

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.024

# 海河干流健康评估体系研究

罗 莎, 张 凯, 李 强

(天津市水利科学研究院, 天津 300061)

**摘要:** 针对海河穿过天津中心城区、原有入境水量大幅减少的特点, 以水利部河流健康评估技术导则为基础, 调整了 5 个准则层的部分评估指标及赋分权重, 构建了一套海河干流健康评估体系, 并依此评估出海河干流 2013 年的健康指数得分为 47.9 分, 为“亚健康状态”, 比直接按水利部标准评出的结论“不健康状态”提高了一个等级。

**关键词:** 河湖健康评估; 海河干流; 指标体系

**中图分类号:** TV213.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-6933(2016)04-0142-05

## Study of health assessment system for main stream of Haihe River

LUO Sha, ZHANG Kai, LI Qiang

(Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

**Abstract:** The original inbound water quantity of the Haihe River, which flows across the central urban area of Tianjin City, has decreased remarkably. In view of this, we adjusted some of the assessment indicators and scoring weights of five criterion layers based on the Rivers' Health Assessment Guide published by the Ministry of Water Resources of China, and built a health assessment system for the main stream of the Haihe River. According to the assessment, we obtained the following results: the score of the health indicator for the main stream of the Haihe River in 2013 was 47.9, indicating that the river had a sub-healthy status, which was one grade superior to an unhealthy status as assessed by the standards established by the Ministry of Water Resources of China.

**Key words:** health assessment of rivers and lakes; main stream of Haihe River; indicator system

20 世纪 90 年代以来, 为了解河湖的生态状况, 弄清河湖健康出现问题的原因, 掌握其变化规律, 提高流域综合管理水平, 西方国家采用“河湖健康评价”作为流域综合管理的技术手段<sup>[1]</sup>。针对我国各地河湖健康面临的诸多问题和严峻形势, 水利部于 2010 年底开始进行了河湖健康评估工作, 确定了天津市的海河干流为河湖健康评估的试点之一。

海河干流流经天津市中心城区, 是天津的母亲河。自 1963 年特大洪水之后, 海河流域大规模兴建水利工程, 海河干流原有入境水量大幅减少, 河流的水文特性、河床状况等均发生重大改变, 加之社会的快速发展, 目前海河干流存在着水资源短缺、水污染严重等问题, 亟须对海河干流的健康状况做出客观科学的评价。

笔者以水利部河湖健康评估技术导则为基础, 结合海河的实际情况, 构建一套海河干流健康评估体系, 并以 2013 年为评估基准年, 对海河干流健康进行评估。

### 1 水利部河流健康评估体系

水利部河湖健康评估工作技术工作组对河湖健康评估的定义是指就河湖系统完整性(水文完整性和物理结构完整性)、化学完整性、生物完整性和服务功能完整性以及它们的相互协调性进行评价<sup>[2-3]</sup>。根据河流和湖库的不同特点, 水利部分别制定了《河流健康评估指标、方法和标准》(试点工作用)(1.0 版)<sup>[2]</sup>(以下简称《河流标准》)和《湖泊健康评估指标、方法和标准》(试点工作用(1.0 版))<sup>[3]</sup>(以

基金项目: 天津市水务局项目(津水保[2012]36 号); 中法水资源与水务管理合作项目(2013DFA71340)

作者简介: 罗莎(1976—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水环境研究。E-mail: ls@tjhri.com

下简称《湖泊标准》)。

水利部河湖健康评估指标体系自下而上为指标层、准则层和目标层3级。评估采用分级指标评分法,自下而上,逐级加权计算各层得分,最终得到河湖的健康等级。

准则层包括水文水资源(HD)、物理结构(PF)、水质(WQ)、生物(AL)和社会服务功能(SS)等5个层面;每个准则层对应不同的评估指标,包括必选指标和流域自选指标。目标层指河流与湖库的总体健康水平,分为理想状况、健康、亚健康、不健康、病态5个等级,河湖健康等级、类型、颜色代码如下表1。

表1 河湖健康评估分级

等级	类型	颜色	赋分范围	说明
1	理想状况	蓝	80~100	接近参考状况或预期目标
2	健康	绿	60~80	与参考状况或预期目标有较小差异
3	亚健康	黄	40~60	与参考状况或预期目标有中度差异
4	不健康	橙	20~40	与参考状况或预期目标有较大差异
5	病态	红	0~20	与参考状况或预期目标有显著差异

## 2 海河干流概况及存在的问题

海河是天津的母亲河,横穿天津市区,为典型的北方城市河流,干流西起红桥区的子北汇流口,东流经市区、近郊区及滨海地区,北岸东丽区,南岸津南区,贯穿滨海新区塘沽镇,于大沽口入渤海,全长73.45 km,流域面积2 066 km<sup>2</sup>,是一条以行洪为主,兼顾排涝、蓄水供水、航运、旅游等多功能的河道。

海河素有“九河下梢”之称,历史上水灾频发。海河干流原是海河水系漳卫河、子牙河、大清河及永定河、北运河的入海尾间河道,1949年中华人民共和国成立以后经历多次治理,下游新辟了入海通道,大部分洪水通过新辟的子牙新河、独流减河、永定新河分泄入海。海河干流主要承泄大清河和永定河部分洪水,设计行洪能力800 m<sup>3</sup>/s<sup>[4]</sup>。为实现“清浊分流”、“咸淡分家”之目标,1958年在海河入海口修建了防潮闸,1985年又在津南东泥沽附近建了二道闸。为防止海水倒灌和淡水资源流失,目前两闸的运行模式是:日常多处于闭闸状态,只在汛期和换水期间开启。由于上游来水减少,目前海河干流及与之相连的二级河道的生态用水主要靠汛期蓄水和引滦调水。

2003年启动的海河两岸综合开发堤岸改造工程极大地促进了天津城市旅游业的发展,海河的景观娱乐功能逐渐加强;同时,由于上游水利工程的拦截及近年来流域内降水量的减少,海河原来的行洪防潮功能有所弱化。

由于水资源紧缺、水体置换频次低,加上海河沿岸的生活污水、工业废水、汛期雨污水以及二级河道的排涝水直接或经过泵站、闸涵排入海河,造成海河

水体污染和富营养化。尽管近几年先后开展了河道清淤、污水处理厂建设和以截污为主的“清水工程”,但海河的水环境问题依然严峻,特别是夏天,海河干流多次发生了较大规模的蓝藻水华<sup>[5]</sup>,引起了政府和市民的高度关注。

## 3 海河健康评估体系构建

开展河湖健康评估的目的是要了解河湖的生态状况,识别河湖所承受的压力和影响,寻求自然、人为压力与河湖系统健康变化之间的关系,探求河湖健康受损的原因,进而指导人类在河湖框架下的河流开发和管理活动。海河属于人类活动强烈干预的河道,已有水利工程和沿岸开发建设的影响在较长一段时期内不会消失,目前能做到的就是在现有条件下进行海河优化开发和保护,完善海河基本功能及生态体系。以水利部《河流标准》为基础,从评价指标的必要性、适用性、便捷性以及赋分合理性等方面考虑,适当弱化一些不可恢复的因素,强调可恢复的特性,调整部分评估指标和权重,增加反映海河湖泊特征的评估指标,旨在构建一套适合海河的健康评估体系与评估方案,以便快速、量化地定位突出存在的问题。

### 3.1 海河水文水资源准则层评估指标与权重调整

《河流标准》中水文水资源准则层的评估指标有两个:流量过程变异程度、生态流量保障程度。受水资源高度开发的影响,海河的现状流量显著低于历史天然径流量,流量变异程度很高,与20世纪50年代的天然状态截然不同,造成在做水文还原时,存在着历史水文资料少,还原精度差的问题。经过初步试算,按照《河流标准》给海河打分,水文水资源准则层这1项为0。

实际上,海河,尤其是二道闸以上区域,为了景观娱乐需求,通过引滦调水,水深常年维持在适宜通航的高度,从这个意义上说,海河已不是传统意义的河流。尽管河流有水,但这个过程不是天然的,无法把流域的水量变化、历史流量与当前水量变化建立起必然的对应关系,若完全依据《河流标准》对海河进行健康赋分,可能过于苛刻。因此,引入“水深变化程度( $W_D$ )”作为海河水文水资源准则层评估的判断标准, $W_D$ 的计算按公式(1)进行。

$$W_D = \left[ \sum_{m=1}^{12} \left( \frac{d_m - \bar{D}_m}{\bar{D}_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $d_m$ 为评估断面月最大水深; $\bar{D}_m$ 为历年逐月平均最大水深; $m$ 为评估年月份。其中最大水深平均 $D_m$ 采用最近一次大规模工程治理后的历年逐月数

据的平均值。

该方法不用再做水文历史数据还原,重在考察现状条件下河道中水量满足各项功能的保障程度。

### 3.2 海河物理结构准则层评估指标及权重调整

《河流标准》中物理结构准则层包括“天然湿地保留率”、“河流连通阻隔状况”和“河岸带状况”3个指标。

由于场区内没有与海河有直接水力联系,且属于国家、地方湿地名录的天然湿地,因此“天然湿地保留率”予以剔除。

“河流连通阻隔状况”这一指标目的是评判河道中鱼类迁徙和营养盐传递之间的连通性。受二道闸和海河闸的影响,该指标按《河流标准》赋分为0。考虑到一定时期内闸坝将继续存在,河流的连通性无法恢复,该指标对于修复海河水生态没有太大的指导意义,因此给予取消。

《河流标准》中把“河岸带状况”分为了“岸坡稳定性”、“河岸植被覆盖率”和“河岸人工干扰程度”等3项,权重分别为0.25,0.5和0.25。对于海河以及天津其他城市河道而言,“河岸带状况”对河道水质、生态甚至水量的影响很大,应当作为评估的重点。从实际情况来看,“岸坡稳定性”涉及防洪,给予保留。“河岸植被覆盖率”在海河等城市河道或者在深槽两侧构建了防洪堤的河道上并不十分适用,所以将其弱化,降低权重为0.2。对于“河岸人工干预程度”,考虑到天津地区河道的主要污染都是来自各类排水口,包括城市的雨水、企业的污水和农业灌排渠道的退水等,因此增加了“排水口”一项,且将“排水口”和“垃圾填埋场或垃圾堆放”等分值处理。考虑到人工干扰对河岸带影响很大,也是今后治理的重点,故将其权重提高到0.6。

### 3.3 水质准则层评估指标及权重调整

《河流标准》中水质准则层有“低温影响”、“溶解氧状况”、“耗氧有机污染状况”、“重金属污染状况”等4个指标。由于海河上没有大型水利水电工程,不存在低温影响问题,所以对水温变异状况指标不予考虑。另外,由于海河水体流动性差,富营养化及引起的蓝藻暴发问题突出,因此,将《湖泊标准》水质准则层中的“富营养状况”<sup>[3]</sup>指标增加到海河水质准则层的评估中。

最终,海河健康评估水质准则层指标包括“溶解氧状况”、“耗氧有机污染状况”、“重金属污染状况”、“富营养状况”等4个指标,每个指标对应的具体水质项目赋分计算分别遵从上述《河流标准》及《湖泊标准》,水质准则层的最终赋分采用了最小赋分原则。

### 3.4 生物准则层评估指标及权重调整

《河流标准》中生物准则层包括“大型无脊椎动物(底栖动物)生物完整性指数”和“鱼类生物损失指数”2个指标。鉴于海河已表现出一定的富营养化,仅用这两个河流指标不足以完全反映海河的生物健康状况,故将《湖泊标准》生物准则层中的“浮游植物数量(藻密度)”和“浮游动物生物损失指数”2个指标增加到海河健康评估中。

此外,《河流标准》中的底栖动物完整性指数(Benthic index of biological integrative, B-IBI)尽管是目前应用最广泛的生物完整性指数之一,但是该指标也具有其自身的局限性。底栖动物完整性指数(B-IBI)用于未受或受人类活动干扰极小,且生物多样性高的流域评价时效果较好,而用于评价完全暴露在人为干扰的流域时,其参照样点的选择则会出现一定的偏差。此外,Griffith等<sup>[6]</sup>认为底栖动物完整性指数(B-IBI)对农业污染敏感、对可溶性重金属和沉积物中的重金属敏感性比较低,甚至不敏感。事实上,对海河而言,筛选无干扰或干扰较小的参考系十分困难,因此选用“底栖生物综合污染指数BI”来替代B-IBI进行评价<sup>[7-8]</sup>,即通过Trent生物指数、Goodnight修正指数(GBI)、Shannon-wiener多样性生物指数(H')、Margalef丰富度指数(d)、生物学污染指数(BPI)、科级生物指数(FBI)等6个指标进行模糊集合标准化处理,整合出最终的海河综合生物污染指数BI。

在权重方面,生物准则层各指标采取了同等权重赋分原则,即“浮游植物数量”、“浮游动物生物损失指数”、“鱼类结构完整性”和“底栖生物综合生物污染指数”4个指标各占0.25的赋分权重。

### 3.5 社会服务准则层评估指标及权重调整

《河流标准》在社会服务功能指标里给出了“水功能区达标指标”、“水资源开发利用指标”、“防洪指标”和“公众满意度指标”4项。

“水资源开发利用指标”指的是流域的水资源开发利用度,由于海河的水资源主要靠外调水和汛期蓄水,与流域的水资源开发利用程度无法建立直接的关系,这一点与对水文水资源准则层的观点一致。因此,笔者认为不能用流域的“水资源开发利用指标”来表征海河的社会服务功能,而改用“水量满足度”来替代,以反映水资源量满足社会服务功能的程度。

该准则层的4个指标及最终赋分计算方法同《河流标准》。

### 3.6 海河干流健康评估指标体系

海河干流健康评估指标体系(“海河标准”)见表2。

表 2 海河干流健康评估指标体系

目标层	亚层	亚层权重	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重			
海河健康	生态完整性	0.2	水文水资源	0.2	水深变化程度				
					0.2	物理结构	0.2	河岸带状况	岸坡稳定性 0.2
								河岸植被覆盖率 0.2	
		河岸人工干预程度 0.6							
		0.7	水质	0.2	0.2	溶解氧状况			
						耗氧有机污染状况	指标最小值		
						重金属污染状况			
		0.4	生物	0.4	0.4	富营养状况			
						底栖生物综合污染指数	0.25		
						鱼类生物损失指数	0.25		
						浮游植物数量	0.25		
						浮游动物生物损失指数	0.25		
		0.3	社会服务功能	0.3	0.3	水功能区达标指标	0.25		
						水量满足度	0.25		
						防洪指标	0.25		
公众满意度	0.25								

## 4 海河干流健康评估及结果讨论

### 4.1 评估河段划分

按照《海河流域天津市水功能区划》<sup>[9]</sup>,海河干流划为开发利用区、工业用水区和景观娱乐用水区、饮用水源区、过渡区,其中三岔口—二道闸上日常为工业用水区和景观娱乐用水区,在饮用水输水期间为饮用水源区,二道闸下—海河闸为过渡区。本次评估河段的划分依据《河流标准》中河流纵向分段依据,即将河流水文特征、河床及河滨带形式、经济发展特征相同或相似的河流分为一段。由于二道闸以下河流主要需要满足航运和防洪排沥的功能,对水质要求不高,尽管也贯穿了滨海新区塘沽街,但对天津市的整体影响较小,在评估中有所弱化,仅布设

一个断面(海河闸)作为监测断面。海河二道闸以上的河段蓄存了淡水,并且穿过中心城区、津南区 and 东丽区,不仅是城市景观带的核心区,而且是备用水源地和工业用水水源,意义十分重大,为评价重点,故该段共布设了 4 个评估断面。总体上将海河干流划分为 5 个评估河段,相应布设了 5 个监测断面;三岔口、复兴河口、洪泥河口、二道闸上、海河闸,河段划分及监测断面情况分别见表 3 和图 1。

表 3 海河健康评估河段划分情况

河段序号	河段起止断面	河段长度/km	河段长度占比/%	监测断面
I	三岔口—光华桥	10.2	14	三岔口
II	光华桥—外环河口	8.0	11	复兴河口
III	外环河口—西减河	6.3	9	洪泥口
IV	西减河—二道闸上	9.2	13	二道闸上
V	二道闸下—海河闸	39.75	53	海河闸

### 4.2 评估结果讨论

按“海河标准”对海河干流 2013 年的健康状况进行评估,结果见表 4。海河的最终健康赋分为 47.9 分,为亚健康状态。两个亚层中,生态完整性赋分 39.3 分,介于亚健康和不健康的边缘;而社会服务完整性赋分 68 分,为健康水平。从 5 个准则层的得分情况可以看出,水质准则层得分最低,仅有 2 分,为制约海河生态健康的最主要因素;其次是生物准则层。现状条件下,海河在日常运行和管理中面临的主要压力依次为:水质、生物、物理结构、社会服务和水文水资源。

一般来说,河流的开发利用程度越高,其对社会的的服务功能贡献就越大,而在当前的社会发展模式和背景下,对生态的负面影响往往也相应增大。从某种意义上讲,社会服务对生态完整性具有一定的对冲性,海



图 1 海河干流健康评估河段划分及监测断面分布

表 4 海河干流 2013 年健康评估结果

河段序号	河段起止断面	河段长度/ km	水文水资源		物理结构		水质		生物		生态完整性	
			赋分	权重	赋分	权重	赋分	权重	赋分	权重	赋分	健康状况
I	三岔口—光华桥	10.2	80	0.2	48	0.2	9	0.2	32.6	0.4	40.4	亚健康
II	光华桥—外环河口	8.0	80	0.2	48	0.2	0	0.2	32.6	0.4	38.6	不健康
III	外环河口—西减河	6.3	80	0.2	52	0.2	2	0.2	32.6	0.4	39.8	不健康
IV	西减河—二道闸上	9.2	80	0.2	52	0.2	4	0.2	32.6	0.4	40.2	亚健康
V	二道闸下—海河闸	39.75	80	0.2	49	0.2	0	0.2	32.6	0.4	38.8	不健康
各准则层加权赋分 (按河段长占总河长的比例)		—	80	—	49.4	—	2	—	32.6	—	—	—
河流生态完整性赋分						39.3						不健康
社会服务功能赋分						68						健康
河流健康赋分						47.9						亚健康

注:在河流健康赋分计算中,河流生态完整性与社会服务功能各占 0.7 和 0.3 的权重。

河的生态完整性受社会服务功能影响较为严重。

若完全按照《河流标准》对海河干流 2013 年的健康状况进行评估,得分为 33.0 分,处于不健康状态。与“海河标准”的亚健康状态相比,下降了一个等级。导致海河不健康的因素按得分大小排序,依次为:水文水资源、水质、生物、社会服务和物理结构。这个评估结果客观地反映了海河被人类破坏的程度,明确了海河不健康的最主要原因是水资源的匮乏和水体污染。

将按《河流标准》和按“海河标准”得出的各准则层赋分结果,用雷达图表示,见图 2,可以很直观地看出两者的赋分差异。相对于《河流标准》,按“海河标准”评出的海河健康等级、水文水资源、物理结构、社会服务功能准则层的结论均出现了跨级。最显著的就是水文水资源由《河流标准》的 0 分跃变成“海河标准”的 80 分;社会服务功能得分由 43 分提高到了 68 分。而物理结构则由 62.2 分降为 49.4 分;水质由 13 分降为 9 分,尽管得分都很低,但前者的瓶颈是耗氧有机污染,后者是富营养化。

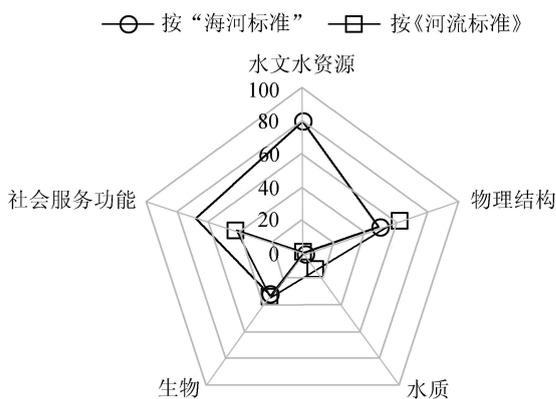


图 2 海河干流 5 个准则层得分雷达图

“海河标准”的评价结果与《河流标准》相比,表面上看,略为乐观。主要是淡化了短期内不可能恢复的水文条件和流域开发程度的负面影响,更加侧重于现实条件下的健康状况。

## 5 结 语

以水利部河流健康评估技术导则为基础,结合海河干流的实际情况,构建了一套健康评估体系,以 2013 年为基准年,开展了海河干流健康评估,得出了海河干流的健康赋分为 47.9 分,为亚健康状态。而直接按照《河流标准》进行评估,得分为 33.0 分,为不健康状态。与按《河流标准》得不健康状态相比,依据本评估体系得出的海河干流健康结论提高了一个等级。

事实上,两个结果都在一定程度上反映了海河的问题,只是现状与《河流标准》描述的理想健康状态相差得更远,意味着按照《河流标准》来修复海河的生态环境,恢复河道的自然功能,所要走的路将更长,任务更艰巨。

## 参考文献:

- [1] 彭文启,谭洪武. 河湖健康评估[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2011.
- [2] 水利部水资源司河湖健康评估全国技术工作组. 河流健康评估指标、方法和标准(试点工作用)(1.0 版)[R]. 北京:水利部水资源司,2010.
- [3] 水利部水资源司河湖健康评估全国技术工作组. 湖泊健康评估指标、方法和标准(试点工作用)(1.0 版)[R]. 北京:水利部水资源司,2010.
- [4] 天津市防汛抗旱指挥部办公室. 天津市行洪河道资料汇编:海河及南部河系[R]. 天津:天津市防汛抗旱指挥部,2011.
- [5] 郭文生,张彤. 海河蓝藻今夏又来[N]. 中国环境报,2013-08-21(05).
- [6] 王备新,杨莲芳,刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价[J]. 生态学杂志,2006,25(6):707-710. (WANG Beixin, YANG Lianfang, LIU Zhengwen. Index of biological integrity and its application in health assessment of aquatic ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006,25(6):707-710. (in Chinese))

(下转第 153 页)

[11] WOSSINK A, SWINTON S M. Jointness in production and farmers' willingness to supply non-marketed ecosystem services [J]. *Ecological Economics*, 2007, 64 (2): 297-304.

[12] Van HECKEN G, Bastiaensen J, VÁSQUEZ W F. The viability of local payments for watershed services: empirical evidence from Matiguas, Nicaragua [J]. *Ecological Economics*, 2012, 74: 169-176.

[13] SCHOMERS S, MATZDORF B. Payments for ecosystem services: a review and comparison of developing and industrialized countries [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 6: 16-30.

[14] KWAYU E J, SALLU S M, PAAVOLA J. Farmer

participation in the equitable payments for watershed services in Morogoro, Tanzania [J]. *Ecosystem Services*, 2014, 7: 1-9.

[15] 齐珊娜, 侯光辉, 张磊. 扩展津冀间水生态补偿模式初探: 以新环境保护法出台为背景 [J]. *城市*, 2015 (2): 62-65. (QI Shanna, HOU Guanghui, ZHANG Lei. Research on the spread of PES style between Tianjin and Hebei: based on the publishment of new environmental law [J]. *City*, 2015 (2): 62-65. (in Chinese))

[16] 张翼飞. 城市内河生态系统服务的意愿价值评估 [D]. 上海: 复旦大学, 2008.

(收稿日期: 2015-10-29 编辑: 徐娟)

(上接第 126 页)

[18] 岳舜琳. 水的浊度问题 [J]. *中国给水排水*, 1995, 11 (4): 33-35. (YUE Shunlin. Water turbidity [J]. *China Water and Wastewater*, 1995, 11 (4): 33-35. (in Chinese))

[19] 汤利华, 许建华. 浊度和色度的混凝去除机理与混凝剂的选择 [J]. *净水技术*, 1996, 56 (2): 2-4, 24. (TANG Lihua, XU Jianhua. The choose of coagulant and coagulation mechanism of turbidity as well as color [J].

*Water Purification Technology*, 1996, 56 (2): 2-4, 24. (in Chinese))

[20] 蒋绍阶, 刘宗源. UV<sub>254</sub> 作为水处理中有机物控制指标的意义 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2002, 24 (2): 61-65. (JIANG Shaojie, LIU Zongyuan. The meaning of UV<sub>254</sub> as an organic matter monitoring parameter in water supply & wastewater treatment [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2002, 24 (2): 61-65. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-07-05 编辑: 彭桃英)

(上接第 130 页)

[5] CAO Xuliang, CORRIVEAU J. Migration of bisphenol A from polycarbonate baby and water bottles into water under severe conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56 (15): 6378-6381.

[6] SCHMIDA P, KOHLER M, MEIERHOFER R, et al. Does the reuse of PET bottles during solar water disinfection pose a health risk due to the migration of plasticisers and other chemicals into the water? [J]. *Water Research*, 2008, 42 (20): 5054-5060.

[7] CERETTI E, ZANI C, ZERBINI I, et al. Comparative assessment of genotoxicity of mineral water packed in polyethylene terephthalate (PET) and glass bottles [J]. *Water Research*, 2010, 44 (5): 1462-1470.

[8] ANDRA S S, MAKRIS K C, SHINE J P. Frequency of use controls chemical leaching from drinking-water containers subject to disinfection [J]. *Water Research*, 2011, 45 (20): 6677-6687.

[9] VANDENBERG L N, EHRlich S, BELCHER S M, et al. Low dose effects of bisphenol A: an integrated review of in vitro, laboratory animal, and epidemiology studies [J]. *Endocrine Disruptors*, 2013, 1 (1) e25078: 1-20.

[10] SCHÖPEL M, JOCKERS K F G, DÜPPE P M, et al. Bisphenol A binds to ras proteins and competes with guanine nucleotide exchange: implications for GTPase-selective antagonists [J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2013, 56 (23): 9664-9672.

(收稿日期: 2015-07-21 编辑: 徐娟)

(上接第 146 页)

[7] 马秀娟, 沈建忠, 孙金辉, 等. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31 (9): 2356-2364. (MA Xiujian, SHEN Jianzhong, SUN Jinghui, et al. Macrozoobenthos community structure and water quality evaluation of Yuqiao Reservoir in Tianjin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31 (9): 2356-2364. (in Chinese))

[8] 戴友芝, 唐受印, 张建波. 洞庭湖底栖动物种类分布及水

质生物学评价 [J]. *生态学报*, 2000, 20 (2): 277-282. (DAI Youzhi, TANG Shouyin, ZHANG Jianbo. The distribution of zoobenthos species and bio-assessment of water quality in Dongting Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (2): 277-282. (in Chinese))

[9] 天津市水利局, 天津市环保局. 海河流域天津市水功能区划报告 [R]. 天津: 天津市水利局, 2008.

(收稿日期: 2015-07-30 编辑: 彭桃英)