河北省任丘市浅层地下水化学特征及形成机制

Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

薛东青,谢明忠,李少虎,杜丽媛,刘咏康,李鹏

河北省煤田地质局环境地质调查院,石家庄,050091

内容提要: 浅层地下水是任丘市重要的水资源之一,为研究其水化学特征及其形成机制,本文在实地调查取样分析化验的基础上,以水文地球化学理论为指导,借助多元数理统计的方法,从多个角度揭示了研究区浅层地下水的形成演化过程:① 通过离散分析,认为研究区各主要离子变异系数较大,说明研究区浅层地下水受人为影响明显,水化学特征复杂。② 通过相关分析,认为 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、以及 SO_4^{2-} 为研究区原始浅层地下水主要离子,而 HCO_3^- 与 NO_3^- 为外来离子且异源;③ 通过聚类分析,可将研究区浅层地下水分为 A、B、C 三类,其中 A 类处于 Gibbs 图中岩石风化端元,矿化度较低,为微咸水或淡水,含 HCO_3^- 和 NO_3^-,受农业灌溉水影响;B 类处于 Gibbs 图中岩石风化端元向蒸发浓缩端元过渡,矿化度居中,为微咸水,NO_3^- 含量相对较高,受生活污水影响;C 类地下水处于 Gibbs 图中蒸发浓缩端元,矿化度较高,以咸水为主,与地表水体连通性差,接近原始浅层地下水化学类型。④ 通过主成分分析,认为研究区原始地下水化学类型为 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-—Na^+$ 型及 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-—Na^+\cdot Ca^{2+}$ 型,受干旱环境下蒸发和海水入侵双重影响。

关键词: 浅层地下水,水化学特征,多元数理统计,形成机制

任丘市位于河北省中部,隶属沧州市管辖,西北与雄安新区隔白洋淀而望。近年来随着当地经济的高速发展,对水资源的需求量日趋增加,“资源性缺水”问题日益突出,研究区还曾因大量超采地下水而引起地下水水位持续下降以及地面沉降等地质灾害,严重制约着社会发展。同时,人类活动的加剧也增加了区分地下水化学所受自然因素和人类活动因素影响的难度(张勇等,2019)。当地下水化学存在多个影响因素时,传统的分析方法所起的作用越来越有限,基于多元数理统计理论,在大量水化学数据中提取有效信息,揭示水化学指标之间的潜在联系,有助于识别影响水化学特征的主要因素。本文从水文地质条件和水文地球化学理论出发,运用多元数理统计方法,结合 Piper 三线图和 Gibbs 图,多方面揭示了该地区的地下水化学的分布特征和形成过程,以期为研究区浅层地下水开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区地处太行山东麓山前平原和渤海西岸滨海平原之间的河流冲积平原与湖淀淤积的平原交错地带,地势自西南向东北缓斜;地貌按成因可划分为冲积平原泛滥洼地小区、冲积平原古河道微高地小区和冲湖积平地小区;属于暖温带亚湿润大陆性季风气候,大陆性气候显著,年平均降雨量为 557.4 mm,年雨量高度集中于 7 月中旬到 8 月下旬,降雨量可占全年总量的二分之一;地表水多呈自由漫流状态,顺地势由西南向东北排泄,主要河道包括东部地区的古洋河、西部地区的小白河以及人工开挖的任文干渠等。

研究区地下水赋存于第四系松散岩类含水层中,根据各含水层之间的水力联系和地下水动态类型等特征,可将其自上而下划分为四个含水层组,其中第Ⅰ含水组和第Ⅱ含水组上段为浅层地下水,第Ⅱ含水组中下段和第Ⅲ、Ⅳ含水组为深层地下水(表 1)。研究区浅层地下水为潜水、潜水—微承压水类型,底板埋深大致为 40~65m,主要为 Qh 及 Qp^3x 上段,含水层岩性主要以粉砂、粉细砂为主,多呈双层或多层含水结构,一般无良好的隔水层,包气带岩性以粉质黏土为主。

注:本文为河北省任丘市城市地质调查项目的成果。

收稿日期:2021-06-09;改回日期:2021-11-25;网络首发:2021-12-20;责任编辑:章雨旭、赵雪。Doi:10.16509/j.georeview.2021.12.075

作者简介:薛东青,男,1990 年生,硕士,工程师,主要从事地质学研究;Email:1036425256@qq.com。

表 1 河北省任丘地区第四系含水组划分表

Table 1 Division table of Quaternaty aquifers in Renqiu area of Hebei Province

地层	含水层组	底板埋深(m)	地下水类型	水质垂向主要变化
全新统(Qh)	Ⅰ+Ⅱ上	40~65	潜水 潜水—微承压水	咸水
上更新统(Qp^3x)	Ⅱ中下	140~160	承压水	微咸水
中更新统(Qp^2s)	Ⅲ	270~290	承压水	深层淡水
下更新统(Qp^1r)	Ⅳ	430~460	承压水	深层淡水

2 材料和方法

2.1 样品采集与检测

研究区 7~8 月份降雨量大,为避免降雨对浅层地下水的影响,本次研究所用水样均于 2019 年 6 月份集中采取,在任丘市县城周边乡镇选取了分布比较均匀的 49 个取样点数据(图 1),基本可以代表任丘市周边乡镇浅层地下水的水质状况,测试项目包括 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、NO_3^- 等离子,以及 pH 值、溶解性总固体(TDS)、总硬度(以 $CaCO_3$ 计)和总碱度(以 $CaCO_3$ 计)等。需要说明的是 CO_3^{2-} 在大多数样品中未检测出,Na^+为 Na^++K^+总和。

样品检测由河北省煤田地质局新能源地质队能源矿产检测中心完成,样品采集工作严格按照检测中心要求进行。

2.2 异常指标的剔除

2.2.1 阴阳离子平衡检验

通常情况下,水溶液中的阴离子所带电荷总和等于阳离子所带电荷总和,称为电荷守恒定律。因此,可通过水溶液中阴阳离子是否平衡来检验数据化验的可靠性,正负电荷平衡误差采用下式计算:

$$E = \frac{m_a - m_c}{m_a + m_c} \tag{1}$$

式中 E 表示相对误差,m_a 和 m_c 为阴阳离子的毫克当量浓度(meq/L)。相对误差 E 越小说明水溶液中阴阳离子的正负电荷总数越接近,化验结果越准确。

经计算,所有样品的离子误差均小于 1%,满足分析要求。

2.2.2 Grubbs 检验

Grubbs 检验是检验异常值的一种统计检验方法,该检验方法使用了全部数据的的标准差和平均值,检验效果较好。检验原理为:若测得的数据为 X_1、X_2、X_3、…、X_n,则其 Grubbs 统计量 G_n 为

$$G_n = \frac{|X_d - \overline{X_n}|}{S_n} \tag{2}$$

式中,X_d 为可疑值,$\overline{X_n}$ 为算术平均值,S_n 为算术标准差。

查 Grubbs 检验的临界值表值 $G_P(n)$,当 $G_n > G_P(n)$,判定为异常值,否则为合理值。

对本次实验数据进行 Grubbs 检验,显著性水平取 0.01。经验证,共剔除 3 组异常数据,剩余 46 组数据。

可见,地下水环境在人类活动影响较大的背景下,数理统计方法可筛选出异常值,避免对后续分析工作产生误导作用,从而得出一般性结论。

2.3 数据分析

本文利用 RockWare AqQa 软件绘制 Piper 三线图,利用 Excel 进行地下水化学特征统计和离散分析并绘制 Gibbs 图,利用 SPSS25 软件进行相关分析、聚类分析以及主成分分析。

3 结果与分析

3.1 离散分析

变异系数是反映数据离散程度的统计量,地下水中人为输入物质通常具有空间离散度高的特征,故可将其作为人类活动影响地下水环境的指示指标之一。变异系数越大,则离散程度越高,说明地下水化学组分的稳定性越差,形成及演化过程复杂,人为影响因素越明显,反之亦然。(王攀等,2020;郑涛等,2020)。

研究区 46 组浅层地下水化学主要指标统计结果见表 1,可看出浅层地下水 pH 值在 7.04~8.05 之间,变异系数较小为 3.23%,均值 7.51,整体上呈中性偏弱碱性。TDS 区间变化较大,在 867.26~3826.00 mg/L 之间,均值 2047.87 mg/L,变异系数为 43.27%。阴离子中,$\rho(NO_3^-)$变异系数最大,为 155.88%,其质量浓度的变化范围为 0.05~257.94 mg/L,均值为 37.08 mg/L;$\rho(SO_4^{2-})$和 $\rho(Cl^-)$变异系数也较大,分别为 63.86%、55.99%。阳离子中,$\rho(Ca^{2+})$和 $\rho(Na^+)$变异系数较大,分别为 57.48%和 50.14%。可见研究区浅层地下水中主要离子的变异系数均较大,说明其水化学特征受人为因素影响明显。

白洋淀流域中浅层地下水 NO_3^- 主要来自生活

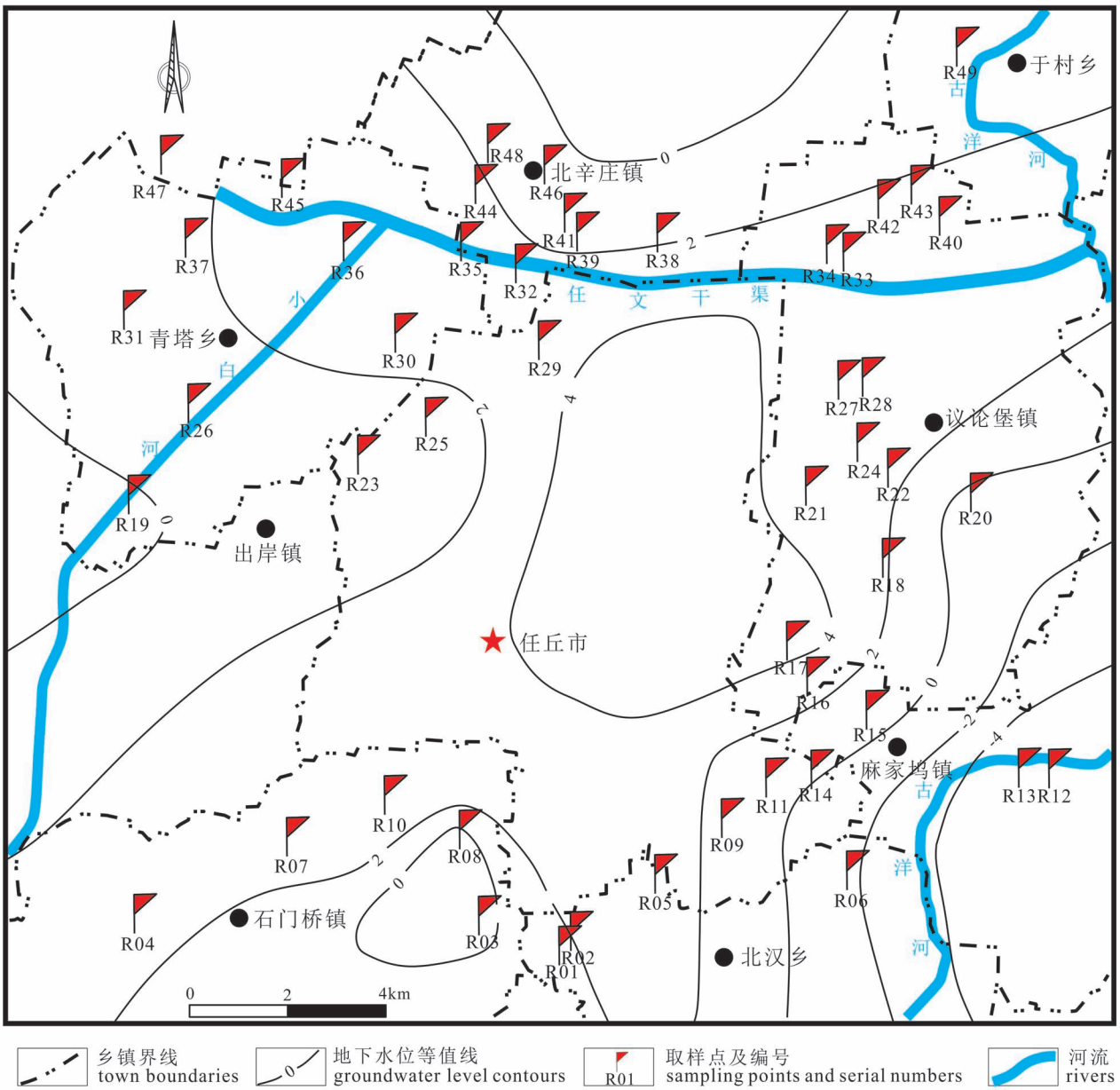

图 1 本次工作取样点位置分布图

Fig. 1 Map of the study area showing the sampling locations

污水、动物和人类的排泄物以及农业中化肥的使用(王仕琴等,2021)。研究区紧邻白洋淀,加之 $\rho(NO_3^-)$ 变异系数高,其含量异常应是人类活动所致无疑,但其均值较低且高值呈点状分散分布,尚未连片,说明整体污染程度较低。

3.2 相关分析

相关分析是研究随机变量之间的相关关系的一种统计方法,是研究现象之间是否存在某种依存关系,并探讨其相关方向以及相关程度。地下水中化学组成之间的关系与其来源有一定的联系,可用化学组分之间的相关关系来揭示地下水水化学参数的相似相异性及来源的一致性和差异性(Delvalls et al.,1998)。对地下水中 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、NO_3^- 及 TDS 等主要水化学指标进行 Pearson 相关分析,分析结果见表 2。

可看出,TDS 与其他所有离子的质量浓度均为正相关关系,并且与 $\rho(Na^+)$、$\rho(Ca^{2+})$、$\rho(Mg^{2+})$、$\rho(Cl^-)$、以及 $\rho(SO_4^{2-})$ 相关性显著,说明 TDS 主要取决于这 5 种离子的质量浓度,尤其是 $\rho(SO_4^{2-})$、

表 2 任丘地区浅层地下水化学主要离子质量浓度、TDS(mg/L)及 pH 统计情况

Table 2 Statistics of major ions, TDS(mg/L) and pH value in shallow groundwater in Renqiu area

	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数(%)
Na^+	93.52	950.78	434.40	217.80	50.14
Ca^{2+}	33.23	325.78	130.69	75.12	57.48
Mg^{2+}	53.15	272.63	119.91	48.48	40.43
Cl^-	110.31	1292.06	390.73	218.76	55.99
SO_4^{2-}	156.40	1698.00	647.73	413.63	63.86
HCO_3^-	282.39	1004.42	618.38	153.43	24.81
NO_3^-	0.05	257.94	39.45	61.50	155.88
TDS	867.26	3826.00	2047.87	886.19	43.27
pH	7.04	8.05	7.51	0.24	3.23

$\rho(Cl^-)$以及$\rho(Na^+)$,相关系数分别为 0.958、0.916 以及 0.802,同时该 5 种离子的质量浓度之间彼此亦呈正相关关系且相关性显著,说明这 5 种离子是原始浅层地下水中的主要离子;$\rho(HCO_3^-)$与$\rho(Ca^{2+})$、$\rho(Cl^-)$以及$\rho(SO_4^{2-})$为负相关关系,与$\rho(Na^+)$、$\rho(Mg^{2+})$呈正相关关系但相关性不显著,说明 HCO_3^- 为外来输入型离子;$\rho(NO_3^-)$与$\rho(HCO_3^-)$为负相关关系,与其他离子的质量浓度为正相关,说明 NO_3^- 与 HCO_3^- 的主要来源不同,揭示出研究区浅层地下水区存在两种外来水混入现象。

3.3 聚类分析

利用舒卡列夫式对地下水中的化学成分进行分类,可将该区浅层地下水划分为 15 类,其中 HCO_3^- · SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Mg^{2+} 型占比最高仅为 19.56%,其次为 SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Mg^{2+} 型占 13.04%,不存在占绝对优势的水化学类型,通过 Piper 三线图也可看出研究区浅层地下水化学类型非常复杂(图 2)。可见由于人类活动的影响,传统的分类方法已不能满足分析需求。因此本文采用多元数理统计中的聚类分析对工作区浅层地下水类型进行研究。

聚类是将相似的事物聚集在一起,而将不相似的事物划分到不同类别的过程。聚类分析的方法很多,不同的分类方法结果会存在一定的差异。本文采取系统聚类分析,聚类方法选择瓦尔德法,参与分类的项目包括 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、NO_3^- 等离子以及 TDS 和总硬度,46 组样品可分为 3 大类(图 3)。

A 类地下水为微咸水或淡水,TDS 均小于 3000 mg/L,个别小于 1000 mg/L,水化学类型主要有 HCO_3^- · SO_4^{2-}— Na^+ · Mg^{2+} 型、HCO_3^- · Cl^-— Na^+ · Ca^{2+} · Mg^{2+} 型及 HCO_3^- · SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Mg^{2+} 型等,且多数样品含有 NO_3^-;B 类地下水 TDS 在 1000~3000 mg/L 之间,为微咸水,水化学类型主要有 HCO_3^- · SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ 型、HCO_3^- · SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Ca^{2+} · Mg^{2+} 型,且 NO_3^- 含量普遍偏高;C 类地下水 TDS 基本都在 3000 mg/L 以上,以咸水为主,水化学类型主要为 SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Mg^{2+} 型、SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ · Ca^{2+} 型和 SO_4^{2-} · Cl^-— Na^+ 型。

Gibbs 图可以用来说明水化学组分的成因机制(图 4)。将 3 类水分别投到 Gibbs 图上可发现,地下水样整体分布在“岩石分化型”1 和“蒸发浓缩型”区间,且 A 类水基本分布在靠近岩石风化端元,受岩石溶滤控制明显,结合 A 类水低矿化度特点,说明 A 类水受深层地下水影响,其来源可能为深层地下水作为农用地灌溉水直接下渗到浅层地下水,农药化肥的使用是导致该类水含有 NO_3^- 的原因,与

表 3 任丘地区浅层地下水化学主要离子质量浓度、TDS 之间相关关系矩阵

Table 3 Correlation coefficients between major ions and TDS value in shallow groundwater in Renqiu area

	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	TDS
Na^+	1							
Ca^{2+}	0.354*	1						
Mg^{2+}	0.518**	0.317*	1					
Cl^-	0.771**	0.597**	0.555**	1				
SO_4^{2-}	0.842**	0.586**	0.699**	0.654**	1			
HCO_3^-	0.18	-0.26	0.19	-0.07	-0.06	1		
NO_3^-	0.398**	0.304*	0.18	0.12	0.478**	-0.09	1	
TDS	0.916**	0.615**	0.707**	0.802**	0.958**	0.059	0.459**	1

注:* 表示在 0.05 级别上相关性显著;** 表示在 0.01 级别上相关性显著。

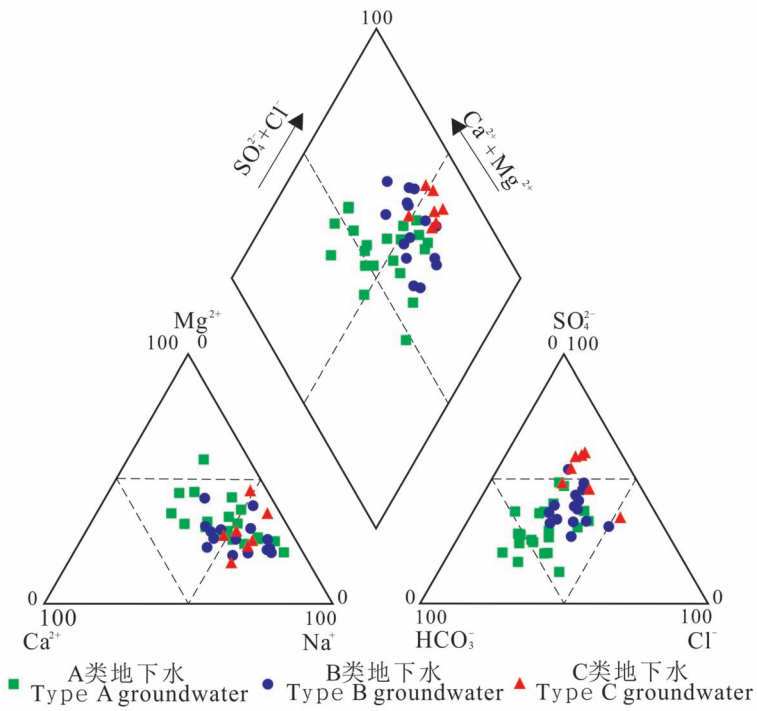

图 2 任丘地区浅层地下水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagram of the shallow groundwater in Renqiu area

A 类水多分布在远离市区的农用地相吻合。B 类水处于 A 类水向 C 类水过渡的位置,受岩石溶滤和蒸发浓缩两方面影响,结合在 B 类水 NO_3^- 含量较高及中等矿化度特点,说明 B 类水与地表水联系紧密,其形成过程为含 NO_3^- 的生活用水排放到附近地表水中,再通过地表水下渗到浅层地下水中。C 类水基本分布在蒸发浓缩型端元,该类水与外界联系较弱,基本保持原始浅层地下水的无 NO_3^-、低 HCO_3^-、高矿化度特点。

3.4　主成分分析

主成分分析是一种通过降维技术把多个变量化为少数几个主成分的统计方法,它可以对高维数据进行降维减少预测变量的个数。通过提取工作区浅层地下水中相关变量信息,可分析其主控因素。根据聚类分析结果,分别对 A、B、C 三类地下水进行主成分分析。

A 类地下水共提取了 4 个主成分,累计贡献率为 89.301%。其中第一主成分 F1 以 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 以及 TDS 为主,代表原始浅层地下水化学类型,主要为 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— Na^+型,与 C 类地下水化学类型基本一致;第二主成分 F2 以 Ca^{2++} 和 Mg^{2+} 为主,代表 A 类地下水受农用地灌溉水的影响,在向下渗透的过程中溶解地层中的易溶性盐,使地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量升高,这也与当地土壤盐碱化程度降低现象相符;第三主成分 F3 以 NO_3^- 为主,代表当地农业活动中使用过量的化肥、农药,导致地下水中含有 NO_3^-;第四主成分 F4 以 HCO_3^- 为主,代表灌溉水的阴离子主要为 HCO_3^-,这也与当地深层地下水水化学类型以 $NaHCO_3$ 型为主一致。

B 类地下水共提取了 3 个主成分,累计贡献率为 82.756%。其中第一主成分 F1 以 Na^+、Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 以及 TDS 为主,代表原始地下水化学类型,主要为 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— $Na^+\cdot Ca^{2+}$型,与 C 类地下水化学类型基本一致;第二主成分 F2 以 Na^+ 和 HCO_3^- 为主,代表人类生活用水多为 $NaHCO_3$ 型,与当地深层地下水水化学类型一致,同时地下水中 HCO_3^- 转变为 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 发生反应形成沉淀,导致 Ca^{2+} 含量降低;第三主成分 F3 以 NO_3^- 为主,代表当地生活污水

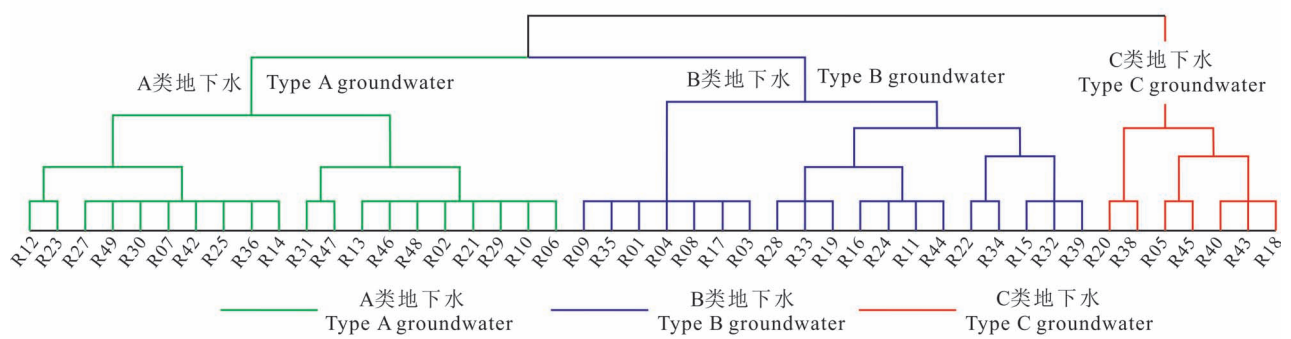

图 3 任丘地区浅层地下水聚类分析谱系图

Fig. 3 Cluster analysis diagram of shallow groundwater in Renqiu area

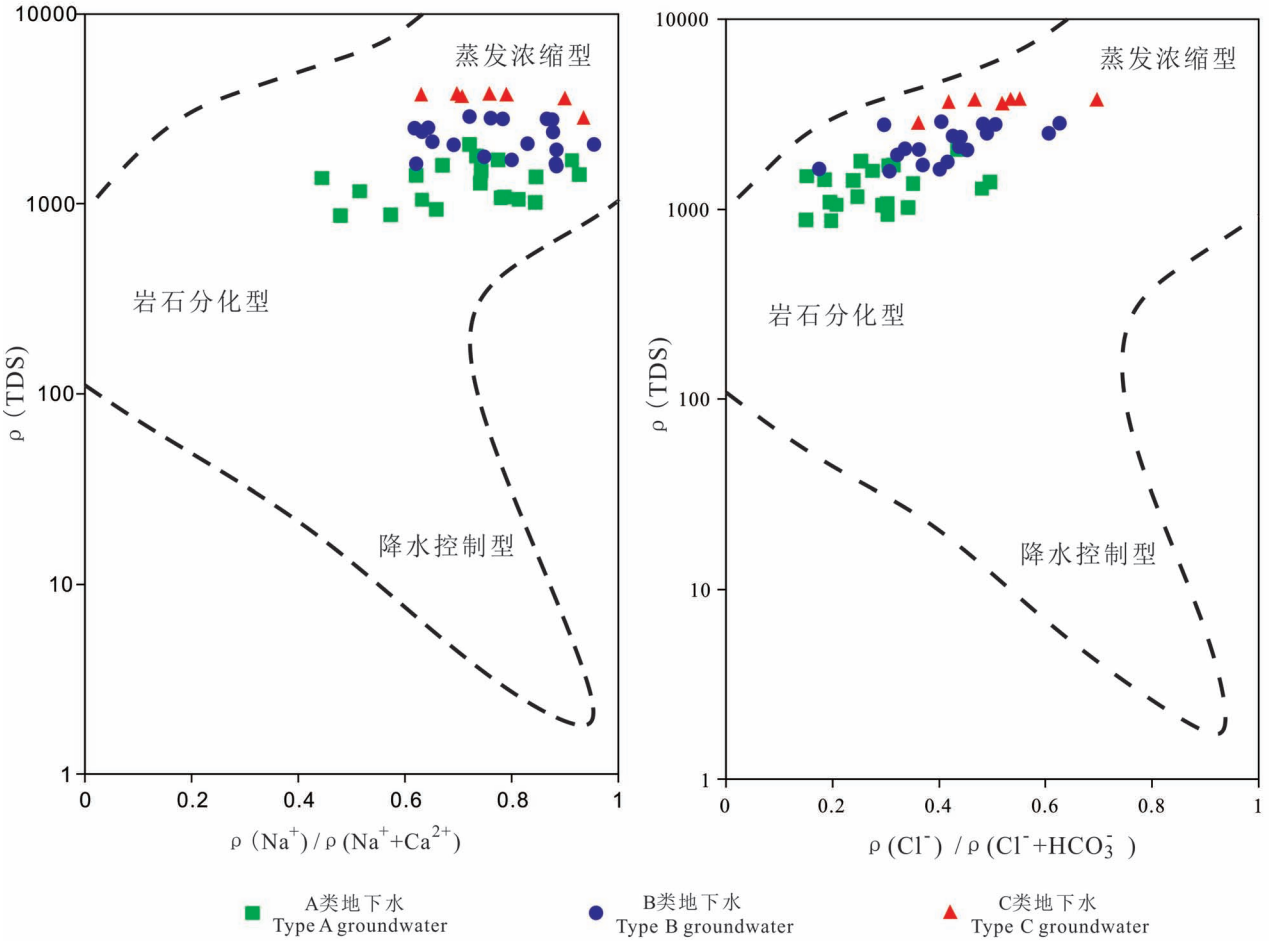

图 4 任丘地区浅层地下水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of shallow groundwater in Renqiu area

排放对地下水的影响。

C 类地下水共提取了 2 个主成分,累计贡献率为 79.510%。其中第一主成分 F1 以 Na^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-} 以及 TDS 为主,代表干旱环境下蒸发岩对浅层地下

表 4 任丘地区浅层地下水成分载荷矩阵表

Table 4 Matrix of rotated factor loadings of shallow groundwater in Renqiu area

主成分	A 类地下水				B 类地下水			C 类地下水	
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F1	F2
Na^+	0.781	−0.567	0.020	0.196	0.668	0.689	0.266	0.554	0.724
Ca^{2+}	0.416	0.755	0.280	−0.208	0.506	−0.751	−0.067	0.896	−0.078
Mg^{2+}	0.448	0.588	−0.503	−0.104	0.404	−0.143	−0.667	−0.878	0.080
Cl^-	0.737	0.061	0.030	−0.555	0.907	−0.003	−0.062	0.326	0.921
SO_4^{2-}	0.784	−0.382	0.173	0.028	0.924	−0.020	0.067	0.579	−0.696
HCO_3^-	0.450	0.365	−0.391	0.675	−0.229	0.843	−0.242	−0.823	0.189
NO_3^-	0.063	0.380	0.806	0.341	−0.043	−0.176	0.814	0.202	−0.783
TDS	0.991	−0.068	0.060	0.043	0.962	0.192	0.104	0.877	0.179
方差贡献率(%)	41.621	20.873	14.618	12.189	44.025	22.972	15.759	47.626	31.883
累积贡献率(%)	41.621	62.494	77.112	89.301	44.025	66.997	82.756	47.626	79.510

水的影响;第二主成分 F2 以 Na^+ 和 Cl^- 为主,代表海水入侵条件下对浅层地下水的影响。

4　结论

研究区浅层地下水受人类活动影响明显,按影响途径和程度可分为 3 类:A 类为深层地下水作为农业灌溉用水排放到地表后,通过下渗作用影响浅层地下水,该类水矿化度较低,为微咸水或淡水,水化学类型为 $HCO_3^-\cdot SO_4^{2-}$— $Na^+\cdot Mg^{2+}$ 型、$HCO_3^-\cdot Cl^-$— $Na^+\cdot Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型及 $HCO_3^-\cdot SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— $Na^+\cdot Mg^{2+}$ 型,多含 NO_3^-;B 类为生活污水排放到地表水,再通过地表水下渗到浅层地下水中,该类水为过渡型水,为微咸水,水化学类型为 $HCO_3^-\cdot SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— Na^+ 型、$HCO_3^-\cdot SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— $Na^+\cdot Mg^{2+}$ 和 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— $Na^+\cdot Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型,NO_3^- 含量相对较高;C 类为研究区原始浅层地下水,与地表水体连通性差,矿化度较高,为咸水,水化学类型为 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— Na^+ 型及 $SO_4^{2-}\cdot Cl^-$— $Na^+\cdot Ca^{2+}$ 型,受干旱环境下蒸发和海水入侵双重影响。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

李笑,于奭,李亮,郭永丽. 2020. 石期河流域地下水化学特征及物质来源分析[J/OL]. 环境科学, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201912261.

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. 灌溉排水学报,38(6):92~98.

屈吉鸿,李潇,张艺锋,湛江,吴佳美. 2019. 新乡市化工集聚区地下水化学特征及成因分析. 科学技术与工程,19(34):95~102.

沈照理,朱宛华,钟佐燊. 1993. 水文地球化学基础. 北京:地质出版社.

史箫笛,康小兵,许模,邓宏科. 2019. 川滇高原斜坡地带峡谷区岩溶水化学特征及演化规律. 地质学报,93(11):2975~2984.

王宝春,贾涛,刚什婷,邓英尔,刘伟坡,彭鑫. 2017. 蛤蟆通流域浅层地下水水文地球化学特征分析. 人民长江,48(16):43~48.

王大纯,张人权,史毅虹. 1980. 水文地质学基础. 北京:地质出版社.

王明君,梁秀娟,肖长来. 2019. 双辽市地下水化学特征及成因分析. 水利水电技术,50(3):124~131.

王攀,靳孟贵,路东臣. 2020. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制. 地球科学,45(6):2232~2244.

王仕琴,檀康达,郑文波,马林,宋献方,唐常源,胡春胜. 2021,白洋淀流域浅层地下水硝酸盐分布及来源的区域分异特征. 中国生态农业学报(中英文),29(1):230~240.

魏兴,周金龙,乃尉华,曾妍妍,范薇,李斌. 2019. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律. 环境科学,40(9):4042~4051.

吴翊,李永乐,胡庆军. 1995. 应用数理统计. 长沙:国防科技大学出版社.

尹子悦,林青,徐绍辉. 2018. 青岛市大沽河流域地下水水化学时空演化及影响因素分析. 地质论评,64(4):1030~1043.

张景涛,史浙明,王广才,姜军,杨炳超. 2020. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J/OL]. 地学前缘, https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.6.40.

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化学特征及控制因素. 环境科学,39(11):4981~4990.

张勇,郭纯青,朱彦光,于奭. 2019. 云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析. 环境科学,40(6):2686~2695.

郑涛,焦团理,胡波,龚建师,侯香梦,王赫生. 2020. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J/OL]. 环境科学, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202006037.

朱嘉欣,包雨恬,黎朝. 2018. 数据离群值的检验及处理方法讨论. 大学化学,33(8):58~65.

Delvalls T A, Forja J M, Gonza E, Goniazalez-MazoGonza E, Gomez Parra A. 1998. Determining contamination sources in marine sediments using multivariate analysis. Tr AC Trends in Analytical Chemistry,17(4):181~192.

He Jianhua, Ma Jinzhu, Zhang Peng, Tian et alLiming, Zhu Gaofeng, Edmunds W. Mike, Zhang Qinghuan. 2012. Groundwater recharge environments and hydrogeochemical evolution in the Jiuquan Basin, Northwest China. Applied Geochemistry, 27(4):866~87.

Li Xiao, Yu Shi, Li Liang, Guo Yongli. 2020&. Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in Shiqi River Basin[J/OL]. Environmental Science, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201912261

Li Xuguang, He Haiyang, Tian Hui, Dai Yajian, Zhu Wei, Sun Qifa. 2019&. Geochemistry of groundwater in Tongliao Horqin area. Journal of Irrigation Drainage, 38(6):92~98.

Qu Jihong, Li Xiao, Zhang Yieng, Zhanjiang, Wu Jiamei. 2019&. Analysis of groundwater chemical characteristics and cause of formation in chemical agglomeration area of Xingxiang City. Science Technology and Engineering, 19(34):95~102.

Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoshen. 1993#. Fundamentals of Hydrogeochemistry. Beijing: Geological Publishing House.

Shi Xiaodi, Kang Xiaobing, Xu Mo, Deng Hongke. 2019&. Hydrochemical characteristics an evolution laws of karst grounderwater in the slope zone of the canyou area, Sichuan—Yunnan Plateau. Acta Geologica Sinica, 93(11):2975~2984.

Wang Pan, Jin Menggui, Lu Dongchen. 2020&. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province. Earth Science, 45(6):2232~2244.

Wang Baochun, Jia Tao, Gang Shiting, Deng Yinger, Liu Weipo, Peng Xin. 2017&. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Hamatong Basin. Yangtze River. 48(16):43~48.

Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong. 1980#. Fundamentals of Hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House.

Wang Mingjun, Liang Xiujuan, Xiao Changlai. 2019&. Analysis on chemical characteristics and genesis of groundwater in Shuangliao City. Water Resources and Hydropower Engineering, 50(3):124~131.

Wang Shiqing, Tan Kangda, Zheng Wenbo, Ma Lin, Song Xianfang, Tang Changyuan, Hu Chunsheng. 2021&. Regional characteristics of nitrate sources and distributions in the shallow groundwater of the Lake Baiyangdian watershed. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 29(1):230~240.

Wei Xing, Zhou Jinlong, Nai Weihua, Zeng Yanyan, Fan Wei, Li Bin.

2019&. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar Delta area in Xinjiang. Environmental Science, 40 (9):4042~4051.

Wu Yi, Li Yongle, Hu Qingjun. 1995 #. Applied Mathematical Statistics. Changsha: National University of Defense Technology Press.

Yin Ziyue, Lin Qing, Xu Shaohui. 2018&. Spatial temporal variations and controlling factors of groundwater hydrochemical Characteristics in the Dagu River Basin. Geological Review, 64(4):1030~1043.

Zhang Tao, He Jin, Li Jingjie, Cao Yueting, Gong Lei, Liu Jinwei, Bian Chao, Cai Yuemei. 2018&. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River Basin. Environmental Science, 39(11):4981~4990.

Zhang Yong, Guo Chunqing, Zhu Yanguang, Yu Shi. 2019&. Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province. Environmental Science, 40 (6):2686~2695.

Zhang Jingtao, Shi Zheming, Wang Guangcai, Jiang Jun, Yang Bingchao. 2020&. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Dachaidan area, Qaidam Basin[J/OL]. Earth Science Frontiers, https://doi. org/10. 13745/j. esf. sf. 2020. 6. 40.

Zheng Tao, Jiao Tuanli, Hu Bo, Gong Jianshi, Hou Xiangmeng, Wang Hesheng. 2020&. Hydrochemical characteristics and its origin of groundwater in the middle part of Guohe River Basin[J/OL]. Environmental Science, https://doi. org/10. 13227/j. hjkx. 202006037.

Zhu Jiaxin, Bao Yutian, Li Zhao. 2018&. Discussion on the Method for Testing and Treating Outliers. University Chemistry, 33(8):58~65.

Chemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Renqiu City, Hebei Province

XUE Dongqing, XIE Mingzhong, LI Shaohu, DU Liyuan, LIU Yongkang, LI Peng

Institute of Environmental Geology, Hebei Coal Geology Bureau, Shijiazhuang, 050091

Abstract: the shallow groundwater is one of the important water resources in renqiu, to study the water chemical characteristics and formation mechanism, this paper on the basis of field investigation and sampling analysis laboratory, on the hydrogeochemical theory as the instruction, with the aid of multivariate statistics method, from various angles to reveal the evolution process of the formation of shallow groundwater in the study area:

(1) Through discrete analysis, it is considered that the variation coefficient of major ions in the study area is large, indicating that the shallow groundwater in the study area is obviously affected by human and the hydrochemical characteristics are complex.

(2) Through correlation analysis, it is believed that Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, and SO_4^{2-} are the main ions in the original shallow groundwater in the study area, while HCO_3^- and NO_3^- are foreign ions and heterologous ions.

(3) According to the cluster analysis, the shallow groundwater in the study area can be divided into three categories: A, B, and C, among which A is in the weathering end of rocks in Gibbs diagram, with low salinity, briny water or fresh water, containing HCO_3^- and NO_3^-, and is affected by agricultural irrigation water. Type B is in the transition from the weathering end to the evaporation and concentration end in Gibbs diagram. Its salinity is in the middle, and it is briny water with relatively high NO_3^- content, which is affected by domestic sewage. Class C groundwater is at the end of evaporation and concentration in Gibbs diagram, with high salinity, mainly salt water, poor connectivity with surface water, and close to the original shallow groundwater chemical type.

(4) According to the principal component analysis, the original groundwater chemical types in the study area are $SO_4^{2-} \cdot Cl^- — Na^+$ type and $SO_4^{2-} \cdot Cl^- — Na^+ \cdot Ca^{2+}$ type, which are affected by both evaporation in arid environment and seawater intrusion.

Keywords: shallow groundwater, hydrochemical characteristics, multivariate mathematical statistics, formation mechanism

Acknowledgements: This article was supported by Urban Geological Survey Project in Renqiu.

First author: XUE Dongqing, male, born in 1990, master, engineer, mainly engaged in geology; Email: 1036425256@ qq. com

Manuscript received on: 2021-06-09; Accepted on: 2021-11-25; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 12. 075 **Edited by**: ZHANG Yuxu, ZHAO Xue