

龚正,于琦,汪娴,等.西北地区地下水污染现状及风险调查[J].净水技术,2022,41(3):118-133.

GONG Z, YU Q, WANG X, et al. Investigation on risks and present situation of groundwater pollution in northwest regions[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 118-133.



扫码试试?

西北地区地下水污染现状及风险调查

龚正,于琦,汪娴,史俊,邓慧萍*

(同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要 随着我国西北地区城市化进程的加快,地下水污染问题日益突出,地下水环境质量直接影响当地人民的生产生活。虽然前人对西北地区地下水污染情况已有了大量的研究,但缺乏较为宏观的概述和规律性的总结。因此,文中对西北地区各省市及自治区的各类型污染超标情况进行了调研。在详实的数据基础上,参照我国《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),阐述了各地区需注意的水质超标风险,分析了各地区地下水污染的原因、污染物的来源、需采取的治理措施。文章从气候条件、地形地势、地质构造等自然因素和农业灌溉、工业排放和超量开采等人为因素方面,总结了各类型超标风险的地区性规律,归纳了各类型污染的地下水化学特征。

关键词 西北地区 地下水 氮污染 氟污染 铁锰污染 砷污染

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)03-0118-16

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.018

Investigation on Risks and Present Situation of Groundwater Pollution in Northwest Regions

GONG Zheng, YU Qi, WANG Xian, SHI Jun, DENG Huiping*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract With the acceleration of urbanization in the northwest regions of China, the issue of groundwater pollution has become increasingly severe, and the quality of groundwater environment directly affects the industries and life of local people. Lots of researches regarding to groundwater pollution of these regions have been studied, however relatively macroscopical overview and regularity summary are needed. Therefore, the situations of various pollutions of groundwater that not meet the standards in the provinces and autonomous regions of these areas have been investigated in this paper. Based on detailed survey and with reference to *Standard for Groundwater Quality*(GB/T 14848—2017) and *Standard for Drinking Water Quality*(GB 5749—2006), the security risks of water quality should raise attention. Meanwhile, the causes of contamination, the sources of pollutants, and management measures to be taken in each region have been analyzed in this paper. In the light of natural factors such as climate conditions, topography and geological structure and human factors such as agricultural irrigation, industrial discharge and excessive exploitation, the regional patters of various risk and the water chemical characteristics of various contaminations in groundwater have been summarized.

Keywords northwest region groundwater nitrogen pollution fluorine pollution iron and manganese pollution arsenic pollution

西北地区位于我国西北内陆,包括新疆维吾尔

自治区、青海省、甘肃省、陕西省、宁夏回族自治区和内蒙古自治区。目前,西北地区地下水主要超标项目为总溶解固体(TDS)、总硬度(TH)、硝酸盐、氯化物和氟化物等,不可直接利用的地下水分布面积占该区总面积的17.7%,主要分布于该区域内陆盆地中心地带^[1]。在西北干旱与半干旱地区,地下水污染严重制约着经济的可持续发展,威胁着人类的健

[收稿日期] 2021-07-07

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2020YFD1100501-02)

[作者简介] 龚正(1997—),男,硕士,研究方向为西北地区地下水特征污染物识别和高硝酸盐水质净化技术,E-mail: zhengong@tongji.edu.cn。

[通信作者] 邓慧萍(1964—),女,教授,研究方向为高级氧化水处理技术,E-mail: denghuiping@tongji.edu.cn。

康^[2]。因此,本文对西北地区各省市地下水水质进行文献调研,对近 10 年内曾发生过地下水污染的区域进行风险预警与防范,具有十分重要的理论意义。

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),地下水各指标限值如表 1 所示。

表 1 地下水水质指标限值
Tab. 1 Limits for Groundwater Quality Indices

指标	限值/(mg·L ⁻¹)
TDS	1 000
NO ₃ ⁻ -N	20
NO ₂ ⁻ -N	1.0
氨氮	0.5
SO ₄ ²⁻	250
F ⁻	1.0
Cl ⁻	250
TH	450
Cr ⁶⁺	0.05
挥发酚类	0.002
Fe	0.3
I	0.08
Mn	0.10
As	0.01

下文为各省及自治区地下水污染现状及风险调查结果及污染物处理工艺简述。

1 甘肃省

甘肃省各地区地下水污染情况如表 2 所示。兰州市秦王川灌区地下水 NO₃⁻ 与 Cl⁻、K⁺ 呈正相关,污染源为生活污水和农业化肥^[3];氟污染主要来源于地层中的含氟矿物,刘家井村、上古山村等有较大氟污染风险^[4]。就市区而言,西固区的石油化工区、七里河区的农业污灌区、安宁区的工业区、城关区的垃圾填埋场区域由于工农业发达,均有发生硝酸盐和铁锰污染的风险^[5-6]。

武威市凉州区铁路西南带的西营河与金塔河灌区,尤其是臧家大庄至陈家庄一带、新城以北地段^[7],地势低洼,地下水流速较慢,各污染物容易富集,加之农业聚集的乡镇居多,地下水水质较差,需防范地下水污染^[8]。民勤县(民勤盆地)由于阳离

子交换作用、蒸发浓缩作用、溶滤作用^[9]和人类活动,TDS 严重超标,水质污染由南向北风险逐渐升高^[10]。

张掖市甘州区人口密集但缺乏完善的污水处理设施,临泽县、高台县城区地下水埋深浅易污染,存在较高的污染风险^[11]。具体而言,甘州区龙渠乡 SO₄²⁻ 超标;临泽县板桥镇 TH、TDS、SO₄²⁻、氯化物超标;高台县宣化镇水质为 IV 类^[12]。此外,龙首山山前地带由于含氟岩石的存在,有较高氟污染的风险^[13]。

庆阳市属大陆型干旱气候区,受到降水强度的制约,地下水矿物质含量较高,存在点状和面状污染。具体而言,环县红星村、华池县孙家川村和合水县老城镇水质较差,需注意 TDS、氯化物、SO₄²⁻、NO₃⁻-N、Cr⁶⁺、TH 超标风险的防范^[14]。

酒泉市肃州区地下水有氟化物、TDS 和铁锰超标的风险。就含氟水而言,岩矿石含有氟源,群众通过手压井抽取浅层地下水饮用,有较大的健康风险^[15]。就苦咸水而言,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 主要由硅酸盐岩和蒸发岩溶解,SO₄²⁻ 主要由石膏、芒硝溶解^[16],使得地下水矿化度上升,硬度较大。就铁锰水而言,工厂产生的废水、废渣直排,加之污水处理设备落后,导致地下水铁锰含量增高^[17]。此外,酒泉市金塔县地下水水质极差,有 TDS、SO₄²⁻ 和 TH 超标风险^[18]。在疏勒河灌区,山前平原倾斜,地下水汇集于下游灌区,自然蒸发导致盐分富集,引起 TDS、SO₄²⁻、TH 等项目超标^[19]。

2 宁夏回族自治区

宁夏回族自治区各地区地下水污染情况如表 3 所示。银川市黏土中含氟量和铁、锰含量均较大,岩石的风化、地下水的蒸发浓缩和阳离子的交替吸附导致地下水有氟化物、碘化物和铁、锰、砷超标的风险^[22-24]。由于银川平原地下水为还原性偏碱性条件,且 TDS 较低,砷含量超标^[25] 成为饮水健康风险的最主要污染物。由于宁夏曾经是饮水型地方性砷中毒区域之一^[26],要尤其注意砷超标风险的防范,建议用离子交换法、吸附法、膜分离及铁锰氧化法防治^[27]。此外,由于除氟效果好、管理难度低、稳定性好,水厂可考虑使用纳滤+超滤技术对饮用地下水出厂水集中除氟^[28]。

石嘴山市大武口区有 TH、TDS、氯化物、SO₄²⁻、

表2 甘肃省各地区地下水污染情况
Tab. 2 Groundwater Pollution in Different Regions of Gansu Province

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地水样超标率
兰州市	秦王川盆地	[4]	2011年	F ⁻	2.5	11.8%
兰州市	城区	[5]	2012年	NO ₃ ⁻ -N	209.10	51.2%
兰州市	城区	[6]	2012年	Fe	45.21	62%
兰州市	城区	[6]	2012年	Mn	2.269	55%
武威市	凉州区	[8]	2013年	SO ₄ ²⁻	1 106.70	38.64%
武威市	凉州区	[8]	2013年	NO ₃ ⁻ -N	41.37	18.18%
武威市	民勤县	[10]	2009年—2013年	TDS	/	14.69%
武威市	石羊河流域	[20]	2011年—2015年	TDS	12 685	/
武威市	石羊河流域	[20]	2011年—2015年	Fe	4.55	/
张掖市	城区	[11]	2015年	NO ₃ ⁻ -N	283.32	17.6%
张掖市	龙首山山区	[13]	2014年	F ⁻	2.0	29.17%
庆阳市	环县红星村	[14]	2018年	TH	2 050	/
庆阳市	环县红星村	[14]	2018年	TDS	3 020	/
庆阳市	环县红星村	[14]	2018年	SO ₄ ²⁻	1 660	/
庆阳市	合水县老城镇	[14]	2018年	TDS	1 910	/
庆阳市	合水县老城镇	[14]	2018年	SO ₄ ²⁻	1 210	/
庆阳市	华池县孙家川村	[14]	2018年	TDS	1 080	/
庆阳市	宁县早胜镇	[14]	2018年	Cr ⁶⁺	0.064	/
酒泉市	肃州区	[15]	2016年	TH	2 154	33.33%
酒泉市	肃州区	[15]	2016年	TDS	3 580	27.78%
酒泉市	肃州区	[15]	2016年	SO ₄ ²⁻	760	27.78%
酒泉市	酒泉东盆地	[16]	2015年—2016年	TDS	10 367	29.91%
酒泉市	酒泉东盆地	[16]	2015年—2016年	Cl ⁻	4 889.0	/
酒泉市	酒泉东盆地	[16]	2015年—2016年	SO ₄ ²⁻	2 853.0	/
酒泉市	酒泉东盆地	[16]	2015年—2016年	NO ₃ ⁻ -N	127.19	/
酒泉市	酒泉东盆地	[21]	2018年	TDS	5 439	28.57%
酒泉市	酒泉东盆地	[21]	2018年	SO ₄ ²⁻	1 482.0	45.71%
酒泉市	酒泉东盆地	[21]	2018年	Fe	/	22.86%
酒泉市	酒泉东盆地	[21]	2018年	Mn	/	40%
酒泉市	疏勒河灌区	[19]	2013年	TH	1 430	58.18%
酒泉市	疏勒河灌区	[19]	2013年	TDS	2 620	56.36%
酒泉市	疏勒河灌区	[19]	2013年	SO ₄ ²⁻	519	52.72%

NO₂-N、F⁻超标的风险。究其原因,在地下水由南向北过程中,岩盐和石膏不断溶解,导致北部 SO₄²⁻ 和

Cl⁻ 浓度较高^[29]。贺兰山前地下水水质较好,北部的平罗县至惠农区一带水质最差^[30]。

表 3 宁夏回族自治区各地区地下水污染情况
Tab. 3 Groundwater Pollution in Ningxia Hui Autonomous Region

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地下水样超标率
银川市	灵武市	[22]	2019年	F ⁻	5.89	30%
银川市	银川平原	[25]	2009年	As	0.177	70%
银川市	银川平原	[24]	2017年	I	2.368	13.9%
银川市	银川平原	[23]	2018年	TH	/	56.1%
银川市	银川平原	[23]	2018年	Cl ⁻	/	42.4%
银川市	银川平原	[23]	2018年	SO ₄ ²⁻	/	63.6%
银川市	银川平原	[23]	2018年	Fe	47.6	59.24%
银川市	银川平原	[23]	2018年	Mn	4.53	54.56%
石嘴山市	大武口区	[29]	2010年	TH	811.159	30.77%
石嘴山市	大武口区	[29]	2010年	TDS	2 290.95	38.46%
石嘴山市	大武口区	[29]	2010年	Cl ⁻	655.88	38.46%
石嘴山市	大武口区	[29]	2010年	SO ₄ ²⁻	664.25	46.15%
石嘴山市	大武口区	[29]	2010年	NO ₂ ⁻ -N	0.1	23.08%
石嘴山市	大武口区	[29]	2010年	F ⁻	1.66	30.77%
吴忠市	金积镇	[31]	2011年	TH	/	87.5%
吴忠市	金积镇	[31]	2011年	TDS	/	37.5%
吴忠市	金积镇	[31]	2011年	氨氮	/	50%
吴忠市	金积镇	[31]	2011年	Mn	/	56.25%
吴忠市	青铜峡市	[32]	2019年	TDS	1 602.89	/
吴忠市	盐池县	[33]	2011年	TDS	10 900	82.28%
吴忠市	盐池县	[33]	2011年	F ⁻	14.7	87.39%
固原市	原州区	[34]	2016年	TH	1 351.7	37.5%
固原市	原州区	[34]	2016年	TDS	2 119.3	37.5%
固原市	原州区	[34]	2016年	SO ₄ ²⁻	918.6	37.5%
固原市	原州区	[34]	2016年	F ⁻	1.8	37.5%
固原市	原州区	[34]	2016年	Fe	0.5	25%
固原市	西吉县	[38]	2012年	TDS	4 120	/
固原市	西吉县	[38]	2012年	F ⁻	2.4	44%
固原市	西吉县	[38]	2012年	TDS	8 338.6	66.67%
固原市	西吉县	[38]	2012年	Cl ⁻	1 750.3	60%
固原市	西吉县	[38]	2012年	SO ₄ ²⁻	3 904.0	86.67%
固原市	西吉县	[38]	2012年	F ⁻	2.2	60%

吴忠市金积镇的造纸废水排入南干沟,导致金积水源地上游以及南干沟沿线 TDS、氨氮、锰含量超标风险较高。同时,此地区有地下水还有萘和荧蒽等多环芳烃检出,应注意有机物污染的防范^[31]。青铜峡市地下水中的离子主要来自岩石矿物的溶解,

由于地下水由西南流向东北,东北部地区更需注重污染的防治^[32]。盐池县境内石膏分布广、厚度大,地下水 TDS 和氟污染风险极高,由此还引起了严重的地方病^[33]。

固原市地下水 V 类水主要分布在清水河和冬至

河的河谷区域,河水入渗加之地层因素,导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 超标风险较大^[34]。彭堡镇地下水受基岩山区补给,有 Cl^- 超标风险。石碑村至高坡村以东、原州区以北的区域、彭阳县罗洼乡一带以及西吉县地区,由于偏碱性环境中碳酸氢根和氢氧根会置换出矿物中的 F^- ,富氟岩石矿物的溶解、地下水水力坡度小、蒸发浓缩作用强, F^- 超标风险较大^[35-38]。

3 青海省

青海省各地区地下水污染情况如表 4 所示。海东市平安区由于大气降水少,蒸发强烈,有较大的 TDS、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 超标风险。红崖子沟、哈拉直沟和湟水河流域两侧岸坡由于人类的聚集、农业的发展, NO_3^- -N 和氨氮有超标风险,但人口密度不大,超标风险也不大^[39]。

海西蒙古族藏族自治州由于盆地较多,地下水流速慢,加之盐化工企业和金属冶炼企业众多,污染物易汇集而超标,盆地中央、小柴旦湖及大苏干湖附近超标风险,尤其是西北部的茫崖镇、乌兰县、冷湖镇等地水质较差^[40]。

海南藏族自治州贵德盆地入侵岩铁锰矿物中富含砷元素,加之地热资源丰富,地热水的高温、弱碱、还原性环境会导致砷的溶出和迁移,超标风险较大^[41-42]。

海北藏族自治州海北化工厂曾发生污染事故,在停产 10 年后,地下水中 Cr^{6+} 依然超标,从厂区到湟海渠,从泉集河到上星火村依然存在带状污染,可采用抽水法、置换被污染地层和清理固体污染源的方法综合治理^[43]。

表 4 青海省各地区地下水污染情况
Tab. 4 Groundwater Pollution in Different Regions of Qinghai Province

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	调研地水样超标率
海东市	平安盆地	[39]	2018 年	TH	/	40.91%
海东市	平安盆地	[39]	2018 年	TDS	/	36.36%
海东市	平安盆地	[39]	2018 年	Cl^-	/	22.72%
海东市	平安盆地	[39]	2018 年	SO_4^{2-}	/	40.91%
海西蒙古族藏族自治州	柴达木盆地	[40]	2018 年	TDS	/	51.30%
海西蒙古族藏族自治州	柴达木盆地	[40]	2018 年	Cl^-	/	42.23%
海西蒙古族藏族自治州	柴达木盆地	[40]	2018 年	SO_4^{2-}	/	53.37%
海西蒙古族藏族自治州	柴达木盆地	[40]	2018 年	F^-	/	27.72%
海西蒙古族藏族自治州	柴达木盆地	[40]	2018 年	I	/	11.14%
海南藏族自治州	贵德盆地	[41]	2013 年	TDS	1 978.5	23.81%
海南藏族自治州	贵德盆地	[41]	2013 年	As	0.035 4	52.38%
海北藏族自治州	海晏县	[43]	2014 年	Cr^{6+}	33.8	35.29%

4 内蒙古自治区

内蒙古自治区各地区地下水污染情况如表 5 所示。呼和浩特市西南部和托克托县为粮食产区^[44],由于污水灌溉、畜禽养殖、施肥过度^[45],加之制药和煤化工企业的废水排放,有 TH 和“三氮”超标的风险^[46-47]。呼和浩特盆地中部处于大黑河与黄河冲湖积平原中心^[48],为典型的湖洼-池沼还原性沉积环境,故而土默特左旗哈素海^[49]和托克托县双河镇、古城乡、五申镇三价砷含量超标风险非常大^[50]。同时,该区域萤石含量高,桃花乡东北部^[51]和黑城以东^[52]地区,尤其是五申镇乃只盖乡^[53],氟

超标风险也非常大。

包头市 TDS 含量由东北向西南逐渐增高,包钢渣坝、昆河排污渠附近超标风险较大^[54]。由于地势平坦,地下水埋深浅,加之工农业活动,昆都仑区、东河区东南部和青山区南部地下水还应注意石油类、挥发酚、氰化物等化工污染防治^[55]。

赤峰市富氟矿物分布广泛^[56],在 20 世纪 90 年代曾经发生过严重氟污染,全市人口氟骨症和斑釉齿比例达 61%,近年来情况虽然有所改善,但李家园子至达林台淖尔地区仍应注意防范氟超标风险^[57-59]。阿鲁科尔沁旗地区地处大草原,地下水受

表5 内蒙古自治区各地区地下水污染情况
Tab. 5 Groundwater Pollution in Inner Mongolia Autonomous Region

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地水样超标率
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[44]	2006年	TH	/	34.48%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[48]	2013年	TDS	6 258	31.2%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[48]	2013年	Cl ⁻	2 232	27.1%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[48]	2013年	NO ₃ ⁻ -N	121.3	10.75%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[48]	2013年	F ⁻	20	37.2%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[48]	2013年	Fe	12.8	41.7%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[48]	2013年	Mn	1.37	31.5%
呼和浩特市	呼和浩特盆地	[50]	2012年—2017年	As	0.428	27.11%
呼和浩特市	土默特左旗	[49]	2014年	Cl ⁻	920	/
呼和浩特市	土默特左旗	[49]	2014年	SO ₄ ²⁻	659	/
呼和浩特市	托克托县	[52]	2013年	F ⁻	7.2	/
呼和浩特市	托克托县	[81]	2014年	NO ₃ ⁻ -N	368	/
呼和浩特市	呼包坳陷东部	[53]	2013年	Cl ⁻	2 654	44.12%
呼和浩特市	呼包坳陷东部	[53]	2013年	F ⁻	7.2	79.41%
呼和浩特市	呼包坳陷东部	[53]	2013年	Mn	0.88	35.29%
包头市	城区	[54]	2013年	TDS	3 041	/
包头市	城区	[54]	2013年	Cl ⁻	1 056.5	/
包头市	城区	[54]	2013年	SO ₄ ²⁻	1 304.07	/
包头市	城区	[54]	2013年	NO ₃ ⁻ -N	403.81	/
包头市	城区	[54]	2013年	F ⁻	4.27	/
赤峰市	巴林右旗	[59]	2009年	NO ₃ ⁻ -N	/	17.24%
赤峰市	巴林右旗	[59]	2009年	F ⁻	/	51.72%
通辽市	城区	[82]	2006年	F ⁻	2.2	/
通辽市	科尔沁地区	[62]	2012年	NO ₂ ⁻ -N	5.33	27.63%
通辽市	科尔沁地区	[62]	2012年	Fe	8.19	75%
通辽市	科尔沁地区	[62]	2012年	Mn	1.86	90.79%
通辽市	科尔沁地区	[62]	2012年	As	0.07	10.53%
鄂尔多斯市	鄂尔多斯盆地	[64]	2014年	Cl ⁻	2 199	/
鄂尔多斯市	鄂尔多斯盆地	[64]	2014年	NO ₃ ⁻ -N	203.23	/
鄂尔多斯市	鄂尔多斯盆地	[64]	2014年	F ⁻	15.50	/
鄂尔多斯市	鄂尔多斯盆地	[83]	2016年	TH	/	24.04%
鄂尔多斯市	鄂尔多斯盆地	[83]	2016年	TDS	/	26.02%
鄂尔多斯市	鄂尔多斯盆地	[83]	2016年	SO ₄ ²⁻	/	23.06%
鄂尔多斯市	达拉特旗	[65]	2012年	NO ₂ ⁻ -N	/	22.22%
鄂尔多斯市	达拉特旗	[65]	2012年	F ⁻	/	22.22%
鄂尔多斯市	达拉特旗	[65]	2012年	As	/	10%
鄂尔多斯市	杭锦旗	[84]	2012年	NO ₃ ⁻ -N	86.4	26.32%
呼伦贝尔市	呼伦贝尔高原	[66]	2010年	F ⁻	2.8	30%

(续表5)

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地水样超标率
呼伦贝尔市	满洲里市	[85]	1999年	F ⁻	2.12	100%
呼伦贝尔市	满洲里市	[85]	1999年	As	0.0167	50%
呼伦贝尔市	阿荣旗	[69]	2013年	NO ₃ ⁻ -N	111.60	38.98%
巴彦淖尔市	杭锦后旗	[73]	2011年	As	0.721	60%
巴彦淖尔市	杭锦后旗	[73]	2011年	I	1.290	48%
巴彦淖尔市	杭锦后旗	[70]	2014年	F ⁻	3.36	/
巴彦淖尔市	五原县	[71]	2005年	As	0.658	70.6%
巴彦淖尔市	乌拉特前旗	[86]	2019年	TDS	36 473.6	/
巴彦淖尔市	乌拉特前旗	[86]	2019年	Cl ⁻	20 031	/
巴彦淖尔市	乌拉特前旗	[86]	2019年	NO ₃ ⁻ -N	172.7	/
乌兰察布市	集宁区	[87]	2015年	TDS	2 361.44	20%
乌兰察布市	集宁区	[87]	2015年	Cl ⁻	576	20%
乌兰察布市	化德县	[74]	2013年	TDS	1 273.74	25%
乌兰察布市	化德县	[74]	2013年	F ⁻	5.6	83.33%
乌兰察布市	四子王旗	[75]	2004年	NO ₃ ⁻ -N	360	/
锡林郭勒盟	锡林浩特市	[76]	2016年	氨氮	4.88	66.7%
锡林郭勒盟	锡林浩特市	[76]	2016年	F ⁻	1.45	27.6%
锡林郭勒盟	锡林浩特市	[76]	2016年	Fe	0.68	46.7%
锡林郭勒盟	锡林浩特市	[76]	2016年	Mn	1.86	80%
锡林郭勒盟	阿巴嘎旗	[78]	2017年	NO ₃ ⁻ -N	67.09	65.22%
阿拉善盟	城区	[79]	2013年—2016年	SO ₄ ²⁻	1 610	50.38%
阿拉善盟	吉兰泰盆地	[88]	2019年	TDS	12 140	/
阿拉善盟	吉兰泰盆地	[88]	2019年	Cl ⁻	9 100.89	/
阿拉善盟	吉兰泰盆地	[88]	2019年	氨氮	126.62	/
阿拉善盟	吉兰泰盆地	[88]	2019年	F ⁻	46.18	/

到生活污水污染,又缺乏水质净化和消毒设施,有细菌总数和总大肠菌群数超标风险^[60]。

通辽市科尔沁区地下水属于高矿化度、重碳酸盐类的弱碱性硬水^[61],TDS自西向东逐渐升高,铁、锰、氟原生环境背景值较高,超标风险较大,同时,受人类活动及工农业生产影响,“三氮”也有超标风险^[62]。值得注意的是,科尔沁区由于气候、地形地貌、岩石性质、水化学类型等诸多因素,20世纪90年代也为氟中毒病区,当时利用氧化铝和麦饭石降氟,当下也应注意氟超标风险的防范^[63]。

鄂尔多斯盆地石炭系-侏罗系地下水硝酸盐污染因过度施肥导致,白垩系地下水硝酸盐污染由黄铁矿氧化、石油天然气开采导致,硝酸盐都有超标风

险^[64]。达拉特旗地区从西南到东北地下水水质变差,由淡水变为咸水,有TH和TDS超标风险^[65]。

呼伦贝尔市酸性花岗岩类分布广泛,含氟岩石风化导致呼伦湖东南部漫滩、新巴尔虎右旗及满洲里市附近需注意氟超标^[66-67]。鄂温克族自治旗地下水径流较弱,需防范SO₄²⁻超标风险^[68]。阿荣旗由于化肥施用和人畜粪便等因素,需防范“三氮”超标风险^[69]。

巴彦淖尔市杭锦后旗曾是内蒙古最严重的砷中毒区^[70],在2008年,扇前洼地砷依然超标900多倍。由于狼山富含大理岩、片麻岩、板岩等富砷矿石^[71],地下水处于强还原带,五原县、沙海镇地区应尤其注意防范砷超标风险^[72],可用海泡石和粉煤灰

除砷。同时,由于地下水处于弱碱还原性环境, Fe_2O_3 的溶解和有机质的分解均可促进碘的富集,沙海镇、蛮会镇和三道桥镇还应注意碘超标风险^[73]。

乌兰察布市地下水同样为还原弱碱性水,花岗岩等含氟硅酸盐矿物在此环境中易溶于水,需注意氟超标风险的防范^[74]。由于农业发达,武川县的西官井和张正恒地区、四子王旗的牛房滩和三元井地区也需防范“三氮”超标风险^[75]。

锡林郭勒盟气候条件干燥,锡林浩特市需注意 TH、氟化物和铁锰超标问题^[76],东乌珠穆沁旗需注意 TDS、氟化物和硼超标问题^[77]。同时,由于各旗县地处草原,动物粪便降解后进入地下水,需注意“三氮”超标问题^[78]。

阿拉善盟西潮水槽地、东潮水槽地、土克木盆地、吉兰泰盆地、额济纳盆地和雅布赖山前盆地地区需注意 TDS、TH、 SO_4^{2-} 和氯化物等指标,避免超标。吉兰泰盆地南部为农业种植区,硝酸盐超标风险比其他地区要大。阿拉善盟富含高氟岩层,又有吸氟的黏土底层,地形平坦,气候干燥,罕乌拉至敖伦布拉克一带尤其需防范氟超标^[79-80]。

5 新疆维吾尔自治区

新疆维吾尔自治区各地区地下水污染情况如表 6 所示。乌鲁木齐市地下水水质状况暂时缺乏有效的数据,暂未在表 6 中列出。根据文字记载,乌鲁木齐是西北地区重要的能源化工基地^[89],大气污染、污水处理不合理和工业废水排放^[90]导致地下水 TH、TDS、氯化物、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N 污染风险较大^[91]。

吐鲁番盆地气候炎热,降水量少,溶滤作用强,却勒塔格山区和艾丁湖湖区地带需注意 TH、TDS、 SO_4^{2-} 、氯化物的超标^[92]。同时,人类活动导致的过度开采和直接污染,使得三堡乡、鲁克沁镇和库米什镇地下水水质为劣 V 类,大部分地区地下水不能作为生活、农业和一般工业用水^[93],需加强地下水监测^[94]。

哈密市南部冲洪积平原区水质最差,十三间房至五堡南一带和南湖乡至梧桐泉一带需注意 TH、TDS、氯化物、 SO_4^{2-} 等常规无机指标的超标^[95]。

阿克苏市、阿瓦提县、乌什县和柯坪县同样需注意无机常规离子的超标。同时,该地区磷灰石、萤

石、云母等^[96]含氟岩石分布广,台兰河等地表水和冰雪融水一起将氟化物从山区带到低洼处,随后的蒸发作用使得离子浓缩,导致阿瓦提县新大河两岸地区、台兰河灌区和库托河灌区含氟量严重超标^[97],成为了新疆地方性氟中毒防治重点地区之一^[98]。由于岩石中的砷元素在偏碱性条件下会从针铁矿、水铝矿中释放到水体,加之含砷农药的喷洒,温宿县古勒阿瓦提乡、阿瓦提县乌鲁却勒镇和柯坪县玉尔其乡需尤其注意砷超标^[99]。

和田地区在 20 世纪五六十年代兴建水库,导致地下水水位上升,蒸发加剧,地下水应注意 TH、TDS、 SO_4^{2-} 超标风险^[100]。同时,氧化性偏碱性的地下水环境,加之居民生活污染物和禽畜粪便的随意排放,墨玉县四十七团六连、和田县肖尔巴格乡以及和田市伊里其乡需防范“三氮”超标^[101]。此外,由于角闪石、云母等含氟、含铁锰矿物的溶出,和田河流域绿洲区还应注意氟超标风险和铁锰超标^[102-103]。

塔城盆地处于地下水排泄区,重污染点主要分布在塔城市、额敏县及其周边人口密集地区,零星分布在工矿企业、污水处理厂、垃圾填埋场周围^[104]。同时,由于含氟岩石风化溶解,盆地南部扇前洼地和中部洼地应注意氟超标^[105];由于原生地质环境和人类活动,盆地北部塔尔巴哈台铜成矿带、盆地中部巴尔鲁克成矿带以及盆地南部哈图成矿带、包古图铜钼成矿带需注意铁锰超标^[106]。

喀什地区是南疆的经济、政治、交通、文化中心,是主要粮棉基地和灌溉农业区,工业发展迅速,因此,位于冲积细土平原区且地下水动力条件较差的岳普湖县和疏勒县需防范“三氮”和砷超标^[107]。喀什地区北部山区存在石膏、芒硝、铁矿、锰矿,以及富氟的变质岩、沉积岩、萤石等,位于此地区的喀什市、伽师县、巴楚县、麦盖提县和疏勒县需尤其注意 SO_4^{2-} 、铁锰、氟化物超标风险^[108-111]。

巴音郭楞蒙古自治州博斯腾湖流域和焉耆盆地矿物众多,静县西南部、博湖县东北部、焉耆县西南部,和硕县地区需注意锰、镍、铜、铬和锌等重金属超标风险^[112-114]。由于存在化工厂、造纸厂等工业污染源,农场、养殖场等农业污染源和污水处理厂、垃圾填埋场等生活污染源,博斯腾湖地区、且木-若羌地区和焉耆盆地地区还应注意三氯甲烷、甲苯、二氯乙烷等有机污染物和“三氮”超标的可能^[115-118]。

伊犁哈萨克自治州南面为天山,北面是库尔班通古特沙漠,地势从南向北逐渐降低^[119],故而北部地下水水质超标风险较大。奎屯地区是中国大陆第一个砷中毒病区^[120],砷元素来自当地的沉积环境和山区构造山脉的煤层^[121-122],浓度从南向北逐渐升高。乌苏市由于农业生产中的地膜、农药、化肥对地下水的污染,主要表现为部分地区氟、砷、碘超标,需预防地方性氟中毒、砷中毒、甲状腺肿病的发生^[123]。伊犁河察布查尔县和伊宁市段两侧地带需

注意无机常规化学指标的超标,源县别斯托别乡、尼勒克县克令乡和霍城县清水河镇需注意无机毒理指标的超标^[124]。

石河子市自南向北倾斜,北部地区水力坡度小,故而地下水水质由南向北逐渐变差^[125]。地区南部的煤系地层富含氟元素与砷元素,加之电厂废物的排放,平原区北部靠近沙漠区需注意氟化物和砷超标。此外,地区主要为农业区,玛河和塔西河周边农垦区的化肥、农药和杀虫剂等会导致“三氮”超标^[126]。

表6 新疆维吾尔自治区各地区地下水污染情况
Tab. 6 Groundwater Pollution in Xinjiang Uygur Autonomous Region

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地水样超标率
吐鲁番市	吐鲁番盆地	[92]	2014年	TH	/	30%
吐鲁番市	吐鲁番盆地	[92]	2014年	TDS	/	32%
吐鲁番市	吐鲁番盆地	[92]	2014年	SO ₄ ²⁻	/	38%
吐鲁番市	吐鲁番盆地	[92]	2014年	NO ₃ ⁻ -N	/	22%
哈密市	哈密盆地	[95]	2014年	Cl ⁻	1 595.2	20%
哈密市	哈密盆地	[95]	2014年	SO ₄ ²⁻	1 074.0	20%
哈密市	哈密盆地	[95]	2014年	NO ₂ ⁻ -N	/	34%
哈密市	哈密盆地	[95]	2014年	F ⁻	/	14%
阿克苏地区	阿克苏市	[97]	2005年	SO ₄ ²⁻	/	57%
阿克苏地区	阿克苏市	[98]	2013年	TDS	2 996.34	27.27%
阿克苏地区	阿克苏市	[98]	2013年	Cl ⁻	809.98	22.73%
阿克苏地区	阿克苏市	[99]	2017年	As	0.0987	26.7%
阿克苏地区	阿克苏市	[96]	2018年	F ⁻	7.0	63.4%
阿克苏地区	阿克苏市	[127]	2018年	F ⁻	6.1	83%
阿克苏地区	温宿县	[97]	2005年	SO ₄ ²⁻	/	27%
阿克苏地区	温宿县	[97]	2005年	F ⁻	/	60%
阿克苏地区	阿瓦提县	[97]	2005年	TH	/	70%
阿克苏地区	阿瓦提县	[97]	2005年	SO ₄ ²⁻	/	70%
阿克苏地区	阿瓦提县	[97]	2005年	F ⁻	/	57%
阿克苏地区	乌什县	[97]	2005年	TDS	/	40%
阿克苏地区	柯坪县	[97]	2005年	F ⁻	/	17%
和田地区	和田河流域	[103]	2014年	TDS	3 404.0	75%
和田地区	和田河流域	[103]	2014年	F ⁻	5.80	62.8%
和田地区	和田河流域	[103]	2014年	Fe	4.579	55%
和田地区	和田河流域	[103]	2014年	Mn	4.114	40%
和田地区	和田河流域	[103]	2014年	As	0.043	5%
塔城地区	塔城盆地	[105]	2015年	TH	1 237.0	23.94%
塔城地区	塔城盆地	[105]	2015年	TDS	3 881.0	16.9%
塔城地区	塔城盆地	[105]	2015年	SO ₄ ²⁻	2 082.0	32.9%
塔城地区	塔城盆地	[105]	2015年	F ⁻	4.70	14.08%

(续表6)

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地水样超标率
塔城地区	塔城盆地	[105]	2015年	Fe	3.57	26.3%
喀什地区	喀什地区	[108]	2014年	TH	/	61.1%
喀什地区	喀什地区	[108]	2014年	TDS	/	66.7%
喀什地区	喀什地区	[108]	2014年	Cl ⁻	9 279.0	50%
喀什地区	喀什地区	[108]	2014年	SO ₄ ²⁻	3 940.0	83.3%
喀什地区	喀什地区	[128]	2014年	I	1.46	11.5%
喀什地区	喀什地区	[111]	2016年	F ⁻	8.70	22.2%
喀什地区	喀什地区	[110]	2017年	Fe	5.965	36.8%
喀什地区	喀什地区	[110]	2017年	Mn	2.898	76.5%
喀什地区	喀什地区	[110]	2017年	As	0.034	11.8%
喀什地区	喀什地区	[107]	2019年	NO ₂ -N	1.21	1.6%
喀什地区	喀什地区	[107]	2019年	氨氮	77.78	3.3%
喀什地区	噶尔河流域	[129]	2016年	Fe	/	29.6%
喀什地区	噶尔河流域	[129]	2016年	Mn	/	33.3%
巴音郭楞蒙古自治州	博斯腾湖流域	[112]	2016年	Mn	0.297	10.45%
巴音郭楞蒙古自治州	博斯腾湖流域	[112]	2016年	Ni	0.109	10.45%
巴音郭楞蒙古自治州	若羌-且末地区	[115,130]	2014年	TH	2 699	66.7%
巴音郭楞蒙古自治州	若羌-且末地区	[115,130]	2014年	TDS	776.60	55.6%
巴音郭楞蒙古自治州	若羌-且末地区	[115,130]	2014年	SO ₄ ²⁻	893.10	77.8%
巴音郭楞蒙古自治州	若羌-且末地区	[115,130]	2014年	F ⁻	/	33.3%
巴音郭楞蒙古自治州	若羌-且末地区	[115,130]	2014年	Fe	/	22.2%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[114]	2014年	F ⁻	3.00	4.8%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[114]	2014年	Fe	1.747	11.9%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[114]	2014年	Mn	0.381	4.8%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[131]	2016年	NO ₃ -N	28.73	28.6%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[132]	2018年	TH	723.85	44.44%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[132]	2018年	TDS	2 015.16	44.44%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[132]	2018年	Cl ⁻	549.12	50%
巴音郭楞蒙古自治州	焉耆盆地	[132]	2018年	SO ₄ ²⁻	704.12	55.56%
伊犁哈萨克自治州	奎屯河流域	[119,121]	2017年	As	0.401	88.7%
伊犁哈萨克自治州	奎屯河流域	[120]	2019年	F ⁻	6.407	28.41%
伊犁哈萨克自治州	伊犁河谷	[124]	2014年	TDS	3 193.8	18.19%
伊犁哈萨克自治州	伊犁河谷	[124]	2014年	TH	1 260.0	24.68%
伊犁哈萨克自治州	伊犁河谷	[124]	2014年	SO ₄ ²⁻	1 220.0	20.78%
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	TH	692.81	17.86%
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	SO ₄ ²⁻	409.59	14.29%
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	NO ₃ -N	41.09	/
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	F ⁻	1.54	17.39%
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	Fe	0.42	4.3%
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	Mn	0.176	8.7%
石河子市	城区	[125,133-134]	2014年	As	0.049 1	34.8%

6 陕西省

陕西省各地区地下水污染情况如表 7 所示。西安市地下水情况不容乐观,2011 年有害物质达 20 多种,重污染区已达到 120 km²^[135]。具体而言,临潼区铁、锰、氟、SO₄²⁻ 超标区域基本重合,主要集中在渭河及其支流的河漫滩和一级阶地上^[136],且由

南向北超标程度逐渐加重^[137]。阎良区受陕西省古地理、沉积环境的影响,其岩土中的氟含量普遍偏高^[138-139]。同时,蓝田县灞河河谷阶地以及南部部分塬区地下水水位较浅,加之生活污水的不合理排放和农田长期过量施用化肥,需注意防范硝酸盐超标风险^[140]。

表 7 陕西省各地区地下水污染情况
Tab. 7 Groundwater Pollution in Various Regions of Shaanxi Province

地级市	详细位置	参考文献	调研年份	污染项目	最大值/(mg·L ⁻¹)	调研地水样超标率
西安市	城区	[154]	2005 年	TH	845	50%
西安市	城区	[154]	2005 年	TDS	1 725	29.17%
西安市	城区	[154]	2005 年	Cr ⁶⁺	0.061	12.5%
西安市	蓝田县	[140]	2010 年	NO ₃ ⁻ -N	294.67	80.26%
咸阳市	全市	[141]	2010 年	Cr ⁶⁺	0.088	46.15%
咸阳市	全市	[142]	2015 年	F ⁻	2.5	30%
咸阳市	全市	[142]	2015 年	Mn	0.488	10%
铜川市	耀州区、王益区等	[143]	2011 年	TH	1 450	68%
铜川市	耀州区、王益区等	[143]	2011 年	TDS	2 343	44%
铜川市	耀州区、王益区等	[143]	2011 年	SO ₄ ²⁻	897	40%
铜川市	耀州区、王益区等	[143]	2011 年	NO ₃ ⁻ -N	482.50	56%
铜川市	耀州区、王益区等	[143]	2011 年	Fe	1.017	20%
渭南市	澄城县	[145]	2014 年	SO ₄ ²⁻	1 452.900	/
渭南市	澄城县	[145]	2014 年	F ⁻	4.78	52%
渭南市	大荔县	[155]	2020 年	F ⁻	30.66	93.67%
渭南市	全市	[147]	2014 年—2016 年	F ⁻	5.4	50%
渭南市	全市	[144]	2017 年	TH	3 767.53	/
渭南市	全市	[144]	2017 年	I	5.25	72%
渭南市	全市	[148]	2019 年	TDS	8 478.00	/
渭南市	全市	[148]	2019 年	Cl ⁻	2 261.70	/
渭南市	全市	[148]	2019 年	SO ₄ ²⁻	2 745.00	/
渭南市	全市	[148]	2019 年	NO ₃ ⁻ -N	141.49	28.57%
延安市	全市	[149]	2012 年	TDS	2 868	38.89%
延安市	全市	[149]	2012 年	NO ₃ ⁻ -N	345	25%
延安市	全市	[149]	2012 年	F ⁻	1.16	5.56%
延安市	全市	[149]	2012 年	Fe	/	8.33%
延安市	全市	[149]	2012 年	Mn	/	11.11%
延安市	吴起县	[156]	2012 年—2013 年	Cr ⁶⁺	0.268	28.95%
榆林市	靖边县	[150]	2011 年	F ⁻	4.50	/
榆林市	靖边县	[151]	2017 年	TDS	1 727.78	/
榆林市	靖边县	[151]	2017 年	Cl ⁻	458.88	/
榆林市	靖边县	[151]	2017 年	SO ₄ ²⁻	415.84	/
榆林市	靖边县	[151]	2017 年	NO ₃ ⁻ -N	86.00	/
汉中市	全市	[153]	2008 年	NO ₃ ⁻ -N	182.4	/
汉中市	全市	[153]	2008 年	F ⁻	2.88	/

咸阳市需注意氟和 Cr^{6+} 超标风险的防范。由于工业发达,大量含 Cr^{6+} 的废水未经处理直接排入河道,导致山前倾斜平原区中部区域(乾县及礼泉县城周边)和南部台塬区域(阡东镇-兴平-咸阳市三角区)存在 Cr^{6+} 污染^[141]。同时,咸阳市北山以南的黄土台塬、阶地平原和洪积扇前缘地区,地下水存在氟污染现象^[142]。

铜川市需防范 TH、硝酸盐、铁超标风险。TH 主要来源于石膏岩、方解石和白云石的风化、溶解等。铁元素主要来自地层岩性,超标点主要出现在南部深层的还原性地下水中。硝酸盐主要来源于农业施肥、生活污水和含氮工业废水的排放,重污染地区位于金锁关镇、王石凹镇及王家河镇^[143]。

渭南市需特别注意氟化物、硝酸盐、碘超标风险的防范。由于第四纪堆积物中含氟矿物较多,弱碱性地下水有利于 F^- 的溶滤作用^[144],入渗到地下水后随地下水流由北向南逐渐迁移^[145],至朝邑、安仁和许庄一带,地下水位埋深较浅,蒸发强烈, F^- 浓缩富集,高氟地下水形成^[146]。氟化物超标比例最高的是澄城和合阳县,其次是富平、蒲城和大荔县^[147]。同时,富平县东南部和西部以及蒲城县南部需注意防范地下水氮污染^[148]。此外,渭南市有 72% 的地下水存在碘污染,高碘病区主要位于蒲城、大荔县城以及富平县。其中,富平县高碘区域不仅出现高碘水,还共生有高氟水,部分地区还出现高砷水^[144]。

延安市需注意苦咸水、氮素超标问题。河谷区域包气带岩性松散,溶滤作用强,水位埋深较浅、蒸发浓缩作用强,浅水的 TDS 含量大部分都超标。此外,柳林镇、河湾镇、河庄坪镇由于人口稠密、农业发达,需注意防范硝酸盐超标^[149]。

榆林市需防范氟化物和硝酸盐超标。榆林市西部存在风积黄土层沉积物,其中,有磷灰石、云母等含氟矿物,其受蒸发作用、离子交换作用以及碱性环境影响而溶解富集在柠条梁、王渠、席麻湾地区附近^[150]。同时,靖边县西南、中南部为农灌区,含氮化肥的施用导致地下水硝酸盐偏高,浓度由西向东递减^[151]。

汉中市氟化物和硝酸盐也具有超标风险,但风险略小于榆林市。城区南部地下水埋藏较浅,包气带薄,自净能力差,地表的污染物质容易进入地下水。同时,由于人口密集,生活污水和工业废水排放防渗措施较差,加之蔬菜种植区的农药、化肥施放量

大且高频,硝酸盐含量较高^[152]。此外,氟化物在汉中市普遍存在,具有东部含量高、西南部及北部含量低的特点。特别是东郊水源地地下水过度开采, F^- 溶解于承压水中,浓度超标^[153]。

7 结 论

西北地区地下水主要存在下列指标超标风险。

(1) TH、TDS、氯化物、 SO_4^{2-} 超标风险。西北地区降水少,蒸发强烈,地下水中溶质含量百分比增高。此类污染常见于平原盆地地区,如石羊河下游、酒泉东盆地、吉兰泰盆地、鄂尔多斯盆地、哈密盆地、伊犁河谷、呼包盆地等,地下水径流缓慢且交替强度弱,各离子累积导致水质较差。常见的苦咸水淡化方法主要有纳滤法、反渗透法和膜蒸馏,其中,纳滤和反渗透的成本较低。

(2) “三氮”超标风险。此类污染常见于人口稠密的城市和现代化程度较高的乡镇,如陕西省全省、兰州市、张掖市、呼和浩特市、包头市、赤峰市、通辽市科尔沁地区、鄂尔多斯市杭锦旗、呼伦贝尔市阿荣旗、乌兰察布市四子王旗等。含氮化肥的过度施用、工业废水的排放、生活污水的灌溉等均为潜在污染源。其中,硝酸盐污染易发生于弱碱性氧化环境中,故而与铁锰污染、砷污染不常同时存在。针对硝酸盐污染,可用物化修复技术、化学还原技术和生物修复技术处理。物化法主要包括离子交换、蒸馏法、反渗透、吸附法等,一般将硝酸盐集中在介质或废液中而没有彻底去除。化学还原技术可分为催化还原法和活泼金属还原法,缺点是副产物较多。生物修复技术高效低耗,其成为目前地下水中硝酸盐去除的主流方法。

(3) 氟超标风险。此类污染常见于磷灰石、萤石、云母等含氟岩石富集处,如内蒙古自治区、陕西省、兰州市、灵武市、固原市、龙首山山区、阿克苏地区、和田地区、塔城地区、喀什地区等。弱碱性、高钠离子、高碳酸氢根离子、高 TDS 和低钙离子的地下水区域,氢氧根会将矿物晶格中的氟元素置换释放到水体,需尤其防范氟超标风险。小水量地下水除氟常用吸附法,吸附剂主要有活性氧化铝、改性沸石、羟基磷灰石、氧化锆等;大水量地下水除氟常用絮凝沉淀/过滤法,常用絮凝剂主要有氢氧化铝、氯化铝和硫酸铝等。

(4) 铁锰超标风险。铁超标与锰超标常相伴出

现,常见于磁铁矿、赤铁矿等原生沉积矿物富集处,地下水特征为中性或弱碱性还原环境。有机质污水的入渗消耗地下水中氧气,形成还原环境,铁、锰元素被还原,同时钠、钙离子将铁、锰离子置换下来进入地下水。兰州市、通辽市、锡林浩特市、延安市、石羊河流域、酒泉东盆地、银川平原、呼和浩特盆地、鄂尔多斯盆地、杭锦后旗等地需防范铁、锰超标。针对该污染,可采用氧化法、离子交换法和活性炭吸附法去除污染离子,或间歇性对地下水进行曝气以破坏还原环境来有效防范。

(5) 砷超标风险。此类污染出现在富含大理岩、片麻岩、板岩等富砷矿石较多的地区,如科尔沁地区、喀什地区、银川平原、贵德盆地、呼和浩特盆地、鄂尔多斯盆地、吉兰泰盆地、和田河流域、奎屯河流域、满洲里市、巴彦淖尔市、石河子市、土默特左旗、达拉特旗等地。高砷地下水通常具有如下特征:低含量的TDS、 SO_4^{2-} 、硝酸盐;处于碱性环境,且pH越高,砷含量越高;处于还原环境,常与铁、锰污染同时出现。地下水传统除砷工艺有混凝-沉淀-过滤法、吸附法、离子交换法和反渗透法等,新兴除砷工艺有曝气-生物氧化过滤法。

参考文献

- [1] 汪珊,孙继朝,李政红. 西北地区地下水质量评价[J]. 水文地质工程地质, 2004(4): 96-100.
- [2] 孙景云,左犀. 地下水饮用水源地的保护[J]. 环境保护, 1996(5): 20-24.
- [3] 吕晓立,刘景涛,韩占涛,等. 甘肃秦王川灌区地下水硝酸盐污染特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 139-145.
- [4] 吕晓立,刘景涛,朱亮,等. 甘肃省秦王川盆地地下水氟富集特征及影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 188-195.
- [5] 吕晓立,刘景涛,朱亮,等. 兰州市地下水中“三氮”污染特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 95-100.
- [6] 吕晓立,刘景涛,朱亮,等. 兰州市地下水中铁锰分布特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 130-136.
- [7] 张玲. 武威市凉州区地下水污染现状评价探析[J]. 地下水, 2017, 39(4): 90-92, 123.
- [8] 王熙蓓. 武威市凉州区地下水环境质量评价与环境暴露健康风险评估研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [9] 蒙琪. 石羊河流域中下游浅层地下水水化学特征及其成因[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(3): 80-87.
- [10] 方琳,柴尔闯. 通过饮用水检测结果分析民勤地下水水质和生态状况[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(10): 1630-1633.
- [11] 盛丹睿,温小虎,冯起,等. 张掖盆地地下水硝酸盐污染与人体健康风险评价[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 37-44.
- [12] 刘芬. 黑河中游张掖盆地地下水污染风险研究[D]. 兰州:兰州大学, 2014.
- [13] 王文祥,何锦,张梦南,等. 张掖盆地龙首山山前高氟地下水的形成[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 415-420.
- [14] 刘婧. 平凉和庆阳地区地下水水质综合评价及现状分析[J]. 地下水, 2020, 42(5): 71-74.
- [15] 闫起发. 甘肃省肃州区地下水化学特征及现状浅析[J]. 地下水, 2018, 40(3): 84-85, 119.
- [16] 任晓辉,吴玺,高宗军,等. 酒泉东盆地地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 109-116.
- [17] 杨亚兵. 酒泉东盆地地下水演化研究[D]. 兰州:兰州大学, 2020.
- [18] 宋天琪. 金塔县浅层地下水质量现状评价与治理对策分析[J]. 地下水, 2019, 41(2): 40-41, 48.
- [19] 李计生,王静,李斌,等. 河西走廊疏勒河灌区地下水特征现状分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1288-1297.
- [20] 李亮. 石羊河流域地下水水质变化及污染防治对策研究[J]. 地下水, 2017, 39(4): 86-87, 113.
- [21] 任晓辉. 酒泉东盆地地下水水化学特征及演化机理研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2020.
- [22] 李英,吴平,张勃,等. 灵武市北部高氟地下水的分布特征及影响因素[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2520-2528.
- [23] 李英,李洁,薛忠歧,等. 银川平原浅层地下水Fe、Mn空间分布及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 110-115.
- [24] 董陆阳. 河套平原区碘和砷地球化学特征及地方病控制因素[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
- [25] 王程,韩双宝,张福存,等. 银北平原浅层高砷地下水砷富集水化学特征研究[J]. 地质与资源, 2017, 26(4): 383-389.
- [26] 王娇. 银川平原湿地变化及其对浅层地下水砷分布的影响[D]. 北京:中国地质大学, 2018.
- [27] 陈玺,朱亮,刘景涛,等. 银川平原饮用地下水健康风险评估及风险控制研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(18): 78-84.
- [28] 张宁惠. 氟处理工艺在宁夏灵武水厂的应用[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [29] 许金梅. 石嘴山市大武口地区地下水水化学特征与水质评价[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [30] 李洪波. 石嘴山市地下水质量评价及影响因素识别研究[J]. 宁夏工程技术, 2020, 19(4): 372-480.
- [31] 王威,王金生,曹阳,等. 宁夏吴忠市金积水源地地下水水化学特征分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(11): 56-59.
- [32] 吴平,闫中永,李英,等. 青铜峡市北部地下水水化学特征及成因分析[J]. 宁夏工程技术, 2019, 18(4): 379-384.

- [33] 王冬, 马洪云, 张俊, 等. 盐池县地下水水质分布特征及成因分析[J]. 地下水, 2012, 34(4): 33-35.
- [34] 陆雯婷. 固原市地下水污染调查评价[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
- [35] 王红英, 吴健华, 李培月. 泾源县地下水水质多元统计分析[J]. 宁夏工程技术, 2011, 10(4): 368-372.
- [36] 杨子林, 李培月, 吴健华, 等. 泾源县饮用地下水水化学特征及水质评价[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 99-104.
- [37] 李培月, 钱会. 彭阳县饮用地下水氟离子含量空间变异性及其与地质环境的关系[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(2): 33-38.
- [38] 吴旻, 郭华明. 宁夏西吉县高氟地下水成因简析[C]. 福州: 第一届全国青年地质大会论文集, 2013.
- [39] 刘青. 青海东部平安盆地地下水化学特征[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2018.
- [40] 邓吉强. 柴达木盆地地下水污染及水功能评价[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [41] 廖媛, 马腾, 陈柳竹, 等. 青海贵德盆地高矿低温地热水水化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 121-126.
- [42] 王振. 青海贵德盆地高矿地下水分布和成因探究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [43] 安勇, 刘丽峰, 保善磊, 等. 青海省海北化工厂 Cr^{6+} 污染调查评价与治理[J]. 地质与资源, 2014, 23(4): 408-413.
- [44] 吴昌将. 基于 Visual MODFLOW 的呼和浩特地下水硝酸盐污染数值模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2010.
- [45] 李政红, 张翼龙, 胡波, 等. 人类活动对内蒙古托克托县浅层地下水 NO_3^- -N 污染的驱动作用[J]. 地球学报, 2018, 39(3): 358-364.
- [46] 李潇瀚, 张翼龙, 王瑞, 等. 呼和浩特盆地地下水化学特征及成因[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 136-145.
- [47] 周振宏, 邢世禄, 杨亮平, 等. 呼和浩特市浅层地下水质量现状评价[J]. 环境与发展, 2017, 29(2): 55-60.
- [48] 冯娟. 呼和浩特地区地下水有害元素分布特征及形成机理研究[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2013.
- [49] 孟姝蓉. 内蒙古土默特左旗地下水水化学特征及其成因分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [50] 张恒星. 呼和浩特盆地浅层地下水砷含量分布规律研究[J]. 绿色科技, 2018(8): 47-48, 51.
- [51] 王丽娟, 张翼龙, 王文忠, 等. 呼和浩特市浅层地下水中氟离子空间变异性及分布特征[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(4): 22-24, 39.
- [52] 冯海波, 董少刚, 史晓珑, 等. 内蒙古托克托县潜水与承压水中氟化物的空间分布特征及形成机理[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 672-679.
- [53] 史晓珑. 呼包坳陷东部地下水类型及高氟水分布成因研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.
- [54] 崔虎群. 包头市地下水污染特征及其成因分析[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [55] 吴娟. 包头市地下水污染调查及防治对策研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.
- [56] 高燕彬. 巴林右旗地方病严重区地下水氟离子的赋存及分布规律[J]. 内蒙古科技与经济, 2012(17): 61-62.
- [57] 高照山. 赤峰市潜水中氟形成的主要自然环境与分布规律的研究[J]. 内蒙古地质, 1996(z1): 36-51.
- [58] 徐军. 赤峰市高氟水地质特征和氟病的发生[J]. 皖南医学院学报, 1995(2): 165-166.
- [59] 王兰云, 齐笑晨. 内蒙古自治区巴林右旗地下水水质分析与评价[J]. 西部资源, 2015(5): 16-18.
- [60] 徐佳楠. 内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗地区 2009~2011 年农村地下水监测分析[J]. 大家健康(学术版), 2013, 7(5): 163-164.
- [61] 郭伟, 张加宏, 李卫星, 等. 科尔沁区地下水水质污染分析[J]. 内蒙古水利, 2013(4): 34-35.
- [62] 李旭光, 何海洋, 田辉, 等. 通辽科尔沁地区地下水水化学特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 92-98.
- [63] 郭立秋, 杜向全. 通辽市科尔沁区高氟地下水的成因及降氟改水的措施[J]. 哲里木畜牧学院学报, 2000(4): 37-39.
- [64] 王璐晨. 鄂尔多斯盆地北部浅层地下水水化学特征及形成机制分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [65] 王海波, 侯俊林, 李虎平. 达拉特旗三响梁地区地下水质量评价浅析[J]. 西部资源, 2012(2): 60-61.
- [66] 李旭光, 王长琪, 郭常来, 等. 呼伦贝尔高原地下水氟分布特征及其开发利用建议[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 665-671.
- [67] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 满洲里市水体中氟化物的环境特征[J]. 环境科学研究, 2001(1): 24-26, 30.
- [68] 马挨荣, 随春明. 内蒙古鄂温克族自治旗地下水水化学特征分析及水质评价[J]. 西部资源, 2016(3): 1-2, 7.
- [69] 高燕彬, 闫岩. 内蒙古自治区阿荣旗地下水水质评价[J]. 西部资源, 2013(5): 105-106, 108.
- [70] 鲁守刚, 邓娅敏, 张美雁, 等. 基于多元统计分析的高矿地下水水化学特征研究——以内蒙古杭锦后旗为例[J]. 中国农村水利水电, 2014(12): 40-44, 48.
- [71] 闫洁, 客文皎, 王芳, 等. 内蒙古五原县砷污染及防治措施[J]. 内蒙古林业, 2009(12): 16-17.
- [72] 曹文庚, 陈南祥, 张翼龙, 等. 杭锦后旗浅层地下水砷赋存形态研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 98-101.
- [73] 王妍妍, 马腾, 董一慧, 等. 内陆盆地高矿地下水的成因分析: 以内蒙古河套平原杭锦后旗为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 66-73.
- [74] 施俊杰, 张春华, 杨文凯, 等. 内蒙古化德县七号盆地高氟浅层地下水水化学特征[J]. 地下水, 2013, 35(5): 32-35.
- [75] 许来生. 内蒙古武川-四子王旗地区地下水中的 NO_3^- 污染[J]. 铀矿地质, 2004(4): 251-256, 250.
- [76] 贾龙, 范荣荣. 2016 年锡林浩特市地下水水质评价[J]. 内蒙古科技与经济, 2017(15): 67-68.
- [77] 王玉敏, 金婧, 庞俊峰. 东乌珠穆沁旗地下水环境现状及保

- 护建议[J]. 内蒙古水利, 2021(4): 32-33.
- [78] 丁建, 丁建涛, 张超. 内蒙古自治区阿巴嘎旗某地地下水硝酸盐含量调查分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2017(12): 44, 96.
- [79] 王晓雪, 曾海俐, 曾国栋. 阿拉善盟地下水水质现状调查[J]. 环境与发展, 2017, 29(4): 166-168.
- [80] 李鸿娟. 吉兰泰盆地地下水化学特征及氟污染风险评价[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [81] 史晓珑, 董少刚. 托克托县潜水氯化物浓度空间分布及其成因[J]. 人民黄河, 2016, 38(8): 73-76.
- [82] 畅利毛, 郑和祥, 闫秀生. 通辽市地下水质量评价[J]. 内蒙古水利, 2010(3): 125-126.
- [83] 安永凯. 鄂尔多斯盆地地下水污染风险评价及预警研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [84] 张震. 杭锦旗气田水平井开发工程地下水环境影响评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [85] 严登华, 邓伟, 何岩, 等. 满洲里市地下水中污染物的变化特征及成因分析[J]. 环境科学研究, 2001(2): 18-21.
- [86] 马铭言, 董少刚, 张文琦, 等. 乌梁素海区域地下水水化学特征及成因分析[J]. 地球与环境, 2021, 49(5): 472-479.
- [87] 马瑞娟. 内蒙古自治区乌兰察布市集宁区东部地下水资源分析与评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [88] 秦子元. 内蒙古吉兰泰盐湖盆地地下水化学特征及控制因素[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [89] 时雯雯, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆乌昌石城市群地下水多重水质评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 109-116.
- [90] 王刚, 魏继壮. 乌鲁木齐地下水污染预警体系探究[J]. 西部资源, 2020(3): 82-84.
- [91] 赵丽莉. 乌鲁木齐市地下水环境质量现状分析[C]. 海口: 2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷), 2016.
- [92] 韩鹏, 李晓平. 吐鲁番盆地地下水质量评价分析[J]. 四川地质学报, 2019, 39(2): 272-276.
- [93] 吴海霞. 新疆吐鲁番盆地南部山区地下水分布特征及成因[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(12): 135-137.
- [94] 杨广焱, 李巧, 周金龙. 新疆吐鲁番地区地下水质量与污染评价[J]. 节水灌溉, 2014(2): 29-32.
- [95] 倪剑. 新疆哈密盆地区域地下水质量评价[J]. 地下水, 2017, 39(6): 52-54.
- [96] 阿依简·波拉提汗, 李升, 葛燕燕, 等. 阿克苏河流域潜水氟含量分布与形成特征[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 153-158.
- [97] 叶含春, 徐良, 刘学杰. 阿克苏地区部分县市地下水作为生活饮用水的水质评价[J]. 塔里木大学学报, 2005(4): 15-18, 41.
- [98] 李巧, 贾瑞亮, 周金龙, 等. 新疆阿克苏地区高氟地下水化学特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 87-92.
- [99] 陈劲松, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆阿克苏地区平原区高砷地下水分布特征及富集因素分析[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 254-262.
- [100] 曾妍妍, 吴津蓉, 周金龙, 等. 新疆和田地区地下水质量与污染现状评价[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 79-81.
- [101] 李玲, 周金龙, 齐万秋, 等. 和田河流域绿洲区地下水“三氮”污染状况及影响因素[J]. 环境化学, 2019, 38(2): 395-403.
- [102] 李玲, 周金龙, 齐万秋, 等. 和田河流域绿洲区地下水中氟的分布特征及形成过程[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 112-118.
- [103] 李玲, 周金龙, 齐万秋, 等. 新疆和田河流域绿洲区地下水重金属含量及空间分布特征[C]. 厦门: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第二卷), 2017.
- [104] 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 42-50.
- [105] 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 塔城盆地地下水氟分布特征及富集机理[J]. 地学前缘, 2021, 28(2): 426-436.
- [106] 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 新疆塔城盆地地下水中铁锰分布特征及人类活动的影响[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1765-1775.
- [107] 孙英, 周金龙, 曾妍妍. 新疆喀什地区西部地下水“三氮”空间分布特征及影响因素[C]. 西安: 2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷), 2019.
- [108] 曾妍妍, 周殷竹, 周金龙, 等. 新疆喀什地区西部地下水质量现状评价[J]. 新疆农业大学学报, 2016, 39(2): 167-172.
- [109] 魏兴, 周金龙, 曾妍妍, 等. 喀什地区西部地下水重金属空间分布特征及成因分析[J]. 环境化学, 2017, 36(8): 1802-1811.
- [110] 林丽, 范薇, 周金龙, 等. 喀什地区浅层地下水重金属污染健康风险评价[J]. 节水灌溉, 2020(5): 93-98.
- [111] 陈劲松, 周金龙, 陈云飞, 等. 新疆喀什地区地下水氟的空间分布规律及其富集因素分析[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1800-1808.
- [112] 艾提业古丽·热西提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维, 等. 博斯腾湖流域地下水重金属污染的人体健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 251-259.
- [113] 艾提业古丽·热西提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 迪力夏提·司马义, 等. 博斯腾湖流域浅层地下水重金属分布特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(3): 345-351.
- [114] 赵江涛, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水质量评价与污染成因探讨[J]. 地球与环境, 2015, 43(6): 628-636.
- [115] 孟奇. 新疆若羌—且末地区绿洲带地下水水质评价及水质演化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [116] 孙英, 周金龙, 曾妍妍, 等. 环博斯腾湖地区地下水有机污染现状评价[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 183-189.
- [117] 赵江涛, 周金龙, 高业新, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水

- 有机污染评价及污染成因[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 117-124.
- [118] 汪昌树, 杨鹏年, 于宴民, 等. 焉耆盆地绿洲区地下水硝态氮污染空间变异性研究及成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(4): 65-70.
- [119] 罗艳丽, 李晶, 蒋平安, 等. 新疆奎屯原生高砷地下水的分布、类型及成因分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 2897-2903.
- [120] 戴志鹏, 罗艳丽, 王翔. 新疆奎屯河流域高砷、高氟地下水的分布特征[J]. 环境保护科学, 2019, 45(4): 81-86.
- [121] 袁翰卿, 李巧, 陶洪飞, 等. 新疆奎屯河流域地下水砷富集因素[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 524-530.
- [122] 宿彦鹏, 李巧, 陶洪飞, 等. 新疆奎屯河流域地下水中砷超标的原因分析[J/OL]. 长江科学院院报, 2021: 1-7. (2021-05-20)[2021-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20210519.1637.014.html>.
- [123] 庞春花, 李建成. 新疆乌鲁木齐市地下水现状分析[J]. 地下水, 2011, 33(2): 41-42.
- [124] 高轮船. 新疆伊犁河谷地下水污染与防污性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [125] 程凡. 石河子市地下水质量及污染评价[J]. 水科学与工程学报, 2016(1): 9-13.
- [126] 侯珺, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆石河子地区地下水重(类)金属组分空间分布特征及影响因素[J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40(1): 71-78.
- [127] 潘欢迎, 邹常健, 毕俊攀, 等. 新疆阿克苏典型山前洪积扇内高氟地下水的化学特征及氟富集机制[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 194-203.
- [128] 王红太, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆喀什地区饮用地下水碘分布及其富集因素分析[J]. 新疆农业大学学报, 2019, 42(2): 145-150.
- [129] 穆台力甫·牙森. 喀什噶尔河流域地下水污染的探讨[J]. 地下水, 2016, 38(3): 104-105.
- [130] 曾妍妍, 周金龙, 李巧, 等. 新疆若羌-且末地区地下水质量与污染评价[J]. 新疆农业大学学报, 2015, 38(1): 72-78.
- [131] 肖亚奇. 新疆焉耆盆地绿洲灌区地下水硝态氮运移趋势研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- [132] 祖丽菲耶·亚力坤. 新疆焉耆县典型灌区地下水水质评价[J]. 陕西水利, 2020(4): 83-84.
- [133] 栾凤娇, 周殷竹, 周金龙, 等. 新疆石河子地区地下水氟分布及富集因素分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(3): 64-67, 71.
- [134] 曾妍妍, 周金龙, 高业新, 等. 新疆石河子地区地下水污染评价及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 197-202.
- [135] 任唯敏. 基于GIS构建的西安市地下水污染防治方法研究[J]. 地下水, 2011, 33(6): 57-59.
- [136] 耿艺成, 周维博, 史方方, 等. 西安市平原区地下水污染风险研究[J]. 环境工程, 2020, 38(5): 215-222.
- [137] 马艳. 西安市临潼区地下水水质调查与评价成果分析[J]. 地下水, 2017, 39(6): 50-51.
- [138] 丁开亮. 西安市阎良区地下水环境质量评价[J]. 陕西水利, 2009(3): 110-111.
- [139] 王新光, 李娜. 未央区地下水体污染现状及影响的分析[J]. 西北水力发电, 2004(s1): 137-139.
- [140] 罗大成, 卢新卫, 锁惠娟, 等. 蓝田县西北区饮用井水中硝酸盐含量的时空变异及分布规律[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 75-79.
- [141] 蔚丽娜. 渭北黄土塬灌区地下水水质演变规律研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
- [142] 李晔桦. 渭河流域秦汉新城地下水污染现状及防治措施[J]. 东莞理工学院学报, 2019, 26(3): 65-68.
- [143] 解飞, 刘景涛, 张玉玺, 等. 基于“层级阶梯评价方法”的地下水质量与污染评价: 以铜川市为例[J]. 地学前缘, 2021, 21(8): 15-25.
- [144] 吴飞. 渭南地区浅层高碘地下水水化学特征及其形成机理[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [145] 王冬. 陕西澄城县高氟地下水分布特征及成因分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [146] 朱桦, 杨炳超, 赵阿宁, 等. 陕西省大荔县高氟地下水的形成条件分析[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 672-676.
- [147] 张圃轩, 李琪. 渭南市地下水氟化物分布特征及污染成因研究[J]. 地下水, 2019, 44(4): 59-60, 70.
- [148] 王曾祺. 渭南地区地下水氮污染特征及源解析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [149] 曹珍珍. 延安城区及周边地区地下水水化学特征与污染成因研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [150] 周佩瑶, 杨乔洋, 王玮. 靖边县地下水氟影响因素及健康风险评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(7): 67-72.
- [151] 葛佳亮. 靖边县平原地区地下水环境变化及水源保护区划定[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [152] 常彩屏, 郑楠, 郑和平. 汉中市城区地下水水质评价与分析[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2009, 25(2): 78-81.
- [153] 常彩屏, 郑楠, 郑和平. 汉中市地下水水质动态变化原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(3): 124-127, 131.
- [154] 黄新. 西安市地下水污染风险研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [155] 陈志军. 陕西省大荔县高氟地下水成因研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [156] 顾小凡, 党学亚, 杨炳超, 等. 延安吴起县地下水中Cr⁶⁺分布规律及来源探讨[J]. 西北地质, 2015, 48(4): 190-203.