

宝鸡市饮用水源地重金属健康风险评价

耿雅妮^{1,2}, 杨宁宁¹, 董洁¹, 梁青芳¹, 张军^{1,2}

(1. 宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013;

2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 宝鸡市饮用水源地包括冯家山水库、清姜河及部分井水。为全面掌握宝鸡市饮用水源地水质安全状况,对宝鸡市水源地饮用水中重金属进行含量检测及健康风险评价。结果表明:宝鸡市主要水源地饮用水中重金属含量在国家标准限值范围内,但宝鸡市各主要饮用水源地水均出现 Pb 浓度最大值超标、均值(井水、清姜河及冯家山水库分别为 35、43.92、47 $\mu\text{g/L}$)接近国家标准的情况;宝鸡市水源地饮用水致癌风险在 $4.75 \times 10^{-4} \sim 6.84 \times 10^{-4}$ 之间,非致癌风险在 $1.05 \times 10^{-7} \sim 3.25 \times 10^{-7}$ 之间,重金属元素致癌风险值大小顺序为 $\text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Ni}$;宝鸡市水源地饮用水对儿童健康风险略大于成人健康风险,应引起重视;宝鸡市水源地饮用水健康风险呈现出井水 > 清姜河河水 > 冯家山水库水的空间分布状态。宝鸡市各水源地饮用水水质达标,但存在致癌健康风险,其中 Cr 是主要风险因子。

关键词: 饮用水; 水源地; 健康风险评价; 重金属; 致癌; 宝鸡市

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0073-05

Health risk assessment of drinking water from heavy metals in water sources of Baoji City

GENG Yani¹, YANG Ningning¹, DONG Jie¹, LIANG Qingfang¹, ZHANG Jun^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of

Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and

Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Baoji City's drinking water sources include Fengjiashan Reservoir, Qingjiang River and some wells. In order to fully grasp the water quality safety status of drinking water sources in Baoji City, the content and health risk assessment of drinking water from heavy metals in water sources were carried out. The results showed that: the content of heavy metals in drinking water of major water sources in Baoji City was within the limits of the national standards, but the maximum Pb concentration exceeded in the major drinking water sources in Baoji City. The mean value (well water, Qingjiang River, and Fengjiashan Reservoir was 35, 43.92, 47 $\mu\text{g/L}$) were close to the national standards. The risk index of drinking water in drinking water sources in Baoji City was between 4.75×10^{-4} and 6.84×10^{-4} , and the non-carcinogenic risk was between 1.05×10^{-7} and 3.25×10^{-7} . The order of the carcinogenic risk caused by heavy metals was $\text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Ni}$, the water quality of children in major drinking water sources in Baoji City was slightly greater than the risk of adult health and should be taken seriously. The health risks of major drinking water sources in Baoji City showed that the spatial distribution pattern of well water > Qingjiang River water > Fengjiashan Reservoir water. The water quality of drinking water sources in Baoji City met the standard, but the health risk exceeded the threshold recommended by the relevant international organizations, and the risk of cancer-causing health was the main one, among which Cr was the main risk factor.

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071359); 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室项目(310829151140、310829151141); 宝鸡市科技计划项目(2017JH2-25); 宝鸡文理学院研究生创新项目(YJSCX18YB06); 陕西省地理学重点学科项目

作者简介: 耿雅妮(1977-), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 副教授, 主要从事水污染控制及风险评估研究。

通讯作者: 张军(1974-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 副教授, 主要从事区域污染控制及风险评估研究。

Key words: drinking water; water source; health risk assessment; heavy metals; carcinogenesis; Baoji City

1 研究背景

饮用水源安全关系到广大人民群众身体健康和社会稳定。目前,重金属污染是水源地水环境面临的重要问题之一^[1],一些重金属是人体必需的微量营养元素,但当它们的含量超过饮用水中允许的极限时,可能会对人体健康产生极其不利的影响^[2]。因此,检测重金属在水源地饮用水的含量,并进行健康风险评估,是掌握水源地水质安全与否的重要手段,同时也可作为建立完善的饮用水源重金属污染控制系统和预警机制提供科学依据。

基于风险度为衡量指标的健康风险评估方法,可定量描述环境污染物经人体暴露等途径以及危害人体健康的风险程度^[3]。目前,在水源地饮用水重金属污染健康风险评估的研究中,美国环境保护署(US EPA)推荐的健康风险评估模型被国内外众多学者所采用^[4-6],但模型中固定的参数使用于不同的研究区域,难以真实反映当地饮用水源地的健康风险程度;同时随着城市化的发展,城市(特别是工业城市)饮用水源地类型的多样化,用单一水源地饮用水的健康风险值去衡量整个城市饮用水源地的健康风险值,存在一定片面性^[7-8]。宝鸡市经济的发展主要以工业为支撑,市区饮用水源地主要以清姜河、冯家山水库及部分井水为主,在城市工业化进程中,频繁的工业活动有可能对城市水源地饮用水

的水质安全造成影响,因此,对宝鸡市水源地饮用水重金属含量监测及健康风险评估,对饮水安全与水质风险管理工作的开展尤为重要。

本文以宝鸡市水源地饮用水为研究对象,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对宝鸡市水源地饮用水中8种主要重金属含量进行监测;并基于宝鸡市人均寿命及陕西省成人和儿童的平均体重,运用US EPA所推荐的健康风险评估模型,分别对不同水源地饮用水中的重金属含量进行人体健康风险评估,为宝鸡市饮用水源地环境风险管理提供科学依据。

2 区域与方法

2.1 研究区概况

宝鸡市坐落于渭河谷地之上,是陕西省西部重要的工业城市。市区面积约106 km²,人口近150万。属于暖温带半湿润气候,四季分明,气候温和,雨量充足,市区饮用水水源地主要以清姜河、冯家山水库及部分地下水为主。

2.2 样品采集与处理

2017年4月期间于清姜河、冯家山水库及部分地下水共采集样品24个(图1),样品使用聚乙烯瓶采集,样品采集后运回实验室,过0.45 μm滤膜后,加入硝酸溶液使pH小于2,以防止样水中离子沉淀,然后放入冰箱冷藏保存。

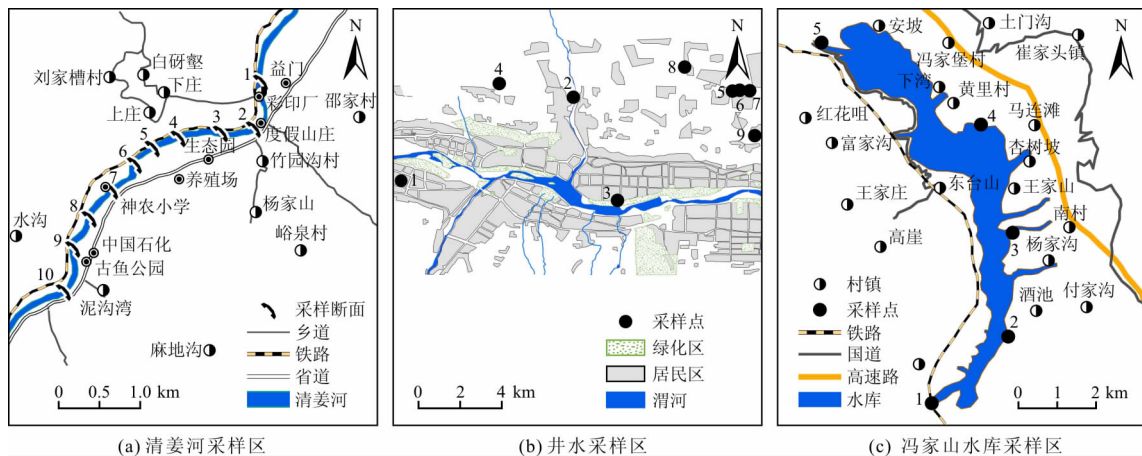


图1 实验水样品采样点分布

2.3 样品测定

重金属水样采用ICP-MS(NexION 350X, PE, USA)进行测定。实验所用试剂均为优质纯,标准溶液在实验过程中逐级配制,实验容器均采用同等浓度硝酸溶液浸泡,使用优纯水冲洗、晾干,并且在测

试样中加标样进行校核。

2.4 评价模型

采用US EPA的评价模型^[9-10],评价水源地饮用水中重金属对人体造成的健康风险,模型如下:

$$D_i = \frac{\theta \cdot C_i}{BW} \quad (1)$$

$$R_i^n = \frac{D_i \times 10^{-6}}{RfD_i} \quad (2)$$

$$R^n = \sum R_i^n \quad (3)$$

式中: D_i 为非致癌物 i 经饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; θ 为人体每日平均饮水量 (成人 2.2、儿童 1.0), L/d ; C_i 为化学非致癌物 i 的浓度, mg/L ; BW 为陕西省人体平均体重 (成人 64.06、儿童 19.14), kg ; RfD_i 为非致癌物 i 经饮水途径参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; R_i^n 为非致癌物 i 经饮水途径的平均个人非致癌年风险值, a^{-1} ; R^n 为总非致癌风险值。

$$R_i^c = 1 - e(-D_i q_i) / 76.34 \quad (4)$$

$$R^c = \sum R_i^c \quad (5)$$

式中: q_i 为致癌物经饮水途径的致癌斜率因子, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; 76.34 为 2017 年宝鸡市人均寿命, a ; R_i^c 为化学致癌物 i 经饮水途径的平均个人致癌年风险值, a^{-1} ; R^c 为致癌物总风险值, a^{-1} 。

$$R^T = R^c + R^n \quad (6)$$

式中: R^T 为总个人健康风险值。

2.5 评价模型中参数因子取值的确定

国际癌症研究机构 (IARC) 将 Cr、As、Ni 和 Cd 划分为致癌物质, 将 Pb、Cu、Mn 和 Zn 划分为非致癌物质, 模型中各重金属经饮水途径的剂量取值如表 1 所示。

3 结果与分析

3.1 重金属浓度

宝鸡市水源地饮用水重金属浓度如表 2 所示, 除井水中未检测出 Cd 元素外, 其余各元素均在各水源地中检出。

将检测结果与文献 [13-14] 对比, 在各类型水源地水体中, 各水源地饮用水中 Pb 浓度的均值接近国家标准的限值, 且 Pb 浓度的最大值均超标, 其余各元素浓度的最大值与均值均低于国家标准的限值。因此, 说明宝鸡市水源地饮用水中, 重金属 Pb 受到人为活动影响较严重。

表 1 模型中各重金属经饮水途径的剂量取值

$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$

致癌物质 q_i				非致癌物质 RfD_i			
Cr	Cd	As	Ni	Mn	Pb	Cu	Zn
41	6.1	15	2×10^{-2}	1.4×10^{-1}	1.4×10^{-3}	5.0×10^{-3}	0.3

表 2 宝鸡市主要水源地饮用水重金属含量

$\mu\text{g}/\text{L}$

项目	取值	Mn	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd	As
清姜河	范围	4.3~11	5.9~67	2.8~6.6	17~114	1.20~4.15	13~35	0.06~0.62	0.30~1.10
	平均值	7.26	43.92	4.48	54.85	1.90	18.91	0.19	0.48
冯家山水库	范围	1.92~4.47	32~63	3.37~4.84	28~36	2.64~2.76	14~16	1.32	1.64~1.94
	平均值	2.80	47	3.89	32	2.70	15	0.42	1.75
GB3838-2002 ^[13]		≤ 100	≤ 50	≤ 1000	≤ 1000	≤ 50	≤ 50	≤ 5	≤ 50
井水	范围	0.22~3.22	0.59~75	0.34~4.88	15~763	3.5~12.4	1.58~36	未检出	0.55~1.48
	平均值	1.27	35	2.16	120	6.49	22.19	未检出	1.15
GB/T14848-2017 ^[14]		≤ 100	≤ 50	≤ 1000	≤ 1000	≤ 50	≤ 50	≤ 10	≤ 50

3.2 健康风险评价

依据公式 (1)~(5), 得到宝鸡市主要饮用水水源地非致癌健康风险和致癌健康风险, 评价结果见表 3 和 4。由表 3 得, 宝鸡市水源地饮用水中, 儿童和成人总非致癌风险分别在 $1.09 \times 10^{-7} \sim 3.25 \times 10^{-7}$ 和 $1.05 \times 10^{-7} \sim 3.12 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ 之间, 均低于 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 处于可接受风险水平, 儿童总非致癌

健康风险值大于成人总非致癌健康风险值。非致癌重金属的健康风险排序为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn}$ 。

由表 4 可知, 宝鸡市各水源地饮用水中, 清姜河与冯家山水库饮用水中致癌物质的风险值排序为: $\text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Ni}$, 井水中致癌物质的风险值排序为: $\text{Cr} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Cd}$, 人均年致癌风险均超过了国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险

水平($5.0 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$)。儿童和成人总致癌风险分别在 $4.95 \times 10^{-4} \sim 6.84 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 和 $4.75 \times 10^{-4} \sim 6.57 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 之间,各水源地年均总致癌风险值

排序均呈现出儿童略大于成人的特征。其中,Cr的健康风险值与总致癌风险值处于同一数量级,说明Cr是主要风险因子。

表3 宝鸡市主要饮用水水源地非致癌重金属健康风险评价值

a^{-1}

采样区	年龄段	非致癌重金属健康风险平均值 R_i^n				R^n
		Mn	Pb	Cu	Zn	
清姜河	儿童	2.49×10^{-11}	2.37×10^{-8}	6.77×10^{-10}	1.38×10^{-7}	1.63×10^{-7}
	成人	2.39×10^{-11}	2.27×10^{-8}	6.49×10^{-10}	1.32×10^{-7}	1.56×10^{-7}
冯家山水库	儿童	9.63×10^{-12}	2.55×10^{-8}	5.88×10^{-10}	8.28×10^{-8}	1.09×10^{-7}
	成人	9.23×10^{-12}	2.44×10^{-8}	5.64×10^{-10}	7.94×10^{-8}	1.05×10^{-7}
井水	儿童	4.37×10^{-12}	1.93×10^{-8}	3.27×10^{-10}	3.05×10^{-7}	3.25×10^{-7}
	成人	4.19×10^{-12}	1.85×10^{-8}	3.13×10^{-10}	2.92×10^{-7}	3.12×10^{-7}

表4 宝鸡市主要饮用水水源地致癌物健康风险评价值

a^{-1}

采样区	年龄段	致癌重金属健康风险平均值 R_i^n				R^n
		Cr	Cd	As	Ni	
清姜河	儿童	5.74×10^{-4}	8.58×10^{-7}	5.38×10^{-6}	7.17×10^{-11}	5.80×10^{-4}
	成人	5.51×10^{-4}	8.22×10^{-7}	5.16×10^{-6}	6.87×10^{-11}	5.57×10^{-4}
冯家山水库	儿童	4.73×10^{-4}	1.96×10^{-6}	1.98×10^{-5}	1.02×10^{-10}	4.95×10^{-4}
	成人	4.54×10^{-4}	1.88×10^{-6}	1.90×10^{-5}	9.79×10^{-11}	4.75×10^{-4}
井水	儿童	6.71×10^{-4}	未检出	1.31×10^{-5}	2.45×10^{-10}	6.84×10^{-4}
	成人	6.44×10^{-4}	未检出	1.25×10^{-5}	2.35×10^{-10}	6.57×10^{-4}

3.3 健康风险比较

由公式(6)得,健康风险为致癌风险和非致癌风险之和。宝鸡市各饮用水源地水中,各致癌重金属健康风险集中在 $7.17 \times 10^{-11} \sim 6.71 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 之间,各非致癌重金属健康风险集中在 $4.19 \times 10^{-12} \sim 3.05 \times 10^{-7} \text{a}^{-1}$ 之间,因此,研究区健康风险主要来自致癌风险。从图2可知,研究区健康风险排序为:井水 > 清姜河 > 冯家山水库,在不同年龄段中的年均健康风险排序为:儿童 > 成人,说明儿童较成人相比,是更脆弱群体,即对儿童饮用水安全的防控和管理需要格外加强。

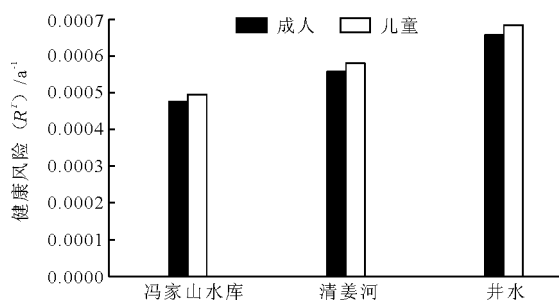


图2 各饮用水水源地水环境健康风险

4 讨论

将本研究结果与国家标准进行对比发现,宝鸡市各水源地水质达标,井水中Cd元素未检出,但经健康风险评价得出井水对人体健康风险值高于清姜河和冯家山水库水源地的健康风险值,各水源地水质总健康风险也高于US EPA的推荐值,因此,将水质评价与健康风险评价相结合的研究,能更准确地反映水源地水环境的优劣^[15]。宝鸡市水源地水中重金属类致癌物健康风险均值远大于非致癌物健康风险均值,通过饮水途径对人体产生的总健康风险主要以致癌风险为主,这与相关研究结果一致^[4-8,15]。各饮用水源地水体中重金属致癌物质通过饮水途径产生的个人健康风险在 $4.75 \times 10^{-4} \sim 6.84 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 之间,致癌风险值 $\text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Ni}$,Cr是主要致癌物质,其次为As、Cd、Ni,不同年龄段中 R_i^n 值排序为:儿童 > 成年。本研究结果与马海涛等^[4]、韩芹芹等^[5]、黄睿智等^[6]对我国其他城市水源地饮用水的研究结果类似,Cr的 R^T 均值超过

了 ICRP 等机构推荐的最大可接受风险值。各主要水源地饮用水致癌健康风险为:井水 > 清姜河河水 > 冯家山水库水,这与王若师等^[15]对东江流域乡镇饮用水源地的研究结果(致癌风险值:水库 > 江河 > 地下水 > 山泉)相反。井水致癌物 Cr 含量要大于其他水源地的 Cr 含量,说明宝鸡市地下水已经受到人为活动导致的 Cr 污染,建议加强地下水的监测和保护,城市供水部门应该对直接饮用井水地区作出供水规划,改地下水饮用为城市管网供水。

宝鸡市水源地水中非致癌总风险值:井水(1.18×10^{-6}) > 清姜河(5.92×10^{-7}) > 冯家山水库(3.97×10^{-7}),总非致癌风险值低于马海涛等^[4]、韩芹芹等^[5]、黄睿智等^[6]对我国其他城市水源地饮用水的研究结果,也低于 ICRP 和 US EPA 的推荐值($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$)。将本研究重金属的实测浓度值与地表水环境质量标准(GB3838-2002)^[13]进行对比,宝鸡市各水源地水中 Pb 浓度的最大值均超过国家标准,究其原因,主要是受到工农业活动导致 Pb 超标,冯家山水库主要水源补给以流经农田区的渭河支流为主,上游入口处为千湖湿地公园,水库两侧有宝汉高速、104 省道及陇千铁路延伸段;清姜河沿岸有 212 省道等重要交通干线,长年有大量的交通运输。研究表明^[16-18],交通排放对地表灰尘中 Pb 含量有直接影响,含有 Pb 的灰尘通过干湿沉降的方式进入路旁水体,从而使水源地水体中 Pb 浓度均值接近国家标准。同时,冯家山水库和清姜河周边分布有旅游接待、娱乐等设施,旅游活动产生的各类垃圾对水体中重金属污染也不容忽视。建议依法取缔饮用水水源保护区内的违法旅游等项目,消除该区域生产生活污水对饮用水源的污染,确保水源安全,避免其通过饮水途径对人体(尤其是儿童)健康的伤害。

此外,由于本次研究中采集宝鸡市饮用水源地水样,但因居民在饮用过程中会对其进行二次净化处理,致使重金属在末梢饮用水中实际浓度值与本次检测值会有所出入,也未对供水季节变化、暴露参数、人群饮水习惯差异等不确定性因素进行分析。针对上述不足,还有待深入探讨。

5 结 论

(1)宝鸡市水源地饮用水中各重金属浓度均值均低于国家标准限值,水质达标,各水源地 Pb 浓度最大值均超过了国家标准限值,平均值接近国家标准限值,应引起注意。

(2)宝鸡市水源地饮用水健康风险以致癌风险为主,Cr 是首要风险因子。宝鸡市各主要水源地饮用水对儿童的健康风险略大于成人健康风险。

(3)宝鸡市水源地饮用水健康风险排序依次为:井水 > 清姜河河水 > 冯家山水库水。

参考文献:

- [1] SOBHANARDAKANI S. Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand Plain, Hamadan Province, Western Iran[J]. Iranian Journal of Toxicology, 2016,10(3):35-40.
- [2] MUHAMMAD S, SHAH M T, KHAN S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, Northern Pakistan[J]. Microchemical Journal, 2011,98(2):334-343.
- [3] COVELLO V T, MERKHOFFER M W. Risk assessment methods: approaches for assessing health and environmental risks[M]. Berlin:Springer Netherlands,1993.
- [4] 马海涛,何金平,杨晓灵,等. 南宁市邕江水源地重金属污染物健康风险初评[J]. 环境科学与技术, 2014,37(S1):377-381.
- [5] 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估[J]. 中国环境监测, 2015,31(1):57-63.
- [6] 黄睿智,班美玲,苏相琴,等. 广西某城市饮用水源地重金属健康风险评估[J]. 工业安全与环保, 2015,41(6):21-24.
- [7] WANG Qiulian, ZHANG Zhen, LIU Wei. Environmental Health Risk Assessment of Drinking Water Source in Tianjin[J]. Environmental Science and Technology, 2009,32(5):187-190.
- [8] KAVCAR P, SOFUOGLU A, SOFUOGLU S C. A health risk assessment for exposure to trace metals via drinking water ingestion pathway[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2009,212(2):216-227.
- [9] US EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food [R]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000.
- [10] 李莹莹,张永江,邓茂,等. 武陵山区域典型生态保护城市饮用水源地水质人体健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2017,30(2):282-290.
- [11] 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.
- [12] 国家体育总局. 2010 年国民体质监测报告[M]. 北京:人民体育出版社, 2016.

(下转第 84 页)

- 下水水质空间分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 61-65+71.
- [12] 高玉琴, 赖丽娟, 姚敏, 等. 基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 1-7.
- [13] 王彦丽, 赵敏宁. 近10年辽河干流水质综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 53-59.
- [14] 于洪涛, 吴泽宁. 灰色关联分析在南水北调中线澧河水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2010(3): 39-41+45.
- [15] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 359-369.
- [16] 朱世丹, 张飞, 张海威, 等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1707-1721.
- [17] CHEN Xiqing, YAN Yixin, FU Renshou, et al. Sediment transport from the Yangtze River, China, into the sea over the Post-Three Gorge Dam Period: A discussion[J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 55-64.
- [18] 董维红, 林学钰, 张博, 等. 鄂尔多斯苏里格南区块浅层地下水水化学分布特征及污染源分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 103-108.
- [19] 高彦芳, 沈立成, 杨平恒. 重庆金佛山地下水的氮污染源研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(6): 23-26+31.
- [20] 陈亚峰, 杨彪山, 贾志宏, 等. 成都市红层地下水水质特征研究[J]. 地下水, 2017, 39(6): 33-37.
- [21] 王石, 陈丽媛, 孙翔, 等. 从“大截排”到清源和低影响开发——基于水质目标约束的情景模拟与规划[J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3981-3990.
- [22] 曾思育, 董欣. 城市降雨径流污染控制技术的发展与实践[J]. 给水排水, 2015, 51(10): 1-3.
- [23] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 319-327.
- [24] 曹锡军, 张英明, 崔延松, 等. 南通市濠河水环境容量评价和提升措施[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 37-39+27.
- [25] 陈言菲, 李翠梅, 齐国远, 等. 基于GMS的江南某地区浅层地下水溶质迁移规律分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 33-38.
- [26] 汪顺生, 黄天元, 陈豪, 等. 基于CRITIC赋权的模糊综合评判模型在水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 48-51.
- [27] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1806-1810.
- [28] 马越, 姬国强, 石战航, 等. 西咸新区沣西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造[J]. 给水排水, 2017, 53(3): 59-67.

(上接第77页)

- [13] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB3838-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 国家技术监督局. 地下水质量标准 GB/T14848-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3083-3088.
- [16] PAN Huiyun, LU Xinwei, LEI Kai. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1361-1369.
- [17] ZHOU Qihong, ZHENG Na, LIU Jingshuang, et al. Residents health risk of Pb, Cd and Cu exposure to street dust based on different particle sizes around zinc smelting plant, Northeast of China [J]. Environmental Geochemistry and health, 2015, 37(2): 207-220.
- [18] 王济, 张一修, 高翔. 城市地表灰尘重金属研究进展及展望[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 821-830.