

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019042801

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.

CHEN Jinsong, ZHOU Jinlong, CHEN Yunfei, et al. Spatial distribution and enrichment factors of groundwater fluoride in Kashgar Region, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(7): 1800-1808.

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*

陈劲松^{1,2} 周金龙^{1,2**} 陈云飞^{1,2} 张 杰^{1,2} 魏 兴^{1,2} 范 薇^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐, 830052; 2. 新疆水文资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐, 830052)

摘 要 高氟地下水严重影响当地居民的身体健康. 基于新疆喀什地区 571 个地下水样的氟离子实测含量, 运用 Mapgis 软件绘制研究区地下水氟含量分布图, 结果表明, 研究区地下水氟含量呈西部、北部高于东部、南部, 中部最低的特点; 山麓斜坡冲洪积砾质平原区氟含量表现为浅层潜水高于深层潜水, 中下游河流冲积平原区地下水氟含量表现为潜水>浅层承压水>深层承压水. 采用绘制 Gibbs 图、Piper 三线图、离子比例图等方法对研究区水化学环境特征及地下水氟的富集因素进行研究, 结果表明, 研究区地下水氟源于山前含氟基岩; 受地下水径流条件影响, 研究区地下水氟含量平均值表现为中下游河流冲积平原区>山麓斜坡冲洪积砾质平原区; 蒸发浓缩作用使 F⁻ 浓度进一步增大; 研究区高氟地下水水化学类型主要为 HCO₃-Na 和 Cl·SO₄-Na 型, 地下水弱碱性环境有助于 F⁻ 的富集.

关键词 喀什地区, 高氟地下水, 分布特征, 蒸发浓缩, 碱性环境.

Spatial distribution and enrichment factors of groundwater fluoride in Kashgar Region, Xinjiang

CHEN Jinsong^{1,2} ZHOU Jinlong^{1,2**} CHEN Yunfei^{1,2} ZHANG Jie^{1,2}
WEI Xing^{1,2} FAN Wei^{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)

Abstract: High-fluoride groundwater seriously affects the health of local residents. Based on the measured concentration of fluoride in 571 groundwater samples, the distribution of groundwater fluoride in the study area was mapped using the Mapgis software. The results showed that the fluoride concentration in groundwater in the west and north was higher than in the east and south, and the middle area was the lowest of the study area. The fluoride concentration in shallow unconfined groundwater was higher than that in deep unconfined groundwater in piedmont slope alluvial gravel plain area. The fluoride concentration of groundwater in alluvial plain area of middle and lower reaches was manifested as unconfined groundwater > shallow confined groundwater > deep confined groundwater. The Gibbs diagram, Piper trilinear diagram, and ion ratio diagrams were used to study the hydrochemical environment characteristics and the enrichment factors of groundwater fluoride. The results showed that the groundwater fluoride was originated from fluoride-containing bedrock in

2019 年 4 月 28 日收稿 (Received: April 28, 2019).

* 国家自然科学基金 (41662016) 和新疆自治区“十三五”重点学科建设-水利工程学科基金 (xjslgcgfk20161103) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41662016) and Xinjiang Autonomous Region “13th Five-Year” Key Discipline Construction-Water Conservancy Engineering Discipline Fund Project (xjslgcgfk20161103).

** 通讯联系人, Tel: 15299181811, E-mail: zjzhoujl@163.com

Corresponding author, Tel: 15299181811, E-mail: zjzhoujl@163.com

the piedmont. Affected by the groundwater runoff conditions, the average fluoride concentration of groundwater in alluvial plain area of middle and lower reaches was larger than that in the piedmont slope alluvial gravel plain area. Evaporation and concentration increase fluoride concentration further. The hydrochemical types of high-fluoride groundwater were mainly $\text{HCO}_3\text{-Na}$ and $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$, and the groundwater weak alkaline environment contributed to the enrichment of fluoride.

Keywords: Kashgar Region, high-fluoride groundwater, distribution characteristics, evaporation and concentration, the alkaline environment.

氟是人体必需的微量元素之一,适量的氟有利于加速骨骼的形成,增强牙齿抗龋的能力^[1].缺氟会影响铁的吸收利用,导致贫血,从而对机体构成危害^[2],但长期摄入过量的含氟地下水易患氟斑病和氟骨症.一旦高氟地下水作为主要的供水水源时,氟含量超标将直接危害人体健康^[3].因此,我国《地下水质量标准》(GB/T1484—2017)和《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)中规定,居民生活用水氟含量最大值均为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[4].中国东北地区、华北地区、西北地区以及印度与非洲地区均出现因饮用高氟水而导致人体中毒^[5].新疆喀什地区位于中国西北地区,地氟病在喀什盖孜河流域、叶尔羌河流域以及克孜河流域均有检出^[6-7].地下水氟含量超标将直接影响当地居民的身体健康^[8].因此,查明当地地下水氟含量超标区域分布及其富集因素,对于喀什地区饮水安全和地下水资源开发利用具有重要的现实意义^[9].栾凤娇等分别对焉耆盆地平原区、若羌—且末地区和叶尔羌流域平原区地下水氟进行研究,阐述了高氟地下水的分布特征及其富集因素^[10];李玲等对和田河流域绿洲地下水中氟的分布特征及形成过程进行了研究,发现研究区地下水中的氟主要来源是含水层介质中大量的含氟矿物^[11];李巧等对阿克苏地区高氟地下水化学特征进行了分析,结果表明,地下水的水化学类型对 F^- 质量浓度有影响,高氟地下水的水化学类型一般为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型或 Cl-Na 型^[12];纳麦提·托合提等对克里雅河流域水中氟离子的空间分布特征进行了研究分析,发现上游至下游,河水中 F^- 整体呈逐渐上升趋势^[13].虽然已有学者对喀什地区地下水水质进行了大量的研究,但是目前针对该研究区高氟地下水的研究还有待进一步深化.因此,在前人研究成果的基础上,本文对喀什地区地下水氟的空间分布及富集因素进行了研究,以期对喀什地区饮用水安全提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

喀什地区位于新疆西南部,东南与和田地区的皮山县相连,西北与克孜勒苏柯尔克孜自治州的阿图什市、乌恰县和阿克陶县相接壤,东抵塔克拉玛干大沙漠,东北与阿克苏地区的柯坪县、阿瓦提县相接^[14].全地区总面积 $16.2\times 10^4\text{ km}^2$,东西宽约 750 km,南北长 535 km,西、南、北三面环山,三角洲半封闭盆地镶嵌于环山之中,地势西高东低,地处东经 $75^\circ 00'\text{—}80^\circ 00'$ 、北纬 $37^\circ 20'\text{—}40^\circ 20'$ 之间(见图 1).

喀什地区光照充足,降水稀少,地表蒸发强烈,四季分明,春夏多大风、沙暴、浮尘天气,冬无严寒,并且长时间处于低温期.研究区多年平均降水 65 mm,年蒸发量高达 2100 mm,属暖温带大陆性干旱气候^[15].

喀什地区山区至平原区垂直分带明显,靠近平原区一带低山区岩层主要以灰岩、泥岩、砾岩、砂岩为主,平原区地层主要为第四系堆积物,由卵砾石、砂砾石、中粗砂、中细砂、粉砂土、黏土等组成.山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区沿西、南、北三面山前分布,中下游则为河流冲积平原区^[16-18].

喀什地区的水资源总量为 93.33 亿 m^3 ,其中地下水总量 5.62 亿 m^3 ,地表水总量 87.71 亿 m^3 ^[19],属于地下水水量较丰富的地区.地下水通过地表水、降水入渗及山前侧渗等方式进行补给.中下游河流冲积平原地势平坦,水平方向上受上游的侧向补给,垂直方向上通过地表径流入渗、灌溉入渗、水库等地表水入渗等方式进行补充.冲积平原中下部水平运动迟缓,受人类活动影响较大,补给以及排泄以垂直方向为主,同时侧向流入塔克拉玛干沙漠^[20].

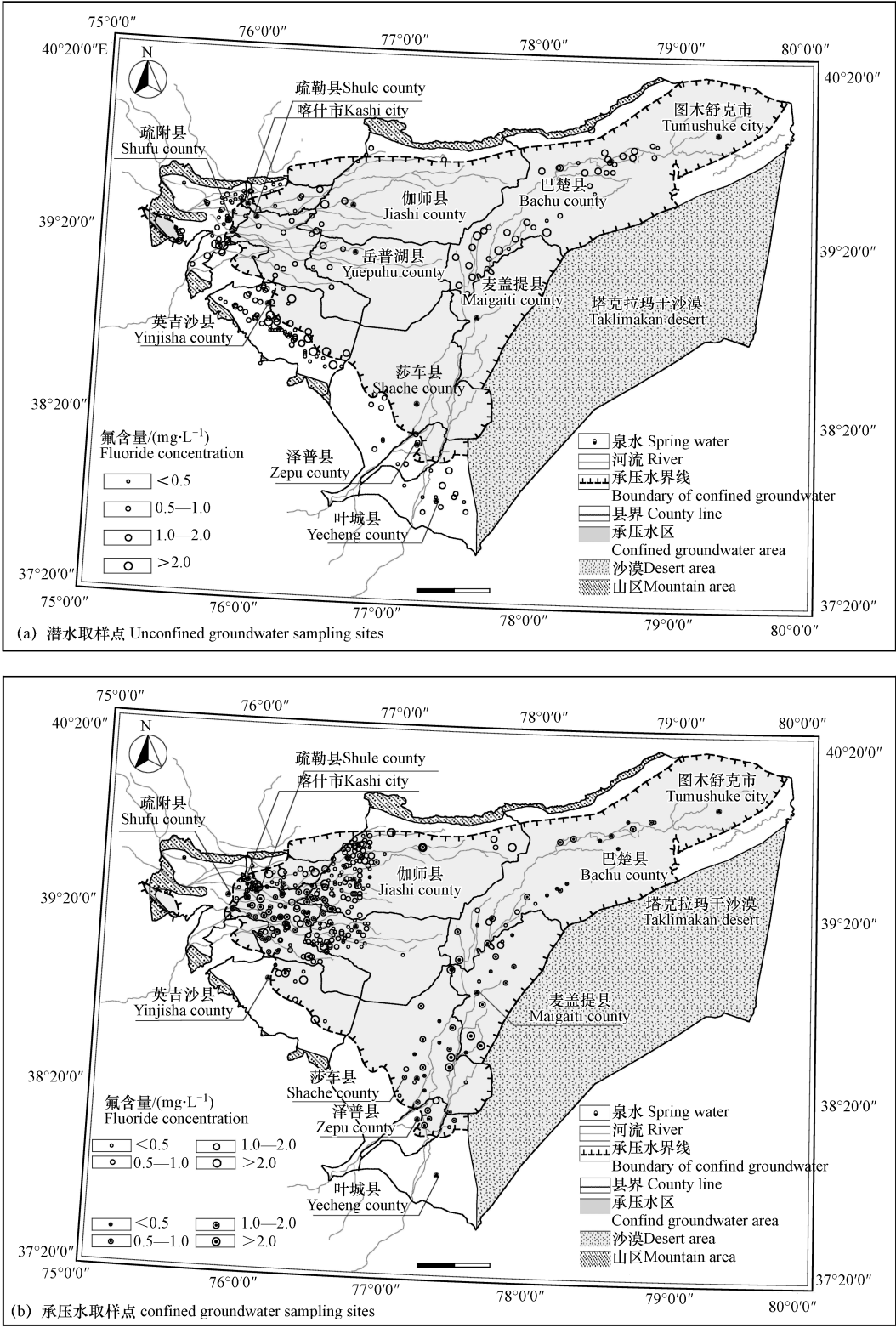


图 1 喀什地区地下水氟含量分布图

Fig.1 Distribution map of groundwater fluoride concentration in Kashgar Region

1.2 样品的采集与测试

2016 年在喀什地区进行了 1:25 万地下水污染调查工作,覆盖喀什市以及周边 10 个县,共采集水样样品 571 个,井深 7—300 m.根据采样点的机井深度,将研究区山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区分为浅

层潜水(井深 ≤ 100 m,地下水位埋深一般为 7—100 m)和深层潜水(井深 >100 m,地下水位埋深一般为 105—300 m),中下游河流冲积平原区含水层分为潜水(井深 ≤ 48 m,地下水位埋深一般为 7—48 m)、浅层承压水(井深 ≤ 100 m,地下水位埋深一般为 50—100 m)和深层承压水(井深 >100 m,地下水位埋深一般为 105—300 m).其中泉水水样 2 个、潜水水样 220 个、浅层承压水水样 118 个、深层承压水水样 231 个,地下水采样点及其氟含量分布见图 1.水样严格按《地下水环境监测技术规范(HL/T164—2004)》进行采集、保存、送样,由中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成水样测试.检测项目依据《地下水环境检测技术规范(HL/T164—2004)》进行选择,包括 pH、水温、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)、电导率(EC)等 5 项现场必测指标, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 F^- 、总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)等 28 项无机指标,氟离子检测下限值为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 地下水中氟的含量特征

根据表 1 喀什地区各县市地下水氟含量的统计结果可看出,喀什地区地下水氟含量的变化范围在 $0.02\text{—}8.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变异系数为 0.98,表明喀什地区地下水氟含量整体分布不均匀.地下水氟含量 $\leq 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 样品共 231 组,占样水总数 40.4%;地下水氟含量 $0.5\text{—}1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 样品共 213 组,占样水总数 37.3%;地下水氟含量 $1.0\text{—}2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 样品共 95 组,占样水总数 16.6%;地下水氟含量 $\geq 2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 样品共 32 组,占样水总数 5.6%.《生活饮用水标准》(GB5749—2006)中规定居民生活饮用水标准限值为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过标准值的地下水统称为高氟地下水,喀什地区高氟地下水共计 127 组,超标率 22.2%,因此,喀什地区地下水饮水安全受到影响.

表 1 喀什地区各县市地下水氟含量统计表
Table 1 Statistics of groundwater fluoride concentration in Kashgar Region

县市名 Name of county and city	最大值 Maximum/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值 Minimum/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation	各浓度范围样品数 Number of samples in each concentration range/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			
					≤ 0.5	$0.5\text{—}1.0$	$1.0\text{—}2.0$	≥ 2.0
喀什市	2.59	0.05	0.57	0.82	27	7	3	1
疏附县	3.80	0.10	0.68	1.05	37	12	5	4
疏勒县	3.30	0.08	0.93	0.62	15	43	21	3
伽师县	6.00	0.15	0.82	0.74	36	57	15	5
巴楚县	4.62	0.02	1.05	0.77	15	19	28	4
岳普湖县	1.21	0.04	0.56	0.36	34	28	3	0
英吉沙县	8.70	0.07	0.95	1.42	44	26	8	10
麦盖提县	2.30	0.06	0.99	0.74	5	2	3	2
莎车县	3.80	0.34	0.97	0.87	10	9	4	3
泽普县	1.31	0.38	0.87	0.38	1	4	3	0
叶城县	1.40	0.30	0.61	0.50	7	6	2	0
喀什地区	8.70	0.02	0.83	0.98	231	213	95	32

对比前人对新疆其它地区地下水氟含量的研究,喀什地区地下水氟含量最大值高于其它研究区,平均值高于焉耆盆地和石河子地区,低于和田河流域绿洲区和阿克苏地区(表 2).通过比较表 2 中最大值和最小值可发现喀什地区地下水氟含量空间分布较其它 4 个研究区差异性更大.

2.2 地下水中氟含量的分布特征

2.2.1 水平分布

从图 1(a,b)和表 1 可以看出,喀什地区地下水氟含量呈西部、北部高于东部、南部,中部最低的特点.高氟地下水主要分布在北部的喀什市、疏附县、疏勒县、伽师县、巴楚县及西部英吉沙县.地下水氟含量最大值的采样点位于西部的英吉沙县,地下水氟含量为 $8.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 且该县氟含量变异系数为 1.42,

说明英吉沙县地下水氟含量分布不均;研究区北部的巴楚县平均值最高,为 $1.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明巴楚县地下水饮用安全受到一定影响;中部地区的岳普湖县氟含量平均值、变异系数最低,分别为 0.56 、 0.36 ,表明岳普湖县氟含量水平分布均匀,水质较好;研究区内靠近东部沙漠地下水排泄区的麦盖提县、莎车县地下水氟含量大于南部地区的泽普县和叶城县,这是由于靠近沙漠地区地下水蒸发强烈,地下水各组分进一步浓缩导致的。

表 2 喀什地区与新疆其它地区地下水氟含量对比表

统计量 Statistic/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	喀什地区 Kashgar Prefecture	焉耆盆地 ^[10] Yanqi Basin	和田河流域绿洲区 ^[11] Oasis Region of Hetian River Basin	阿克苏地区 ^[12] Aksu Prefecture	石河子地区 ^[21] Shihezi Prefecture
最大值 Maximum	8.70	3.00	5.80	5.28	1.54
最小值 Minimum	0.02	0.05	0.22	0.21	0.14
均值 Mean	0.83	0.37	1.50	1.34	0.61

2.2.2 垂直分布

研究区北、西、南三面山前为单一的山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区,中下游为河流冲积平原潜水区,和河流冲积平原承压水区。山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区取样点 127 个(浅层潜水 99 个和深层潜水 28 个),其中高氟地下水取样点 19 个,浅层潜水占 16 个、深层潜水占 3 个,超标率分别为 16.2%和 10.7%;根据图 2(a)和表 3 可看出,山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区氟含量表现为浅层潜水高于深层潜水。中下游河流冲积平原区取样点 444 个(潜水 95 个、浅层承压水 159 个、深层承压水 190 个),其中高氟地下水取样点 108 个,潜水占 33 个、浅层承压水占 53 个、深层承压水占 22 个,超标率分别为 34.7%、33.3%和 11.6%。根据图 2(b)和表 3 可看出,河流冲积平原区地下水氟含量平均值表现为潜水>浅层承压水>深层承压水,变异系数从大到小的排序为深层承压水>浅层承压水>潜水。

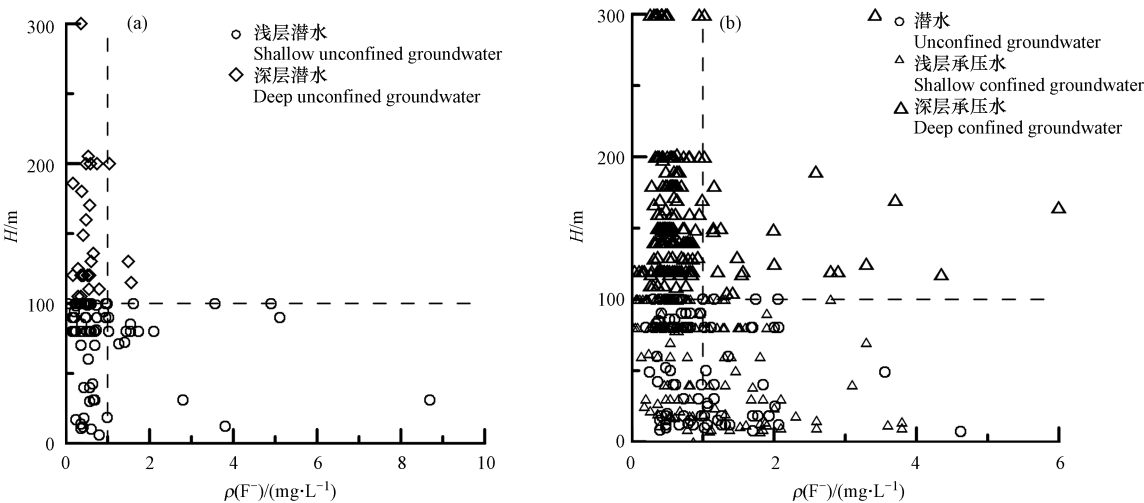


图 2 地下水氟含量与调查井深关系图

(a) 山麓斜坡冲洪积砾质平原区; (b) 中下游河流冲积平原区

Fig.2 Relation between groundwater fluoride concentration and well depth

(a) Piedmont slope alluvial gravel plain area (b) Alluvial plain area in middle and lower reaches of rivers

2.3 高氟地下水富集因素分析

2.3.1 岩土与土壤因素

喀什地区富氟的岩石、沉积物和土壤为高氟地下水的形成提供了丰富的氟源,《新疆维吾尔自治区矿产开发简明图集》(新疆维吾尔自治区国土资源厅,2004 年 8 月)显示研究区北部共有 5 个萤石矿产区,萤石是地下水氟的天然来源,大量的富氟萤石受风化作用影响向地下水释放氟化物,致使地下水氟含量上升。同时《中国地球化学图集》^[23]显示喀什地区北面山区地壳中氟含量 $430\text{—}570\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,西面

山区至南面山区地壳中氟含量 500—700 mg·kg⁻¹,表明北、西、南三面山区均有丰富的氟源,根据图 3 可看出地下水各组分浓度受岩石风化作用影响.因此,岩石与土壤是影响地下水氟含量因素之一.

表 3 不同含水层中地下水氟含量统计表

Table 3 Statistics of groundwater fluoride concentrations in the different aquifers							
地形 Terrain	地下水类型 Groundwater types	样本数 Sample numbers	极大值 Maximum/ (mg·L ⁻¹)	极小值 Minimum/ (mg·L ⁻¹)	标准差 Standard deviation	均值 Mean/ (mg·L ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation
山麓斜坡冲洪积	浅层潜水	99	8.70	0.05	1.18	0.81	1.46
砾质平原区	深层潜水	28	1.56	0.18	0.32	0.57	0.56
中下游河流	潜水	95	4.62	0.20	0.68	0.95	0.72
冲积平原区	浅层承压水	159	3.80	0.02	0.76	0.93	0.82
	深层承压水	190	6.00	0.04	0.69	0.73	0.94

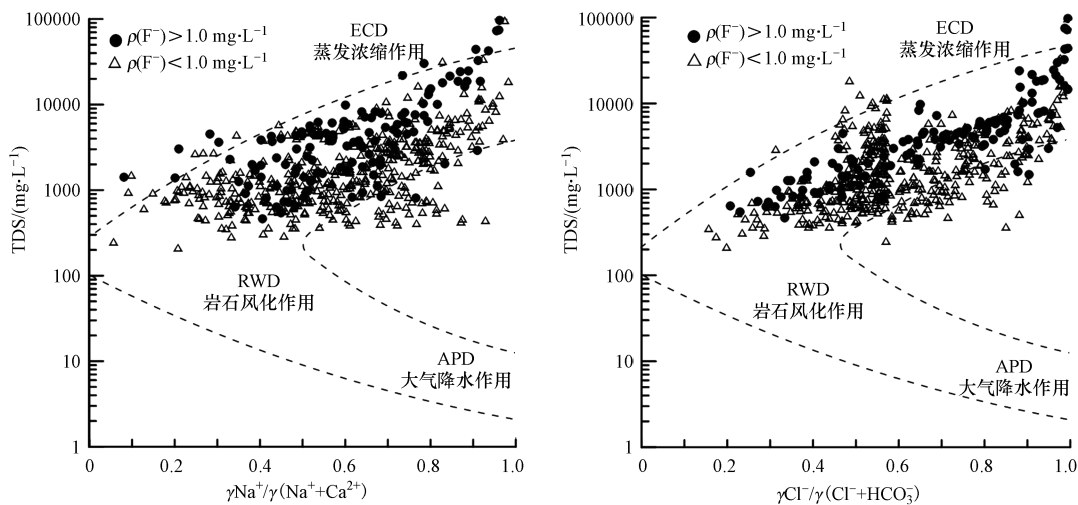


图 3 地下水 Gibbs 图
Fig.3 Groundwater Gibbs diagram

2.3.2 地形因素

地形对地下水的迁移方向、速度以及沉积环境具有关键作用,因此对地下水氟的聚集和迁移具有一定影响^[24].喀什地区西高东低,地下水在地形条件的影响下,由北、西、南三面流向平原区.通过表 4 可看出,研究区地下水氟含量平均值山麓斜坡冲洪积砾质平原区<中下游河流冲积平原区,这是由于山前地下水水力梯度较大(为 1.5%),地下水径流较好,地下水循环较快,不利于氟的聚集,因此靠近山前一带氟含量较低;平原区水力梯度较小(为 0.25%)^[25],地下水循环减缓,地下水氟开始聚集,因此中下游河流冲积平原区氟含量较高.但由于山前一带赋存大量的含氟矿物,因此山麓斜坡冲洪积砾质平原区存在个别调查井的地下水氟含量异常偏高.

表 4 不同地形条件下地下水氟含量统计表

Table 4 Statistics of groundwater fluoride concentration in different terrain conditions					
地形 Terrain	样本数 Sample numbers	最大值 Maximum/ (mg·L ⁻¹)	最小值 Minimum/ (mg·L ⁻¹)	平均值 Mean/ (mg·L ⁻¹)	中位数 Median/ (mg·L ⁻¹)
山麓斜坡冲洪积砾质平原区	127	8.70	0.05	0.76	0.48
中下游河流冲积平原区	444	6.00	0.02	0.85	0.59

2.3.3 水文地质因素

研究区地下水补给主要源自地表水,山前主要是山麓斜坡冲洪积砾质平原区,地下水动态表现为溶

滤-径流型,大量的氟化物从岩石析出进入地下水,以 F^- 形式赋存于地下水中,在地形因素的影响下,大量的含氟地下水由北、西、南三面地势较高的山麓斜坡冲洪积砾质平原区流向地势较低的河流冲洪积平原区;河流冲洪积平原区水力梯度变小,水流速度减慢,地下水动态表现为径流-蒸发型,蒸发作用增强,地下水各化学组分浓缩,氟浓度上升.

2.3.4 蒸发浓缩作用因素

蒸发浓缩作用将导致地下水中各组分富集,各组分之间相互反应,TDS、pH 明显升高,从地下水 Gibbs 图(图 3)中可以看出,采样点集中落在岩石风化型和蒸发浓缩型内,随着 $\gamma Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 、 $\gamma Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 比值的增加,TDS 呈上升趋势, $[\rho(F^-)]>1.0$ 主要分布在比值 0.5 的右方,且大部分采样点 $\gamma Na^+/(Na^++Ca^{2+})>0.5$ 、 $\gamma Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)>0.5$,TDS 值主要集中在 $1000\text{--}10000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,表明 F^- 的聚集受蒸发浓缩作用影响较大.因此,蒸发浓缩作用是影响地下水氟含量的另一重要因素^[26].

2.3.5 水化学环境因素

根据图 4 Piper 三线图可看出,研究区同一含水层中不同采样点的水化学环境差异性较大,高氟地下水水化学类型主要为 $HCO_3\text{--}Na$ 和 $Cl\text{--}SO_4\text{--}Na$ 型,低氟地下水水化学类型主要为 $HCO_3\text{--}Ca\text{--}Mg$ 型.高氟地下水主要集中在 Na^+ 含量占优势的地下水环境中,主要因为 Na^+ 与 F^- 结合,生成易溶的 NaF ,从而形成高氟环境;低氟地下水主要集中在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量占优势的地下水环境中,由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 易与 F^- 生成难溶于水的 CaF_2 、 MgF_2 沉淀物,从而形成低氟环境^[26];地下水 Cl^- 、 HCO_3^- 对 F^- 含量影响不大,随着 Cl^- 、 HCO_3^- 含量的增大, F^- 并未呈现出明显的规律;地下水 SO_4^{2-} 对 F^- 含量的影响较为明显,随着 SO_4^{2-} 含量的增大,地下水氟含量呈逐渐增大的趋势.

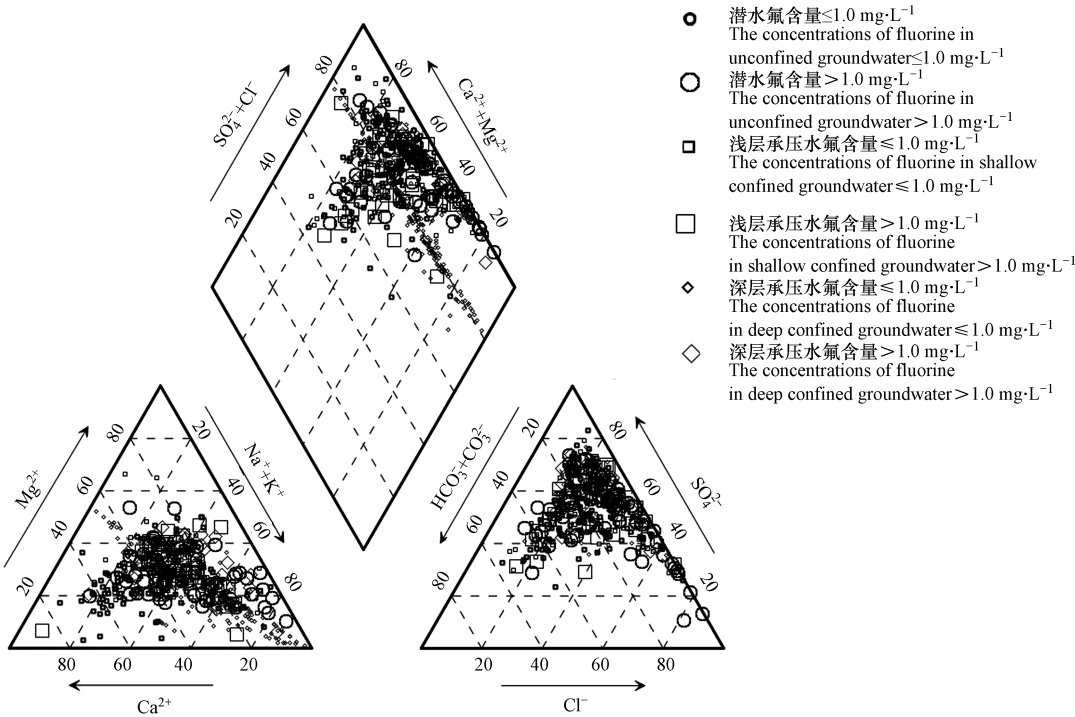


图 4 喀什地区地下水 Piper 三线图

Fig.4 Piper trilinear diagram of groundwater in Kashgar Region

地下水酸碱条件对 F^- 含量影响较大(图 5),氟离子含量随着地下水 pH 值的增大呈上升趋势且高氟地下水主要集中在偏碱性环境中,这是因为在碱性环境下 Ca^{2+} 大量的消耗沉淀,主要反应方程式:



当 pH 值上升时, OH^- 含量高,反应式(1)向左方向进行,同时消耗水中的 Ca^{2+} ,导致反应式(2)向右方向进行^[27],地下水 F^- 增加,由此可看出 pH 值是影响地下水氟含量的因素之一.

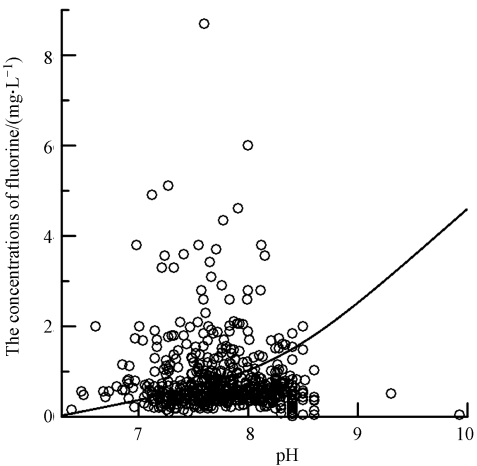


图 5 喀什地区地下水 F⁻ 含量与 pH 的关系

Fig.5 The correlation between groundwater fluoride and pH in Kashgar Region

3 结论 (Conclusion)

- (1)喀什地区地下水氟含量超标率达到 22.2%, 平均值为 0.83 mg · L⁻¹, 变化范围为 0.02—8.70 mg · L⁻¹, 对当地居民饮水安全有一定的影响.
- (2)研究区地下水氟含量水平方向上呈西部、北部高于东部、南部, 中部最低的特点; 垂直方向上山麓斜坡冲洪积砾质平原区氟含量表现为浅层潜水高于深层潜水, 中下游河流冲积平原区地下水氟含量表现为潜水>浅层承压水>深层承压水.
- (3)喀什地区地下水的氟主要来自山前含氟基岩; 受地下水径流条件的影响, 氟含量平均值表现为山麓斜坡冲洪积砾质平原区<中下游河流冲积平原区; 蒸发浓缩作用使得 F⁻ 浓度进一步增大; 高氟地下水水化学类型主要为 HCO₃-Na 和 Cl · SO₄-Na 型, 地下水弱碱性环境利于 F⁻ 的富集.

参考文献 (References)

[1] 张英, 张玉玺, 王金翠, 等. 珠江三角洲地区地下水氟元素背景特征分析 [J]. 环境化学, 2013, 32 (10) : 1983-1988.
ZHANG Y, ZHANG Y X, WANG J C, et al. The background features of fluoride in groundwater of Pearl River Delta [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32 (10) : 1983-1988 (in Chinese).

[2] 张小磊, 何宽, 马建华. 氟元素对人体健康的影响 [J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23 (6) : 66-67.
ZHANG X L, HE K, MA J H. Influence of fluoride on human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2006, 23 (6) : 66-67 (in Chinese).

[3] 李成城. 运城盆地高氟地下水咸水成因机制研究 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2018.
LI C C. Genesis of high fluoride saline groundwater in Yuncheng Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018 (in Chinese).

[4] 刘春华, 王威, 卫政润, 等. 微山湖流域高氟地下水的成因分析 [J]. 地球学报, 2018, 39 (3) : 351-357.
LIU C H, WANG W, WEI Z R, et al. Distribution characteristics and genesis of high fluoride groundwater in Weishan Lake Watershed [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39 (3) : 351-357 (in Chinese).

[5] 毛若愚, 郭华明, 贾永锋, 等. 内蒙古河套盆地含氟地下水分布特点及成因 [J]. 地学前缘, 2016, 23 (2) : 260-268.
MAO R Y, GUO H, JIA Y F, et al. Distribution characteristics and genesis of fluoride groundwater in Hetao Basin, Inner Mongolia [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23 (2) : 260-268 (in Chinese).

[6] 何锦, 张福存, 韩双宝, 等. 中国北方高氟地下水分布特征和成因分析 [J]. 中国地质, 2010, 37 (3) : 621-626.
HE J, ZHANG F C, HAN S B, et al. The distribution and genetic types of high-fluoride groundwater in Northern China [J]. Geology in China, 2010, 37 (3) : 621-626 (in Chinese).

[7] 林勤. 喀什地区地理环境与地方性氟中毒 [C] // 中国矿物岩石地球化学学会环境地质地球化学专业委员会、中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室、第六届全国环境地球化学学术讨论会论文摘要汇编. 中国矿物岩石地球化学学会环境地质地球化学专业委员会、中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室: 中国矿物岩石地球化学学会, 2002.
LIN Q. Geographical environment and endemic fluorosis in Kashi area [C] // Committee of Environmental Geology and Geochemistry of China Society of Mineral and Rock Geochemistry, State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Summary of theses of the Sixth National Symposium on Environmental Geochemistry. Professional Committee of Environmental Geology and Geochemistry, Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences; Chinese Society of Minerals, Petrology and Geochemistry, 2002

- (in Chinese).
- [8] 梁川,苏春利,吴亚,等.大同盆地高氟地下水的分布特征及形成过程分析[J].地质科技情报,2014,33(2):154-159.
LIANG C, SU C L, WU Y, et al. Distribution and geochemical processes for the formation of high fluoride groundwater in Datong Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(2): 154-159(in Chinese).
- [9] 左锐,谷鹏,滕彦国,等.下辽河平原高氟地下水空间分布及成因分析[J].水文地质工程地质,2015,42(3):135-141.
ZUO R, GU P, TENG Y G, et al. Spatial distribution and genesis of the high-fluorine groundwater in the Lower Liaohe River Plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42 (3): 135-141(in Chinese).
- [10] 栾凤娇,周金龙,曾妍妍,等.新疆南部典型地区地下水中氟的分布特征及其富集因素分析[J].环境化学,2016,35(6):1203-1211.
LUAN F J, ZHOU J L, ZENG Y Y, et al. Distribution characteristics and enrichment factors of fluorine in groundwater in typical areas of southern Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(6): 1203-1211 (in Chinese).
- [11] 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.
LI L, ZHOU J L, QI W Q, et al. Distribution and formation process of fluorine in groundwater in oasis area of Hotan River basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33 (1): 112-118(in Chinese).
- [12] 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.
LI Q, JIA R L, ZHOU J L, et al. Analysis of chemical characteristics of high-fluoride groundwater in Aksu prefecture, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27 (12): 87-92(in Chinese).
- [13] 纳麦提·托合提,张峰,师庆东.克里雅河流域水中氟离子的空间分布特征[J].干旱区研究,2016,33(5):1125-1131.
TUOHETI·N, ZHANG F, SHI Q D. Spatial distribution of fluorine in water in the Keriya River Basin [J]. Arid Zone Research, 2016, 33 (5): 1125-1131(in Chinese).
- [14] 阿布都克日本·阿巴司,胡素琴,努尔帕提曼·买买提热依木.新疆喀什气候变化对棉花发育期及产量的影响分析[J].中国生态农业学报,2015,23(7):919-930.
ABASHI·A, HU S Q, MAIMAITIREYIMU·N. Effect of climate change on cotton growth period and yield in Kashgar City, Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 919-930(in Chinese).
- [15] 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.
ZENG Y Y, ZHOU Y Z, ZHOU J L, et al. Assessment of groundwater quality status in western Kashgar, Xinjiang [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2016, 39 (2): 167-172(in Chinese).
- [16] 朱宏,周宏飞,陈小兵,等.新疆喀什地区的地下水资源特征分析[J].干旱区研究,2005,22(2):152-156.
ZHU H, ZHOU H F, CHEN X B, et al. Analysis on the characteristics of groundwater resources in Kashgar Prefecture, Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2005 (2): 152-156(in Chinese).
- [17] 纪媛媛,李巧,周金龙.新疆喀什地区地下水量与污染评价[J].节水灌溉,2014(1):50-53,56.
JI Y Y, LI Q, ZHOU J L. Assessment of groundwater quality and pollution in Kashgar Region of Xinjiang [J]. Water Saving Irrigation, 2014 (1): 50-53,56(in Chinese).
- [18] 魏兴,周金龙,乃尉华,等.新疆喀什三角洲地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源[J].环境科学,2019,41(8):3550-3558
WEI X, ZHOU J L, NAI W H, ZENG Y Y, et al. Chemical characteristics and sources of groundwater sulfate in Kashgar Delta, Xinjiang [J]. Environmental Science, 2019,41(8): 3550-3558(in Chinese).
- [19] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴,2018[Z].北京:中国统计出版社,2018:183-218.
Statistical Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang statistical yearbook, 2018 [Z]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2018;183-218(in Chinese).
- [20] 胡林金.喀什地区地下水埋深及其动态特征浅析[J].地下水,2013,35(3):85-87.
HU L J. Analysis of groundwater depth and its dynamic characteristics in Kashi region [J]. Groundwater, 2013, 35 (3): 85-87(in Chinese).
- [21] 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.
LUAN F J, ZHOU Y Z, ZHOU J L, et al. Distribution characteristics and enrichment factors of groundwater fluorine in Shihezi Area of Xinjiang[J]. Yellow River, 2016, 38 (3): 64-67,71(in Chinese).
- [22] 马诗敏,徐新阳,陈熙,等.松辽西部地区高氟地下水形成机理[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(10):1487-1491.
MA S M, XU X Y, CHEN X, et al. Formation mechanism of high-fluorine groundwater in West Area of Songliao [J]. Journal of Northeast University (Natural Science), 2014, 35 (10): 1487-1491(in Chinese).
- [23] 谢学锦,任天祥,孙焕振.中国地球化学图集[M].北京:地质出版社,2015:52
XIE X J, REN T X, SUN H Z. China geochemical atlas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015;52(in Chinese).
- [24] 朱亮,孙继朝,刘景涛,等.兰州市地下水氟分布规律及影响因素分析[J].环境科学与技术,2015,38(4):144-148.
ZHU L, SUN J C, LIU J T, et al. Distributing regularity and influencing factors of fluorine in Lanzhou City [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38 (4): 144-148(in Chinese).
- [25] 於嘉润,周金龙,曾妍妍,等.新疆喀什地区东部地下水“三氮”空间分布特征及影响因素[J].环境化学,2016,35(11):2402-2410.
YU J W, ZHOU J L, ZENG Y Y, et al. Spatial distribution and influencing factors of “Three-Nitrogen” in Groundwater of the eastern area of Kashgar, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(11): 2402-2410(in Chinese).
- [26] 吴初,武雄,张艳帅,等.秦皇岛牛心山高氟地下水分布特征及成因[J].地学前缘,2018,25(4):307-315.
WU C, WU X, ZHANG Y S, et al. Distribution characteristics and genesis of high fluoride groundwater in the NiuXin Mountain, Qinhuangdao[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25 (4):307-315(in Chinese).
- [27] 张威,傅新锋,张甫仁.地下水中氟含量与温度、pH值、 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Ca}^{2+}$ 的关系——以河南省永城矿区为例[J].地质与资源,2004,13(2):109-111,95.
ZHANG W, FU X F, ZHANG F R. The relationship between the high fluorine content of groundwater and the pH value, water temperature and the ratio of $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Ca}^{2+}$: A case study of Yong cheng mine area [J]. Geology and Resources, 2004, 13(2): 109-111, 95(in Chinese).