

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0058

纪媛媛, 周金龙, 孙英, 等. 新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 551-560. JI Y Y, ZHOU J L, SUN Y, et al. Groundwater chemical characteristics and water quality evaluation for groundwater in plain area of Changji City, Xinjiang[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 551-560. (in Chinese)

新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量评价

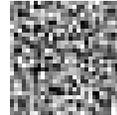
纪媛媛^{1,2,3}, 周金龙^{2,3}, 孙英^{2,3}, 雷米^{2,3}

(1. 新疆农业职业技术学院, 新疆 昌吉 831100; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量时空分布规律,采用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、离子比值法、F 值评分法和质量比对应方法对昌吉市平原区 2016 年 42 组及 2011 年 9 组地下水取样点检测数据进行分析。结果表明:昌吉市平原区潜水水化学类型主要有 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,承压水水化学类型主要有 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型;研究区潜水水化学成分主要受蒸发浓缩和岩石风化共同作用的影响,承压水水化学成分主要受岩石风化作用的影响。通过 2011 年与 2016 年地下水原位点比对发现,潜水取样点中有 3 组质量不变、3 组质量有所改善、2 组质量劣化,承压水取样点 1 组无变化。影响地下水化学特征和质量时空分布的因素主要是自然因素和人为因素。

关键词:昌吉市;平原区;地下水化学特征;质量评价;时空分布

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地下水作为干旱以及半干旱地区生产生活所需淡水的主要来源,近年由于受到地球环境变化以及人类活动干扰,水环境破坏的现象尤为普遍。研究地下水的化学特征,评估其质量,对地下水与环境之间的关系进行剖析,不仅可以明确地下水资源开发潜力,还能够从长远的角度合理地规划和保护水资源^[1]。

作为新疆维吾尔自治区(简称“新疆”)昌吉回族自治州(简称“昌吉州”)的州府,昌吉市坐落于乌石(乌鲁木齐-昌吉-石河子)城市群中央,辐射全疆各地,向西联结中亚、欧洲,是古丝绸之路黄金通道上的重镇之一。昌吉市的主要经济来源是农业生产和工业生产,但日趋严重的地下水资源质量问题制约当地经济和社会发展^[2]。有较少学者对昌吉市平原区地下水的化学特征和质量进行综合分析和评价。本文以昌吉市平原区 2016 年 42 组地下水取样

点检测数据为基础,采用多种手段综合研究该区的水化学特征,并分析其影响因素;同时利用 2011 年 9 组地下水原位点检测数据,揭示该区地下水质量时空变化规律,以期为地下水资源利用和保护提供理论依据。

1 研究区概况

昌吉市地理位置为 $86^{\circ}24'E \sim 87^{\circ}37'E, 43^{\circ}06'N \sim 45^{\circ}20'N$,东边是乌鲁木齐市,南边是巴音郭楞蒙古自治州和静县,西边是昌吉州呼图壁县,北边是阿勒泰地区福海县和塔城地区布克赛尔县。昌吉市从南到北总长 260 km,从东到西总长 30 km。昌吉市总面积约为 $8\,215\text{ km}^2$,由南向北依次为山区(面积 $3\,345\text{ km}^2$)、沙漠区(面积 $2\,201\text{ km}^2$)和平原区(面积 $2\,669\text{ km}^2$)^[3](图 1)。

收稿日期:2020-08-31 修回日期:2021-01-22 网络出版时间:2021-02-09

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20210208.1655.006.html

基金项目:中国地质调查局项目(12120114056401);新疆农业职业技术学院院级课题(XJNZYKJ201806)

作者简介:纪媛媛(1988—),女,山东海阳人,讲师,在读博士,主要从事干旱区地下水利用与保护研究。E-mail:119339607@qq.com

通信作者:周金龙(1964—),男,浙江龙游人,教授,博士生导师,主要从事干旱区地下水资源评价与保护、灌区土壤水-盐运移监测与模拟、土壤地球化学等研究。E-mail:zjzhoujl@163.com



图 1 昌吉市地貌分区与平原区地下水取样点分布

Fig. 1 Landscape partition and distribution of groundwater sampling points in the plain area of Changji City

1.1 地质构造

昌吉市平原区主要存在 2 条区域性隐伏断裂带:一条断裂自头屯河的出山口,经过山前延伸至三屯河渠首站,大致呈东西向,形成第四系平原区和基岩山区的断层接触关系,导致在头屯河和三屯河河口处形成地下跌水;另一断裂带呈北西走向,位于乌伊公路(自东向西穿过昌吉市区)周边,西边延伸至呼图壁背斜南端^[4]。

1.2 地形地貌

昌吉市由西南到东北呈现倾斜势态,南边地势明显高于北边;地貌由 3 部分组成,包括南部的山区、中部的平原区和北部的沙漠区(图 1)。南部属于天山山区,其中的天格尔峰高达 4 562 m;中部属于冲积平原;北部属于古尔班通古特沙漠,地势最低,海拔在 400 m 左右,沙丘之间地势平缓,属于固定-半固定型^[3]。

1.3 气候特征

昌吉市夏季酷热,冬季严寒,昼夜温差大,是典型的中温带大陆性干旱气候。南北气候主要受地形影响,呈现出较大差异,南部山区夏季的降水量较大,北部则凸显为典型的沙漠性气候特征^[3]。该区冬季降水量少于夏季,年平均降水 279.5 mm,年平

均气温 8.5 °C,2011—2016 年年均气温和年降水量见表 1,2014—2016 年降水量呈增加趋势。

表 1 昌吉市年均气温和年降水量统计

Tab. 1 Statistics of annual average temperature and annual precipitation in Changji City

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016
气温/°C	8.2	8.2	9.5	8.4	8.3	8.5
降水量/mm	285.3	241.6	278.4	210.7	311.9	349.2

1.4 地下水的赋存与分布

昌吉市平原区地下水的形成与补给主要受到东西走向断裂带的控制,地下水的溢出带位于乌伊公路北侧,第四系沉积环境、地下水的径流与排泄均受北西走向的隐伏断裂影响^[4-5]。受两处隐伏断裂带和呼图壁背斜的影响,形成断陷谷地,该谷地近东西走向,位于阿苇滩机场南边,具有较厚(大于 500 m)的饱水带,由南向北含水层厚度逐渐减小。地下水从山前扇缘区向平原区方向径流,呈现明显的分带规律,山前为单一结构、厚度较大的砂砾石与卵砾石的潜水含水层,平原区则为上部潜水含水层和下部承压含水层^[4]。研究区水文地质剖面见图 2^[6]。

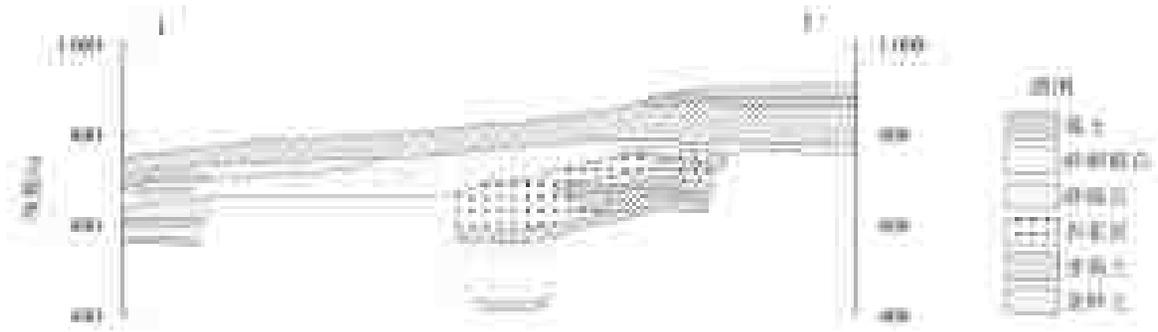


图2 昌吉市平原区水文地质剖面

Fig. 2 Hydrogeological profile of plain area in Changji City

2 地下水取样与检测方法

2.1 地下水取样

在对昌吉市平原地区进行系统研究之后,对该地区的水文地质数据进行调查和收集,并了解人类活动的影响。严格遵循《区域地下水污染调查评价》(DZ/T 0288—2015)^[5]有关规定,于2016年在昌吉市平原区采集地下水样本42组(其中潜水27组、承压水15组);另从新疆昌吉州地质环境监测站获取2011年地下水水样数据9组(其中潜水8组、承压水1组)。取样点分布见图1。

2.2 地下水检测方法

严格按照《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)

和《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164—2004)^[7]相关要求,对昌吉市平原区地下水进行检测和测定。取样点主要的检测项目包括:溶解氧(DO)、电导率(EC)、氧化还原电位(Eh)、酸碱度(pH值)、总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)和八大离子等。对检测数据进行可靠性分析,取样点离子的电荷平衡误差 E 均小于5%,说明检测结果准确可靠^[8]。

3 结果与讨论

3.1 地下水化学特征分析

3.1.1 地下水化学成分含量统计特征

昌吉市平原区2016年(现状年)的地下水化学成分的分析结果见表2。

表2 地下水各指标特征值及超标率统计

Tab. 2 Statistics of index characteristic value and over standard rate in groundwater

地下水类型	评价指标	最大值/(mg·L ⁻¹)	最小值/(mg·L ⁻¹)	平均值/(mg·L ⁻¹)	标准差/(mg·L ⁻¹)	变异系数	超标率/%
潜水	K ⁺	7.9	1.1	2.0	1.6	0.80	—
	Na ⁺	250.5	21.2	61.0	66.4	1.09	37.0
	Ca ²⁺	878.6	22.8	97.5	192.2	1.97	—
	Mg ²⁺	126.5	1.2	21.2	26.6	1.25	—
	Cl ⁻	1 665.2	9.4	101.2	314.3	3.11	3.7
	SO ₄ ²⁻	857.7	25.9	135.0	178.7	1.32	14.8
	HCO ₃ ⁻	244.2	128.2	163.0	31.2	0.19	—
	pH值	8.5	7.5	8.0	0.3	0.04	0
	TDS	3 970.8	197.2	543.4	719.4	1.32	7.4
	TH	2 714.9	80.1	290.2	493.6	1.70	7.4
承压水	K ⁺	2.1	0.1	1.0	0.7	0.70	—
	Na ⁺	135.0	25.6	52.3	30.1	0.58	26.7
	Ca ²⁺	51.3	12.4	28.0	13.8	0.49	—
	Mg ²⁺	51.9	3.1	13.0	14.2	1.09	—
	Cl ⁻	1 797.3	10.0	154.0	456.1	2.96	6.7
	SO ₄ ²⁻	274.0	29.0	75.5	71.8	0.95	6.7
	HCO ₃ ⁻	283.0	105.6	151.3	51.9	0.34	—
	pH值	8.6	7.7	8.1	0.3	0.04	6.7
	TDS	2 914.5	182.4	505.9	691.6	1.37	6.7
TH	2 101.7	44.8	260.8	514.1	1.97	6.7	

注:表中pH值无量纲;“—”表示无标准值。

(1)潜水。研究区潜水中阳离子和阴离子各组分质量浓度平均值排序为 $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$ 和 $HCO_3^{-} > SO_4^{2-} > Cl^{-}$, 其中 Cl^{-} 和 Ca^{2+} 分别以 3.11、1.97 的变异系数呈现出较大的空间变化差异; TDS、TH 的变化范围分别为 197.2 ~ 3 970.8 mg/L 和 80.1 ~ 2 714.9 mg/L; pH 值为 7.5 ~ 8.5, 属于中性-弱碱性。潜水取样点共 27 组, 超标最为严重的是 Na^{+} (超标率 37.0%), SO_4^{2-} 、TDS、TH 等超标率次之, 说明 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、TDS、TH 等是对潜水质量影响较大的指标。

(2)承压水。研究区承压水取样点中阳离子和阴离子各组分质量浓度平均值排序为 $Na^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+}$ 和 $Cl^{-} > HCO_3^{-} > SO_4^{2-}$, 其中 Cl^{-} 和 Mg^{2+} 分别以 2.96、1.09 的变异系数呈现出较大的空间变化差异; TDS、TH 的变化范围为 182.4 ~ 2 914.5 mg/L 和 44.8 ~ 2 101.7 mg/L; pH 值为 7.7 ~ 8.6, 属于中性-弱碱性。承压水取样点共 15 组, 超标最为严重的是 Na^{+} (超标率 26.7%), Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、pH 值、TDS 和 TH 超标率次之, 说明 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、pH 值、TDS 和 TH 是对承压水质量影响较大的指标。

3.1.2 地下水化学类型

通过 Piper 三线图表示研究区地下水现状年水化学类型, 见图 3。水化学类型分布情况, 潜水以 $HCO_3 \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型和 $HCO_3 \cdot SO_4-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型为主, 承压水以 $HCO_3-Na \cdot Ca$ 型和 $HCO_3 \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型为主。

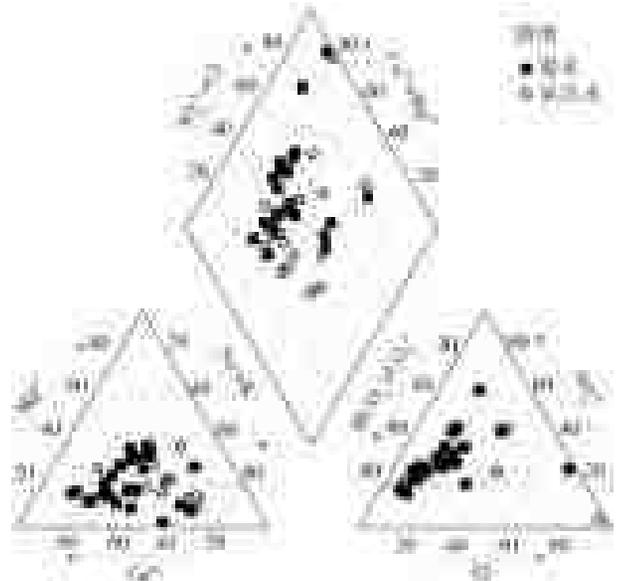


图 3 地下水水化学 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagrams of groundwater hydrochemistry

3.1.3 地下水化学特征影响因素

吉布斯(Gibbs)图在分析地下水化学特征的影响因素时具有直观、方便等优点, 因此将其应用于昌吉市平原区现状年水化学特征分析, 见图 4。当 $\gamma(Na^{+})/\gamma(Na^{+} + Ca^{2+})$ 或 $\gamma(Cl^{-})/\gamma(Cl^{-} + HCO_3^{-})$ 大于 0.5 且 TDS 值较小时, 表示大气降水是影响地下水化学成分的主要因素; 当 $\gamma(Na^{+})/\gamma(Na^{+} + Ca^{2+})$ 或 $\gamma(Cl^{-})/\gamma(Cl^{-} + HCO_3^{-})$ 小于 0.5, TDS 值中等时, 表示岩石风化作用是影响地下水化学成分的主要因素; 当 $\gamma(Na^{+})/\gamma(Na^{+} + Ca^{2+})$ 或 $\gamma(Cl^{-})/\gamma(Cl^{-} + HCO_3^{-})$ 大于 0.5 且 TDS 值较大时, 则表示蒸发浓缩作用是影响地下水化学成分的主要因素^[7,9]。

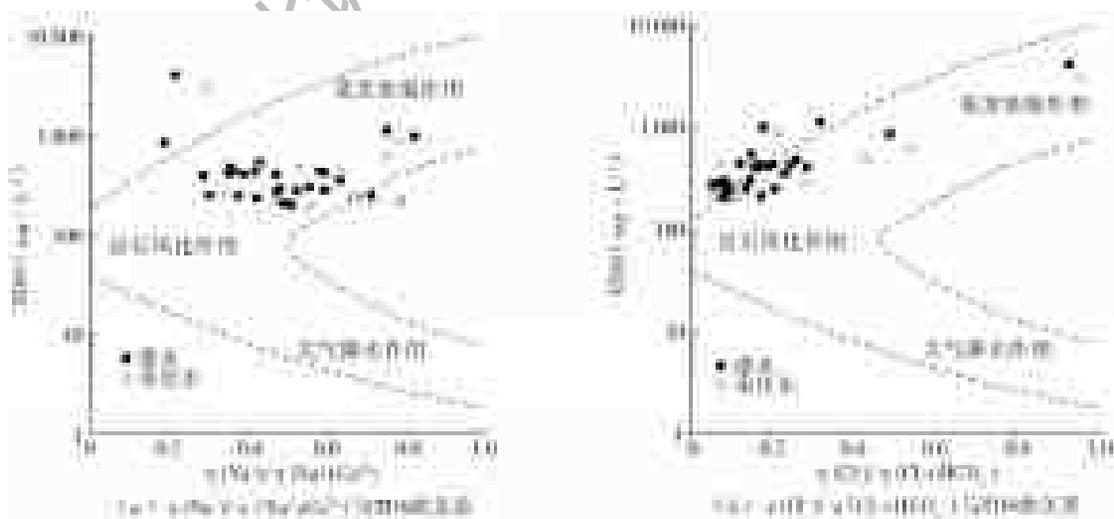


图 4 昌吉市地下水水化学 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs plots of groundwater hydrochemistry in Changji City

根据研究区地下水水化学 Gibbs 图(图 4)可知:潜水和承压水 TDS 范围大多在 0.20 ~ 1.10 g/L, 该值较大;潜水中 $\gamma(Na^{+})/\gamma(Na^{+} + Ca^{2+})$ 多大于

0.5, $\gamma(Cl^{-})/\gamma(Cl^{-} + HCO_3^{-})$ 多小于 0.5, 说明影响研究区潜水的水化学成分的因素主要是蒸发浓缩以及岩石风化共同作用;承压水中 $\gamma(Na^{+})/\gamma(Na^{+} +$

Ca^{2+})多小于0.5, $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 多小于0.5,说明影响研究区承压水的水化学成分的因素主要是岩石风化作用。

3.1.4 地下水化学成分主要来源

采用离子比值法对研究区现状年地下水各化学成分的主要来源进行分析。

当地下水存在 $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 大于1的关系时,表示蒸发岩溶解是构成其化学成分的主要因素,反之则为碳酸盐溶解^[10]。研究区的潜水中 $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 大多在1以上(图5(a)),表示蒸发岩溶解是潜水水化学成分的主要来源;而承压水则大多在1以下,表示碳酸盐溶解是承压水水化学成分的主要来源。

当 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 大于1时,表示岩盐溶解是控制其化学成分的主要因素,反之则为硅酸盐溶解^[11]。研究区取样点大多满足 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 大于1(图5(b)),表明岩盐溶解是地下水中 Na^+ 和 K^+ 的主要来源。

$\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值关系,可以较为直观的反映 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的关键来源:如果 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 主要由碳酸盐溶解所产生,那么存在 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 大于1的关系;相反,则主要由硅酸盐和蒸发岩溶解所产生^[12]。研究区取样点大多符合 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 小于1(图5(c)),表明地下水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的关键来源是蒸发岩和硅酸盐溶解。

同时,阳离子的现交换作用也会产生一定量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,可以通过 $\gamma(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)/[\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ 比值关系反映。当比值关系为负相关时则发生离子交换作用,比值与-1越接近,表示 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生交换反应越激烈^[13]。潜水取样点在拟合之后(图5(d)),直线斜率为-0.994、 R^2 为0.961,承压水取样点在拟合之后,直线斜率为-0.949、 R^2 为0.944,斜率均接近于-1,表明研究区潜水和承压水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子交换作用均较强。

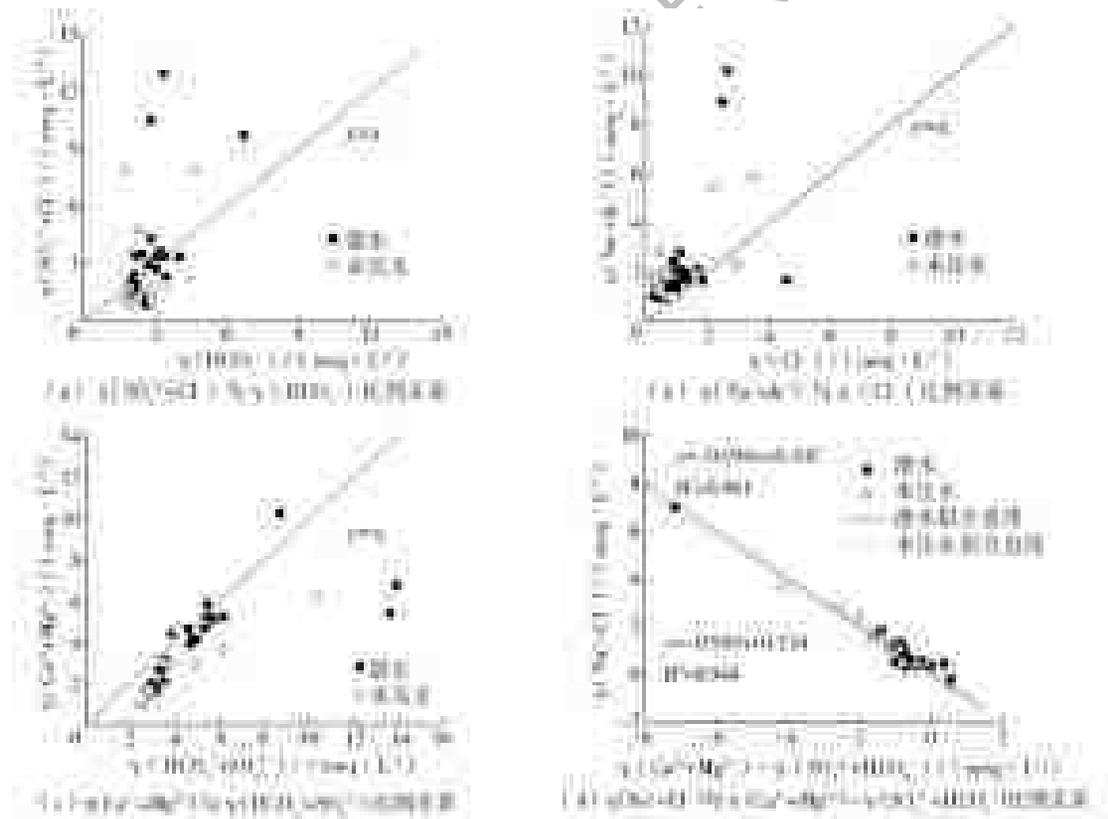


图5 昌吉市地下水主要离子比例关系

Fig. 5 The proportion of main ions in groundwater in Changji City

3.2 地下水质量时空分布特征

3.2.1 评价方法与标准

F 值评分法在国内外地下水质量评价中应用较为广泛,适用于化学指标分级明显、无超标或者多项指标均超标等各类情况^[14]。采用《地下水

质量标准》(GB/T 14848—2017) III类水限值为标准 and F 值评分法^[15],对研究区取样点10项检测指标进行综合评价^[16],具体包括 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、pH值、TH、TDS、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 F^- 等。

3.2.2 地下水质量现状评价

由 F 值评分法评价统计结果(表 3)表明:现状年潜水 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类水取样点分别为 16 组、6 组、0 组、3 组、2 组;承压水 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类水取样点分别为 10 组、2 组、0 组、2 组、1 组。昌吉市地下水质量整体较好,为 I 类水;潜水 I 类水占取样点的 59.3%、II 类水占比为 22.2%、IV 类水占比为 11.1%、V 类水占比为 7.4%;承压水 I 类水占取样点的 66.7%、II 类水占比为 13.3%、IV 类水占比为 13.3%、V 类水占比为 6.7%。

表 3 不同质量类别地下水占比统计

Tab. 3 Statistics of groundwater proportion of different categories
单位: %

地下水质量类别	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
潜水	59.3	22.2	0	11.1	7.4
承压水	66.7	13.3	0	13.3	6.7

研究区现状年地下水质量分布见图 6。潜水取样点 C₁₀、C₄₀ 和 C₄₂ 为 IV 类水,取样点 C₁ 和 C₃ 为 V 类水,主要分布于昌吉市南部的三工镇、二六工镇以及市区北部;承压水取样点 C₁₈ 和 C₃₁ 为 IV 类水,取

样点 C₁₇ 为 V 类水,主要分布在昌吉市北部的庙儿沟乡和市区北部。地下水质量较差的点集中在农业活动较为频繁的昌吉市南部和北部,以及人类活动密集的市区北部。

3.2.3 地下水质量原位点对比

对昌吉市 2011 年与 2016 年的 9 组地下水原位点进行比较(图 6 和表 4),其中潜水有 8 组取样点,承压水有 1 组。由潜水取样点评价结果可知:取样点 C₁、C₂₂、C₄₀ 质量没有发生变化,占潜水总水样的 37.5%;取样点 C₄、C₃₄、C₃₉ 质量从 II 类改善为 I 类水,在潜水总水样占比为 37.5%,均分布于昌吉市南部山前平原的河流出山口位置,加上 2011 年至 2016 年降水量增加,补给水源充足,地下水的补给更新速度较快,地下水质量有所改善;取样点 C₄₁ 从 I 类水劣化为 II 类水,取样点 C₄₂ 从 I 类水劣化为 IV 类水,地下水质量劣化的取样点占潜水总水样的 25%,均位于人类活动较为密集的市区北部。由承压水取样点评价结果可知,取样点 C₂ 的质量没有发生变化,并且地下水质量较佳,属于 I 类水。

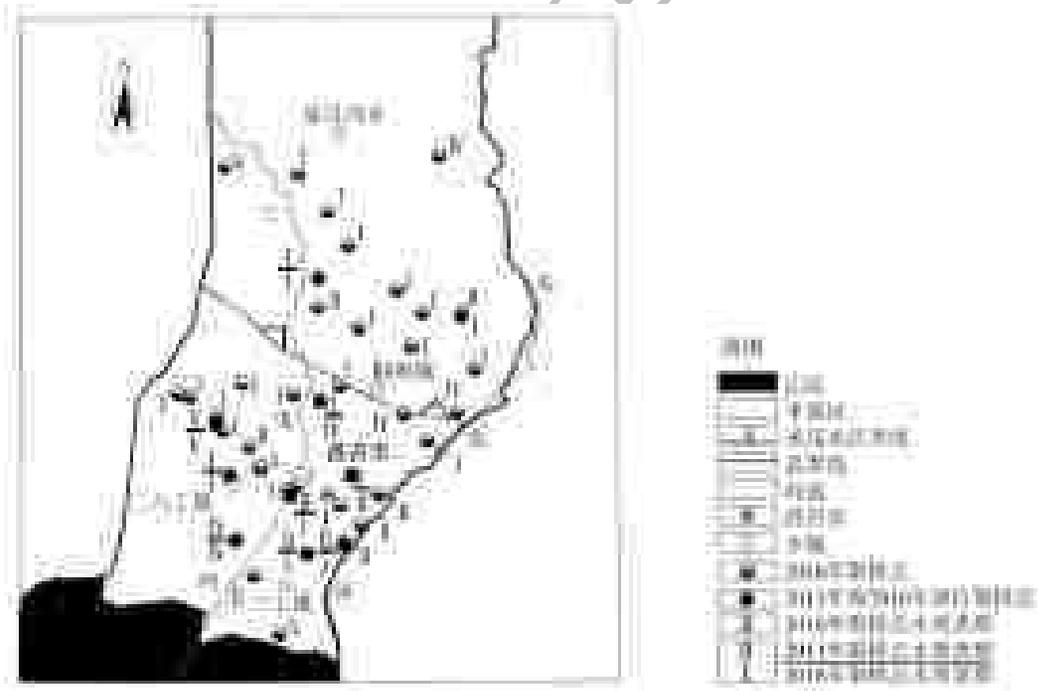


图 6 研究区地下水质量分布

Fig. 6 Groundwater quality distribution in the study area

表 4 2011 年与 2016 年原位取样点质量类别对比

Tab. 4 Comparison of water quality categories of the same sampling points in 2011 and 2016

地下水类型	潜水								承压水
	C ₁	C ₄	C ₂₂	C ₃₄	C ₃₉	C ₄₀	C ₄₁	C ₄₂	C ₂
2011 年质量类别	V	II	I	II	II	IV	I	I	I
2016 年质量类别	V	I	I	I	I	IV	II	IV	I

2011年潜水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS、TH平均值分别为188.19 mg/L、184.20 mg/L、0.76 g/L、460.86 mg/L;承压水则分别为14.65 mg/L、33.42 mg/L、0.20 g/L、84.18 mg/L。2016年潜水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS、TH平均值分别为101.2 mg/L、135.0 mg/L、0.54 g/L、290.2 mg/L;承压水平均值分别为154.0 mg/L、75.5 mg/L、0.51 g/L、260.8 mg/L。由数据分析可知,2011年到2016年潜水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS、TH平均值均有所降低,承压水则均呈现升高态势。

昌吉市地下水质量总体呈改善趋势(表4),主要是由于含水层渗透性强、补给(主要是地表水补给)、排泄(主要是径流排泄和抽取地下水),以及近年来河流天然年径流量和降水量逐年增加^[17]。

3.3 地下水化学特征及质量时空分布规律原因简析

影响昌吉市地下水化学特征及质量时空分布规律的因素较为复杂,主要由自然因素(包括包气带岩性和地下水补给等)与人为因素(包括超采、农业、工业和其他污染等)构成^[18]。

(1)昌吉市从南向北,地形地貌分为山区—平原—沙漠,形成补给—径流—排泄的地下水流模式,属于较为完整的水文地质单元。该市为典型的干旱内陆盆地,引起土壤盐渍化的主要原因包括特殊干旱的气候、封闭的地形、较高的地下水位和丰富的盐分来源^[19]。这也是导致昌吉市平原区地下水中TDS超标率较高的主要原因。随着蒸发浓缩,溶解度小的钙、镁的重碳酸盐部分析出, SO_4^{2-} 及 Na^+ 逐渐成为主要成分。随着质量浓度不断增加,水中的硫酸盐达到饱和后析出,形成以 Cl^- 和 Na^+ 为主的高TDS水^[20]。地下水的补给主要是降雨与地表水的入渗,盐分随着水被带入浅层地下水中,导致了地下水潜水质量易劣化^[21]。

(2)昌吉市矿产资源丰富。由于水岩相互作用导致芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)等可溶性盐类中的 Na^+ 和 SO_4^{2-} 等溶解后进入地下水, Na^+ 和 SO_4^{2-} 的含量有所增加;此外,燃烧煤炭所产生的 SO_2 会伴随着降雨入渗等形式补给地下水,从而导致地下水中的 SO_4^{2-} 质量浓度显著增高^[22],导致研究区地下水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型且较多取样点 Na^+ 和 SO_4^{2-} 质量浓度高于Ⅲ类水限值标准,浅层地下水质量较差。

(3)根据2011年的全国水利普查数据,该市城区及近郊的地下水主要用于居民生活用水与工农业用水,年地下水开采量达3500万 m^3 ^[23]。对比昌吉

市2006年12月和2015年12月的22个浅层地下水水位监测井,其中21组水位明显下降^[4],地下水超采引起地下水水位下降等问题,包气带盐分通过降水、灌溉水入渗补给地下水,导致地下水质量劣化。

(4)研究区是重要的农业种植和示范基地,在种植过程中广泛使用化肥、农药等,含有大量 NH_4^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 等离子。这些离子伴随降水和灌溉,经过包气带,入渗补给浅层地下水,导致地下水的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、总硬度和矿化度等含量高于污染起始值,使地下水质量劣化^[24]。

(5)根据《新疆水资源公报》统计数据,昌吉州2014—2016年的废污水排放量分别是1.406亿、1.320亿、1.525亿t,处理后的污水仍含有大量 Cl^- 等离子被排放到河道,对潜水质量产生直接影响;承压水超采使潜流向承压含水层越流,导致承压水中的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 质量浓度较高^[7]。

(6)研究区地下水质量2016年较2011年有所好转,主要原因是近年来该地区的降水量增大,加之政府部门对地下水开采、化工业、矿业、化肥使用和污水处理等方面严格把关,地下水资源的管理和水污染的治理取得了一定成效。

4 结论

(1)昌吉市平原区潜水和承压水均呈现中性-弱碱性, Na^+ 超标率最高,TDS含量偏高的特征;潜水取样点中 Cl^- 、 Ca^{2+} 空间变化差异较大,承压水则以 Cl^- 、 Mg^{2+} 空间变化差异较大。

(2)研究区潜水以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主,承压水以 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型为主。

(3)研究区潜水水化学成分主要受蒸发浓缩和岩石风化共同作用的影响,承压水水化学成分主要受岩石风化作用的影响。

(4)研究区2016年地下水质量整体较好,为Ⅰ类水;潜水Ⅰ类水占取样点的59.3%、Ⅱ类水占比为22.2%、Ⅳ类水占比为11.1%、Ⅴ类水占比为7.4%;承压水Ⅰ类水占取样点的66.7%、Ⅱ类水占比为13.3%、Ⅳ类水占比为13.3%、Ⅴ类水占比为6.7%。

(5)通过研究区2011年与2016年地下水原位点比对发现:潜水中质量无变化的取样点有3组;质量改善的取样点有3组,分布于昌吉市南部山前平原的河流出口位置;质量劣化的取样点有2组,位于人类活动较为密集的市区北部。承压水 C_2 取样点的质量没有变化且地下水质量较佳,属于Ⅰ类水。

参考文献(References):

- [1] SLAMA T, SEBEI A. Spatial and temporal analysis of shallow groundwater quality using GIS, Grombalia aquifer, northern Tunisia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, 170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103915>.
- [2] 赵江涛, 周金龙, 高业新, 等. 新疆天山北坡平原区地下水质量与污染评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(5): 888-894. (ZHAO J T, ZHOU J L, GAO Y X, et al. Assessment of groundwater quality and pollution in the plain area of northern slope of Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(5): 888-894. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.05.015.
- [3] 昌吉市人民政府办公室. 昌吉市基本情况[EB]. http://www.cjs.gov.cn/info/iList.jsp?cat_id=28027, 2019-04-15. (Changji City basic information [EB]. http://www.cjs.gov.cn/info/iList.jsp?cat_id=28027, 2019-04-15. (in Chinese))
- [4] 何玉敬. 新疆昌吉市地下水动态分析研究[J]. *干旱环境监测*, 2019, 33(4): 155-158, 190. (HE Y J. Dynamic analysis of groundwater in Changji City of Xinjiang[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2019, 33(4): 155-158, 190. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1504.2019.04.003.
- [5] 雷米, 周金龙, 吴彬, 等. 新疆昌吉州东部平原区地下水水文地球化学演化分析[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 105-115. (LEI M, ZHOU J L, WU B, et al. Hydrogeochemical evolution process of groundwater in the eastern plains in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 105-115. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2020.01.12.
- [6] 王彩华. 新疆维吾尔自治区环境地质图集[M]. 昌吉: 新疆金版印务有限公司, 2005. (WANG C H. Environmental geological atlas of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Changji: Xinjiang Jinban Printing Company, 2005. (in Chinese))
- [7] 雷米, 周金龙, 曾妍妍, 等. 昌吉州东部平原区地下水质量时空分布规律[J]. *人民黄河*, 2020, 42(6): 89-94. (LEI M, ZHOU J L, ZENG Y Y, et al. Spatial and temporal distribution law of groundwater quality in the eastern plains of Changji Hui Autonomous Prefecture[J]. *Yellow River*, 2020, 42(6): 89-94. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.06.018.
- [8] 张杰, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆叶尔羌河流域平原区浅层地下水咸化空间分布及成因[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 126-134. (ZHANG J, ZHOU J L, NAI W H, et al. Spatial distribution and cause of salinization of shallow groundwater in plain terrain of the Yarkant River basin, Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23): 126-134. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.016.
- [9] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090. DOI: 10.1126/science.170.3962.1088.
- [10] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. *环境化学*, 2017, 36(2): 380-389. (LUAN F J, ZHOU J L, JIA R L, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu basin, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(2): 380-389. (in Chinese)) DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016062001.
- [11] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3230-3237. (ZHANG Y, WU Y, YANG J, et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(9): 3230-3237. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjx.2015.09.014.
- [12] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区地下水水化学特征及其演化驱动机理[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 733-740. (LI H Y, FENG Q, CHEN L J, et al. Hydrochemical characteristics and evolution mechanism of groundwater in the Minqin Oasis[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 733-740. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2017.04.03.
- [13] CHITSAZAN M, AGHAZADEH N, MIRZAEI Y, et al. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia City, Iran[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, 21(1): 331-351. DOI: 10.1007/s10668-017-0039-1.
- [14] 王一凡, 张永祥, 王昊, 等. 地下水质量综合评价方法的对比分析及应用[J]. *河北工业科技*, 2014, 31(6): 457-462. (WANG Y F, ZHANG Y X, WANG H, et al. Comparative analysis and application of groundwater quality comprehensive evaluation methods[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2014, 31(6): 457-462. (in Chinese)) DOI: 10.7535/hbgykj.2014yx06001.
- [15] 张新钰, 辛宝东, 刘文臣, 等. 三种地下水水质评价方法的对比分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(3): 113-118. (ZHANG X Y, XIN B D, LIU W C, et al. Comparative analysis on three evaluation methods

- for groundwater quality assessment [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, 22(3): 113-118. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; XBSZ. 0. 2011-03-030.
- [16] 方运海, 郑西来, 彭辉, 等. 基于模糊综合优化模型的地下水质量评价[J]. *地学前缘*, 2019, 26(4): 301-306. (FANG Y H, ZHENG X L, PENG H, et al. Groundwater quality assessment based on optimization of fuzzy synthetic evaluation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(4): 301-306. (in Chinese) DOI: 10. 13745/j. esf. sf. 2019. 5. 27.
- [17] 李巧, 周金龙, 高业新, 等. 新疆北部平原区 2003—2011 年地下水水质变化特征[J]. *地学前缘*, 2014, 21(4): 124-134. (LI Q, ZHOU J L, GAO Y X, et al. Variations of groundwater quality in 2003-2011 in the plain area of north Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 124-134. (in Chinese) DOI: 10. 13745/j. esf. 2014. 04. 014.
- [18] WANG S X. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Yanqi basin of Xinjiang Province, northwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 427-440. DOI: 10. 1007/s12665-013-2450-8.
- [19] 朱高飞. 农田盐渍化土壤光谱特征及其遥感反演与分类研究: 以昌吉州为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013. (ZHU G F. Spectral characteristics of salt-affected farmland soil and its remote sensing inversion and classification: A case study in Changji[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [20] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2018. 6. (ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, et al. *Fundamentals of hydrogeology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [21] BARRON O V, BARR A D, DONN M J. Evolution of nutrient export under urban development in areas affected by shallow watertable[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 443: 491-504. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2012. 10. 085.
- [22] 田夏, 费宇红, 李亚松, 等. 南襄盆地浅层地下水质量影响因子解析[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 132-136. (TIAN X, FEI Y H, LI Y S, et al. Impact factors of shallow groundwater quality in the Nanyang-Xiangyang basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6): 132-136. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 06. 019.
- [23] 陈俊仁. 昌吉市地下水资源超采影响分析及应对措施[J]. *水资源开发与管理*, 2017(8): 26-28, 32. (CHEN J R. Analysis on groundwater resources over exploitation influence in Changji and countermeasures [J]. *Water Resources Development and Management*, 2017(8): 26-28, 32. (in Chinese) DOI: 10. 16616/j. cnki. 10-1326/TV. 2017. 08. 008.
- [24] 谢辉, 古丽尼莎, 孙振海, 等. 昌吉市浅层地下水现状及开发潜力分析[J]. *西部探矿工程*, 2013(10): 137-139, 143. (XIE H, GU L N S, SUN Z H, et al. Analysis on the current situation and development potential of shallow groundwater in Changji [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2013(10): 137-139, 143. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; XBTK. 0. 2013-09-047.

Groundwater chemical characteristics and water quality evaluation for groundwater in plain area of Changji City, Xinjiang

JI Yuanyuan^{1,2,3}, ZHOU Jinlong^{2,3}, SUN Ying^{2,3}, LEI Mi^{2,3}

(1. *Xinjiang Agricultural Professional Technological College, Changji 831100, China;*

2. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;*

3. *Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China)*

Abstract: Changji City is the capital of Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang, and the increasingly serious quality problem of groundwater resources seriously restricts the local economic and social development. Based on the detection data of 42 groups of groundwater samples in Changji plain in 2016 (including 27 groups of unconfined groundwater samples and 15 groups of confined groundwater samples), the chemical characteristics of groundwater in this area are studied comprehensively by various means and its influencing factors are analyzed. At the same time, the detection data of nine groups of groundwater in-situ samples in 2011 (including eight groups of unconfined groundwater samples and one group of confined groundwater sample) were used to reveal the law of spatial and temporal variation of groundwater quality in this area, in order to provide theoretical basis for the utilization and protection of groundwater resources.

The mathematical statistics method is used to analyze the chemical composition content characteristics of groundwater in Changji City, Piper diagram is used to analyze the chemical types of groundwater, Gibbs figures are used to analyze the influencing factors of chemical characteristics of groundwater, ion ratio method is used to analyze the main sources of chemical composition of groundwater in the current year, *F* value evaluation method is used to evaluate the groundwater quality category, and quality

comparison method is used to analyze the changes of groundwater quality in-situ in 2011 and 2016.

The relationship between the average content of cations and anions in unconfined groundwater is $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ and $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$. The confined groundwater is $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ and $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$. The current year groundwater hydrochemical types were obtained by Piper diagram, with $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ types dominating in unconfined groundwater and $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ types dominating in confined groundwater. The chemical characteristics of groundwater in current year were analyzed by Gibbs figures. The TDS range of unconfined groundwater and confined groundwater was mostly between 0.20 and 1.10 g/L. In unconfined groundwater, $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ is more than 0.5 and $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ is less than 0.5. In confined groundwater, $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ and $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ are mostly less than 0.5. The statistical results evaluated by *F* value evaluation method show that the samples of groundwater quality in the current year of unconfined groundwater are 16 groups, 6 groups, 0 groups, 3 groups, and 2 groups for Class I, Class II, Class III, Class IV, and Class V groundwater, respectively. The samples of groundwater quality in the current year of unconfined groundwater are 10 groups, 2 groups, 0 groups, 2 groups, and 1 group. Compared with 9 groups of groundwater in-situ points in 2011 and 2016, the quality category of samples C_1 , C_{22} , and C_{40} in unconfined groundwater did not change, the quality category of samples C_4 , C_{34} , and C_{39} improved from Class II to Class I, C_{41} deteriorated from Class I to Class II, and C_{42} deteriorated from Class I to Class IV. The quality category of C_2 in confined groundwater sample did not change.

Both unconfined groundwater and confined groundwater in the plain area of Changji City are characterized by neutral to weakly alkaline, the highest Na^+ over-standard rate and high TDS content. The spatial variation of Cl^- and Ca^{2+} in unconfined groundwater is quite different, while the spatial variation of Cl^- and Mg^{2+} in confined groundwater is quite different. The hydrochemical types of unconfined groundwater are mainly $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$, while the confined groundwater are mainly $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca}$. The chemical composition of unconfined groundwater in the study area is mainly affected by the combined effect of evaporation concentration and rock weathering, and the confined groundwater is mainly affected by the effect of rock weathering. The overall quality of groundwater in the study area was better in 2016, mainly Class I. The samples of Class I, Class II, Class IV, and Class V in unconfined groundwater accounted for 59.3%, 22.2%, 11.3%, and 7.4% of the total, respectively. While the samples of Class I, Class II, Class IV, and Class V in confined groundwater accounted for 66.7%, 13.3%, 13.3%, and 6.7% of the total, respectively. Compared with the groundwater in-situ samples in 2011 and 2016, it was found that the quality category of three groups of unconfined groundwater sampling sites remained unchanged, three groups improved, two groups deteriorated, and the quality category of one group of the confined groundwater sampling sites had no change. The main factors that affect the chemical characteristics and the spatial and temporal distribution of groundwater quality are natural factors and human factors.

Key words: Changji City; plain area; chemical characteristics of groundwater; quality evaluation; spatial and temporal distribution

