

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.260>



塔里木盆地南缘浅层高碘地下水的分布及成因： 以新疆民丰县平原区为例

孙 英^{1,2}, 周金龙^{1,2*}, 梁 杏³, 周殷竹⁴, 曾妍妍^{1,2}, 林 丽^{1,2}

1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052

2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830052

3. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

4. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051

摘 要: 塔里木盆地位于欧亚大陆腹地, 远离海洋, 地下水是塔里木盆地南缘重要的供水水源, 查明该区浅层地下水中碘(I⁻)的分布及成因至关重要。基于新疆塔里木盆地南缘的民丰县平原区 44 组浅层地下水水样, 综合运用水化学图解法、数理统计法和 GIS 技术, 分析潜水和浅层承压水水化学特征、碘的空间分布及高碘地下水的成因。结果表明: 民丰县平原区浅层地下水中碘的富集和贫乏共存; 潜水和浅层承压水 I⁻ 含量范围分别为 $\leq 730 \mu\text{g/L}$ 和 $\leq 183 \mu\text{g/L}$, 潜水水样中缺碘水、适碘水、高碘水和超高碘水占比分别为 19.4%、69.4%、5.6% 和 5.6%, 浅层承压水水样中缺碘水、适碘水和高碘水占比分别为 12.5%、75.0% 和 12.5%, 潜水中缺碘水和超高碘水均高于承压水。从山前倾斜平原到细土平原, 地下水中 I⁻ 含量呈明显上升趋势。高碘水和超高碘水水化学类型主要为 Cl-SO₄-Na 型和 Cl-Na 型。除水文地质条件和偏碱性的地下水环境外, 研究区潜水碘主要受强烈的蒸发浓缩作用、第四系全新统沼泽堆积物和矿物溶解沉淀的影响, 浅层承压水碘主要受矿物溶解沉淀及还原环境的影响。

关键词: 高碘; 浅层地下水; 因子分析; 聚类分析; 塔里木盆地南缘; 民丰县; 水文地质学。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2021)08-2999-13

收稿日期: 2020-05-25

Distribution and Genesis of Shallow High-Iodine Groundwater in Southern Margin of Tarim Basin: A Case Study of Plain Area in Minfeng County, Xinjiang

Sun Ying^{1,2}, Zhou Jinlong^{1,2*}, Liang Xing³, Zhou Yinzhu⁴, Zeng Yanyan^{1,2}, Lin Li^{1,2}

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China

3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

4. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China

Abstract: Tarim Basin is located in the hinterland of Eurasia, far away from the sea. Groundwater is an important source of water supply in the southern margin of Tarim Basin. Based on the 44 groups of shallow groundwater samples from the plain area of

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42067035); 新疆农业大学水利工程重点学科项目((No. SLXK2019-10); 新疆农业大学研究生科研创新项目((No. XJAUGRI2020006).

作者简介: 孙英(1994-), 女, 博士研究生, 主要从事地下水资源评价与水质演化方面的研究。ORCID: 0000-0002-1737-8726. E-mail: 879986831@qq.com

*** 通讯作者:** 周金龙, ORCID: 0000-0001-5055-0252. E-mail: zjzhoujl@163.com

引用格式: 孙英, 周金龙, 梁杏, 等, 2021. 塔里木盆地南缘浅层高碘地下水的分布及成因: 以新疆民丰县平原区为例. 地球科学, 46(8): 2999-3011.

Minfeng County in the southern margin of Tarim Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, the hydrochemical characteristics of unconfined groundwater and shallow confined groundwater, the spatial distribution of iodine and the causes of the high-iodine groundwater were analyzed by using the hydrochemical graphic method, mathematical statistics method and geographic information system (GIS) techniques. The results show that iodine enrichment and iodine deficiency coexist in groundwater in plain area of Minfeng County. The I^- contents in unconfined groundwater and shallow confined groundwater were $\leq 730 \mu\text{g/L}$ and $\leq 183 \mu\text{g/L}$ respectively. The proportions of iodine deficient water, suitable iodine water, high iodine water and ultra-high iodine water in unconfined groundwater samples were 19.4%, 69.4%, 5.6% and 5.6%, respectively. The proportions of iodine deficient groundwater, suitable iodine water and high iodine water in shallow confined groundwater samples were 12.5%, 75.0% and 12.5%, respectively. From the sloping plain in front of the mountain to the plain in the fine earth, the I^- content in the groundwater increased obviously. The main hydrochemical types of high iodine groundwater and ultra-high iodine groundwater are $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ and Cl-Na . In addition to the hydrogeological conditions and alkaline groundwater environment, iodine content in unconfined groundwater is mainly affected by strong evaporation and concentration, Quaternary Holocene swamp deposits and mineral dissolution precipitation, and the shallow confined groundwater is mainly affected by mineral dissolution precipitation and reduction environment.

Key words: high iodine; shallow groundwater; factor analysis; cluster analysis; southern margin of Tarim Basin; Minfeng County; hydrogeology.

0 引言

碘是人体合成甲状腺激素必需的微量元素,具有重要的健康效应,环境缺碘和高碘均会诱发甲状腺肿等地方病(Teng *et al.*, 2006).在实行全民食盐加碘政策前,我国 29 个省、市、自治区存在碘缺乏现象(滕卫平和滕晓春, 2006),碘缺乏病随着碘摄入量增加得到有效控制的同时,碘过量引起的危害也逐渐凸显;目前,我国现有 13 个省、市、自治区存在高碘区(申红梅, 2019),由水源引起的地方性高碘甲状腺肿最为常见.相关研究表明,饮用高碘水地区的居民甲状腺肿大率均明显高于低碘水区,例如非洲索马里(Kassim *et al.*, 2014),阿尔及利亚廷杜夫的撒哈拉难民营(Barikmo *et al.*, 2011),我国江苏省徐州市(蔡可英和郑昂, 2013)、河南省商丘市(赵海霞等, 2014)、河北省(廊坊、衡水、沧州、邢台和邯郸 5 市)(吕胜敏等, 2007)、山东省滨州市(吕茂军等, 2007)和新疆伊犁地区(崔维江等, 2017)等地.相较于缺碘,水源性高碘对人体的危害更加难以控制.由此可见,高碘地下水成为继高砷、高氟地下水之后又一全球性公共健康和饮水安全问题.

自 1978 年在我国河北省首先发现水源性高碘甲状腺肿以来,许多学者对地下水中高碘的来源进行了分析,认为大气沉积、海水入侵(Voutchkova *et al.*, 2017)、气候类型、地下径流条件、水文地质条件(Tang *et al.*, 2013)、沉积环境、沉积物中有机质的降解(Zhang *et al.*, 2013)、含水层氧化还原条件、铁铝氧化物的还原性溶解(Li *et al.*, 2013)和碱性

条件(Qian *et al.*, 2017)等是造成地下水高碘的原因,碘迁移富集主要受水文地球化学过程和含水层矿物特征的影响(Li *et al.*, 2014).据统计,1982 年新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)因缺碘造成的地方性甲状腺肿患病率极高,有 87.1% 的县域分别属中、重、特重病区(陶振德等, 1990).目前关于新疆高碘地下水的研究较少,陈俊良等(2017)和王红太等(2019)分别对新疆塔城地区和喀什地区地下水中碘的分布及影响因素进行了分析.塔里木盆地是我国西北典型的干旱内陆盆地,研究区位于该盆地南缘,地下水质量总体很差,生态环境十分脆弱(马金珠, 2001);地下水是该区的主要水源,查明地下水中高碘的分布与成因十分必要.

本文结合前人研究成果,共采集民丰县平原区 44 组浅层地下水水样,通过对水样中碘含量分析,结合当地地质和水文地质条件,确定研究区潜水和浅层承压水中缺碘水、适碘水、高碘水和超高碘水的分布情况;查明研究区水文地质环境,分析浅层高碘地下水的成因,可为当地饮水安全和食用加碘盐供应提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

民丰县地处塔克拉玛干沙漠南缘、昆仑山北麓,研究区位于民丰县中部的平原区,坐标为 $82^{\circ}30'\sim 84^{\circ}00'\text{E}$ 、 $36^{\circ}40'\sim 37^{\circ}50'\text{N}$ (图 1).民丰县东临且末县,西连于田县,南越昆仑山接西藏改则县,北

靠阿克苏地区沙雅县.南北长 451 km,东西宽 130 km,总面积为 $5.676 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中昆仑山和沙漠面积之和约为总面积的 93.2%,中部平原面积占全县总面积的 6.8%;南部山区海拔 3 000~4 000 m,山体由北向南呈阶梯状递降,研究区总体地势南高北低,地貌由南部的昆仑山地、北部的冲积扇平原和沙漠三大地形单元构成.民丰县属典型暖温带大陆性干旱气候,四季分明,干旱少雨,年平均气温 11.1°C ,极端高温 41.5°C ,极端低温 -28.3°C ,平原区年降水量 18.1~30.2 mm,年蒸发量 2 756 mm,无霜期 194 d,全年日照 2 842.2 h.民丰县内主要有尼雅河、叶亦克河和安迪尔河等河流(熊黑钢和周哲,2007).

塔里木盆地南部分别与西昆仑和阿尔金山相邻,研究区所在区域构造为民丰凹陷,该凹陷位于东南隆起的西部,北以车尔臣断裂为界,南邻阿尔金山脉,近东西走向,整体形态向北东方向收敛、向西南方向发散.民丰凹陷的烃源岩主要是石炭系浅

海陆棚相碳酸盐岩和侏罗系煤系及湖相泥岩(丁长辉,2008).

研究区第四系水文地质特征主要受第四系地质条件(图2)控制.第四系堆积呈明显的水平分带性,主要有山前倾斜平原(在山前槽状断拗带堆积巨厚的洪积相砾石层)、冲积平原(洪积相粗颗粒沉积逐渐过渡到砂砾与亚砂土互层)和细土平原(冲积层逐渐过渡到冲—湖积相细粒沉积)(曹福祥和朱庆俊,2006),第四纪冲积物巨厚,一般为 500~600 m,最厚可达 900 m(刘敏,2007).

研究区地下水补给主要来自河流、渠系的渗漏补给及田间灌溉水入渗补给等;地下水径流方式主要受地形地势影响,由南至北径流缓慢;地下水排泄方式主要以蒸发、蒸腾和人工开采为主.

1.2 样品采集与测试

在充分收集地质及水文地质资料的基础上,笔者于 2016 年 7 月共采集民丰县平原区浅层地下水水样 44 组(井深为 5~150 m),其中潜水水样 36 组、

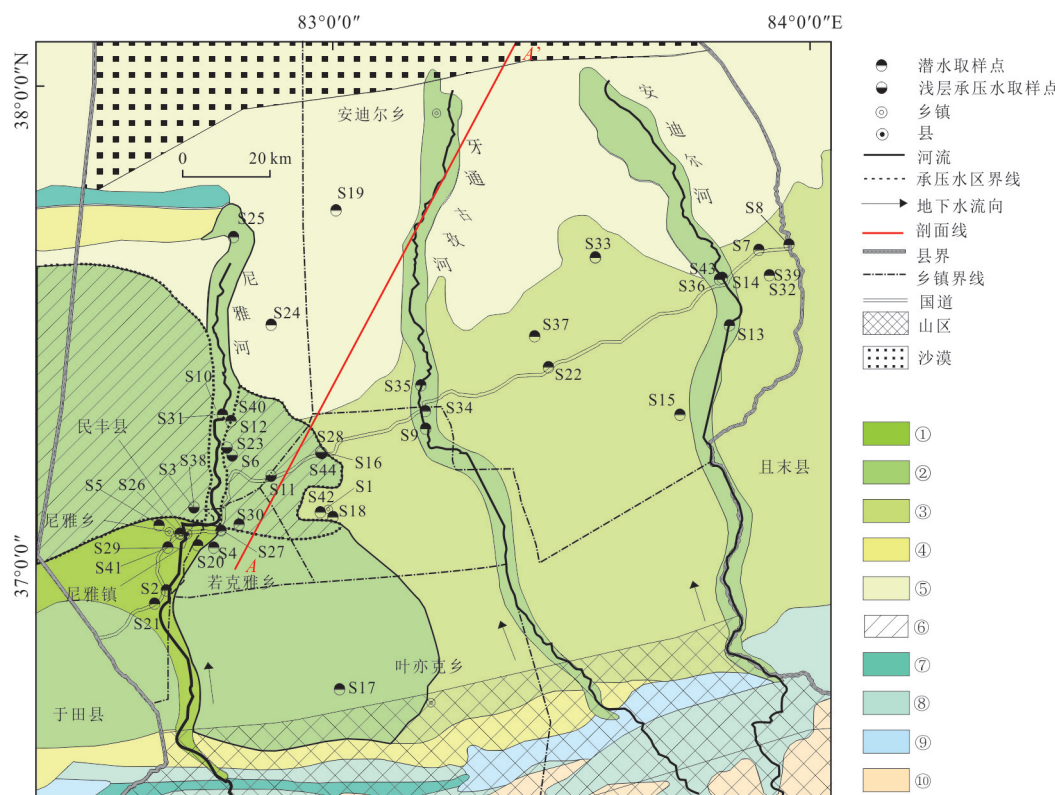


图1 民丰县采样点分布及水文地质图

Fig.1 Distribution of sampling points and hydrogeological diagram of Minfeng County

地下水类型(200 mm管径降深 5 m,涌水量单位为 m^3/d):I. 松散岩类孔隙水潜水,①1 000~5 000 水量丰富,②100~1 000 水量中等,③10~100 水量贫乏,④<10 水量极其贫乏,⑤<250 水量不均匀;II. 松散岩类孔隙水承压水,⑥100~1000 水量中等;III. 碎屑岩类裂隙孔隙水,⑦<10;IV. 基岩裂隙水层状岩类或轻变质岩类裂隙水,⑧10~100;V. 基岩裂隙水块状岩类裂隙水,⑨10~100;⑩冻结层水

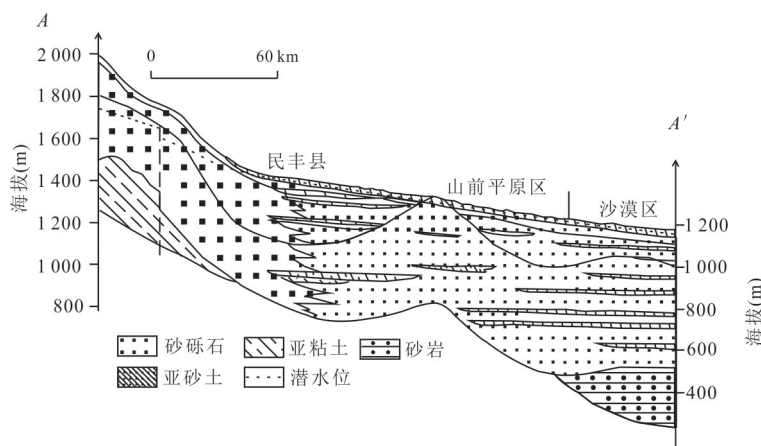


图2 民丰县水文地质剖面图

Fig.2 Hydrogeological profile of Minfeng County

浅层承压水水样 8 组,地下水采样点控制面积约为 4 739.82 km²,采样点位置如图 1 所示.采样严格按照《地下水环境监测技术规范(HJ/T164-2004)》执行,现场采样用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤、去除悬浮物,之后分别加入相应的保护剂,不留气泡盖紧,用封口膜密封,4℃冷藏保存;同时取地下水平行样、空白样,确保水样的可靠性.

水样组分检测由中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成.现场测定 pH 值和氧化还原电位(Eh);K⁺和 Na⁺用电感耦合等离子体发射光谱法测试,Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和总硬度用乙二胺四乙酸二钠滴定法测试,Cl⁻用硝酸银容量法测试,SO₄²⁻用硫酸钡比浊法测试,检出限均为 0.05 mg/L;溶解性总固体(TDS)用干燥—重量法测试,检出限为 0.1 mg/L;I⁻用高浓度碘化物比色法测试,检出限为 20 μg/L;氟(F⁻)用离子选择电极法测试,检出限为 0.1 mg/L;砷(As)用氢化物原子荧光法测试,检出限为 0.001 mg/L;锰(Mn²⁺)用火焰原子吸收分光光度法测试,检出限为 0.025 mg/L.

1.3 数据分析

数据可靠性采用阴阳离子平衡检查(电中性原则),经计算,所有样品离子的电荷平衡误差 < ±5%,分析测试结果可靠.利用 ArcGIS 10.4 绘制地下水采样点分布及水文地质图 and 地下水 I⁻ 含量分布图,确定高碘地下水分布情况;利用 Grapher 软件绘制 Piper 三线图和 Gibbs 图,确定研究区地下水水化学类型和水化学形成机制;利用 SPSS 20 软件进行因子分析、聚类分析,提取研究区潜水和浅层承压水成因的主控因素,确定地下水中化学成分对碘富集的影响.

因子分析是寻找对结果起决定作用的潜在因子的统计分析方法,利用主要因子描述数据集内部结构,实际对数据进行降维;是以主成分为初始因子,通过对载荷阵做方差最大旋转实现的.因子分析的基本模型为(何晓群,2015):

$$\begin{cases} x_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \cdots + a_{1m}F_m + a_1\epsilon_1 \\ x_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \cdots + a_{2m}F_m + a_2\epsilon_2 \\ \vdots \\ x_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \cdots + a_{pm}F_m + a_p\epsilon_p \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_m 为公共因子,即在各个变量中共同出现的因子; a_{ij} 为因子载荷,即第 i 个变量在第 j 个主因子上的负荷,它反映出第 i 个变量在第 j 个主因子上的相对重要性; ϵ_i 为特殊因子; a_i 为特殊因子的载荷.

聚类分析是根据研究对象的特征,按照一定标准对其分类的分析方法,它使组内的数据对象具有最高的相似度,而组间具有较大差异.系统聚类是在样品距离的基础上定义类与类之间的距离,首先将 n 个样品或变量自成一类;然后每次将具有最小距离的两类合并,合并后重新计算类与类之间的距离,将此过程一直持续到所有样品归为一类为止(何晓群,2015);最后把这个过程做成一张聚类谱系图.本文对变量进行系统聚类.

2 结果与分析

2.1 地下水水化学组分及碘含量分布特征

由地下水水化学指标统计分析结果(表 1)可以看出,研究区地下水 pH 值范围为 7.12~8.90,平均值为 8.09,整体呈中性至弱碱性,潜水和浅层承压水 pH 值范围分别为 7.12~8.90 和 7.29~8.48;地下水中阳离子以 Na⁺ 为主,含量为 35.99~13 582.08 mg/

L;其次为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 主, 含量分别为 49.18~14 348.64 mg/L 和 122.70~9 889.67 mg/L. 水样中 TDS 为 351.10~41 282.73 mg/L, 均值为 4 859.18 mg/L. 潜水中淡水 ($\text{TDS}<1\text{ g/L}$) 主要分布在山前倾斜平原 (占总水样 25.0%), 微咸水 ($1\text{ g/L}\leq\text{TDS}<3\text{ g/L}$) 主要分布在地势平缓的冲积平原 (占总水样 52.8%), 咸水 ($3\text{ g/L}\leq\text{TDS}<10\text{ g/L}$) 和盐水 ($10\text{ g/L}\leq\text{TDS}<50\text{ g/L}$) 主要分布在细土平原 (分别占总水样的 11.1% 和 11.1%); 承压含水层中淡水、微咸水、咸水和盐水分别占总水样的 50.0%、12.5%、12.5% 和 25.0%.

根据舒卡列夫分类法对研究区浅层地下水水化学进行分类, 并绘制 Piper 三线图 (图 3), 研究区浅层地下水水化学类型从山前倾斜平原到细土平原具有较明显的水平分带特征, 山前倾斜平原区地下水以 HCO_3^- 及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主; 冲积平原区地下水阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 为主; 细土平原区地下水以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 为主. 潜水水化学类型主要为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型 (38.9%)、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型 (11.1%), 浅层承压水水化学类型主要为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ 型 (25.0%)、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型 (25.0%).

研究区潜水 I^- 含量范围为 $\leq 730\text{ }\mu\text{g/L}$, 浅层承压水 I^- 含量范围为 $\leq 183\text{ }\mu\text{g/L}$, 其中 7 组水样 (潜水 6 组、承压水 1 组) I^- 含量超过 $80\text{ }\mu\text{g/L}$ (《地下水质量

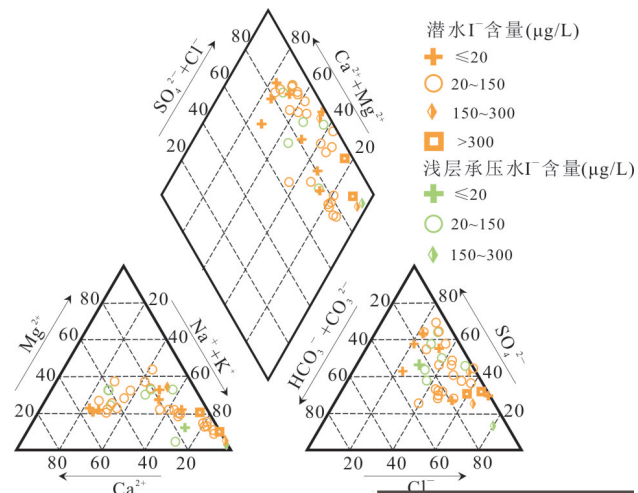


图 3 浅层地下水 Piper 三线图
Fig.3 Piper diagrams of shallow groundwater

标准 (GB/T14848-2017)》中的Ⅲ类水限值), 占总水样 15.9%; 5 组水样 (潜水 4 组、承压水 1 组) I^- 含量超过 $150\text{ }\mu\text{g/L}$ (《水源性高碘地区和地方性高碘甲状腺肿病区的规定 (GB/T19380-2003)》中的国家标准), 占总水样 11.4%. 依据《碘缺乏病 (IDD) 病区划分标准 (GB/T16005-2009)》和《水源性高碘地区和高碘病区的划定 (GB/T19380-2016)》, 将研究区地下水分为缺碘水 ($\leq 20\text{ }\mu\text{g/L}$)、适碘水 ($20\sim 150\text{ }\mu\text{g/L}$)、高碘水 ($150\sim 300\text{ }\mu\text{g/L}$) 和超高碘水 ($> 300\text{ }\mu\text{g/L}$). 潜水水样中缺碘水、适碘水、高碘水和超高碘水占比分别为 19.4%、69.4%、5.6% 和 5.6%, 承压水

表 1 研究区浅层地下水水化学指标统计分析结果
Table 1 Results of statistical analysis on hydrochemical index of shallow groundwater in the study area

指标	潜水 (n=36)				浅层承压水 (n=8)			
	最大值	最小值	均值	中值	最大值	最小值	均值	中值
I ⁻	734.00	ND.	85.94	50.00	183.00	ND.	64.13	50.00
pH	8.90	7.12	8.09	8.21	8.48	7.29	8.09	8.25
TDS	41 282.73	351.10	4 674.16	1 799.98	25 818.17	522.57	5 691.81	1 029.33
TH	6 549.30	156.60	1 037.24	588.55	3 786.30	108.60	1 086.29	521.40
K ⁺	776.41	3.19	74.52	21.21	710.01	8.37	127.96	12.73
Na ⁺	13 582.08	35.99	1 214.60	418.41	8 848.90	65.26	1571.89	136.18
Ca ²⁺	702.10	20.06	140.03	103.37	396.20	25.98	149.98	74.27
Mg ²⁺	1 307.97	15.54	167.03	49.47	690.70	3.66	172.88	51.09
Cl ⁻	14 348.64	49.18	1 531.47	401.41	12 364.63	91.54	2 160.06	190.26
SO ₄ ²⁻	9 889.67	122.70	1 315.89	555.73	3 607.56	177.19	1 256.69	446.18
HCO ₃ ⁻	3 954.03	36.62	415.99	219.30	1 933.05	85.45	460.55	164.88
As	0.09	ND.	0.01	0.01	0.04	ND.	0.01	0.01
F ⁻	23.23	ND.	3.02	1.46	16.20	0.55	3.88	1.82
Mn ²⁺	0.53	ND.	0.08	0.05	1.20	ND.	0.19	0.05

注: ND. 为未检出; I^- 单位为 $\mu\text{g/L}$, 其余单位为 mg/L .

水样中缺碘水、适碘水和高碘水占比分别为 12.5%、75.0% 和 12.5%。潜水中缺碘水和超高碘水占比均高于浅层承压水,表明潜水中碘对人体健康的潜在危险更大。由 Piper 三线图可以看出,高碘水和超高碘水集中落在底部,其水化学类型主要为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型和 Cl-Na 型。

由图 4 可以看出,研究区地下水 I^- 含量空间分布呈明显分带性,从山前倾斜平原到细土平原,从地下水补给带、径流带至蒸发排泄带,地下水中 I^- 含量呈明显上升趋势,潜水中高碘水和超高碘水主要位于平原区东部的排泄区,浅层承压水中高碘水主要位于承压水区边界处(牙通古孜河和尼雅河中部);潜水中低碘水主要位于地下水补给带,个别取样点位于南部的沙漠,其余大部分区域为适碘水。由 I^- 含量与地下水位埋深关系(图 5)可以看出,高碘水和超高碘水主要分布于埋深 $<10\text{ m}$ 的浅层地下水中。

2.2 因子分析结果

选取研究区地下水 12 项指标对潜水和浅层承压水水样进行因子分析,采用主成分分析分别提取出公共因子 3 个(F_1 、 F_2 和 F_3)和 2 个(F_1 和 F_2),利用 Kaiser 正态化最大方差法分别旋转 5 次和 4 次迭代后收敛。提取公共因子累计方差贡献率分别达 89.8% 和 81.4%。潜水中 F_1 、 F_2 和 F_3 贡献率分别为 65.6%、14.2% 和 10.0%,对应的特征值分别为 7.87、1.71 和 1.20,碘在 F_1 、 F_2 和 F_3 中载荷分别为

0.923、0.311 和 0.149;浅层承压水 F_1 和 F_2 贡献率分别为 54.2% 和 27.2%,对应的特征值分别为 6.50、3.26,碘在 F_1 和 F_2 中载荷分别为 0.973 和 0.022,表明 F_1 对碘富集影响较大。

从旋转因子载荷矩阵(表 2)可以看出,潜水 F_1 中因子载荷较高的指标为 HCO_3^- 、 As 、 Na^+ 、 I^- 、TDS、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,且均呈正相关。研究区地下水位埋藏较浅,在强烈的蒸发作用下,溶解度小的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子析出, SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 Cl^- 成为主要成分; HCO_3^- 主要来源于如方解石和白云石等碳酸盐矿物的风化溶解(钱会等,2012);形成地下水高 As 的重要因素之一是以蒸发作用为主的还原环境(王焰新等,2010),因此 F_1 表示为强烈的蒸发浓缩作用。 F_2 中因子载荷较高的指标为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 F^- ,且均呈正相关,地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐类沉积物和含钙镁矿物的风化溶解, F^- 的来源主要是含氟矿物的溶解,因此 F_2 表示为研究区地下水中水岩相互作用(钱会等,2012)。 F_3 中因子载荷较高的指标为 Mn^{2+} 和 pH 值,且 Mn^{2+} 呈负相关,锰氧化物为地下水中锰提供物质来源,弱酸性和强还原环境为沉积物中锰溶解释放提供有利条件(蔡玲等,2019);潜水中 pH 值呈中性至弱碱性,表明地下水中碘较易赋存于偏碱性环境。

与潜水有所不同,浅层承压水 F_1 中因子载荷较高的指标为 HCO_3^- 、 As 、 Na^+ 、 I^- 、TDS 和 Cl^- ,且均呈正相关。 Na^+ 主要来自沉积岩中岩盐及含钠矿物

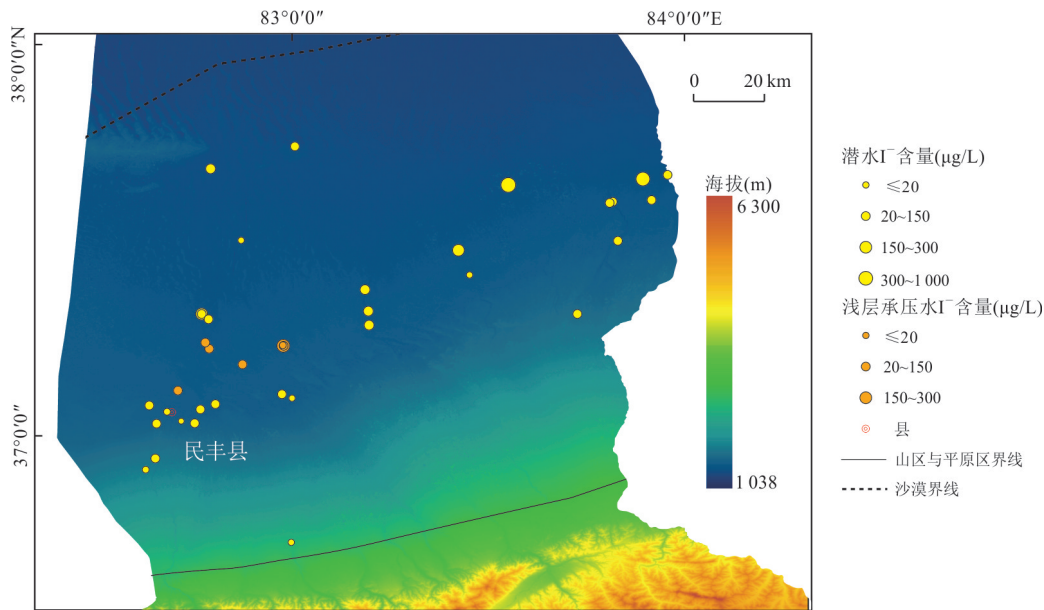


图 4 浅层地下水中 I^- 含量分布
Fig.4 Distribution of I^- content in shallow groundwater

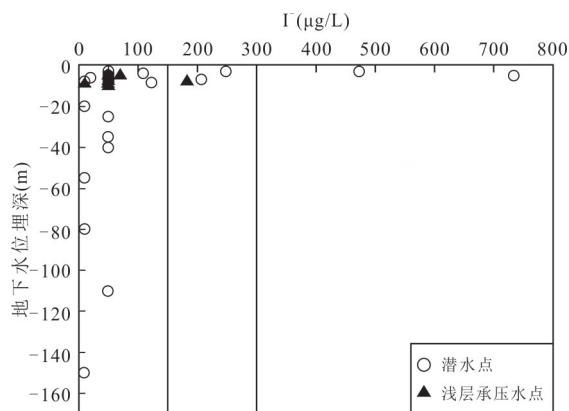
图5 地下水 I^- 含量与地下水位埋深关系Fig.5 Relationship between groundwater I^- content and groundwater depth

表 2 浅层地下水旋转因子载荷矩阵

Table 2 Matrix of rotated factor loadings of shallow groundwater

因子	潜水			承压水	
	F_1	F_2	F_3	F_1	F_2
HCO_3^-	0.974	0.016	0.129	0.989	0.121
As	0.970	0.061	0.035	0.881	0.029
Na^+	0.933	0.311	0.136	0.961	0.184
I^-	0.923	0.311	0.149	0.973	0.022
TDS	0.873	0.464	0.116	0.933	0.331
Cl^-	0.855	0.476	0.140	0.961	0.181
SO_4^{2-}	0.820	0.562	0.066	0.519	0.840
Ca^{2+}	0.014	0.912	-0.195	-0.110	0.766
Mg^{2+}	0.523	0.827	0.042	0.090	0.971
F^-	0.342	0.650	0.276	0.217	0.934
Mn^{2+}	0.074	-0.055	-0.877	0.111	0.120
pH	0.395	-0.067	0.758	0.214	-0.022

的风化溶解, Cl^- 主要来自沉积岩中岩盐及其他氯化物的溶解. F_2 中因子载荷较高的指标为 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 F^- , 且均呈正相关, SO_4^{2-} 主要来自含石膏或其他硫酸盐的沉积岩溶解, 因此浅层承压水中的水岩相互作用是影响 I^- 含量的主要因素.

2.3 聚类分析结果

由聚类分析树状图(图6)可以看出, 当类间距离 < 10 时, 聚类效果较好, 潜水和浅层承压水聚类结果均可分为四类. 潜水第一类: TDS、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 I^- 、 HCO_3^- 、As、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ; 第二类: F^- ; 其余类别依次为 pH 和 Mn^{2+} . 浅层承压水第一类: Na^+ 、 Cl^- 、TDS、 HCO_3^- 、 I^- 和 As; 第二类: Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 F^- 和 Ca^{2+} ; 其余类别依次为 Mn^{2+} 和 pH. 第一类中潜水 I^- 与 TDS、 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 类间距离最小; 浅层承压水 I^- 与 Na^+ 、 Cl^- 、TDS 和 HCO_3^- 类间距离最小, 联系紧密, 其余类别依次与碘的联系逐渐减弱. 该结果与因子分析中公共因子 F_1 结果基本一致.

3 地下水中高碘富集因素分析

3.1 沉积演化特征及水文地质条件的影响

塔里木盆地古生代沉积水为海水、中新生代为淡水, 其间发生多次地表水的浓缩作用. 民丰县所在区域中、新生代构造及断裂活动剧烈, 新生界厚度变化较大. 早侏罗世早期为初始断陷期, 沉积范围扩大, 在民丰凹陷, 部分区域发育冲积扇沉积; 在断拗转换期, 盆地稳定沉降、湖面扩充, 断裂活动由强到弱, 沉积类型由以冲积扇体系为主的沉积转变为湿润、还原环境的扇三角洲—滨浅湖沉积, 民丰凹陷发育扇三角洲—湖泊沉积, 部分区域为半深湖

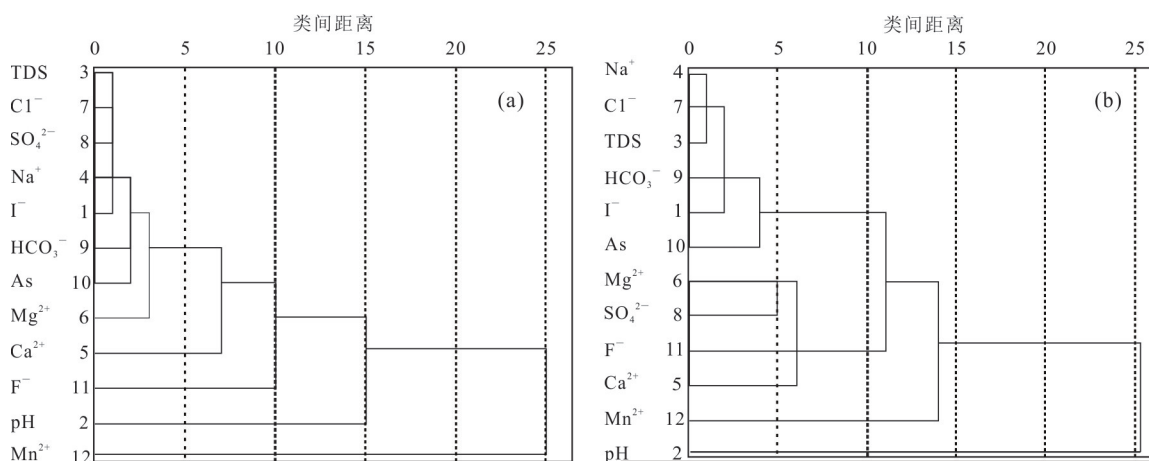


图6 潜水(a)、浅层承压水(b)聚类分析树状图

Fig.6 Parameters clustering analysis of unconfined groundwater (a) and shallow confined groundwater (b)

相沉积;在拗陷期,盆地沉积范围扩大,民丰凹陷发育扇三角洲平原—湖泊环境(陆星宇,2018).在构造运动的影响下,湖相沉积中残留大量碘化物,并影响着地下水中碘的分布.研究区高碘地下水分布地层主要为第四系全新统沼泽堆积物砂、淤泥,部分位于第四系上更新统一全新统化学堆积物盐碱壳和上更新统一全新统泥、砂、砾中;第四系成因类型分别为湖积、化学堆积和风积.因此,地下水中高碘的分布与沉积物密切相关.

由研究区水文地质图和浅层地下水 I⁻ 含量分布图(图 1 和图 4)可以看出,由南部山前倾斜平原向北部细土平原,地下水资源由丰到贫,地下潜水位由深到浅.山区地下水类型主要为裂隙水,平原区为松散岩类孔隙水,水文地质条件受河流影响,水平分带不明显.(1)山前砾质带潜水:山前近河段砾石层中,单井涌水量约 500 m³/d,远河段小于 100 m³/d;砾质带前缘,单位涌水量达 968 m³/(d·m)(降深 1.41 m).(2)细土平原区潜水、承压水:民丰县城以北的粉砂、细粉砂中潜水平单井涌水量为 500~1 500 m³/d;于田—民丰北部间的北民丰隆起以南,在 150 m 的勘探深度内,形成 2 个由亚粘土组成的区域性隔水层,上部为潜水,下部为承压水,中更新统砂层中的承压水顶板深 29~64 m,单位涌水量为 380 m³/(d·m)(降深 15.36 m),局部自流.

山前倾斜平原区为地下水补给区,含水层岩性为砂砾石,地下水水力梯度相对较大(为 1‰~4‰),地下径流作用较强,有利于碘的迁移,为低碘水.冲积平原为地下水径流区,含水层岩性为砂砾

与亚砂土互层,地势较为平缓,水力梯度相对较小(小于 1‰)(李玲等,2018),易形成适碘区.细土平原含水层岩性为粉细砂,地形较为平坦,地下水径流迟缓,地下水水位埋深较浅,蒸发成为地下水的主要排泄方式,使浅层地下水中碘富集.因此,地下水中碘分布受水文地质条件的影响.

3.2 影响碘迁移富集的水文地球化学过程

3.2.1 蒸发浓缩作用 Gibbs(1970)把控制自然水体主要化学组分形成的机制分为蒸发主导型、大气降水主导型和岩石风化主导型,并通过一种半对数坐标图($\gamma\text{Cl}^-/\gamma(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 与 TDS 的关系, $\gamma\text{Na}^+/\gamma(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 与 TDS 的关系)判断区域地下水水化学的形成机制.由图 7 可以看出,绝大多数水样都落在了蒸发主导型区域(右上部),表明研究区潜水水化学形成主要受蒸发控制.

潜水中高碘水(150~300 μg/L)和超高碘水(>300 μg/L)水样 TDS 最大值为 41 282.73 mg/L,最小值为 16 851.83 mg/L,均为盐水; $\gamma\text{Cl}^-/\gamma(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 最大值为 0.95,最小值为 0.65; $\gamma\text{Na}^+/\gamma(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 最大值为 0.99,最小值为 0.80,表明潜水中高碘水和超高碘水受蒸发控制作用明显.研究区地下水位较高,地下水蒸发强烈,蒸发作用仅排走水分,盐分仍保留在地下水中,水中各种组分在蒸发过程中不断浓缩,浓度不断增加,导致表层土壤盐渍化严重,潜水中碘浓度也随之增加.因此,潜水中碘富集受蒸发浓缩作用影响较大,这与因子分析结果中公因子 F₁代表的蒸发浓缩作用一致.

3.2.2 岩石风化作用 水岩作用是岩石与水接触

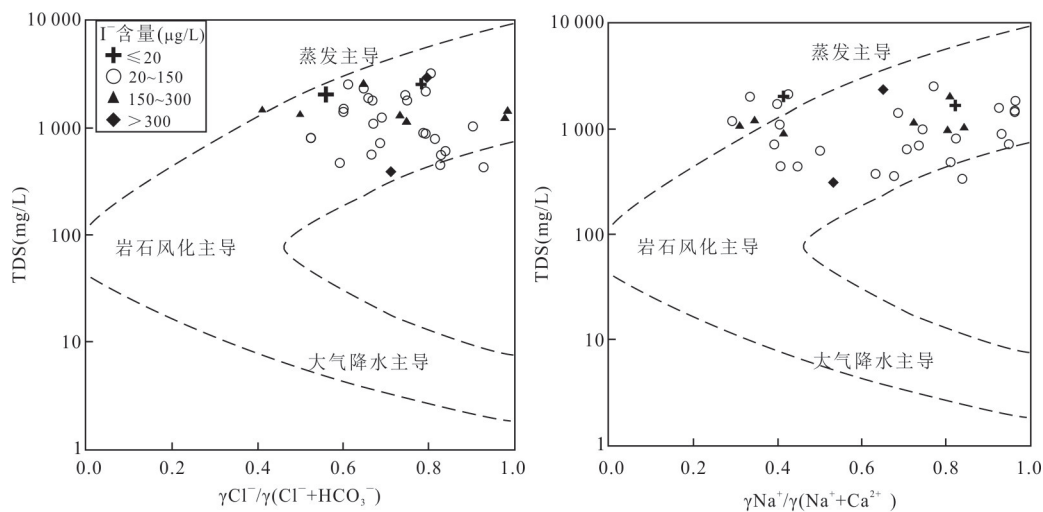


图 7 潜水 Gibbs 图

Fig.7 Gibbs map of unconfined groundwater

后发生的一种常见的化学风化作用,水岩作用对地下水化学成分的影响主要表现在矿物的溶解沉淀上.矿物在地下水中是溶解还是沉淀主要与其相对水溶液的饱和程度来决定(钱会等,2012).在对水溶组分的平衡分布进行计算的基础上,计算地下水相对岩盐、方解石、白云石、石膏和萤石的饱和指数:

$$SI = \lg \frac{IAP}{K}, \quad (2)$$

式中, SI 为水溶液相对矿物的饱和指数; IAP 为水溶液中相关离子的活度积; K 为矿物溶解反应的平衡常数.当 $SI > 0$ 时,水溶液相对矿物是过饱和的,将发生矿物的沉淀作用;当 $SI < 0$ 时,水溶液相对矿物未饱和,矿物将发生溶解作用;当 $SI = 0$ 时,水溶液相对矿物处于平衡状态.

由地下水相对岩盐、方解石、白云石、石膏和萤石的饱和指数与TDS的关系(图8)可以看出,研究区绝大多数潜水相对于方解石(94.4%)和白云石(97.2%)均处于相对饱和状态($SI_{\text{方解石}} > 0$ 、 $SI_{\text{白云石}} > 0$),相对于岩盐(100%)和大部分石膏(94.4%)、萤石(83.3%)均处于非饱和状态($SI_{\text{岩盐}} < 0$ 、 $SI_{\text{石膏}} < 0$ 、 $SI_{\text{萤石}} < 0$);浅层承压水相对于方解石(100%)和多数白云石(87.5%)均处于相对饱和状态($SI_{\text{方解石}} > 0$ 、 $SI_{\text{白云石}} > 0$),相对于岩盐(100%)、石膏(100%)和萤石(100%)均处于非饱和状态($SI_{\text{岩盐}} < 0$ 、 $SI_{\text{石膏}} < 0$ 、 $SI_{\text{萤石}} < 0$).随着TDS增大,岩盐的饱和指数有所增大,表明岩盐在不断溶解;潜水和浅层承压水中发生方解石和白云石的沉淀作用,以及石膏和岩盐的溶解作用;潜水大部分区域发生萤石溶解、局部区域为沉淀,浅层承压水中萤石均为溶解状态.方解石、白云石类碳酸盐为浅层地下水中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 提供来源,石膏沉积物和岩盐溶解分别为浅层地下水中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 、 Na^+ 提供来源,地下水中 F^- 主要来源于含氟矿物的溶解(钱会等,2012).

3.3 pH值和Eh

pH值是影响地下水中碘富集的一个重要因素(Li *et al.*, 2014).在弱碱性条件下,胶体和铁锰氧化物矿物表面带更多的负电荷,导致其对碘离子吸附性能降低,增强了碘的解吸作用,促进了碘从沉积物向地下水迁移富集(Li *et al.*, 2013).由研究区浅层地下水中碘与pH的关系(图9a)可以看出,潜水中高碘水和超高碘水均呈碱性(pH为8.25~8.90,均值8.58),承压水中高碘水pH值为8.18,表明偏碱性的地下水环境有利于碘的迁移和富集.

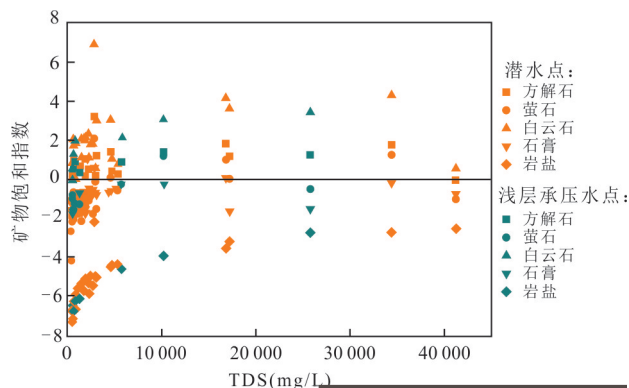


图8 浅层地下水中矿物相的饱和指数与TDS的关系

Fig.8 The relationship between the saturation index of mineral phase and TDS in shallow groundwater

Eh是表征水系统氧化还原状态的指标(钱会等,2012),本次水样检测数据较少(只有12个),研究区潜水和浅层承压水Eh范围分别为18.0~214.0 mV和25.0~68.0 mV,潜水为氧化状态,浅层承压水为弱还原状态.由浅层地下水中 I^- 含量与Eh的关系(图9b)可以看出,潜水和浅层承压水 I^- 含量与Eh整体呈负相关关系,12个水样大部分属于低碘水(75.0%),个别水样属于适碘水(25.0%).在氧化条件下,取样点主要位于含水介质以砂砾石为主的补给区和径流区,地下水循环在垂直方向和水平方向上较活跃,碘化物易随地下水迁移;在弱还原条件下,取样点均位于含水介质以粉细砂为主的排泄区,沉积物中粘土吸附碘的能力较强,有利于碘的富集;因此,Eh是影响地下水碘富集的重要环境因素.

3.4 离子来源的相关性分析

根据地下水中 I^- 与TDS、 HCO_3^- 、 Mn^{2+} 、As和 F^- 含量的关系(图10),进一步确定 I^- 与地下水环境中各指标之间的联系或共存性.潜水、浅层承压水碘与TDS和 HCO_3^- 呈显著性正相关,与 Mn^{2+} 呈负相关.

研究区为典型的内陆干旱区,岩性主要为颗粒细小的粉细砂,地势低,地下水位埋深较浅,发源于昆仑山北坡的河流源源不断地带来盐分,使地下水及土壤累积盐分,TDS不断增大,低洼地区的表层土壤盐渍化加剧了浅层地下水中碘浓度升高.

土壤中 I^- 含量与有机质含量直接相关(薛肖斌等,2018;王雨婷等,2021),在偏还原的地下水环境中,沉积物中有机质通过微生物降解作用最终以 HCO_3^- 为主要形式存在,有机质分解过程中与 I^- 竞

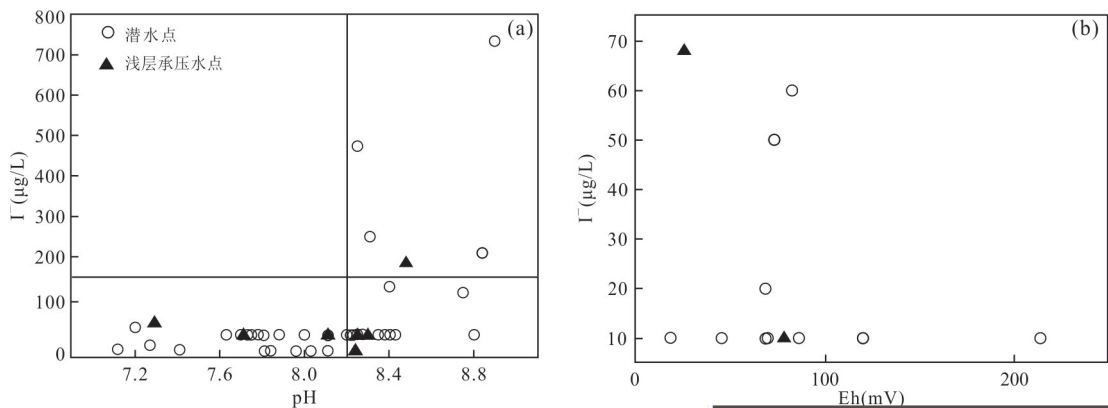


图 9 浅层地下水中 I⁻ 含量与 pH(a)、Eh(b) 的关系

Fig.9 The relationship between I⁻ content and pH(a) and Eh(b) of shallow groundwater

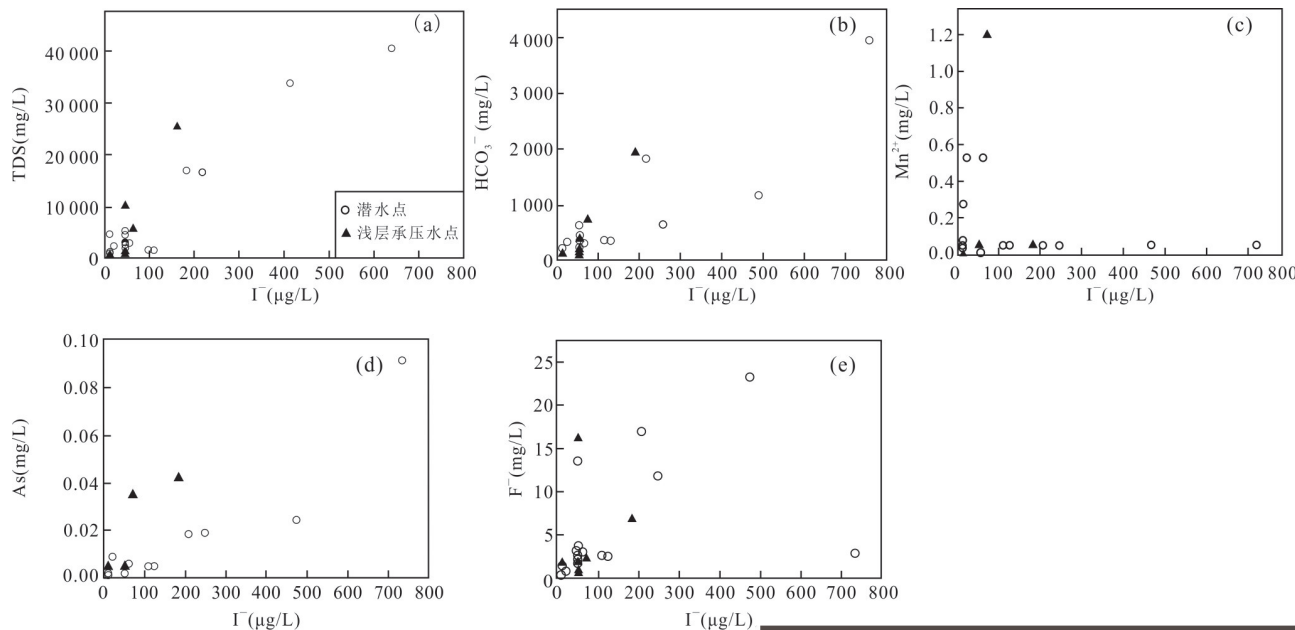


图 10 地下水 I⁻ 含量与 TDS(a)、HCO₃⁻ (b)、Mn²⁺ (c)、As(d) 和 F⁻ (e) 的关系

Fig.10 Correlation between I⁻ content and TDS (a), HCO₃⁻ (b), Mn²⁺ (c), As (d) and F⁻ (e) in groundwater

相吸附作用,使 I⁻ 随着有机物的分解释放到地下水中,地下水中 I⁻ 含量随有机质以及 HCO₃⁻ 含量升高而升高。

锰氧化物在还原条件下发生还原性溶解,导致矿物中的锰释放进入地下水(蔡玲等,2019),潜水和浅层承压水中 Mn²⁺ 含量范围分别为 ≤0.53、≤1.20 mg/L,在浅层承压水中的还原环境下,粘土矿物/铁锰氧化物还原性溶解,使吸附在铁锰氧化物上的碘从固相迁移至液相,地下水中 I⁻ 含量增加。周期性地表灌溉促使地下水发生垂向混合,使浅层地下水由亚还原状态变为氧化状态(Li *et al.*, 2016),影响碘在地下水中的迁移。

研究区地下水 I⁻ 含量与 As 呈显著正相关,与 F⁻ 的相关性相对较弱。水文地球化学作用、pH 值、浅层地下水微生物作用等均是高 As 地下水形成的主要因素(高存荣等,2014),研究区 As 超标的取样点数为 6 个(超标率为 13.6%),其中 5 个取样点为高碘水和超高碘水(占 As 超标点数的 83.3%),As 和 I⁻ 在地下水中可能有相同的来源或形成作用。水文地球化学过程和地质因素控制氟化物的来源和分布(吴初等,2018),研究区地下水中 F⁻ 超标的取样点数为 24 个(超标率为 56.8%),其中包含 I⁻ 含量 > 80 μg/L 的 7 个水样;因此,地下水中 F⁻ 和 I⁻ 可能有相同的形成作用。

4 结论

(1)位于新疆塔里木盆地南缘的民丰县平原区潜水 I^- 含量范围为 $\leq 730 \mu\text{g/L}$,浅层承压水 I^- 含量范围为 $\leq 183 \mu\text{g/L}$,其中16.7%的潜水和12.5%的浅层承压水水样 I^- 含量超过《地下水质量标准(GB/T14848-2017)》中Ⅲ类水限值($80 \mu\text{g/L}$),11.1%的潜水和12.5%的浅层承压水水样 I^- 含量超过《水源性高碘地区和地方性高碘甲状腺肿病区的规定(GB/T19380-2003)》中的国家标准($150 \mu\text{g/L}$)。

(2)潜水水样中缺碘水、适碘水、高碘水和超高碘水占比分别为19.4%、69.4%、5.6%和5.6%,浅层承压水水样中缺碘水、适碘水和高碘水占比分别为12.5%、75.0%和12.5%,潜水中缺碘水和超高碘水占比均高于浅层承压水。

(3)地下水中碘含量的空间分布呈现明显的分带性,从山前倾斜平原到细土平原,从地下水补给带到蒸发排泄带,地下水中碘含量呈明显上升趋势。高碘水和超高碘水的水化学类型主要为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型和 Cl-Na 型。

(4)除水文地质条件和偏碱性的地下水环境外,研究区潜水碘主要受强烈的蒸发浓缩作用、第四系全新统沼泽堆积物和矿物溶解沉淀的影响,浅层承压水主要受矿物溶解沉淀及还原环境的影响。

References

Barikmo, I., Henjum, S., Dahl, L., et al., 2011. Environmental Implication of Iodine in Water, Milk and Other Foods Used in Saharawi Refugees Camps in Tindouf, Algeria. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24 (4-5): 637-641. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.10.003>

Cai, K.Y., Zheng, A., 2013. Study on the Prevalence of Hypothyroidism during Early Pregnant Women in Excess and Sufficient Water Iodine Area in Xuzhou. *Journal of Frontiers of Medicine*, (11): 63-64 (in Chinese with English abstract).

Cai, L., Hu, C., Chen, Z.H., et al., 2019. Distribution and Genesis of High Fe and Mn Groundwater in the Northeast of the Jiangnan Plain. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(4): 18-25 (in Chinese with English abstract).

Cao, F.X., Zhu, Q.J., 2006. Application Effect of EH-4 System in Groundwater Exploration in the Southern Edge of Tarim Basin. *Site Investigation Science and*

Technology, (5): 61-64 (in Chinese with English abstract).

Chen, J.L., Yang, H.X., Liu, W., 2017. Study on the Total Iodine and Iodine Speciation Characteristics in Xilingol League, Inner Mongolia and Tacheng Xinjiang High Iodine Area by High Performance Liquid Chromatography Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6):631-640 (in Chinese with English abstract).

Cui, W.J., Meng, L., Yu, J., 2017. Investigation Analysis of Iodine Deficiency and Iodine Nutrition Related Thyroid Disease in Lili. *Xinjiang Medical Journal*, 47(6): 627-629 (in Chinese with English abstract).

Ding, C.H., 2008. The Structurally Feature and Petroleum Geologic Evaluation in the Southeast Region of Tarim Basin (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).

Gao, C.R., Liu, W.B., Feng, C.E., et al., 2014. Research on the Formation Mechanism of High Arsenic Groundwater in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study of Hetao Plain in Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontiers*, 21(4): 13-29 (in Chinese with English abstract).

Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, 170(3962): 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.172.3985.870>

He, X.Q., 2015. Meta-Statistical Analysis. China Renmin University Press, Beijing (in Chinese).

Kassim, I. A. R., Moloney, G., Busili, A., et al., 2014. Iodine Intake in Somalia is Excessive and Associated with the Source of Household Drinking Water. *The Journal of Nutrition*, 144(3): 375-381. <https://doi.org/10.3945/jn.113.176693>

Li, J. X., Wang, Y. X., Guo, W., et al., 2014. Iodine Mobilization in Groundwater System at Datong Basin, China: Evidence from Hydrochemistry and Fluorescence Characteristics. *Science of the Total Environment*, 468-469: 738-745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.092>

Li, J. X., Wang, Y. X., Xie, X. J., et al., 2013. Hydrogeochemistry of High Iodine Groundwater: A Case Study at the Datong Basin, Northern China. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(4): 848-859. <https://doi.org/10.1039/c3em30841c>

Li, J. X., Wang, Y. X., Xie, X. J., et al., 2016. Effects of Water-Sediment Interaction and Irrigation Practices on Iodine Enrichment in Shallow Groundwater. *Journal of Hydrology*, 543: 293-304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.011>

- jhydrol.2016.10.002
- Li, L., Zhou, J.L., Qi, W.Q., et al., 2018. Hydrochemical Characteristics and Formation Reasons of Shallow Groundwater in Oasis Area of Hotan River Basin, Xinjiang. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 29(3): 14–20 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M., 2007. Study on Groundwater Spatiotemporal Distribution Law and Its Environmental Effects in Hotan Oasis (Dissertation). Xi'an University of Technology, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Lu, X.Y., 2018. The Main Control Factors Coal Accumulation and Favorable Area Selection of Middle and Lower Jurassic in Southeastern Xinjiang (Dissertation). Xinjiang University, Urumqi (in Chinese with English abstract).
- Lü, M.J., Ren, J.F., Wang, M.J., 2007. Investigation on Goiter in Children Aged 8–10 Years in High Iodide Areas in Binzhou, Shandong. *Journal of Environment and Health*, 24(8): 614–615 (in Chinese with English abstract).
- Lü, S.M., Xu, D., Zhong, Z.S., et al., 2007. Research on Factors Affecting Children's Iodine Nutrition and Thyroid Goiter in Iodine Excessive Regions. *Chinese Journal of Control of Endemic Diseases*, 22(2): 136–138 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J.Z., 2001. Groundwater Vulnerability Assessment for the South Rim of Tarim Basin. *Journal of Desert Research*, 21(2): 170–174 (in Chinese with English abstract).
- Qian, H., Ma, Z.Y., Li, P.Y., 2012. Hydrogeochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Qian, K., Li, J.X., Xie, X.J., et al., 2017. Organic and Inorganic Colloids Impacting Total Iodine Behavior in Groundwater from the Datong Basin, China. *Science of the Total Environment*, 601–602: 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.127>
- Shen, H.M., 2019. Prevention and Practice of Water-Based High Iodine Hazard in China. People's Medical Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Tang, Q.F., Xu, Q., Zhang, F.C., et al., 2013. Geochemistry of Iodine-Rich Groundwater in the Taiyuan Basin of Central Shanxi Province, North China. *Journal of Geochemical Exploration*, 135: 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.019>
- Tao, Z.D., 1990. The Endemic of Xinjiang and the Concerned Hydrogeochemistry. *Arid Environmental Monitoring*, 4(2): 89–91, 83 (in Chinese with English abstract).
- Teng, W.P., Shan, Z.Y., Teng, X.C., et al., 2006. Effect of Iodine Intake on Thyroid Diseases in China. *The New England Journal of Medicine*, 354(26): 2783–2793. <https://doi.org/10.1056/nejmoa054022>
- Teng, W.P., Teng, X.C., 2006. Research Progress of Iodine and Thyroid Disease. *Chinese Journal of Practical Internal Medicine*, 26(20):1569–1573 (in Chinese).
- Voutchkova, D. D., Ernstsens, V., Kristiansen, S. M., et al., 2017. Iodine in Major Danish Aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 76(13): 447–463. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6775-6>
- Wang, H.T., Zhou, J.L., Zeng, Y.Y., et al., 2019. Spatial Distribution and Enrichment Factors of Iodine in Drinking Groundwater in Kashgar Prefecture of Xinjiang. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 42(2): 145–150 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.T., Li, J.X., Xue, X.B., et al., 2021. Similarities and Differences of Main Controlling Factors of Natural High Iodine Groundwater between North China Plain and Datong Basin. *Earth Science*, 46(1): 308–320 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.X., Su, C.L., Xie, X.J., et al., 2010. The Genesis of High Arsenic Groundwater: A Case Study in Datong Basin. *Geology in China*, 37(3): 771–780 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C., Wu, X., Zhang, Y.S., et al., 2018. Distribution Characteristics and Genesis of High-Fluoride Groundwater in the Niuxin Mountain, Qinhuangdao. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 307–315 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, H.G., Zhou, Z., 2007. The Selection and Practice of Eco-Environment Index in Typical Arid Region's PRED System—Take the Minfeng County in Xinjiang for Example. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 21(8): 2–6 (in Chinese with English abstract).
- Xue, X.B., Li, J.X., Qian, K., et al., 2018. Spatial Distribution and Mobilization of Iodine in Groundwater System of North China Plain: Taking Hydrogeological Section from Shijiazhuang, Hengshui to Cangzhou as an Example. *Earth Science*, 43(3): 910–921 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, E.Y., Wang, Y.Y., Qian, Y., et al., 2013. Iodine in Groundwater of the North China Plain: Spatial Patterns and Hydrogeochemical Processes of Enrichment. *Journal of Geochemical Exploration*, 135: 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.11.016>
- Zhao, H.X., Xu, C.H., Chen, G.S., et al., 2014. Investigation and Analysis of Iodine Content Distribution and

Condition of Drinking Water in Shangqiu City. *Contemporary Medicine*, 20(5): 162—163 (in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡可英,郑昂,2013.徐州高碘及碘适宜地区妊娠早期妇女甲状腺功能减退症发病率的调查.医药前沿,(11):63—64.
- 蔡玲,胡成,陈植华,等,2019.江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律.水文地质工程地质,46(4):18—25.
- 曹福祥,朱庆俊,2006.塔里木盆地南缘地下水勘查EH-4系统应用效果.勘察科学技术,(5):61—64.
- 陈俊良,杨红霞,刘崴,2017.高效液相色谱—电感耦合等离子体质谱法测定内蒙古锡盟和新疆塔城高碘地区地下水的总碘及碘形态特征.岩矿测试,36(6):631—640.
- 崔维江,孟柳,郁进,2017.新疆伊犁碘缺乏区及碘充足区相关甲状腺疾病调查分析.新疆医学,47(6):627—629.
- 丁长辉,2008.塔里木盆地塔东南地区构造特征与石油地质条件评价(硕士学位论文).长春:吉林大学.
- 高存荣,刘文波,冯翠娥,等,2014.干旱、半干旱地区高碘地下水形成机理研究:以中国内蒙古河套平原为例.地学前缘,21(4):13—29.
- 何晓群,2015.多元统计分析.北京:中国人民大学出版社.
- 李玲,周金龙,齐万秋,等,2018.新疆和田河流域绿洲区浅层地下水水化学特征及成因分析.水资源与水工程学报,29(3):14—20.
- 刘敏,2007.和田绿洲地下水时空分布规律及其生态环境效应研究(硕士学位论文).西安:西安理工大学.
- 陆星宇,2018.新疆东南部中—下侏罗统聚煤主控因素分析与有利区优选(博士学位论文).乌鲁木齐:新疆大学.
- 吕茂军,任金凤,王孟杰,2007.2004年滨州市高碘地区8~10岁儿童的甲状腺肿大情况和尿碘水平.环境与健康杂志,24(8):614—615.

- 吕胜敏,徐栋,种振水,等,2007.高碘地区儿童碘营养甲状腺肿影响因素的研究.中国地方病防治杂志,22(2):136—138.
- 马金珠,2001.塔里木盆地南缘地下水脆弱性评价.中国沙漠,21(2):170—174.
- 钱会,马致远,李培月,2012.水文地球化学.北京:地质出版社.
- 申红梅,2019.中国水源型高碘危害防治与实践.北京:人民卫生出版社.
- 陶振德,1990.新疆地方病及相关水文地球化学.干旱环境监测,4(2):89—91,83.
- 滕卫平,滕晓春,2006.碘与甲状腺疾病的研究进展.中国实用内科杂志,26(20):1569—1573.
- 王红太,周金龙,曾妍妍,等,2019.新疆喀什地区饮用地下水碘分布及其富集因素分析.新疆农业大学学报,42(2):145—150.
- 王雨婷,李俊霞,薛肖斌,等,2021.华北平原与大同盆地原生高碘地下水赋存主控因素的异同.地球科学,46(1):308—320.
- 王焰新,苏春利,谢先军,等,2010.大同盆地地下水神异常及其成因研究.中国地质,37(3):771—780.
- 吴初,武雄,张艳帅,等,2018.秦皇岛牛心山高氟地下水分布特征及成因.地学前缘,25(4):307—315.
- 熊黑钢,周哲,2007.典型干旱区PRED系统生态环境指标的选择与实践——以新疆民丰县为例.干旱区资源与环境,21(8):2—6.
- 薛肖斌,李俊霞,钱坤,等,2018.华北平原原生富碘地下水系统中碘的迁移富集规律:以石家庄—衡水—沧州剖面为例.地球科学,43(3):910—921.
- 赵海霞,徐春华,陈观升,等,2014.商丘市生活饮用水碘含量分布及病情调查分析.当代医学,20(5):162—163.