

doi: 10.12029/gc20220311

孙岐发, 杨柯, 孙茁桉, 贾林刚, 田辉, 郭晓东, 李旭光, 朱巍. 2022. 长春新区地下水水质特征及其对生态健康的评价[J]. 中国地质, 49(3): 834–848.

Sun Qifa, Yang Ke, Sun Zhuo'an, Jia Lin'gang, Tian Hui, Guo Xiaodong, Li Xuguang, Zhu Wei. 2022. Characteristics of groundwater quality in Changchun New Area and its evaluation on ecological health[J]. Geology in China, 49(3):834–848 (in Chinese with English abstract).

长春新区地下水水质特征及其对生态健康的评价

孙岐发^{1,2}, 杨柯¹, 孙茁桉³, 贾林刚⁴, 田辉², 郭晓东², 李旭光², 朱巍²

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 国家珠宝玉石质量监督检验中心沈阳实验室, 辽宁 沈阳 110034; 4. 中煤科工生态环境科技有限公司, 北京 100031)

摘要:【研究目的】为查明长春新区地下水特征及演化, 支撑东北老工业基地建设。【研究方法】本文在调查取样的基础上, 充分利用前人成果资料, 应用 SPSS 分析软件、地下水污染分析软件, 通过对长春新区的地质条件、水化学参数空间分布特征、地下水化学类型、地下水化学成因的分析, 得出系列结果。【研究结果】长春新区地下水的硬度较高且矿化度较大, HCO_3^- 在地下水的离子中占据主导, Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 在地下水中的绝对质量浓度较高; pH、 H_2SiO_3 、Sr、TDS、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的质量浓度相对稳定; 地下水离子以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主; Na^+ 和 K^+ 同时来自岩盐和硅酸岩的溶解; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐的溶解。区内地下水质量可分为四级, 其中 V 类水未评出。【结论】总体来看, I 类水占 7.50%, II 类水占 32.10%, III 类水占 20.80%, IV 类水占 39.60%。较好以上地下水占 60.4%, 总体情况较好。

关键词: 长春新区; 地下水; 水质特征; 水文环境地质调查工程

创新点: 研究了国家级新区的地下水化学、成因和演化, 得出地下水的水质特征, 有效支撑区域生态健康发展。

中图分类号: X523; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2022)03–0834–15

Characteristics of groundwater quality in Changchun New Area and its evaluation on ecological health

SUN Qifa^{1,2}, YANG Ke¹, SUN Zhuo'an³, JIA Lin'gang⁴,
TIAN Hui², GUO Xiaodong², LI Xuguang², ZHU Wei²

(1. Harbin natural resources comprehensive investigation center, CGS, Haerbin 150081, Heilongjiang, China; 2. Shenyang Center of Geological Survey, CGS, Shenyang 110034, Liaoning, China; 3. Shenyang Laboratory of National Gemstone Testing Center, Shenyang 110034, Liaoning, China; 4. Ecological Environment Technology Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Beijing 100013, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological and environmental survey engineering.

收稿日期: 2020–01–31; 改回日期: 2020–03–21

基金项目: 中国地质调查局项目“长吉经济圈地质环境综合调查”(DD20160265)和“松嫩平原海伦地区黑土地地表基岩层调查”(DD20211589)共同资助。

作者简介: 孙岐发, 男, 1966 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质和环境地质调查研究工作;

E-mail: 152468435@qq.com。

通讯作者: 杨柯, 男, 1980 年生, 博士, 从事勘查地球化学的研究工作; E-mail: yangkejs@qq.com。

[Objective] In order to find out the characteristics and evolution of groundwater in Changchun new area and support the construction of northeast old industrial base. **[Methods]** Based on the investigation and sampling, this paper makes full use of the previous achievements and data, and applies SPSS analysis software and groundwater pollution analysis software, through the analysis of the geological conditions, the spatial distribution characteristics of hydrochemical parameters, the chemical types of groundwater and the chemical causes of groundwater in Changchun new area, a series of results are obtained. **[Results]** The groundwater in Changchun new area has high hardness and mineralization, HCO_3^- is dominant in the ions of groundwater, and the absolute mass concentration of Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ is relatively high; the mass concentration of pH 、 H_2SiO_3 、 Sr 、 TDS 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- is relatively stable; the ions of groundwater are mainly HCO_3^- and Ca^{2+} ; Na^+ and K^+ are from the dissolution of rock salt and siliceous rock; Ca^{2+} and Mg^{2+} are mainly from carbonate dissolution of salt. The quality of groundwater in the area can be divided into four grades, among which class V water is not evaluated. **[Conclusions]** In general, class I water accounts for 7.50%, class II water 32.10%, class III water 20.80%, class IV water 39.60%. More than 60.4% of the groundwater is in good condition.

Key words: Changchun new area; groundwater; water quality characteristics; hydrogeological and environmental survey engineering

Highlights: The chemistry, origin and evolution of groundwater in national new areas are studied, and the water quality characteristics of groundwater are obtained, which can effectively support the healthy development of regional ecology.

About the first author: SUN Qifa, male, born in 1966, doctor, professor level senior engineer, mainly engaged in hydrogeology, engineering geology and environmental geology investigation and research; E-mail: 152468435@qq.com.

About the corresponding author: YANG Ke, male, born in 1980, doctor, mainly engaged in exploration geochemistry; E-mail: yangkejs@qq.com.

Fund Support: Supported by the comprehensive geological environment survey of Changji economic circle (No.DD20160265) and investigation on surface matrix layer of black land in Hailun area of Songnen Plain (No.DD20211589) of China Geological Survey.

1 引言

长春新区是2016年国务院在长东北经济区的基础上批准的国家级新区,包括朝阳区的双德乡、宽城区的奋进乡、二道区的龙嘉镇以及九台区的西营城街道,规划控制面积499 km²。建设好长春新区作为推进“一带一路”建设、加快新一轮东北地区等老工业基地振兴的重要举措,促进吉林省经济发展和东北地区全面振兴发挥重要支撑作用。水是生命的源泉、农业的命脉、工业的血液、城市的灵魂,是人类和一切生物生存不可缺少的物质基础。而长春又是严重缺水的城市,研究长春新区地下水水质特征对未来新区发展、生态保护意义重大。

地下水化学特征及形成作用是水文地质学科的重要研究内容,开展相关研究对区域地下水资源的利用和管理及生态环境的建设与保护都具有十分重要的意义(沈照理等,1993;钱会和马致远,2005)。地下水化学特征由物源的沉积环境及沉积组合特征决定,并受自然和人为因素交互影响(章光新等,2006;谢振华等,2010;安乐生等,2012;李旭光等,2019)。当前,国内外学者主要采用数理统计(孙立梅和刘晓洁,2005;王水献等,2007;陈倩

等,2012;邢立亭等,2015;张涛等,2018)、Piper 三线图、舒卡列夫分类法、相关性分析等技术方法对地下水水质、水化学特征进行研究(孙斌和邢立亭,2010;张伟敬等,2010;袁建飞等,2016;孙岐发等,2017;孙岐发等,2019)。

地下水在运移过程中,与介质发生多种多样的物理化学作用,其中包括溶解/沉淀、酸碱平衡、吸附/解吸及氧化还原作用等(章光新等,2006;姜凌,2009;杨磊等,2015;冯亿年等,2015;杨炳超等,2016;孙厚云等,2018)。依据地质、水文地质条件的不同,这些作用往往控制着一个地区地下水的化学成分,利用离子比例系数法认识地下水的形成及演化。

依据中国地下水质量状况和人体健康风险,参照生活饮用水、工业、农业等用水质量要求,有学者(高彦伟等,2008;王意惟和王宇昕,2009;尹华等,2009;任光等,2015)在长春地区作过地下水水质评价以及后备水源地评价,但针对长春新区地下水还没有人专门进行过研究。

2 研究区概况

长春新区分布在长春市外围的西南和东北两面,地理坐标:43°40′~44°11′N,125°12′~125°53′E,地

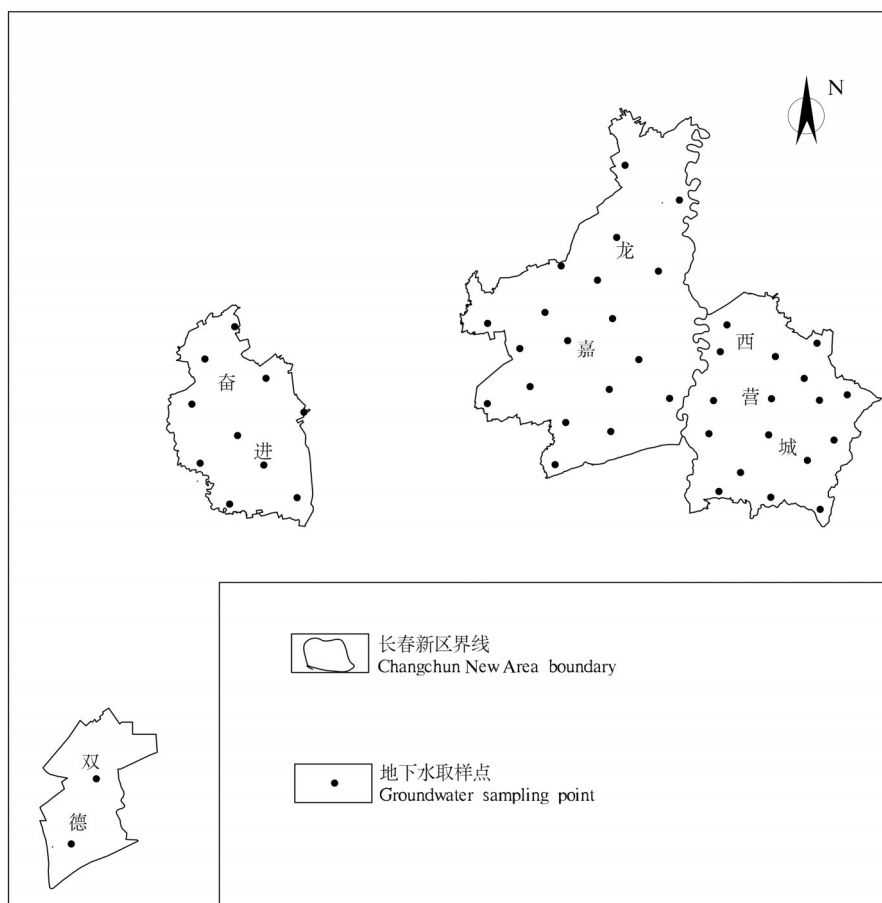


图1 长春新区及取样点位置图
Fig.1 Location of Changchun New Area and sampling point

势东南高,西北低(图1)。按成因类型、形态特征,分为构造剥蚀、剥蚀堆积、堆积3个成因类型和大黑山丘陵、黄土波状台地、一级阶地及漫滩三个形态单元。其中黄土波状台地分布最广,其次为一级阶地及漫滩。属于北温带大陆性季风气候,春季干旱少雨,夏季炎热多雨,秋季凉爽早霜,冬季寒冷漫长。全区降水多年平均为576.7 mm,降水主要集中在6—9月份,占全年降水的60%~80%,蒸发量全区1741 mm,是降水的3倍。较大的水系为雾开河、饮马河与伊通河。石头口门水库位于研究区东北部,库区有一小部分位于研究区内。石头口门水库位于饮马河中游,集水面积4944 km²,库容量为7.02亿m³。

研究区主要地层有侏罗系、白垩系和第四系。地下水类型划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、基岩裂隙水3种类型,地下水富水性差别大

(图2)。

3 研究方法

3.1 地下水水样采集与测试方法

地下水采样点分布于长春新区,采样时间为2016年7月,采样点控制面积为499 km²,共采集地下水水样48组(其中平行样1组),采样点分布见图1,水样严格按《地下水环境监测技术规范(H/164-2004)》进行采集、保存和送样。

水样测试由自然资源部东北矿产资源监督检测中心测试完成。利用全谱直读等离子体光谱法(ICP-OES)测定Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺,用离子色谱法(IC)测定Cl⁻、SO₄²⁻,用紫外分光光度法(UV)测定H₂SiO₃,用重量法(GR)测定溶解性总固体(Total Dissolved Solid, 简写TDS),容量法(VOL)测定

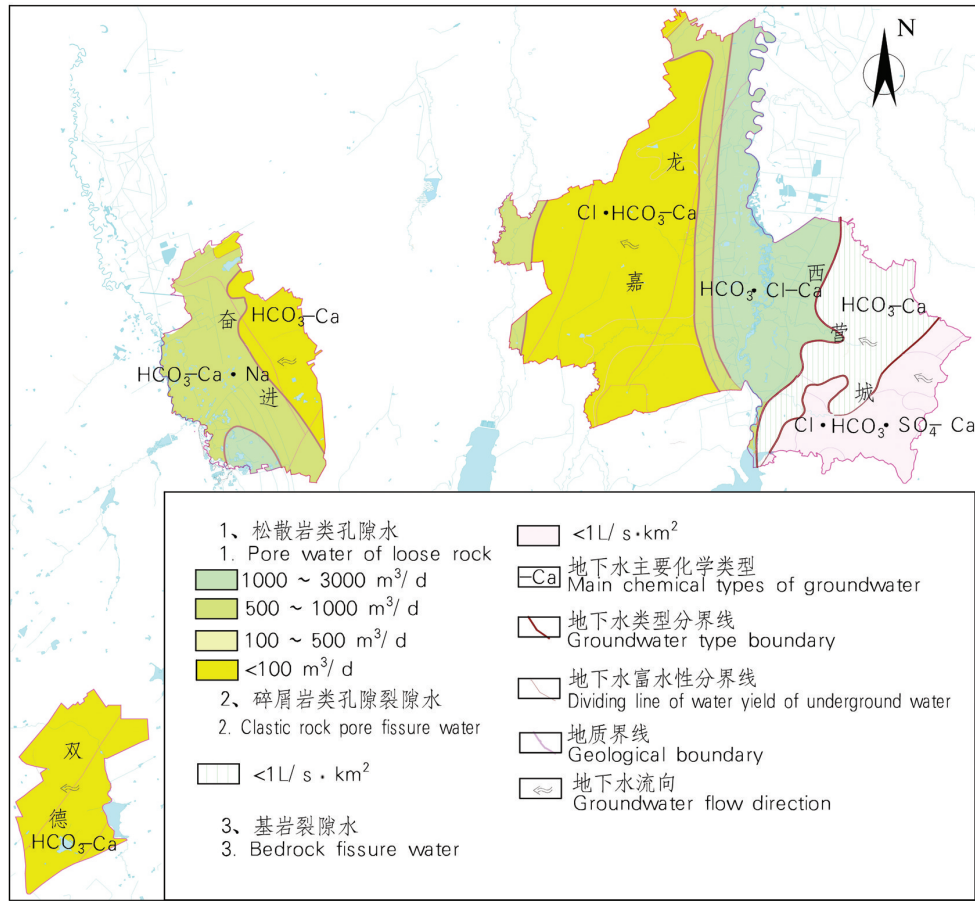


图2 长春新区水文地质图
Fig.2 Hydrogeological map of Changchun New Area

HCO_3^- , K^+ 检测下限为 0.05 mg/L, Na^+ 检测下限为 0.01 mg/L, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 检测下限为 1.0 mg/L, SO_4^{2-} 检测下限为 5.0 mg/L, NO_3^- 的检测下限为 0.2 mg/L。采用阴阳离子平衡检验方法对水样数据进行可靠性检验,取阴阳离子平衡的相对误差E的绝对值小于5%为可靠数据,经检验,所有数据均为可靠数据。

3.2 数据分析方法

本次利用数学统计方法应用 SPSS19 软件,构建地下水中主要离子间相关系数矩阵,分析地下水中主要离子特征;应用地下水分析软件,绘制地下水 Piper 三线图,同时,根据舒卡列夫分类法分析确定地下水水化学类型;利用离子系数比方法进行地下水水化学成因分析。

采用内梅罗(Nemerow)指数法计算地下水水质综合指标,计算公式为:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(P_{i平均})^2 + (P_{i最大})^2}{2}} \quad (1)$$

$$P_{i平均} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中: $P_{综}$ 为综合评价指标; $P_{i平均}$ 为各单项组分值的平均值; $P_{i最大}$ 为各单项组分值的最大值; P_i 为各单项组分值; n 为参评项目数。

然后根据 $P_{综}$ 值,按标准中所规定的方法对地下水质量进行分级。依据中国地下水质量状况和人体健康风险,参照生活饮用水、工业、农业等用水量要求,依据各组分含量高低(pH 除外),分为五类(表1)。

I类:地下水化学组分含量低,适用于各种用途;

表1 地下水质量综合评价分级
Table 1 Comprehensive evaluation and classification of groundwater quality

代号	I	II	III	IV	V
级别	优良	良好	较好	较差	极差
污染程度	未污染	轻微污染	中等污染	较重污染	重污染
$P_{综}$	<0.80	<0.80~2.50	<2.50~4.25	4.25~7.20	>7.20

Ⅱ类:地下水化学组分含量较低,适用于各种用途;Ⅲ类:地下水化学组分含量中等,以GB5749-2006为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水;Ⅳ类:地下水化学组分含量较高,以农业和工业用水质量要求以及一定水平的人体健康风险为依据,适用于农业和部分工业用水,适当处理后可作生活饮用水;Ⅴ类:地下水化学组分含量高,不宜作为生活饮用水水源,其他用水可根据使用目的选用。

4 结 果

4.1 地下水化验结果

经自然资源部东北矿产资源监督检测中心化验得到各项化验结果如表2和表3。

4.2 地下水质量

本次评价采用国家《地下水质量标准》GB/T14848-2017进行评价。本次参加评价的点为47个,参评项目31项,其中全分析一般化学指标采用20项,毒理学指标采用11项。评价结果见表4。

由于整个东北地区地下水的典型特征是铁、锰普遍超标,所以本次评价没有将铁、锰计算在内。由表4可知,区内地下水质量可分为4级,其中Ⅴ类水未评出。总体来看,Ⅰ类水占7.50%,Ⅱ类水占32.10%,Ⅲ类水占20.80%,Ⅳ类水占39.60%。较好以上地下水占60.4%,总体情况较好。从长春新区地下水质量评价结果(图3)看 NO_3^- 是影响长春新区地下水质量的主要因素,同农业生产普遍大量使用硝酸盐化肥有关,需要引起足够重视,科学施肥,保护生态环境,关爱身体健康。

5 讨 论

5.1 主要化学指标统计分析

为了解该地区的地下水水化学特征,对长春新区浅层地下水水样 CaCO_3 、TDS、pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、Fe、 H_2SiO_3 、Sr、 Cl^- 、 NO_2^- 、 HCO_3^- 检测结果用SPSS19软件进行数理统计分析,得到水化学组分统计特征值,如表5。反映长春新区或调查时间段内地下水水化学成分的概略面貌。

从表5可以看出:TDS(溶解性总固体简称)、总硬度较高,说明地下水的硬度较高且矿化度较大,在离子组分方面, HCO_3^- 质量浓度的平均值最大, Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 次之,表明其在地下水的离子中

占据主导,又因 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 的平均值较大,说明其在地下水中的绝对质量浓度较高。

研究区浅层地下水的pH值为5.87~8.6,平均值为7.03,中性。

变异系数是变量变幅和稳定性的特征,变量变幅越小,稳定性越强,变异系数就越小,反之亦然。较大的变异系数说明地下水化学组分形成及演化的影响因素复杂。pH、 H_2SiO_3 、Sr、TDS、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 变异系数较小,反映其在该地区的地下水中的质量浓度相对稳定, HCO_3^- 不仅质量浓度较高,且稳定;而 NO_2^- 、Fe、 K^+ 、 SO_4^{2-} 的变异系数较大,说明其不同区域质量浓度值相差较高,易受水文气象条件、地形地貌,含水层介质和人类活动等因素的影响。

5.2 地下水中重要参数的相关性分析

利用各离子含量之间的相关性分析,可以推演出地下水中各离子之间是否为相同来源(钱程和武雄,2016;田辉等,2017;霍吉祥等,2018;刘裕等,2019)。采用SPSS19软件对区域水质起重要作用的TDS、pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_2^- 及 H_2SiO_3 列出相关系数矩阵(表6),将各类离子或指标之间相关性定量化清楚地表示出来加以分析。

由表6可以看出,各离子与TDS之间具有良好的相关性,说明他们之间可能有相同的来源。TDS与 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 的相关性最高,均大于0.8;此外, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 Cl^- 也存在显著的相关性,说明TDS主要受 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 控制。 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 有不错的相关性(相关系数为0.621),表明石膏简单溶解对 Ca^{2+} 的控制性,但是这种控制性并不是唯一的。

5.3 地下水化学类型研究

5.3.1 地下水Piper三线图分析

通过绘制的地下水Piper三线图,对地下水的化学特征进行研究。从图4中可以看出,地下水中阳离子以 Ca^{2+} 为主, Na^+ 、 Mg^{2+} 次之;阴离子以 HCO_3^- 为主, Cl^- 和 SO_4^{2-} 次之。

5.3.2 舒卡列夫地下水类型分析

利用舒卡列夫分类法对长春新区进行地下水化学分类,如表7所示:

1-A号水,即为 HCO_3^- -Ca型水,9个水样点,占总样品的18.75%。表示沉积岩地区浅层溶滤水的

表2 长春新区地下水(mg/L)化验结果
Table 2 Test results of groundwater in Changchun New Area

样品号	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	$\rho(\text{TFe})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)$	$\rho(\text{CO}_3^{2-})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{F}^-)$
DXW01	31.71	0.95	65.42	12.25	0.03	0.08	244.55	<3	13.42	50.10	0.42
DXW02	15.67	0.73	70.46	13.88	<0.02	0.07	109.91	8.11	48.67	12.76	0.14
DXW03	16.03	0.52	19.63	4.71	0.09	0.02	93.42	<3	3.10	5.23	0.21
DXW04	15.95	0.47	19.19	4.65	0.23	0.03	90.68	<3	3.01	5.24	0.21
DXW05	16.42	0.57	95.63	11.50	<0.02	0.04	87.93	<3	59.87	18.75	0.10
DXW06	45.58	1.25	88.16	18.64	0.02	1.58	299.50	16.22	81.31	35.77	0.25
DXW07	200.56	0.92	3.67	1.52	<0.02	0.13	337.97	59.46	16.21	33.04	1.14
DXW08	94.62	1.00	39.12	24.80	0.13	0.63	321.48	27.03	53.86	24.63	<0.1
DXW09	110.89	2.10	108.41	20.09	0.21	8.45	288.51	8.11	129.49	151.42	<0.1
DXW10	28.55	0.81	40.20	15.93	0.02	0.02	244.55	18.92	1.01	4.74	0.40
DXW11	22.63	0.70	83.69	8.90	0.02	0.10	131.89	<3	33.36	38.72	<0.1
DXW12	50.12	1.86	88.30	17.15	0.09	0.51	159.37	13.51	49.49	52.47	0.22
DXW13	28.78	0.74	113.47	20.43	<0.02	0.33	54.95	<3	92.09	65.79	<0.1
DXW14	32.74	1.03	162.08	16.33	<0.02	0.05	104.41	<3	98.66	115.32	0.11
DXW15	50.17	0.31	73.43	20.00	<0.02	0.06	54.95	<3	56.96	77.68	<0.1
DXW16	29.49	1.11	70.54	12.39	0.02	0.19	189.59	<3	39.27	46.02	0.39
DXW17	22.52	0.98	125.66	18.29	<0.02	0.07	101.67	<3	94.95	5.18	0.10
DXW18	12.93	0.39	26.96	4.78	0.08	0.04	112.66	<3	1.81	0.68	0.32
DXW19	60.33	1.16	223.00	27.90	<0.02	0.07	101.67	<3	170.27	95.41	<0.1
DXW20	16.05	0.48	62.02	13.79	0.02	1.61	71.44	<3	51.72	3.90	<0.1
DXW21	14.91	0.73	59.64	8.34	0.02	0.57	87.93	<3	33.92	18.69	<0.1
DXW22	71.93	0.79	19.04	4.12	0.06	0.11	225.31	16.22	0.73	6.85	0.16
DXW23	33.85	0.68	210.68	33.03	0.04	0.23	57.70	<3	202.32	37.42	<0.1
DXW24	20.89	0.51	73.15	9.33	0.02	0.24	96.17	<3	62.25	11.62	<0.1
DXW25	24.53	1.16	69.43	15.70	<0.02	0.27	115.40	<3	51.24	43.08	<0.1
DXW26	16.74	0.44	65.02	13.38	0.04	0.11	76.94	<3	33.76	23.04	<0.1
DXW27	13.96	0.56	50.39	11.83	0.02	0.07	46.71	<3	38.77	3.97	<0.1
DXW28	59.31	1.71	120.49	30.05	0.15	0.22	120.90	<3	126.84	106.92	<0.1
DXW29	9.71	0.37	19.02	3.25	0.06	0.08	57.70	<3	6.20	3.24	0.21
DXW30	27.06	1.23	83.81	20.62	0.10	1.29	131.89	<3	43.80	51.97	<0.1
DXW31	31.09	12.77	56.57	18.74	0.12	0.31	131.89	<3	26.66	56.93	<0.1
DXW32	16.59	0.86	32.33	7.56	<0.02	0.12	57.70	<3	23.61	11.17	0.12
DXW33	14.38	0.70	42.81	10.24	0.04	0.16	156.62	<3	14.14	4.93	0.19
DXW34	43.54	15.64	100.33	23.92	0.14	0.16	230.81	<3	53.04	85.86	<0.1
DXW35	35.76	1.19	112.61	23.78	0.05	0.19	277.52	16.22	39.18	53.95	0.13
DXW36	17.18	0.49	68.74	16.66	0.05	0.05	239.05	<3	16.31	22.03	0.14
DXW37	23.02	1.50	93.01	20.45	0.06	0.15	76.94	<3	52.25	51.82	<0.1
DXW38	36.47	1.00	150.51	33.45	0.20	0.06	120.90	<3	148.89	56.20	<0.1
DXW39	37.07	25.41	47.66	13.88	0.07	0.06	247.30	<3	12.47	41.27	0.18
DXW40	15.63	2.75	30.16	9.60	0.09	0.21	115.40	<3	17.54	26.51	0.11
DXW41	17.21	2.34	22.34	4.53	0.16	3.27	98.92	<3	8.55	25.70	<0.1
DXW42	17.80	1.30	44.51	7.28	1.17	18.63	148.38	<3	29.38	60.14	0.12
DXW43	15.06	0.73	42.35	9.99	0.27	4.74	219.82	<3	3.46	1.08	0.16
DXW44	20.15	0.87	51.46	8.01	0.03	0.16	241.80	<3	1.51	3.60	<0.1
DXW45	52.12	3.92	193.83	26.49	0.03	0.15	261.03	<3	179.99	256.71	<0.1
DXW46	38.40	1.49	85.69	22.13	0.06	0.45	126.40	<3	73.89	94.44	<0.1
DXW47	57.95	0.55	100.65	28.42	0.07	0.21	74.19	<3	96.81	91.19	<0.1
DXW48	22.68	0.60	58.21	14.03	<0.02	0.02	63.20	<3	62.29	28.06	<0.1
检出限	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	3.00	3.00	1.00	2.00	0.10

续表2

样品号	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{PO}_4^{3-})$	$\rho(\text{NO}_2^-)$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{H}_2\text{SiO}_3)$	$\rho(\text{Br})$	$\rho(\text{I})$	$\rho(\text{Cr})$	$\rho(\text{Cu})$	$\rho(\text{Pb})$	$\rho(\text{Zn})$
DXW01	8.61	0.05	0.23	0.97	19.05	0.01	0.01	<0.002	0.00	<0.001	0.00
DXW02	85.56	0.03	0.06	0.83	21.74	0.03	<0.01	<0.002	0.00	0.01	0.04
DXW03	16.16	0.07	0.02	0.69	31.74	<0.01	<0.01	0.01	0.00	0.01	0.02
DXW04	15.61	0.21	0.02	0.83	29.69	<0.01	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.00
DXW05	159.02	0.28	0.03	1.10	30.29	0.10	<0.01	0.01	<0.003	0.00	0.00
DXW06	<0.02	0.06	2.79	2.34	17.95	0.06	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.00
DXW07	3.73	0.05	0.01	1.52	11.98	0.03	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW08	<0.02	0.19	0.04	1.52	33.65	0.02	0.03	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW09	<0.02	0.04	0.13	2.07	17.93	0.07	0.01	0.02	0.00	0.01	0.09
DXW10	3.37	0.04	0.23	0.83	28.45	0.01	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.00
DXW11	108.17	0.04	0.01	0.97	23.73	0.08	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.02
DXW12	139.14	0.04	0.13	1.93	15.86	0.03	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.00
DXW13	206.93	0.29	0.03	0.97	17.40	0.06	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.02
DXW14	212.09	0.05	0.04	1.24	35.16	0.10	<0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
DXW15	185.95	0.05	0.07	0.97	15.59	0.04	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.00
DXW16	25.79	0.04	0.02	0.69	20.08	0.09	<0.01	<0.002	<0.003	0.00	0.00
DXW17	239.17	0.23	0.10	0.97	33.50	0.13	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW18	18.49	0.06	0.00	0.55	41.09	0.03	<0.01	0.00	<0.003	0.01	0.00
DXW19	420.72	0.07	0.03	1.24	33.62	0.18	<0.01	0.01	<0.003	0.01	0.02
DXW20	130.31	0.03	0.08	0.69	29.08	0.06	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.00
DXW21	83.74	0.06	0.03	0.83	25.99	0.05	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW22	0.90	0.05	0.01	0.41	18.85	0.02	<0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
DXW23	404.83	0.05	0.05	1.10	26.69	0.12	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW24	96.27	0.04	0.02	0.69	32.03	0.05	<0.01	0.01	<0.003	0.01	0.01
DXW25	116.80	0.07	0.06	0.97	36.24	0.05	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW26	136.09	0.02	0.02	0.97	28.97	0.03	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW27	122.46	0.06	0.01	0.69	34.68	0.07	<0.01	0.00	<0.003	0.01	0.00
DXW28	171.32	0.03	0.04	1.93	26.88	0.09	<0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
DXW29	23.52	0.06	0.01	<0.5	31.50	<0.01	<0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
DXW30	149.07	0.01	0.02	1.24	37.14	<0.01	<0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
DXW31	103.28	0.03	0.02	3.31	31.03	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
DXW32	61.41	0.22	0.02	0.83	34.28	0.01	<0.01	0.01	<0.003	0.02	0.01
DXW33	26.43	0.06	0.03	0.97	23.08	0.04	<0.01	0.00	<0.003	0.01	0.00
DXW34	107.23	0.26	0.04	1.66	33.25	0.03	<0.01	0.00	0.00	0.03	0.00
DXW35	89.32	0.12	0.04	1.38	27.23	<0.01	<0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
DXW36	28.95	0.10	0.02	0.83	31.22	<0.01	<0.01	0.00	<0.003	0.01	0.01
DXW37	197.78	0.03	0.12	1.10	28.70	0.04	<0.01	0.00	0.00	0.04	0.02
DXW38	243.69	0.04	0.04	1.38	41.53	0.03	<0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
DXW39	19.06	2.23	0.04	3.45	27.69	0.03	<0.01	0.00	0.01	0.02	0.02
DXW40	<0.02	0.02	0.02	3.03	5.39	0.01	<0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
DXW41	1.82	0.04	0.02	1.24	25.59	0.05	<0.01	0.00	<0.003	0.04	0.03
DXW42	<0.02	0.05	0.05	1.24	30.07	0.05	<0.01	0.03	<0.003	0.01	0.01
DXW43	<0.02	0.47	0.03	2.90	35.47	<0.01	<0.01	0.01	<0.003	0.01	0.01
DXW44	0.71	0.25	0.01	0.83	37.59	0.01	<0.01	0.00	<0.003	0.01	0.00
DXW45	29.98	0.07	0.01	1.38	27.65	0.13	<0.01	0.00	<0.003	0.01	0.00
DXW46	89.30	0.04	0.07	1.10	26.90	0.06	<0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
DXW47	221.76	0.02	0.04	1.24	24.94	0.04	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
DXW48	87.70	0.38	0.02	0.55	36.44	0.08	<0.01	0.00	<0.003	0.00	0.01
检出限	0.02	0.01	0.00	0.50	2.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

续表2

样品号	$\rho(\text{As})$	$\rho(\text{Hg})$	$\rho(\text{Cd})$	$\rho(\text{Se})$	$\rho(\text{Cr}^{6+})$	$\rho(\text{Mn})$	$\rho(\text{Al})$	$\rho(\text{溶固})$	$\rho(\text{硬度})$
DXW01	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.02	320.23	214.02
DXW02	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.02	327.86	233.29
DXW03	0.00	0.00	<0.0002	0.00	0.00	0.00	0.01	136.94	68.49
DXW04	0.00	0.00	<0.0002	0.00	0.01	0.00	0.01	132.98	67.12
DXW05	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.00	0.01	0.04	429.52	286.25
DXW06	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.61	0.08	455.89	301.12
DXW07	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.05	498.70	15.75
DXW08	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.08	0.02	452.84	201.50
DXW09	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	2.34	0.13	699.90	376.16
DXW10	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.07	258.46	166.05
DXW11	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.06	380.69	245.91
DXW12	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.00	0.04	0.34	505.30	292.50
DXW13	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.20	570.05	368.39
DXW14	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.01	0.01	0.09	717.88	472.13
DXW15	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.00	0.04	504.28	265.91
DXW16	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.18	0.02	335.71	227.67
DXW17	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.05	583.92	389.30
DXW18	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.00	0.02	154.51	87.13
DXW19	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.01	0.01	0.38	1076.08	671.95
DXW20	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.03	0.02	338.23	215.98
DXW21	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.02	284.69	184.80
DXW22	0.01	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.12	248.26	64.81
DXW23	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.03	972.63	662.72
DXW24	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.01	0.01	0.10	347.21	221.73
DXW25	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.80	0.05	408.80	238.74
DXW26	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.03	349.45	217.74
DXW27	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.02	292.17	174.74
DXW28	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.08	698.31	425.21
DXW29	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.01	0.01	0.04	118.87	61.11
DXW30	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.04	0.01	473.57	297.66
DXW31	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.03	0.08	396.48	219.29
DXW32	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	0.01	0.01	0.19	209.43	112.18
DXW33	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.09	210.27	149.47
DXW34	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.07	571.24	349.49
DXW35	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.02	532.29	379.63
DXW36	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.61	0.02	314.91	240.41
DXW37	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.02	0.11	500.89	316.89
DXW38	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.04	763.02	513.74
DXW39	0.01	0.00	<0.0002	0.00	0.00	0.00	0.05	344.39	176.35
DXW40	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.26	0.04	164.79	115.43
DXW41	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	1.91	0.01	157.13	83.23
DXW42	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	1.76	0.10	279.60	191.18
DXW43	0.04	0.00	<0.0002	0.00	0.00	2.08	0.02	217.62	159.64
DXW44	0.01	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.58	0.01	237.25	161.94
DXW45	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.56	0.04	895.75	593.49
DXW46	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.03	0.31	490.20	306.30
DXW47	<0.001	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.04	0.17	654.19	368.94
DXW48	0.00	0.00	<0.0002	0.00	<0.004	0.01	0.03	333.68	203.21
检出限	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	4.00	20.00

注: 采样日期: 2016.06.17; 报告日期: 2016.07.17; 检测依据: DZ/T0064-1993等; 仪器名称或编号: ICP等。

表3 含水层介质代表性岩石鉴定结果

Table 3 Identification results of representative rocks in aquifer media

序号	岩石名称	镜下鉴定
1	流纹质岩屑	岩屑:次棱角状,成分为微晶片岩、石英岩、长英质成分、变酸性熔岩及安山岩 直径:0.15~1.2 mm,约占5%
	晶屑凝灰岩	晶屑:呈棱角状、次棱角状,成分以石英为主,少量斜长石及条纹长石,粒径:0.2~0.5 mm,约占20% 填隙物:隐晶褐铁质成分为主,少量细小棱角状长石、石英
2	强碳酸盐化玄武岩	斑晶成分:橄榄石:柱状、楔形柱状、锥面粒状,裂纹发育,表面强碳酸盐化呈假象,粒径:0.3~0.9 mm,约占7%~8% 斜长石:不规则柱状,双晶不发育,粒径:0.8 mm,约占2% 基质:斜长石微晶杂乱分布,其间充填隐晶质及金属晶粒 斜长石:半自形长柱状,聚片双晶带较宽,部分弱环带,表面强碳酸盐化,粒径均在0.1 mm以下 蚀变特征:岩石发生强碳酸盐化,隐晶碳酸盐广泛交代,见较粗方解石脉
	花岗质初碎裂岩	由黑云母3%、斜长石30%、碱性长石35%及石英32%组成 该岩石原岩为花岗岩,现强碎裂,分成碎斑及碎基两部分,碎斑约占70%,成分为黑云母、斜长石、碱性长石及石英。特征如下: 黑云母:不规则片状,黄绿色,见绿泥石沿解理缝交代 斜长石:半自形板柱状、粒状,部分棱角状,聚片双晶纹较清晰,表面弱泥化,部分发育裂纹。粒径:0.4~2.6 mm 碱性长石:次棱角状、次圆状,成分为条纹长石,粒径:0.6~2.6 mm 石英:次圆状、次棱角状,局部可见粒状集合体,裂纹发育,裂而不离,粒径:0.4~3.4 mm 碎基成分:为碎粒或碎粉状长石、石英,粒径在0.2 mm以下

特点。26-A号水,即为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型水,13个样品点,占总样品的27.08%。4-A号水,即为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型水,5个样品点,占总样品的10.4%。15-A号水,即为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水,4个样品点,占总样品的8.33%。25-A号水,即为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型水,2个样品点,占总样品的4.17%。36-A号水,即为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水,2个样品点,占总样品的4.17%。个别地区地下水化学类型存在 HCO_3-Na 型水、 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 等类型水。在伊通河流域以 HCO_3-Ca 型水为主,还有 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型水、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型水,在饮马河流域以 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型水为主,还有 HCO_3-Ca 型水、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水。

5.4 地下水化学成因比例系数分析

在水的化学成分中,各种组分之间的含量比例系数常常被用来研究某些水文地球化学问题,因为不同成因或不同条件下形成的地下水,某些比例系数在数值上有比较明显的差异,因此可以利用这类系数判断地下水的成因(杨天笑等,1998;张翼龙等,2010;安乐生等,2012;栾凤娇等,2017)。

$(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)$ 与 HCO_3^- 的毫克当量比值反映地下水中化学成分的主要来源,当 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^-$ 大于1时,地下水中化学成分主要是来自蒸发岩的溶解,当 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^-$ 小于1时,地下水中化学成分主要是来自碳酸盐的溶解。由图5a看出除了个别浅层地下水取样点位于 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^-=1$ 的左上方,多数取样点均位于右下方,说明碳酸盐的溶解占主导作用。

可以用 $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-)$ 之间的比值关系来反映阳离子交换作用,如果在地下水中发生了阳离子交换作用,则 $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-)$ 的关系将表现出负相关性,斜率为负,即随着Na含量的增加Ca和Mg含量减少在矿物的溶解过程中, $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$ 可以反映Na含量的增加或减少。图5b表示不同水体中 $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-)$ 的关系,研究区浅层地下水水样分布在斜率为-0.473的直线周围, R^2 为0.591,即在直线 $y=-0.473x+1.707$ 周围, $R^2=0.591$ 说明浅层地下水发生了阳离子交换作用。

表4 地下水水质综合评价表
Table 4 Comprehensive evaluation of groundwater quality

样品编号	地理位置	评价分值	地下水质量分级	影响因子
DXW11	双德乡韩酒局子	4.24	较好(Ⅲ类)	NO ₃ ⁻
DXW10	双德乡大房身村南	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW36	西营城镇盘道岭村2队老烧锅	4.24	较好(Ⅲ类)	NO ₃ ⁻
DXW38	西营城子镇官马山村4队	7.07	较差(Ⅳ类)	Pb;NO ₃ ⁻
DXW37	西营城镇盘道岭5舍	4.24	较好(Ⅲ类)	Pb
DXW07	长春市奋进乡	4.24	较好(Ⅲ类)	Na ⁺
DXW08	长春市奋进乡小城市村三家子屯	0.71	优良(Ⅰ类)	
DXW06	长春市奋进乡郭家店	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW09	长春市奋进乡	2.13	良好(Ⅱ类)	
DXW05	长春市奋进乡	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW01	奋进乡工地	0.71	优良(Ⅰ类)	
DXW03	长春市奋进乡隆北村	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW04	长春市奋进乡隆北村	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW02	长春市奋进乡沙场	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW12	后侯家屯侯俭	7.07	较差(Ⅳ类)	Al;NO ₃ ⁻
DXW14	秦忠宪	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW13	龙加乡吉祥大队大房身	7.07	较差(Ⅳ类)	Al;NO ₃ ⁻
DXW21	龙嘉堡镇翻身村9组	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW15	长春市龙嘉镇	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW25	龙嘉镇魏家窝棚	4.24	较好(Ⅲ类)	NO ₃ ⁻
DXW24	龙嘉镇四家子村	4.24	较好(Ⅲ类)	NO ₃ ⁻
DXW16	高家店	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW23	龙嘉镇	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW17	长春市龙嘉镇	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW27	龙嘉镇腰屯村	4.24	较好(Ⅲ类)	NO ₃ ⁻
DXW26	龙嘉镇新民村	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW18	四马架	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW19	龙嘉镇东小城市村朝阳村	7.07	较差(Ⅳ类)	Al;NO ₃ ⁻
DXW20	挖铜村挖铜屯	4.24	较好(Ⅲ类)	NO ₃ ⁻
DXW29	龙嘉镇和平村拱家湾子	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW28	临河村五舍	7.08	较差(Ⅳ类)	Pb;NO ₃ ⁻
DXW22	三家子村7队	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW41	饮马河下游后三家子	4.24	较好(Ⅲ类)	耗氧量
DXW42	西营城镇臻楷泡村	4.24	较好(Ⅲ类)	Pb
DXW43	榛粘泡6队莲花泡	4.25	较好(Ⅲ类)	NH ₄ ⁺ ;Pb
DXW34	石头口门	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW44	西营城镇榆树岗村5队	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW45	西营城子镇石人沟村腰榆树岗子	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW33	石头口们海清房子	4.24	较好(Ⅲ类)	Pb
DXW46	西营城镇石人沟村3舍	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW40	西营城镇前张家油坊	4.25	较好(Ⅲ类)	耗氧量;Pb
DXW31	烧锅村烧锅7队花张屯	7.07	较差(Ⅳ类)	Pb;NO ₃ ⁻
DXW35	西营城子镇榆树棵村7队石砬山	4.25	较差(Ⅳ类)	Pb;NO ₃ ⁻
DXW49	西营城镇万家村1舍	2.12	良好(Ⅱ类)	
DXW47	西营城子镇唐家窑村	4.25	较好(Ⅲ类)	Al;Pb;NO ₃ ⁻
DXW39	董家村赵家窝铺	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻
DXW32	西营城镇董家村	4.25	较好(Ⅲ类)	耗氧量;Pb;NO ₃ ⁻
DXW48	西营城镇万家村7队	7.07	较差(Ⅳ类)	NO ₃ ⁻

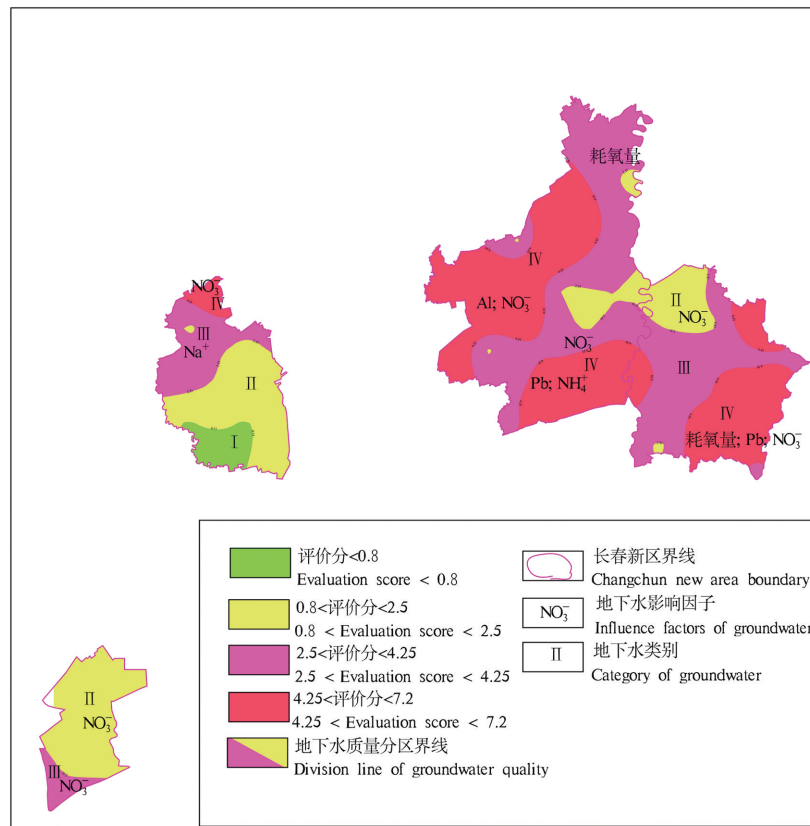


图3 地下水水质评价图

Fig.3 Groundwater quality evaluation

表5 浅层地下水化学组分统计特征值

Table 5 Statistical results of hydrochemical index

特征值	CaCO ₃	TDS	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Fe	H ₂ SiO ₃	Sr	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	HCO ₃ ⁻
最小值	15.75	119.00	5.87	4.00	2.00	0.31	9.71	0.68	0.02	5.39	0.00	0.73	0.00	46.71
最大值	671.95	1076.00	8.60	223.00	33.00	25.41	200.56	256.71	18.63	41.53	1.00	202.32	2.79	337.97
平均值	257.43	423.90	7.03	76.74	15.35	2.09	35.56	44.19	0.97	27.80	0.44	53.30	0.10	148.03
标准偏差	150.51	221.23	0.51	49.27	8.15	4.41	32.19	46.94	2.97	7.68	0.19	49.76	0.40	82.11
变异系数	0.58	0.52	0.07	0.64	0.53	2.11	0.91	1.06	3.06	0.28	0.43	0.93	4.00	0.55

注:pH无量纲,其他单位:mg/L。

表6 地下水水化学参数相关性系数矩阵

Table 6 Correlation matrices of hydro-chemical parameters of groundwater

	TDS	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	H ₂ SiO ₃
TDS	1										
pH	-0.237	1									
Ca ²⁺	0.924**	-0.387**	1								
Mg ²⁺	0.837**	-0.251	0.801**	1							
K ⁺	0.04	0.165	-0.038	0.085	1						
Na ⁺	0.403**	0.323*	0.058	0.154	0.072	1					
Cl ⁻	0.919**	-0.342*	0.899**	0.789**	-0.029	0.235	1				
SO ₄ ²⁻	0.692**	-0.172	0.621**	0.556**	0.188	0.339*	0.661**	1			
HCO ₃ ⁻	0.068	0.311*	-0.08	0.049	0.234	0.568**	-0.106	0.194	1		
NO ₂ ⁻	-0.002	0.067	-0.062	-0.045	0.351*	0.091	0.122	0.073	0.063	1	
H ₂ SiO ₃	0.042	-0.206	0.162	0.153	-0.08	-0.360*	0.033	-0.157	-0.177	-0.324*	1

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

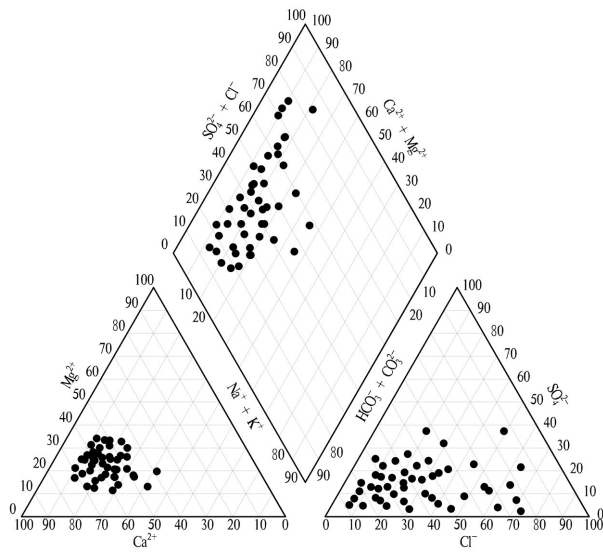


图4 地下水Piper三线图
Fig.4 Piper three - line map of groundwater

地下水中的Ca²⁺和Mg²⁺主要是来自碳酸盐或硅酸盐及蒸发岩的溶解,因此可以用(Ca²⁺+Mg²⁺)与(HCO₃⁻+SO₄²⁻)之间的毫克当量比值来判断Ca²⁺和Mg²⁺的主要来源,当 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^{-}+\text{SO}_4^{2-})$ 大于1时,地下水中Ca²⁺和Mg²⁺主要是来自碳酸盐的溶解当 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^{-}+\text{SO}_4^{2-})$ 小于1时,地下水中Ca²⁺和Mg²⁺主要是来自硅酸盐和蒸发岩的溶解,由图5c可以看出,地下水取样点大多数位于 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^{-}+\text{SO}_4^{2-})=1$ 的上方,说明研究区浅层地下水中的Ca²⁺和Mg²⁺主要来源于碳酸盐的溶解。

(3)(Na⁺+K⁺)与Cl⁻之间的毫克当量比值关系可以反映Na⁺和K⁺的来源,当 $\gamma(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-}$ 大于1时,表示此时发生的是岩盐的溶解,当 $\gamma(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-}$ 小于1时,表示此时发生的是硅酸岩的溶解。由图5d可以看出,研究区取样点大多数都位于 $\gamma(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-}=1$

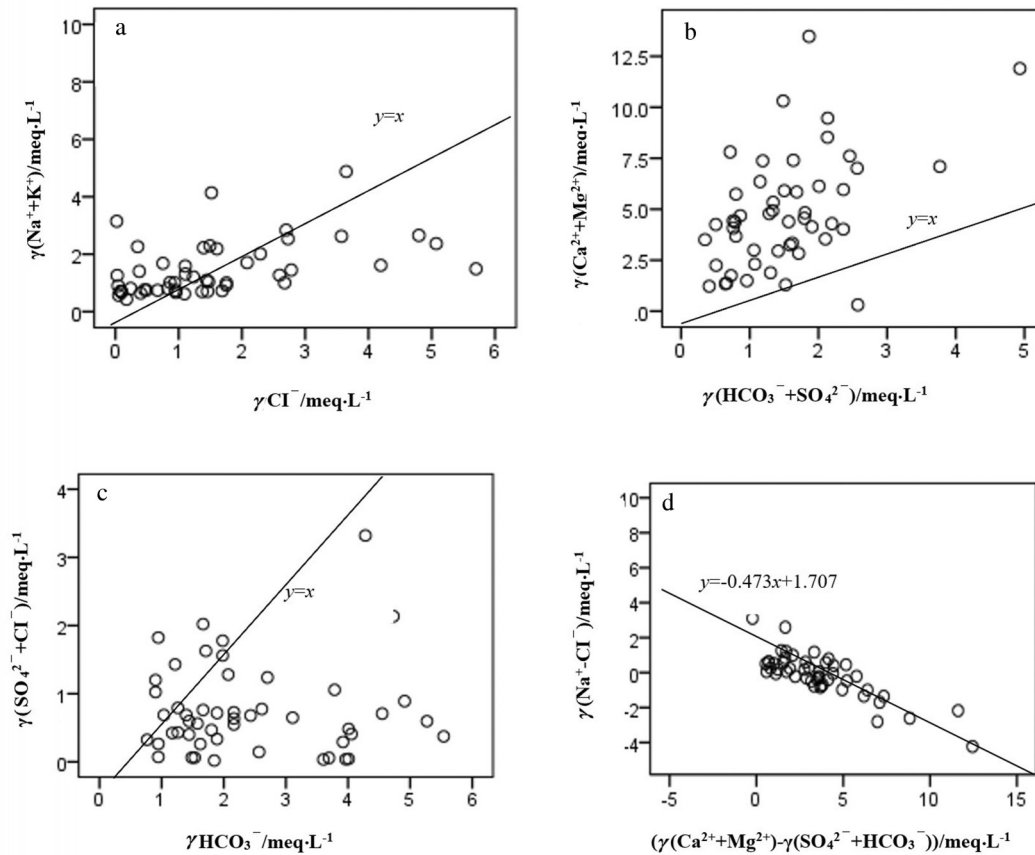


图5 地下水离子比值相关图
Fig.5 Correlation diagram of ion ratio of groundwater

表7 舒卡列夫地下水类型分类汇总表

Table7 Summary of classification of groundwater types in shukalev

化学类型	1-A	16-A	15-A	18-A	25-A	26-A	36-A	39-A	4-A	43-A	5-A	6-A	7-A	8-A
阳离子类型	Ca	Ca·Na·Mg	Ca	Ca·Na	Ca·Na	Ca	Ca	Ca·Na	Ca·Na	Ca	Ca·Mg·Na	Na·Mg	Na	Ca
阴离子类型	HCO ₃	HCO ₃ ·SO ₄	Cl·HCO ₃ ·SO ₄	HCO ₃ ·Cl·SO ₄	HCO ₃ ·Cl	Cl·HCO ₃	Cl·SO ₄	Cl·SO ₄	HCO ₃	Cl	HCO ₃	HCO ₃	HCO ₃	HCO ₃ ·SO ₄
数量	9	1	4	1	2	13	2	2	5	2	1	2	2	2
占比/%	18.75	2.08	8.33	2.08	4.17	27.08	4.17	4.17	10.42	4.17	2.08	4.17	4.17	4.17

的两侧, $\gamma(\text{Na}^+\text{+K}^+)/\gamma\text{Cl}^- = 1$ 的上方和下方机会均等, 说明研究区浅层地下水中 Na^+ 和 K^+ 同时来自岩盐的溶解、硅酸岩的溶解。

5.5 地下水水质讨论

长春新区地下水分为4级, 从 I 类水到 IV 类水, V 类水未评出, 总体水质很好, 个别地区水质较差是由于人类影响造成, 特别是过度使用氮肥导致硝酸盐超标较多, 控制化肥使用量, 做到科学合理施肥, 就会使地下水水质逐渐转好。

6 结 论

(1) 区内地下水质量可分为四级, 其中 V 类水未评出。总体来看, I 类水占 7.50%, II 类水占 32.10%, III 类水占 20.80%, IV 类水占 39.60%。较好以上地下水占 60.4%, 总体情况较好。

(2) HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 在地下水的离子中占据主导; Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 在地下水中的绝对质量浓度较高; PH 、 H_2SiO_3 、 Sr 、 TDS 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的质量浓度相对稳定; 而 NO_2^- 、 Fe 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 在不同区域质量浓度值相差较高, 易受水文气象条件、地形地貌, 含水层介质和人类活动等因素的影响。

(3) 长春新区地下水的硬度较高且矿化度较大; 地下水化学类型以 HCO_3^- -Ca 型为主, Na^+ 和 K^+ 同时来自岩盐和硅酸岩的溶解; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐的溶解; 浅层地下水发生了阳离子交换作用。

致谢: 论文审稿过程中匿名专家及编辑提出建设性的修改意见, 对论文质量提升起到了重要作用, 在此一并表示诚挚的谢意。

References

An Lesheng, Zhao Quansheng, Ye Siyuan, Liu Guanqun, Ding Xigui. 2012. Chemical characteristics and formation of shallow groundwater in the Yellow River Delta[J]. Environmental Science, 33 (2): 370-378(in Chinese with English abstract).
Chen Qian, Zhong Jinxian, Li Changshun. 2012. Application of

mathematical statistics method in regional shallow groundwater hydrogeochemistry research [J]. Geoscience, 26(3): 607-613(in Chinese with English abstract).

Feng Yinian, Zhang Jiantao, Wang Lu, Qin Limin, Wang Hairong, Xu Jun, Liu Li. 2015. Study on the characteristics and genesis of Mangshan mineral water in Yongcheng City[J]. Hydrogeology, 35 (5): 24-28(in Chinese with English abstract).

Gao Yanwei, Dong Deming, Yin Hua. 2008. Spatial distribution and forecast of nitrogenous compounds in groundwater in Changchun Area[J]. Journal of Jilin University (Sci. Ed.), 47(4): 795-799(in Chinese with English abstract).

Huo Jixiang, Li Ziyang, Ma Fuheng, Song Hanzhou. 2018. Environmental hydrochemical characteristics and evolution of Lijiaxia Hydropower Station dam site [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 45 (1): 1-7(in Chinese with English abstract).

Jiang Ling. 2009. Study on the Formation and Evolution Mechanism of Groundwater Chemical Composition in Oasis in Arid Area: A case Study of Yaoba Oasis in Alashan [D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).

Li Xuguang, He Haiyang, Tian Hui, Dai Yajian, Zhu Wei, Sun Qifa. 2019. Analysis of hydrochemical characteristics of groundwater in Horqin area of Tongliao [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 38 (6): 92-98(in Chinese with English abstract).

Liu Yu, Lu Chenming, Ma Rong. 2019. Source discrimination analysis of iron ions in groundwater of Jidong Plain [J]. Geological Survey and Research, 42 (2): 135-142(in Chinese with English abstract).

Luan Fengjiao, Zhou Jinlong, Jia Ruiliang, Lu Chengxin, Bai Ming, Liang Hongtao. 2017. Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in BalikunYiwu basin, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 36 (2): 380-389(in Chinese with English abstract).

Qian Cheng, Wu Xiong. 2016. Hydrochemical characteristics and formation of groundwater in the flow area of salt pond [J]. Resources and Environment in Arid Area, 30 (3): 169-175(in Chinese with English abstract).

Qian Hui, Ma Zhiyuan. 2005. Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

Ren Guang, Zhao Chunhua, Sun Xin. 2014. Analysis and evaluation of groundwater quality of Qijia reserve water source of Changchun City, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 36(4): 98-102(in Chinese with English abstract).

- Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoxin. 1993. Fundamentals of Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Sun Bin, Xing Liting. 2010. Study on the chemical characteristics of groundwater near the urban area of Jinan [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, (11): 33–37(in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Peng Yuze. 2018. Hydrochemical characteristics and formation evolution of groundwater system in Hami Basin [J]. Geology in China, 45(6): 1128–1141(in Chinese with English abstract).
- Sun Limei, Liu Xiaojie. 2005. Hydrochemical characteristics of Cretaceous groundwater in the eastern high plain of Songliao plain, Jilin Province [J]. Jilin Geology, 24 (3): 22–27(in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming, Ma Shimin, Li Lijun. 2017. Metasilicic acid and strontium enriched area in groundwater in Changchun area, Jilin Province [J]. Geology in China, 44 (5): 1031–1032(in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming. 2019. Strontium enriched area discovered in Lianhua Mountain, Changchun [J]. Geology in China, 46 (2): 430–431(in Chinese with English abstract).
- Tian Hui, Jin Hongtao, Sun Qifa, Liang Xiujian, Ma Shimin, Du Jizhong, Li Xuguang, Wang Xiaoguang. 2017. Study on the current situation and change rule of groundwater in Liaohe Delta [J]. Geology and Resources, 26 (3): 290–295(in Chinese with English abstract).
- Wang Shuixian, Wang Yunzhi, Dong Xinguang. 2007. Shallow groundwater depth, temporal and spatial variation of TDS and evolution characteristics of hydrochemistry in Yanqi Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 26 (5): 90–93(in Chinese with English abstract).
- Wang Yiwei, Wang Yuxin. 2009. Changchun area groundwater quality evaluation and safeguard[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 15(2): 149–150(in Chinese with English abstract).
- Xie Zhenhua, Liu Kai, Li Zhiping, Lu Ming, Liu Yingchao, Xing Guozhang. 2010. Chemical characteristics of groundwater based on sediment sources: A case study of Beijing Plain Area [J]. Earth Science Frontiers, 17 (6): 81–87(in Chinese with English abstract).
- Xing Liting, Zhang Fengjuan, Li Changshou, Yang Lizhi, Wang Liyan. 2015. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Lubei Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 34 (6): 90–94 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bingchao, Li Xiao, Zhang Ge, Li Chengzhu. 2016. Study on hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Nomuhong River Basin [J]. Journal of Northwest Agricultural and Forestry University of Science and Technology (Natural Science Edition), 44 (10): 214–220(in Chinese with English abstract).
- Yang Lei, Gong Xulong, Lu Xurong, Zhang Yan. 2015. Distribution characteristics and genesis of high fluorine groundwater in northern Lianyungang [J]. Geology in China, 42(4): 1161–1169(in Chinese with English abstract).
- Yang Tianxiao, Wang Min, Chen Liang. 1998. Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of Dongying Basin [C]// Proceedings of the 30th International Geological Congress, Volume 22. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Yin Hua, Liu Wen, Wu Yandong, Zhang Guangxin. 2009. The present situation and trends analysis of shallow groundwater quality in Changchun City[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 39(2): 171–176(in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianfei, Deng Guoshi, Xu Fen, Tang Yeqi, Li Pengyue. 2016. Multivariate statistical analysis of hydrochemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the north of Bijie City [J]. Geology in China, 43 (4): 1446–1456(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangxin, Deng Wei, He Yan, Ramsis Salama. 2006. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Advances in Water Science, 17 (1): 20–28(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, He Jin, Li Jingjie, Cao Yueting, Gong Lei, Liu Jinwei, Bian Chao, Cai Yuemei. 2018. Chemical characteristics and control factors of groundwater in Rangtong River Basin[J]. Environmental Science, 39 (11): 4981–4989(in Chinese with English abstract).
- Zhang Weijing, Sun Xiaoming, Liu Futian, Zhang Wei, Fang Cheng. 2010. R– type factor analysis of groundwater hydrochemical characteristics and influencing factors in Caofeidian area[J]. Safety and Environmental Engineering, 17 (1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yilong, Wang Lijuan, Wang Wenzhong, Li Zhenghong, Yu Juan, Cao Wengeng, Long Wenhua, Miao Qingzhuang, Wang Zhe. 2010. Evolution of hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Hohhot City [J]. South to North Water Diversion and Water Conservancy Technology, 8(6): 14–17(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂. 2012. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J]. 环境科学, 33(2): 370–378.
- 陈倩, 钟金先, 李长顺. 2012. 数理统计方法在区域浅层地下水水文地球化学研究中的应用[J]. 现代地质, 26(3): 607–613.
- 冯亿年, 张建涛, 王路, 秦莉旻, 王海荣, 徐军, 刘丽. 2015. 永城市芒山矿泉水特征及成因研究[J]. 水文地质, 35(5): 24–28.
- 高彦伟, 董德明, 尹华. 2008. 长春地区地下水中含氮化合物的空间分布及预测[J]. 吉林大学学报, 47(4): 795–799.

- 霍吉祥, 李子阳, 马福恒, 宋汉周. 2018. 李家峡水电站坝址环境水化学特征与演变[J]. 水文地质工程地质, 45(1):1-7.
- 姜凌. 2009. 干旱区绿洲地下水水化学成分形成及演化机制研究:以阿拉善腰坝绿洲为例[D]. 西安:长安大学.
- 李旭光, 何海洋, 田辉, 代雅建, 朱巍, 孙岐发. 2019. 通辽科尔沁地区地下水水化学特征分析[J]. 灌溉排水学报, 38(6):92-98.
- 刘裕, 陆晨明, 马荣. 2019. 冀东平原地下水中铁离子来源判别分析研究[J]. 地质调查与研究, 42(2): 135-142.
- 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 陆成新, 白铭, 梁红涛. 2017. 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, 36(2):380-389.
- 钱程, 武雄. 2016. 盐池内流区地下水水化学特征及其形成作用[J]. 干旱区资源与环境, 30(3):169-175.
- 钱会, 马致远. 2005. 水文地球化学[D]. 北京:地质出版社.
- 任光, 赵春华, 孙欣. 2014. 长春市齐家后备水源地地下水水质分析评价[J]. 吉林地质, 36(4): 98-102.
- 沈照理, 朱宛华, 钟佐辛. 1993. 水文地球化学基础[D]. 北京:地质出版社.
- 孙斌, 邢立亭. 2010. 济南市附近地下水水化学特征研究[J]. 中国农村水利水电, (11): 33-37.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128-1141.
- 孙立梅, 刘晓洁. 2005. 吉林省松辽平原东部高平原白垩系地下水水化学特征[J]. 吉林地质, 24(3): 22-27.
- 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 于慧明, 马诗敏, 李丽君. 2017. 吉林长春地区地下水中发现偏硅酸和镉富集区[J]. 中国地质, 44(5): 1031-1032.
- 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 于慧明. 2019. 长春莲花山发现镉富集区[J]. 中国地质, 46(2): 430-431.
- 田辉, 金洪涛, 孙岐发, 梁秀娟, 马诗敏, 都基众, 李旭光, 王晓光. 2017. 辽河三角洲地下潜水流现状及其变化规律研究[J]. 地质与资源, 26(3): 290-295.
- 王水献, 王云智, 董新光. 2007. 焉耆盆地浅层地下水埋深与 TDS 时空变异及水化学的演化特征[J]. 灌溉排水学报, 26(5):90-93.
- 王意惟, 王宇昕. 2009. 长春地区地下水水质评价及保护措施[J]. 水利科技与经济, 15(2): 149-150.
- 邢立亭, 张凤娟, 李常锁, 杨丽芝, 王立艳. 2015. 鲁北平原浅层地下水水化学特征[J]. 灌溉排水学报, 34(6): 90-94.
- 谢振华, 刘凯, 李志萍, 路明, 刘颖超, 邢国章. 2010. 基于沉积物物质来源的地下水水化学特征分析:以北京市平原区为例[J]. 地学前缘, 17(6): 81-87.
- 杨炳超, 李小等, 张戈, 李成柱. 2016. 诺木洪河流域地下水水化学特征及演化规律研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 44(10): 214-220.
- 杨磊, 龚绪龙, 陆徐荣, 张岩. 2015. 连云港北部地区高氟地下水分布特征及成因[J]. 中国地质, 42(4): 1161-1169.
- 杨天笑, 汪民, 陈亮. 1998. 东营盆地水文地球化学特征及其成因分析[C]//第30届国际地质大会论文集第22卷. 北京:地质出版社.
- 尹华, 刘文, 吴延东, 章光新. 2009. 长春市浅层地下水水质现状评价及变化趋势分析[J]. 东北师大学报:自然科学版, 39(2):171-176.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质, 43(4): 1446-1456.
- 章光新, 邓伟, 何岩, Ramsis Salama. 2006. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 17(1): 20-28.
- 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅. 2018. 蛤蟆通河流域地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 39(11): 4981-4989.
- 张伟敬, 孙晓明, 柳富田, 张卫, 方成. 2010. 曹妃甸地区地下水水化学特征及影响因素的 R 型因子分析[J]. 安全与环境工程, 17(1): 1-5.
- 张翼龙, 王丽娟, 王文中, 李政红, 于娟, 曹文庚, 龙文华, 苗青壮, 王哲. 2010. 呼和浩特市浅层地下水水化学特征演变规律[J]. 南水北调与水利科技, 8(6): 14-17.