

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.003

湖南洞庭湖水系重金属健康风险评估

张光贵¹, 黄博²

(1. 湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 湖南 岳阳 414000; 2. 岳阳市环境监测中心, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 为了掌握洞庭湖水系重金属健康风险状况, 采用美国环境保护署推荐的水环境健康风险评估模型, 对洞庭湖水系重金属通过饮用水途径引起的健康风险进行评价。结果表明: 重金属总健康风险在 $2.27 \times 10^{-5} \sim 1.004 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间, 平均为 $4.87 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 未超过美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$; 重金属健康风险从大到小的顺序为: As、Cd、Pb、Cu、Zn, 湘江、资水、沅江、洞庭湖、澧水, 丰水期、枯水期; As 为主要风险污染物; 1988 年以来, 洞庭湖水系“四水”重金属健康风险均呈增加趋势, 其中湘江和资水分别增加了 13.34 和 5.07 倍, 因此, 加强洞庭湖流域特别是湘江和资水重金属的污染治理是降低洞庭湖水系重金属健康风险的有效途径。

关键词: 重金属污染; 健康风险评估; 洞庭湖水系

中图分类号: X503.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)01-0014-04

Health risk assessment of heavy metals in Dongting Lake water system in Hunan Province, China

ZHANG Guanggui¹, HUANG Bo²

(1. Dongting Lake Eco-Environmental Monitoring Center of Hunan Province, Yueyang 414000, China;
2. Yueyang Environmental Monitoring Center, Yueyang 414000, China)

Abstract: In order to investigate the health risk of heavy metals in the Dongting Lake water system, we used the water environmental health risk assessment model recommended by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) to assess the health risk of heavy metals that pass through drinking water supply routes in the Dongting Lake water system. The results show that the total health risk value of the heavy metals ranged from 2.27×10^{-5} per year to 1.004×10^{-4} per year, with an average value of 4.87×10^{-5} per year, not exceeding the maximum acceptable risk level 1×10^{-4} per year recommended by the USEPA. The heavy metals, rivers, and seasons can be ranked by risk in descending order, as follows: As, Cd, Pb, Cu, and Zn; the Xiangjiang River, the Zishui River, the Yuanjiang River, Dongting Lake, and the Lishui River; and the wet season, and the dry season. The main risk pollutant was As. The four-water health risk values of heavy metals in the Dongting Lake water system have increased since 1988, and the values of the Xiangjiang River and the Zishui River increased by 13.34 and 5.07 times, respectively. Therefore, strengthening the control of heavy metal pollution in the Dongting Lake Basin, especially in the Xiangjiang River and the Zishui River, is an effective way to reduce the health risk associated with heavy metals in the Dongting Lake water system.

Key words: heavy metal pollution; health risk assessment; Dongting Lake water system

重金属污染具有持久、隐蔽、毒性大等特点, 且不能被微生物降解, 还会通过生物富集作用破坏生态系统平衡, 甚至通过化学作用、生物作用与有机物结合形成毒性更强的有机金属^[1]。重金属污染物

通过工农业及生活废水的排放、降水径流、受污染底泥的释放及大气沉降等途径进入水体, 在水体中积累到一定程度会对水-水生植物-水生动物系统产生严重危害, 并通过饮水、食物链等途径直接或间接

地影响人类的健康^[2]。目前,已确定危害较大的重金属元素有 As、Cd、Pb、Cu、Zn 等^[3],其中,As 是公认的致癌物,是当前环境中最普遍、危害最大的毒性物质之一,长期暴露在 As 污染环境下可导致慢性 As 中毒,甚至肝癌、皮肤癌等;Cd 也是有毒重金属,主要蓄积在人体的肝脏和肾中,具有较强的致癌性,还会干扰人的雌激素分泌情况。重金属作为环境污染物和潜在的有毒有害物质已引起了国内外的广泛关注。

湖南省的绝大部分河流、湖泊均属洞庭湖水系。洞庭湖水系是长江水系的重要组成部分,是湖南人民重要的生活饮用水源,其水质的好坏直接影响湖南省乃至长江中下游人民群众的身体健康。湖南省素有“有色金属之乡”之称,矿产资源丰富,特别是湘江流域衡阳水口山的铅锌矿、郴州的钨矿、湘潭的锰矿和资水流域锡矿山的锑矿更是蜚声中外。然而,随着矿产资源的开发和洞庭湖流域社会经济的迅速发展,洞庭湖水系水质已受到不同程度的污染^[4],流域重金属污染问题突出,因此,开展洞庭湖水系重金属健康风险评价研究具有十分重要的意义。

健康风险评价是一种把污染物与人体健康联系起来,进而判断环境是否安全的评价方法^[5]。水环境健康风险评价是 20 世纪 80 年代后兴起的健康风险评价的重要组成部分,是建立水体污染与人体健康定量联系的一种评价方法,由美国率先提出,20 世纪 90 年代开始在我国得到应用^[6],其目的是通过水体污染物危害鉴定、污染物暴露评价和污染物与人的剂量-反应关系的分析等,定量评估水体污染物对人体健康的潜在风险^[7]。目前,我国水环境健康风险评价研究主要针对河流和湖库,对整个水系水环境健康风险进行研究的尚不多见。笔者利用杨忠芳等^[8]的研究数据,采用美国环境保护署推荐的水环境健康风险评价模型,对洞庭湖水系重金属健康风险进行评价,旨在掌握洞庭湖水系重金属健康风险状况,以期为洞庭湖流域水环境风险管理及重金属污染治理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

洞庭湖水系指最终汇入洞庭湖的各水网系统,由洞庭湖和入湖的湘江、资水、沅江、澧水等河流组成,流域面积 26.28 万 km²,占长江流域总面积的 14.6%,其中湖南省境内的面积为 20.48 万 km²,占全省总面积的 96.7%。

洞庭湖位于湖南省北部、长江中游荆江南岸,北接长江松滋、太平、藕池“三口”,南纳湘、资、沅、澧“四水”,经城陵矶汇入长江,湖体呈近似“U”字形,水位

33.50 m 时(岳阳站,黄海基面),湖长 143.00 km,最大湖宽 30.00 km,平均湖宽 17.01 km,湖泊面积 2 625 km²,最大水深 23.5 m,平均水深 6.39 m,相应蓄水量 167 亿 m³,多年平均径流量 3 126 亿 m³^[9],约占长江多年平均径流量的 1/3,为我国第二大淡水湖。

湘江、资水、沅江、澧水俗称湖南“四水”,自南向北贯穿湖南省汇入洞庭湖,并与其他河湖构成以洞庭湖为中心、呈扇形展开的发育完善的洞庭湖水系。洞庭湖水系主要河流概况见表 1。

表 1 洞庭湖水系主要河流概况^[9]

河流	发源地	干流长度/ km	湖南境内干流长度/ km	流域面积/ km ²	湖南境内流域面积/ km ²	多年平均径流量/亿 m ³
湘江	广西海洋山	856	670	94 660	85 383	643
资水	广西资源、湖南城步	713	630	28 142	26 738	227
沅江	贵州都匀、麻江	1 033	568	89 163	51 066	653
澧水	湖南桑植、永顺	388	388	18 496	15 505	149

1.2 水环境健康风险评价模型

水环境健康风险评价主要是针对水环境中对人体有害的物质。这些物质对人体健康产生危害的途径主要有 3 种,即直接接触、摄入水体中的食物和饮用,其中饮用被认为是一个很重要的暴露途径。本研究主要考虑重金属污染物通过饮用途径对人体造成的健康危害。

重金属污染物通过饮用水进入人体后,引起的健康风险主要包括基因毒性物质(致癌物质)健康风险和躯体毒性物质(非致癌物质)健康风险,两者的计算公式分别为

$$R_c = \sum R_{ci} = \sum [1 - \exp(-D_i Q_i)]/70 \quad (1)$$

$$R_n = \sum R_{ni} = \sum (D_i/R_{FD_i}) \times 10^{-6}/70 \quad (2)$$

式中: R_{ci} 为致癌物质*i*通过饮用水途径产生的年平均致癌风险,a⁻¹; R_{ni} 为非致癌物质*i*经饮用水途径产生的年平均健康风险,a⁻¹; D_i 为毒性物质*i*对人体的日均暴露剂量,mg/(kg·d); Q_i 为致癌物质*i*通过饮用水途径产生的致癌强度系数,(kg·d)/mg; R_{FD_i} 为非致癌物质*i*通过饮用水途径被人体摄入的参考剂量,mg/(kg·d);70 为人均寿命,a。

重金属污染物通过饮用水途径对人体的日均暴露剂量(D_i)按下式计算:

$$D_i = 2.2 \rho_i/70 \quad (3)$$

式中:2.2 为成人每天平均饮水量,L/d; ρ_i 为饮用水体中各重金属的实测质量浓度,mg/L;70 为人均体重,kg。

假定各重金属污染物对人体健康危害的毒性作用不存在拮抗或协同关系,则重金属通过饮用水途

表 2 洞庭湖水系重金属质量浓度

μg/L

河湖	ρ(Cu)			ρ(Zn)			ρ(Pb)			ρ(As)			ρ(Cd)		
	枯水期	丰水期	年平均	枯水期	丰水期	年平均	枯水期	丰水期	年平均	枯水期	丰水期	年平均	枯水期	丰水期	年平均
湘江	1.78	1.31	1.55	10.30	4.23	7.27	2.49	1.58	2.04	12.81	16.37	14.59	1.37	0.44	0.91
资水	4.86	3.30	4.08	2.99	9.35	6.17	2.20	2.98	2.59	5.42	11.00	8.21	0.17	0.28	0.23
沅江	0.84	1.08	0.96	2.37	2.14	2.26	1.47	1.03	1.25	4.20	5.70	4.95	0.26	0.13	0.20
澧水	2.20	4.06	3.13	2.82	5.69	4.26	1.07	13.84	7.46	1.55	5.10	3.33	0.11	0.11	0.11
洞庭湖	3.35	3.36	3.36	10.12	4.04	7.08	4.25	2.44	3.35	2.00	6.80	4.40	0.46	0.18	0.32

径对人体产生的总健康风险为： $R_{总}=R_e+R_n$ 。

1.3 研究区水质监测数据

为了查明洞庭湖水系 Cd 等重金属的自然来源、输送通量及影响因素,杨忠芳等^[8]在 2007 年 7—8 月(丰水期)和 2007 年 12 月至 2008 年 1 月(枯水期)进行了 4 个多月的水质监测工作,监测结果见表 2。

1.4 模型参数的选择

根据国际癌症研究机构(IARC))和世界卫生组织(WHO)编制的分类系统,As 和 Cd 为化学致癌物质,Cu、Zn 和 Pb 为非致癌物质。模型中化学致癌物质的致癌强度系数和非致癌物质通过饮水途径暴露的参考剂量均参照美国环境保护署标准,具体情况见表 3。

表 3 化学致癌物质致癌强度系数和非致癌物质的参考剂量

化学致癌物质	$Q_i/(kg \cdot d \cdot mg^{-1})$	非致癌物质	$R_{FD_i}/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$
As	15.0	Cu	0.0050
Cd	6.1	Zn	0.3000
		Pb	0.0014

1.5 评价标准的确定

水环境风险评价是通过建立人体健康与环境污染的关系,定量描述各种环境污染物对人体健康造成的危害及其发生概率,并将所得结果与国际推荐的风险水平对比,使风险管理国际化。目前,部分机构推荐的最大可接受风险水平在 $10^{-6} \sim 10^{-4} a^{-1}$ 之间^[10],考虑到我国的实际情况,选取美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 $1 \times 10^{-4} a^{-1}$ 作为评价标准。

2 结果与讨论

2.1 重金属健康风险评价结果

根据前述评价模型和评价参数,可以计算出

2007 年洞庭湖水系重金属通过饮用水途径产生的健康风险,计算结果见表 4。

从表 4 可以看出,致癌重金属健康风险在 $2.27 \times 10^{-5} \sim 1.004 \times 10^{-4} a^{-1}$ 之间,平均为 $4.87 \times 10^{-5} a^{-1}$,其中 As 健康风险在 $2.24 \times 10^{-5} \sim 9.79 \times 10^{-5} a^{-1}$ 之间,平均为 $4.77 \times 10^{-5} a^{-1}$;Cd 健康风险在 $3.01 \times 10^{-7} \sim 2.49 \times 10^{-6} a^{-1}$ 之间,平均为 $9.69 \times 10^{-7} a^{-1}$;致癌重金属健康风险在各河湖均表现为 As>Cd。非致癌重金属健康风险在 $4.90 \times 10^{-10} \sim 2.68 \times 10^{-9} a^{-1}$ 之间,平均为 $1.31 \times 10^{-9} a^{-1}$,其中 Cu 健康风险在 $8.62 \times 10^{-11} \sim 3.66 \times 10^{-10} a^{-1}$ 之间,平均为 $2.35 \times 10^{-10} a^{-1}$;Zn 健康风险在 $3.38 \times 10^{-12} \sim 1.09 \times 10^{-11} a^{-1}$ 之间,平均为 $8.09 \times 10^{-12} a^{-1}$;Pb 健康风险在 $4.01 \times 10^{-10} \sim 2.39 \times 10^{-9} a^{-1}$ 之间,平均为 $1.07 \times 10^{-9} a^{-1}$;非致癌重金属健康风险按从大到小排序在各河湖均表现为 Pb、Cu、Zn。

洞庭湖水系重金属总健康风险在 $2.27 \times 10^{-5} \sim 1.004 \times 10^{-4} a^{-1}$ 之间,平均为 $4.87 \times 10^{-5} a^{-1}$,未超过美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 $1 \times 10^{-4} a^{-1}$ 。

洞庭湖水系重金属健康风险主要来自致癌重金属,As 的健康风险占总健康风险的比例在 97.05%~98.92% 之间,平均为 97.95%;Cd 的健康风险占总健康风险的比例在 1.13%~2.87% 之间,平均为 1.99%。可见,As 是洞庭湖水系各河湖重金属健康风险的主要污染物。孙树青等^[7]在 2006 年评价湘江干流水环境健康风险得出的结论是,毒性物质由饮用水途径所致健康危害的风险 As 最大;秦普丰等^[11]对湘江湘潭段、刘丽等^[12]对湘江株洲段进行水环境健康风险评价时得出了同样的结论。

非致癌重金属的健康风险很小,仅为总健康风险的 0.003%,低于荷兰建设和环境保护部推荐的

表 4 2007 年洞庭湖水系重金属健康风险评价结果

a^{-1}

河湖	R_{cAs}	R_{cCd}	R_{nCu}	R_{nZn}	R_{nPb}	R_c	R_n	$R_{总}$
湘江	9.79×10^{-5}	2.49×10^{-6}	1.39×10^{-10}	1.09×10^{-11}	6.54×10^{-10}	1.004×10^{-4}	8.04×10^{-10}	1.004×10^{-4}
资水	5.52×10^{-5}	6.30×10^{-7}	3.66×10^{-10}	9.23×10^{-12}	8.31×10^{-10}	5.58×10^{-5}	1.21×10^{-9}	5.58×10^{-5}
沅江	3.33×10^{-5}	5.48×10^{-7}	8.62×10^{-11}	3.38×10^{-12}	4.01×10^{-10}	3.38×10^{-5}	4.90×10^{-10}	3.38×10^{-5}
澧水	2.24×10^{-5}	3.01×10^{-7}	2.81×10^{-10}	6.38×10^{-12}	2.39×10^{-9}	2.27×10^{-5}	2.68×10^{-9}	2.27×10^{-5}
洞庭湖	2.96×10^{-5}	8.76×10^{-7}	3.02×10^{-10}	1.06×10^{-11}	1.07×10^{-9}	3.05×10^{-5}	1.39×10^{-9}	3.05×10^{-5}
平均	4.77×10^{-5}	9.69×10^{-7}	2.35×10^{-10}	8.09×10^{-12}	1.07×10^{-9}	4.87×10^{-5}	1.31×10^{-9}	4.87×10^{-5}

可忽略风险水平 $1 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1[10]}$ 。

2.2 重金属健康风险的空间分布

从表 4 可以看出,洞庭湖水系重金属总健康风险按从大到小排序表现为:湘江、资水、沅江、洞庭湖、澧水。湘江和资水的重金属总健康风险均高于洞庭湖水系的平均值,其中湘江重金属总健康风险为 $1.004 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,达到了美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,对此,应予以高度重视并切实加强湘江和资水流域的重金属污染治理。

洞庭湖水系各河湖重金属健康风险差异较大,其中湘江的 $R_{\text{总}}$ 值分别是澧水和洞庭湖水系平均值的 4.42 和 2.06 倍。

2.3 重金属健康风险的时间分布

采用同样方法计算洞庭湖水系 2007 年不同水期重金属健康风险,结果见表 5。

表 5 2007 年不同水期重金属总健康风险 $R_{\text{总}}$

水期	$R_{\text{总}}$ 10^{-5} a^{-1}					
	湘江	资水	沅江	澧水	洞庭湖	平均
枯水期	8.98	3.69	2.90	1.07	1.47	3.62
丰水期	11.10	7.47	3.87	3.46	4.62	6.10

从表 5 可以看出,2007 年丰水期洞庭湖水系各河湖的 $R_{\text{总}}$ 值均大于枯水期;枯水期未出现重金属健康风险超标现象,丰水期湘江 $R_{\text{总}}$ 值达 $1.11 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,超过了美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 。可见,洞庭湖水系重金属健康风险表现为丰水期大于枯水期。

澧水、洞庭湖和资水的重金属总健康风险的水期差异相对较大,其中澧水丰水期的 $R_{\text{总}}$ 值是枯水期的 3.23 倍,湘江和沅江的重金属总健康风险的水期差异相对较小。

1988 年,曾北危等^[13]系统地研究了洞庭湖水系水环境中重金属元素的含量,利用其研究数据计算洞庭湖水系重金属健康风险并与表 4 进行比较,结果见图 1。

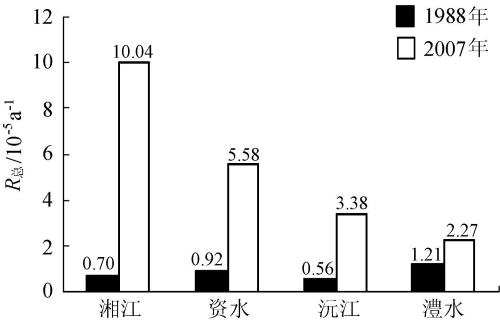


图 1 洞庭湖水系重金属健康风险的年代对比

从图 1 可以看出,1988 年以来,洞庭湖水系“四水”的重金属总健康风险均呈增加趋势,其中以湘江增加最为明显,湘江、资水、沅江和澧水的重金属总健康风险分别增加了 13.34、5.07、5.04 和 0.88 倍。

2.4 对水环境管理的启示

上述研究结果表明,造成洞庭湖水系重金属健康风险的主要污染物为 As,然而洞庭湖水系各河湖中 As 的质量浓度不大于 $16.37 \mu\text{g/L}$,小于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的 I 类标准值 0.05 mg/L ,不到 I 类标准值的 1/3,依据《地表水环境质量评价办法(试行)》对洞庭湖水系水质进行评价,As 并非主要污染物。尽管两种评价体系在方法上存在一定的差异,其结果不可以直接比较,但两种评价结果的差异仍可以说明:仅仅根据水质监测参数对水质进行分级评价不足以真正揭示水体中各污染物对人体健康的潜在危害,因而采取何种方法评价水环境质量并直接反映水体污染对人类健康的潜在危害,值得进一步研究。

3 结 论

a. 洞庭湖水系重金属总健康风险在 $2.27 \times 10^{-5} \sim 1.004 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间,平均为 $4.87 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,未超过美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$;洞庭湖水系重金属健康风险按从大到小排序,各河湖均表现为 As、Cd、Pb、Cu、Zn,其中 As 健康风险占总健康风险的比例在 97.05% ~ 98.92% 之间,平均为 97.95%,是洞庭湖水系各河湖重金属健康风险的主要污染物。

b. 洞庭湖水系重金属健康风险按从大到小排序,呈现湘江、资水、沅江、洞庭湖、澧水的空间分布特征,和呈现丰水期大于枯水期的水期变化特征。

c. 1988 年以来,洞庭湖水系“四水”重金属健康风险均呈增加趋势,其中湘江和资水分别增加了 13.34 和 5.07 倍,因此,加强洞庭湖流域特别是湘江和资水的重金属污染治理,是降低洞庭湖水系重金属健康风险的有效途径。

d. 在重金属健康风险评价过程中,未考虑除饮用水途径以外的其他暴露途径,如直接接触、摄入水体中的食物等,因此,本研究所得的风险值应小于实际存在的风险值。

参考文献:

[1] 李建新. 垃圾焚烧过程重金属污染物迁移机理及稳定化处理技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.

(下转第 47 页)

参考文献:

[1] 关涛,钮媚娜,侯越. 浅谈白洋淀水资源的可持续发展[J]. 黑龙江科技信息,2011(25):42-45. (GUAN Tao, NIU Meina, HOU Yue. Introduction to baiyangdian water resources sustainable development [J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2011(25):42-45. (in Chinese))

[2] 刘立华. 白洋淀湿地水资源承载能力及水环境研究[D]. 上海:中国科学院上海冶金研究所,2000.

[3] 许万清,何永健. 山区水文站天然年径流量的还原计算方法浅析[J]. 吉林水利,2009(9):38-40. (XU Wanqing, HE Yongjian. Mountains of hydrologic natural annual runoff reduction method makes analysis [J]. Journal of Jilin Water,2009(9):38-40. (in Chinese))

[4] 燕荷叶. 径流还原计算技术方法及其应用研究[J]. 吉林水利,2009(9):65-70. (YAN Heye. Runoff reduction computing methods and its application [J]. Journal of Jilin Water,2009(9):65-70. (in Chinese))

(上接第 17 页)

[2] 孙超,陈振楼,张翠,等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学研究,2009,22(1):60-65. (SUN Chao, CHEN Zhenlou, ZHANG Cui, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(1):60-65. (in Chinese))

[3] 廖国礼. 典型有色矿山重金属迁移规律与污染评价研究[D]. 长沙:中南大学,2005.

[4] 张光贵. 湖南省水污染防治对策研究[J]. 水资源保护,2003,19(4):43-45. (ZHANG Guanggui. Measures for water pollution control in Hunan Province [J]. Water Resources Protection, 2003, 19(4):43-45. (in Chinese))

[5] 李祥平,齐剑英,陈永亨,等. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学学报,2011,31(3):547-553. (LI Xiangping, QI Jianying, CHEN Yongheng, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources of Guangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2011,31(3):547-553. (in Chinese))

[6] 孙树青,胡国华,王勇泽,等. 湘江干流水环境健康风险评估[J]. 安全与环境学报,2006,6(2):12-15. (SUN Shuqing, HU Guohua, WANG Yongze, et al. Water environmental health risk assessment of Xiangjiang River [J]. Journal of Safety and Environment,2006,6(2):12-15. (in Chinese))

[7] 邹滨,曾永年,BENJAMIN F Z,等. 城市水环境健康风险评估[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(2):94-98. (ZOU Bin, ZENG Yongnian, BENJAMIN F Z, et al. Spatial and temporal health risk assessment of water

[5] 李素霞. 河北省山区天然年径流量的还原计算[J]. 地下水,2009(3):78-81. (LI Suxia. Hebei mountain natural annual runoff reduction calculation [J]. Journal of Groundwater,2009(3):78-81. (in Chinese))

[6] 尹健梅,程伍群,严磊. 白洋淀湿地水文水资源变化趋势分析. 水资源保护,2010,25(1):52-55. (YIN Jianmei, CHENG Wuqun, YAN Lei. Baiyangdian wetland hydrology and water resources change trend analysis [J]. Water Resources Protection, 2010, 25(1):52-55. (in Chinese))

[7] 彭文启. 湖泊健康评价指标、标准与方法[R]. 北京:中国水利水电科学研究院水环境研究所,2011.

[8] 张素珍,宋保平. 白洋淀水资源承载力研究[J]. 南水北调与水利科技,2009(7):91-94. (ZHANG Suzhen, SONG Baoping. Baiyangdian water resources carrying capacity research [J]. Journal of the South-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology,2009(7):91-94. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-21 编辑:徐 娟)

environment in urban area [J]. Geography and Geo-Information Science,2009,25(2):94-98. (in Chinese))

[8] 杨忠芳,夏学齐,余涛,等. 湖南洞庭湖水系 As 和 Cd 等重金属元素分布特征及输送通量[J]. 现代地质,2008,22(6):897-908. (YANG Zhongfang, XIA Xueqi, YU Tao, et al. Distribution and fluxes of As and Cd metals in the Dongting Lake water system, Hunan Province, China [J]. Geoscience,2008,22(6):897-908. (in Chinese))

[9] 窦鸿身,姜加虎. 洞庭湖[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2000:3-10.

[10] 倪彬,王洪波,李旭东,等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 环境科学研究,2010,23(1):74-79. (NI Bin, WANG Hongbo, LI Xudong, et al. Water environmental health risk assessment in lake source of drinking water [J]. Research of Environmental Sciences, 2010,23(1):74-79. (in Chinese))

[11] 秦普丰,雷鸣,郭雯. 湘江湘潭段水环境主要污染物的健康风险评估[J]. 环境科学研究,2008,21(4):190-195. (QIN Pufeng, LEI Ming, GUO Wen. Health risk assessment of main water pollutants of Xiangjiang River in Xiangtan City [J]. Research of Environmental Sciences, 2008,21(4):190-195. (in Chinese))

[12] 刘丽,秦普丰,李细红,等. 湘江株洲段水环境健康风险评估[J]. 环境科学与管理,2011,36(4):173-176. (LIU Li, QIN Pufeng, LI Xihong, et al. Water environmental health risk assessment of Xiangjiang in Zhuzhou City [J]. Environmental Science and Mangement, 2011, 36(4):173-176. (in Chinese))

[13] 曾北危,李健. 洞庭湖水系水环境中微量元素的地球化学特征[C]//刘卓澄. 环境中重金属研究文集. 北京:科学出版社,1988:105-121.

(收稿日期:2013-03-21 编辑:彭桃英)