

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.007

西北高寒牧区水质评价与重金属健康风险评估

张国珍, 高广辉, 汪光宗, 武福平, 周添红
(兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对西北高寒牧区水质状况及其对人体健康的影响,采用主成分分析法对牧区水质指标进行评价,采用健康风险评估模型对水质中的重金属Cd、As、Cu、Pb、Fe进行健康风险评估。结果表明,氨氮、有机物、耐热大肠杆菌、总磷、总氮之间具有很强的相关性,有机物、氨氮及耐热大肠杆菌是影响牧区水质的主要污染物;Cd、As、Cu、Pb、Fe的浓度均达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准,致癌重金属健康风险数量级远超非致癌重金属健康风险数量级,其风险水平平均相差 $10^5\sim 10^7$ 倍,但致癌重金属健康风险水平尚未超过国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平 $5.0\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$,仍属于人体可接受风险。说明牧区水质中重金属对人体的危害较小。致癌重金属健康风险程度由高到低的顺序为Cd、As,非致癌重金属健康风险程度的顺序为Cu>Fe>Pb。

关键词: 高寒牧区; 主成分分析法; 水质评价; 重金属; 健康风险评估

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0042-07

Water Quality Assessment and Heavy Metal Health Risk Evaluation in Northwest Alpine Pastoral Area

ZHANG Guo-zhen, GAO Guang-hui, WANG Guang-zong, WU Fu-ping,
ZHOU Tian-hong

(School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the water quality situation and its influence on human health in northwest alpine pastoral area, the water quality indicators of pastoral area were evaluated by using principal component analysis method. The health risk of heavy metal such Cd, As, Cu, Pb and Fe in water was evaluated by using the health risk assessment model. There was a strong correlation among ammonia nitrogen, organic matter, heat-resistant *E. coli*, total phosphorus and total nitrogen. Organic matter, ammonia nitrogen and heat-resistant *E. coli* were the main pollutants affecting water quality in pastoral area. The concentrations of Cd, As, Cu, Pb, and Fe all met Ⅲ level criteria specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). The health risk of carcinogenic heavy metals was much higher than that of non-carcinogenic heavy metals, and the risk levels varied by an average of $10^5\sim 10^7$ times. However, the health risk level of carcinogenic heavy metals did not exceed the maximum acceptable risk level of $5.0\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$ recommended by the international commission on radiological

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100103、2019YFC0507405); 甘肃省科技重大专项计划项目(20ZD7FA005)
通信作者: 周添红 E-mail: zhouth@163.com

protection (ICRP), which was an acceptable risk for human body. The results indicated that the heavy metals in water in pastoral area were less harmful to human health. The health risk of carcinogenic heavy metals in descending order was Cd and As, while that of non-carcinogenic heavy metals in descending order was Cu, Fe and Pb.

Key words: alpine pastoral area; principal component analysis method; water quality assessment; heavy metal; health risk evaluation

甘南高寒牧区作为黄河上游重要的水源涵养区,具有十分重要的生态功能。但是关于高寒牧区的水质评价却鲜有报道,而且对高寒牧区水质评价的理论也不够完善,因此合理地选择水质评价方法可为制定科学的高寒牧区水质评价体系提供相关依据。

目前常用的水质评价方法主要有单因子评价法^[1]、综合污染指数法^[2]、模糊数学综合评价法^[3]等。其中,单因子评价方法具有计算简单、应用广泛等优点,但仅反映最差因子状况且适用于受某一种污染较为严重的水体。综合污染指数法评价结果偏于概况,主要用于判断水体污染程度,在使用上述评价方法时,由于各指标之间具有潜在联系,因此评价结果具有一定的局限性。同时甘南高寒牧区作为重要的水源涵养区,水质未受到严重污染,因此采用上述评价方法不能准确反映当地水质状况。而主成分分析法可以将多个指标线性化,在不影响原始数据信息的情况下,舍弃部分影响不大的指标,简化数据结构,提高分析的可靠性^[4]。邢洁等人^[5]用主成分分析法对松花江流域黑龙江段进行评价;刘贤梅等人^[6]运用主成分分析法对喀斯特山区河流水质进行评价。在上述评价过程中,通过该方法判别出了流域内主要污染因子,并准确地反映出流域内水质在时空上的差异。因此,采用主成分分析法可以有效反映水质状况,为水环境质量评价提供参考。

由于很多疾病与饮用水相关,而高寒牧区牧民有经过简单沉淀处理直接饮用生河水的习惯,因此高寒牧区水质安全与牧民身体健康息息相关。重金属是自然界水体中常见的污染物,具有累积性、毒性大、难降解等特点^[7-8],重金属通过饮用水途径进入人体内有致癌风险。因此,重金属健康风险评估对饮用水安全和人类健康具有重大意义。目前,常用的水环境健康风险评估评价模型为美国EPA推荐

的水质健康风险模型,并得到了广泛应用。例如,郝守宁等人^[9]研究了西藏尼洋河流域饮用水源地重金属健康风险;王若师等人^[10]研究了东江流域乡镇饮用水水源地重金属健康风险;郭杏妹等人^[11]研究了佛山农村饮用水重金属健康风险。通过水质健康风险评估模型,判别出水质中主要的重金属污染物,明确重金属健康风险程度的顺序,可为流域水环境风险管理提供依据。

笔者以甘肃省玛曲县高寒牧区为例,利用SPSS软件,采用主成分分析法对牧区水质进行评价,找到牧区水质的主要影响因素。采用健康风险评估模型,以重金属为研究对象,对当地水体环境的重金属进行健康风险评估,旨在为该地区水环境风险管理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选择玛曲县阿万仓镇为研究区域,该区年均降水量为600 mm,平均气温为1.1℃,植被以高寒草甸和高山草原化草甸为主^[12]。本次调研主要考察该镇分散式牧民家庭用水情况,选取5个生活用水取水点开展水质及水源卫生状况分析。采样点如图1所示。

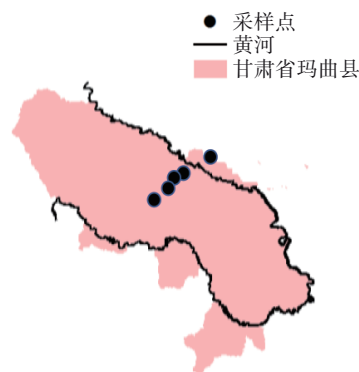


图1 采样点示意

Fig.1 Schematic diagram of sampling points

玛曲县位于甘南藏族自治州西南部,青藏高原

东端,该县是黄河上游重要的水源涵养区。玛曲县总面积为 $101.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$,总人口约为6万人,平均海拔为3 700 m,拥有天然草场 $85.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ [13]。该县牧草生长旺盛,当地以畜牧业为主 [12]。但因草场净初级生产力相对较弱,牧区呈现随季节变化而流动转场的牧养模式。因此饮用水质量是牧民日常生活的基本保障,也是牧民流动转场的重要因素。牧民生活饮用水水源主要取自草场中的溪流,并且取水后经过简单沉淀处理直接作为生活饮用水。

1.2 样品采集与测试方法

课题组于2020年7月27日—28日赴玛曲县阿万仓镇5个采样点,每个点位采集3个水样,作为水质检测的平行样。其中1、2、5点位为草甸水,3、4点位为河流水。水样的水质分析采用《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中的相关水质指标检测方法。

1.3 主成分分析法

利用SPSS软件进行主成分分析,该方法通过降维思想,将多个变量信息转化为少数综合变量指标,在不影响原有信息的条件下,通过少数综合变量指标对问题进行分析 [14-17],其具体计算步骤如下:①数据标准化处理;②计算相关系数矩阵和相关系数矩阵的特征根与特征向量;③计算贡献率并确定主成分个数,一般选取特征根大于1、累积贡献率达到85%以上的主成分进行分析;④计算主成分表达式 F_i 。

1.4 水环境健康风险评价模型

水环境健康风险评价是建立水体污染对人体健康危害的一种评价方法,其目的是评估水体污染物对人体健康危害的潜在风险。目前常用的水环境健康风险评价模型为美国EPA推荐的模型,该模型包括致癌和非致癌风险评价模型 [18-19]。

致癌风险评价模型表达式如下:

$$R_i = D_i q_i / 72.23 \quad (1)$$

若结果 > 0.01 ,则按高剂量计算:

$$R_i = [1 - \exp(-D_i q_i)] / 72.23 \quad (2)$$

非致癌风险评价模型表达式如下:

$$H_i = (D_i / \text{RFD}_i) \times 10^{-6} / 72.23 \quad (3)$$

式中: R_i 为致癌物*i*经过饮水暴露产生的人均年致癌风险, a^{-1} ; D_i 为致癌物*i*通过饮水暴露的单位

体质量日平均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; q_i 为致癌物*i*经饮水摄入的致癌系数, $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$; H_i 为非致癌物*i*经饮水暴露产生的人均年致癌风险, a^{-1} ; RFD_i 为非致癌物*i*通过饮水途径的单位体质量日平均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; 72.23为甘肃省人均寿命, a 。

饮水暴露的单位体质量日平均暴露剂量 D_i 计算公式为:

$$D_i = 2.2 C_i / 64.3 \quad (4)$$

$$D_i = 1.0 C_i / 22.9 \quad (5)$$

式中:2.2和1.0分别为流域内成年人和未成年人每天的平均饮水量, L ; C_i 为水体中致癌物或非致癌物的浓度, mg/L ; 64.3和22.9分别为成年人和7岁儿童的平均体质量, kg 。

由于水体中的重金属浓度均较低,且假设各金属污染物之间不存在拮抗和协同关系,则重金属通过饮水途径对人体的总健康风险为:

$$R_{\text{总}} = R_i + H_i \quad (6)$$

在模型参数选择中,致癌重金属的致癌强度系数和非致癌重金属参考剂量依据国际癌症研究机构(IARC)、世界卫生组织(WTO)及美国EPA的推荐值。本研究中致癌重金属为Cd、As,其致癌强度系数分别为6.1、15 $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$,毒性参考剂量分别为0.000 5、0.000 3 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ [11];非致癌重金属Fe、Pb、Cu的毒性参考剂量分别为0.7 [10]、0.001 4 [11]、0.005 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ [11]。

2 结果与讨论

2.1 主成分分析法

本次取样对浊度、总磷、氨氮、高锰酸盐指数、总氮等29项指标进行检测。现选取氨氮(X1)、高锰酸盐指数(X2)、总磷(X3)、总氮(X4)、耐热大肠杆菌(X5)等5个超标或数据波动幅度较大的指标进行主成分分析。

本次水样中的5个水质指标原始数据见表1。根据主成分分析法的操作步骤,水质指标的标准化和相关系数矩阵见表2和表3。从表3可以看出,大部分相关系数的绝对值均大于0.3,说明部分变量之间具有一定的相关性,表明原始变量之间可以相互影响,适合因子分析。其中,氨氮与高锰酸盐指数、总氮、耐热大肠杆菌有较强的相关性,相关系数分别为0.625、-0.530、0.676;高锰酸盐指数与总磷之间有较强的相关性,相关系数为0.752。

表 1 水质原始数据

Tab.1 Raw water quality data

采样点	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	高锰酸盐指 数/(mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	耐热大肠杆 菌/(MPN·100 mL ⁻¹)
1点	0.58	9.26	0.19	0.76	2 419
2点	0.49	8.32	0.05	0.74	2 400
3点	0.07	6.82	0.01	0.81	2 400
4点	0.05	8.81	0.18	0.94	49
5点	0.07	5.83	0.06	0.74	79

表 2 标准化水质数据

Tab.2 Standardized water quality data

Z(氨氮)	Z(高锰酸 盐指数)	Z(总磷)	Z(总氮)	Z(耐热大 肠杆菌)
1.259	1.010	1.126	-0.450	0.740
0.914	0.356	-0.588	-0.687	0.725
-0.699	-0.687	-1.078	0.142	0.725
-0.776	0.697	1.004	1.683	-1.107
-0.699	-1.376	-0.465	-0.687	-1.084

表 3 相关系数矩阵

Tab.3 Correlation coefficient matrix

项 目	氨氮	高锰酸 盐指数	总磷	总氮	耐热大 肠杆菌
氨氮	1.000	0.625	0.295	-0.530	0.676
高锰酸盐指数		1.000	0.752	0.330	-0.307
总磷			1.000	0.438	-0.245
总氮				1.000	-0.462
耐热大肠杆菌					1.000

相关特征值、主成分贡献率及累积贡献率如表 4 所示。可以看出,原始数据经过处理后,前两个主成分特征值分别为 2.313、2.060,累积贡献率达到 87.445%,因此本次需选取前两个主成分来取代原始变量,并对牧区水质进行综合评价。第一与第二主成分初始因子载荷矩阵如表 5 所示。可以看出,氨氮、高锰酸盐指数、耐热大肠杆菌在第一主成分中有较高的载荷,第一主成分总方差贡献率为 46.254%;总磷、总氮在第二主成分中有较高的载荷,第二主成分总方差贡献率为 41.191%。这反映了牧区流域水质有机污染的特征。同时表 4 中前两项主成分累积贡献率达到 87.445%,根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准得出,高寒牧区水中的主要污染物包括有机物、氨氮及耐热大肠杆菌。

表 4 特征值、主成分贡献率及累积贡献率

Tab.4 Eigenvalue, principal component

contribution rate and cumulative contribution rate

成分 序号	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分 比/%	累积贡 献率/%	总计	方差百 分比/%	累积贡 献率/%
1	2.313	46.254	46.254	2.313	46.254	46.254
2	2.060	41.191	87.445	2.060	41.191	87.445
3	0.552	11.039	98.483			
4	0.076	1.517	100			
5	-3.921E-16	-7.842E-15	100			

表 5 初始因子载荷矩阵

Tab.5 Initial factor loading matrix

项 目	成分序号	
	1	2
氨氮	0.951	-0.226
高锰酸盐指数	0.809	0.554
总磷	0.459	0.813
总氮	-0.269	0.861
耐热大肠杆菌	0.687	-0.547

根据主成分分析法的步骤,得到第一主成分和第二主成分的表达式,以及综合评价函数表达式,分别见式(7)~(9)。

$$F_1 = 0.625Z_{x1} + 0.532Z_{x2} + 0.302Z_{x3} - 0.177Z_{x4} + 0.452Z_{x5} \quad (7)$$

$$F_2 = -0.157Z_{x1} + 0.386Z_{x2} + 0.566Z_{x3} + 0.600Z_{x4} - 0.381Z_{x5} \quad (8)$$

$$F = 0.529F_1 + 0.471F_2 \quad (9)$$

式中: Z_{x1} 、 Z_{x2} 、 Z_{x3} 、 Z_{x4} 、 Z_{x5} 分别表示氨氮、高锰酸盐指数、总磷、总氮、耐热大肠杆菌标准化后的水质数据。根据综合评价函数,计算各点水质污染的综合评分,见表 6。分数越高,说明污染越严重;反之,水质越好。

表 6 各点水质综合评价结果

Tab.6 Comprehensive assessment results of water

quality at various points

地 点	第一主 成分得 分	第一主 成分排 名	第二主 成分得 分	第二主 成分排 名	综合评 价得分	综合 评价 排名
玛曲 1 点	2.078	1	0.278	2	1.230	1
玛曲 2 点	1.032	2	-1.027	5	0.062	3
玛曲 3 点	-0.825	4	-0.957	4	-0.887	4
玛曲 4 点	-0.609	3	2.391	1	0.804	2
玛曲 5 点	-1.678	5	-0.684	3	-1.210	5

由表6可知,玛曲1点与玛曲4点污染比较严重,原因是这两个取水点附近有牧民居住且周围散养牦牛等牲畜较为集中,牧民排放的生活污水、牲畜排放的粪便和动植物残体经过生物降解后随着降雨汇入河流中,又因河流水量与水环境容量较小,水体的自净能力较弱,流入水体的污染物未能得到及时稀释,造成水中微生物、有机物、总磷和总氮超标。而其他取样点则因周围没有牧民居住,且周围牲畜较少、河流水量较大、自净能力强,致使受污染程度较轻。

2.2 玛曲水环境健康风险评价

玛曲河流水体重金属指标的浓度检测结果见表7。可知,水体中Cd、As、Pb、Cu、Fe的浓度(Pb与Cu部分数据未检出,以检测限数据一半为准)均满足国家地表水Ⅲ类水质标准。

表7 水体重金属指标检测结果

Tab.7 Test results of heavy metals index in water

mg·L⁻¹

地 点	Cd	As	Pb	Cu	Fe
玛曲1点	0.000 57	0.004 1	0.000 04	0.000 21	0.047
玛曲2点	0.000 47	0.001 5	0.000 04	0.005 00	0.039
玛曲3点	0.000 56	0.001 0	0.000 04	0.000 05	0.010
玛曲4点	0.000 51	0.000 5	0.000 04	0.000 05	0.055
玛曲5点	0.000 59	0.001 7	0.000 04	0.000 05	0.210

依据重金属指标的检测结果,结合健康风险评价模型及参数选择,计算玛曲当地牧民通过饮水途径带来的人均年致癌风险和非致癌风险。结果表明,成年人和未成年人致癌重金属Cd的健康风险值分别为1.66E-06~1.33E-06和2.12E-06~1.69E-06 a⁻¹;致癌重金属As分别为2.84E-05~3.54E-06和3.63E-05~4.51E-06 a⁻¹。成年人和未成年人的非致癌重金属Fe的健康风险值分别为1.39E-10~6.61E-12和1.77E-10~8.43E-12 a⁻¹;非致癌重金属Pb分别为1.35E-11和1.73E-11 a⁻¹;非致癌重金属Cu分别为4.74E-10~4.74E-12和6.05E-10~6.05E-12 a⁻¹。可见,未成年人的重金属健康风险高于成年人,说明流域内重金属对未成年人的伤害更大,因此未成年人饮用水安全应更加受到重视,管理应更加严格。

致癌重金属Cd与As的健康风险值均未超过国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ^[20],说明玛曲河流致癌重金属健康

风险在可接受范围内。Cd的健康风险平均值:成年人为1.56E-06 a⁻¹,未成年人为1.99E-06 a⁻¹。As的健康风险平均值:成年人为1.25E-06 a⁻¹,未成年人为1.60E-06 a⁻¹。产生的健康风险从大到小依次为Cd、As。在地域分布上,致癌重金属As的健康风险分布存在一定差异,即As造成的健康风险程度为草甸水>河流水,原因可能是牧区人口数量不断增长,生活和农牧业污染日益严重,土壤中可能存在的重金属随着降雨和雪水的融化一同汇入水体,又因为草甸水的流量小、流动性较弱、水源补给不及时,造成了As的不断累积。

非致癌重金属Pb、Cu、Fe的健康风险值均远小于 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ^[21],最高为1.77E-10 a⁻¹,因此非致癌重金属不会对牧民身体健康构成明显危害。Pb的健康风险平均值:成年人为1.35E-11 a⁻¹,未成年人为1.73E-11 a⁻¹。Cu的健康风险平均值:成年人为1.02E-10 a⁻¹,未成年人为1.30E-11 a⁻¹。Fe的健康风险平均值:成年人为4.89E-11 a⁻¹,未成年人为6.24E-11 a⁻¹。健康风险值从大到小依次为Cu、Fe、Pb。致癌重金属健康风险数量级远超非致癌重金属健康风险数量级,其风险值平均相差5~7个数量级,说明致癌重金属对人体的危害远大于非致癌重金属。

本研究只考虑了Cd、As、Pb、Cu、Fe通过饮水途径对人体健康产生的风险,并未检测其他重金属对健康风险的危害。同时重金属也可以通过饮食、皮肤等形式进入人体,因此存在一定的局限性。

3 结论

牧区河水中的氨氮、有机物、耐热大肠杆菌、总磷、总氮之间有很强的相关性,各指标相互影响,其中有机物、氨氮及耐热大肠杆菌为主要污染物。牧区河流水中未发现重金属超标现象,均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准。水中致癌重金属的健康风险值排序为Cd>As,非致癌重金属的健康风险值排序为Cu>Fe>Pb。

参考文献:

- [1] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 617-624.
- LI Mingsheng, ZHANG Jianhui, LIANG Nian, et al. Comparisons of some common methods for water

- environmental quality assessment [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5):617-624(in Chinese).
- [2] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4):185-190.
- SUN Tao, ZHANG Miaoxian, LI Miaomiao, *et al.* River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(4):185-190(in Chinese).
- [3] 吕卓然, 丁爽, 王凌青. 基于改进模糊数学法的河流水环境质量评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2):317-324,399.
- LÜ Zhuoran, DING Shuang, WANG Lingqing. River water environmental quality assessment based on improved fuzzy mathematics [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(2):317-324,399(in Chinese).
- [4] 张国珍, 乔国亮, 武福平, 等. 主成分分析法在窖水水质变化评价中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4):181-184.
- ZHANG Guozhen, QIAO Guoliang, WU Fuping, *et al.* Application of principal component analysis to an evaluation of water quality in water cellar [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(4):181-184(in Chinese).
- [5] 邢洁, 宋男哲, 陈祥伟, 等. 基于主成分分析的松花江流域黑龙江段水质评价[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1):89-94.
- XING Jie, SONG Nanzhe, CHEN Xiangwei, *et al.* Water quality evaluation of Heilongjiang control section in Songhua River basin based on principal component analysis [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1):89-94(in Chinese).
- [6] 刘贤梅, 周忠发, 张昊天, 等. 基于主成分分析的喀斯特山区河流水质评价及水质时空特征分析:以贵州省张维河为例[J]. *环境工程*, 2019, 37(10):49-54,132.
- LIU Xianmei, ZHOU Zhongfa, ZHANG Haotian, *et al.* Assessment of water quality and its spatial and temporal characteristics of rivers in Karst mountain area based on principal component analysis: a case study on Zhangwei River in Guizhou Province [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10):49-54,132(in Chinese).
- [7] 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.
- [8] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(8):2133-2139.
- ZHANG Li, QI Shihua, QU Chengkai, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8):2133-2139(in Chinese).
- [9] 郝守宁, 李成林, 郭永刚. 西藏尼洋河流域饮用水源地重金属健康风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(5):154-163.
- HAO Shouning, LI Chenglin, GUO Yonggang. Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Nyang River basin in Tibet [J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 43(5):154-163(in Chinese).
- [10] 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.
- WANG Ruoshi, XU Qiujin, ZHANG Xian, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical townships water sources in Dongjiang River basin [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9):3083-3088(in Chinese).
- [11] 郭杏妹, 李宁, 康园, 等. 佛山市农村饮用水中重金属的健康风险评价[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2014, 35(1):21-25.
- GUO Xingmei, LI Ning, KANG Yuan, *et al.* The health risk evaluation of heavy metals via rural surface water source in Foshan [J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2014, 35(1):21-25(in Chinese).
- [12] 杨林平, 俞慧云, 俞联平, 等. 玛曲县天然草原牧草生长盛期植被盖度及变化[J]. *中国草食动物科学*, 2020, 40(1):22-26.
- YANG Linping, YU Huiyun, YU Lianping, *et al.* Vegetation coverage and change of grassland during forage growth period in Maqu [J]. *China Herbivore Science*, 2020, 40(1):22-26(in Chinese).
- [13] 戚登臣, 李广宇, 陈文业, 等. 黄河上游玛曲县天然草场退化现状、成因及治理对策[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2):202-207.
- QI Dengchen, LI Guangyu, CHEN Wenye, *et al.*

- Present status, causes and control countermeasures of natural grassland degeneration in Maqu County [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(2): 202-207 (in Chinese).
- [14] NGUYEN B T, NGUYEN T M T, BACH Q V. Assessment of groundwater quality based on principal component analysis and pollution source-based examination: a case study in Ho Chi Minh City, Vietnam [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(6):395.
- [15] QI L L, ZHANG H, GUO S S, *et al.* Groundwater pollution source apportionment using principal component analysis in a multiple land-use area in southwestern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(9):9000-9011.
- [16] 刘小楠, 崔巍. 主成分分析法在汾河水质评价中的应用[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(18):105-108.
- LIU Xiaonan, CUI Wei. Application of principal component analysis method to assessment of water quality in Fenhe River [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(18):105-108(in Chinese).
- [17] 万金保, 曾海燕, 朱邦辉. 主成分分析法在乐安河水质评价中的应用[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(16): 104-108.
- WAN Jinbao, ZENG Haiyan, ZHU Banghui. Application of principal component analysis in evaluation of water quality of Lean River [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(16): 104-108 (in Chinese).
- [18] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(4):1598-1607.
- ZHANG Qinghua, WEI Yongzhu, CAO Jianhua, *et al.* Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River basin, and related health risk assessments[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1598-1607(in Chinese).
- [19] REZA R, SINGH G. Heavy metal contamination and its indexing approach for river water [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2010, 7(4):785-792.
- [20] 于云江, 向明灯, 孙朋. 健康风险评价中的不确定性[J]. *环境与健康杂志*, 2011, 28(9): 835-838.
- YU Yunjiang, XIANG Mingdeng, SUN Peng. Uncertainty in health risk assessment [J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, 28(9): 835-838 (in Chinese).
- [21] 许海萍, 张建英, 张志剑, 等. 致癌和非致癌环境健康风险的预期寿命损失评价法[J]. *环境科学*, 2007, 28(9):2148-2152.
- XU Haiping, ZHANG Jianying, ZHANG Zhijian, *et al.* Method of loss of life expectancy for quantitate and compare the health risk caused by carcinogen and non-carcinogen pollutants [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9): 2148-2152(in Chinese).
-
- 作者简介:张国珍(1969-),男,甘肃靖远人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源与水环境领域的研究与教学工作。
- E-mail:zhangguozhen@mail.lzjtu.cn
- 收稿日期:2021-05-16
- 修回日期:2021-06-19

(编辑:任莹莹)

治理水土流失 建设美丽中国