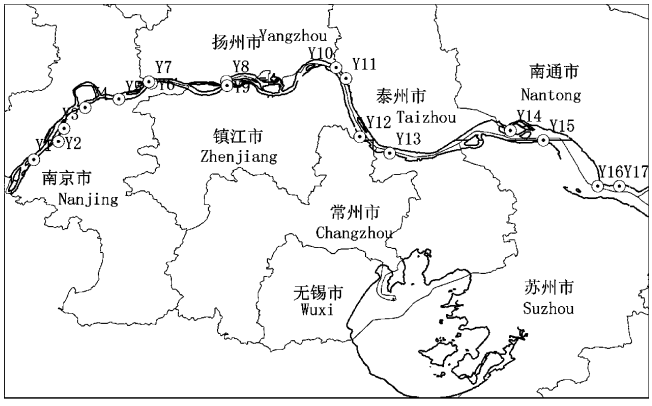


图1 长江干流江苏段底栖动物调查点位.

Fig. 1 Sampling sites in the Jiangsu Reach of the Yangtze River.

1.2 研究方法

分别于2013年5月和9月对长江干流江苏段的17个点位进行底栖动物群落调查，并现场对各采样点生境状况（底质与水生植被等状况）进行简单的定性调查.

1.2.1 **底栖动物样品** 底栖动物定量采集使用1/16 m^2的彼得逊采泥器，每个采样点采集底泥样品3次，并将3次样品混合. 采集的底泥样品经40目的筛网现场分选，然后置于白色解剖盘中挑选出底栖动物样本，并用10%的福尔马林固定，带回实验室. 软体动物肉眼观察，寡毛类与摇蚊类制片用显微镜放大到400倍观察，其他类物种用解剖镜观察；所有物种均鉴定至尽可能低的分类单元[15-17]，并计数.

1.2.2 **底栖动物群落生境状况** 采样现场记录并定性描述采样点生境情况，主要包括底质类型、水生植被状况以及水流等情况.

1.2.3 **数据处理** 用Excel 2010计算底栖动物Shannon-wiener多样性指数[18]，用PRIMER6.0对17个采样点底栖动物密度进行聚类分析，各聚类组群结构的差异性用ANOSIM（One-way analysis of similarities）检验.

Shannon-wiener多样性指数（H'）计算公式：

$$H' = -\sum_{i=1}^{s}\left(\frac{n_i}{n}\right)\log_2\left(\frac{n_i}{n}\right)$$

式中，S为样品中的种类数，n_i为样品中第i种生物的个体数，n为样品中生物总个体数.

2 结 果

2.1 底栖动物物种组成

本次调查共采集鉴定底栖动物36种（表1）. 其中软体动物腹足类4种、双壳类1种，摇蚊类13种，寡毛类9种，其他类9种. 长江干流江苏段主要饮用水源地底栖动物优势种为齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）、霍甫水丝蚓（*Limnodrilus hoffmeisteri*）、颤蚓属一种（*Tubifex* sp.）和大螯蜚属一种（*Grandidierella chaohuensis* sp.）；其中南京段底栖动物优势种为齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）、大螯蜚属一种（*Grandidierella chaohuensis* sp.）和霍甫水丝蚓（*Limnodrilus hoffmeisteri*）；扬州段底栖动物优势种为中华圆田螺（*Cipangopaludina cahayensis*）；镇江段底栖动物优势种为梨形环棱螺（*Bellamya purificata*）；泰州段底栖动物优势种为齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）；常州段底栖动物优势种为颤蚓属一种（*Tubifex* sp.）和钩虾属一种（*Gammarus* sp.）；南通段底栖动物优势种为颤蚓属一种（*Tubifex* sp.）.

2.2 底栖动物群落多参数分析

根据物种密度进行底栖动物群落聚类分析，长江干流江苏段17个采样点相似度在40%水平上有4组（图2）. 根据单边ANOSIM分析4组群落结果间的有显著差异（r = 0.875-1.000，$P < 0.05$）. A组包括6个采样点主要分布在长江干流南京段，底栖动物群落密度相对较高. 多样性指数也相对较高. A组主要物种为齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）和大螯蜚属一种（*Grandidierella chaohuensis* sp.）；B组包括5个测点主要分布在扬州、镇江和泰州段，底栖动物群落密度一般，多样性指数相对较低，主要物种类型为中华圆田螺（*Cipangopaludina cahayensis*）和齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）；C组包括4个采样点，分布在南通段，连通大海，底栖动物群落密度最低，多样性指数最低，主要特征物种属于颤蚓属（*Tubifex* sp.）；D组包括2个采样点，主要分布在常州段采样点，该组底栖动物群落密度最高，多样性指数最高，主要特征物种属于

表1 长江干流江苏段底栖动物名录

Table 1 Macrobenthic animals in the Jiangsu Reach of the Yangtze River

物种 Species	出现频率 Frequency of occurrence (*f*/%)	物种 Species	出现频率 Frequency of occurrence (*f*/%)
软体动物 Mullusca		长跗摇蚊属一种 *Tanyarsus* sp.	8.8
河蚬 *Corbicula fluminea*	5.9	大蚊科 Tipulidae	2.9
方格短沟蜷 *Semisulcospira cancellata*	5.9	前突摇蚊属一种 *Procladius* sp.	2.9
中华圆田螺 *Cipangopaludina cahayensis*	5.9	蠓科 Ceratopogouidae	2.9
中国圆田螺 *Cipangopaludina chinensis*Gray	2.9	苍白摇蚊 *Chinonomus pallidivittatus*	5.9
梨形环棱螺 *Bellamya purificata*	5.9	羽摇蚊 *Chironomus plumosus*	2.9
寡毛类 Oligochaeta		小摇蚊属一种 *Microchironomus* sp.	5.9
前囊管水蚓 *Aulodrilus prothecatus*	2.9	雕翅摇蚊属一种 *Glyptotendipes* sp.	2.9
多毛管水蚓 *Aulodrilus pluriseta*	8.8	弯铗摇蚊 *Cryptotendipes* sp.	2.9
水丝蚓属一种 *Limnodrilus* sp.	2.9	梯形多足摇蚊 *Polypedilum scalaenum*	5.9
克拉泊水丝蚓 *Limnodrilus claparedianus*	8.8	耐垢多足摇蚊 *Polypedilum sordens*	2.9
巨毛水丝蚓 *Limnodrilus grandisetosus*	2.9	**其他类 Others**	
霍蒲水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*	29.4	钩虾属一种 *Gammarus* sp.	11.8
颤蚓属一种 *Tubifex* sp.	23.5	沼虾属一种 *Macrobrachium* sp.	5.9
中华颤蚓 *Tubifex sinicus*	2.9	大螯蜚属一种 *Grandidierella chaohuensis* sp.	23.5
中华河蚓 *Rhyacodrilus sinicus*	11.8	杯尾水虱属一种 *Cythura* sp.	2.9
苏氏尾鳃蚓 *Brcnchiura sowerbyi*	11.8	水蛭 *Whitmaniapigra Whitman*	2.9
摇蚊类 Chironomidae		多毛纲一种 *Polychaeta* sp.	5.9
间摇蚊属一种 *Paratendipes* sp.	2.9	齿吻沙蚕属一种 *Nephthys* sp.	47.1
哈摇蚊属一种 *Harnischia* sp.	2.9	线形虫动物一种 *Aulolaimoides* sp.	8.8

表 2 各组采样点底质与生境状况定性描述

Table 2 Description of substrates and habitats in the sampling groups

生境 Habitat	组A Group A (Y1-Y6)	组B Group B (Y7-Y11)	组C Group C (Y14-Y17)	组D Group D (Y12-Y13)
江水流速 Flow Velocity	缓流 Slow	Y7-Y8缓流，Y9急流，Y10-Y11缓流 Y7-Y8: Slow; Y9: Torrent; Y10-Y11: Slow	急流 Torrent	缓流 Slow
底质 Substrate	淤泥 Mud	Y7-Y8泥砂，Y9细砂，Y10-Y11淤泥 Y7-Y8: Mud-sand; Y9: Siler sand; Y10-Y11: Mud	江砂 Sand	淤泥 Mud
水生植被 Macrophytes	丰富 Diverse	Y7-Y8丰富，Y9-Y10无水草，Y11水草较少 Y7-Y8: Diverse; Y9-Y10: Zero; Y11: Less	无水草 Zero	水草丰富 Diverse

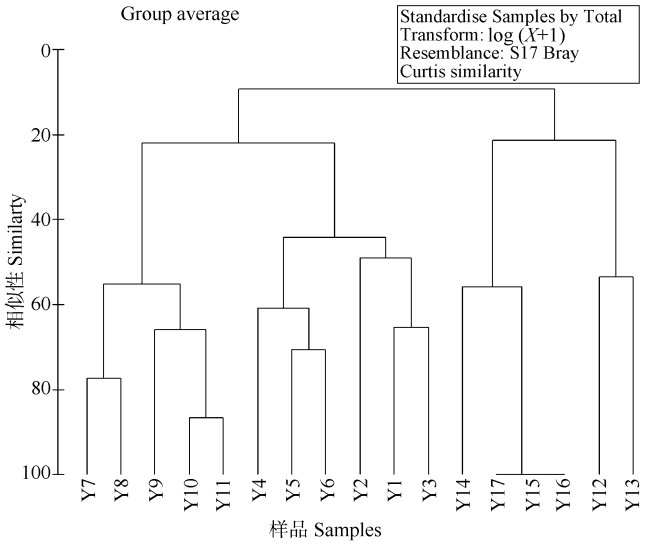


图2 基于17个采样点底栖动物密度的Bray-Curtis相似性系数的聚类分析.

Fig. 2 Dendrogram showing the hierarchical clustering of the 17 sampling sties based on Bray-Curtis similarity coefficients.

颤蚓属（*Tubifex* sp.）、钩虾属（*Gammarus* sp.）、多足摇蚊属（*Polypedilum* sp.）和长跗摇蚊属一种（*Tanyarsus* sp.）.

2.3 底栖动物群落生境状况

根据采样点生境状况现场记录结果分析，4组采样点底质与生境状况定性描述见表2. 另外泰州段Y10测点为货运码头，船舶较多.

3 讨 论

3.1 长江不同河段底栖动物群落特征

不同河段底栖动物群落特征也不相同. 南京段没有发现软体动物，该段沿岸主要工业污染源排放的主要污染物为石油类[19]，有研究表明石油类不利于底栖动物生长[20]，特别是双壳类底栖动物[21]；而大螯蜚属（*Grandidierella chaohuensis* sp.）仅在研究区域内南京段发现，该段上游巢湖流域曾发现大螯蜚属（*Grandidierella chaohuensis* sp.）[22]. 扬州段、镇江段和泰州段，底栖动物密度较低，物种比较单一，尤其是镇江段采样点水流湍急，河流底质不稳定，无法为底栖动物提

供一个良好的生存环境，故其底栖动物物种贫乏，仅平水期发现梨形环棱螺（*Bellamya purificata*）；且镇江段丰水期未采集到底栖动物物种，这与夏爱军的研究结果[23]一致. 常州段位于镇江、泰州下游，多为静水区河床稳定适宜底栖动物生长，底栖动物密度和多样性都较高，且水生昆虫较多. 而长江南通段连通大海，底栖动物物种单一、多样性最低，颤蚓属（*Tubifex* sp.）为绝对优势物种.

3.2 生境状况对底栖动物多样性的影响

长江干流江苏段水生底栖动物多样性为D组＞A组＞B组＞C组. 研究认为生境的复杂性是决定底栖动物多样性的关键因素[24-26]. A组和D组水生植被丰富，能够给底栖动物提供更加多样的栖息、繁殖场所，也有利于底栖动物逃避其他动物的捕食，从而增加了底栖动物生存的空间，使得底栖动物多样性较高[27]；同时A组和D组底栖动物密度相对较高，A组检测出大蠏蚩属（*Grandidierella chaohuensis* sp.）、齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）等较清洁敏感种，D组有钩虾属一种（*Gammarus* sp.）、梯形多足摇蚊（*Polypedilum scalaenum*）和长跗摇蚊属一种（*Tanyarsus* sp.）等较敏感物种[8]，这也与区域内水生植被丰富有着直接关系. 尽管如此，A组和D组组间物种却存在显著差异，A组仅发现3种摇蚊且摇蚊类密度所占比例较低，而D组发现10种摇蚊且摇蚊类总密度所占比例较高，尽管每个摇蚊类物种密度比例不是很高. 同时D组摇蚊类以较耐污物种居多，这可能与D组所在区域内常州段土地开发利用综合生态风险高于A组南京段有关[28]. 这也说明影响底栖动物群落结构及多样性的因素较多，除了水生植被等生境状况[29]，还与水质和底质污染状况有关[30-31].

B组和C组底栖动物多样性和密度相对较低；其中扬州段两个采点无水草分布，该区域内依赖水草生存和庇护的甲壳动物难以生存；镇江段有水草分布，但水流湍急，细砂底质很难附着底栖动物[32]，仅采集到梨形环棱螺（*Bellamya purificata*），早在1990年Thomas研究发现螺类、附生生物与水生植物之间建立了一个互利系统，即“螺–草互利理论”[33]；泰州段Y10采样点为货运码头，来往船只较多，江水搅动无法为底栖动物提供一个良好的生存环境，物种多样性较低；南通段江水较深、水流湍急、底质为硬砂质，不利于底栖动物生长. 因此，长江干流江苏段水生植被、流速、底质类型以及航道可能是影响底栖动物结构与多样性的重要因素，但不是唯一因素.

4 结 论

本研究显示，现阶段长江干流江苏段上游南京段以齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.）和大蠏蚩属（*Grandidierella chaohuensis* sp.）为优势种，底栖动物多样性较高；中游扬州、镇江和泰州段底栖动物优势种为中华圆田螺（*Cipangopaludina cahayensis*）和齿吻沙蚕（*Nephthys* sp.），底栖动物多样性较低；中下游常州段优势种为钩虾属（*Gammarus* sp.）和颤蚓属（*Tubifex* sp.），南通段底栖动物优势种为颤蚓属（*Tubifex* sp.）. 常州段底栖动物多样性最高，下游南通段底栖动物多样性最低.

参考文献 [References]

1 Dauer DM. Biological criteria, environmental health and estuarine macrobenthic community structure [J]. *Mar Pollut Bull*, 1993, **26**: 249-257

2 Chainho P, Costa JL, Chaves ML, Chainho P, Lane MF, Dauer DM, Costa MJ. Seasonal and spatial patterns of distribution of subtidal benthic invertebrate communities in the Mondego River, Portugal-a poikilohaline estuary [J]. *Hydrobiol*, 2006, **555**: 59-74

3 Kolkwitz R, Marsson M. Okologie der pflanzlichen Sprobien. *Berichte Deutschen Botaniscben Gesellschaft*, 1908 (26A): 505-519

4 Growns JE, Chessman BC, Jackson JE, Ross DG. Rapid assessment of Australian rivers using macroinvertebrates: cost and efficiency of 6 methods of sample processing [J]. *J N Am Benthol Soc,* 1997, **16** (3): 682-693

5 Clarke RT, WrightJF, Furse MT. RIVPACS models for predicting the expected macroinvertebrate fauna and assessing the ecological quality of rivers [J]. *Ecol Model*, 2003, **160**: 219-233

6 Hering D, Buffagni A, Moog O, Sandin L, Sommerhäuser M, Stubauer I, Feld C, Johnson R, Pinto P, Skoulikidis N, Verdonschot P, Zahrádková S. The development of a system to assess the ecological quality of streams based on macroinvertebrates design of the sampling programme within the AQEM Project [J]. *Intern Rev Hydrobiol*, 2003, **88** (3): 345-361

7 Hawkes HA. Origin and development of the biological monitoring working party score system [J]. *Water Res*, 1998, **32**: 964-968

8 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值[J]. 生态学报, 2004, **24** (12): 2768-2775 [Wang BX, Yang LF. Astudy on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (12): 2768-2775]

9 任淑智. 京津及邻近地区底栖动物群落特征与水质等级[J]. 生态学报, 1991, **3**: 262-268 [Ren SZ. The characteristics of benthic macroinvertebrate community and water quality in Bejing-Tianjin area. *Acta Ecol Sin*, 1991, **3**: 262-268]

10 熊金林, 梅兴国, 胡传林. 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较[J]. 湖泊科学, 2003, **15** (2): 160-168 [Xiong JL, Mei XG, Hu CL. Comparative study on the community structure and biodiversity of zoobenthos in lakes of different pollution states [J]. *J Lake Sci*, 2003, **15** (2): 160-168]

11 Cai Y, Gong Z, Qin B. Bethicmacroinvertebrate community structure in Laek Taihu, China: effects of trophic, wind-induced disturbance and habitat complexity [J]. *J Great Lakes Res*, 2012, **38**: 39-48

12 全为民, 沈新强. 长江口及邻近水域渔业环境质量的现状及变化趋势研究[J]. 海洋渔业, 2004, **26** (2): 93-98 [Quan WM, Shen XQ. Research on present condition and change tendency of fisheries environmental quality in the Changjiang River estuary and adjacent East China Sea [J]. *Mar Fieher*, 2004, **26** (2): 93-98]

13 章飞军, 童春富, 张衡, 陆健健. 长江口潮下带春季大型底栖动物的群落结构 [J]. 动物学研究, 2007, **28** (1): 47-52 [Zhang FJ, Dong CF, Zhang H, Lu JJ. Community structure of macrobenthic fauna in subtudal areas of the Yangtze River Estuary in spring [J]. *ZoolRes*, 2007, **28** (1): 47-52]

14 严娟, 庄平, 侯俊利, 张涛, 刘鉴毅, 冯广朋, 杨刚. 长江口潮间带大型底栖动物次级生产力及其影响因子[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (6): 935-942 [Yan J, Zang P, Hou XL, Zhang T, Liu JY, Fen GP, Yang G. Secondary production of macrobenthos from intertidal in the Changjiang Estuary and its impact factors [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (6): 935-942]

15 董聿茂, 诸葛阳, 黄美华, 等. 浙江动物志 [M]. 浙江: 浙江科学技术出版社, 1991

16 梁彦龄, 王洪铸. 环节动物寡毛纲小蚓类[M]//尹文英等著. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 90-98, 476-480

17 陈义. 中国动物志: 环节动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1959

18 Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 117

19 吴伟, 翟建宏, 陈家长, 胡庚东, 张瑞涛, 火村英. 长江下游重点江段水质污染及对鱼类的毒性影响[J]. 应用与环境生物学报, 1999, **5** (3): 291-295 [Wu W, Zhai JH, Chen JZ, Hu GD, Zhang RT, Huo CY. Waterpollution and toxicity to fishes in the major areas of the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 1999, **5** (3): 291-295]

20 Lu L. The relationship between soft-bottom macrobenthic communities and environmental variables in Singaporean waters [J]. *Mar Pollut Bul*, 2005, **51**: 1034-1040

21 Hartwick EB, Wu RSS, Parker DB. Effects of a crude oiland an oil dispersant (Corexit 9527) on populations of the littleneck clam (*Protothac astaminea*) [J]. *Mar Environ Res*, 1982, **6**: 291-306

22 侯仲娥, 李枢强. 中国巢湖大螯蜚属一新种[J]. 动物分类学报, 2002, **27** (2): 225-234 [Hou ZE, Li SQ. A new species of the genus *Grandidierella* from lake Chaohu, China [J]. *Acta Zootaxon Sin*, 2002, **27** (2): 225-234]

23 夏爱军, 陈校辉, 蔡永祥, 彭刚, 王明华. 长江江苏段底栖动物群落结构现状及其水质的初步评价[J]. 海洋渔业, 2006, **28** (4): 272-277 [Xia AJ, Chen XH, Cai YX, Peng G, Wang MH. The status of zoobenthos community structure and preliminary evaluation of water quality in the Jiangsu section of the Yangtze River [J]. *Mar Fish*, 2006, **28** (4): 272-277]

24 Tolonen KT, Hämäläinen H, Holopainen IJ, Karjalainen J. Influences of habitat type and environmental variables on littoral macroinvertebrate communities in a large lake system [J]. *Archiv Hydrobiol*, 2001, **152**: 39-67

25 Galuppo N, Maci S, Pinna M, Basset A. Habitat types and distribution of benthic macroinvertebrates in a transitional water ecosystem: Alimini Grande (Puglia, Italy) [J]. *Transit Water Bull*, 2007, **4**: 9-19

26 Shostell JM, Williams BS. Habitat complexity as a determinate of benthic macroinvertebrate community structure in cypress tree reservoirs [J]. *Hydrobiol*, 2007, **575**: 389-399.

27 Magoba RN, Samways MJ. Recovery of benthic macroinvertebrate and adult dragonfly assemblages in response to large scale removal of riparian invasive alien trees [J]. *J Insect Conserv*, 2010, **14** (6): 627-636

28 王锡贞, 吴以中, 宗良纲, 宋雅铎, 石美霞. 长江江苏段沿江地区开发利用生态风险评价[J]. 水电能源科学, 2012, **30** (2): 123-126 [Wang XZ, Wu YZ, Zong LG, Song YD, Shi MX. Development and utilization ecological risk assessment of Jiangsu Part of the Yangtze River [J]. *Water Resour Power*, 2012, **30** (2): 123-126]

29 Cai Y, Gong Z, Qin B. Influences of habitat type and environmental variables on benthic macroinvertebrate communities in a large shallow subtropical lake (Lake Taihu, China) [J]. *Ann Limnol-Int J Lim*, 2011, **47**: 85-95

30 Simboura N, Zenetos N, Panayotidis P, Markra A. Changes of benthic community structure along an environmental pollution gradient. *Mar Pollut Bull*, **30**: 470-474

31 Ryu J, Khim JS, Kang SG, Kang D, Lee C, Koh C. The impact of heavy metal pollution gradients in sediments on benthic macrofauna at population and community levels [J]. *Environ Pollut*, 2011, **159**: 2622-2629

32 段学花. 河流水沙对底栖动物的生态影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2009 [Duan XH. Study on ecological impact of water and sediments on macrobenthic animals [D]. Beijing: University of Tsinghua, 2009]

33 Thomas JD. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components [J]. *Adv Ecol Res*, 1990, **20**: 125-178