

西宁市富铁地下水分布特征及影响因素分析

刘春燕, 刘景涛, 荆继红, 张玉玺, 朱 亮, 黄冠星, 张 英, 陈 玺, 周 冰, 杨明楠, 解 飞, 李 备

Distribution characteristics and influencing factors of iron-rich groundwater in Xining City

LIU Chunyan, LIU Jingtao, JING Jihong, ZHANG Yuxi, ZHU Liang, HUANG Guanxing, ZHANG Ying, CHEN Xi, ZHOU Bing, YANG Mingnan, XIE Fei, and LI Bei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下水氮循环与砷迁移转化耦合的研究现状和趋势

Research status and trend of coupling between nitrogen cycle and arsenic migration and transformation in groundwater systems

郭华明, 高志鹏, 修伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 153-163

云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin

常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9-15

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律

Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jianghan Plain

蔡玲, 胡成, 陈植华, 王清, 王宁涛, 常威, 黄琨 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 18-25

海原盆地地下水咸化特征和控制因素

Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin

王雨山, 李成, 李海学, 程旭学, 刘伟坡, 张梦南 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 10-17

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311025

刘春燕, 刘景涛, 荆继红, 等. 西宁市富铁地下水分布特征及影响因素分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 45-55.
LIU Chunyan, LIU Jingtao, JING Jihong, et al. Distribution characteristics and influencing factors of iron-rich groundwater in Xining City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 45-55.

西宁市富铁地下水分布特征及影响因素分析

刘春燕^{1,2}, 刘景涛^{1,2}, 荆继红^{1,2}, 张玉玺^{1,2}, 朱 亮^{1,2}, 黄冠星^{1,2}, 张 英^{1,2}, 陈 玺^{1,2}, 周 冰^{1,2},
杨明楠^{1,2}, 解 飞^{1,2}, 李 备^{1,2}

(1. 福建省水循环与生态地质过程重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 地下水是西宁市的重要供水水源, 调查发现其地下水中富铁, 限制了开发利用, 而针对不同类型含水层中富铁地下水分布特征及其成因缺乏研究。以 144 组地下水样品水化学测试数据为基础, 结合地质和水文地质条件特征, 借助统计学和地统计学等方法, 研究了不同类型含水层地下水中铁含量的分布特征及其影响因素。结果表明: 松散岩类孔隙含水层 (I 区) 地下水中 Fe 超过质量浓度 0.3 mg/L 的水占 27.85%, 分别是碎屑岩类裂隙孔隙含水层 (II 区) 和基岩裂隙含水层 (III 区) 的 1.6 倍和 2.7 倍, 富铁地下水 (质量浓度大于 0.3 mg/L) 在建设用地中的比例明显高于其他土地利用类型区; 还原环境和人类活动 (如工业废水、生活污水、富铁河水的入渗) 可能是影响 I 区地下水中铁含量升高的主要因素, II 区中富铁地下水除了受还原环境的影响外, 农业氮肥的施用和生活污水的排放也是重要影响因素, III 区中富铁地下水主要受控于还原条件; 在区域尺度上, 富铁地下水沿河流呈条带或斑状分布, 原生地层中铁矿床和人类活动 (工业废水) 释放的铁是研究区浅层地下水中铁离子的主要来源, 地下水中铁离子的迁移和富集主要受还原条件的控制, 径流条件也起到一定作用, 与 pH 无明显相关性, 未引起明显的“盐效应”。研究结果可为西宁市及类似干旱—半干旱区城市水环境管理提供科学依据。

关键词: 地下水; 人类活动; 含水层; Fe 分布特征; 影响因素; 西宁市

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0045-11

Distribution characteristics and influencing factors of iron-rich groundwater in Xining City

LIU Chunyan^{1,2}, LIU Jingtao^{1,2}, JING Jihong^{1,2}, ZHANG Yuxi^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}, HUANG Guanxing^{1,2},
ZHANG Ying^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, ZHOU Bing^{1,2}, YANG Mingnan^{1,2}, XIE Fei^{1,2}, LI Bei^{1,2}

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen, Fujian 361021, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Groundwater is an important water supply source in Xining City. Previous works have found that iron-rich groundwater limits water development and utilization. However, few studies focus on the distribution characteristics and mechanism of iron-rich groundwater in different types of aquifers in Xining City. Based on the hydrochemical data of 144 groundwater samples, combined with the geological and hydrogeological conditions,

收稿日期: 2023-11-18; 修订日期: 2024-01-17

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230422; DD20221752-3; DD20190311)

第一作者: 刘春燕 (1980—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事水文地质与地下水环境研究。E-mail: lcy566@163.com

通讯作者: 荆继红 (1965—), 女, 正高级工程师, 主要从事水文地质与水资源调查研究。E-mail: jingjihong@mail.cgs.gov.cn

the distribution characteristics and influencing factors of iron content in groundwater in different aquifers were analyzed by methods of statistics and geostatistics. The results show that the exceeding standard ratio of iron in groundwater of unconsolidated sediments aquifer (Area I) is 27.85%, which is 1.6 times and 2.7 times higher than that of clastic rocks fissure-pore aquifer (Area II) and bedrock aquifer (Area III), respectively. The proportion of iron-rich groundwater (concentration greater than 0.3 mg/L) in construction land area is significantly higher than in areas with other land use types. The redox environment and human activities (such as industrial wastewater, domestic sewage, and infiltration of iron-rich river water) may be the main factors affecting the increase of iron content in groundwater in Area I. In addition to the redox environment, Agricultural nitrogen fertilizer use and domestic sewage discharge are also important factors affecting iron-rich groundwater in Area II. The iron-rich groundwater in Area III is mainly controlled by redox conditions. On the regional scale, the distribution of iron-rich groundwater presents in bands or spots along the river. The iron deposits releasing in the primary strata and human activities (industrial wastewater) are the main source of iron ions in the shallow groundwater in the study area. The migration and enrichment of iron in groundwater are mainly controlled by redox conditions, and affected by the runoff condition, without relation to pH and salt effect. This study can provide scientific basis for urban water environment management in Xining City and similar arid and semi-arid areas.

Keywords: groundwater; human activities; aquifers; Fe distribution characteristics; influencing factors; Xining City

铁在地壳中含量丰富,其价态容易受环境影响^[1],沉积物和人类活动释放的铁是地下水环境中铁的主要来源^[2-4]。铁作为人体不可缺少的微量元素,对人体健康起到至关重要的作用^[5-6],然而,如果地下水中 Fe 含量过高则会对人体健康造成危害,破坏神经和呼吸系统,长期积累会引发胰腺、肝脏和皮肤病变的可能^[7-9]。美国环保局在 2019 年出台的《二级饮用水标准:有害化学品指南》把 Fe 列为二次污染物,规定其含量限值为 0.3 mg/L^[10],我国《地下水质量标准》中规定地下水中 Fe 的Ⅲ类水限值也为 0.3 mg/L^[11],因此,地下水中富铁在本文中被定义为 Fe 质量浓度大于 0.3 mg/L。我国富铁地下水主要分布在人口密集的冲积平原、三角洲和内陆盆地等地势相对低洼处^[12],例如松花江流域和长江中下游^[13-14],部分黄河流域和珠江流域也有一定程度的分布^[15-16]。

西宁市是青海省粮食主产区和工业基地,青海省约 50% 的人口和 35% 的经济集中在西宁市^[17]。自 2000 年后,西宁市工业化、城市化进程发展迅速^[18],对地下水资源的需求量不断增加,然而受地貌特征(高原河谷型城市)的潜在影响,土地利用类型变化较大,建设用地增加,生态环境压力增大^[19],政策因素对城市扩展有显著的推动和导向作用^[20]。西宁市人口空间分布呈郊区化趋势明显,城市周边郊区新建大量工厂企业,但与之配套的排水系统还不完善,调查期间发现

当地存在自行挖井排污的现象。受人类活动(如工业化、城市化)的影响^[21],部分区域的地下水水质受到影响,限制了开发利用,加剧了地下水供需矛盾^[22-23]。有研究学者发现 Fe 已成为西宁市浅层地下水中超Ⅲ类地下水的主要贡献指标^[24],但没有对西宁市不同类型含水层中地下水铁含量的分布和来源进行深入研究。本研究旨在描述西宁市不同类型含水层不同土地利用类型中地下水 Fe 含量的空间分布,探讨该区不同类型含水层地下水 Fe 含量的来源及控制因素,为该区供水水质安全提供技术支持。

1 研究区水文地质概况

西宁市位于青海省东北部,黄河支流湟水河的上游,面积约 7 679 km²。其地形复杂,西北高东南低,川道走向由西北向东南呈“丰”字形,海拔 2 200 ~ 3 000 m 之间。气候以寒冷和干旱为主,寒长暑短,多风少雨,年均温度为 5.9 °C,年均蒸发量为 1 708.4 mm,年均降水量为 393.6 mm,年降水分布不均,集中在 7—9 月^[25],属高原半干旱气候。

研究区是典型的高原河谷城市,可分为山区(包括高山丘陵区)和河谷平原区。地下水类型分布见图 1,典型水文地质剖面见图 2。

松散岩类孔隙水主要分布在河谷及丘陵区局部地带,河谷砂砾卵石层潜水主要赋存于河漫滩及 I、

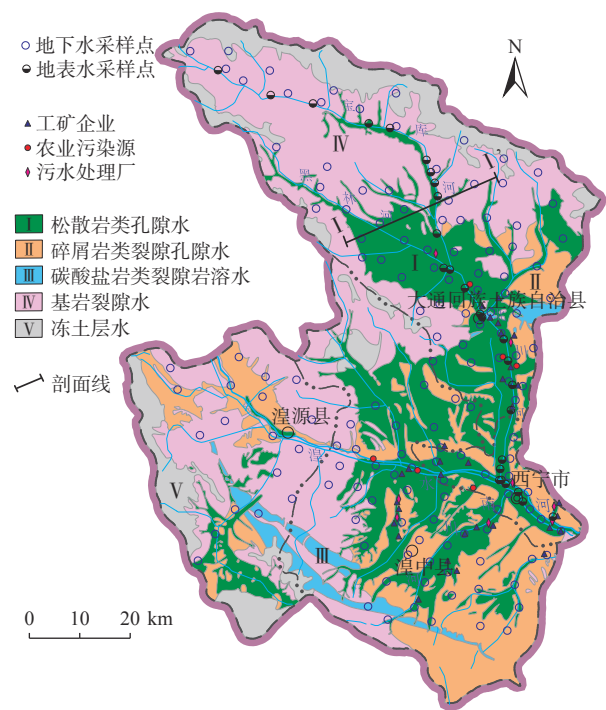


图1 西宁市地下水类型、潜在污染源及采样点位置

Fig. 1 Groundwater types, potential pollution sources and sampling sites in Xining City

Ⅱ级阶地的砂砾卵石层、泥质砂砾卵石层中,与地表水有密切水力联系;山前平原、冰碛冰水台地泥质砂砾卵石层潜水分布于宝库河上游两岸及东峡河山前地带,含水层为全新统,中~上更新统坡洪积、冰碛冰水沉积的泥质块碎石、泥砾层;丘陵区黄土及黄土底砾石层潜水主要分布在盆地内丘陵区,含水层为中更新统冰碛冰水沉积的砂砾卵石和泥质砂砾卵石层,多出露于长梁或残丘的顶部。

侏罗系碎屑岩以小型单斜储水构造分布在大通南缘;白垩系、古近系碎屑岩构成西宁、大通 2 个向斜承

压自流水盆地,含水层岩性均为砂岩、砂砾岩和泥灰岩。碳酸盐岩裂隙岩溶水主要分布在大通回族土族自治县老爷山一带和湟源县西南部,含水层包括寒武系中~上统白云岩、灰岩、结晶灰岩夹斜长玄武岩、硅质岩等。

基岩裂隙水主要分布在西部基岩山区,地下水赋存于下古生界、元古界的变质岩裂隙和构造带中。

冻结层水主要分布在研究区西北部 and 西南部,分布面积小,本次研究未取样。

山区地下水的补给来源主要是大气降水,其次是临近地带的基岩裂隙水和地表水,地下水流向沿沟谷方向向下游径流,在沟谷以泉的形式泄出;河谷区潜水主要接受河水入渗、基岩和丘陵山区的侧向补给,另外在部分地段还接受大气降水入渗补给,以及渠道水渗漏和农田灌溉水入渗补给,主要排泄方式为人为开采地下水和蒸发^[26]。总体上,地下水流向由山前向沟谷平原区径流,趋势与地势走向一致。

2 材料与方法

2.1 水样采集与测试

2019—2020 年期间,共采集水样 171 组,从湟水河、北川河采集地表水样品 27 组,浅层地下水样品 144 组(井深范围为 4~56 m),其中取自松散岩类孔隙含水层(以下简称Ⅰ区)79 组,碎屑岩类裂隙孔隙含水层(以下简称Ⅱ区)23 组,基岩裂隙含水层(以下简称Ⅲ区)40 组,碳酸盐岩类裂隙岩溶含水层(以下简称Ⅳ区)2 组(图 1)。采样深度在水位(水位埋深范围为 3~45 m)下约 1 m。采样前先洗井 5 min,采集时用现场水样润洗取样瓶 3 遍,样品储存在 2.5 L 高密度聚乙烯瓶中,4℃低温密闭避光保存,7 d 内送至中国地质

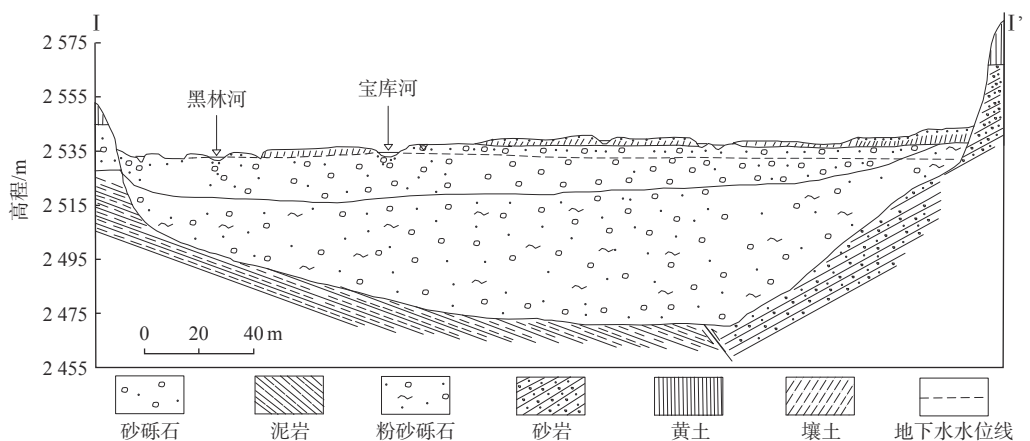


图2 I-I'典型水文地质剖面

Fig. 2 I-I' typical hydrogeological section

科学院地下水矿泉水与环境监测中心测试,参照《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T8538—2016)检测,样品批次定期与标准样和空白样进行质量控制,电荷平衡误差(charge balance equation, CBE)在实验室中经过现场测量的双重检查后计算得到,相对误差 $\leq 3\%$ 。采用多参数仪(WTWMulti340i/SET, 德国)现场测试 pH 值、氧化还原电位(Eh)和溶解氧(DO)等,研究区潜在污染源及采样点位置见图 1。

2.2 数据分析

根据土地利用情况将西宁市划分为 3 种类型,分别是建设用地、农用地和未利用地,城市化区域与建设用地相关,农用地包括耕地、林地、草地。将不同类型含水层不同土地利用类型的样品测试数据分别采用常规统计学和地统计学方法进行分析,运用舒卡列夫分类法分析水化学类型,利用 MAPGIS6.7 软件绘制西宁市地下水铁含量分布图,利用 Origin2021 绘制箱型图,对西宁市浅层地下水铁含量的分布特征进行

分析,推断控制不同类型含水层地下水中铁赋存的潜在地球化学和人为过程,探讨不同类型含水层地下水中铁的迁移与富集成因。

3 结果

3.1 水环境中铁的空间分布规律

结合已测得的水样样品指标数据,选择总硬度(TH)、TDS、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、Fe、Mn、Cu、Zn、As、Hg、 Cr^{6+} 、 F^- 、 COD_{Mn} 、Al、Se、I、Cd、Pb 共 22 项无机指标,对西宁市浅层地下水水质进行评价。统计西宁市浅层地下水综合评价超标样品组数及地下水各指标的超标组数,计算各超标指标的贡献率(某一超标指标的样品组数与综合评价超标样品组数的比值),分析影响水质的主要贡献指标(图 3)。地下水评价依据《地下水质量标准》^[11],地表水评价依据《地表水环境质量标准》^[27],评价方法为单指标最大类别法。

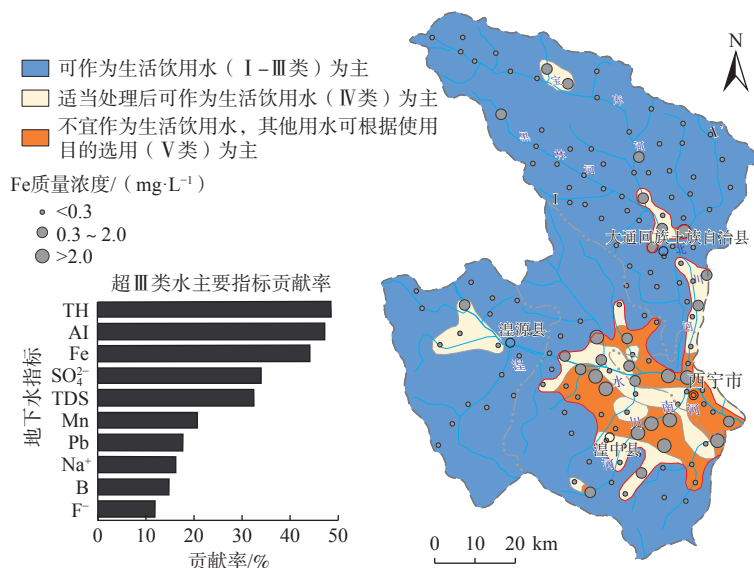


图 3 西宁市浅层地下水水质状况及铁质量浓度分布特征

Fig. 3 Groundwater quality and distribution characteristics of Fe in Xining City

对西宁市地表水和不同类型区地下水中 Fe 含量进行了统计,结果见表 1。西宁市地表水中 Fe 的含量范围为 0.04~2.04 mg/L,从上游向下游呈增高趋势,中位值为 0.68 mg/L,超《地表水环境质量标准》Ⅲ类水限值 2 倍以上,地表水中 Fe 含量超标率为 77.78%,说明西宁市地表水水质受 Fe 污染严重。浅层地下水中 Fe 含量最大值为 100.80 mg/L,平均值为 1.52 mg/L,中位值为 0.05 mg/L,超标组数达 30 组,对超Ⅲ类地下水的贡献率为 44.12%(图 3),排名第 3,已成为影响地下

水水质的主要贡献指标;超标率为 20.83%,最大值超标准限值 336 倍,中位值为 0.05 mg/L,约为河水中 Fe 含量中位值的 1/13,在铁含量较高的地表水采样点附近的地下水铁含量也较高,这与河水入渗是河谷潜水的主要补给来源相吻合。Ⅰ区地下水中铁的超标率最高,为 27.85%,分别是Ⅱ区和Ⅲ区的 1.6 倍和 2.7 倍,而Ⅳ区不存在富铁地下水。这表明地下水中 Fe 离子在Ⅰ区中更容易富集。

Ⅰ区地下水中 Fe 含量变异系数较大,为 480.46%,

表 1 水环境中铁质量浓度统计
Table 1 Statistics of iron concentration in groundwater

水点类型	类型区编号	Fe质量浓度/(mg·L ⁻¹)				变异系数/%	超标率/%
		最大值	最小值	平均值	中位值		
地下水	I 区(n=79)	100.80	<0.01	2.58	0.09	480.46	27.85
	II 区(n=23)	3.09	<0.01	0.41	0.01	238.71	17.39
	III 区(n=40)	0.85	<0.01	0.12	0.04	148.42	10.00
	IV 区(n=2)	0.09	<0.01	0.04	0.04	148.42	0.00
	整区(n=144)	100.80	<0.01	1.52	0.05	609.17	20.83
地表水	北川河、湟水河(n=27)	2.04	0.04	0.76	0.68	72.64	77.78

注: 计算统计Fe的测试数据时, 未检出以0.7倍检出限替代; n为样品数量。

具有空间离散度高、波动性大的特征,说明受人类活动影响较大^[28]。人类活动对地下水化学组分的影响与土地利用类型密切相关^[29]。由图 4、图 5 知,在 I 区的建设用地中,富铁地下水的比例最高,为 34.48%,未利用地中富铁地下水次之,为 33.33%,分别是农用地中富铁地下水的 1.77 倍和 1.71 倍,而 II 区和 III 区的未利用地中未发现富铁地下水,说明 I 区的未利用地已受到政策驱动力的影响,人类活动强度增大。在 II 区和 III 区中只有农用地有富铁地下水,比例分别为 26.32% 和 10.27%, II 区中耕地面积较多,富铁地下水比例较 III 区高出 16.05%,说明人类活动(化肥的施用)对 II 区中地下水铁的富集起到一定作用。IV 区中由于采集的地下水样品数量较少(2 组),且 Fe 质量浓度小于 0.3 mg/L,故不作分析。总体来看,西宁市浅层地下水以 I—III 类水为主,水质整体较好,富铁地下水主要分布在 I 区中,在河流两侧呈带状或斑块状分布(图 3)。

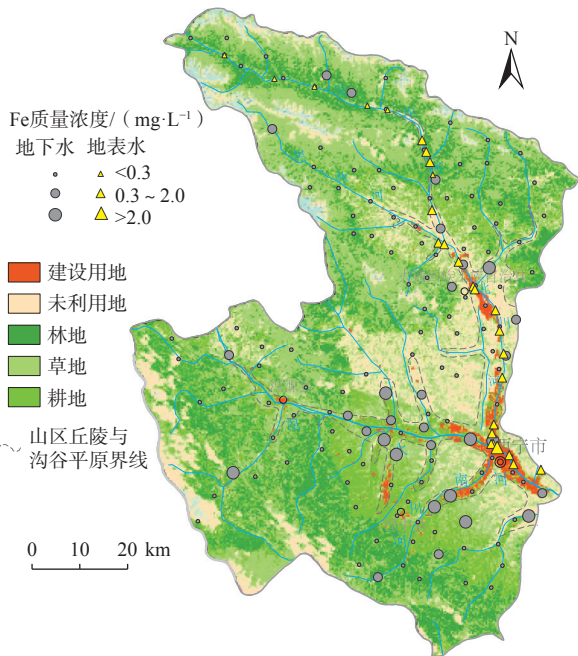


图 5 不同土地利用类型水环境中 Fe 含量分布

Fig. 5 Distribution of Fe in the shallow groundwater in different land use types and surface water

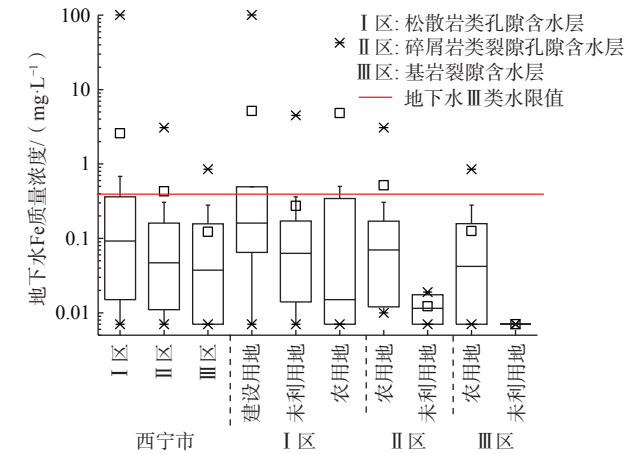


图 4 不同类型区不同土地利用类型地下水中 Fe 质量浓度分布
Fig. 4 Groundwater Fe distributions in different aquifers and different land use types in the study area

3.2 西宁市富铁地下水水化学特征

从 Piper 三线图(图 6)可以看出,地下水阴离子以

HCO₃⁻为主,阳离子以 Ca²⁺、Mg²⁺等碱土金属为主;地表水大部分水化学阴离子以 HCO₃⁻、SO₄²⁻为主,阳离子以 Ca²⁺、Mg²⁺为主,研究区内 I 区地下水与地表水水化学类型较为一致,指示地表水与 I 区地下水之间存在一定的补排关系。研究区 I 区中地下水化学类型主要以 HCO₃—Ca、HCO₃—Ca•Mg、HCO₃•SO₄—Ca 为主,占总样品的 35.44%、13.92%、10.13%,富铁地下水主要富集于 HCO₃—Ca、HCO₃—Ca•Mg、HCO₃•SO₄—Ca 型水中。II 区中水化学类型主要以 HCO₃—Ca、HCO₃—Ca•Mg、HCO₃—Ca•Na 为主,富铁地下水主要富集于 HCO₃—Ca•Na 型水中。III 区中水化学类型主要以 HCO₃—Ca、HCO₃•SO₄—Ca、HCO₃—Ca•Mg 为主,富铁地下水主要富集于 HCO₃—Ca 型水中。

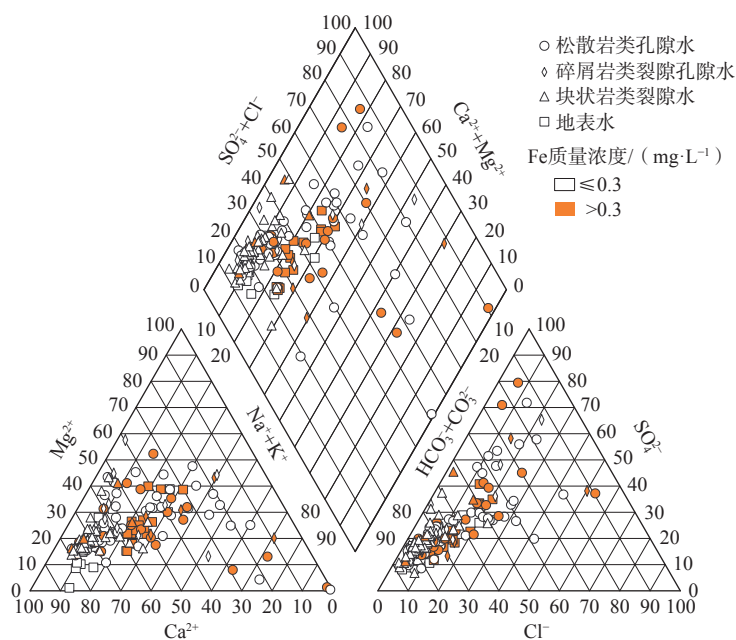


图 6 西宁市采样水点 Piper 三线图

Fig. 6 Piper diagram of water samples from Xining City

4 讨论

4.1 人为因素

I 区主要分布在河谷区,是建设用地的主要分布区,受人类活动影响程度最高。自 2000 年后,西宁市重工业企业快速发展,人口迅速增长,重工业企业发展到 2016 年出现转折,但人口总数量、污水年排放量持续增加,城市建设用地面积逐年扩大^[24]。根据调查资料可知,西宁市重工业主要以炼钢、有色金属冶炼等生产加工为主,许多中、小企业配套的废水处理系统还不完善,处理能力有限,致使大量未经处理的废水直接排入附近的沟渠。建设用地面积向郊区扩建迅速,在城市周边缺乏完善的排水系统,造成生活污水未经处理直接排放到附近河流。富铁地下水水样大部分集中在湟水河、北川河以及南川河沿岸(图 5)。这些地区正是工业企业及工业园区密布的工业发达区。如西北最大的特钢企业西宁特钢集团坐落于西宁市城北区湟水河河谷;北川工业园区位于大通县北川河河谷,是以黑色金属和有色金属冶炼和压延加工业为主导的工业集群。河水下渗是此区地下水的主要补给来源,在附近河流采集的地表水样品中铁质量浓度超标达 77.78%,远高于地下水中铁质量浓度的超标率(表 1)。I 区中富铁地下水高于 II 区和 III 区,且建设用地中地下水铁的质量浓度高于其他土地利用类型,这表明西宁市受工业废水和生活污水不合理排

放的影响,导致地表水中铁含量较高,包气带为砂卵石层,防污性能较差,污染物极易扩散到浅层地下含水层。建设用地中地下水的水化学类型多达 21 种,而农用地和未利用地中的地下水化学类型分别为 12 种和 5 种^[26],再次反映了强烈的人类活动(如工业废水、生活污水)对这些地区地下水化学成分的影响。

II 区的农用地中出现的富铁地下水主要分布在小村庄内及周边耕地中。调查发现村庄未建排污系统,部分村民利用废弃机井排放污水,污水直接灌入含水层,污染地下水。另外,当地农民为了粮食增产,过量施用含氮化肥,在径流和还原环境作用下,Fe 离子在 II 区不断富集。

III 区的富铁地下水主要出现在沟谷的林地中,可能是在径流和还原环境作用下引起铁离子的富集。

总之,人类活动(如工业废水、生活污水和含氮化肥)是西宁市浅层地下水 Fe 含量升高的影响因素之一,并在局部地区起主导作用。

4.2 原生沉积环境

上覆盖层中有机质和铁含量会影响附近地下水中铁离子的迁移与富集。青海省铁矿资源丰富,分布广泛,主要形成于元古宙、寒武~奥陶纪和三叠纪。西宁市位于祁连山褶皱带中生代断陷盆地之中,盆地的古老基底形成于前震旦纪的剧烈造山运动和加里东运动期,中生代受印支运动影响,拗陷地带接受了碎屑沉积,盆地沉积了厚层的红色岩系。依据陈毓

川^[30]对青海省铁矿床类型的划分标准,西宁市处于中祁连陆块沉积变质型铁矿床内,含矿岩性主要为石英岩、石英片岩、千枚岩和变质砂岩。因强烈构造运动的影响,在古近纪以前,基底可能产生沿湟水河谷及南北两川基底断裂^[31]。富铁地下水分布与河谷平原区基底断裂带分布一致(图5),雨水和第四系含水层内地下水对富含铁的基岩长期侵蚀,区域中铁元素主要以 Fe^{2+} 形式存在并进入地下水中,随地下水径流被带至低洼地带富集。另外,河谷平原区上覆盖层广泛分布着黏土或亚黏土,含有丰富的有机质,使地下水处于相对还原环境。还原地层中的磁铁矿、赤铁矿等富铁矿物,将难溶的高价态铁还原为易溶的低价态离子溶出。同时,有机质还可以通过络合、螯合等作用,提高重金属离子的溶解度,进一步加剧了地层中铁的溶出。总之,铁离子主要来源于原生沉积环境中含铁化合物,上覆盖层中丰富的有机质是地下水中铁释放、进入地下水的激发因素。

4.3 径流条件

受气候、地形地貌条件控制,西宁市的浅层地下水受山区融水的补给量较大,且北、西、南方山区向中心倾斜的地形有利于地下水的补给富集。因此。西宁市富水性较好,地势较高的区域是Ⅲ区的主要分布区,径流条件良好,当降水和冰雪融水等补给地下水时,同时向地下水提供氧气,地下水部分处于氧化环境,铁以氧化物的形式存在,地下水水力坡度较大,地下水中溶解的铁会在较短时间内迁移。Ⅱ区主要分布在坡度较小的丘陵区,地下水中溶解的铁迁移速度减慢,而处于地势较低的Ⅰ区,上覆沉积物使含水层环境逐渐变为还原性环境,地下水停留时间较长,有利于铁氧化物的还原溶解^[32]。此外,沉积物中含有丰富的活性有机碳,可促使含水层继续维持还原性环境^[33-34]。西宁市沟谷平原区的地下水径流条件明显差于丘陵区、山区,因此,在靠近河流的地区,地下水中的铁含量较高,Ⅱ区次之,Ⅲ区最低(图7),在河套盆地^[33]等地区的研究中也得到了相同的结论。

4.4 氧化还原条件

文献[2, 12, 15-16, 24, 26, 35-39]研究发现地下水中铁含量主要受氧化还原条件和pH值的控制。低pH值条件下,铁的溶解度较高^[35]。研究区地下水样品中的pH值为6.4~8.8,平均值为7.72,地下水环境呈中性或弱碱性。在 $\text{pH}<7$ 的7个样品中,不存在富铁地下水样品,这表明西宁市地下水中铁含量与pH值无明显相关性,松嫩平原也发现了这种情况^[36]。由图8

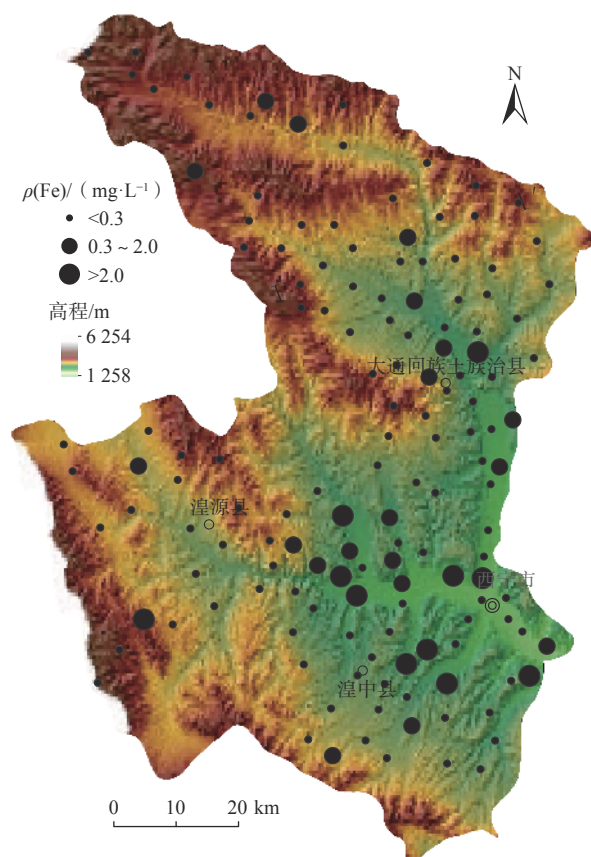
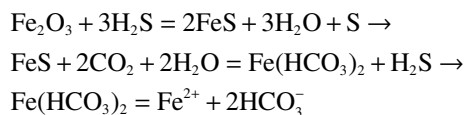


图7 不同高程条件下地下水铁质量浓度分布

Fig. 7 Distribution of Fe in groundwater under different elevation

可以看出西宁市各类型区中铁质量浓度与Eh、DO呈负相关,表明西宁市各类型区中铁质量浓度主要受还原环境的影响。

Ⅰ区中铁含量明显高于Ⅱ区和Ⅲ区中铁含量(图6)。这不仅与Ⅰ区的人类活动影响大于Ⅱ区和Ⅲ区有关,还与其所处的氧化还原环境密切相关。研究区Ⅰ区通常具有双层结构,上层是2~4 m深的黏性土,这使得下部砾石含水层呈现出更封闭的还原环境。此外,由于地下水水位埋深较浅,地层沉积物长期浸泡在地下水中,河谷低洼带的还原环境能促使土层中的有机质在厌氧环境下产生大量的 H_2S 和 CO_2 ,促使土层中的 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,溶入地下水^[37-38],反应过程为:



地下水中高含量的 HCO_3^- 与沉积物中有机物质的生物降解作用有关,该作用会导致碳酸盐岩的溶解。本次水样的测试结果也显示西宁市地下水铁含量与 HCO_3^- 含量呈明显的非线性正相关关系(图9)。前人

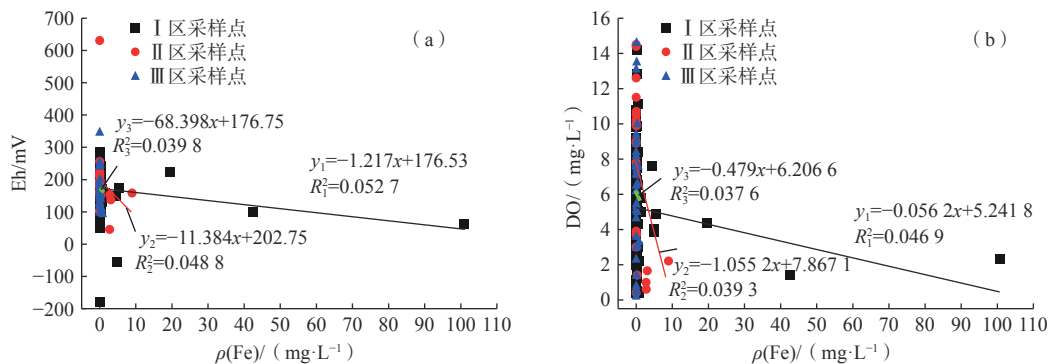


图 8 西宁市地下水中铁含量与 Eh 和 DO 的相互关系

Fig. 8 Correlation between iron content and Eh and DO in groundwater in Xining City

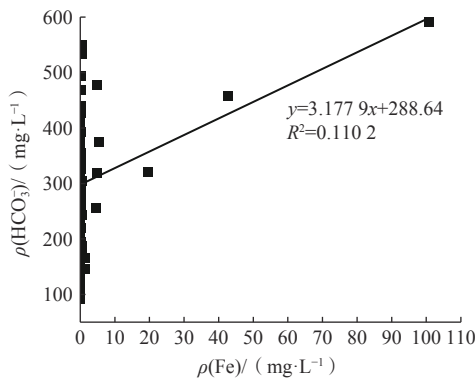


图 9 沟谷平原区地下水中 Fe 含量与 HCO₃⁻ 含量的相互关系

Fig. 9 Relationship between Fe content and HCO₃⁻ in groundwater in gully plain area

在研究珠江三角洲地区地下水铁的富集成因时也得到了类似的结论^[39]。

研究区中铁随着 COD_{Mn}、NH₄⁺含量的升高而升高,随 NO₃⁻含量的升高而降低(图 10)再次说明地下水中铁含量受氧化还原条件控制^[40-43]。建议对建设用地中的地下水 Fe 含量进行长期监测,警惕可能由人类活动引起外源性还原性物质输入(COD_{Mn}、NH₄⁺)造成地下水中 Fe 含量进一步升高,如在工业园区建设污水处理厂,减少工业和生活污水的排放。

4.5 盐效应

西宁市地下水中 TDS 浓度平均值为 570.57 mg/L (I—III 区中 TDS 浓度平均值分别为 677.67, 715.87, 275.40 mg/L),淡水比例为 84.72%, TDS 含量较低,难以引起明显的盐效应。

有趣的是西宁市地下水中 Fe 含量随 TDS 含量的升高呈下降趋势(图 11)。说明西宁市浅层地下水在高 TDS 含量条件下,受到强烈蒸发作用的影响,各组分浓缩富集,引起矿物沉淀,而未引起明显的“盐效应”。

西宁市浅层地下水中 Fe 离子的来源主要是由原

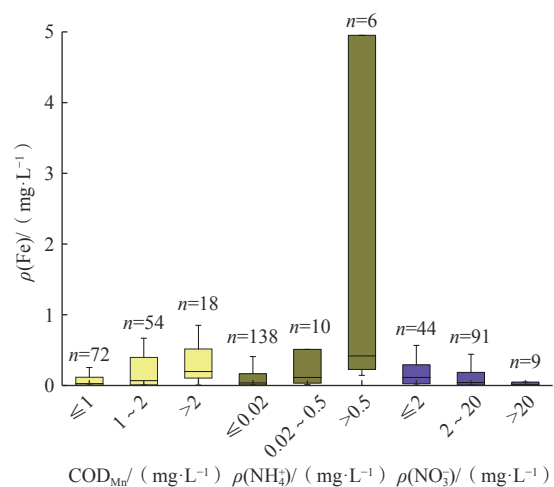


图 10 不同水化学特征中铁的分布

Fig. 10 Iron distribution in different water chemical characteristics

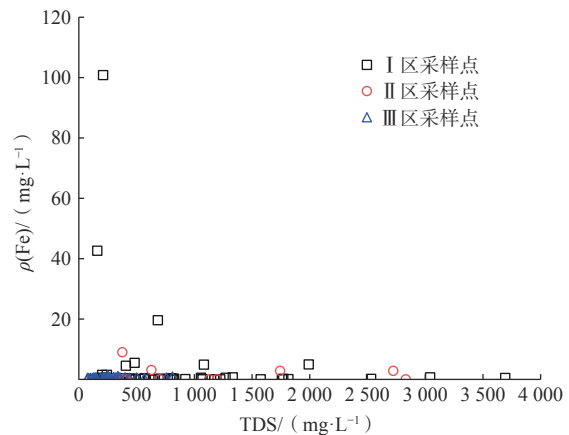


图 11 地下水 Fe 质量浓度与 TDS 浓度关系图

Fig. 11 Relationship between Fe concentration and TDS

生沉积环境所致,而局部(尤其是 I 区)浅层地下水中 Fe 含量升高则是人类活动影响所致,地下水中铁离子的迁移和富集,主要受控于氧化还原环境,其次是地下水径流条件,与酸碱条件无明显相关,未引起明显的“盐效应”。

5 结论

(1)研究区浅层地下水中 Fe 超标率为 20.83%, I 区>II 区>III 区, IV 区未发现富铁地下水。在 I 区中, 建设用地和未利用地中富铁地下水的比例分别为 34.48% 和 33.33%, 是农用地的 1.77 倍和 1.71 倍, 主要分布在河谷平原区, 沿河流呈带状或斑块状分布; 而在 II 区富铁地下水为 17.39%, 主要分布在农用地的耕地中; III 区中富铁地下水为 10%, 主要分布在农用地中的林地中; II 区和 III 区的未利用地中均未发现富铁地下水。

(2)研究区地下水铁含量的分布与所处区域的补给条件及土地利用类型密切相关, 尤其在 I 区, 地下水铁含量与地表河流的污染程度密切相关, 远离污染河流的地下水样品点铁含量有明显减少的趋势; 建设用地地下水中铁含量高于其他土地利用类型, 特别是工业分布区。未利用地中富铁地下水的出现说明此区已受政策驱动力的影响, 应加强水环境监测。

(3)在区域尺度上, 原生沉积环境是研究区浅层地下水中铁离子的主要来源。人类活动造成铁的释放只在局部地区对地下水铁含量的分布起主导作用, 建议改变人类活动方式, 加强对污水排放的监管; 地下水中铁离子的迁移和富集主要受氧化还原条件控制, 径流条件也起到一定作用, 与 pH 无明显相关, 未引起明显“盐效应”。

参考文献 (References):

- [1] JIA Yongfeng, XI Beidou, JIANG Yonghai, et al. Distribution, formation and human-induced evolution of geogenic contaminated groundwater in China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 967–993.
- [2] SHARMA G K, JENA R K, RAY P, et al. Evaluating the geochemistry of groundwater contamination with iron and manganese and probabilistic human health risk assessment in endemic areas of the world's largest River Island, India[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2021, 87: 103690.
- [3] CARRETERO S, KRUSE E. Iron and manganese content in groundwater on the northeastern coast of the Buenos Aires Province, Argentina[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 1983–1995.
- [4] ZHANG Ming, HUANG Guanxing, LIU Chunyan, et al. Distributions and origins of nitrate, nitrite, and ammonium in various aquifers in an urbanized coastal area, South China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124528.
- [5] REHMAN I U, ISHAQ M, ALI L, et al. Enrichment, spatial distribution of potential ecological and human health risk assessment via toxic metals in soil and surface water ingestion in the vicinity of Sewakht mines, district Chitral, Northern Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 154: 127–136.
- [6] 余东, 周金龙, 张杰, 等. 新疆喀什地区地下水铁锰水文地球化学及演化规律[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2169–2181. [YU Dong, ZHOU Jinlong, ZHANG Jie, et al. Hydrogeochemistry and evolution of iron and manganese in groundwater in Kashgar, Xinjiang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(6): 2169–2181. (in Chinese with English abstract)]
- [7] BENOIT B, ANNIE C, MARYSE F B. Spatial and temporal variations of manganese concentrations in drinking water[J]. *Journal of Environmental Science & Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2011, 46(6): 608–616.
- [8] BONDU R, CLOUTIER V, ROSA E. Occurrence of geogenic contaminants in private wells from a crystalline bedrock aquifer in western Quebec, Canada: Geochemical sources and health risks[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 627–637.
- [9] YADAV K K, KUMAR S, PHAM Q B, et al. Fluoride contamination, health problems and remediation methods in Asian groundwater: A comprehensive review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 182: 109362.
- [10] EPA. Secondary drinking water standards: Guidance for nuisance chemicals[EB/OL]. 2024. <https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance- nuisance-chemicals#table>
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [12] 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. [LÜ Xiaoli, LIU Jingtao, ZHOU Bing, et al. Fe and Mn distribution of groundwater in the Tacheng Basin, Xinjiang and its impact of human

- activities[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1765 – 1775. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中 Mn 元素的背景特征及其形成 [J]. *上海地质*, 2004, 25(1): 9 – 12. [ZENG Zhaohua. The background characteristics and formation of Mn element of groundwater in the area of the middle and lower reaches of the yangtze river[J]. *Shanghai Geology*, 2004, 25(1): 9 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [14] ZHAI Yuanzheng, ZHENG Fuxin, ZHAO Xiaobing, et al. Identification of hydrochemical genesis and screening of typical groundwater pollutants impacting human health: A case study in Northeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 1202 – 1215.
- [15] 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. [LI Ying, LI Jie, XUE Zhongqi, et al. Spatial distribution of iron and manganese in shallow groundwater in Yinchuan Plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(5): 110 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 梁国玲, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水锰的分布特征及其成因 [J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 899 – 906. [LIANG Guoling, SUN Jichao, HUANG Guanxing, et al. Origin and distribution characteristics of manganese in groundwater of the Zhujiang River Delta[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 899 – 906. (in Chinese with English abstract)]
- [17] PAN Xinhao, WANG Yihang, LIU Zhifeng, et al. Understanding urban expansion on the Tibetan Plateau over the past half century based on remote sensing: The case of Xining City China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(1): 1 – 24.
- [18] 李梦洁. 基于 TOD 模式的西宁市土地利用效益评价研究 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2020. [LI Mengjie. Study on land use benefit evaluation of Xining City based on TOD model[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 谢丹, 宋卓玛. 西宁市土地利用与生态环境耦合关系 [J]. *内江师范学院学报*, 2017, 32(4): 89 – 95. [XIE Dan, SONG Zhuoma. Coupling relationship between land use and eco-environment in Xining City[J]. *Journal of Neijiang Normal University*, 2017, 32(4): 89 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 规划科技处国土规划研究院. 《青海省土地利用总体规划》(2006 年—2020 年)具体内容 [J]. *青海国土经略*, 2010(4): 6 – 8. [Land Planning Research Institute of Planning and Technology Division. The specific contents of the Master Plan of Land Use in Qinghai Province (2006—2020)[J]. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, 2010(4): 6 – 8. (in Chinese)]
- [21] MENDIETA-MENDOZA A, HANSON R T, RENTERIA-VILLALOBOS M. Potential adverse impacts on vulnerability and availability of groundwater from climate-change and land use[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125978.
- [22] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500323.
- [23] 孙思奥, 任宇飞, 张蕾. 多尺度视角下的青藏高原水资源短缺估算及空间格局 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1308 – 1317. [SUN Siao, REN Yufei, ZHANG Qiang. A multi-scale perspective on water scarcity assessment in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1308 – 1317. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘春燕, 刘景涛, 朱亮, 等. 高原河谷城市浅层地下水铁锰分布特征、影响因素及其对生态环境的影响——以西宁市为例 [J/OL]. *中国地质*, (2023-06-14) [2023-11-18]. [LIU Chunyan, LIU Jingtao, ZHU Liang, et al. Distribution characteristics, influencing factors and impacts on ecological environment of Fe and Mn in shallow groundwater of Plateau Valley-City: A case study of Xining city[J/OL]. *Geology in China*, (2023-06-14) [2023-11-18]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1167.P.20230613.1552.004.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [25] FAN Yupeng, FANG Chuanglin. Evolution process analysis of urban metabolic patterns and sustainability assessment in Western China, a case study of Xining city[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105784.
- [26] 刘春燕, 于开宁, 张英, 等. 西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 [J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3228 – 3236. [LIU Chunyan, YU Kaining, ZHANG Ying, et al. Characteristics and driving mechanisms of shallow groundwater chemistry in Xining city[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6): 3228 – 3236. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [State Environmental Protection Administration of the Peoples Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and

- Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)]
- [28] ZHANG Bing, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China[J]. *Water Research*, 2012, 46(8): 2737 – 2748.
- [29] LI Zijun, YANG Qingchun, YANG Yuesuo, et al. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 685 – 697.
- [30] 陈毓川. 中国新疆战略性固体矿产大型矿集区研究[M]. 北京: 地质出版社, 2007. [CHEN Yuchuan. Research on large scale ore concentration area of strategic mineral resources in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese)]
- [31] 张爱奎, 马生龙, 刘光莲, 等. 青海省铁矿时空分布、成矿系列及成矿模式[J]. *矿物学报*, 2019, 39(1): 41 – 54. [ZHANG Aikui, MA Shenglong, LIU Guanglian, et al. The spatial-temporal distribution, minerogenic series and metallogenic models of iron deposits, Qinghai Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(1): 41 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [32] ADEYEYE O, XIAO Changlai, ZHANG Zhihao, et al. State, source and triggering mechanism of iron and manganese pollution in groundwater of Changchun, Northeastern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(10): 619.
- [33] JIA Yongfeng, GUO Huaming, JIANG Yuxiao, et al. Hydrogeochemical zonation and its implication for arsenic mobilization in deep groundwaters near alluvial fans in the Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 518: 410 – 420.
- [34] KOIT O, BARBERÁ J A, MARANDI A, et al. Spatiotemporal assessment of humic substance-rich stream and shallow Karst aquifer interactions in a boreal catchment of northern Estonia[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 124238.
- [35] ZHAI Yuanzheng, HAN Yifan, XIA Xuelian, et al. Anthropogenic organic pollutants in groundwater increase releases of Fe and Mn from aquifer sediments: Impacts of pollution degree, mineral content, and pH[J]. *Water*, 2021, 13: 1 – 15.
- [36] ZHAI Yuanzheng, CAO Xinyi, XIA Xuelian, et al. Elevated Fe and Mn concentrations in groundwater in the Songnen Plain, Northeast China, and the factors and mechanisms involved[J]. *Agronomy*, 2021, 11: 2392.
- [37] 蔡玲, 胡成, 陈植华, 等. 江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 18 – 25. [CAI Ling, HU Cheng, CHEN Zhihua, et al. Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jiangnan Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 18 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [38] HUANG Guanxing, HAN Dongya, SONG Jiangmin, et al. A sharp contrasting occurrence of iron-rich groundwater in the Pearl River Delta during the past dozen years (2006–2018): The genesis and mitigation effect[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154676.
- [39] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因[J]. *中国地质*, 2008, 35(3): 531 – 538. [HUANG Guanxing, SUN Jichao, JING Jihong, et al. Distribution and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 531 – 538. (in Chinese with English abstract)]
- [40] ZHAI Yuanzheng, MA Tianyi, ZHOU Jingjing, et al. Impacts of leachate of landfill on the groundwater hydrochemistry and size distributions and heavy metal components of colloids: A case study in NE China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(6): 5713 – 5723.
- [41] DU Yao, DENG Yamin, MA Teng, et al. Enrichment of geogenic ammonium in quaternary alluvial-lacustrine aquifer systems: Evidence from carbon isotopes and DOM characteristics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6104 – 6114.
- [42] MCMAHON P B, BELITZ K, REDDY J E, et al. Elevated manganese concentrations in United States groundwater, role of land surface-soil-aquifer connections[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(1): 29 – 38.
- [43] ZHANG Zhihao, XIAO Changlai, YANG Weifei, et al. Effects of the natural environment and human activities on iron and manganese content in groundwater: A case study of Changchun city, Northeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(30): 41109 – 41119.