环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.3
第41卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第3期
2020年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第3期 2020年3月
Vol.41, No.3 Mar., 2020

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因

吕晓立[1,2], 刘景涛[1*], 韩占涛[1,2], 周冰[1], 朱亮[1], 陈玺[1]
(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 河北省、中国地质调查局地下水污染机理与修复重点实验室, 石家庄 050061)

摘要: 随着经济的发展,新疆塔城盆地地下水开采量持续增大,然而研究区水文地质研究基础薄弱,盆地地下水化学演化趋势及其成因不明,这使得未来的地下水开发利用存在较大风险. 本文在对盆地内地下水进行系统采样分析的基础上,基于5种水化学图对地下水化学组分进行异常识别,并对比历史水化学数据,对盆地地下水化学演变进行了深入分析. 结果表明:研究区地下水阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^{+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,盆地广泛分布溶解性总固体小于 1.0 g·L^{-1} 的淡水. 从山前淋溶迁移带到地下水径流缓慢的平原区,地下水化学类型由 HCO_3-Ca 和 $HCO_3\cdot SO_4$-Ca·Mg 型过渡到 $SO_4\cdot HCO_3$-Na·Ca 型. 对比1979年水化学数据,城镇化进程中,由于地下水的过量开采,水位埋深下降,原来的部分排泄区变为径流区,水循环交替加快,致使研究区 HCO_3 型和 $SO_4\cdot HCO_3$ 型水分布面明显增加,以硫酸根和氯离子为主的高TDS水化学类型分布面积明显减少. 然而在城镇周边人口密集区地下水中水氯离子和硝酸根离子明显升高,地下水TDS和总硬度呈上升趋势,地下水盐化和硬化明显. 研究区地下水化学演变主要受潜水流经的含水层介质及地下水流场变化影响,另外排污沟渠污水下渗是影响地下水水质的另一个主要因素.

关键词:塔城盆地; 城镇化; 地下水化学; 离子比; 异常识别; 控制因素
中图分类号: X143 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)03-1197-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201908192

Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization

LÜ Xiao-li[1,2], LIU Jing-tao[1*], HAN Zhan-tao[1,2], ZHOU Bing[1], ZHU Liang[1], CHEN Xi[1]
(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Hebei and China Geological Survey Key Laboratory of Groundwater Remediation, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: With the development of the local economy, the volume of groundwater production has increased continuously in the past decades in the Tacheng Basin of the Xinjiang Uygur Automous Region. Previous studies have not provided a clear pattern of the chemical composition evolution of groundwater and its driving force in this basin, which makes the future development and utilization of groundwater riskier. This study carried out systematic sampling and analysis of groundwater chemistry in this basin, and the chemical evolution of groundwater in the basin was analyzed by comparison with historical hydrochemical data. The results show that Ca^{2+} and Na^{+} are the main cations in the groundwater, HCO_3^-, SO_4^{2-} are the main anions in the groundwater, and freshwater is widely distributed. The chemical types of groundwater changed from HCO_3-Ca and $HCO_3\cdot SO_4$-Ca·Mg in the source zone in front of the mountains to $SO_4\cdot HCO_3$-Na·Ca type in the plain area. In comparison with the hydrochemical data of 1979, HCO_3 and $SO_4\cdot HCO_3$ type groundwater increased significantly. SO_4 and Cl type groundwater with high total dissolved solids decreased significantly. However, the Cl^- and SO_4^{2-} concentration and total hardness in the groundwater around the cities and towns increased. Aquifer material and the change of flowing field are the two controlling factors of groundwater chemical change, but the leakage of waste water from city drainage channels also affects the groundwater chemistry drastically.

Key words: Tacheng Basin; urbanization; hydrogeochemistry; ion ratio; abnormal recognition; controlling factors

西北干旱区内陆盆地,降雨稀少,蒸发强烈,地下水资源对区内生态系统、经济发展发挥着不可替代的作用[1,2]. 在"一带一路"背景下,西北地区城镇化进程不断推进[3],城市化的快速发展和市政建设的严重滞后,给当地地下水环境带来严峻压力,主要表现为地下水位下降、水质恶化[4,5]. 水化学特征分析是研究水体化学组成与地下水演化过程的基础[6~8],水体中主要离子成分常用来分析区域水化学控制因素及物质来源[9,10]. 城镇化进程中人类活动对地下水环境的影响在很大程度上可以通过水化学组分表现出来[11~14],即出现"水化学异常". 对地下水化学组分异常识别是确认人类活动对地下水影响程度的关键. Huang 等[11]的研究表明,城镇化进程中,化粪池以及生活污水渗漏导致珠江三角洲地区地下水硝酸根离子明显升高,硝酸根在阴离子中

收稿日期: 2019-08-22; **修订日期**: 2019-10-31
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190331); 中央级科研院所基本科研业务费专项(SK201901); 国家自然科学基金项目(41472226)
作者简介: 吕晓立(1978~),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为水土污染调查与修复,E-mail:xiaoli_lv1978@163.com
* 通信作者,E-mail:728881944@qq.com

的毫克当量百分比大于 25%,硝酸型水在珠江三角洲地区频繁显现. 李洁等[12]的研究表明,城镇化使贵州岩溶区地下水溶滤作用减弱,硫酸盐和氯化物的输入增加. 朱丹尼等[14]的研究表明,城镇化进程中生活污水及垃圾的大量输入导致地下水中三氮质量浓度明显升高.

目前,国内外学者对城镇化进程中地下水化学特征及水质演化研究较多,但是上述研究对城镇化进程中人为输入对地下水影响的识别方法多局限于数理统计、变异系数离散程度等方法[12,14]. 这些方法主要根据某几项指标的变异程度评价人类活动对地下水水质的影响,忽略了反映水化学特征的水化学指标之间的内在联系,很可能造成评价结果失准. 水化学方法识别人类活动对地下水水质的影响程度是根据主要组分在地下水流向分布上出现的异常,利用 Piper 三线图及各离子比例关系图等进行异常识别,并最终得出人类活动影响程度[13]. 该方法避免了评价结果受单个指标极值的影响,且从水化学场进行整体考虑,方法上更为科学合理. 因此,本文以处于古丝绸之路经济中心带的新疆塔城盆地为研究区,在对盆地内地下水进行系统采样分析的基础上,综合多方面水文地质数据,基于 5 种水化图对地下水主要组分进行异常识别[15],探讨城镇化进程中盆地地下水化学演变特征及控制因素,以期为当地地下水资源的可持续开发与利用提供参考,并为我国西北干旱脆弱区地下水化学演化研究提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区水文地质概况

塔城盆地位于新疆西北部,三面环山,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(图 1 和图 2),中部为平原区. 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 300 mm,集中在 7 ~ 9 月,多年平均蒸发量为1 600 mm. 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、向东收敛的展布特征[16]. 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 和图 2). 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,地下水位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[17].

1.2 研究区城市化进程

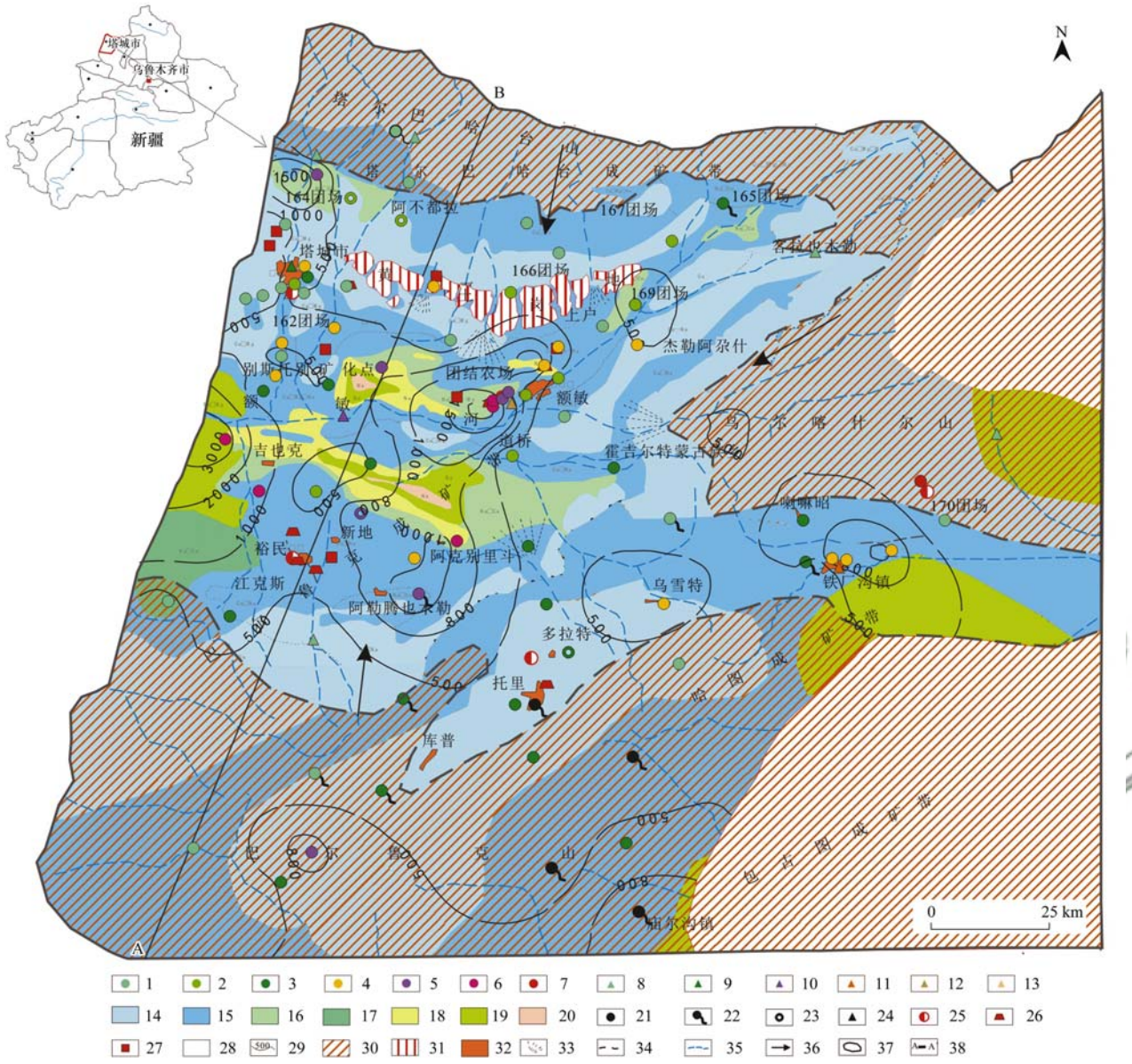
塔城盆地农牧业发达,工业基础薄弱、企业布局分散,人类活动形式较为单一[3]. 区内人口集中分布在塔城市、额敏县、托里县和裕民县等 4 个县市及其周边,在城镇周边分布有污水处理厂、垃圾填埋场、排污沟渠等潜在污染源. 据塔城市统计年鉴[19],研究区城镇化率呈逐年递增的趋势,城镇建设用地从 2009 年的8 760.48 hm^2 发展到 2015 年的 12 009.34 hm^2,年平均增长率为 5.3%. 城镇化进程中,城市生活污水和工业废水量逐年增加,但由于地处边疆,市政基础设施严重滞后,生活污水的泄漏和垃圾及人畜粪便的淋滤下渗导致城镇人口密集区地下水水质呈恶化趋势. 农药化肥的使用导致区域地下水硝酸根离子呈上升趋势[20].

1.3 样品采集与分析

2015 年 7 ~ 8 月在研究区采集水样品 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、农业灌溉井和泉,采样井井深 3 ~ 180 m,地下水位埋深 0.5 ~ 120 m. 采样设备为离心泵或潜水泵. 采样前,对采样井进行抽水清洗,等排出水量大于井孔储水量 3 倍,并且现场指标稳定后再进行采样,以确保采集的样品具有代表性. 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”[21],通过人工提水方式在微扰动的情况下,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. 取样后,贴标签并用 Parafilm 封口膜密封避光保存, 7 d 内送达实验室测试. 样品由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 8538-95[22]. 利用 DX-120 型离子色谱仪和 ICP-AES 分别对阴、阳离子进行测定. 现场测试指标酸碱度、溶解氧和氧化还原电位等采用多功能便携式测试仪(Multi-340i/SET,德国 WTW)进行测试.

1.4 数据分析

运用舒卡列夫分类法分析水化学类型,运用 SPSS 和 AquaChem 等软件分析水化学数据,基于水化学法和离子比分析法探讨地下水化学组分演变特征及控制因素.



2015 年水化学类型：1. HCO_3-Ca(Ca·Mg、Ca·Na)；2. HCO_3·SO_4-Ca(Ca·Mg)；3. HCO_3·SO_4-Ca·Na(Na·Ca)；4. SO_4·HCO_3-Ca(Ca·Mg)；5. SO_4·HCO_3-Ca·Na(Na·Ca)；6. SO_4-Na·Ca；7. Cl·HCO_3-Ca(以上为地下水)；8. HCO_3-Ca(Ca·Mg)；9. HCO_3·SO_4-Ca·Na·Mg；10. SO_4·HCO_3-Na·Ca·Mg；11. SO_4·Cl-Na·Ca；12. HCO_3·Cl-Na·NH_4；13. HCO_3-Ca·Na·NH_4(以上为地表水)；1979 年水化学类型：14. HCO_3-Ca(Ca·Mg、Ca·Na)；15. HCO_3·SO_4-Ca·Na(Ca·Mg)；16. SO_4·HCO_3-Na·Ca；17. SO_4·HCO_3·Cl-Na·Ca；18. SO_4-Na；19. SO_4·Cl-Na(Na·Mg)；20. Cl·SO_4-Na；边界及其他：21. 潜水；22. 泉；23. 承压水；24. 地表水点；25. 污水处理厂；26. 垃圾填埋场；27. 农业污染源；28. 无数据区；29. 2015 年 TDS 浓度等值线(mg·L^{-1})；30. 山区基岩裂隙水；31. 黄土岗地；32. 城镇区；33. 洪积扇；34. 山区与平原区界限；35. 地表水系；36. 地下水流向；37. 研究区边界；38. 水文地质剖面位置；1979 年数据引自文献[18]，图中面色表示 1979 年水化学类型，不同颜色的点表示本次取样点的水化学类型，相同类型的面色和采样点以相近的颜色表示

图 1　研究区水化学类型变化对比(1979 年与 2015 年)

Fig. 1　Contrast of groundwater chemical type distribution in 1979 and 2015

2　结果与讨论

2.1　现状条件下地下水水化学组分特征

本次研究在山前洪积扇群采集地下水样品 25 组，在冲洪积平原区采集地下水样品 55 组，在出山口采集地表水 6 组，在排污沟渠下游采集地表污染水样 4 组(图 1)．塔城盆地不同地貌单元地下水总体上属于稳态水，略偏氧化水(图 3)．浅层地下水 pH 介于 7.1 ~ 8.5 之间，为中性或弱碱性水，pH 值从上游到下游呈逐渐降低趋势．研究区地下水阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主，阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主．盆地潜水溶解性总固体(TDS)质量浓度介于 161.6 ~ 3 881 mg·L^{-1}，均值为 669.0 mg·L^{-1}，总体上为 TDS 小于 1.0 g·L^{-1}的淡水．从山前到平原，沿着地下水流向地下水中的各主要离子组分、总硬及 TDS 呈逐渐升高的趋势(图 4 和图 5)．从各宏量组

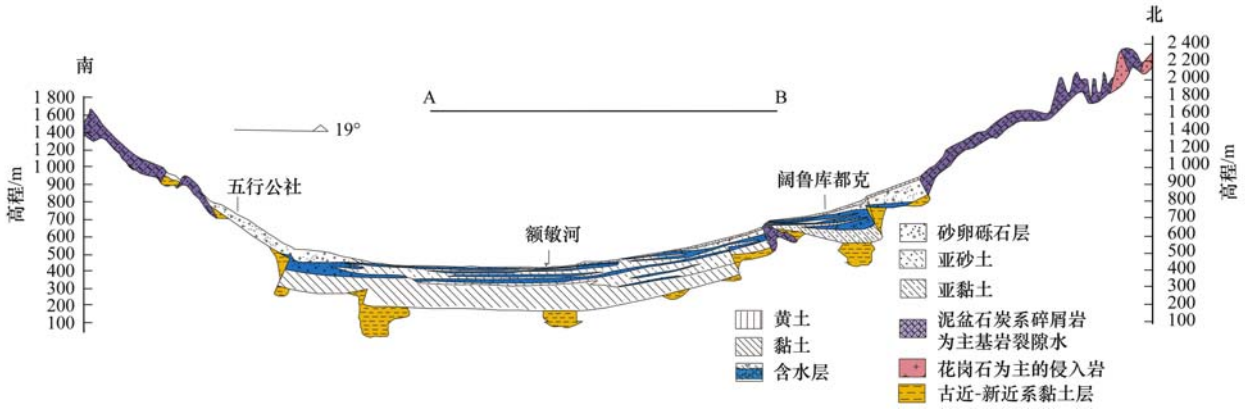


图 2 研究区水文地质剖面(A-B)示意

Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area(A-B)

表 1 研究区水化学组分统计[1)]

Table 1 Chemical composition of groundwater in the study area

分区	检测项目	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^--N	H_2SiO_3	TDS
潜水 山前($n=25$)	最小值/mg·L^{-1}	0.35	6.16	41.72	6.16	0.35	10.92	172.8	0.10	10.92	198.0
	最大值/mg·L^{-1}	7.32	205.60	176.90	36.79	114.30	511.80	471.2	15.38	21.74	1 116.0
	均值/mg·L^{-1}	2.07	68.76	77.56	19.04	27.68	156.95	253.5	4.00	2.74	507.7
	变异系数/%	89.5	81.8	50.2	49.6	42.9	51.4	25.3	115.3	16.8	58.0
潜水 平原区($n=46$)	最小值/mg·L^{-1}	0.49	6.14	41.00	4.40	0.35	14.32	78.5	0.10	14.35	161.6
	最大值/mg·L^{-1}	3.94	770.80	281.10	130.10	404.40	2 082.00	519.5	29.22	24.39	3 881.0
	均值/mg·L^{-1}	1.51	109.41	109.72	31.01	48.61	305.01	275.0	8.01	19.52	793.9
	变异系数/%	43.2	131.0	54.6	80.4	131.7	131.6	35.8	99.7	13.3	90.7
承压水 平原区($n=9$)	最小值/mg·L^{-1}	0.64	9.38	45.32	9.06	1.05	34.49	158.3	0.74	14.20	228.4
	最大值/mg·L^{-1}	1.84	236.70	137.90	44.67	184.6	533.3	277.9	7.75	21.53	1 289.0
	均值/mg·L^{-1}	1.12	66.20	68.11	20.04	40.9	145.98	208.5	3.91	17.87	478.5
	变异系数/%	38.8	127.8	42.6	54.4	149.8	129.8	18.1	63.7	16.8	79.3

1)n 表示样品采集数量(组)

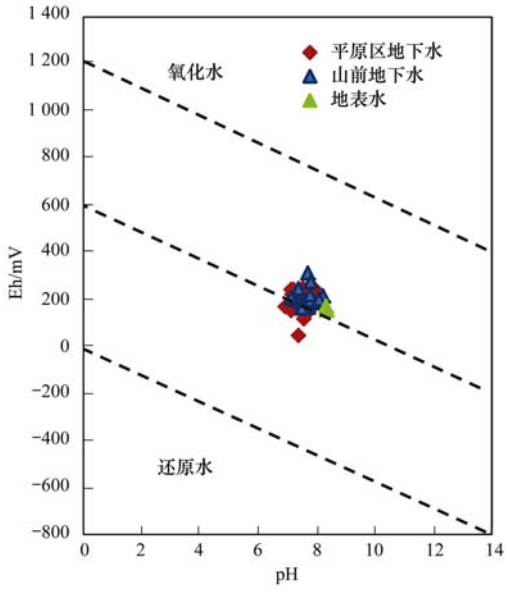


图 3 研究区不同水体 Eh-pH

Fig. 3 Eh-pH plots of water samples in the study area

分的变异系数来看,除 pH 值外,其余指标的变异系数值均大于 10%,表现出中等或强变异性,表明各离子在空间分布上存在较大离散性和波动性. 其中,平原区地下水大部分离子组分变异系数较山区大,平原区 Na^+、NO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、Mg^{2+} 和 TDS 等指标表现出较强的变异性(表 1),表明这些组分在区域上分布不均匀,局部富集程度高. 研究区 HCO_3^- 与 Ca^{2+}、Mg^{2+} 的变异系数相对较小,指示其含量主要受地质背景条件控制,受外界人类活动影响较小.

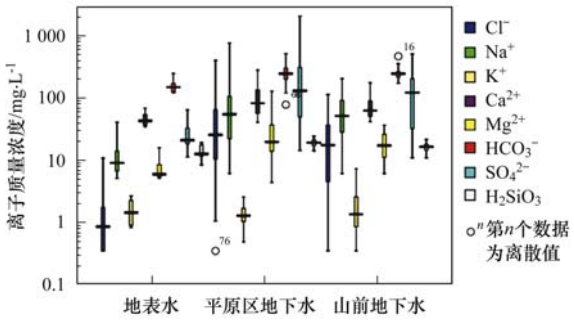


图 4 主要离子浓度箱图

Fig. 4 Box plots showing variations in major ion concentrations in the water samples

2.2　地下水水化学时空演变特征

2.2.1　现状条件下地下水化学空间分布特征

根据舒卡列夫分类法(图 6),研究区地下水化学水平分带明显,潜水在盆地四周的基岩山区主要为 HCO_3-Ca 和 $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Mg 型水; 山前丘陵区主要为 $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Na 型,局部为 $SO_4 \cdot HCO_3$-Na·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,溶解性总固体也逐渐增高(图 1). 研究区承压水各离子组分浓度较潜水低,水化学类型在平原区周边主要为 $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Mg 型水,到平原区中部过渡为 $SO_4 \cdot$Cl-Na·Ca 型水,TDS 值介于 228.4 ~ 1 289 mg·L^{-1}之间,总体上为 TDS 小于 1.0 g·L^{-1}的淡水. 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 $HCO_3 \cdot SO_4$- Ca·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(图 6),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.

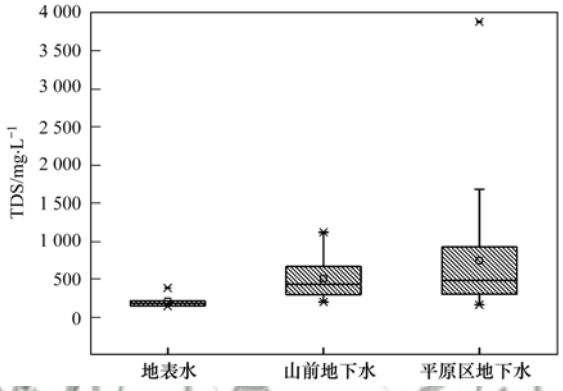


图 5　研究区水体 TDS 箱图

Fig. 5　Box plots showing variations of TDS in the water body of different areas in the study area

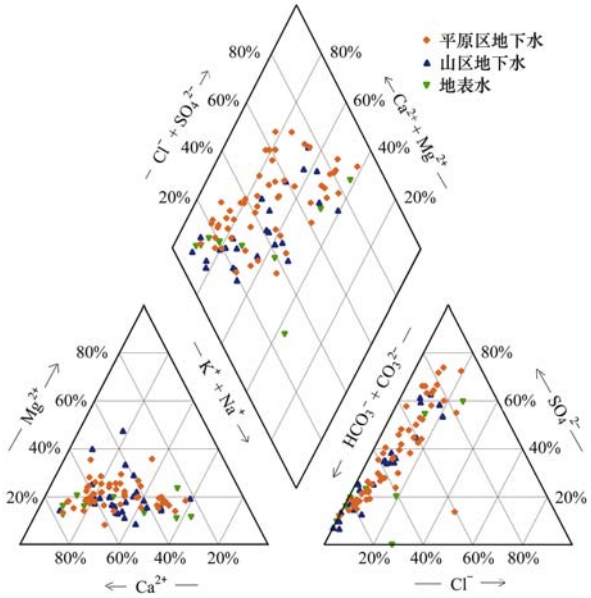


图 6　平原区和山前洪积扇地下水化学 Piper 三线图

Fig. 6　Piper plots of groundwater samples in the plain area and the piedmont area

塔城盆地南北两侧地下水化学类型具有明显的不对称性(图 1),这是由于受下部隐伏构造的控制,盆地北部地下水系统洪积平原潜水由两个循环带组成,且黄土岗地南北含水层由洪积砂砾石层组成. 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径流途径较短,水循环较快,以溶滤作用为主,蒸发浓缩作用相对较小,TDS 总体较低,地下水以重碳酸、重碳酸硫酸型水为主. 而在盆地南部地下水系统由山前到盆地中部地下水溶解性总固体逐渐升高. 额敏河近岸,地表水与地下水交替循环,地下水水质较好,以重碳酸硫酸型水为主. 然而在额敏河出国境处,基底隆起,隔水湖相黏土层抬升,地下水径流缓慢,河流两侧地下水水质明显变差,以硫酸或硫酸氯型水为主.

2.2.2　地下水化学随时间的演变特征

对比 1979 年水化学数据[18],研究区地下水在 20 世纪六七十年代基本保持天然状态,南北部基岩山区及盆地倾斜洪积平原区地下水大面积分布重碳酸型、重碳酸硫酸型水,总体上为 TDS 值小于 1.0 g·L^{-1}的淡水. 盆地中部冲积平原区以 Cl·SO_4 型和 SO_4 型水为主的微咸水、咸水和卤水在额敏河两岸的地势低洼处呈斑块晕状分布,在地下水的最终排泄区晕中心 TDS 值大于 10 g·L^{-1}. 近 40 年来,随着城镇化进程,人口数量逐年增加,城镇化面积逐渐加大,地下水开采量持续增加,塔城盆地山前倾斜平原地下水位埋深下降、泉流量减少、溢出带下移. 在自然条件演化及人类活动输入双重影响下,盆地地下动力条件发生了较大变化,原来的水岩平衡被打破,水化学场发生了明显变化. 对比研究区 1979 年及 2015 年水化学类型图(图 1),塔尔巴哈台山前上覆不同厚度黄土的波状、垅状冰水台地中赋存的潜水水化学类型由之前的 $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Na 型水转变为 HCO_3-Ca·Mg型水,这是由于随着山前潜水埋深下降,流经低渗透介质的潜水水量减少,大部分潜水流经下伏于黄土的粗颗粒冰水堆积物,地下水循环交替加快,地下水 TDS 值下降,水化学类型向 HCO_3 型水演化. 研究区黄土岗地南侧部分区域浅层地下水由 $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Na 型水转变为 $SO_4 \cdot HCO_3$-Ca·Na型水,这是由于随着地下水位埋深的下降,黄土岗以北泉流量减小,地下水以地表潜流的形式流经黄土岗地,地下水径流速度变慢,在溶滤及蒸发浓缩作用下,黄土岗地与山前弱倾斜平原交

界处潜水中硫酸根离子升高. 然而在额敏河两岸地下水排泄区地势低洼处硫酸型及氯化物硫酸型水分布面积明显减小,TDS 值明显降低,咸水和微咸水分布面积大范围萎缩,卤水消失. 这是由于,城镇化进程中,额敏河两岸地下水开采量持续增加,水位埋深下降,额敏河两岸沼泽及沼泽化湿地面积不断缩小,原有部分排泄区转变为径流区,水化学交替加强,蒸发浓缩作用较之前明显减弱,原有的咸水向微咸水演变. 另外,在塔城市及额敏县周边人类活动密集区,地下水 TDS 和总硬度总体呈上升趋势,受人类活动影响较大的氯离子和硝酸根离子质量浓度增加,地下水由 HCO_3-Ca·Mg 和 HCO_3·SO_4-Ca·Mg 型演化为 SO_4·HCO_3-Ca·Mg(Ca·Na)和 SO_4-Na·Ca 型水. 南部巴尔鲁克山前人类活动相对密集区庙尔沟镇地下水由重碳酸硫酸型演化为 SO_4·HCO_3-Ca·Na 型水.

总之,从水化学数据的历史变化趋势来看,在过去近 40 年的城镇化进程中,研究区地下水化学类型发生了明显变化. HCO_3 型水和 SO_4·HCO_3 型水分布面明显增加,以硫酸根和氯离子为主的高溶解性总固体水化学类型分布面积均有不同程度下降. 在城镇周边人类活动密集区,重碳酸型水范围逐渐缩小,而人类活动来源的氯化物硫酸根浓度升高,地下水盐化和硬化明显. 另外,在垃圾填埋场、排污沟渠等大型污染源附近,水体中的 Na^+、Cl^- 和 NO_3^- 明显升高,水化学类型由 HCO_3-Ca 型向 HCO_3·Cl -Na·Ca 和 SO_4·Cl -Na·Ca 型转化.

2.3 地下水化学演变成因分析

2.3.1 基于“水化学法”的异常数据识别

应用“水化学法”识别人为活动输入对地下水水质的影响程度[23],该方法充分考虑了各水化学指标之间的内在联系,且能反映溶滤、蒸发、混合、离子交换等一系列的水化学演化过程[24]. 马氏距离是 1936 年由印度统计学家马哈拉诺比斯(P. C. Mahalanobis)提出,表示数据协方差距离,能有效计算两个未知样本集的相似度[25]. 本文利用反映水化学演化过程的 5 种水化学图与马氏距离相结合[15],识别水化学异常,量化人类活动对地下水水质的影响程度,预测地下水受污染的潜在风险. 5 种水化学图主要包含水化学类型 Piper 三线图、离子交换作用($Ca^{2+}+Mg^{2+}-Na^+-K^+$)-($HCO_3^-+SO_4^{2-}-Cl^-$)以及 3 种离子比关系[($Ca^{2+}+Mg^{2+}$)-HCO_3^-、(Na^++K^+)-Cl^-、($Ca^{2+}+Mg^{2+}$)-SO_4^{2-}]. 利用水化学图转换的 5 幅二维坐标图,计算图中各点所对应数据集的马氏距离进行异常数据识别. 基于 5 种水化学图异常数据识别情况见表 2 和图 7.

Piper 三线图二维坐标转换公式:

$$X = 1.125 - \left(1 - \frac{vm_{Na+K}}{\sum vm_c}\right)\times 0.5 + \left(1 - \frac{vm_{HCO_3+CO_3}}{\sum vm_a}\right)\times 0.5$$

$$Y = a + \left(1 - \frac{vm_{Na+K}}{\sum vm_c}\right)\times b + \left(1 - \frac{vm_{HCO_3+CO_3}}{\sum vm_a}\right)\times b$$

式中,m_c 表示各阳离子(Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+})的物质的量浓度; m_a 表示各阴离子(HCO_3^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、Cl^-)的物质的量浓度; m_{Na+K} 表示钾离子和钠离子物质的量浓度之和; $m_{HCO_3+CO_3}$ 表示重碳酸根和碳酸根物质的量浓度之和; v 表示对应离子的电荷数; $a = 0.25\times(3^{0.5})/2$; $b = (3^{0.5})/2$.

马氏距离公式:

$$\left(X-\overline{X}\right)' S^{-1}\left(X-\overline{X}\right) = Da^2$$

式中,X 表示数组毫克当量浓度; $\overline{X}$ 表示数组毫克当量浓度平均值; S^{-1} 表示协方差逆矩阵; Da 表示马氏距离.

得到 5 种二维坐标水化学图对应的马氏距离后,分别利用马氏距离的均值加减 3 倍标准差作为临界距离(Di^2),比较 Di^2 与 Da^2 的大小,将 Da^2 值超出临界距离(Di^2)的样品全部剔除,即所有剩余样品对应的马氏距离都处于均值加减 3 倍标准差内. 然后重新计算所剩样品的均值、协方差矩阵、马氏距离,再次比较 Di^2 与 Da^2 的大小,反复循环,直到剩余样品的马氏距离均小于临界距离 Di^2,即无离群样品.

表 2 各水化学图异常数据识别[1)]

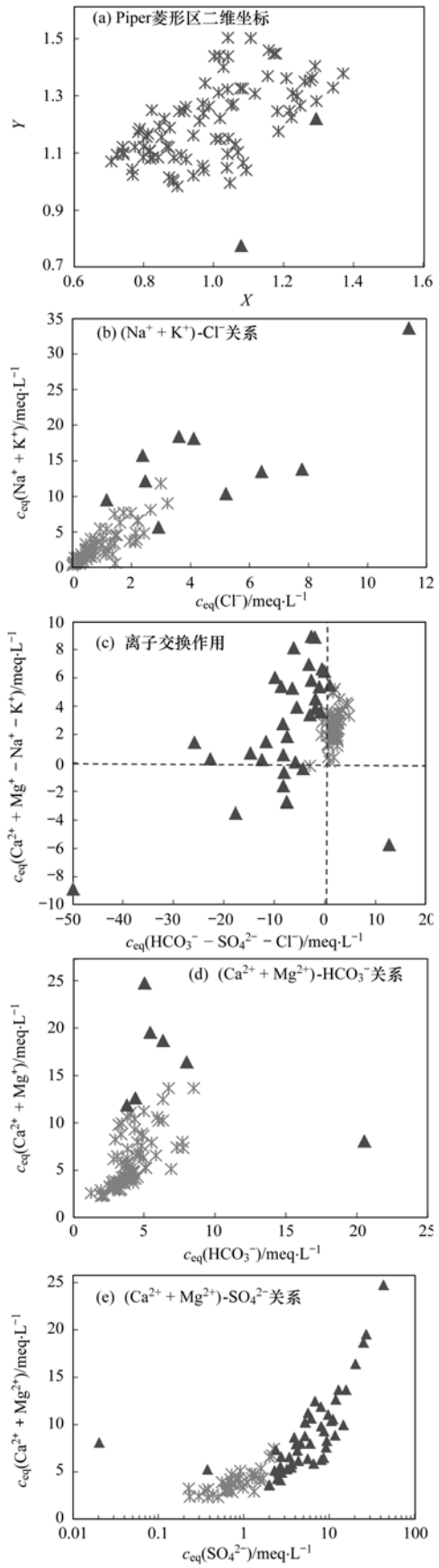
Table 2 Identification of abnormal water chemical data from the hydrochemical maps

水化学图	异常数据识别(组)
Piper 三线图	2
离子交换图	33
(Na^++K^+) - Cl^-	10
($Ca^{2+}+Mg^{2+}$) - HCO_3^-	7
($Ca^{2+}+Mg^{2+}$) - SO_4^{2-}	50
合计	50

1)合计为各方法识别的总数含有重复项

2.3.2 异常数据主要影响指标及其演变成因分析

为探明地下水水质与人类活动影响的关系,对比 2017 年发布的《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)[26]中各指标的限值及推荐的地下水水质单因子评价法,选取 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、NO_3^-、NO_2^-、NH_4^+、Fe、Mn、Zn、Cu、COD、TDS、总硬度、F^-、I^-、Cd、Hg、As、Se 和 Pb 等 23



✳代表正常点，▲代表异常点

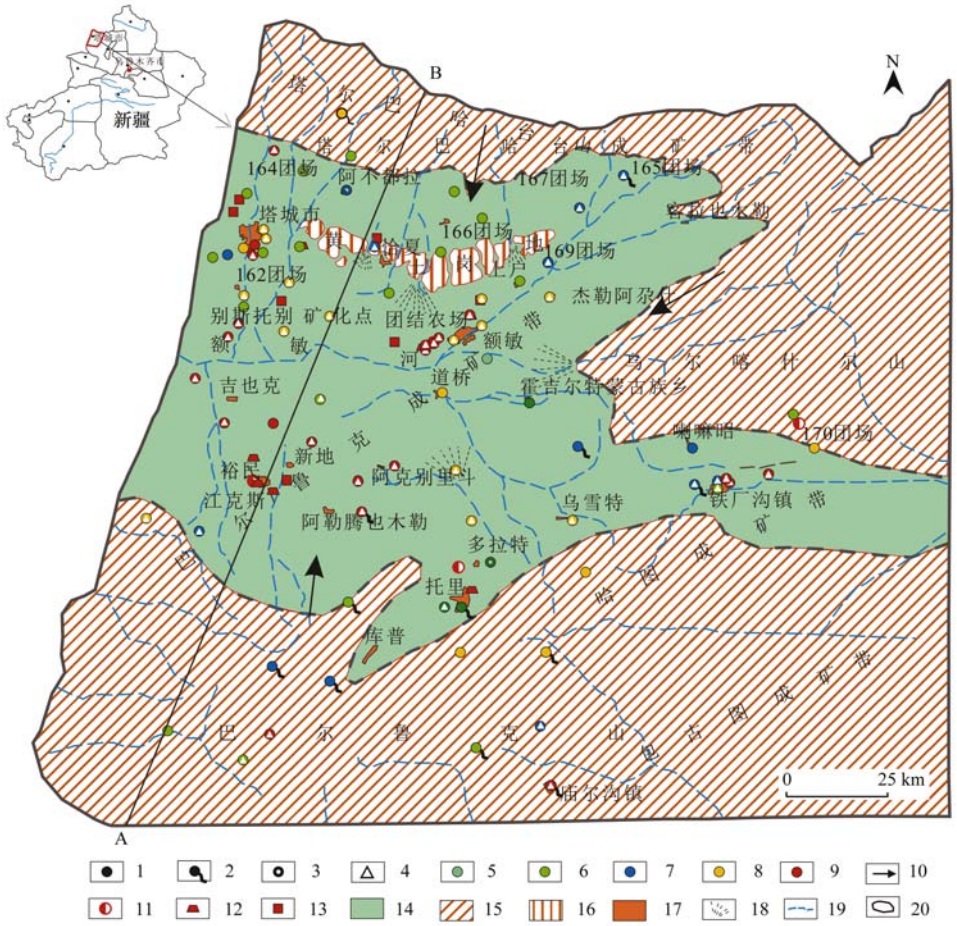
图 7　5 种水化学图法异常数据识别

Fig. 7　Abnormal data identification figures from five water chemical diagram methods

项无机指标对研究区地下水进行质量评价. 由图 8 可见,地下水水质超 Ⅲ 类水与基于“水化学法”识别出的受人类活动影响的异常点分布几乎一致. 主要分布在盆地中部冲洪积平原人类活动密集区及其大型污染源周边. 然而在南北两侧山体受原生沉积环境影响,也分布有地下水水质超Ⅲ类水,其超标组分主要为 Fe、Mn 和 F^-. 位于盆地北部及南部山前倾斜洪积平原区部分样品点为异常点,但地下水水质未超出Ⅲ类水标准. 由此可见,山前地带部分区域地下水已经受人类活动影响,虽然其地下水水质相对较好,但是可以推测该区域地下水化学正在发生变化,其受污染的潜在风险较大.

研究区识别的异常点地下水水质超Ⅲ类水主要影响指标为 SO_4^{2-}、总硬度、TDS、Fe、F^-、Na^+、Mg^{2+} 和 NO_3^- 等 15 项(图 9). 其中,SO_4^{2-}、总硬度和 TDS 的贡献率较大,贡献率均超过了 50%. 其次是 Fe、F^-、Na^+、Mg^{2+} 和 NO_3^- 等,贡献率介于 27%～42%. 另外,Mn、NH_4^+、Cl^-、COD、I^-、NO_2^- 和 As 等指标贡献率 3%～7%. 由此可见,影响塔城盆地地下水水质的指标呈多样性,除人类活动输入造成的“三氮”、Cl^- 和 COD 以外,受原生沉积环境所形成的高硫酸盐、高硬度、高 TDS、高铁锰、高氟等天然劣质水是研究区地下水水质较差的主要原因. 研究区南北两侧山体高铁劣质水主要受盆地地层中铁锰矿物风化溶解所致,盆地中部人类活动强烈区额敏河两侧地下水中铁锰超标点主要为天然劣质水受人类活动的影响其铁锰离子浓度值升高而发生进一步劣变恶化[27].

城镇化进程中,水资源需求量增大,长期以来地下水的过量开采及人类活动产生的污染物直接作用于地下水,对研究区地下水水质造成威胁. 研究区一方面由于过量开采地下水,改变了地下水循环途径,天然水盐平衡遭到破坏,致使研究区水化学特征发生变化. 如前文所述,流经塔尔巴哈台山前地下水,由于潜水位埋深下降,流经的含水层介质颗粒变粗,水循环加快,SO_4^{2-} 离子浓度降低,HCO_3^- 离子浓度升高,地下水溶解性总固体降低,呈淡化趋势. 而盆地北部黄土岗地以南弱倾斜平原区,由于水位下降,流经的含水层介质为含石膏的二叠系、石炭系砂岩组成的冲洪积物[28],地下水在径流过程中可能发生了石膏和泻盐的淋溶作用,地下水中 SO_4^{2-} 离子浓度升高. 而在地下水的总排泄区额敏河两侧,由于过量开采,地下水位持续下降,原来的部分沼泽湿地逐渐消失,蒸发浓缩作用明显减弱,地下水溶解性总固体降低明显,原有的咸水向微咸水演变. 另一方面,塔城盆地城镇人口密集区污染物的直接输入导致地



取样点类型:1. 潜水; 2. 泉; 3. 承压水; 4. 异常点; 水质级别: 5. Ⅰ类水; 6. Ⅱ类水; 7. Ⅲ类水; 8. Ⅳ类水; 9. Ⅴ类水; 边界及其他:10. 地下水流向; 11. 污水处理厂; 12. 垃圾填埋场; 13. 农业污染源; 14. 松散岩类孔隙水 15. 山区基岩裂隙水; 16. 黄土岗地; 17. 城镇区; 18. 洪积扇; 19. 地表水系; 20. 研究区边界

图 8 地下水质量评价及取样点(含异常点)分布示意

Fig. 8 Groundwater quality assessment and sampling points (including abnormal points) distribution map

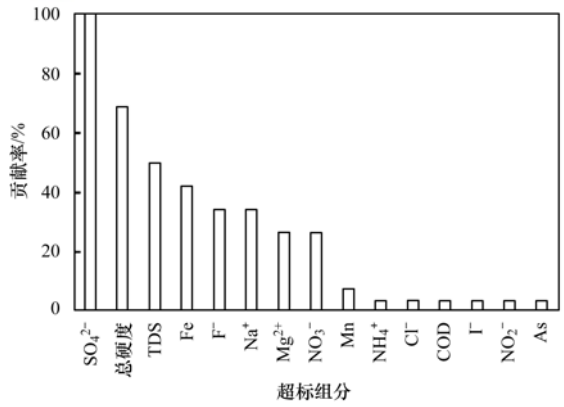


图 9 地下水化学异常点超Ⅲ类水指标贡献率

Fig. 9 Contribution rate of over-standard components of groundwater chemical abnormal data

下水水质恶化,主要表现在 Cl^-、NO_3^-、NO_2^-、NH_4^+ 和 COD 等指标发生变化,出现超Ⅲ类地下水. 受城市生活污水以及垃圾渗滤液等点状污染物的输入影响,城镇周边人口密集区地下水 NO_3^- 离子和耗氧量升高明显. 塔城盆地工矿业薄弱,这可能是地下水不存在重金属超标的主要原因. 总之,从超标组分的贡献程度来看,硫酸根、溶解性总固体、铁和氟离子等指标为塔城盆地地下水水质的主要影响指标,而硝酸根、化学需氧量等为研究区地下水水质的次要影响指标. 塔城盆地劣质地下水的劣质组分主要来源于天然,多为常规指标,大部区域地下水水质受原生沉积环境所控,人类活动诱导而形成的劣变水,也有部分区域叠加人类活动污染输入进一步劣变恶化.

3 结论

(1)塔城盆地地下水化学类型以 HCO_3-Ca(Ca·Mg)、$HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Mg、$SO_4 \cdot HCO_3$-Na·Ca 型为主,沿着地下水流向,地下水由山前的 HCO_3-Ca 和 $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Mg 型水过渡到平原区的 $SO_4 \cdot HCO_3$-Na·Ca 型水,地下水 TDS 也逐渐升高. 对比历史水化学数据,城镇化进程中,研究区地下水化学类型呈复杂的演化特征. 区域上 HCO_3 型水和 $SO_4 \cdot HCO_3$ 型水分布面明显增加,盆地中部额敏河两侧以硫酸根和氯离子为主的高 TDS 水化学类型分布面积明显

减少. 而在城镇周边人口密集区,地下水由 HCO_3-Ca·Mg 和 HCO_3·SO_4-Ca·Mg 型演化为 SO_4·HCO_3-Ca·Mg(Ca·Na)和 SO_4-Na·Ca 型水,地下水呈盐化、硬化趋势.

(2)研究区地下水化学演化受天然和人为因素双重作用影响,其中地下水超采、岩石风化溶解和蒸发浓缩作用是地下水演化的主导因素. 塔城盆地超Ⅲ类地下水劣质组分多为常规指标,主要来源于天然,大部分区域地下水水质受原生沉积环境所控,人类活动诱导而形成劣变水. 研究区地下水化学演变主要受潜水流经的含水层介质及地下水流场变化影响,另外城镇化进程中,排污沟渠污水以及垃圾渗滤液下渗是影响地下水水质的另一重要因素.

参考文献:

[1] 井立红, 高婧, 李新东, 等. 塔城地区干旱时空分布及变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(7): 58-64.
Jing L H, Gao J, Li X D, *et al*. Temporal-spatial distribution and change feature of droughts in Tacheng area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, **23**(7): 58-64.

[2] 庞忠和. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄[J]. 第四纪研究, 2014, **34**(5): 907-917.
Pang Z H. Mechanism of water cycle changes and implications on water resources regulation in Xinjiang uygur autonomous region[J]. Quaternary Sciences, 2014, **34**(5): 907-917.

[3] 王艳, 于东明, 束从杰. 东北资源助力西北边贸城市产业发展研究——以"一带一路"背景下的新疆塔城市为例[J]. 技术经济与管理研究, 2017, (12): 120-124.
Wang Y, Yu D M, Shu C J. Research on the industrial development in northwestern frontier trade cities aided by northeastern resources-case study of Tacheng, Xinjiang, upon the proposal of "One Belt and One Road"[J]. Technoeconomics & Management Research, 2017, (12): 120-124.

[4] Chen Y N, Li W H, Deng H J, *et al*. Changes in central Asia's water tower: past, present and future[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35458.

[5] 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 等. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 2018, **45**(6): 1128-1141.
Sun H Y, Mao Q G, Wei X F, *et al*. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. Geology in China, 2018, **45**(6): 1128-1141.

[6] 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 等. 云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2686-2695.
Zhang Y, Guo C Q, Zhu Y G, *et al*. Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in buckwheat field, Yunnan Province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2686-2695.

[7] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4981-4990.
Zhang T, He J, Li J J, *et al*. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River basin[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4981-4990.

[8] 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 等. 鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1236-1244.
He J, Zhang Y K, Zhao Y Q, *et al*. Hydrochemical characteristics and possible controls of groundwater in the Xialatuo Basin section of the Xianshui river[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1236-1244.

[9] 张雅, 苏春利, 马燕华, 等. 水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2667-2674.
Zhang Y, Su C L, Ma Y H, *et al*. Indicators of groundwater evolution processes based on hydrochemistry and environmental isotopes: a case study of the Dongyuan drinking water source area in Ji'nan city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2667-2674.

[10] 李洲, 李晨曦, 华琨, 等. 黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3559-3567.
Li Z, Li C X, Hua K, *et al*. Groundwater chemistry characteristics and the analysis of influence factors in the Luochuan loess tablelands[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3559-3567.

[11] Huang G X, Liu C Y, Sun J C, *et al*. A regional scale investigation on factors controlling the groundwater chemistry of various aquifers in a rapidly urbanized area: a case study of the Pearl River Delta[J]. Science of the Total Environment, 2017, **625**: 510-518.

[12] 李洁, 罗朝晖, 顾栩, 等. 贵阳地区城镇化对浅层地下水的影响分析[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4): 1-9.
Li J, Luo Z H, Gu X, *et al*. Effect of urbanization on shallow groundwater in Guiyang area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(4): 1-9.

[13] 张小文, 何江涛, 彭聪, 等. 地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3225-3234.
Zhang X W, He J T, Peng C, *et al*. Comparison of identification methods of main component hydrochemical anomalies in groundwater: a case study of Liujiang basin[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3225-3234.

[14] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 不同城镇功能区岩溶地下水化学敏感因子识别[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(4): 484-492.
Zhu D N, Zou S Z, Zhou C S, *et al*. Identification of hydeochemical sensitive factors of karst groundwater in different functional urban areas[J]. Carsologica Sinica, 2018, **37**(4): 484-492.

[15] 彭聪, 何江涛, 廖磊, 等. 应用水化学方法识别人类活动对地下水水质影响程度: 以柳江盆地为例[J]. 地学前缘, 2017, **24**(1): 321-331.
Peng C, He J T, Liao L, *et al*. Research on the influence degree of human activities on groundwater quality by the method of geochemistry: a case study from Liujiang Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, **24**(1): 321-331.

[16] 孙相灿, 杜小弟, 张林, 等. 塔城盆地烃源岩特征及勘探潜力分析[J]. 中国矿业, 2017, **26**(S2): 162-169.
Sun X C, Du X D, Zhang L, *et al*. Analysis of the characteristics and exploration potential of source rocks in Tacheng basin[J]. China Mining Magazine, 2017, **26**(S2): 162-169.

[17] 胡卫忠. 新疆塔城盆地地下水资源评价及开发利用[J]. 干旱区地理, 1987, **10**(2): 31-36.
Hu W Z. Evaluation and development of ground-water resources in Tacheng basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 1987, **10**(2): 31-36.

[18] 李忠, 祈国运, 李庆年, 等. 塔城盆地(1:20 万)水文地质图

及说明书[R]. 新疆地质局第一水文地质工程地质大队, 1979.

[19] 塔城地区统计年鉴[R]. 塔城地区统计局, 2014.

[20] 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 塔城盆地地下水"三氮"污染特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, **46**(2): 42-50.
Lyu X L, Liu J T, Zhou B, *et al*. Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, **46**(2): 42-50.

[21] 孙继朝, 刘景涛. 水斗定深取样器[P]. 中国专利: CN 200720100866.5, 2008.
Sun J C, Liu J T. Bucket depth sampler[P]. Chinese patent: 200720100866.5, 2008.

[22] GB/T 8538-1995, 饮用天然矿泉水检验方法[S].
GB/T 8538-1995, Methods for examination of drinking natural mineral water[S].

[23] 张小文, 何江涛, 刘丹丹, 等. 滹沱河冲洪积扇浅层地下水水质外界胁迫作用分析[J]. 水文地质工程地质, 2018, **45**(5): 48-56.
Zhang X W, He J T, Liu D D, *et al*. An analysis of the stress effects and methods of the shallow groundwater quality in the Hutuo River alluvial fan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, **45**(5): 48-56.

[24] Thilagavathi R, Chidambaram S, Prasanna M V, *et al*. A study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of Pondicherry region, Southeast India[J]. Applied Water Science, 2012, **2**(4): 253-269.

[25] 宋运红. 河北三沟地区水系沉积物数据马氏距离处理与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Song Y H. The processing and the application of stream sediment data with Mahalanobis distance in Sangou area, Hebei Province[D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[26] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].

[27] 王威, 马华东, 邵行来, 等. 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, 2017, **40**(1): 1-3.

[28] 文振旺. 新疆维吾尔自治区土壤地理区划[J]. 土壤学报, 1962, **10**(4): 323-340.
Wen Z W. Soil Geographical regionalization of Xinjiang Tywur autonomous region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1962, **10**(4): 323-340.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 3

Mar. 15, 2020

CONTENTS