

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018060402

开晓莉, 张维江, 邱小琮, 等. 清水河污染物对儿童所致健康风险评估[J]. 环境化学, 2018, 37(12): 2809-2819.

KAI Xiaoli, ZHANG Weijiang, QIU Xiaocong, et al. Health risk evaluation of children caused by water pollutants in Qingshui River [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(12): 2809-2819.

清水河污染物对儿童所致健康风险评估*

开晓莉^{1,2} 张维江^{1**} 邱小琮³ 褚金镒¹ 张宇正¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川, 750021; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南, 232001;
3. 宁夏大学生命科学学院, 银川, 750021)

摘 要 为研究黄河宁夏段一级支流(清水河)汛期水环境污染物对儿童健康影响,2012—2016年5月在清水河7个典型断面进行了水样采集和水质检测,综合考虑各种饮水、皮肤接触途径,对流域上游周边儿童的饮水、饮食及涉水行为进行抽样问卷调查和实际测量,研究获得当地儿童夏季饮水、皮肤暴露参数,并对清水河水环境污染物通过各种饮水、皮肤接触途径对儿童所致健康风险进行了研究.结果表明,儿童饮水、皮肤暴露参数受区域、性别、城乡、饮食、生活习惯等影响而使不同儿童群体所面临的水环境健康风险存在明显的差异性;在同样的污染背景下,女童面临的健康风险高于男童面临的健康风险,城市女童、农村男童所面临的健康风险分别高于农村女童和城市男童面临的健康风险,皮肤暴露风险高于饮水暴露风险,头部、脸及手是儿童健康风险较高的身体部位;清水河水环境化学污染物对儿童所致健康总风险的数量级在 10^{-5} — 10^{-4} a⁻¹之间,且总体上从源头到黄河入河口在逐渐增大,其中在韩府湾、王团及泉眼山超过 1×10^{-4} a⁻¹,为重点污染控制断面,整个流域2012—2016年水环境质量总体不太稳定.

关键词 汛期, 清水河, 水环境健康风险, 暴露参数, 儿童.

Health risk evaluation of children caused by water pollutants in Qingshui River

KAI Xiaoli^{1,2} ZHANG Weijiang^{1**} QIU Xiaocong³ CHU Jindi¹ ZHANG Yuzheng¹

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan, 750021, China;
2. Earth and Environmental College, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China;
3. School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan, 750021, China)

Abstract: In order to investigate the impact of water pollutants on children's health in the first-class tributary of Ningxia section of the Yellow River (Qingshui River) in the flood season, water samples were collected and water quality was detected in seven typical sections of Qingshui River in May of every year from 2012 to 2016. Considering all possible exposure ways through drinking water and dermal contact, sampling questionnaire survey and actual measurement of drinking water, diet and water-related activities of children in the upper reaches of the river basin were carried out. The drinking water-related exposure factors and dermal exposure factors of local children in the summer were obtained. The risk to children's health caused by the pollutants in water environment of Qingshui River was studied through various ways of drinking water and dermal contact. The results

2018年6月4日收稿(Received: June 4, 2018).

* 宁夏回族自治区重点研发计划(科技惠民)项目(2016KJHM34)和宁夏大学“西部一流”重大创新项目(ZKZD201700)资助.

Supported by the Key Research and Development Projects in Ningxia Hui Autonomous Region(2016KJHM34) and Major Innovation Projects in the “First-Rate Western Region” of Ningxia University(ZKZD201700).

** 通讯联系人, Tel: 13909588121, E-mail: zwjiang@263.net

Corresponding author, Tel: 13909588121, E-mail: zwjiang@263.net

show that: Children's drinking water-related exposure and dermal exposure were affected by a series of factors such as location, gender, urban and rural areas, diet, living habits and so on, which make the risk of water environment health of different groups of children obviously different; In the same context of pollution, girls face higher health risks than boys, and urban girls and rural boys face higher health risks than rural girls and urban boys respectively. The risk of dermal exposure is higher than that of drinking water. Head, face and hands are the body parts with higher risk for children's health. The magnitude of the total environmental health risk to children caused by chemical pollutants in the water environment of Qingshui River is between 10^{-5} — 10^{-4} a^{-1} . In general, from the source to the estuary of the Yellow River, it is gradually increased, among which more than $1 \times 10^{-4} a^{-1}$ in Hanfuwan, Wangtuan and Quanyanshan, which are the key pollution control sections. Overall water environmental quality in the whole basin is not stable in 2012—2016.

Keywords: flood season, Qingshui River, water environment health risk, exposure factors, children.

随着人类社会经济发展和生活质量的提高,水环境问题逐渐成为制约人类发展的关键性因素,水环境污染加剧所带来的健康风险不容忽视.据统计大部分缺水或严重缺水城市集中在我国北方及西北干旱半干旱地区^[1],意味着这些地区的水环境安全研究显得尤为重要.儿童是国家和社会的未来,日益严重的环境污染严重威胁着儿童的健康^[2].在儿童的生长发育过程中受各种因素的相互作用,使得儿童较成人对环境污染物有更多的暴露机会,有更长的暴露时间,每公斤体重摄入的污染物更多,对环境毒物有高度易感性,同样的环境污染物暴露剂量对儿童会产生更严重且持久的损害^[3-4].

人类 90% 的癌症系化学致癌物引起^[5],环境污染所产生的健康风险正在制约着我国经济社会又好又快的发展.随着美国等发达国家出台一系列指南方法及准则,环境健康风险评估日渐系统化和规范化^[6].国际癌症研究机构(IARC)通过研究建立了致癌、非致癌物所致健康危害的风险模型^[7],用以确定主要污染物及治理的优先顺序.儿童接触水环境中有毒有害污染物的主要途径包括饮水、饮食及皮肤接触,虽然各种毒物在人们日常饮用水中含量很低,但长期低剂量暴露将会对儿童身体健康造成严重伤害^[8].Brown 等^[9]通过对饮用水中挥发性有机污染物暴露途径的综述表明,对于水中挥发性有机污染物,皮肤暴露远大于经口的直接饮用暴露,原因在于皮肤吸收过程较为复杂,且影响因素众多.因此,对水环境污染物通过各种暴露途径对儿童健康影响进行研究具有重要意义,也更具代表性.

暴露参数的准确性直接决定着健康风险评估结果的可信度,然而我国在开展大量的水污染对人体健康的风险评估工作时,往往采用国外发布的暴露参数,可能会造成较大的偏差,而我国是一个地域宽广、民族多元、人口众多的国家,人群的暴露参数因地区和民族也会有较大差异^[10-11],因此调查研究儿童暴露参数切合当前环境健康研究及水环境管理的迫切需求.国际上普遍采用 1983 年美国科学院首次确立的风险评价基本方法^[12],我国环境健康风险评估研究始于 20 世纪 90 年代,国内学者对其进行了探索性研究,并应用于饮用水源地等区域性水环境健康风险评估^[13-16],主要是借鉴国外已有的暴露参数对污染物通过饮水途径所致成年人平均化健康风险进行研究,将暴露参数本地化,且有针对性地研究污染物通过不同暴露途径对儿童健康影响的程度非常少见.故本研究以清水河流域儿童为研究对象,对水环境污染物所致健康风险进行系统研究,从而为清水河水环境安全管理提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

清水河是黄河在宁夏境内最大的一条支流,位于宁夏回族自治区南部,发源于六盘山东侧山麓黑刺沟脑处,向北流经固原市原州区、西吉县、吴忠市同心县、红寺堡区及中卫市海原县、中宁县,最后于中宁县的泉眼山汇入黄河,是固原市的母亲河,河长 320 km,河道平均比降 1.49‰,流域面积 14481 km².清水河流域粮食产量低而不稳,人民生活十分贫困,是我国著名的低产贫困地区之一.选择该流域研究典型干旱、经济欠发达地区水环境具有较强的代表性.

1.2 样品的采集与测定

依据研究目标,并结合清水河流域的地理位置、水文特征及水环境特点,使用 GPS 定位,选择 7 个有代表性的部位布置采样断面,采样断面涵盖了流域的各主要节点及入黄河口(具体分布见图 1).选择清水河汛期(2012—2016 年每年 5 月)进行采样,检测 As、Cd、NH₃-N、CN、挥发酚、Hg、Pb、Cu、Fe、Zn、Mn 及氟化物等 12 种化学污染物.水样的采集、保存及质量保证措施均按照《环境监测技术规范》和《环境水质监测质量保证手册》的技术要求执行,分析方法按照国家相关水质标准和《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行.

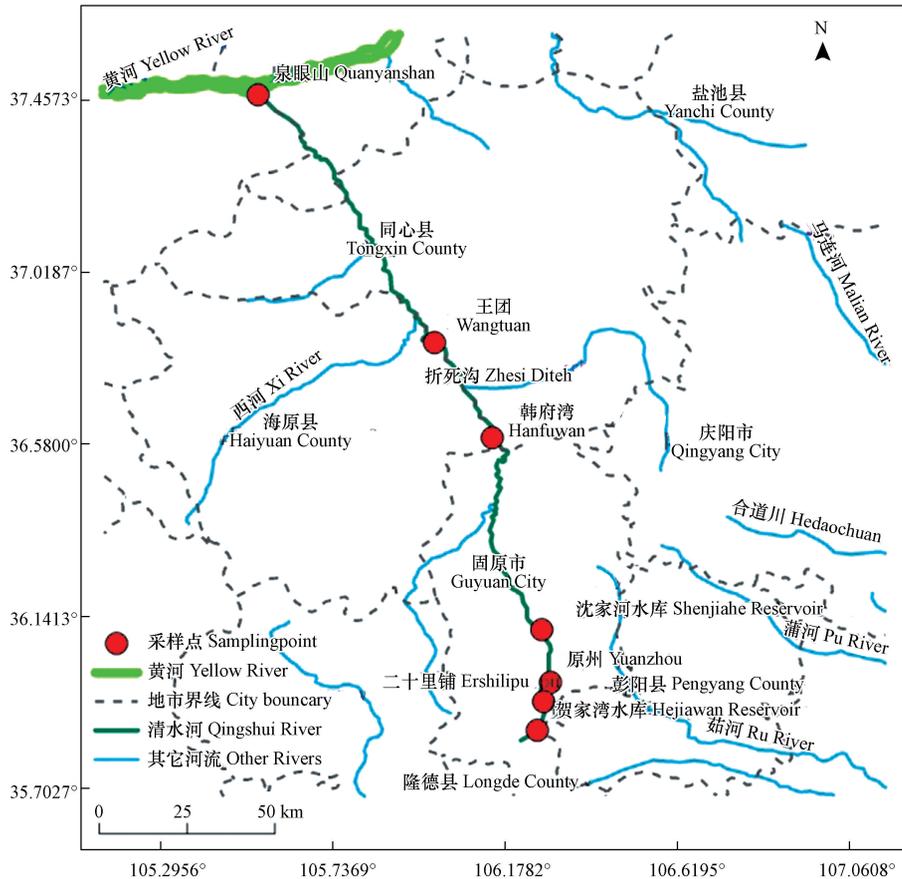


图 1 采样点位置

Fig.1 Location of sampling sites

1.3 健康风险评价模型

健康风险评价是 20 世纪 80 年代发展起来的一个新型研究领域,可定量描述环境污染对人体健康产生的危害风险^[17].1983 年,美国国家科学院出版的红皮书《联邦政府的风险评价:管理程度》,提出风险评价“四步法”,即危害鉴别、剂量-效应关系评价、暴露评价及风险表征^[12],成为环境风险评价的指导性文件,已被荷兰、法国、日本、中国等国家和国际组织采用.很多学者也根据不同污染物对人体的危害效应建立不同类型健康风险评价模型^[18-20].目前,国内外研究水中有毒物质通过饮水途径对人体健康造成的危害一般采用美国环境保护署(US EPA)推荐的健康风险评价模型^[21-22];皮肤接触途径健康风险评价采用 Streng 等^[23]提出的计算模型.本研究采用 US EPA 推荐、Streng 等提出的评价模型对清水河水环境健康风险进行评价.

假定每种化学污染物对人体健康危害的毒性作用呈相加关系,则水环境健康危害总风险 R 可表示为: $R = R^c + R^n + R^p + R^f$,其中 R^c 和 R^p 分别表示致癌物通过饮水、皮肤接触途径所致健康风险; R^n 和 R^f 分别表示非致癌物通过饮水、皮肤接触途径所致健康风险.

$$R^c = \sum_{i=1}^k \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{\theta C_i}{W} \times SF_i\right) \right]}{L} \quad (1)$$

$$R^n = \sum_{i=1}^l \frac{\left[\left(\frac{\theta C_i}{W}\right) \times 10^{-6} / RfD_i \right]}{L} \quad (2)$$

$$R^p = \sum_{i=1}^k \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{2 \times 10^{-3} \times k \times C_i \times \sqrt{\frac{6 \times Z \times TE}{\pi}} \times A_{sd} \times FE \times EF \times ED}{W \times AT \times f} \times SF_i\right) \right]}{L} \quad (3)$$

$$R^f = \sum_{i=1}^l \frac{\left[\frac{2 \times 10^{-3} \times k \times C_i \times \sqrt{\frac{6 \times Z \times TE}{\pi}} \times A_{sd} \times FE \times EF \times ED}{W \times AT \times f} \times 10^{-6} / RfD_i \right]}{L} \quad (4)$$

式中, SF_i 为致癌物 i 的致癌强度系数 ($\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$); RfD_i 为非致癌物 i 的饮水途径参考剂量 ($\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$); C_i 为化学污染物的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); L 为人均寿命 (a); θ 为每日平均饮水量 (L); W 为人均体重 (kg); A_{sd} 为人体表面积 (cm^2); FE 为涉水行为频率 ($\text{次} \cdot \text{d}^{-1}$); EF 为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED 为暴露延时 (a); AT 为平均暴露时间 (d); f 为肠道吸附比率; k 为皮肤吸附参数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); τ 为延滞时间 (h); TE 为涉水行为持续时间 (h).

1.4 模型参数的确定

暴露参数是用来描述人体经呼吸、口、皮肤暴露于外界物质的量和速率,以及人体特征(如体重、寿命等)的参数^[24].本研究主要针对水环境污染对儿童健康影响的研究,涉及的暴露途径包括饮水和皮肤接触,暴露参数主要包括饮水暴露参数和皮肤暴露参数,其中饮水暴露参数是指人体经口暴露各种类型水的强度、频率和持续时间^[25].饮水摄入量即日均饮水量,是最主要的饮水暴露参数,包括直接摄入率和间接摄入率.皮肤暴露参数主要包括皮肤体表面积、化合物-皮肤吸收系数,以及不同场景中的暴露频率、暴露持续时间等时间-活动相关参数.在水中污染物浓度准确定量的情况下,暴露参数的取值越接近于目标人群的实际暴露状况,健康风险评价的结果愈准确.

清水河是固原市农村人饮的重要水源.基于此,本研究针对固原市 200 余名儿童(男女各半、城乡各半,分布在各年龄段)采用抽样问卷调查和实际测量的方法,15 名调查员于 2017 年 5—7 月深入居民家庭对调查对象的一日三餐及三餐之间的直接饮水和间接饮水(冲的牛奶、粥、汤、汤面条、米饭、馒头等),以及游泳、沐浴、其他涉水行为(如刷牙、洗脸、洗手、洗头、洗脚等)进行了详细调查.为了保证调查质量,在调查过程中对 10% 的被调查者进行了平行问卷调查,并对调查过的部分内容进行了重复调查,用统计分析软件对调查数据进行了描述性统计分析,并采用非参数的检验方法进行了差异性检验,对于有缺项或者有明显逻辑检验错误等质量不符合要求的问卷不进行分析.

间接饮水摄入率的计算可根据调查、实测的数据以及食物的含水率进行计算,其中面条、馒头、米饭的含水率分别在 20%—25%、42%—47%、57.12%—67.22%之间^[26-27],在计算过程中面条、馒头、米饭的含水率取其平均值(分别为 22.5%、44.5%、62.17%)进行计算.经过测量,粥、汤、汤面条的含水率分别在 85%、85%、70%以上,在含水量计算过程中取其最低值进行计算.根据模型和调查数据计算获得研究区儿童的夏季饮水摄入量(见表 1),可以看出城市儿童的直接、间接及总液体摄入量均高于农村儿童,其原因可能是由于城市平均气温比农村要高,气温升高促进了机体的饮水量增加,另一方面城市儿童大部分时间待在室内,饮水更具有便利性和规律性.不同儿童群体的直接、间接饮水摄入量在总液体摄入率的占比也不同,而且城乡男、女童对各种饮食的饮水摄入量也不同.本研究所得儿童每千克体重总液体摄入量 [$89.8 \text{ mL} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 比美国 [$56 \text{ mL} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 和加拿大 [$47 \text{ mL} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 同龄儿童总液体摄入量要高^[28],一方面因为本研究所得的是儿童夏季饮水摄入量,一般明显高于其他季节饮水摄入量,另

一方面由于饮食习惯的巨大差异,美国、加拿大等国家儿童总液体摄入量几乎取决于直接饮水摄入量.研究区儿童直接饮水摄入量($0.916 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$)和总液体摄入量($1.468 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$)算数均值均高于河南泌阳地区儿童直接饮水摄入量($0.444 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$)和总液体摄入量($1.087 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$),但间接饮水摄入量($0.552 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$)低于河南泌阳地区间接饮水摄入量($0.643 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$)^[10].上述研究表明饮水摄入量受性别、区域、城乡、饮食、生活习惯等影响而存在明显的差异性.

表 1 固原市儿童体重和夏季饮水摄入量

Table 1 Weight of children and their intake rate of drinking water in summer in Guyuan City

儿童 Children	总液体 摄入量 Total fluid intake rate/ ($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)	直接饮水摄入量 Direct drinking water intake rate/ ($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)	间接饮水摄入量 Indirect drinking water intake rate/($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)						体重 Weight/ kg
			总量 Total amount	牛奶 Milk	粥、汤 Porridge, Soup	汤面条 Soup noodle	米饭 Rice	馒头 Steamed bread	
城市男童	1.682	1.013	0.669	0.121	0.088	0.236	0.155	0.069	17.594
农村男童	1.415	0.904	0.511	0.106	0.142	0.125	0.099	0.039	16.917
城市女童	1.560	0.991	0.569	0.099	0.172	0.160	0.124	0.015	16.069
农村女童	1.213	0.755	0.457	0.083	0.125	0.119	0.090	0.040	14.765

皮肤比表面积是皮肤暴露参数中最为关键的参数.皮肤比表面积可根据 US EPA^[24]推荐的皮肤比表面积计算方法($A_{sd} = 0.0239H^{0.417}W^{0.517}$,其中 A_{sd} 为人体表面积, m^2 ; H 为身高, cm ; W 为体质量, kg .)及美国统计出的0—5岁儿童身体各部位表面积在总面积中的比例(头15.3%,躯干34.6%,手臂13.4%,手5.6%,腿24.3%,脚6.9%)^[28]计算固原市儿童身体各部位的表面积.根据以上的数据和计算模型得出研究区夏季儿童主要皮肤暴露参数见表2.可以看出,研究区不同儿童群体的皮肤比表面积不同,而且身体各部位的皮肤比表面积、暴露时间及频率也有所不同,其中儿童皮肤比表面积均值(0.67 m^2)高于河南泌阳地区同龄儿童的皮肤比表面积(0.64 m^2)^[29],主要由于地域特点等因素导致北方地区儿童身高和体重均高于中部及南方地区,而且我国地域广阔,种族众多,每个地区儿童由于区域、性别、城乡、生活习惯等不同,而使得皮肤暴露参数有所不同.

表 2 固原市夏季儿童身体各部分皮肤暴露参数

Table 2 Dermal exposure factors of children's body parts in summer in Guyuan city

儿童 Children	参数 Factors	全身 Whole body	头部 Head	躯干 Trunk	手臂 Arms	手部 Hands	腿 Legs	脚 Feet	脸部 Face	头皮 Scalp
城市男童	A_{sd}/m^2	0.707	0.096	0.242	0.095	0.039	0.186	0.050	0.048	0.048
	$\text{FE}/\text{Times}\cdot\text{d}^{-1}$	0.267	0.822	0.267	0.267	7.411	0.267	1.267	2.267	0.789
	TE/h	0.194	0.130	0.194	0.194	0.017	0.194	0.117	0.110	0.117
农村男童	A_{sd}/m^2	0.662	0.096	0.228	0.089	0.037	0.167	0.046	0.048	0.048
	$\text{FE}/\text{Times}\cdot\text{d}^{-1}$	0.254	1.845	0.254	0.254	7.028	0.254	0.892	2.927	0.763
	TE/h	0.305	0.130	0.305	0.305	0.025	0.305	0.181	0.162	0.185
城市女童	A_{sd}/m^2	0.667	0.093	0.229	0.090	0.037	0.172	0.047	0.047	0.047
	$\text{FE}/\text{Times}\cdot\text{d}^{-1}$	0.693	1.008	0.693	0.693	7.265	0.693	1.483	2.493	1.058
	TE/h	0.278	0.166	0.278	0.278	0.012	0.278	0.166	0.153	0.153
农村女童	A_{sd}/m^2	0.636	0.093	0.219	0.085	0.035	0.160	0.044	0.046	0.046
	$\text{FE}/\text{Times}\cdot\text{d}^{-1}$	0.229	2.049	0.229	0.229	8.074	0.229	1.029	3.316	0.782
	TE/h	0.333	0.144	0.333	0.333	0.019	0.333	0.199	0.176	0.207

污染物的系数可采用 US EPA^[30]已公布的非致癌参考剂量和致癌强度系数(见表3).人均寿命 L 根据《中国统计年鉴 2012》取 2010 年预期期望寿命,男、女性分别为 71.31 和 75.71.另外,对于模型中的其它参数,参考杨全锁等^[28,31-32]的相关研究成果, f 取 1, K 取 $0.001\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$, τ 取 1 h, EF 取 $365\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$, ED 和 AT 的取值一样,其中非致癌物为 35,致癌物男、女性分别为 71.31 和 75.71.

表 3 模型参数 SF 和 RfD 值

Table 3 Value of model parameters SF and RfD

非致癌物 Non-carcinogen	RfD/ ($\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$)	非致癌物 Non-carcinogen	RfD/ ($\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$)	致癌物 Carcinogen	SF/ ($\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$)
Cu	0.04	Hg	0.0003	As	15
Fe	0.7	Pb	0.0014	Cd	6.1
Zn	0.3	氟化物	0.06		
Mn	0.14	挥发酚	0.1		
CN	0.037	NH ₃ -N	0.97		

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 2012—2016 年清水河汛期水质分析

清水河水样中 12 种化学污染物的浓度范围及特点主要有:2012—2016 年汛期 7 个研究断面 As、Hg 的浓度均未超出最低检出限($0.0005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.00002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其它污染物在一些断面有检出,其浓度值见表 4.对照地表水环境质量标准(GB3838—2002),清水河贺家湾水库和二十里铺的水质均达到 II 类水质标准,原州的水质达到 III 类水质标准,其他断面水质指标中的 NH₃-N(沈家河水库、韩府湾、王团、泉眼山)、氟化物(沈家河水库、韩府湾、王团、泉眼山)、Cd(韩府湾、王团、泉眼山)、Pb(王团和泉眼山)以及挥发酚(沈家河水库)的浓度在个别年份超过地表 III 类水质标准,其它指标均符合地表 III 类水质标准.由此可见,清水河从源头流经的途中水质受到了污染.

表 4 清水河 2012—2016 年汛期 7 个研究断面的水质指标浓度

Table 4 Water quality index concentration of seven study sections in 2012—2016 flood seasons of Qingshui River

水质指标 Water quality index	贺家湾水库 Hejiawan reservoir	二十里铺 Ershilipu	原州 Yuanzhou	沈家河水库 Shenjiahe reservoir	韩府湾 Hanfuwan	王团 Wangtuan	泉眼山 Quanyanshan
As	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≤0.014	≤0.007	≤0.012
NH ₃ -N	0.11—0.33	0.05—0.49	0.25—0.95	1.54—41.9	0.75—8.9	0.67—10.5	0.80—11.3
CN	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	≤0.006	≤0.012
挥发酚	≤0.002	<0.002	<0.002	≤0.092	<0.002	≤0.002	≤0.003
Hg	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002
Pb	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.10	≤0.15
Cu	<0.001	≤0.02	≤0.007	≤0.004	≤0.011	0.003—0.026	≤0.032
Fe	<0.03	<0.03	≤0.03	≤0.19	≤0.10	≤0.10	<0.03
Zn	<0.05	<0.05	<0.05	≤0.05	≤0.35	0.09—0.76	≤0.06
Mn	<0.01	<0.01	<0.01	≤0.80	≤0.12	0.02—0.11	0.04—0.16
氟化物	0.06—0.56	0.46—0.85	0.55—0.88	1.04—2.39	1.20—2.51	1.15—2.20	1.23—1.47

注: As、Cd、CN、挥发酚、Hg、Pb、Cu、Fe、Zn、Mn 的最低检出限分别为: 0.0005、0.001、0.004、0.002、0.00002、0.01、0.001、0.03、0.05、0.01 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 清水河水环境化学污染物对儿童所致健康风险评价

为了比较分析清水河汛期水环境化学污染物通过不同暴露途径对儿童健康影响的特点,污染物浓度低于最低检出限的取其最低检出限,利用 US EPA 推荐、Streng 等提出的计算方法和评价模型,采用本研究得出的固原市儿童暴露参数,对其进行水环境健康风险评价和分析.

2.2.1 水环境化学污染物对儿童所致健康风险五年平均值

通过计算清水河水环境化学污染物通过各种暴露途径对儿童所致健康风险五年平均值(见表 5)可以看出:①化学污染物对儿童所致健康总风险的数量级在 10^{-5} — 10^{-4} 之间,其中在韩府湾(农村男童,城乡女童)、王团(城市女童)、泉眼山(城乡男童)超过美国环境保护署(US EPA)^[33] 推荐的最大可接受

风险水平 $1 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$, 整个流域化学污染物通过各种暴露途径对儿童所致健康总风险平均值大小为: 泉眼山 ($13.299 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$) > 韩府湾 ($11.160 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$) > 王团 ($8.611 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$) > 沈家河水库 ($4.777 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$) > 原州 ($4.764 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$) > 二十里铺 ($4.763 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$) > 贺家湾水库 ($4.762 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$), 下游韩府湾、王团、泉眼山为重点污染控制断面; ②化学污染物通过各种饮水途径对儿童所致健康风险: 总液体摄入途径 > 直接饮水途径 > 间接饮水途径, 其中直接饮水途径: 城市女童 > 城市男童 > 农村男童 > 农村女童, 间接、总液体摄入途径: 城市男童 > 城市女童 > 农村男童 > 农村女童; ③化学污染物通过皮肤接触途径所致健康风险: 所有涉水途径 > 淋浴途径, 其中淋浴途径: 城市女童 > 农村男童 > 农村女童 > 城市男童, 所有涉水途径: 城市女童 > 农村女童 > 农村男童 > 城市男童; ④化学污染物通过各种暴露途径对儿童所致健康总风险大小特点为: 城市女童 > 农村女童 > 农村男童 > 城市男童, 由此可见在同样的污染水平下, 儿童所面临的健康风险: 女童 > 男童, 皮肤接触途径 > 饮水途径. 以往人们在研究水环境健康风险时, 往往只考虑淋浴、直接饮水途径, 忽略了除淋浴以外的其他皮肤接触途径和间接饮水途径, 这样很大程度上低估了水环境污染对人体健康的影响. 因此, 研究水环境健康风险不仅要考虑饮水途径还要考虑皮肤接触途径, 既不能忽略间接饮水, 也不能用淋浴途径就简单代替所有的皮肤接触途径.

表 5 水环境化学污染物对儿童所致健康风险五年平均值

Table 5 Five-year average health risk to children caused by chemical pollutants in the water environment

断面 Section	儿童 Children	饮水途径 ($\times 10^{-5}$) Drinking water way/ a^{-1}			皮肤接触途径 ($\times 10^{-5}$) Dermal contact way/ a^{-1}		总风险 ($\times 10^{-5}$) Total risk/ a^{-1}
		直接饮水 Direct drinking water	间接饮水 Indirect drinking water	总液体摄入 Total fluid intake	淋浴 Shower	所有涉水行为 All water-related activities	
贺家湾水库	城市男童	1.099	0.726	1.825	0.910	2.172	3.997
	农村男童	1.020	0.577	1.596	1.057	2.991	4.587
	城市女童	1.109	0.637	1.745	2.751	3.886	5.631
	农村女童	0.919	0.557	1.477	1.033	3.356	4.833
二十里铺	城市男童	1.099	0.726	1.825	0.911	2.172	3.997
	农村男童	1.020	0.577	1.597	1.058	2.991	4.588
	城市女童	1.109	0.637	1.746	2.751	3.887	5.633
	农村女童	0.920	0.557	1.477	1.033	3.357	4.834
原州	城市男童	1.099	0.726	1.825	0.911	2.173	3.998
	农村男童	1.020	0.577	1.597	1.058	2.992	4.589
	城市女童	1.109	0.637	1.746	2.752	3.888	5.634
	农村女童	0.920	0.557	1.478	1.033	3.358	4.836
沈家河水库	城市男童	1.102	0.728	1.830	0.913	2.179	4.009
	农村男童	1.023	0.578	1.601	1.061	3.000	4.601
	城市女童	1.112	0.639	1.751	2.759	3.898	5.649
	农村女童	0.922	0.558	1.481	1.036	3.367	4.848
韩府湾	城市男童	2.575	1.701	4.272	2.133	5.093	9.365
	农村男童	2.390	1.352	3.738	2.478	7.012	10.75
	城市女童	2.598	1.492	4.086	6.432	9.110	13.20
	农村女童	2.154	1.305	3.459	2.420	7.869	11.33
王团	城市男童	1.987	1.313	3.298	1.646	3.929	7.227
	农村男童	1.845	1.043	2.886	1.912	5.409	8.295
	城市女童	2.005	1.151	3.155	4.970	7.028	10.18
	农村女童	1.662	1.007	2.670	1.867	6.070	8.74
泉眼山	城市男童	3.068	2.027	5.090	2.542	6.069	11.16
	农村男童	2.848	1.611	4.455	2.952	8.356	12.81
	城市女童	3.095	1.778	4.868	7.664	10.86	15.73
	农村女童	2.567	1.555	4.121	2.883	9.376	13.50

2.2.2 水环境化学污染物对儿童所致健康风险流域平均值

根据 2012—2016 年清水河水环境化学污染物通过各种暴露途径所致健康风险流域平均值(见表 6)可以看出:①整个流域化学污染物对儿童所致健康风险流域均值在 2013 年(城乡男、女童总风险,城市女童皮肤暴露风险)和 2015 年(农村男童总风险,城乡女童总风险)超出 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$;②化学污染物通过饮水途径对儿童所致健康风险:城市男童>城市女童>农村男童>农村女童,皮肤接触途径:城市女童>农村女童>农村男童>城市男童,总风险:城市女童>农村女童>农村男童>城市男童,可见流域周边女童所面临的水环境健康风险高于男童;③整个流域化学污染物通过各种暴露途径对儿童所致健康风险大小均为:2013 年>2015 年>2016 年>2012 年>2014 年,由此可见,2013 年和 2015 年清水河汛期水环境质量相对其他年份较差。

表 6 水环境化学污染物对儿童所致健康风险流域平均值

Table 6 Watershed average of health risk to children caused by chemical pollutants in water environment

年份 Year	性别 Gender	城市儿童健康风险($\times 10^{-5}$) Urban children's health risk/ a^{-1}			农村儿童健康风险($\times 10^{-5}$) Rural children's health risk/ a^{-1}		
		饮水 Drinking water	皮肤接触 Dermal contact	总风险 Total risk	饮水 Drinking water	皮肤接触 Dermal contact	总风险 Total risk
2012	男	1.828	2.176	4.004	1.599	2.996	4.595
	女	1.748	3.893	5.641	1.480	3.362	4.842
2013	男	4.738	5.649	10.39	4.146	7.777	11.92
	女	4.531	10.10	14.63	3.836	8.727	12.56
2014	男	1.827	2.174	4.001	1.598	2.994	4.592
	女	1.747	3.891	5.638	1.479	3.360	4.839
2015	男	4.039	4.814	8.853	3.535	6.628	10.16
	女	3.863	8.611	12.47	3.270	7.437	10.71
2016	男	1.829	2.178	4.007	1.601	2.999	4.600
	女	1.750	3.896	5.646	1.481	3.365	4.846

2.2.3 水环境化学污染物通过各种皮肤接触途径对儿童身体各部位所致健康风险

以清水河源头贺家湾水库 2012—2016 年汛期化学污染物通过皮肤接触途径所致健康风险为例,分析化学污染物通过各种涉水行为对身体各部位皮肤所致健康风险的大小特点(见表 7),其中城市男童:手部>脸>头部=躯干>腿>脚>头皮>手臂,农村男童:头部>脸>手部>躯干>腿>脚>头皮>手臂,城市女童:躯干>腿>脸>头部>手臂=手部>脚>头皮,农村女童:头部>脸>手部>躯干>腿>脚>头皮>手臂,由此可见,头部、脸及手是儿童健康风险较高的身体部位,主要因为这些部位的涉水频率比较高.研究发现虽然是相同年龄段的儿童,由于性别、饮食、生活习惯的不同,造成同样的污染物通过皮肤接触途径对不同区域儿童的健康风险不同,而且同一个儿童,身体各部位由于接触水的频率和面积不同从而导致身体各部位的健康风险也不同。

表 7 贺家湾水库化学污染物通过皮肤接触途径对儿童身体各部分所致健康风险五年平均值

Table 7 Five-year average of health risk caused by chemical pollutants from the Hejiawan

Reservoir to all parts of the children's body through dermal contact

儿童 Children	全身 ($\times 10^{-5}$) Whole body/ a^{-1}	头部 ($\times 10^{-5}$) Head/ a^{-1}	躯干 ($\times 10^{-5}$) Trunk/ a^{-1}	手臂 ($\times 10^{-5}$) Arms/ a^{-1}	手部 ($\times 10^{-5}$) Hands/ a^{-1}	腿 ($\times 10^{-5}$) Legs/ a^{-1}	脚 ($\times 10^{-5}$) Feet/ a^{-1}	脸部 ($\times 10^{-5}$) Face/ a^{-1}	头皮 ($\times 10^{-5}$) Scalp/ a^{-1}
城市男童	2.172	0.312	0.312	0.122	0.413	0.240	0.237	0.395	0.142
农村男童	2.991	0.727	0.364	0.142	0.468	0.267	0.199	0.644	0.179
城市女童	3.886	0.431	0.945	0.371	0.371	0.710	0.321	0.518	0.220
农村女童	3.356	0.889	0.356	0.138	0.479	0.260	0.248	0.786	0.201

从清水河水环境健康风险评价结果可以看出,在同样的污染背景下,不同儿童群体面临的健康风险有所不同,其中主要体现在:①化学污染物通过各种饮水途径对城市儿童所致健康风险均高于其对农村儿童所致健康风险,主要因为城市儿童的各种饮水摄入量均高于农村儿童,饮水暴露风险的构成也主要取决于饮水摄入率的构成;②化学污染物通过各种皮肤接触途径对不同儿童群体所致健康风险均不同,主要因为皮肤暴露途径影响因素较多,比较复杂.从而说明在进行区域水环境健康风险研究时,尽可能考虑所有的暴露途径,采用目标人群的暴露参数,以减少评价结果误差,降低不确定性.本研究的评价结果存在一定程度的不确定性,主要来自于:①污染物浓度分布的不确定性,主要受流域水量的季节变化影响;②评价中未考虑放射性物质对儿童健康危害的风险;③儿童饮水、皮肤暴露参数的研究过程中也存在一定程度的不确定性.

从本研究可以看出,无论从汛期水质分析,还是流域水环境健康风险评价,研究结果都表明清水河从其发源地流经途中,水环境受到了污染.清水河水污染主要是由于近年来随着流域经济的发展,沿岸城市及村庄的需水量及污染排放量都在不断增加,城市污水处理和中水回用系统建设不完善,部分淀粉加工废水不能达标排放,一些企业深度治理进展缓慢,畜禽养殖场废水处理设施不全.因此,清水河流域应加强城镇生活污水处理能力的提升,加大对重点行业水污染和村庄生活污染的治理力度,取缔、整治流域沿线排污口,加强清水河流域水环境综合治理.

3 结论 (Conclusion)

(1) 依据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)规定的标准限值,清水河汛期上游等 3 个研究断面水质相对较好,达到三类及以上水质,中下游等 4 个研究断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、挥发酚、氟化物、Cd 及 Pb 的浓度超过水质标准限值,而 As、CN、Hg、Cu、Fe、Zn 及 Mn 的浓度均未超过水质标准限值,清水河从源头流经的途中水质受到了污染.

(2) 对研究区儿童夏季暴露参数研究表明,由于区域、性别、城乡、饮食、生活习惯等不同,使得不同儿童群体饮水、皮肤暴露参数存在明显的差异性.其中研究区城市儿童的直接、间接及总液体摄入率的算数均值均高于农村儿童,而且不同儿童群体其饮水摄入率的构成也不同.不同儿童群体皮肤暴露参数中的皮肤比表面积、涉水行为频率及持续时间均不同,其中全身皮肤比表面积:城市男童>城市女童>农村男童>农村女童.

(3) 清水河水环境健康风险评价结果表明,在同样的污染背景下,流域不同儿童群体面临的健康风险水平和构成不同,主要取决于饮水摄入率、皮肤暴露参数及与水介质相关的主要暴露活动、频率、持续时间.研究区儿童所面临的健康风险特点:城市女童>农村女童,农村男童>城市男童,女童>男童,皮肤接触途径>饮水途径,头部、脸及手是儿童健康风险较高的身体部位.清水河水环境化学污染物对儿童所致健康总风险的数量级在 10^{-5} — 10^{-4} a^{-1} 之间,总体上从源头到黄河入河口在逐渐增大,其中下游韩府湾、王团及泉眼山断面超过 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,为重点污染控制断面,整个流域 2013 年和 2015 年水环境质量相对其他年份较差.

清水河是宁夏境内流入黄河最大的支流,也是固原市的母亲河,其水体有些污染物能够达到水质目标但却存在潜在的健康风险,应采取必要措施减少低剂量暴露对儿童的健康损害.在进行饮水、皮肤接触途径暴露评估时,不仅要准确监测水环境污染物的浓度,也要重视饮水、皮肤暴露参数的调查研究.由于同样的环境污染物暴露剂量对儿童会产生更严重且持久的损害,因此其饮水、皮肤暴露参数的研究和健康风险评价应引起重视,研究人员、政策制定者及社会的方方面面都应当关注水环境健康风险,保证儿童的健康成长和社会的可持续发展.

参考文献 (References)

- [1] 陈鹏飞,王晓峰.缺水型城市水资源利用探讨[J].水利与建筑工程学报,2010, 8(6):84-86.
CHEN P F, WANG X F. Study on water resources utilization in water shortage cities[J].Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(6):84-86(in Chinese).
- [2] 顾伟栋,傅华,叶细标.环境污染物与儿童健康的关系[J].环境与职业医学,2006, 23(4):345-348.

- GU W D, FU H, YE X B. Study on the relationship between environmental pollutants and children's Health[J]. *J Environ Occup Med*, 2006, 23(4):345-348 (in Chinese).
- [3] 唐春宇. 沙颍河某县断面铅、镉污染对儿童生长发育及智力的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 1-46.
TANG C Y. Effects of lead and cadmium pollution in a town along SY River on child growth and intelligence[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012: 1-46 (in Chinese).
- [4] 谭明, 孙贤, 陈冬青, 等. 环境污染对儿童健康的危害[J]. *中国卫生工程学*, 2005, 4(2): 116-117.
TANG M, SUN X, CHEN D Q, et al. Harm of environmental pollution to children's health [J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2005, 4(2): 116-117 (in Chinese).
- [5] 季成叶. 中国青少年健康相关/危险行为调查综合报告 2005[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2007: 2-58.
JI C Y. Comprehensive report on china's adolescent health related/dangerous behavior survey 2005[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2007: 2-58 (in Chinese).
- [6] 张惠惠, 陈红, 焦永杰, 等. 饮用水功能区水环境健康风险阈值体系研究[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(7): 88-93.
ZHANG X H, CHEN H, JIAO Y J, et al. Study on the water environmental health risk threshold system of drinking water function areas [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, 37(7): 88-93 (in Chinese).
- [7] US EPA. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment[R]. Washington: US EPA, 2005: 18-27.
- [8] 黄奕龙, 王仰麟, 谭启宇. 城市饮用水源地水环境健康风险评价及风险管理[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 162-167.
HUANG Y L, WANG Y L, TAN Q Y, et al. Environmental health risk assessment and management for urban water supply sources [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 162-167 (in Chinese).
- [9] BROWN H, BISHOP D, ROWAN C. The role of skin absorption as a route of exposure for volatile organic compounds (VOCs) in drinking water[J]. *American Journal of Public Health*, 1984, 74(5): 479-484.
- [10] 段小丽, 王宗爽, 王贝贝, 等. 我国北方某地区居民饮水暴露参数研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(9): 1216-1220.
DUAN X L, WANG Z S, WANG B B, et al. Drinking water-related exposure factors in a typical area of northern China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(9): 1216-1220 (in Chinese).
- [11] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(4): 370-373.
DUAN X L, NIE J, WANG Z S, et al. Human exposure factors in health risk assessment [J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(4): 370-373 (in Chinese).
- [12] US National Research Council. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process[M]. Washington: National Academy Press, 1983: 1-16.
- [13] 李如忠, 石勇, 王玉锋. 淮河蚌埠段水环境健康风险评价[J]. *水电能源科学*, 2008, 26(2): 37-40.
LI R Z, SHI Y, WANG Y F. Water environmental health risk assessment for Bengbu Reach in Huaihe River [J]. *Water Resource and Power*, 2008, 26(2): 37-40 (in Chinese).
- [14] 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1177-1184.
LI Y L, LIU J L. Health risk assessment on heavy metal pollution in the water environment of Luan River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1177-1184 (in Chinese).
- [15] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(1): 74-79.
NI B, WANG H B, LI X D, et al. Water environmental health risk assessment in lake sources of drinking water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(1): 74-79 (in Chinese).
- [16] 韩芹芹, 王涛, 杨永红. 乌鲁木齐市主要饮用水源地水质健康风险评价[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(1): 57-63.
HAN Q Q, WANG T, YANG Y H. Environmental health risk assessment of the main drinking water sources of Urumqi [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(1): 57-63 (in Chinese).
- [17] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 158-180.
HU E B. Environmental risk assessment practical techniques and methods [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000: 158-180 (in Chinese).
- [18] WONGSASUK P, CHOTPANTARAT S, SIRIWONG W, et al. Heavy Metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural Area in Ubon Ratchathani Province, Thailand [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, 36(1): 169-182.
- [19] KARIM Z, QURESHI B A. Health risk assessment of heavy metals in urban soil of Karachi, Pakistan [J]. *Human and Ecological Risk Assessment (an International Journal)*, 2014, 20(3): 658-667.
- [20] IAN R. Falconer, ANDREW R. Humpage. Health risk assessment of cyanobacterial (blue-green algal) toxins in drinking water [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2005, 2(1): 43-50.
- [21] EPA. Supplement risk assessment Part I. Guidance for Public Health Risk Assessment[S]. EPA.601/5289- 2001, 1989.
- [22] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A) Interim Final [R]. Washington: EPA, 1989: 58-88.
- [23] STRENGE D L, CHAMBERLAIN P J. Multimedia Environmental Pollutant Assessment System: Exposure Pathway and Human Health

- Impact Assessment Models[R]. Washington; Pacific Northwest National Laboratory, 1995;23-30.
- [24] US EPA. Exposure factors handbook[S]. Washington; USEPA, EPA/600/P-95/002, 1997;104-126.
- [25] 黄楠,郑婵娟,段小丽,等.饮水暴露健康风险评估中的水摄入量[J].环境与健康杂志,2012,29(2):109-114.
HUANG N,ZHENG C J, DUAN X L, et al. Water intake rate in health risk assessment for drinking water exposure[J].J Environ Health, 2012,29(2):109-114(in Chinese).
- [26] 徐雪萌,屈凌波,徐芸.基于层析分析法的面制主食杀菌及包装生产线设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(9):219-224.
XU X M, QU L B, XU Y. Design and experiment of aseptic packaging line of staple wheat food with analytic hierarchy process method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2016,32(9):219-224(in Chinese).
- [27] 邓灵珠.大米蒸煮与米饭物性及食味形成机理[D].郑州:河南工业大学,2012:33-40.
DENG L Z. The relation of rice cooking and texture properties and taste mechanism of cooked rice[D].Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012;33-40(in Chinese).
- [28] 段小丽.暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评估中的应用[M].北京:科学出版社,2012:1-22,35-56.
DUAN X L. Research methods of exposure factors and its application in environmental health risk assessment[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-22,35-56(in Chinese).
- [29] 段小丽,张文杰,王宗爽,等.我国北方某地区居民涉水活动的皮肤暴露参数[J].环境科学研究,2010,23(1):55-61.
DUAN X L, ZHANG W J, WANG Z S, et al. Water-related activity and dermal exposure factors of people in typical areas of northern China [J].Research of Environmental Sciences,2010,23(1):55-61(in Chinese).
- [30] US EPA. Human Health Evaluation Manual Supplemental Guidance;Standard Default Exposure Factors [R].Washington; US EPA, 1991; 3-7.
- [31] 杨全锁,郑西来,许延营,等.青岛市黄岛区饮用水源健康风险评价[J].安全与环境学报,2008,8(2):83-86.
YANG T S, ZHENG X L, XU Y Y, et al. Health-hazard assessment for the urban water supply sources in Huangdao District of Qingdao [J].Journal of Safety and Environment,2008,8(2):83-86(in Chinese).
- [32] 杜维,李爱民,鲁敏,等.长江武汉段水质重金属健康风险初步评价[J].环境科学与技术,2014,37(120):535-539.
DU W, LI A M, LU M, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the Yangtze River of Wuhan Area[J].Environmental Science and Technology, 2014,37(120):535-539(in Chinese).
- [33] US EPA. Superfund Public Health Evaluation Manual[R].Washington; US EPA, 1986;121-138.