

doi: 10.12029/gc20200613

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮. 2020. 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, 47(6): 1765-1775.
Lv Xiaoli, Liu Jingtao, Zhou Bing, Zhu Liang. 2020. Fe and Mn distribution of groundwater and impact of human activities in the Tacheng Basin, Xinjiang[J]. Geology in China, 47(6):1765-1775(in Chinese with English abstract).

新疆塔城盆地地下水中铁锰分布特征 及人类活动的影响

吕晓立^{1,2}, 刘景涛¹, 周冰¹, 朱亮¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 河北省地下水污染与修复重点实验室, 中国地质调查局地下水污染机理与修复重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要:以新疆塔城盆地 80 组地下水样品水化学组分测试结果为依据, 结合区域地质、水文地质调查资料, 研究塔城盆地地下水中铁、锰分布特征及其成因。结果表明, 研究区浅层地下水中铁、锰浓度总体较低, 局部超标, 其空间分布特征基本一致。对比 2017 年发布的地下水质量标准, 地下水中铁、锰超标率依次为 25 % 和 5 %, 深层承压水铁、锰含量均未超标。地下水中铁锰离子浓度受原生地质环境所控, 同时叠加人类活动影响, 城镇周边人口密集区尤其是排污沟渠附近地下水中耗氧量、溶解性总固体、铁、锰含量明显升高。地下水中铁锰超标连片区域呈条带状或斑块状分布于塔城盆地北部山区、中部冲积平原区以及南部低山丘陵区的铜钼成矿带, 受人类活动影响, 在塔城市、额敏县及其周边的地表水和地下水重污染区分布有地下水铁、锰重污染点, 污染物特别是有有机污染物排放所引起的还原环境促使地层中难溶的铁锰矿物的溶解释放。地层中, 尤其是矿床及周边地层中高含量的铁锰是地下水中铁锰的重要来源, 沉积层中富含丰富的有机质同时叠加人类活动输入所形成的还原条件是研究区地下水中铁、锰迁移和富集的主控因素。

关键词:地下水; Fe、Mn 分布特征; 人类活动; 水文地质调查工程; 塔城盆地; 新疆

中国分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1765-11

Fe and Mn distribution of groundwater in the Tacheng Basin, Xinjiang and its impact of human activities

LÜ Xiaoli^{1,2}, LIU Jingtao¹, ZHOU Bing¹, ZHU Liang¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Hebei and China Geological Survey Key Laboratory of Groundwater Remediation, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: 80 shallow groundwater samples were collected from Tacheng Basin and analyzed for their chemical composition, and the

收稿日期: 2018-09-15; 改回日期: 2019-02-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“珠江三角洲松散沉积含水层水质综合调查”(DD20160308)、“湟水河水文地质综合调查”(DD20190311)及国家自然科学基金项目“微米活性碳粉在孔隙含水层中的运移研究”(41472226)联合资助。

作者简介: 吕晓立, 女, 1978 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下水污染调查与修复研究; E-mail: 2767398591@qq.com。

通讯作者: 刘景涛, 男, 1981 年生, 副研究员, 主要从事污染水文地质研究; E-mail: 728881944@qq.com。

distribution and source of Fe and Mn in groundwater in Tacheng Basin were studied. Generally, the shallow groundwater in Tacheng Basin is significantly polluted by Fe and Mn. 25% and 5% of the groundwater samples show Fe and Mn exceeding the groundwater standard, respectively. The concentrations of iron and manganese in deep confined water do not exceed the standard. The concentrations of Fe and Mn are controlled by the original geological and sedimentary environment and the superposition of human activities. High concentrations of iron and manganese in groundwater are distributed in stripes or patches in the copper and molybdenum metallogenic belts in northern mountains, middle alluvial plains and southern hilly areas of Tacheng Basin. The spatial distribution characteristics of iron and manganese in the groundwater of the study area are basically the same. The heavy pollution points of iron and manganese are mainly distributed in Tacheng of Emin County and its surrounding areas. The distribution of iron and manganese in groundwater in the study area is closely related to soil and aquifer composition, human activities and some other factors. Redox and groundwater runoff conditions are the main factors affecting the migration and enrichment of iron and manganese in groundwater. Infiltration of polluted water from sewage ditches is an important factor affecting the content of iron and manganese in underground water of heavy pollution spots in Tacheng Basin.

Key words: groundwater; Fe and Mn distribution; human activity; hydrogeological survey engineering; Tacheng Basin; Xinjiang

About the first author: LÜ Xiaol, female, born in 1978, master, senior engineer, majors in groundwater pollution investigation and remediation research; E-mail: 2767398591@qq.com.

About the corresponding author: LIU Jingtao, male, born in 1981, associate researcher, majors in the study of pollution hydrogeology; E-mail: 728881944@qq.com.

Fund support: Supported by Project of China Geological Survey (No. DD20160308, DD20190311) and National Natural Science Foundation of China (No. 41472226).

1 引 言

铁、锰元素是地壳中储量丰富的可变价元素。人类活动产生的含铁、锰物质排放和天然条件下沉积物中铁、锰离子的释放,是地下水中铁、锰的主要来源(姜义等,2003;曾昭华,1994;张德彬,2018;王焰新,2010)。中国含铁、锰地下水主要集中在松花江流域和长江中下游地区,黄河流域、珠江流域等部分地区也有分布。全国有18个省市存在地下水中铁、锰含量超标现象,主要分布于河北南部,山东西北部,宁夏北部,陕西、青海、甘肃的中北部,内蒙古及东北大部分地区(梁和国,2014)。铁、锰是人体所需的微量元素,但饮用水中过量的铁、锰元素含量会对人体健康造成威胁,长时间饮用含有高浓度铁、锰离子的地下水,会引起消化系统和骨骼疼痛等疾病(Leanne et al., 2006; Bhutiani et al., 2016)。中国北方地区普遍存在地下水中铁、锰含量超标现象,地下水中铁、锰含量超标是影响地下水质量的重要因素,铁、锰离子的大量存在不但降低了地下水的使用价值更增加了饮用水安全隐患,还导致我国北方部分城市出现“水质型”缺水问题(Wu Aimin et al., 2020)。地处新疆腹地的塔城盆地,干旱少雨,蒸发强烈,地下水环境的变化对该区

的经济和生态具有重要影响(孙厚云,2018)。针对以上问题,本文选择塔城盆地为研究区,综合多方面水文地质数据,对其浅层地下水铁、锰元素的空间分布特征和成因进行了深入分析,以期为当地的饮用水安全提供参考,也为我国其他地区地下水铁、锰污染的来源分析与污染预防提供借鉴。

2 材料与研究方法

2.1 研究区水文地质概况

塔城盆地位于新疆西北部,三面环山,北部为塔尔巴哈台山,东部为乌尔喀什尔山,南部为巴尔鲁克山(图1,图2)。盆地自东北向西南倾斜,盆地边缘的山前地貌由互相毗邻的洪积扇组成。地貌类型以平原为主,中心是库鲁斯台大草原。塔城盆地属内陆中温带干旱和半干旱气候区,多年平均气温6.5℃。多年平均降水量300mm,集中在7—9月份,多年平均蒸发量为1600mm。盆地内有大小河流共58条,水量充沛,汇向盆地中心的额敏河。河流的动态类型为雪水型,春洪径流量约占年总流量的50%。

塔城盆地为新生代断陷盆地,其构造格局由5条区域大断裂控制,且断裂走向由北东逐渐转为近东西方向,平面上呈向西撒开、向东收敛的展布特

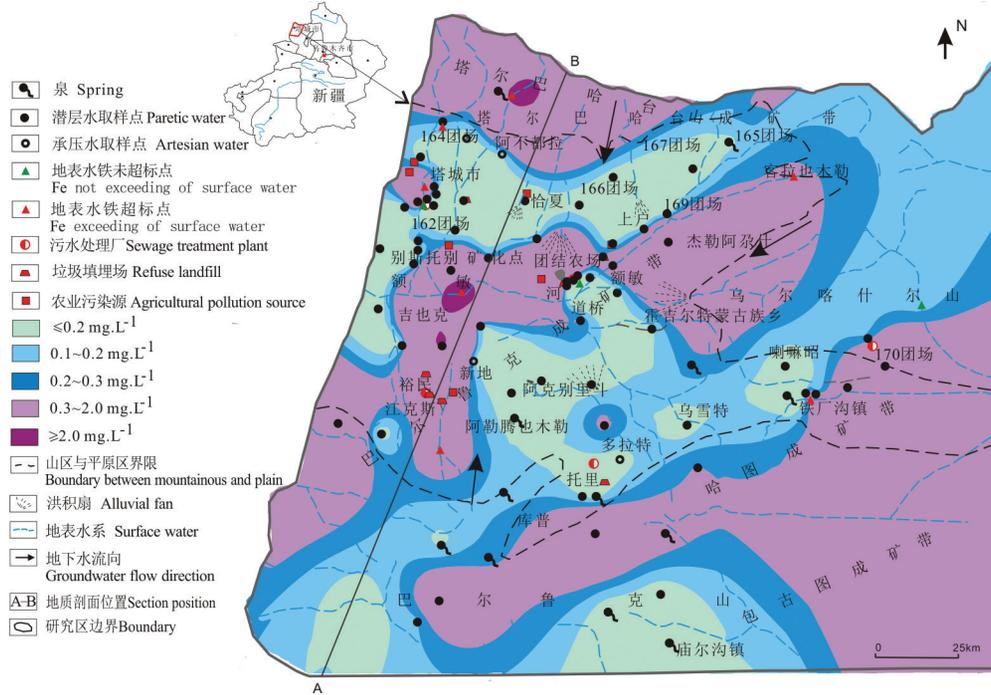


图1 地下水采样点及浅层水铁含量分布图

Fig.1 Fe distribution in the groundwater of Tacheng Basin

征(孙相灿,2017)。第四纪以来堆积了厚达几十到250 m的卵石、砾石、砂和土层,组成从四周向盆地中部分布的含水层(图1,图2)。塔城盆地是水量充沛的地下水闭流盆地,盆地由山区、洪积平原、冲积平原三大水文地质单元组成。山区是盆地地下水的补给区,洪积平原是盆地地下水的补给-径流区,冲积平原是盆地地下水的汇聚-排泄区。盆地内地下水从山前洪积平原单一的砂砾石潜水向盆地中心过渡为多层结构的潜水及承压水;含水层结构由简单到复杂,颗粒由粗到细,埋藏深度由深到浅以至溢出地表。额敏河横贯盆地

中部,对盆地地下水起着总排泄作用。大气降水、山区河床地下潜流的侧向补给、河流及渠道入渗补给是盆地平原区地下水的主要补给来源,人工开采以及额敏河的排泄和蒸发是地下水的主要排泄方式(胡卫忠,1987)。

2.2 样品采集与分析

2.2.1 样品采集

根据研究区水文地质条件、土地利用类型以及污水处理厂、固体废弃物等潜在污染源分布特征,进行取样点布设。在地表水上游地区(出山口附近)以及下游溢出带布设地表水取样点,控制地下

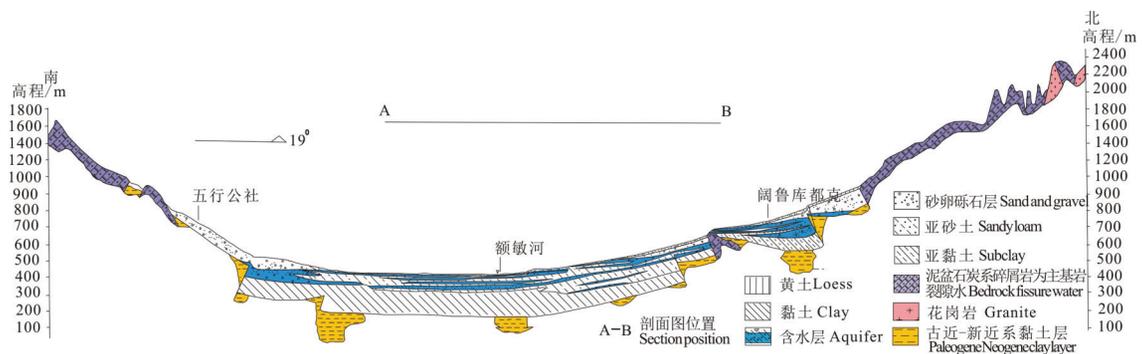


图2 研究区水文地质剖面示意图

Fig.2 Hydrogeological profile of the study area

水的“进口”和“出口”。针对大型污染源,在其附近加密布设取样点。

2015年7—8月在研究区采集地下水和地表水样品共计90组(图1)。其中,地下水样品80组(含泉水12组),地表水样品10组。地下水样品取自民井和农业灌溉井,采样井井深3~180 m,地下水水位埋深0.5~120 m。采样设备主要有离心泵和潜水泵,采样前,对采样井进行抽水清洗,等到排出水量大于井孔储水量的3倍,并且水温、电导率、pH、氧化还原电位、溶解氧等现场测试指标稳定后再进行采样,确保采集的样品具有代表性。当测试项目为可挥发性物质时,在潜水泵或离心泵排水管上接由中国地质科学院水文地质环境地质研究所自主设计的压力阀取样器进行采样。压力阀取样器的目的是使抽上来的地下水保持足够的压力,使挥发性物质仍溶解在水中,消除排水管路中的气泡,防止通过潜水泵提升至地面的地下水因泄压而使挥发性物质如有机物、氨氮等逸出,使样品中的浓度减少。取样时,调节出水口阀门,使管内压强保持在0.25 MPa,并保证管内无气泡后,使用小流量接取水样。当采样井中没有水泵时,采用中国地质科学院水文地质环境地质研究所自主研发的“水斗定深取样器”(孙继朝,刘景涛,2008),通过人工提水方式在微扰动的前提下,将井下目标深度的地下水直接密封后采出地面。所用采样瓶为2.5 L的高密度聚乙烯瓶(测无机宏量元素)、1L高密度聚乙烯瓶(加1:1的硝酸2~3 mL,用于测量重金属离子浓度)。取样后,贴标签并用Para film封口膜密封避光保存,7 d内送达实验室测试。

2.2.2 样品分析

样品均在自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心测定,执行标准参照 GB/T 8538-1995。利用DX-120型离子色谱仪和ICP-AES分别对阴、阳离子进行测定,用纳氏试剂比色法对 NH_4^+ 进行测定,用紫外分光光度法对 NO_3^- 进行测定,用 $\bar{\alpha}$ -萘胺分光光度法对 NO_2^- 进行测定;铁、锰、碳酸氢根、化学需氧量以及总溶解固体的检测方法分别为原子吸收法、酸碱容量法和重铬酸钾法。pH值用电位法测定;电导率用电导仪测定。现场测试指标酸碱度(pH)、溶解氧(DO)和氧化还原电位(Eh)等采用多功能便携式测试仪(Multi-340i/SET,德国WTW)进行测试。

2.2.3 样品质量控制

样品质量控制通过实验室空白样、野外空白样、平行密码样。测定结果显示,实验室空白样和野外空白样的各项数据均低于检出限,平行密码样与其原样测定结果误差在5%以内。

2.2.4 数据分析

运用舒卡列夫分类法分析水化学类型,运用SPSS、AquaChem等软件分析水化学数据,运用MapGIS软件绘制地下水铁、锰含量分布图,运用离子比分析法探讨地下水铁锰迁移与富集成因。

3 结果与分析

3.1 地下水铁、锰分布特征

3.1.1 地下水化学特征

塔城盆地山前及平原区地下水pH值分别为7.12~8.47、6.93~8.21,总体上为中性或弱碱性水,主要阴离子为 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} ;阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 为主,TDS含量介于 $143.5\sim 3881\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中淡水占83.3%(表1)。根据舒卡列夫分类法(图3),研究区地下水水化学分带明显,潜在在盆地四周的基岩山区主要为 HCO_3-Ca 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水;山前丘陵区主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型,局部为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型水,到盆地中部冲积平原地下水化学类型从 HCO_3-SO_4 型水过渡到 SO_4 型水,溶解性总固体含量也逐渐增高。研究区承压水各离子组分浓度比潜水低,水化学类型在平原区周边主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,到平原区中部过渡为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型水,TDS含量介于 $237.5\sim 1289\text{ mg/L}$ 。地表水在上游出山口主要为 HCO_3-Ca 型水,到盆地中部额敏河一带过渡到 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型水。盆地山前地下水与山区地表水具有类似的水化学演化特征,说明山区地表水体在出山口入渗补给地下水,二者水力联系密切。

3.1.2 地表水铁、锰空间分布特征

本次研究取得地表水样品10组,其中在基本无人为污染的山区采集地表水样品6组,在盆地内排污口下游采集地表水样品4组(表2)。取自不同河流上游的6组区域地表水样品铁含量介于 $0.13\sim 2.59\text{ mg/L}$,锰含量介于 $0.02\sim 0.24\text{ mg/L}$,铁、锰含量平均值分别为 0.81 mg/L 和 0.08 mg/L 。对比2002年颁布的地表水质量标准(GB3838-2002),区域6

表1 地下水铁锰含量及其水化学特征

Table1 Fe, Mn content and hydrochemical characteristics of groundwater

检测项目	标准值 /(mg/L)	潜水(n=76)				承压水(n=4)			
		平均值 /(mg/L)	最大值 /(mg/L)	最小值 /(mg/L)	超标率 /%	平均值 /(mg/L)	最大值 /(mg/L)	最小值 /(mg/L)	超标率/%
Fe	0.3	0.29	3.57	ND	26.3	0.05	0.11	ND	0
Mn	0.1	0.05	2.32	ND	5.3	0.001	0.002	ND	0
TDS	1000	609.2	3881.0	161.6	17	500.4	950.8	237.5	0
pH	6.5~8.5	7.58	8.47	6.93	0	7.86	7.99	7.59	0
HCO ₃ ⁻	—	262.9	519.5	78.5	—	220.5	277.9	172.2	—
SO ₄ ²⁻	250	245.4	2082.0	10.92	32.9	154.5	416.9	43.4	25
Cl ⁻	250	41.24	404.4	0.35	1.3	39.91	93.88	9.49	0
Mg ²⁺	50	26.43	130.1	4.4	9.2	19.06	25.94	9.06	0
K ⁺ +Na ⁺	200	92.78	770.8	6.14	11.8	50.2	185.4	9.38	0
Ca ²⁺	400	96.36	281.1	41.0	0	68.1	88.76	59.06	0

注:标准值为《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)规定的限值;ND表示未检出,计算时ND作零处理。

组地表水体Fe、Mn超标率分别为83.3%和33.3%。塔城盆地山区无明显人为污染源,去除铁、锰因子,地表水体其他组分均未超出三类水标准限值(表2),表明塔城盆地山区地表水体质量总体良好,地表水中铁、锰超标为原生沉积环境所致。位于盆地内排污口下游的4组地表水样,分别取自研究区不同的污水处理厂排污沟渠,额敏河中下游牲畜粪便排污沟、铁厂沟呼尔台河污水沟等地。此类地表水体均浑浊,黑色或黄色,并有恶臭味道。测试结果表明(表2),此4组地表水样品铁、锰含量分别介于0.2~3.08 mg/L和0.05~0.50 mg/L,铁、锰超标率分别为50%和75%,其中铁含量最高为3.08mg/L、锰含量最高为0.50 mg/L;除铁、锰外,氨氮、溶解性总固体、总硬度、耗氧量、硫酸盐和氯离子等均不同程度超出地表水质量标准(GB3838-2002)限值。

3.1.3 地下水铁、锰空间分布特征

研究区80组地下水样品水化学组分测试结果(表1)表明,塔城盆地地下水铁含量介于0~3.57 mg/L,平均含量为0.28 mg/L。对比2017年颁布的地下水质量标准(GB/T14848-2017),地下水样品中铁含量超标20组,超标率约为25%。地下水锰含量介于0~2.32 mg/L,平均含量为0.04 mg/L,其中超出地下水质量标准限值(0.1 mg/L)4组,超标率约为5%。

在水平方向上,浅层地下水铁、锰超标区域呈条带状或斑块状分布于塔城盆地北部山区的塔尔巴哈台铜成矿带,塔城市南部别斯托别一带铜矿化点,盆地中部冲积平原区沿额敏河呈条带状分布的巴尔鲁克成矿带以及盆地南部低山丘陵区分布的哈图成矿带、包古图铜铅成矿带(图1,图4)。研究区浅层地下水中铁、锰超标区域空间分布特征与盆

表2 地表水铁锰含量及其水化学特征

Table 2 Fe, Mn content and hydrochemical characteristics of surface water

检测项目	标准值 /(mg/L)	山区样品(n=6)				排污沟渠(n=4)			
		平均值 /(mg/L)	最大值/ (mg/L)	最小值/ (mg/L)	超标率 /%	平均值 /(mg/L)	最大值/ (mg/L)	最小值/ (mg/L)	超标 率/%
Fe	0.3	0.81	2.59	0.13	83.3	1.2	3.08	0.2	50
Mn	0.1	0.08	0.24	0.02	33.3	0.23	0.50	0.05	75
TDS	1000	207.12	383.4	143.5	0	1134.9	1557.0	683.7	50
总硬度	450	149.78	238.2	114.1	0	362.9	497.4	256.7	25
耗氧量	20	1.71	3.02	1.11	0	79.2	209.8	4.3	75
NH ₄ -N	1.0	0.016	0.031	ND	0	35.16	93.3	0.67	50
HCO ₃ ⁻	—	161.8	248.9	120.8	—	530.7	1253.0	211.4	—
SO ₄ ²⁻	250	28.32	64.82	11.31	0	282.97	704.8	0.98	50
Cl ⁻	250	2.52	10.9	0.35	0	159.5	276.0	57.31	25
Mg ²⁺	50	7.84	15.92	5.15	0	28.0	34.8	14.66	0
K ⁺ +Na ⁺	200	14.25	41.13	5.08	0	195.1	298.6	81.95	50
Ca ²⁺	400	47.07	69.15	34.88	0	99.1	147.1	60.3	0

注:标准值为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)规定的限值;ND表示未检出,计算时ND作零处理。

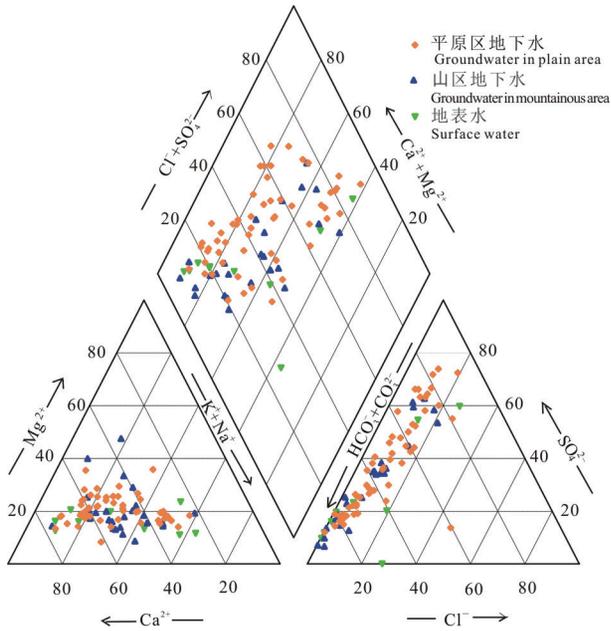


图3 平原区和山前洪积扇地下水化学Piper三线图
Fig.3 Piper plots of groundwater from the plain area and the piedmont area

地各成矿带分布基本一致。在有成矿带分布的山区,地下水受冰雪融水和大气降水补给,质量总体较好,但受地层中大量铁、锰矿物影响(朱伯鹏, 2016;王威, 2017),地下水中铁、锰含量总体较高

(图1,图4)。研究区北部山区以及南部丘陵区的成矿带地下水中铁锰含量出现了条带状超标区域,这也导致受地下水补给的出山口地表水体中铁、锰含量超标(图1,图4,表2)。沿着地下水流向,从山区到盆地中部的冲洪积平原区,受人类活动影响,地下水质量逐渐变差。重污染点主要分布在塔城市、额敏县及其周边工矿企业排污口附近、污水处理厂下游、垃圾填埋场下游等部位(图1,图4)。

在垂向上,研究区地下水中铁锰含量具有明显的垂向分带性(图5),由浅至深呈降低趋势,铁、锰浓度超出地下水质量三类水标准限值(铁0.3 mg/L、锰0.1 mg/L)的样品点水位埋深主要集中于0~20 m。当地下水位埋深较浅时铁、锰浓度变化幅度较大,铁浓度最高可达3.57 mg/L,锰浓度最高可达2.32 mg/L。当水位埋深大于50 m时,地下水铁浓度小于0.1 mg/L,锰浓度小于0.05 mg/L,且超过60%的地下水样品锰浓度未检出。

3.2 地下水中铁、锰的来源及控制因素

3.2.1 原生沉积环境

研究区高含量铁锰分布区与盆地内各成矿带分布一致(图1,图4),这提示多金属成矿带所含铁锰矿物的溶出可能是地下水中铁锰的重要来源。

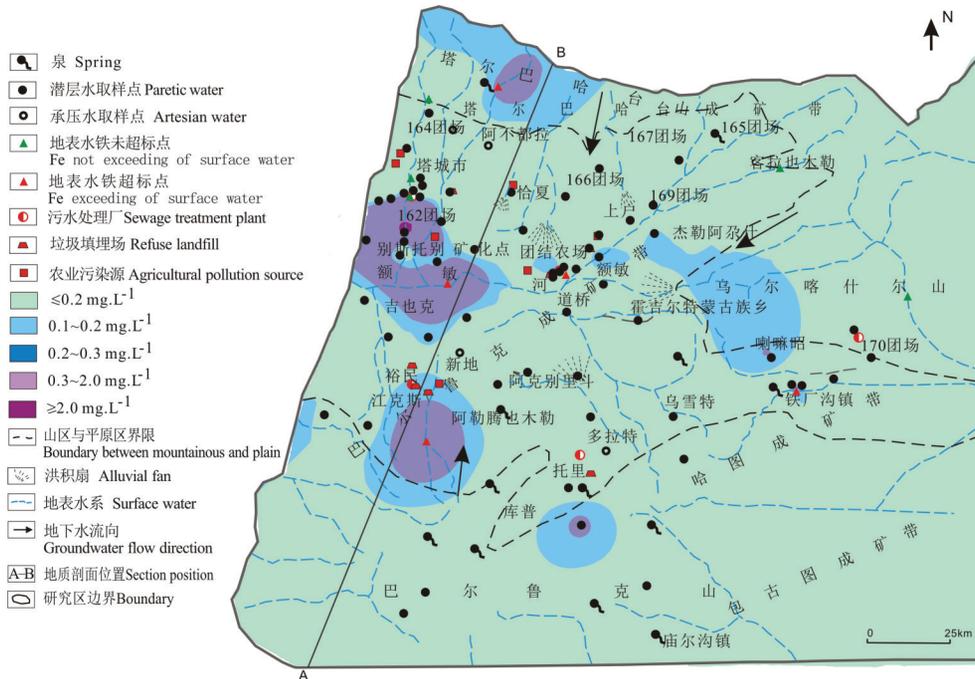


图4地下水采样点及浅层水锰含量分布图
Fig. 4 Mn distribution in the groundwater of Tacheng Basin

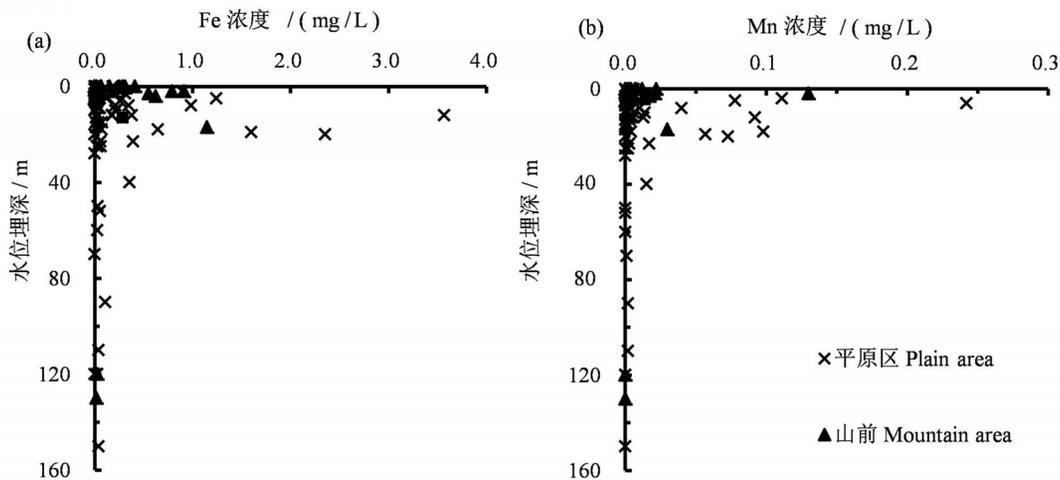


图5 地下水Fe、Mn浓度与水位埋深关系图
Fig.5 Depth distribution of Fe, Mn in groundwater

塔城地区有多条基性岩多金属成矿带,在浅山区甚至平原区也存在许多矿脉露头。如别斯托别铜矿点就位于额敏河北岸,出露于第四系冲洪积平原上(王威等,2017),矿脉中的主要金属矿物包括黄铁矿、黄铜矿、毒砂、辉钼矿等(朱伯鹏等,2016;周军等,2017)。雨水和第四系含水层内地下水对富含铁锰和其他重金属的基性岩的长期侵蚀,使得岩体中的铁锰和其他重金属离子溶出,在不利的地下水径流条件下,会使地下水中富集较高的铁锰和重金属离子。已有研究表明(蒋宜勤,2012;孙相灿,2017),盆地内发育泥盆系、石炭系和二叠系3套暗色泥岩,其中石炭系为盆地主要烃源岩发育层段。塔城盆地周缘露头泥盆系广泛发育,盆地内第四系地质体中含有丰富的有机质(陆俊泽,2017),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、赤铁矿等富铁矿物和富锰矿物(朱伯鹏,2016;王威,2017),将难溶的高价态铁锰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,这进一步加剧了地层中铁锰的溶出。在地质作用过程中,Fe和Mn具有相似的迁移和富集性,其分布范围基本一致。在相同条件下,地下水中的Mn比Fe易迁移富集,但受本区原生沉积环境中Fe、Mn含量差异的影响(曾昭华,1994),研究区地下水中Fe含量高于Mn含量,其超标率也相对Mn较高。

3.2.2 氧化还原环境

含水层介质及其上覆土层中的含铁锰矿物是

地下水中铁锰的主要物质来源,而氧化还原环境是地下水中铁锰迁移富集的外在因素。铁锰是变价元素,氧化环境下,含水层中的铁元素被氧化为高价态, Fe^{3+} 易沉淀。在还原条件下,高价铁的氧化物还原为低价铁的易溶盐,使铁元素以 Fe^{2+} 形式进入地下水。塔城盆地河网发育的山区广泛分布富含铁锰矿物的碎屑岩层(蒋宜勤,2012),风化裂隙水发育。在降雨淋滤的作用下,岩石中的铁锰矿物如磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿释放大量的Fe、Mn离子。但在强烈的氧化作用下,其主要以高价的 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 形式存在并易形成难溶的氢氧化物沉淀,抑制铁、锰离子的迁移和富集。因此,虽然盆地南北山区地下水中铁锰含量高,但盆地倾斜平原地下水径流区铁锰含量低。

在平原区,地下水中铁、锰离子的迁移和富集,除了与含水介质成分、上覆土层性质、酸碱条件有关外,主要受控于还原环境。盆地中部平原额敏坳陷带,分布有巴尔鲁克多金属成矿带,含水层的上覆土层中,不仅含有大量的铁锰矿物,而且富含有机质(孙相灿,2017)。由于地下水位埋深较浅,地层沉积物长期浸泡在地下水中,形成相对还原的地下水环境。盆地中部平原区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 ,从而促使地层中的 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} 而溶解进入地下水并引起地下水中 HCO_3^- 升高。本次研究取自平原区污染源周边的16组样品测试结果显示,地下水中 HCO_3^- 与Fe浓度以及耗氧量均呈非线性正相关关系(图6)。前人在

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(黄冠星,2008)。

3.2.3 人类活动输入

人类活动是促进地层沉积物中铁、锰化合物溶解的一个诱发因素(朱亮,2014)。研究区地下水中铁、锰的超标主要受控于自然因素,而位于盆地中下游的冲洪积平原区铁锰重污染点则由天然沉积环境和污染输入共同影响所致。数据显示,研究区地下水铁含量(3.57 mg/L)最高点位于盆地中部,紧邻某污染处理厂排污沟渠,该排污沟渠内水体浑浊、恶臭、呈墨黑色。为探明地表水体对周边地下水的影响,在地表水体周边及其上下游不同距离处加密布设取样点,共采集地表水样品1组,地下水样品8组。排污沟渠地表水体中氨氮含量高达93.3 mg/L,超出地表水Ⅲ类水质量标准限值(1.0 mg/L)93倍以上;化学耗氧量为209.8 mg/L,超出地表水Ⅲ类水质量标准限值(20 mg/L)10倍以上;Cl⁻和溶解性总固体含量分别为276 mg/L和1557 mg/L,均超出地表水Ⅳ类水质量标准限值。对排污沟渠周边7组地下水样品进行质量评价,结果显示,排污沟渠周边地下水无Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类水,Ⅳ类水占29%,Ⅴ类水占71%。地下水主要超标组分为硝酸盐、硫酸盐、总硬度、钠、TDS、耗氧量和铁。排污沟渠附近地下水Fe、Mn含量较高,且随着化学耗氧量的增大呈上升趋势(图7)。远离排污渠Fe、Mn含量逐渐降低;且沟渠两侧地下水污染呈不对称方式分布,沿着地下水流向污染范围较大;逆地下水流向污染范围相对较小。调查结果显示,该区表层为厚1.8 m的粉土,下伏2~10 m细砂含卵砾石层,10~25 m为粗砂含卵砾石

层,地下水位埋深10~12 m,包气带防污性能差。

化学耗氧量是衡量水中有机质含量的重要指标,其值越大,说明有机污染越严重,还原性越强(朱亮,2014)。研究区排污沟渠含有如此高浓度溶解性有机质(化学耗氧量为209.8 mg/L)和氨氮(93.33 mg/L)的水穿过防污性能差的粉土层和含砾砂层后很容易污染地下水。水中的有机质(主要是腐植酸等有机酸)在经过粉土层时通过络合作用和溶解作用将粉土层中的氯化钠、硫酸钙、碳酸钙、碳酸镁等易溶组分溶解,并带进地下水;同时将地层中的铁氧化物还原为易溶的二价铁离子进入地下水;使得地下水中溶解性总固体、耗氧量和总铁浓度出现明显升高。因此,外界污染物特别是有机污染物的排放所引起的地下水还原环境是促进地层中难溶铁锰化合物溶解的重要因素。

3.2.4 地下水径流条件

地下水的径流条件是影响地下水铁、锰元素迁移、富集的一个重要因素(梁国玲等,2009)。通常,地下水径流条件越好,水中的铁、锰元素就越容易流失而贫乏,反之,则易富集。研究表明,高含量铁、锰的地下水往往分布于径流区或排泄区(张德彬,2018)。调查结果显示,贯穿盆地中部的额敏河谷区及地势低洼处的铁锰含量普遍高于南北两侧的洪积平原区地下水中铁锰含量(图1,图4)。

受气候及地质因素控制,塔城盆地具有独特的水文地质结构。盆地地下水受山区低溶解性总固体积雪融水的补给量较大,且盆地四周向中心倾斜的地形有利于地下水的补给富集,因此,塔城盆地富水性较好。同时,受下部隐伏构造的控制,塔城盆地南北方向具有“两坳夹一隆”构造格局,从北向

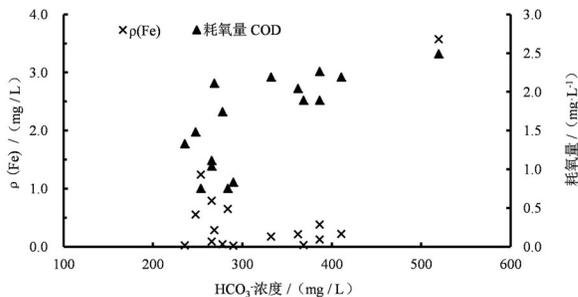


图6 潜在污染源周边地下水中HCO₃⁻浓度与Fe浓度、耗氧量的相关性

Fig.6 Plots of HCO₃⁻ versus Fe and COD in groundwater of pollutant source

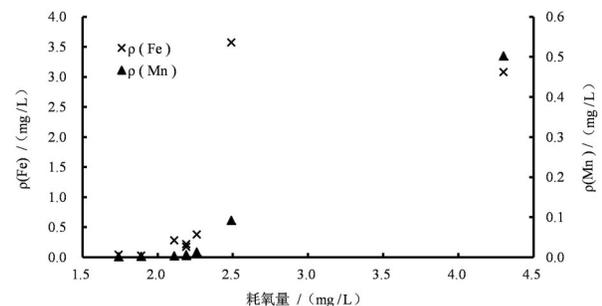


图7 排污沟渠周边地下水中Fe、Mn浓度与耗氧量相关性

Fig.7 Plots of COD versus Fe and Mn in groundwater of sewage drains

南依次为库吉坳陷、哈巴克隆起、额敏坳陷三个构造单元,这一独特的水文地质结构导致塔城盆地北部山前洪积平原地下水经历了两次水循环,北部洪积平原有两个溢出带,地下水径流途径较短,水循环较快(孙相灿,2017)。因此,在山前倾斜平原地下水径流区不利于铁、锰的富集,地下水中铁锰浓度较低。额敏坳陷带地下水铁锰含量高,该条带状地下水中铁锰含量超标区域处于地下水的总汇集-排泄区,地下水径流较缓慢,地下水中溶解的铁锰等污染离子在低洼处富集,出现较高的浓度。但在本研究区,额敏河沿线高铁锰的成因同时受巴尔鲁克成矿带的重要影响。

塔城盆地地下水循环方式,主要靠承压含水层越流补给潜水含水层,通过蒸发及额敏河排泄。因此,塔城盆地以蒸发浓缩型水化学所支配的浅层地下水环境有利于可溶性碱金属离子和强酸根阴离子的富集,潜水的各组分含量及溶解性总固体含量明显高于承压水;浅层地下水铁锰含量高于深层承压水,尤其是受下部承压含水层顶托补给的平原区潜水含水层地下水铁锰含量上高下低的垂向分带表现更为明显。

3.2.5 其他影响因素

Fe、Mn元素在水中的存在形式除受氧化还原环境的影响,还受pH值的影响。在酸性条件下,pH为3~5时,易发生解吸反应。当pH值增大时,水体中H⁺的竞争力小于金属离子,水体中悬浮物或固体颗粒物对离子的吸附作用增强。在中性或偏碱性的条件下,Fe、Mn易发生水解,塔城盆地浅层地下

水pH值在6.93~8.47,总体上为中性或弱碱性水,随着pH值的升高,Fe、Mn含量也逐渐升高,但是在pH值高于8.0以后,地下水中Fe、Mn含量随着pH值升高呈下降趋势(图8)。说明,高pH值碱性环境下,Fe、Mn元素主要以高价的Fe³⁺、Mn⁴⁺形式存在并易形成难溶的氢氧化物沉淀。另外,其他离子浓度升高引起的盐效应也可能是引起地下水中的Fe、Mn含量增高的一个重要因素。Na⁺、Ca²⁺等宏量离子浓度的升高,可以将吸附在地层中的铁锰离子置换进入地下水。塔城盆地地下水中溶解性总固体浓度平均值为658.89 mg/L,淡水比例为83.3%,地下水溶解性总固体含量较低,难以引起明显的盐效应。相反,研究区地下水中Fe、Mn含量随TDS含量的升高呈下降趋势,当TDS含量大于1g/L时,地下水中的Fe、Mn含量急剧下降(图9)。说明,高TDS含量条件下,受强烈的蒸发作用,地下水各组分浓缩富集并未引起明显的“盐效应”,反而矿物沉淀发挥了更大的作用。

4 结 论

(1)塔城盆地地下水中铁、锰浓度点位超标率分别约为25%和5%。受原生地质环境所控,同时叠加人类活动影响,地下水中铁锰超标区域呈条带状或斑块状分布于塔城盆地北部山区、中部冲积平原区以及南部低山丘陵区的铜铅成矿带。地下水中铁、锰超标区域空间分布特征与盆地各成矿带空间分布基本一致,城镇周边人口密集区排污沟渠污水下渗致使地下水中耗氧量、溶解性总固体及铁锰浓度明显升高。

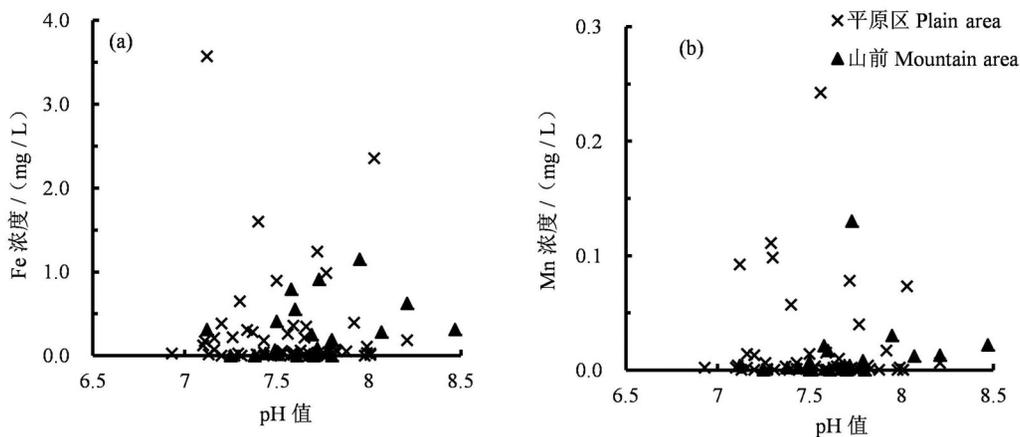


图8 地下水Fe、Mn质量浓度与pH关系图

Fig.8 Relationship of Fe, Mn concentrations to pH

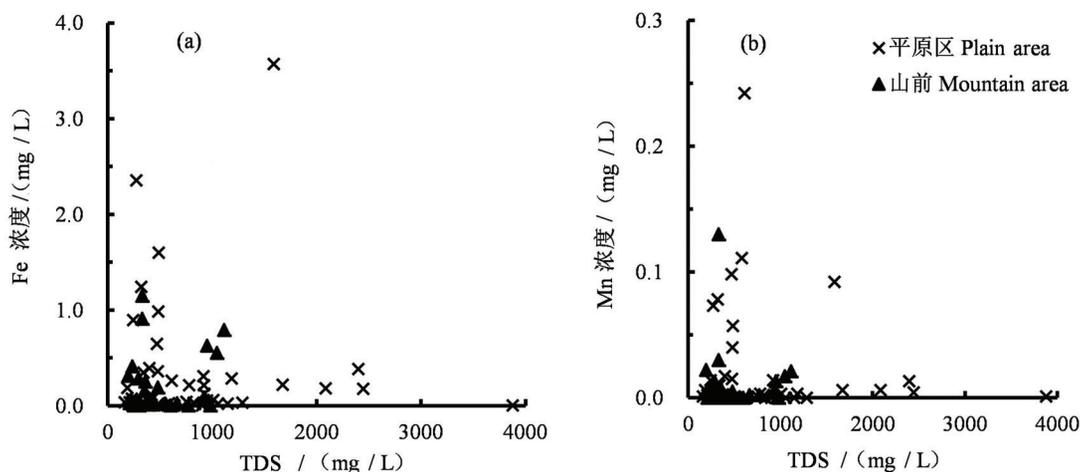


图9 地下水Fe、Mn质量浓度与TDS浓度关系图
Fig.9 Relationship of Fe, Mn concentration to TDS

(2)研究区地层中含铁、锰的易溶盐以及天然地层中的铁、锰化合物是地下水中铁、锰的主要来源。盆地地下水中铁锰含量主要受成矿带地层中铁锰矿物风化溶解的控制;在盆地内部人类活动强烈区,污染物特别是有机污染物排放所引起的地下水还原环境促使地层中铁锰化合物溶解释放。沉积层中高含量的有机质同时叠加人类活动输入所形成的还原环境是地下水中铁锰迁移和富集主要影响因素。

致谢:感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所项目组的同志在野外调查、资料收集以及综合研究等方面的帮助。

References

- Bhutiani R, Kulkarni D B, Khanna D R. 2016. Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in north India[J]. *Exposure and Health*, 8(1): 3–18.
- Hu Weizhong. 1987. Evaluation and Development of Groundwater Resources in Tacheng Basin, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 10(2):31–36(in Chinese with English abstract).
- Huang Guanxing, Sun Jichao, Jing Jihong, Wang Shan, Du Haiyan, Liu Jingtao, Chen Xi, Zhang Yuxi, Di Xiaobin, Zhi Bingfa. 2008. Distribution and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta[J]. *Geology in China*, 35(3):531–538(in Chinese with English abstract).
- GB/T8538–1995. 1996. Method of Calibration for Natural Mineral Water for Drinking[S]. Beijing: China Standard Press (in Chinese with English abstract).
- GB3838–2002. 2002. Environmental Quality Standards for Surface Water[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese with English abstract).
- GB/T14848–2017. 2017. Environmental Quality Standards for Groundwater [S]. Beijing: China Standard Press (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yiqin, Gao Gang, Liu Guangdi, Wang Xulong, Pei Lixin, Xiang Baoli, Tang Yong. 2012. Characteristics and hydrocarbon-generating potential of Carboniferous source rock in Tacheng Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(4):427–437(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yi, Zhang Jiku. 2003. Research on the form of Fe and Mn in underground water and removal technology[J]. *Environmental Protection Science*, 115(29):32–34 (in Chinese with English abstract).
- Liang Heguo. 2014. Research progress of iron and manganese removal from groundwater in China[J]. *Journal of Yangtze University(Nat. Sci. edit)*, 11(5):71–74(in Chinese with English abstract).
- Lu Junze, Yu qian, Bai Honghai, Zhou Jibing, Yan Jianfei, Xiong Guoqing, Xiong Xiaohui. 2017. The organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of the source rocks of Kalagang Formation of Lower Permian, in the southern margin of Tacheng Basin[J]. *J. Mineral Petrol.*, 37(2):84–90(in Chinese with English abstract).
- Liang Guoling, Sun Jichao, Huang Guanxing, Jing Jihong, Liu Jingtao, Chen Xi, Zhang Yuxi, Du Haiyan. 2009. Origin and distribution characteristics of manganese in groundwater of the Zhujiang River Delta[J]. *Geology in China*, 36(4): 899–906(in Chinese with English abstract).
- Leanne M Y, Jillian S P, Heather E C. 2006. The effect of iron status on vascular health[J]. *Vascular Medicine*, 11(2):85–91.
- Sun Xiangcan, Du Xiaodi, Zhang Lin, Zhuang Xinming, Xiong Zhengrong. 2017. Analysis of the characteristics and exploration

- potential of source rocks in Tacheng Basin[J].China Mining Magazine, 26(2): 162-169(in Chinese with English abstract).
- Sun Jichao, Liu Jingtao. 2008. Bucket Depth Sampler[P]. The People's Republic of China: 200720100866.5 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. Geology in China, 45(6): 1128-1141(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanxin, Su Chunli, Xie Xianjun, Xie Zuoming. 2010. The genesis of high arsenic groundwater: A case study in Datong basin[J]. Geology in China, 37(3):771-780(in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Hao Aibing, Guo Haipeng, Liu Jingtao, Zhang Eryong, Wang Heng, Wang Xinfeng, Wen Xueru, Zhang Cui Guang. 2020. Main progress and prospect for China's hydrogeological survey[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 8(3):195-209.
- Wang Wei, Ma Donghua, Shao Xinglai, Wang Cheng. 2017. Rapid evaluation of ore prospecting target in shallow overburden area[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 65(1):1-3 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaohua. 1994. The formation and distribution of Fe and Mn Elements in the groundwater in the Lower-Middle Reaches area of the Yangze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 3(4):326-329 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Debin, Liu Guodong, Zhong Rui. 2018. Analysis of iron and manganese pollution and environmental health risk assessment of groundwater in Xiaoxinhe gas field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 37(1):70-77(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jun, Peng Feng, Liu Yanan, Wei Yupeng, Liang Le. 2017. The result of applying the regional geochemical method to the East Tianshan Mountains: A case study of the Qingbaishan lead-zinc deposit in Hami area[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 41(1):1-8 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Liang, Kang Weidong, Wang Runlan, Sun Jichao, Liu Jingtao. 2014. Impact of human activities on the groundwater quality in Yulin city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 28(11):54-59(in Chinese with English abstract).
- Zhu Bopeng, Lin Yongquan, Wu Xiaogui. 2016. Analysis of geological characteristics and genetic of Baogutu copper-molybdenum DeposR in Tuoli County, Xinjiang[J]. Geological Review, 62(11): 187-188 (in Chinese with English abstract).
- 胡卫忠. 1987. 新疆塔城盆地地下水资源评价及开发利用[J]. 干旱区地理, 10(2):31-36.
- 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 汪珊, 杜海燕, 刘景涛, 陈玺, 张玉玺, 狄效斌, 支兵发. 2008. 珠江三角洲地区地下水铁锰的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 35(3):531-538.
- GB/T8538-1995. 1996. 饮用天然矿泉水检验方法[S]. 北京:中国标准出版社.
- GB3838-2002. 2002. 地表水质量标准[S]. 北京:中国标准出版社.
- GB/T14848-2017. 2017. 地下水质量标准[S]. 北京:中国标准出版社.
- 蒋宜勤, 高岗, 柳广弟, 王绪龙, 裴立新, 向宝力, 唐勇. 2012. 塔城盆地石炭系烃源岩特征及其生烃潜力[J]. 石油实验地质, 34(4): 427-437.
- 姜义, 张吉库. 2003. 地下水中铁、锰的存在形式及去除技术探讨[J]. 环境保护科学, 115(29):32-34.
- 梁和国. 2014. 我国地下水除铁除锰技术研究进展[J]. 长江大学学报(自然科学版), 11(5):71-74.
- 梁国玲, 孙继朝, 黄冠星, 荆继红, 刘景涛, 陈玺, 张玉玺, 杜海燕. 2009. 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, 36(4):899-906.
- 陆俊泽, 余谦, 白洪海, 周继兵, 闫剑飞, 熊国庆, 熊小辉. 2017. 塔城盆地南缘下二叠统卡拉岗组烃源岩有机地化特征及生烃潜力[J]. 矿物岩石, 37(2): 84-90.
- 孙相灿, 杜小弟, 张林, 庄新明, 熊峥嵘. 2017. 塔城盆地烃源岩特征及勘探潜力分析[J]. 中国矿业, 26(2): 162-169.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 惠玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128-1141.
- 孙继朝, 刘景涛. 2008. 水斗定深取样器[P]. 中华人民共和国: 200720100866.5.
- 王威, 马东华, 邵行来, 王成. 2017. 浅覆盖区矿化异常找矿靶区快速评价—以新疆塔城盆地别斯托别矿化点为例[J]. 新疆有色金属, 65(1):1-3.
- 王焰新, 苏春利, 谢先军, 谢作明. 2010. 大同盆地地下水砷异常及其成因研究[J]. 中国地质, 37(3):771-780.
- 周军, 彭峰, 刘亚楠, 魏宇鹏, 梁乐. 2017. 适用于东天山地区的区域化探工作方法与找矿效果—以新疆哈密市清白山铅锌矿为例[J]. 物探与化探, 41(1):1-8.
- 曾昭华. 1994. 长江中下游地区地下水中铁锰元素的形成及其分布规律[J]. 长江流域资源与环境, 3(4):326-329.
- 朱伯鹏, 林永全, 吴晓贵. 2016. 新疆托里县包古图铜铅矿床地质特征及成因分析[J]. 地质评论, 62(11):187-188.
- 朱亮, 康卫东, 王润兰, 孙继朝, 刘景涛. 2014. 人类活动对榆林地区地下水水质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 28(11):54-59.
- 张德彬, 刘国东, 钟瑞. 2018. 孝新合气田区地下水铁锰污染分析及环境健康风险评估[J]. 灌溉排水学报, 37(1):70-77.

附中文参考文献

胡卫忠. 1987. 新疆塔城盆地地下水资源评价及开发利用[J]. 干旱区