

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018020402

田莘冉, 丁文广, 张慧琳 等. 2011—2015 年甘肃省部分区域水环境健康风险评估[J]. 环境化学 2019, 38(1): 142-151.

TIAN Xinran , DING Wenguang , ZHANG Huilin , et al. Water environment health risk assessment in part of Gansu Province from 2011 to 2015 [J]. Environmental Chemistry 2019, 38(1): 142-151.

2011—2015 年甘肃省部分区域水环境健康风险评估*

田莘冉¹ 丁文广^{1**} 张慧琳¹ 许丹阳¹ 郭学源²

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000; 2. 兰州理工大学设计艺术学院, 兰州, 730000)

摘要 本工作基于 2011—2015 年甘肃省中部、东南部、西北部、东部等 8 座城市所属 3 大流域 12 个断面的江河实测水质数据, 建立了水环境健康风险评估模型。研究发现, 各断面 Cr(VI) 的健康风险最高; 5 年间环境健康总风险、非致癌物风险及化学致癌物风险最高的断面为泾河平凉段、渭河天水段及泾河平凉段; 各断面非致癌物风险均明显小于化学致癌物健康风险值; 12 个断面 5 年的环境总风险均未超过美国环境保护署规定的最大可接受风险水平, 但也均未达到可忽略风险水平, 其中泾河平凉段最高, 渭河天水段最低。

关键词 甘肃省, 水环境质量, 水环境健康风险评估。

Water environment health risk assessment in part of Gansu Province from 2011 to 2015

TIAN Xinran¹ DING Wenguang^{1**} ZHANG Huilin¹ XU Danyang¹ GUO Xueyuan²

(1. College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China;

2. School of Design Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Based on the measured water quality data of 12 rivers in the three major river basins in eight cities in the central, southeastern, northwestern, and eastern parts of Gansu Province from 2011 to 2015, a water environmental health risk assessment model was established. It was found that the health risk caused by Cr(VI) in all sections was the highest. The sections with the health risk caused by all the pollutants, non-carcinogens and chemical carcinogens during the five-year period were Jing River in Ping Liang, Wei River in Tian Shui and Jing River in Ping Liang. The risk caused by the non-carcinogens in each section was significantly less than the health risk caused by the chemical carcinogens in the section at the same time. The total risk of water environment in 12 sections in 2011—2015 didn't exceed the maximum acceptable risk level set by the USEPA, but neither of them met the negligible risk level. Among them, Jing River in Pingliang had the highest risk, and Wei River in Tian Shui had the lowest risk.

Keywords: Gansu Province, water environment quality, water environmental health risk assessment.

水是人类生产和生活不可或缺的自然资源之一, 健康的水环境是满足人类日益增长的美好生态环境需要的优质生态产品。水环境安全关系到人类健康, 有研究表明, 我国 90% 的癌症患者是由于接触致

2018 年 2 月 4 日收稿(Received: February 4, 2018) .

* 软科学专项(17CX1ZA041), 甘肃社会科学学术活动基金, 国家社会科学基金(16BSH135) 和国家科技支撑计划课题(2012BAC19B09) 资助。

Supported by Soft Science Research Program (17CX1ZA041), Gansu Social Science Academic Activities Fund, National Social Science Fund (16BSH135) and National Science and Technology Support Program (2012BAC19B09) .

** 通讯联系人, Tel: 0931-8915589, E-mail: wgding@lzu.edu.cn

Corresponding author, Tel: 0931-8915589, E-mail: wgding@lzu.edu.cn

癌物质而引发疾病^[1],全球每年有超过 80 万人死于饮用和直接接触污染水体.非洲、亚洲和拉丁美洲每年有近 350 万人死于与水有关的疾病,这一数字超过了全球每年艾滋病、车祸的死亡总人数^[2],故对水环境的研究和改善是保障人类健康生活的关键.

环境健康风险模型不同于普通水质评价中根据国家、当地水质标准划定水体水质级别的单一的水质评价方法,而是将水体污染与人体健康定量联系起来,从而直观描述人体暴露在环境中时,受到污染物产生的危害,同时也是收集、整理和解释各种毒理学、人群流行病学等相关资料的过程^[3-10].以美国为首的西方国家在环境风险评价领域取得了些许成果,20 世纪 80 年代美国国家科学院(NAS)出版了红皮书——《联邦政府的风险评价:管理程序》;随后美国环保局(USEPA)在此基础上制定了一系列健康风险评价导则、指南和技术性文件,使得水环境安全对人体健康的威胁有了清晰明确的研究方向^[17-19].一些国外学者在现有研究基础上通过药理学、病理学等角度对地表水、饮用水等进行了环境健康风险评价研究^[20-23];我国环境健康风险评价研究起于 1990s,众多学者对北京、湖南、贵州、天津、广西、江苏、河北及新疆等地区的河流湖泊、城市与农村的饮用水源地等进行了研究^[16, 24-29],但大部分都局限于短时间跨度、小水域范围,环境健康风险的时空影响分析不够充分;甘肃省是黄河的重要流经之处,其地域范围内的三大内陆河流域——石羊河、疏勒河及黑河世代代养育着河西走廊的人们,其中祁连山更是我国西北地区的重要生态屏障,保护甘肃省水环境健康对于保障我国西部地区生态安全问题有重要意义.但目前甘肃省相关水环境健康方面的研究很少,特别是水环境健康风险评价方面的研究几乎空白.同时,甘肃省现有的 119 个城镇集中式饮用水水源地中,大都基于黄河、渭河、白龙江等甘肃省重要流域水系建立^[30],所以对甘肃省重要水系水环境健康风险评价研究是甘肃省饮用水安全重要保障的关键前提.故本文基于甘肃省 2011—2015 年间 8 个城市 12 个江河断面的水体物理、化学指标等监测数据,进行水体水环境健康风险评价,对于研究本地水体对于人类健康危害的风险及水环境优先重点治理等工作提供一定的理论基础.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

甘肃省位于中国西北内陆中腹地,全省降水稀少且分布极为不均,年蒸发量远大于降水量^[11],地表水资源较为稀缺,分布也相对不平衡.甘肃省的水资源主要分属于三大流域——黄河流域、长江流域及内陆河流域.其中长江流域地少水多、地高水低,属于为丰水区;黄河流域地多水少、地高水低,属于缺水;内陆河流域是甘肃省内面积最大,地表水最少,但却方便利用的地区^[12].因此本文特选择分布在甘肃省中部、东南部、西北部、东部等 8 座城市,所属三大流域的江河作为监测断面,分析甘肃省整体水环境健康风险分布情况,各断面详细情况见表 1.

表 1 监测断面编号及分布情况

Table 1 Number and distribution of the monitoring sections

断面编号 Section number	城市 City	地理位置 Geographic location	河流名称 River	所属流域 Basin
1 [#]	兰州	甘肃省中部	黄河	黄河流域
2 [#]	白银	甘肃省中部	黄河	黄河流域
3 [#]	白银	甘肃省中部	黄河	黄河流域
4 [#]	天水	甘肃省东南部	渭河	黄河流域
5 [#]	天水	甘肃省东南部	渭河	黄河流域
6 [#]	张掖	甘肃省西北部	黑河	内陆河流域
7 [#]	张掖	甘肃省西北部	黑河	内陆河流域
8 [#]	嘉峪关	甘肃省西北部	北大河	内陆河流域
9 [#]	嘉峪关	甘肃省西北部	北大河	内陆河流域
10 [#]	陇南	甘肃省东南部	白龙江	长江流域
11 [#]	平凉	甘肃省东部	泾河	黄河流域
12 [#]	平凉	甘肃省西南部	黄河	黄河流域

1.2 样品采集与处理

本文根据地表水和污水监测技术规范(HJ/T 91—2002)的相关规定对 12 个研究断面的水体进行采样、保存及分析.在每年的 3 月、9 月月初进行采样,以每年的两次监测结果的均值作为该年的监测数据.实验主要仪器包括:Agilent 7700X 电感耦合等离子体质谱仪、Evolution 300 紫外可见分光光度计等;采取 ICP-MS 法对样品中的砷、镉、汞、铅及铜进行检测,年均 RSD 分别为 2.3%、2.0%、2.8%、1.2%、1.8%;利用二苯碳酰二肼分光光度法测定水体中的六价铬,年均 RSD 为 0.98%;利用氟试剂分光光度法测定水体中的氟化物,年均 RSD 为:4.7%;利用纳氏试剂比色法测定水体中的氨氮,年均 RSD:2.3%;利用紫外分光光度法测定水体中的挥发酚与氰化物,年均 RSD 分别为:3.1%、4.6%.所有实验过程均设置多个平行样检测,以保证数据的准确性和可靠性.

1.3 水环境健康风险评估模型

水环境健康风险评估研究中的有毒物质分为基因毒物质和躯体毒物质^[13].基因毒物质包含化学致癌物和放射性污染物,但水体中能检测出的放射性污染物极少,所以对基因毒物质的研究只考虑化学致癌物;而躯体毒物质是指化学毒物质和非致癌物,有研究表明非致癌污染物达到一定阈值后会对人体健康产生危害,长期低剂量暴露仍对人体健康有害.故本研究综合 USEPA 提出的水环境健康风险评估模型与当前国内外现有研究方法,根据不同污染物对人体产生的不同影响^[14-16],建立水环境健康风险评估模型,计算方法见表 2.

表 2 水环境健康风险评估模型计算方法

Table 2 Calculation method of water environmental health risk assessment model

模型名称 Model name	计算公式 Calculation formula	说明 Description
化学致癌物健康风险模型	$Risk^c = \sum_{i=1}^k Risk_i^c$ $Risk_i^c = [1 - \exp(-D_i \times Q)] / Age$ $D_{i(j)} = 2.2 \times C_{i(j)} / 70$	①Risk _{i(j)} ^(c) 是指个人通过含有化学(非)致癌物 i(j) (共 k(l) 种)的饮水途径所得的评价致癌年风险,单位: a ⁻¹ ; ②D _{i(j)} 是指通过含有化学(非)致癌物 i(j) 的饮水途径的单位体重日均暴露剂量,单位: mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ ; ③2.2 是指成年人日均饮水量,单位: L; C _{i(j)} 是指化学(非)致癌物 i(j) 的浓度,单位: mg·L ⁻¹ ; 70 是指人平均体重,单位: kg; ④Q _i 是指通过含有化学致癌物 i 的饮水途径的化学致癌物 i 的致癌系数,单位: mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ ; ⑤RfD _j 是指非致癌物 j 通过饮食途径的参考剂量,单位: mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ ; ⑥Age 为人类平均寿命,在此研究中人类平均寿命取 70,单位: a.
非致癌物健康风险模型	$Risk^n = \sum_{j=1}^l Risk_j^n$ $Risk_j^n = (D_j \times 10^{-6} / RfD_j) / Age$ $D_{i(j)} = 2.2 \times C_{i(j)} / 70$	
水环境健康风险模型	Risk = Risk ^c + Risk ⁿ	Risk 即为水中的基因毒物质与躯体毒物质所造成的风险总和,不考虑协同作用等其他因素 ^[17] .

1.4 模型参数选择

根据 IARC 和 WHO 编制的分类系统以及众多学者的研究成果,本研究模型中化学致癌物包括砷(As)、镉(Cd)、六价铬(Cr(VI)),非致癌物主要包括氨氮(NH₃-N)、氟化物、挥发酚、汞(Hg)、铅(Pb)、铜(Cu)及氰化物.在此研究中,污染物致癌强度系数、非致癌物参考剂量根据 USEPA 出版的资料所确定,详见表 3、表 4.

表 3 化学致癌物强度系数

Table 3 Intensity factor of chemical carcinogen

化学致癌物 Chemical carcinogens	砷 Arsenic	镉 Cadmium	六价铬 Hexavalent chromium
Q _i / (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	15	6.1	41

表 4 非致癌物参考剂量

Table 4 Reference dose of non-carcinogen

非致癌物质 Non-carcinogen	氨氮 Ammonia nitrogen	氰化物 Cyanide	挥发酚 Volatile phenol	汞 Mercury	铅 Lead	铜 Copper	氟化物 Fluoride
RfD _j /(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	9.7×10 ⁻¹	3.7×10 ⁻²	1.0×10 ⁻¹	3.0×10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻³	5×10 ⁻³	0.06

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 化学致癌物环境健康风险分析

本文所建立的水体化学致癌物环境健康风险模型中考虑的水体中的基因毒物质有砷、六价铬等,不考虑水体中的放射性物质.2011—2015 年各断面水体化学致癌物质健康风险及变化情况见表 5、图 1.

表 5 2011—2015 年各断面水体化学致癌物质健康风险(1×10⁻⁴)Table 5 Health risk caused by the chemical carcinogens in each section from 2011 to 2015(1×10⁻⁴)

年份 Year	化学致癌物 Chemical carcinogens	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]
2011	As	0.0088	0.0070	0.0123	0.0007	0.0007	0.0011	0.0038	0.0034	0.0034	0.0438	0.0274	0.0040
	Cd	0.0009	0.0010	0.0013	0.0011	0.0011	0.0027	0.0027	0.0015	0.0015	0.0027	0.0027	0.0027
	Cr(VI)	0.0736	0.1840	0.1824	0.0184	0.0184	0.0736	0.0736	0.0736	0.0751	0.0736	0.4099	0.0736
2012	As	0.0090	0.0075	0.0109	0.0007	0.0007	0.0012	0.0032	0.0020	0.0020	0.0471	0.0313	0.0034
	Cd	0.0004	0.0012	0.0013	0.0011	0.0011	0.0027	0.0027	0.0005	0.0005	0.0017	0.0027	0.0027
	Cr(VI)	0.0736	0.1058	0.1043	0.0184	0.0184	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.3922	0.0736
2013	As	0.0069	0.0057	0.0089	0.0007	0.0007	0.0025	0.0058	0.0007	0.0007	0.0471	0.0279	0.0035
	Cd	0.0003	0.0013	0.0011	0.0093	0.0093	0.0027	0.0027	0.0003	0.0003	0.0003	0.0027	0.0027
	Cr(VI)	0.0736	0.1196	0.1211	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.3707	0.0813
2014	As	0.0049	0.0070	0.0095	0.0007	0.0007	0.0026	0.0053	0.0012	0.0013	0.0191	0.0240	0.0034
	Cd	0.0003	0.0016	0.0012	0.0110	0.0110	0.0027	0.0027	0.0023	0.0025	0.0002	0.0032	0.0027
	Cr(VI)	0.0736	0.1196	0.1211	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.3554	0.1273
2015	As	0.0066	0.0099	0.0109	0.0007	0.0007	0.0032	0.0057	0.0020	0.0020	0.0140	0.0232	0.0021
	Cd	0.0003	0.0018	0.0015	0.0110	0.0110	0.0006	0.0006	0.0004	0.0002	0.0002	0.0030	0.0027
	Cr(VI)	0.0736	0.0767	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.3707	0.0859

从表 5 和图 1 可以看出, Cr(VI) 所产生的健康风险最高, 占每年水体化学致癌物健康总风险的 85.58%—95.8%; 其中, Cr(VI) 最高健康风险为 0.4099×10⁻⁴, 最低健康风险为 0.0184×10⁻⁴, 均超过了瑞典环境保护局与荷兰建设和环境保护部所规定的水环境化学污染物最大可接受风险水平(1.0×10⁻⁶), 但没有超过 USEPA 所规定的最大可接受风险水平(1.0×10⁻⁴). 不同时间不同地点, As 和 Cd 产生的健康风险不一. 2011—2015 年 4[#]、5[#] 及 6[#] 断面水体化学致癌物健康风险由大到小依次为: Cr(VI) > Cd > As, 其余断面水体化学致癌物健康风险均为: Cr(VI) > As > Cd. 2011—2015 年各断面水体化学致癌物总体健康风险如图 2 所示.

由图 2 可知, 1[#]、6[#]、7[#]、8[#]、9[#] 断面健康风险波动较小, 年均变化率分别为: 1.88%、0.99%、1.71%、2.49%、3.14%. 5 年间致癌物健康风险最高的是 11[#], 该断面化学致癌物健康风险已达到其它断面的 3.73—6.91 倍, 年均变化率为 4.29%, 变化幅度相对明显. 从时间变化角度发现, 2011 年 11[#] 断面化学致癌物健康风险最高, 而 4[#] 与 5[#] 断面健康风险最低. 5 年间各断面化学致癌物年均健康风险变化情况如图 3 所示.

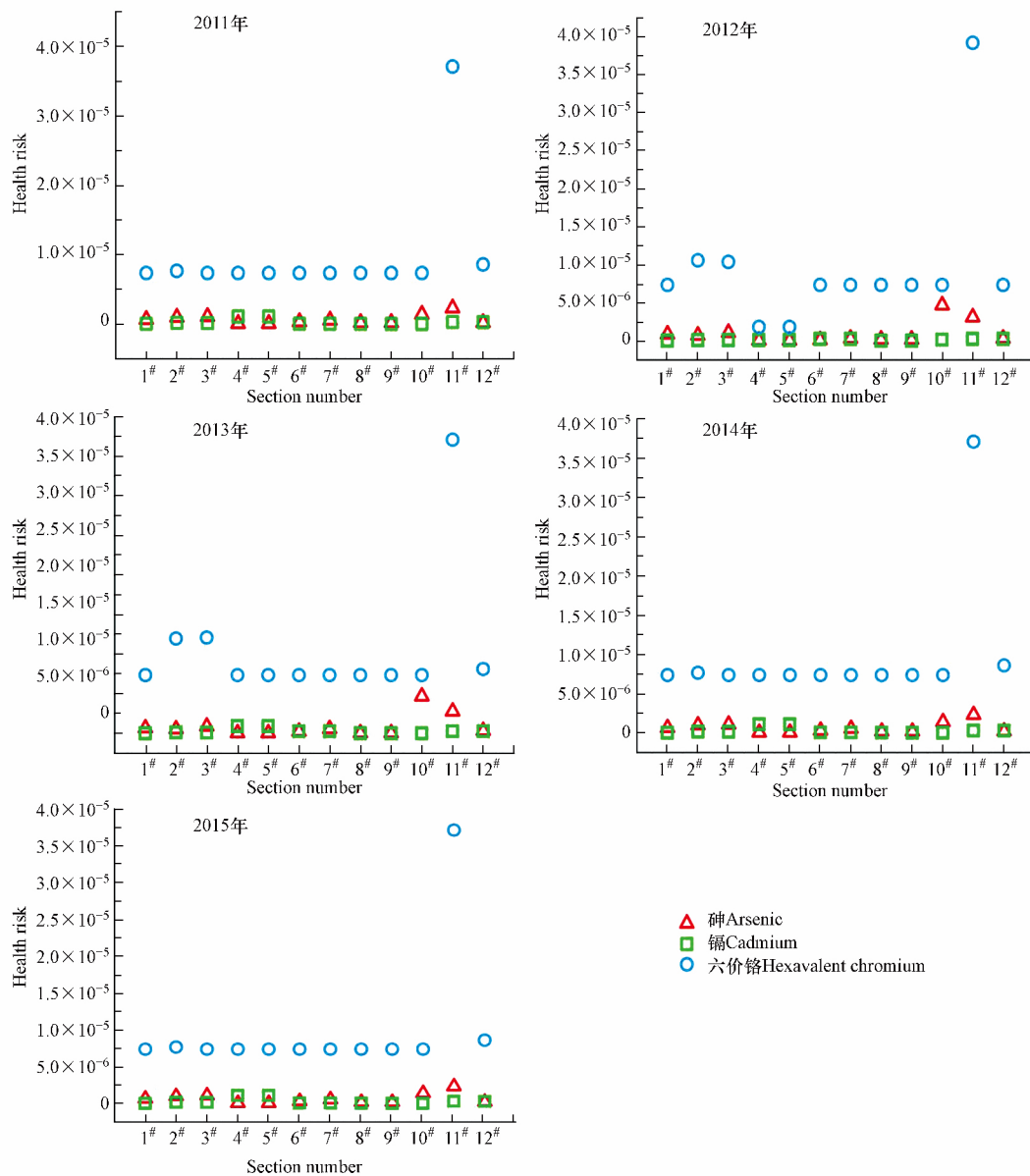


图1 2011—2015年每年各断面水体化学致癌物健康风险

Fig.1 Health Risk caused by the chemical carcinogens in each section during 2011—2015

由图3可知4[#]与5[#]在2011—2012年水体化学致癌物健康风险最低,2011年11[#]断面健康风险最高;1[#]、2[#]及3[#]断面致癌物健康风险呈先升高后降低的趋势;2013—2014年4[#]、5[#]与2011—2015年6[#]—9[#]各断面化学致癌物健康风险在 7.46×10^{-6} — 1.22×10^{-5} 之间波动,变化较小,均在USEPA规定的最大可接受风险水平之内($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$)。11[#]断面化学致癌物健康风险明显高于其他断面,已经接近USEPA规定的最大可接受风险水平。

2.2 非致癌物环境健康风险分析

本研究的非致癌物包括:氨氮、氰化物、挥发酚、汞、铅、铜及氟化物。2011—2015年各断面水体非致癌物产生的环境风险变化情况见图4。

由图4可以看出,5年间4[#]、5[#]断面铜产生的健康风险占非致癌物健康风险比例最高,平均占比为49.95%;12[#]断面铅产生的健康风险占比最高,为70.95%。其他断面占比最高的为氟化物,平均占比达51.91%。各断面非致癌物健康风险均未超瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部以及英国皇家协会规定的最大可接受风险水平($1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$)。并且五年内各断面氨氮、氰化物、挥发酚及汞的健康风险达到了

荷兰建设和环境保护部规定的可忽略风险水平($1 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$),即对人体产生的健康风险可以忽略不计. 2011—2015 年各断面水体非致癌物总年均风险的变化情况如图 5 所示.

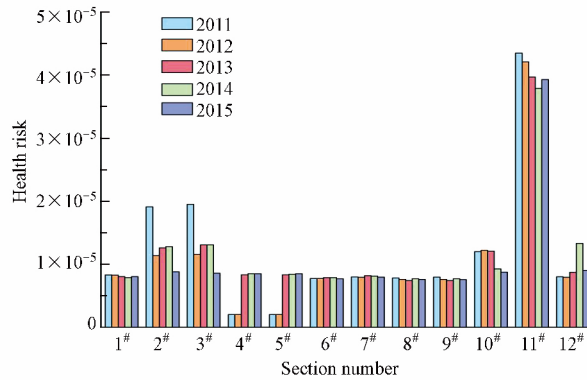


图 2 2011—2015 年各断面水体化学致癌物健康风险变化情况

Fig.2 Changes of health risk caused by the chemical carcinogens in each section during 2011—2015

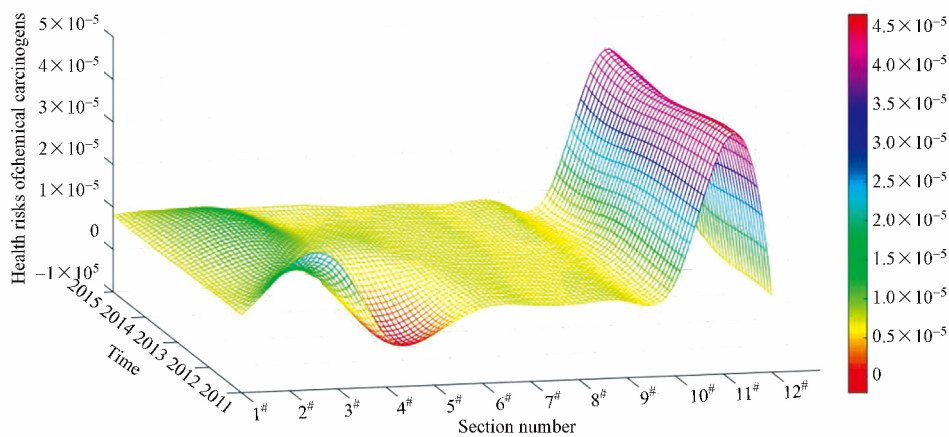


图 3 2011—2015 年各断面水体化学致癌物年均风险变化

Fig.3 Annual average risk caused by the chemical carcinogens in each section during 2011—2015

从图 5 可以看出,断面 4#、5# 及 11# 非致癌物总风险明显高于其他断面,从大到小依次为 $4\# > 5\# > 11\#$. 同时 4#、5# 断面健康风险都随时间变化剧烈,年变化率分别为 16.63%、7.84%; 2013 年 11# 断面非致癌物年均风险最高,2015 年 10# 断面健康风险最低,前者是后者的 4.964 倍.5 年间各断面非致癌物总风险均未超过英国皇家协会规定的可忽略风险水平,但 4#、5#、及 11# 健康风险已接近其上限.

2.3 水体环境总健康风险分析

水体环境健康总风险是化学致癌物和非致癌物产生风险的总和,能够反映水体环境对人体健康、动植物等产生的潜在风险.2011—2015 年各断面水体环境健康总风险时空变化如图 6 所示.

非致癌物的风险远远小于化学致癌物的健康风险,故总风险的变化趋势与致癌物风险的变化趋势大致相同.由图 6 可以看出,11# 断面 5 年的总风险均最高,年均风险为 4.10×10^{-5} ,3#、2# 次之,分别是 1.33×10^{-5} 、 1.30×10^{-5} .2011—2012 年 4#、5# 断面总风险最低(2.11×10^{-6}); 6#、7#、8# 及 9# 断面总风险趋于平稳,变化波动较小,最大年变化率为 5%.各断面 5 年的总风险虽超过了瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部及英国皇家协会规定的最大可接受风险水平($1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$),但未超过 USEPA 规定的最大可接受风险水平($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$).

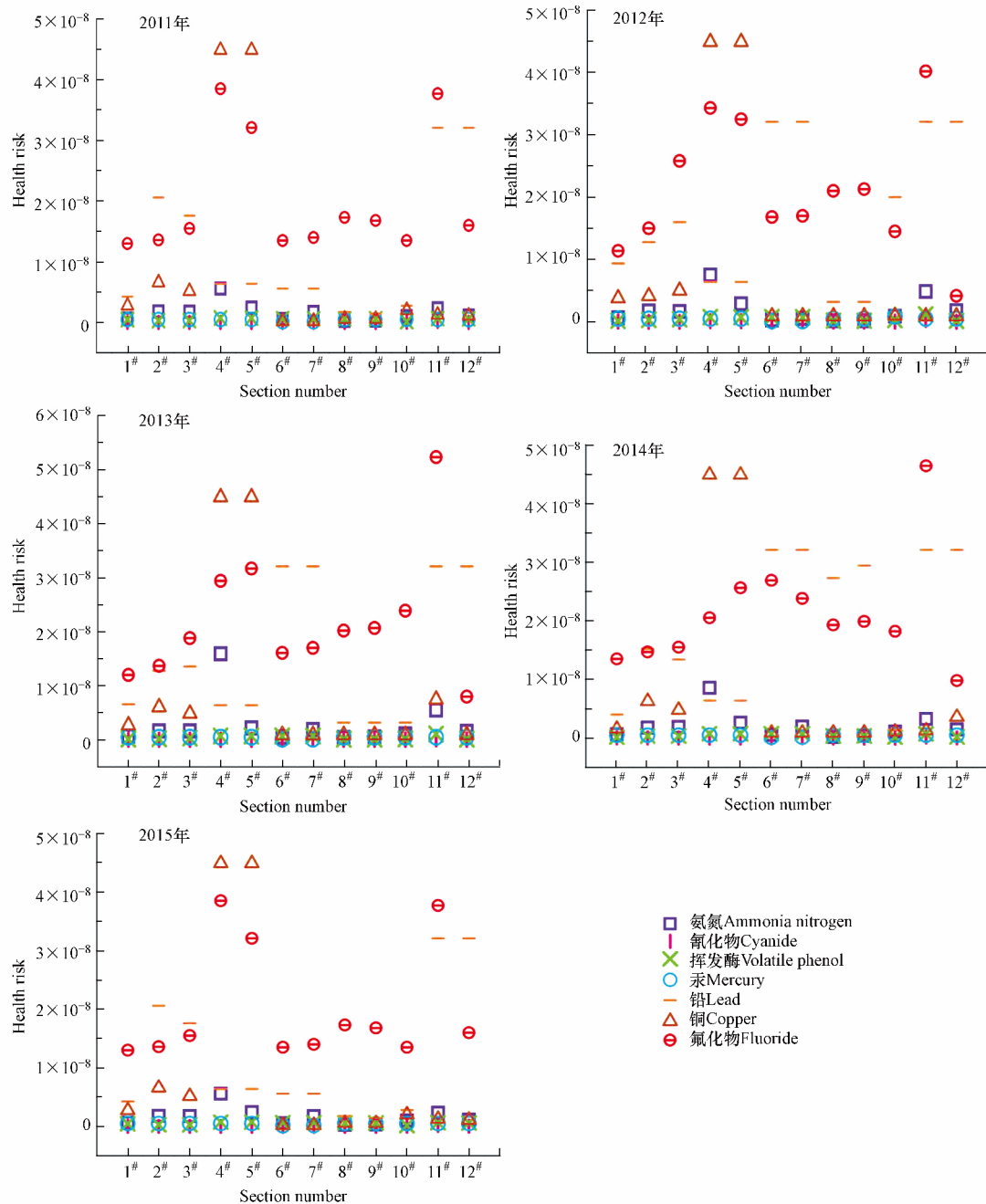


图4 2011—2015年每年各断面水体非致癌物环境健康风险

Fig.4 Health risk caused by the chemical non-carcinogen in each sections during 2011—2015

3 结论(Conclusion)

(1) 各断面化学致癌物中, Cr(VI) 环境健康风险最高, 尤其是泾河平凉段年均值是瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部及英国皇家协会所规定最大可接受风险水平的 37.98 倍, 但未超过规定的最大可接受风险水平, 这与当地自然资源、工业发展及政府决策等密切相关^[31]。

(2) 五年间各断面化学致癌物年均健康风险分布情况为: 泾河平凉段>黄河白银段>白龙江陇南段>黄河平凉段>黄河兰州段>黑河张掖段>北大河嘉峪关段>渭河天水段; 且均未超过国际辐射防护委员会(ICRP) 规定最大可接受风险($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) , 但超过了瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部及英国皇家协会所规定最大可接受风险水平($1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$) 。

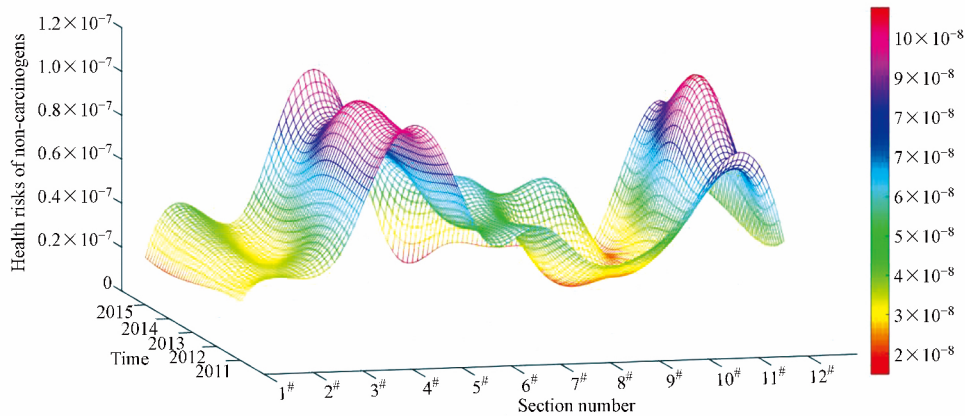


图 5 2011—2015 年各断面水体非致癌物年均风险

Fig.5 Annual average risk caused by the chemical non-carcinogen in each section during 2011—2015

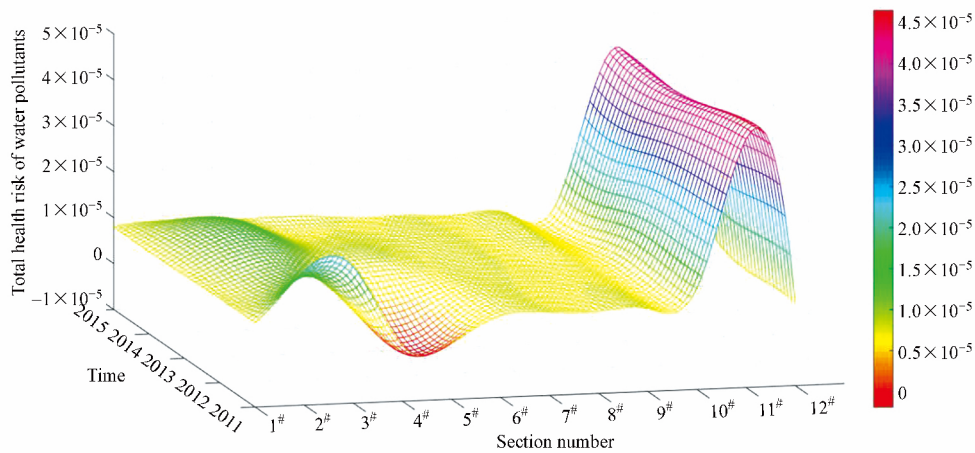


图 6 2011—2015 年各断面水环境总健康风险变化情况

Fig.6 Changes of total health risk caused by the water pollutants in each section during 2011—2015

(3) 各断面非致癌物风险以氟化物、铜及铅为主,此三者产生的环境风险之和占非致癌物总风险的 82%—98%;同时,各断面非致癌物风险均明显小于该断面同一时刻化学致癌物产生的健康风险值,渭河天水段与泾河平凉段处水体非致癌物健康风险已接近英国皇家协会规定的可忽略风险水平上限。

(4) 2011—2015 年 12 个断面总风险中,2011 年泾河平凉段最高,2011—2012 年渭河天水段最低,均未超过 USEPA 规定的最大可接受风险水平 ($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$),但也未达到可忽略风险水平,说明水体质量有待提高,水环境状况有待改善。

参考文献 (References)

- [1] 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: 69-70.
HU E B. Environmental risk assessment of practical technologies and methods [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000: 69-70(in Chinese).
- [2] WWAP. 2017. The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater[R]. Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2017.
- [3] U.S.EPA. The Risk Assessment Guidelines of 1986 [R]. EPA/600/18-87/045. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S.EPA, 1986.
- [4] 费尔曼,米德,威廉姆斯. 环境风险评价: 方法、经验和信息来源[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 188.
Fearman, Meader, Williams. Environmental risk assessment: Methods, experiences, and sources [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011: 188(in Chinese).
- [5] 秦波. 湖南省水环境健康风险评价[J]. 湖南水利水电, 2008(1): 69-71.

- QIN B. Evaluation of health risk of water environment in Hunan province [J]. *Hunan Water Resources and Hydropower*, 2008, 28(1): 69-71(in Chinese) .
- [6] 童建, 郭裕中. 公众健康危险评价[M]. 北京: 原子能, 1994: 58.
TONG J, GUO Y Z. Public health risk assessment [M]. Beijing: Atomic Energy, 1994: 58(in Chinese) .
- [7] 吴丰昌, 李会仙. 美国水质基准制定的方法学指南[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 156.
WU F C, LI H X. American guidelines for the development of water quality guidelines [M]. Beijing: Science Press, 2011: 156(in Chinese) .
- [8] 张光贵, 张屹. 洞庭湖区城市饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *环境化学*, 2017, 36(8): 1812-1820.
ZHANG G G, ZHANG Y. Evaluation of health risks of drinking water in urban drinking water sources in Dongting Lake area [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(8): 1812-1820(in Chinese) .
- [9] 谢许情, 赖肖, 章英. 南昌市城市饮用水水质健康风险评价[J]. *环境卫生学杂志*, 2016(1): 51-55.
XIE X Q, LAI X, ZHANG Y. Evaluation of health risk of drinking water quality in cities of Nanchang [J]. *Chinese Journal of Environmental Hygiene*, 2016(1): 51-55(in Chinese) .
- [10] GETANEH Z, MEKONEN S, AMBELU A. Exposure and health risk assessment of lead in communities of Jimma town, southwestern Ethiopia. [J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2014, 93(2): 245-50.
- [11] 王燕, 王润元, 王鹤岭 等. 甘肃省干旱气候灾害的自然和人文因素探讨[J]. *环境保护与循环经济*, 2008, 28(9): 51-54.
WANG Y, WANG R Y, WANG H L, et al. Analysis of natural and human factors of arid climatic disasters in Gansu [J]. *Environmental Protection and Recycling Economy*, 2008, 28(9): 51-54(in Chinese) .
- [12] 唐海萍, 唐少卿. 甘肃水资源的特点及保护利用[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(2): 213-216.
TANG H P, TANG S Q. Characteristics of Gansu water resources and their protection and utilization [J]. *Chinese Desert*, 2000, 20(2): 213-216(in Chinese) .
- [13] EPA U S. Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume3-Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment Chapter1 Part A[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response U.S.EPA, 2001.
- [14] 黄奕龙, 王仰麟, 谭日宇 等. 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. Health environmental health risk assessment and risk management of urban drinking water sources [J]. *Geology Frontline*, 2006, 13(3): 162-167(in Chinese) .
- [15] 邹滨, 曾永年, Belljamin F.Zhan 等. 城市水环境健康风险评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(2): 94-98.
ZOU B, ZENG Y N, BELLJAMIN F ZHAN, et al. Health Risk Assessment of Urban Water Environment [J]. *Geography and Geographical Information Science*, 2009, 25(2): 94-98(in Chinese) .
- [16] 王秋莲, 张震, 刘伟. 天津市饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(5): 187-190.
WANG Q L, ZHANG Z, LIU W. Evaluation of water environment health risk of drinking water sources in Tianjin [J]. *Journal of Environmental Science & Technology*, 2009, 32(5): 187-190(in Chinese) .
- [17] 孙树青, 胡国华, 王勇泽 等. 湘江干流水环境健康风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(2): 12-15.
SUN S Q, HU G H, WANG Y Z, et al. Healthy environment health risk assessment of main shaft of Xiangjiang River [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(2): 12-15(in Chinese) .
- [18] BARAM, MICHAEL. Report on reports: Risk assessment in the federal government: managing the process[J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1983, 25(7): 25-27.
- [19] 罗锦洪. 饮用水源地水华人体健康风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
LUO J H. Drinking water sources of human body water health risk assessment [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012(in Chinese) .
- [20] SCHWAB B W, HAYES E P, FIORI J M, et al. Human pharmaceuticals in US surface waters: A human health risk assessment [J]. *Regulatory Toxicology & Pharmacology*, 2005, 42(3): 296-312.
- [21] LIM S S, VOS T, FLAXMAN A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990—2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *The Lancet*, 2012, 380(9859): 2224-2260.
- [22] ROBU B, JITAR O, TEODOSIU C, et al. Environmental impact and risk assessment of the main pollution sources from the romanian black sea coast [J]. *Environmental Engineering & Management Journal*, 2015, 14(2): 331-340.
- [23] WANG C M, ZHANG X C. Health risk assessment of urban surface waters based on real-time PCR detection of typical pathogens [J]. *Human & Ecological Risk Assessment An International Journal*, 2012, 18(2): 329-337.
- [24] 王鹤扬. 北京市西城区水环境健康风险评价研究[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(11): 163-167.
WANG H Y. Study on water environment health risk assessment in Xicheng District, Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Science and Management*, 2013, 38(11): 163-167(in Chinese) .
- [25] 陈生科, 万玉, 杨明姣 等. 贵阳某农村饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(5): 403-408.
CHEN S K, WAN Y, YANG M J, et al. Evaluation on health risk of drinking water in a rural drinking water source in Guiyang [J].

- Chinese Journal of Ecology and Rural Environment , 2017 , 33 (5) : 403-408(in Chinese) .
- [26] 马海涛, 杨晓灵, 任重 等. 南宁市主要饮用水源地水环境健康风险分析[J]. 人民珠江, 2014 , 35(4) : 41-44.
MA H T , YANG X L , REN Z , et al. Analysis on health risks of water environment in the main sources of drinking water in Nanning [J]. Peoples Bank of China , 2014 , 35 (4) : 41-44 (in Chinese) .
- [27] 胡冠九, 孙成, 杨敏娜 等. 长江江苏段主干断面污染物健康风险评估[J]. 长江流域资源与环境, 2009 , 18(8) : 771-776.
HU G J , SUN C , YANG M N , et al. Healthy risk assessment of pollutants in the main section of the Yangtze River in Jiangsu Province [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin , 2009 , 18 (8) : 771-776 (in Chinese) .
- [28] 李俊杰, 李靖洁. 张家口市洋河、桑干河流域水环境健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2008 , 16(5) : 92-95.
LI J J , LI J. Evaluation on health risk of aquatic environment in Yanghe and Sangganhe river basins in Zhangjiakou [J]. Chinese Environmental Monitoring , 2008 , 16 (5) : 92-95(in Chinese) .
- [29] 梁爽, 李维青. 乌鲁木齐市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 新疆农业科学, 2010 , 47(8) : 1660-1664.
LIANG S , LI W Q. Evaluation of water environment health risk in drinking water sources in Urumqi [J]. Xinjiang Agricultural Sciences , 2010 , 47 (8) : 1660-1664(in Chinese) .
- [30] 甘肃省水利厅. 甘肃省水利厅关于公布甘肃省集中式饮用水水源地核准名录(第一批) 的通知[EB/OL]. http://www.gssl.gov.cn/slxz/slxw/201702/t20170226_69824.html , 2018-03-02.
Gansu Provincial Department of Water Resources. Notice of Gansu Provincial Department of Water Conservancy on publishing the approved list of centralized drinking water sources in Gansu Province (the first batch) [EB/ OL]. http://www.gssl.gov.cn/slxz/slxw/201702/t20170226_69824.html , 2018-03-02(in Chinese) .
- [31] 赵华强. 泾河平凉段污染综合整治对策[J]. 环境研究与监测, 2007 , 18(3) : 41-42.
ZHAO H Q. Pollution countermeasures for pollution control in Pingliang section of Jinghe River [J]. Environmental Research and Monitoring , 2007 , 12 (3) : 41-42(in Chinese) .