

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.015

阳澄湖大型底栖动物群落结构和空间分布特征

刘 唱,刘 凌,张 又,杨艳青,王昊天,邢西刚

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为了解阳澄湖大型底栖动物群落结构现状,于 2014 年 7 月—2015 年 7 月对阳澄湖进行 4 次采样,14 个采样点共采集底栖动物 3 门 7 纲 35 种,平均生物密度和生物量分别为 340 个/m²、180.4 g/m²。其中,主要优势种为铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)、红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)、中国长足摇蚊(*Tanypus chinensis*)和长角涵螺(*Alocinma longicornis*)。基于种群生物密度的聚类分析,14 个采样点被分为 3 组,其生境特征分别对应于敞水区、水生植被区和人类活动频繁区。其中,河蚬主要分布在阳澄湖西湖区的敞水区;红裸须摇蚊、中国长足摇蚊和霍甫水丝蚓主要分布在中湖和东湖中北部的人类活动频繁区;铜锈环棱螺和长角涵螺主要分布在中湖和东湖的南部的水生植被区。各点位的生物多样性显示,敞水区采样点的多样性指数最高,其次是水生植被区和人为活动频繁区。研究结果表明,底质类型、水生植被分布和受污染状况是导致阳澄湖大型底栖动物空间分布差异的主要影响因素。

关键词:大型底栖动物;群落结构;生物多样性;阳澄湖

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)02-0079-09

Community structure and spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake, China

LIU Chang, LIU Ling, ZHANG You, YANG Yanqing, WANG Haotian, XING Xigang
(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to understand the community structure of macrozoobenthos in Yangcheng Lake, we surveyed the macrozoobenthos of Yangcheng Lake four times during the period from July 2014 to July 2015. A total of 35 macroinvertebrate species from three classes and seven phyla were collected at 14 sampling sites. The mean abundance and biomass of macrozoobenthos were 340 ind/m² and 180.4 g/m², respectively. The dominant species of Yangcheng Lake were *Bellamya aeruginosa*, *Corbicula fluminea*, *Prosilocerus akamusi*, *Tanypus chinensis*, and *Alocinma longicornis*. Based on clustering analysis, the 14 sites were divided into three groups. Their habitat features corresponded to open water areas, aquatic vegetation areas, and areas with frequent human activity, respectively. *Corbicula fluminea* was mainly distributed in open water areas in the western part of the lake. *Prosilocerus akamusi*, *Tanypus chinensis*, and *Limnodrilus hoffmeisteri* were mainly distributed in the areas with frequent human activities in the middle of the lake and the north central area of the eastern part of the lake. *Bellamya aeruginosa* and *alocinma longicornis* were mainly distributed in the aquatic vegetation areas in the middle of the lake and the southern area of the eastern part of the lake. The biodiversity was greatest at sites in the open water areas, followed by the aquatic vegetation areas and areas with frequent human activities. The study results show that substrate types, aquatic vegetation, and pollution conditions are the main factors causing the difference in spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake.

Key words: macrozoobenthos; community structure; biodiversity; Yangcheng Lake

基金项目:国家自然科学基金(51279060,41301531)
作者简介:刘唱(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水生态环境保护和修复。E-mail:;burnhamliu@163.com
通信作者:刘凌,教授。E-mail:lingliu_hhu@hhu.edu.cn

大型底栖动物作为淡水生态系统的一个重要组成部分,在许多方面都发挥着重要作用,如加速植物碎屑分解、增强沉积物-水界面的物质交换、促进水体自净等^[1-2],而且其本身也是湖泊生态系统中食物网的重要环节。另外,其生活史相对较长,迁移能力差,且不同的属种对于污染的耐受能力各不相同,因而是良好的环境指示生物^[3]。

阳澄湖地处苏州、吴县、昆山3地交界(31°21'N~31°30'N,120°39'E~120°51'E),水域总面积为119.04 km²。阳澄湖北长约17 km,东西宽约11 km,湖中有2条带状圩埂纵贯南北,将湖体分成东湖、中湖和西湖3个湖区。阳澄湖是苏州和周边地区的主要水源地,也是苏州市区重要的战略备用水源。

过去对阳澄湖的研究主要是水质变化^[4-6]、浮游植物^[7-9]、浮游动物^[10]以及螺类群落的空间分布^[11]等,关于阳澄湖大型底栖动物的调查研究相对较少。本研究根据2014—2015年对阳澄湖为期1年的季度调查,分析了阳澄湖大型底栖动物的类群结构及优势种空间分布特征,并初步探讨导致分布差异的影响因素,以期对阳澄湖生态系统保护和水生态环境的恢复提供基础数据。

1 采样和方法

1.1 采样点布置和样品采集

考虑围网、桥梁和航道等实际情况,在阳澄湖均匀布设14个采样点(图1),其中西湖4个,东湖5个,中湖5个采样点。

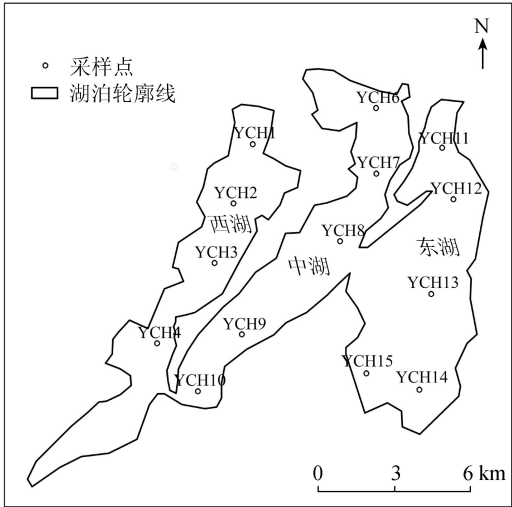


图1 阳澄湖采样点示意图

大型底栖动物采集时间为夏季(2014年7月、2015年7月)、秋季(2014年11月)和春季(2015年5月),共4次采样。采样用1/16 m²改良的Peterson采泥器,每个采样点采集3次合成一个样品,泥样在现场经60目尼龙筛洗净后,剩下的样品

带回实验室分拣。在实验室,将样品置于白瓷盘中,肉眼将动物标本挑出,标本用10%的福尔马林溶液保存。将标本鉴定到尽可能低的分类单元,用滤纸吸取样品表面固定液,然后计数和称重,结果最终折算成生物密度(个/m²)和湿重生物量(g/m²)。

1.2 数据处理

本文采用相对重要性指数(index of relative importance, IRI)来计算底栖动物优势度^[12-13],根据各站点的采样数据,按照下列公式计算:

$$C_{IRI} = (W + N)F \quad (1)$$

式中: C_{IRI} 为相对重要性指数; W 为物种的生物量百分比; N 为物种的生物密度百分比; F 为物种的出现频率。

采用K-优势曲线^[14]来评价湖区各采样点的多样性,同时结合2个多样性指标,Shannon-Wiener指数^[15]和Margalef指数^[16]:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \frac{P_i}{P} \ln \frac{P_i}{P} \quad (2)$$

$$D = \frac{S - 1}{\ln P} \quad (3)$$

式中: H' 为Shannon-Wiener多样性指数值; D 为Margalef指数值; P 为所有种类总个体数; p_i 为第*i*种的个体数; S 为群落内的种类数。

为分析大型底栖动物群落结构受污染的干扰状况及其空间差异性,本文采用丰度/生物量比较(abundance biomass comparison, ABC)曲线^[17]。该方法通过比较物种生物密度和生物量的K-优势曲线,假定未受污染状况下,大型底栖动物群落接近平衡,优势种为大个体K-选择种,这些物种数量少,但是生物量占优,即生物量K-优势曲线位于生物密度上方;相反,当群落受到干扰时,平衡逐渐打破,大的优势种首先死亡,这样对r-选择种更加有利,生物密度的K-优势曲线会逐步超过生物量的曲线,最后位于生物量曲线的上方。为了曲线趋势更加显著,横坐标做对数变换。

各点位的4次采样数据,其平均值用于生物类群和优势种的空间分析、聚类分析、ABC曲线和K-优势曲线的绘制,生物多样性分析使用的则是4次采样多样性指数的平均值。数据整理在Excel (Microsoft 2007)中进行,利用ArcGIS15.0软件绘制底栖动物组成的空间位置分布。在Primer5.0软件中,基于Bray-Curtis相似性系数,对14个采样点的生物密度进行聚类分析(去掉仅出现1次的物种),由于生物密度的数据数量级差异较大,对数据进行对数处理。

2 结果分析

2.1 群落组成

阳澄湖全湖 4 次共采集到大型底栖动物 35 种(表 1),隶属于 3 门 7 纲 11 目,分为 5 个类群:寡毛

纲(Oligochaeta) 3 种,摇蚊幼虫(Chironomidae) 11 种,双壳纲(Bivalvia) 7 种,腹足纲(Gastropoda) 7 种,其他(Others) 7 种。寡毛纲颤蚓科是典型的耐污种,对环境有很好的指示作用,根据本次调查,摇蚊幼虫在阳澄湖也有广泛分布。

表 1 底栖动物名录和相对重要性指数

类群	种	生物密度/ (个 · m ⁻²)	生物量/ (g · m ⁻²)	出现 频率/%	C _{IRI}
寡毛纲	多毛管水蚓(<i>Aulodrilus pluriseta</i>)	0. 2	0. 001	1. 8	<1
	苏氏尾鳃蚓(<i>Branchiura sowerbyi</i>)	5. 1	0. 057	10. 7	16. 5
	霍甫水丝蚓(<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>)	16. 9	0. 027	19. 6	97. 9
摇蚊幼虫	黄色羽摇蚊(<i>Cihronomu fslaviplumus</i>)	2. 6	0. 013	16. 1	12. 5
	隐摇蚊属一种(<i>Cryptochironomus sp. </i>)	3	0. 002	17. 9	15. 7
	叶二叉摇蚊(<i>Dicrotendipus lobifer</i>)	0. 1	0	1. 8	<1
	浅白雕翅摇蚊(<i>Glyptotendipes pallens</i>)	0. 2	0	1. 8	<1
	多巴小摇蚊(<i>Microchironomus tabarui</i>)	3. 3	0. 001	10. 7	10. 3
	软狭小摇蚊(<i>Microchironomus tener</i>)	0. 4	0	5. 4	<1
	红裸须摇蚊(<i>Propiloscerus akamusi</i>)	51. 3	0. 489	53. 6	823. 3
	中国长足摇蚊(<i>Tanypus chinensis</i>)	39. 4	0. 079	35. 7	415. 7
	分离底栖摇蚊(<i>Benthalia dissidens</i>)	0. 7	0	1. 8	<1
	菱跗摇蚊属一种(<i>Clinotanypus sp. </i>)	3. 7	0. 001	17. 9	19. 6
	小云多足摇蚊(<i>Polypedilum nubeculosum</i>)	0. 1	0	1. 8	<1
双壳纲	椭圆背角无齿蚌(<i>Anodonta woodiana elliptica</i>)	0. 1	0. 01	1. 8	<1
	圆背角无齿蚌(<i>Anodonta woodiana pacifica</i>)	0. 2	5. 109	1. 8	5. 1
	中国淡水蚌(<i>Novaculina chinensis</i>)	0. 3	0. 009	3. 6	<1
	河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)	37. 5	91. 888	30. 4	1 881. 0
	淡水壳菜(<i>Limnoperna fortunei</i>)	0. 5	0. 193	3. 6	<1
	圆顶珠蚌(<i>Unio douglasiae</i>)	0. 1	0. 561	1. 8	<1
	背瘤丽蚌(<i>Lamprotula lei</i>)	0. 1	2. 049	1. 8	2. 1
腹足纲	铜锈环棱螺(<i>Bellamy</i> <i>aeruginosa</i>)	131. 9	75. 337	66. 1	5 321. 6
	方格短沟蜷(<i>Semisulcospira cancelata</i>)	3. 7	0. 412	19. 6	25. 8
	光滑狭口螺(<i>Stenothyra glabra</i>)	0. 3	0. 005	3. 6	<1
	大沼螺(<i>Parafossarulus eximius</i>)	3. 6	1. 603	16. 1	31. 2
	长角涵螺(<i>Alocinma longicornis</i>)	17. 9	1. 908	25. 0	158. 3
	纹沼螺(<i>Parafossarulus striatulus</i>)	3	0. 573	10. 7	12. 9
	尖口圆扁螺(<i>Hippeutis cantori</i>)	0. 4	0. 007	1. 8	<1
其他	泽蛭属一种(<i>Helobdella fusca</i>)	3. 9	0. 014	26. 8	30. 8
	宽身舌蛭(<i>Glossiphonia lata</i>)	0. 1	0. 002	1. 8	<1
	扁舌蛭(<i>Glossiphonia complanata</i>)	0. 8	0. 004	7. 1	1. 6
	尖刺缨虫(<i>Potamilla</i>)	0. 5	0	3. 6	<1
	钩虾属一种(<i>Gammarus sp. </i>)	0. 4	0. 001	1. 8	<1
	太湖大鳌蚩(<i>Grandidierella aihuensis</i>)	1. 9	0. 007	5. 4	3. 0
	寡鳃齿吻沙蚕(<i>Nephtys oligobranchia</i>)	6. 1	0. 032	10. 7	19. 3

全湖大型底栖动物的平均生物密度和生物量分别为(340. 2 ± 24. 5) 个/m² 和(180. 4 ± 19. 7) g/m²。各类群中(图 2),平均生物密度最高的是腹足纲(47. 3%), 其次是摇蚊幼虫(30. 8%) 和双壳纲(11. 4%);平均生物量最高的则是双壳纲(55. 3%) 和腹足纲(44. 3%)。

2.2 类群的空间分布及优势种

2.2.1 类群空间分布

阳澄湖大型底栖动物平均生物密度和生物量的空间分布有着很大的差异(图 3),全湖平均生物密度最高的点位是中湖南部的 YCH10(1 412 个/m²),

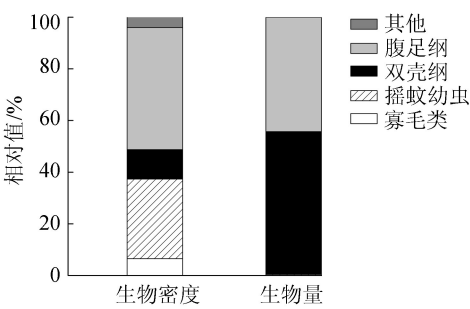
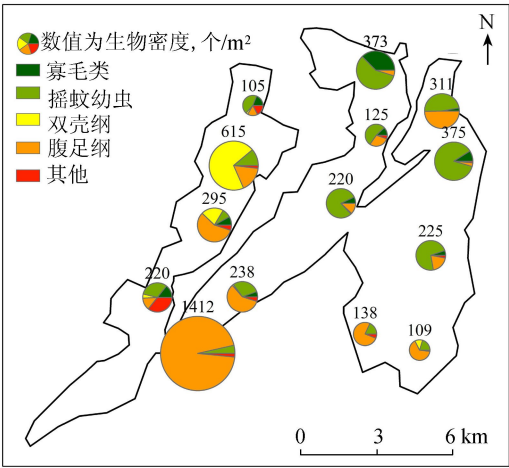


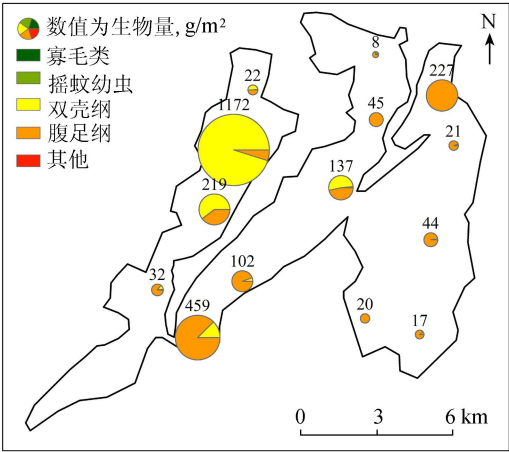
图 2 阳澄湖大型底栖动物类群组成

以铜锈环棱螺(*Bellamy* *aeruginosa*) 为主(85%);平均生物量最高的是西湖中部的 YCH2(1 172 g/m²),

以河蚬 (*Corbicula fluminea*) 为主 (95%)。



(a) 生物密度



(b) 生物量

图3 阳澄湖大型底栖动物平均生物密度和生物量的空间分布和各类群百分比

从生物密度来看(图3(a)),摇蚊幼虫和腹足纲在全湖广泛分布。腹足纲作为全湖的常见类群,主要分布在西湖中部、中湖的南部和东湖的南部。生物密度最高值出现在 YCH10 (1328 个/m²),明显高于其他点位;摇蚊幼虫在全湖均有分布,主要分布区域在中湖中北部和东湖的中北部区域;双壳纲则集中出现在西湖的中部点位,在西湖南部和东湖南部的部分点位有少量分布,最大值出现在 YCH2 点位 (433 个/m²);寡毛纲在生物密度中占比较低 (6%),集中出现在中湖的北部湖湾区,中湖中北部和东湖的中部也有分布,在 YCH6 达到生物密度最大值 138 个/m²。

在生物量方面(图3(b)),西湖中部(YCH1-3)和中湖中部(YCH8)以双壳纲生物量占优,其他采样点都是以腹足纲为生物量的主要部分。总体来看,腹足纲、双壳纲和摇蚊幼虫为现阶段阳澄湖的主要优势类群。

2.2.2 优势种分布

根据相对重要性指数 (IRI) 计算得到的结果排

序如表1所示,阳澄湖前5位的优势种依次是铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*)、河蚬 (*Corbicula fluminea*)、红裸须摇蚊 (*Prosilocerus akamusi*)、中国长足摇蚊 (*Tanypus chinensis*) 和长角涵螺 (*Alocinma longicornis*)。

从空间分布来看,腹足纲的优势种为铜锈环棱螺(图4(a))和长角涵螺(图4(e)),其中,铜锈环棱螺的密度最大值出现在中湖南部的 YCH10 (1203 个/m²),其次分布在东湖北部、中湖南部和西湖中部。双壳纲的优势种为河蚬(图4(b)),其最大值出现在西湖中部 YCH2 (432 个/m²),在西湖其他点位、中湖南部和东湖南部分布较少 (<20 个/m²)。摇蚊幼虫的优势种分别是红裸须摇蚊(图4(c))和中国长足摇蚊(图4(d)),其中,红裸须摇蚊主要分布在中湖和东湖的中北部,最大值出现在中湖北部 YCH6 (164 个/m²),中国长足摇蚊则主要出现在东湖中北部,最大值出现在 YCH13 (220 个/m²)。霍甫水丝蚓(图4(f))的分布情况与红裸须摇蚊相似,最大值出现在中湖北部 YCH6 (131 个/m²)。

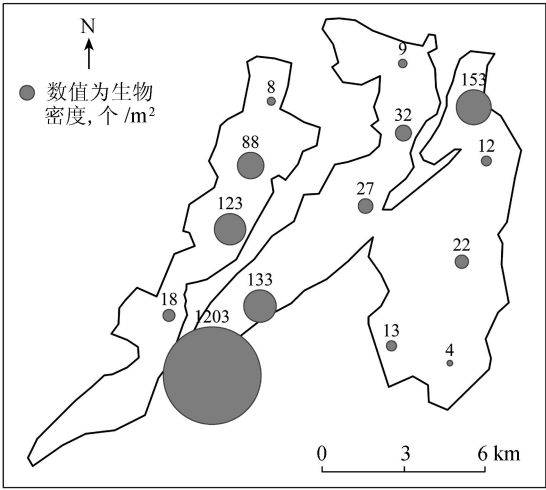
2.3 聚类分析和 ABC 曲线

根据聚类分析的结果(图5),在50%的相似性水平上,14个采样点被分成3组。结合从采样点的空间分布来看,YCH1-4位于西湖区,YCH10位于中湖区最南部,这5个点为A组;YCH14、15是位于东湖区南部的2个采样点,为B组;其余的则是中湖和东湖的中北部区域的点位被分为C组。

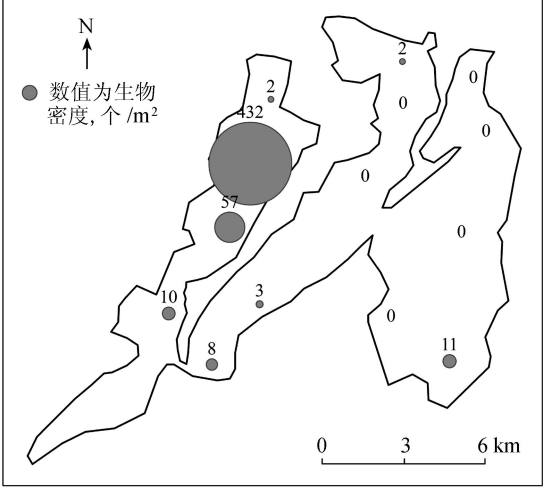
从ABC曲线(图6)的来看,阳澄湖14个采样点中,只有YCH6、8和10点位出现交叉,其余点位都是生物量曲线在生物密度曲线上方。结合优势种的空间分布情况(图4),红裸须摇蚊最大值就出现在YCH6点位,其次是YCH8;而霍甫水丝蚓的最大值也出现在YCH6,这与ABC曲线所反映的情况相一致。但是在YCH10点位,其物种组成由铜锈环棱螺占绝对优势,其次是个体相对较小的长角涵螺和红裸须摇蚊数量占优,大个体的背瘤丽蚌和河蚬生物量占优,最终导致ABC曲线出现交叉。综合来看,YCH6和YCH8点位的水体显示出可能受到污染或有富营养化的趋势。

2.4 生物多样性分析

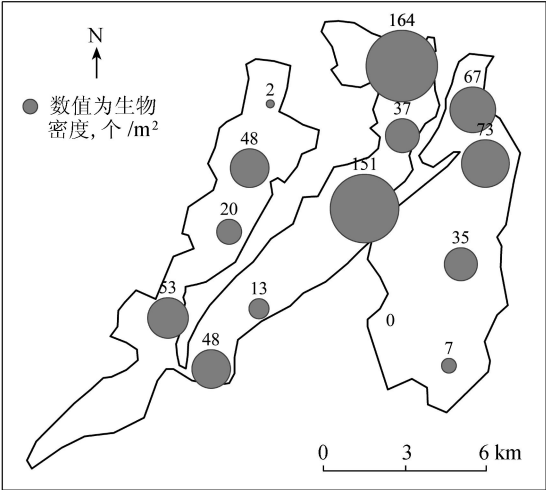
本文采用各采样点的K-优势曲线(图7)和多样性指数(图8)来分析3个分组的生物多样性。在K-优势曲线最上方的2条曲线,依次是A组的YCH10和YCH2点位,从图7可以看到这2个点位都是第一优势种的优势过高(80%和75%),削弱了种的丰富度对多样性的贡献;A组中有2个点位的曲线明显在其他曲线下方,另1个点位的曲线与B



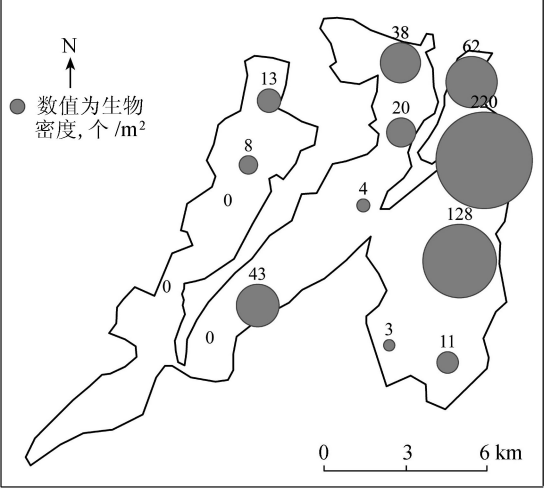
(a) 铜锈环棱螺



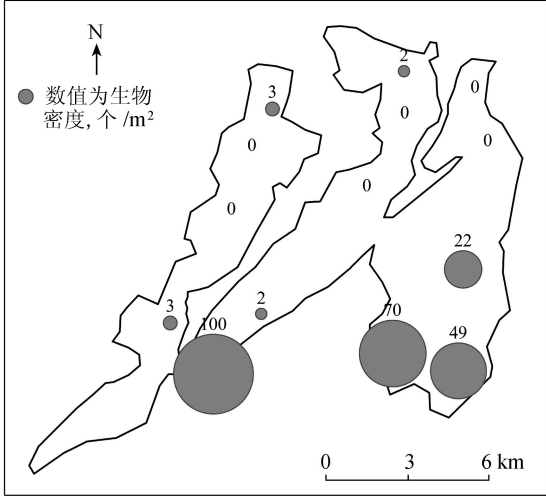
(b) 河蚬



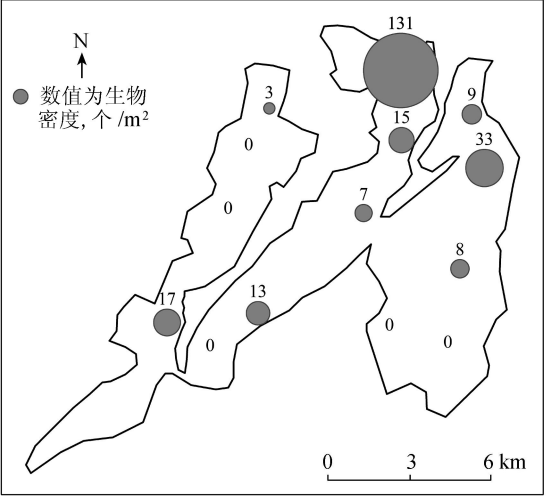
(c) 红裸须摇蚊



(d) 中国长足摇蚊



(e) 长角涵螺



(f) 霍甫水丝蚓

图4 阳澄湖优势种生物密度的空间分布

组的2个点位曲线相近;相比较而言,C组的点位曲线大部分位于其他区曲线的上方,生物多样性较低。各采样点生物多样性指数(图8)的变化也和K-优势曲线的规律相一致。阳澄湖大型底栖动物3组的生物多样性由低到高依次是:C组<B组<A组。

3 讨论

从本次调查的结果来看,阳澄湖大型底栖动物类群结构空间差异显著。过去的许多研究表明,影响底栖动物分布的因素众多^[18],沉积物的组成和性质^[19-20]、大型水生植物^[21]等均会对大型底栖动物的

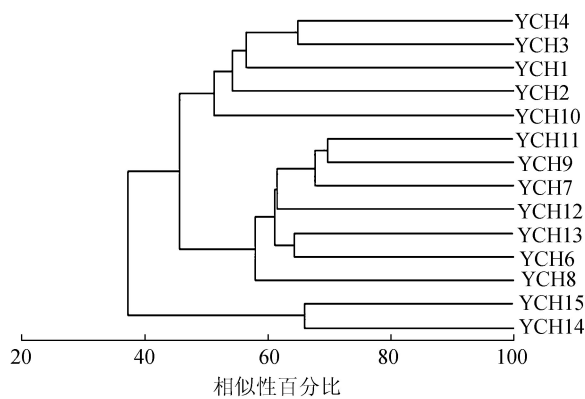


图5 阳澄湖各采样点大型底栖动物生物密度的聚类分析

组中,YCH1-4 点位于西湖区,该区域属于敞水区,水生植被覆盖率低,几条主要的入湖河道也位于该湖区,该湖区原有的围网大部分已经基本拆除。YCH10 点则位于中湖和西湖的通道附近(图1),该点位附近有水生植被分布,2 个湖区的水力连通可能是该点位物种组成与西湖区相似的重要因素。②B 组的 YCH14、15 点位于东湖南部区域,该区域为水生植被区,被大面积的水生植被覆盖,而且位于围网养殖区域的外围,人为活动强度相对较弱。③C 组中,YCH6-9 位于中湖的中北部,YCH11-13 位于东湖的中北部,该区域人类活动频繁。中湖中北

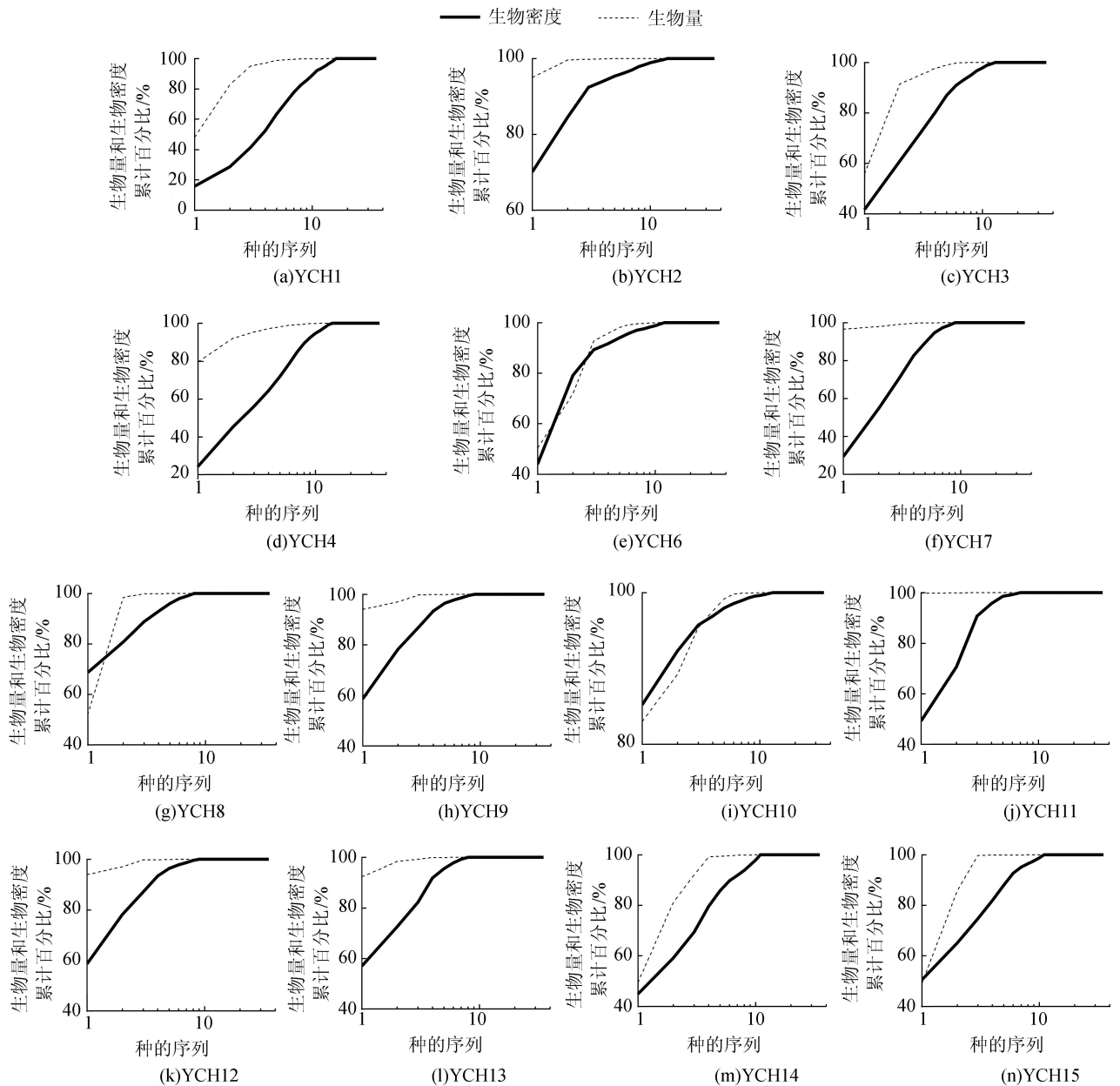


图6 阳澄湖各采样点的 ABC 曲线

空间分布有显著影响。
从各采样点现场调查和水生植被的分布情况来看,聚类分析的 3 组采样点生境特征各不相同:①A

部的点位(YCH7-9)位于阳澄湖中湖的航道上,航道的西侧也是大范围的围网养殖区域;YCH6 和 YCH11-12 位于中湖和东湖的北部,没有水生植被覆

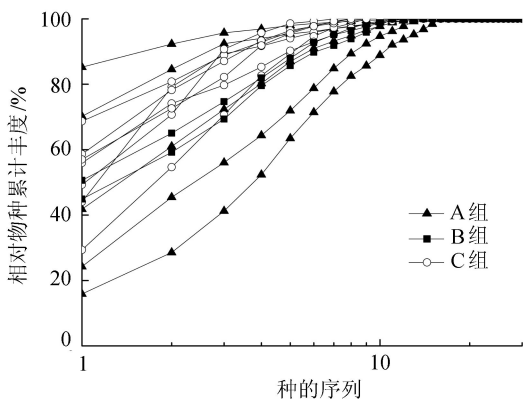


图7 3组采样点大型底栖动物的 K-优势曲线

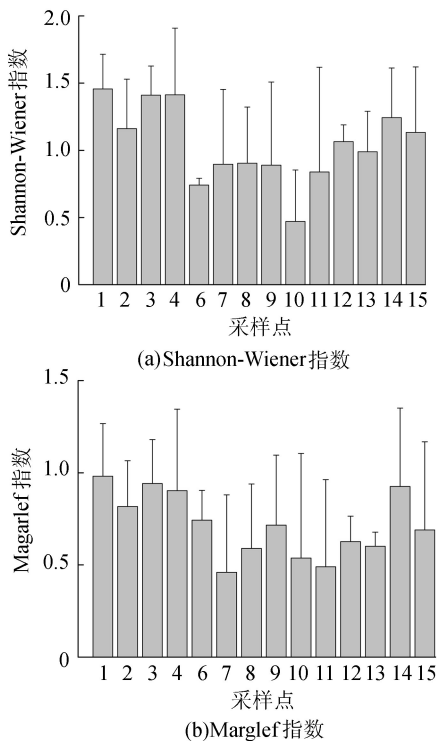


图8 各采样点大型底栖动物的生物多样性指数

盖,沿岸主要是餐馆和码头;YCH13 位于东湖中部为密集的围网养殖区。总体来说,该区域受到人类活动干扰强度较大。

结合大型底栖动物的空间分布和生境特征来看,各聚类组物种构成差异显著。河蚬主要是过滤悬浮碎屑和浮游植物来摄食,属于滤食者。许多研究表明^[22-23],底质类型是影响其分布的主要因素,常见于水草少、污染较小的沙质底质中。本研究中,河蚬主要分布在 A 组的敞水区域,在水生植被区和人类活动频繁区域分布很少。敞水区由于没有水生植被的覆盖,水体透明度为 3 个区域中最低^[11]。从现场采样来看,该区域的沉积物主要是沙质底质,淤泥很少,这样的生境非常有利于河蚬的行动和摄食。

A 组的 YCH10 点和 B 组的 YCH14、15 点均有水生植被覆盖,腹足纲是绝对的优势物种(图 3),比

较螺类(图 4(a)、(e))和水生植被的分布区域,其高值出现在中部和东湖南部的水生植被覆盖区,这也进一步印证了经典的螺-草互利理论^[24-25]。不过,YCH10 与 YCH14、15 的腹足纲物种的组成仍有差异,YCH10 的腹足纲以铜锈环棱螺占优,其次是长角涵螺;而 YCH14、15,其腹足纲主要是长角涵螺和纹沼螺。孙月娟等^[11]对阳澄湖螺类分布的研究也表明,铜锈环棱螺在全湖广泛分布,中湖区密度最高,而长角涵螺和纹沼螺主要分布在透明度较高的东湖区。这与本研究中腹足纲的空间分布也相一致。

C 组的点位受人类活动干扰很大,主要的优势种是红裸须摇蚊、中国长足摇蚊和霍甫水丝蚓(图 4(c)、(d)、(f)),这些物种都属于太湖流域富营养化水体中的常见种^[26-28],习见于营养水平较高的湖泊。该区域的污染源可能主要是以下几个方面:①围网养殖区的饲料过量投放、大闸蟹在底泥-水界面的扰动会对底栖动物和部分水生植物影响显著^[29-31];②北部区域位于莲花岛两侧,岛上有许多餐饮、码头以及观光旅游开发,从而可能加剧入湖的点源污染;③航道区由于船只通航时的波浪影响,会破坏沉积物-水界面的稳定,这些因素都可能会加剧水体的富营养化。结合 ABC 曲线(图 6)的结果来看,该区域的 YCH6、8 采样点可能出现水体的富营养化。

4 结 论

本研究根据 2014—2015 年对阳澄湖大型底栖动物的调查结果,分析了阳澄湖大型底栖动物的类群结构及优势种空间分布特征,并探讨导致分布差异的影响因素。结果表明,阳澄湖大型底栖动物空间分布差异显著,现阶段阳澄湖西湖的敞水区主要以河蚬占优,大型底栖动物的多样性最高;在阳澄湖中湖和东湖南部的水生植被区,腹足纲为主要的优势种;到了阳澄湖中湖和东湖北部的人类活动频繁区,红裸须摇蚊、中国长足摇蚊和霍甫水丝蚓是主要优势种,生物多样性最低。阳澄湖中湖北部和中部水体可能出现水体的富营养化。

参考文献:

[1] COVICH A P, PALMER M A, CROWL T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems[J]. Bioscience, 1999, 49(2):119-127.
 [2] LINDEGAARD C. The role of zoobenthos in energy flow in deep, oligotrophic Lake Thingvallavatn, Iceland [J]. Hydrobiologia, 1992 (243/244):185-195.
 [3] 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[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24 (4): 107-111. (WANG Beixin, YANG Lianfang. Advances in rapid bio-assessment of water quality using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24 (4): 107-111. (in Chinese))
- [4] 桂智凡, 薛滨, 姚书春, 等. 阳澄湖水质现状及原因探讨[J]. 地理科学, 2011, 31 (12): 1487-1492. (GUI Zhifan, XUE Bin, YAO Shuchun, et al. Water quality statue and influencing factors of Yangcheng Lake, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31 (12): 1487-1492. (in Chinese))
- [5] 杨积德, 沈桢, 陈美丹, 等. 阳澄湖水环境综合整治对策研究与分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26 (6): 6-10. (YANG Jide, SHEN Zhen, CHEN Meidan, et al. Research on comprehensive improvement countermeasures of Yangcheng Lake water environment [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26 (6): 6-10. (in Chinese))
- [6] 宋学宏, 邴旭文, 孙丽萍, 等. 阳澄湖网围养殖区水体营养盐的时空变化与水质评价[J]. 水生态学杂志, 2010, 3 (6): 23-29. (SONG Xuehong, BING Xuwen, SUN Liping, et al. The spatial and temporal changes of nutrients of net-pen aquaculture area in Yangcheng Lake and its water quality evaluation [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3 (6): 23-29. (in Chinese))
- [7] 徐恒省, 李继影, 翁建中, 等. 苏州阳澄湖的浮游植物[J]. 环境科学与管理, 2011, 36 (1): 134-138. (XU Hengsheng, LI Jiying, WENG Jianzhong, et al. Phytoplankton from the Yangchenghu Lake in Suzhou [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36 (1): 134-138. (in Chinese))
- [8] 翁建中, 李继影, 徐恒省, 等. 阳澄湖浮游植物研究及其富营养化评价[J]. 环境科学与管理, 2009, 34 (10): 41-44. (WENG Jianzhong, LI Jiying, XU Hengsheng, et al. Studies on phytoplankton of Yangchenghu Lake and its eutrophication evaluation [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34 (10): 41-44. (in Chinese))
- [9] 陈立婧, 吴淑贤, 彭自然, 等. 2008 年苏州阳澄湖浮游藻类群落结构与环境因子的 CCA 分析[J]. 生物学杂志, 2012, 29 (6): 65-69. (CHEN Lijing, WU Shuxian, PENG Ziran, et al. Canonical correspondence analysis between the phytoplankton community structure and environment factors of Yangcheng Lake in 2008 [J]. Journal of Biology, 2012, 29 (6): 65-69. (in Chinese))
- [10] 袁林. 阳澄湖浮游甲壳动物群落结构研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [11] 孙月娟, 王武, 刘其根, 等. 江苏阳澄湖螺类群落的空间分布格局[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20 (6): 711-716. (SUN Yuejuan, WANG Wu, LIU Qigen, et al. Spatial distribution of snail (gastropod) community in Yangcheng Lake, Jiangsu Province, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20 (6): 711-716. (in Chinese))
- [12] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构[J]. 生态学报, 2004, 24 (3): 531-537. (HAN Jie, ZHANG Zhinan, YU Zishan. Macrobenthic community structure in the southern and central Bohai Sea, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (3): 531-537. (in Chinese))
- [13] 张又, 刘凌, 蔡永久, 等. 太湖流域河流及溪流大型底栖动物群落结构及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, 35 (5): 1535-1546. (ZHANG You, LIU Ling, CAI Yongjiu, et al. Benthic macroinvertebrate community structure in rivers and streams of Lake Taihu Basin and environmental determinants [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (5): 1535-1546. (in Chinese))
- [14] WARWICK R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities [J]. Marine Biology, 1986, 92 (4): 557-562.
- [15] SHANNON C E, WEAVER W, WIENER N. The Mathematical Theory of Communication [M]. Upper Saddle River: Addison-Wesley Pub. Co., 1981.
- [16] CLARKE K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure [J]. Austral Ecology, 1993, 18 (1): 117-143.
- [17] LAMBSHEAD P J D, PLATT H M, SHAW K M. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity [J]. Journal of Natural History, 1983, 17 (6): 859-874.
- [18] YSEBAERT T, HERMAN P M J. Spatial and temporal variation in benthic macrofauna and relationships with environmental variables in an estuarine, intertidal soft-sediment environment [J]. Marine Ecology Progress, 2002, 244 (1): 105-124.
- [19] CHAPMAN P M, WANG F. Assessing sediment contamination in estuaries [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2001, 20 (1): 3-22.
- [20] 段学花, 王兆印, 田世民. 河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47 (9): 1553-1556. (DUAN Xuehua, WANG Zhaoyin, TIAN Shimin. Field experiment on the effect of streambed substrate on macroinvertebrate diversity [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47 (9): 1553-1556. (in Chinese))
- [21] 闫云君, 李晓宇, 梁彦龄. 草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较[J]. 湖泊科学, 2005, 17 (2): 176-182. (YAN Yunjun, LI Xiaoyu, LIANG Yanling. A comparative study on community structure of macrozoobenthos between macrophitic and algal lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17 (2): 176-182. (in Chinese))
- [22] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空

- 间分布格局(2006-2007 年)[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 713-719. (CAI Yongjiu, GONG Zhijun, QIN Boqiang. Standing crop and spatial distributional pattern of mollusca in Lake Taihu, 2006-2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(5): 713-719. (in Chinese))
- [23] 蔡炜, 蔡永久, 龚志军, 等. 太湖河蚬时空格局[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 714-722. (CAI Wei, CAI Yongjiu, GONG Zhijun, et al. Temporal and spatial patterns of *Corbicula fluminea* in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(5): 714-722. (in Chinese))
- [24] REAVELL P E. A study of the diets of some British freshwater gastropods[J]. Journal of Conchology, 1980, 30: 253-271.
- [25] THOMAS J D. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components [J]. Advances in Ecological Research, 1990, 20: 125-178.
- [26] 许浩, 蔡永久, 汤祥明, 等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852. (XU Hao, CAI Yongjiu, TANG Xiangming, et al. Community structure of macrozoobenthos and the evaluation of water environment in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 840-852. (in Chinese))
- [27] 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[J]. 生物多样性, 2010, 18(1): 50-59. (CAI Yongjiu, GONG Zhijun, QIN Boqiang. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China [J]. Biodiversity Science, 2010, 18(1): 50-59. (in Chinese))
- [28] 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 811-819. (CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al. Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 811-819. (in Chinese))
- [29] 刘其根, 孔优佳, 陈立侨, 等. 网围养殖对漏湖底栖动物群落组成及物种多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(5): 566-570. (LIU Qigen, KONG Youjia, CHEN Liqiao, et al. Effect of pen aquaculture on community structure and species diversity of zoobenthos in Gehu Lake [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2005, 11(5): 566-570. (in Chinese))
- [30] 于洪贤, 蒋超. 放养河蟹对黑龙江东湖水底栖动物和水生维管束植物的影响[J]. 水生生物学报, 2005, 29(4): 430-434. (YU Hongxian, JIANG Chao. Structure of stocking Chinese Mitten crab on the zoobenthos and aquatic vascular plant in the east lake reservoir, Heilongjiang, China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29(4): 430-434. (in Chinese))
- [31] FLINDERS C A, HORWITZ R J, BELTON T. Relationship of fish and macroinvertebrate communities in the mid-Atlantic uplands; implications for integrated assessments[J]. Ecological Indicators, 2008, 8(5): 588-598.

(收稿日期: 2016-06-30 编辑: 王 芳)

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 石效卷. 全面深化饮用水水源地环境保护[J]. 环境保护, 2009(7): 22-23. (SHI Xiaojuan. Deepen the protection of source drinking water [J]. Environmental Protection, 2009(7): 22-23. (in Chinese))
- [2] 马中, 周芳. 基于环境质量要求的污水排放标准和水价标准亟待建立[J]. 环境保护, 2013, 41(6): 42-44. (MA Zhong, ZHOU Fang. Establish the effluent standards and the price standards based on environmental quality [J]. Environmental Protection, 2013, 41(6): 42-44. (in Chinese))
- [3] 崔裕敏, 楚蓓, 黄辉, 等. 二次供水及市政直供水细菌学调查分析[J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(2): 109. (CUI Yumin, CHU Bei, HUANG Hui, et al. The investigation and analysis of bacteriology in secondary water supply and municipal water supply [J]. Journal of Environment and Health, 2004, 21(2): 109. (in Chinese))
- [4] U S EPA. Overview of the safe drinking water act [EB/OL] [2015-07-15]. <https://www.epa.gov/sdwa/overview-safe-drinking-water-act>.
- [5] U S EPA. Water: consumer confidence report rule, consumer confidence reports (CCR) [EB/OL] [2015-07-15]. <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/ccr/index.cfm>.
- [6] U S EPA. Consumer confidence reports (CCR), resources and information about CCR for Consumers [EB/OL] [2015-07-15]. <http://www.epa.gov/ccr/resources-and-information-about-ccr-consumers>.
- [7] U S EPA. Public notification rule, basic information [EB/OL] [2015-09-15]. <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/publicnotification/basicinformation.cfm>.
- [8] U S EPA. Drinking water requirements for states and public water systems, public notification rule [EB/OL] [2015-09-15]. <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/publicnotification/basicinformation.cfm>.

(收稿日期: 2016-05-12 编辑: 王 芳)