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

苏北滨海县深层地下水化学特征及成因

汪名鹏[1, 2]

1)华北水利水电大学地球科学与工程学院,河南郑州, 450045;

2)江苏省水文地质工程地质调查大队,江苏淮安, 223005

内容提要:江苏滨海县地下水资源丰富,深层地下水一直是当地居民生活、生产的重要供水水源之一。为了查明苏北滨海县深层地下水化学特征及其控制因素,保障地下水资源开发和供水安全,采集研究区内深层地下水(第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水)和海水样品共43件。结合研究区水文地质条件、地下水开采现状,综合采用数理统计分析、Piper三线图、Gibbs图、Schoeller图、离子相关性分析和离子比值分析等方法,分析深层含水层不同类型地下水化学组成及水化学类型空间分布特征,探讨深层地下水水化学组分的控制作用和成因机制。结果表明:① 滨海县域范围内深层地下水总体上呈中—弱碱性,不同类型地下水平面上存在差异,总体上由西向东(由陆向海)呈增大趋势。② 水化学类型具有明显的水平分带性。第Ⅱ承压水以 Cl^- · HCO_3^-—Na^+ 型和 HCO_3^-—Na^+ 型为主;第Ⅲ承压水以 Cl^- · HCO_3^-—Na^+ 型和 HCO_3^- · Cl^-—Na^+ 型为主;第Ⅳ承压水均为 Cl^- · HCO_3^-—Na^+ 型水。随深度增加,地下水水化学类型由多元向单一转变。③ 研究区水化学特征受水—岩作用、阳离子交换作用的影响。岩石风化溶解是水化学特征的主要控制因素,且阳离子交换作用活跃,深层地下水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 等主要来源于硅酸盐矿物的溶解,Na^+、SO_4^{2-}、Cl^- 等主要来源于蒸发盐岩、硫酸盐矿物的溶解。目前深层地下水水化学特征尚未明显受到地下水长期过量开采等人类活动的影响,为避免或减缓地下水水位下降引起的深层地下水水质咸化等环境问题,建议合理布局深层地下水开采井,并合理调控取量。研究结果对江苏滨海地区深层地下水资源可持续开发利用和环境保护具有重要的意义。

关键词:深层地下水;水化学特征;水化学成因;离子比值;滨海县

地下水是人类赖以生存的重要的地质资源,对保障城镇居民生活、工业生产等用水安全、促进社会经济可持续发展具有至关重要的作用。江苏省滨海县地下水资源丰富,浅层地下水(潜水和第Ⅰ微承压水)资源由于水质较差,基本不具有开采价值,尚未大面积开采。深层地下水(第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水)是研究区城镇居民生活和工业生产重要供水水源,由于存在不合理的无序开发利用,面临着地下水超采以及水质咸化的风险。2008年以来,随着因地制宜,分区分类推进地下水管控措施的实施,县域范围内逐年限制、关停、封闭部分深水井,但地下水的水位下降以及水化学场的平衡破坏有滞后效应,对区域地下水供水安全存在隐患(张福洋等,2017;赵瑞科等2018;靳博文,2023;许益青等,2010;薛东青等2022)。因此,对江苏省滨海县深层地下水化学特征和影响因素的研究,有助于解译地下水超采引发的水环境问题的影响程度,对区域地下水资源可持续开发利用、供水安全和环境保护都具有重要意义(杨淇翔等,2012;吴平等,2019)。

研究区地下水问题的研究部分学者都集中在浅层地下水的水质健康风险和浅层地下水咸化机理研究(侯国华等,2021;付昌昌等,2017),也有学者对江苏沿海其他城市地下水超采引发的地下水水质环境问题进行研究(周慧芳等,2011;徐玉琳,2002;黄敬军等,2004)。有学者对研究区周边类似地区进行过地下水水化学特征和成因研究,付昌昌(2015)对淮河流域沿海平原地区、张岩等(2017)对江苏盐城地区、陶小虎等(2023)对阜宁县地下水水化学特征及咸水成因进行研究。由于每个地区的各含水层间、层内的地下水分布差异(丁小凡等,2021)和地

注:本文为"江苏省滨海县地下水资源与地质环境调查项目"的成果。

收稿日期:2023-12-22;改回日期:2024-06-22;网络首发:2024-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.065

作者简介:汪名鹏,男,1973年出生,博士研究生,研究员级高级工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质调查研究;Email:ahwmp@163.com。

下水受人工开采的程度差异,地下水水化学特征以及成因类型也同样存在异同,而且涉及到滨海县域范围内的深层地下水化学分析较少,水样采样点也比较稀疏。为此,在前人研究工作的基础上,以滨海县域深层含水层地下水为研究对象,基于滨海县地下水水文地质条件、开采现状以及水位动态分析的基础上,运用水化学数理统计、Piper 三线图、Gibbs 模型、Schoeller 图、主要离子相关分析等方法,对研究区深层含水层不同类型地下水化学特征的时空分布规律进行分析,揭露了地下水水化学成分的控制因素,为指导滨海县地下水合理开发利用和供水安全提供依据(袁利等,2022)。

1 滨海地区概况

1.1 自然地理概况

滨海县位于盐城市东北部,东濒黄海(图 1),地处北亚热带与南暖温带的过渡地带,属湿润季风气候。多年平均降水量 994.5 mm,降雨集中期为 6~9 月。滨海县境内海岸线总长度 44.6 km。陆域成陆时间较短,唐宋之前还是一片汪洋,自南宋黄河夺淮后,黄河携带的大量泥沙不断在入海口沉积(代景良等,2021),使滨海及附近地区成为陆地。由于黄河历次泛滥作用,高漫滩、决口扇、自然堤、堤外洼地微地貌发育,地势起伏较明显,但总趋势是西北高,东南低。滨海县属淮河水系,地势低洼,素有“洪水走廊”之称。东西向河流有苏北灌溉总渠、射阳河、废黄河;南北向河流有通榆运河与境内南、中、北八滩渠汇流成网。

1.2 滨海地区含水层概况

1.2.1 浅层含水层

研究区浅层含水层由全新统冲积相潜水和上更新统海、陆交替相第Ⅰ微承压水组成。研究区浅层含水层地下水以咸水为主,溶解性总固体的质量浓度(TDS)多在 3~10 g/L,近海区域 TDS 高达 20 g/L 以上,同时受到海水、潮汐影响,仅在废黄河高漫滩和部分河流两侧存在 TDS 为 1~3 g/L 潜水淡化带(付昌昌,2015)。浅层地下水富水性较差,水质较差,开采利用价值较小。

1.2.2 深层含水层

研究区深层含水层主要由第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水构成。第Ⅱ承压含水层由上、中更新统粉细砂、中砂为主,具多层结构,上部多呈透镜体状分布,大部分地段缺失,下部厚度 10~35 m,分布较普遍,平面上由西南向沿海逐渐加深加厚(图 2a);第Ⅲ承压水由下更新统河湖相 1~3 层砂层组成,单层厚度大,富水性良好,分布稳定,由西南向沿海逐步尖灭,砂层厚度 10~35m,其中滨海县城—北坍一线西南及八巨、振东等沿海地区厚度为 10~20 m;中部地区厚度大于 20m(图 2b)。第Ⅳ承压水由新近系上新统中砂、

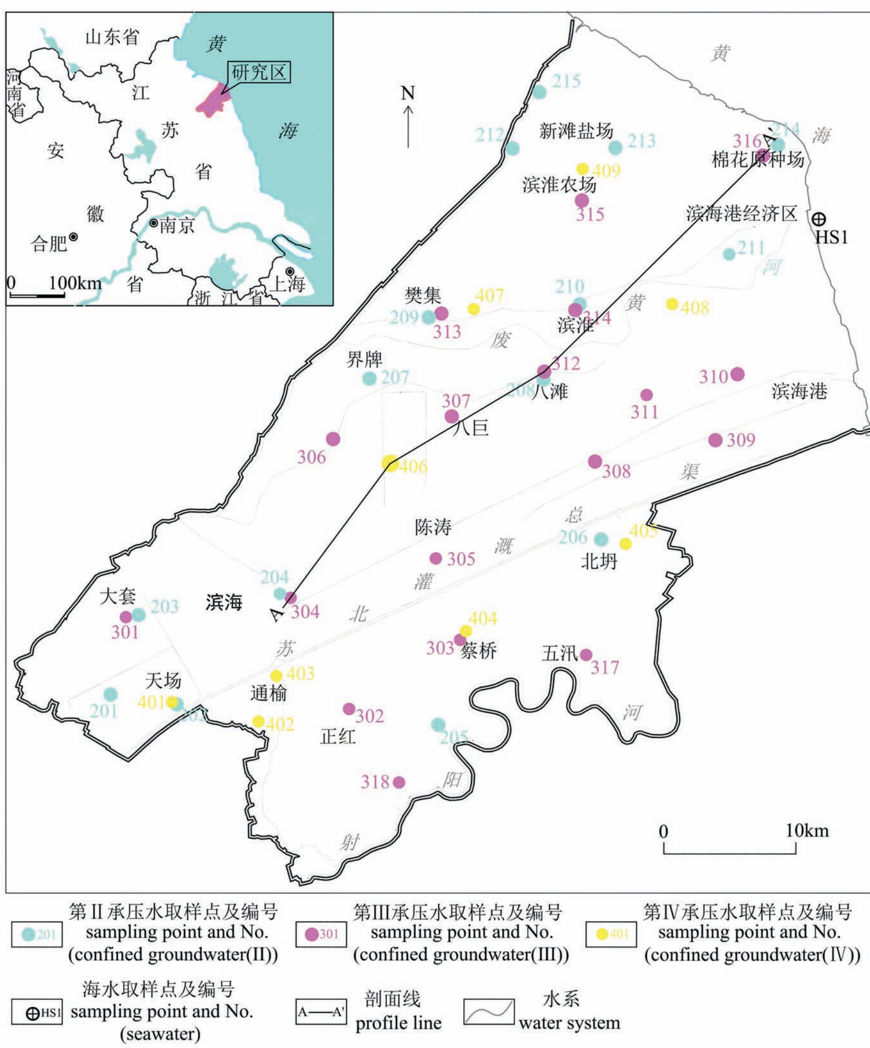

图 1 地下水样品采样点分布图

Fig. 1 Location of the sampling points

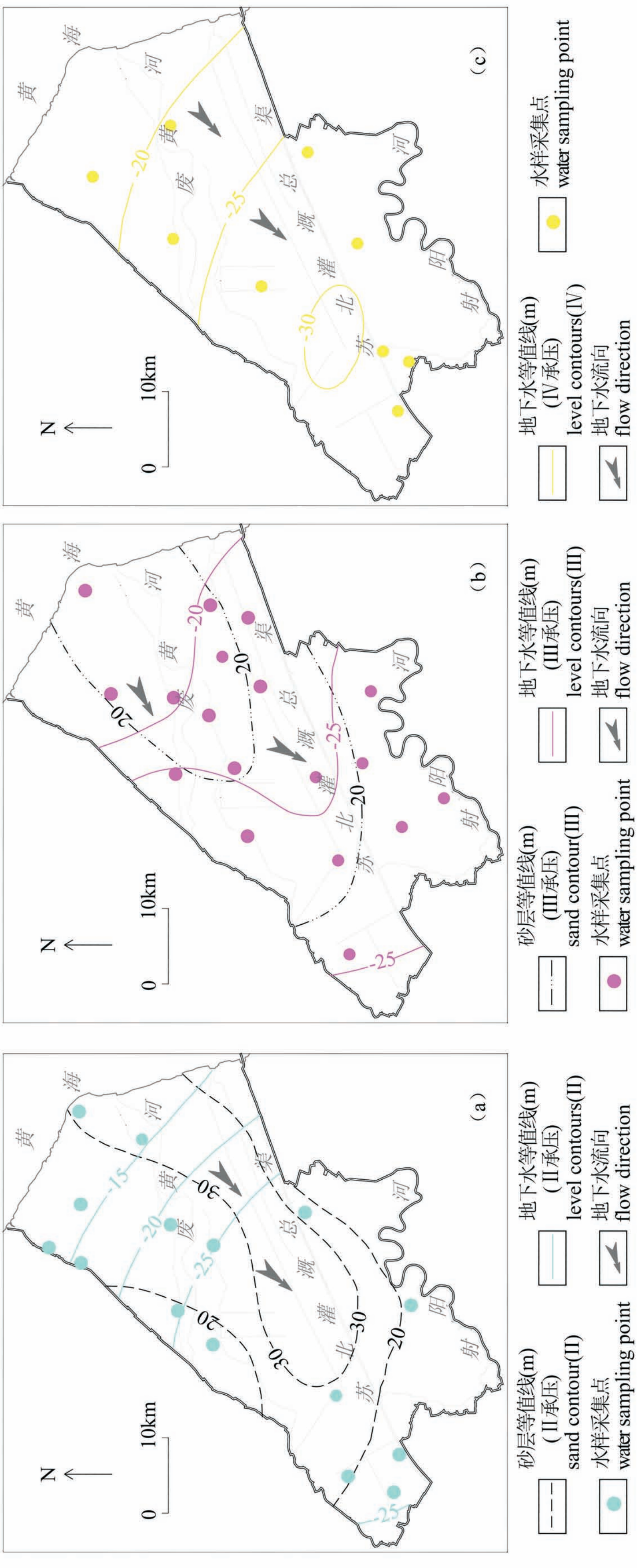

图2 苏北滨海地区II、III、IV承压含水层地下水等值线图

Fig. 2 Groundwater contour maps (II, III, IV) of Binghai area, northern Jiangsu

粉细砂为主,呈多层(4~5 层以上)结构,单层厚度一般数米,个别达十多米;总厚度可达 20 m,局部达三、四十米(图 3)。第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压含水层是滨海县主要开采层位。人工开采是深层地下水的主要排泄途径,补给以侧向径流和相邻含水层组越流补给为主。由于浅层地下水(潜水与第Ⅰ微承压水)与深层地下水砂层之间有较厚的黏性土相隔,故自然状态下两层地下水之间一般无水力联系。

2　滨海地区地下水开采现状及水位

2.1　深层地下水开发利用现状

由于浅层含水层地下水主要接受降水和地表水补给,补给源丰富,但水质较差,基本上未开发利用,处于天然状态。但是深层含水层地下水(第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水)为研究区主要开采层,20 世纪 80 年代以来,开采量逐年增加,到 1993 年开采量达到最高峰,之后全区地下水开采量增长幅度得到控制,见表 1。近几年地下水开采总量均在 900 万立方米以下,大部分(约 80%)作为农村生活饮用,少部分(近 20%)作为工业用水等。

2.2　地下水水位

深层地下水开采较集中于县城、通榆、八滩等地,地下水水位动态多为径流—开采型,其水位动态变化主要受人为开采因素控制;在开采较微弱的地区,地下水位动态变化受人为开采因素影响较小,水位年变幅多小于 1.0~2.0 m,水位动态基本稳定。

随着 20 世纪 80 年代以后地下水的超量开采,第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水水位持续下降。截至到 2018 年,第Ⅱ承压水位于八滩—樊集一线以西地下水位平均埋深在 27.87

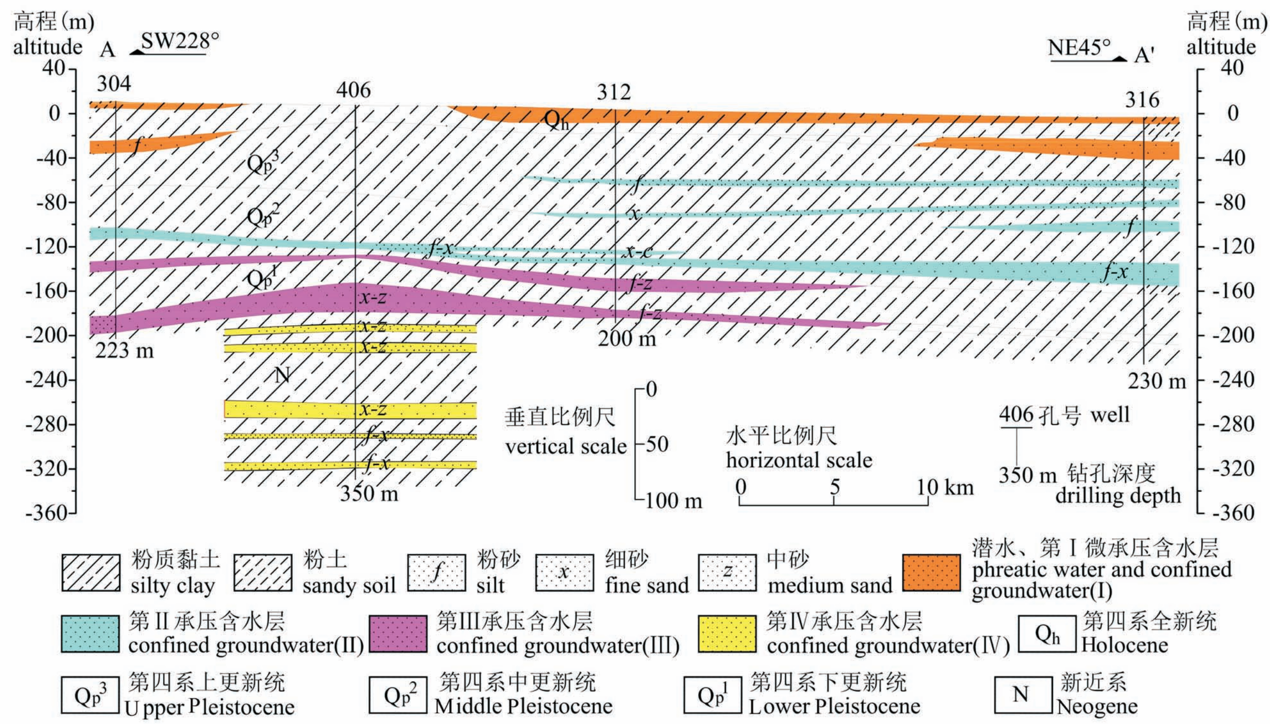

图 3 苏北滨海地区典型水文地质剖面图(图 1 中剖面 A—A′)

Fig. 3 Typical profile of the Binhai area, northern Jiangsu (the Profile A—A′ in the Fig. 1)

m,最大水位埋深达 31.56 m(大套中心水厂,标高-26.5 m),以东地下水位埋深一般 15~25 m(标高-10~-25 m)(图 2a);第Ⅲ承压水位于樊集—陈涛—蔡桥一线以西地下水位平均埋深在 28.29 m(标高低于-25m),其他地区水位埋深多在 20~25 m 之间(标高-10~-25m)(图 2b);第Ⅳ承压水以界牌—八巨—北坍一线为界,西南部地下水位埋深多大于 27m(标高低于-25 m),东北地区水位埋深小于 25 m(标高低于-20 m),其中县城、蔡桥等地水位埋深超过 30 m(标高达-30 m)(图 2c)。

3 地下水样品采集及测试

为了查明研究区深层地下水化学特征的分布规律,基于江苏省滨海县地下水资源与地质环境调查项目的野外地质调查工作,于 2018 年 8 月分别针对第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压含水层组地下水采集样品和测试工作,采集样品位置主要为乡镇分散性供水机井、企事业单位自建机井以及少数地下水监测井等。本次研究共采集深层地下水水样 42 件,其中第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压含水层组地下水水样分别 15 件、18 件和 9 件,同时在滨海港附近采集海水样 1 件(图 1)。在采样过

表 1 苏北滨海地区深层地下水开采利用情况

Table 1 Utilization of deep groundwater extraction in Binhai area, northern Jiangsu

	开采量(×10^4 m^3/a)					开采井数量(2018 年)	成井深度(m)	分布情况
	1986 年	1993 年	2006 年	2012 年	2018 年			
第Ⅱ承压水	42.61	235.54	105.72	95.28	78.4	31	约 150m	集中在县城附近乡镇以及滨海港,占开采井总数的 50%
第Ⅲ承压水	137.39	548.09	339.4	340.67	309.77	139	170~230	集中在县城周边、通榆、大套滨滩农场、八巨、八滩等地,占开采井总数 72%
第Ⅳ承压水	274.6	669.69	481.5	457.43	419.3	168	250~260	集中在县城周边占 35%,其他乡镇零星分布 1~2 眼
合计	454.6	1453.32	926.62	893.38	807.47	338		

程中考虑了采样点的分布均匀性和水文地质条件的差异性，基本上保证了采样点的代表性。地下水样品严格按照《地下水采样技术规程》（DZ/T 0420-2022）进行采样、保存和运送，地下水样品的分析测试由具备 CMA 资质的江苏省水文地质工程地质勘察院实验室完成，测试质量符合各项技术指标的规定要求。

测试指标包括溶解性固体总量（TDS）、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}、$CO_3{}^{2-}$、$NO_3{}^-$等常规离子的质量浓度。

4　结果和分析

4.1　水化学特征及类型

4.1.1　水化学参数统计特征

对研究区深层地下水各类型的地下水溶解性固体总量 TDS、pH 值、总硬度和主要常规离子质量浓度统计分析（表 2）。深层地下水 pH 值在 7.62～8.32，平均 7.98，为中—弱碱性水。从统计结果来看，研究区深层地下水阳离子质量浓度 $\rho(Na^+) > \rho(Ca^{2+}) > \rho(Mg^{2+})$，阴离子质量浓度 $\rho(HCO_3^-) > \rho(Cl^-) > \rho(SO_4^{2-})$，总硬度在 135～395 mg/L，以中硬水—硬水为主（仅第Ⅱ承压水 2 个样品测试数据为软水），占 95% 以上。TDS 在 0.664～1.536 g/L 范围内，不同类型地下水在平面上存在差异。第Ⅱ承压水 TDS 大部分地区在 1.0～1.5 g/L 之间，仅西南角（滨海县城—陈涛乡）TDS 小于 1.0 g/L，TDS 由西向东呈增高趋势，具地域分带特征，东北角新滩盐场 TDS 高达 1.90 g/L。第Ⅲ承压水大套—陈涛—北坍一线以西 TDS 小于 1.0 g/L，以东多在 1.0～1.5 g/L 之间；第Ⅳ承压水 TDS 小于 1.0 g/L 主要分布在大套—通榆—蔡桥—北坍以西，往东多在 1.0～1.5 g/L 之间（图 4）。总体上，研究区深层地下水 TDS 由西向东（由陆向海）表现为逐渐增大趋势。

研究区深层地下水水化学参数统计的变异系数在 0.02～0.71 之间，属于弱变异性—中等变异性，表明第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压含水层地下水水化学参数的空间变异性相对较小。

通过绘制地下水样品中的 TDS 数值与不同阴、阳离子的浓度关系散点图（图 5），由图可知，随着 TDS 的增加，Na^+、Cl^-离子浓度对应的增加，呈现出了良好的正线性关系，相关系数 r 大于 0.90，其它阴、阳离子浓度也基本上呈现线性关系。尤其是 HCO_3^-、Cl^-、Na^+离子，增加的幅度远大于其他离子，可以表明这三种离子对于 TDS 增加的贡献较大。也表明研究区深层地下水在径流过程中 TDS 的升高主要是由于盐岩的溶解作用。

4.1.2　水化学类型

通过绘制研究区水化学 Piper 三线图（图 6），可知，研究区深层地下水中阴、阳离子分布总体上分布较集中，尤其是第Ⅲ、Ⅳ承压水更为明显。阳离子偏向于右下角，以 $Na^+ + K^+$ 型为主，阴离子分布集中靠近 Cl^-轴，也有少部分靠近 HCO_3^- 轴，表明 Cl^-占阴离子的总浓度的比例较高。按舒卡夫分类，研究区深层地下水化学类型共有 HCO_3^- · Cl^-—Na^+型、Cl^- ·

表 2 苏北滨海地区地下水水化学参数统计

Table 2 Statistical characteristics of groundwater hydrochemical parameters of Binhai area, northern Jiangsu

地下水类型	指标	pH	质量浓度 ρ(mg/L)								
			总硬度	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$HCO_3{}^-$	Cl^-	$SO_4{}^{2-}$	TDS
第Ⅱ承压水	最大值	8.32	313	392	3.70	69.1	35.3	537	430	158.5	1990
	最小值	7.62	197	169.6	1.55	40.8	21.9	405	60.3	79.2	664
	平均值	7.90	248.6	253.2	2.61	54.7	27.2	480.78	209.4	107.3	1103.5
	标准差	0.26	42.17	80.98	0.86	8.57	5.46	46.99	149.64	23.57	437.7
	变异系数	0.03	0.17	0.32	0.33	0.16	0.20	0.10	0.71	0.22	0.40
第Ⅲ承压水	最大值	8.32	360	456	9	79.2	43.8	530.9	560.1	156.1	1536
	最小值	7.69	135	208	1.21	28.1	10.3	390.5	124.1	62.4	728
	平均值	7.98	243.9	290.7	3.50	51.2	27.0	444.4	282.2	103.2	995.8
	标准差	0.20	81.30	63.83	1.95	16.70	10.12	38.22	115.58	30.52	209.31
	变异系数	0.02	0.33	0.22	0.56	0.33	0.37	0.09	0.41	0.30	0.21
第Ⅳ承压水	最大值	8.32	395	362	5.7	86.2	50.3	497.3	485.7	158.5	1248
	最小值	7.72	169	260	1.16	36.9	18.6	375	269	52.8	830
	平均值	8.07	286	301	2.65	62.2	34.5	421.4	357.2	99.5	1028.4
	标准差	0.27	81.53	38.59	1.30	16.29	10.84	41.46	77.34	31.86	170.31
	变异系数	0.03	0.28	0.13	0.49	0.26	0.31	0.10	0.22	0.32	0.17

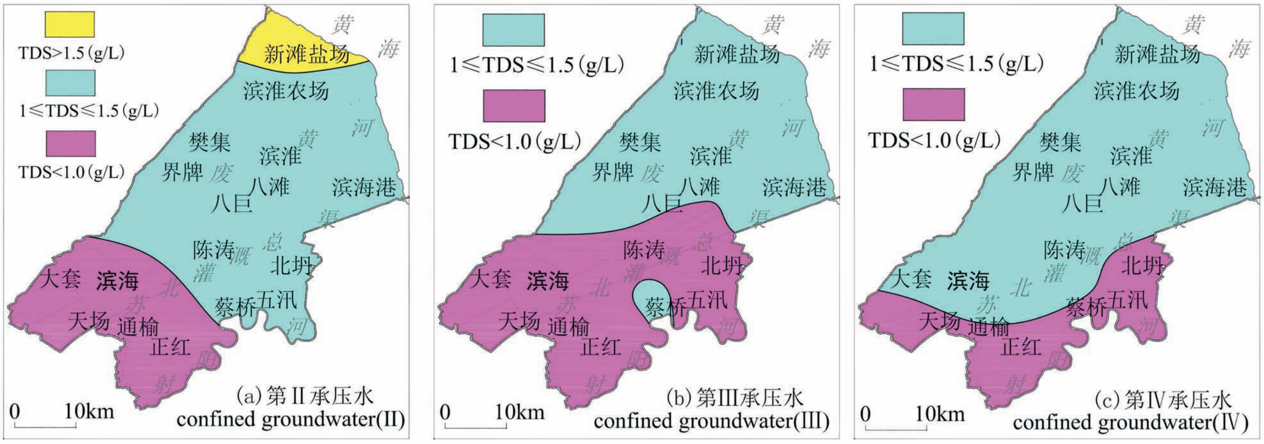

图 4 滨海地区深层地下水 TDS 分布示意图

Fig. 4 Schematic distribution of TDS in deep groundwater in Binhai area

HCO_3^-—Na^+型、HCO_3^-—Na^+型三种类型。

不同类型深层地下水也具有不同的水化学类型，而且在分布上也存在地域分带性。第Ⅱ承压水水化学类型较为复杂，具有 HCO_3^- · Cl^-—Na^+型、Cl^- · HCO_3^-—Na^+型、HCO_3^-—Na^+型三种类型。陈涛—蔡桥一线以西为 HCO_3^-—Na^+型，以东大片区域为 Cl^- · HCO_3^-—Na^+型，仅在界牌—樊集—滨淮以西狭长区域为 HCO_3^- · Cl^-—Na^+型。第Ⅲ承压水水化学类型具有 HCO_3^- · Cl^-—Na^+ 型和 Cl^- · HCO_3^-—Na^+型，陈涛—北坍一线以西为 HCO_3^- ·

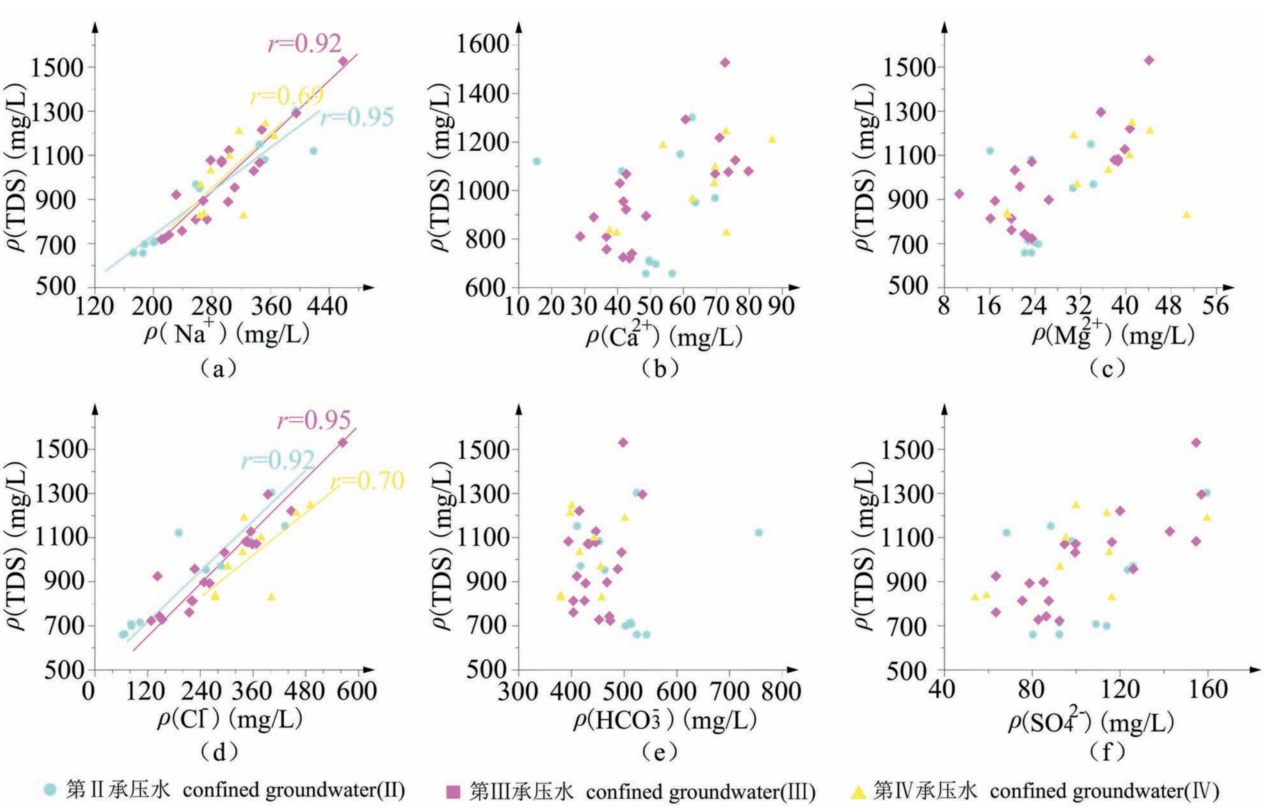

图 5 滨海地区地下水中 TDS 与主要阴、阳离子的关系

Fig. 5 Relationships between TDS and major positive and negative ions in groundwater in Binhai area

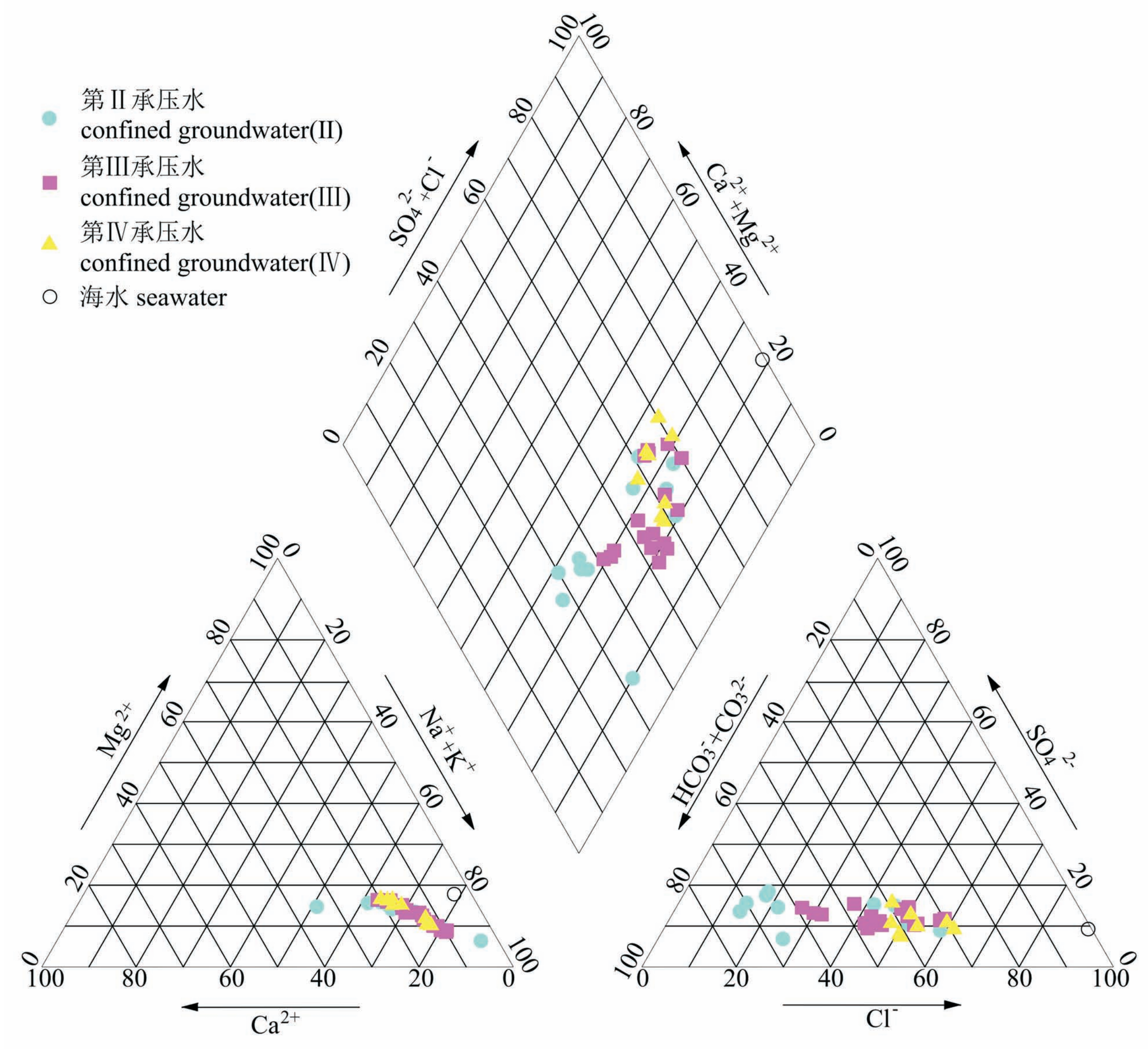

图 6 滨海地区地下水 Piper 三线图(图中各离子的单位是毫克当量百分比)

Fig. 6 Piper diagram of groundwater in Binhai area(the unit of the ions in figures is milligram equivalent percent)

Cl^-—Na^+型，以东为 $Cl^-\cdot HCO_3^-$—Na^+型。第Ⅳ承压水水化学类型较为简单，全域均为 $Cl^-\cdot HCO_3^-$—Na^+型(图 7)。

4.2 水化学特征成因分析

地下水的化学特征反映了区域地质发展史以及人类活动强度，因此，地下水化学成分与地形地貌、气候气象、赋存介质、地下水运动条件、不同水体的混合作用以及人类活动等相关(付昌昌，2015)。Gibbs 图一般被广泛应用于地下水化学组分的影响机制的主要因素(姜体胜等，2017)，将地下水体中的 TDS 值与 $\frac{\rho(Na^+)}{\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})}$ 以及与 $\frac{\rho(Cl^-)}{\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)}$的关系图，分为蒸发结晶控制、水岩作用控制和大气降雨控制三种(Gibbs，1970)。将研究区所有深层地下水水样的阴、阳离子数据绘制于 Gibbs 图中(图 8)，深层地下水水样点偏向于水—岩作用控制型区域内，表明研究区地下水主要受到水—岩相互作用，少量点同时受蒸发结晶作用影响。图 8 中有少数水样点处于虚线外面，表明控制地下水化学组份的影响作用还存在其他因素，较

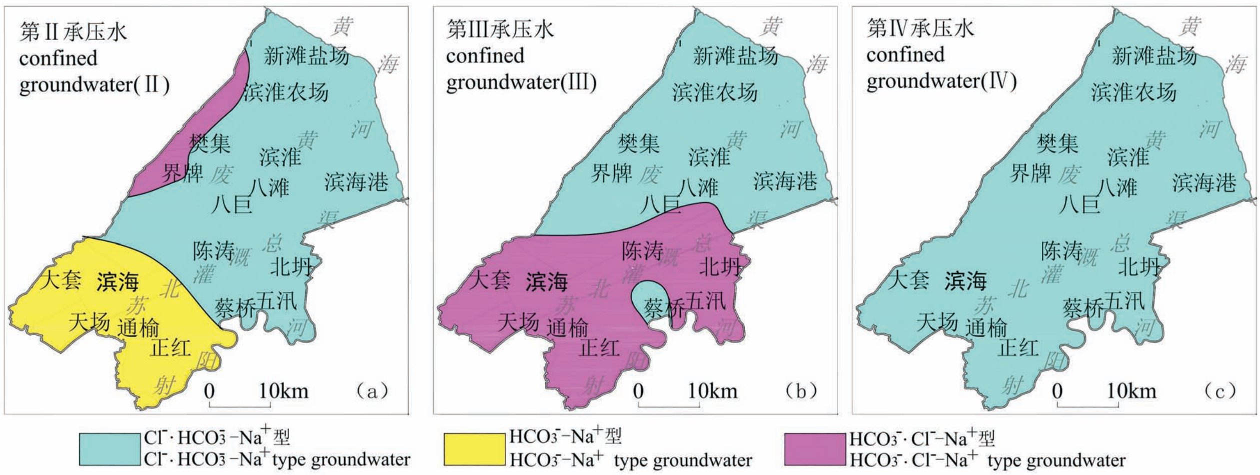

图 7 滨海地区深层地下水水化学类型分布示意图

Fig. 7 Schematic distribution of deep groundwater hydrochemical types in Binhai area

为常见的就是阳离子交换作用等。

为了进一步研究水—岩相互作用的水化学过程，通过地下水离子比值来进一步识别地下水化学离子组分来源(白华等，2023)。可以通过钠氯比值来判断地下水中的 Na^+ 离子和 Cl^- 离子的来源(尹子悦等，2018)，一般标准海水的钠氯比值[$\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$]平均为 0.85(周慧芳等，2011)，本次在滨海港取海水样分析钠氯比值为 0.88。从图 9a 可以看出，第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水测试样品钠氯比值均大于 0.85，表明研究区深层地下水不具有明显的古海水特征。钠氯比值第Ⅱ承压水 1.39～4.71，平均值 2.75，第Ⅲ承压水 1.20～2.61，平均 1.75，第Ⅳ承压水 1.08～1.67，平均 1.34，从统计结果来看：越往深部地下水钠氯比值越来越减小，尤其是第Ⅳ承压水相对于第Ⅱ、Ⅲ承压水钠氯比值减小较多，推测地下水的盐分可能与残留海水混合有关，可能与人类活动有关。通过钠氯比值统计，研究区的地下水样钠氯比值大于 1，主要是由于深层地下水在径流过程中通过水—岩相互作用发生了含钠硅酸盐类矿物的溶解，同时发生阳离子的交换，导致钠氯比值偏高。

钙镁系数 $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$ 也是反映地下水化学成因的参数之一。一般海水中钙少镁多，海水中钙镁比达到 1:4～1:5，根据在滨海港所采取的海水样分析钙镁比达到 1:5。研究区第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承

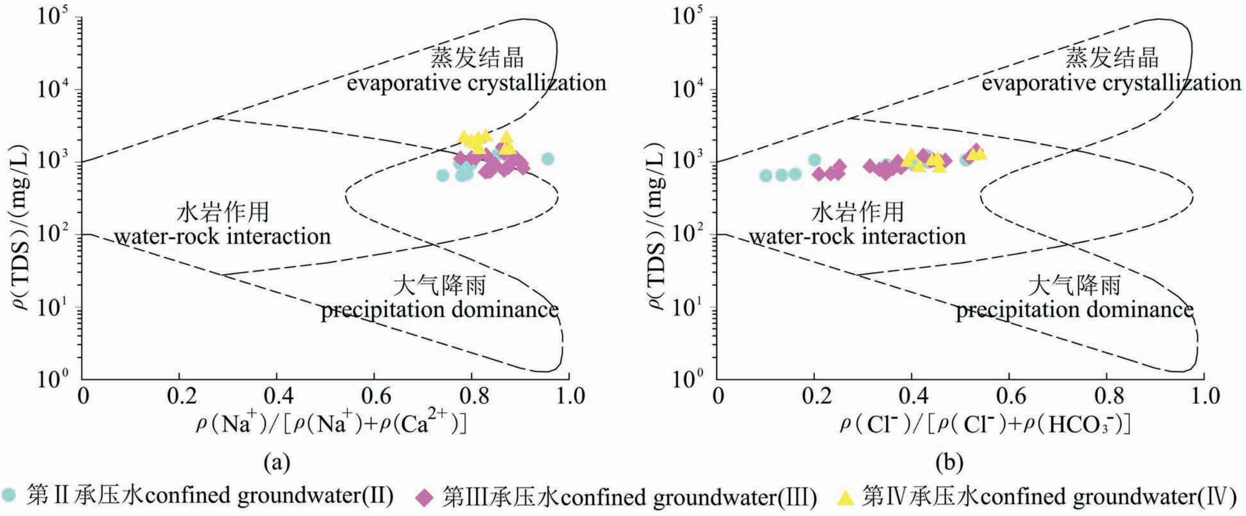

图 8 滨海地区地下水水化学 Gibbs 图

Fig. 8 Hydrochemical Gibbs diagram of groundwater in Binhai area

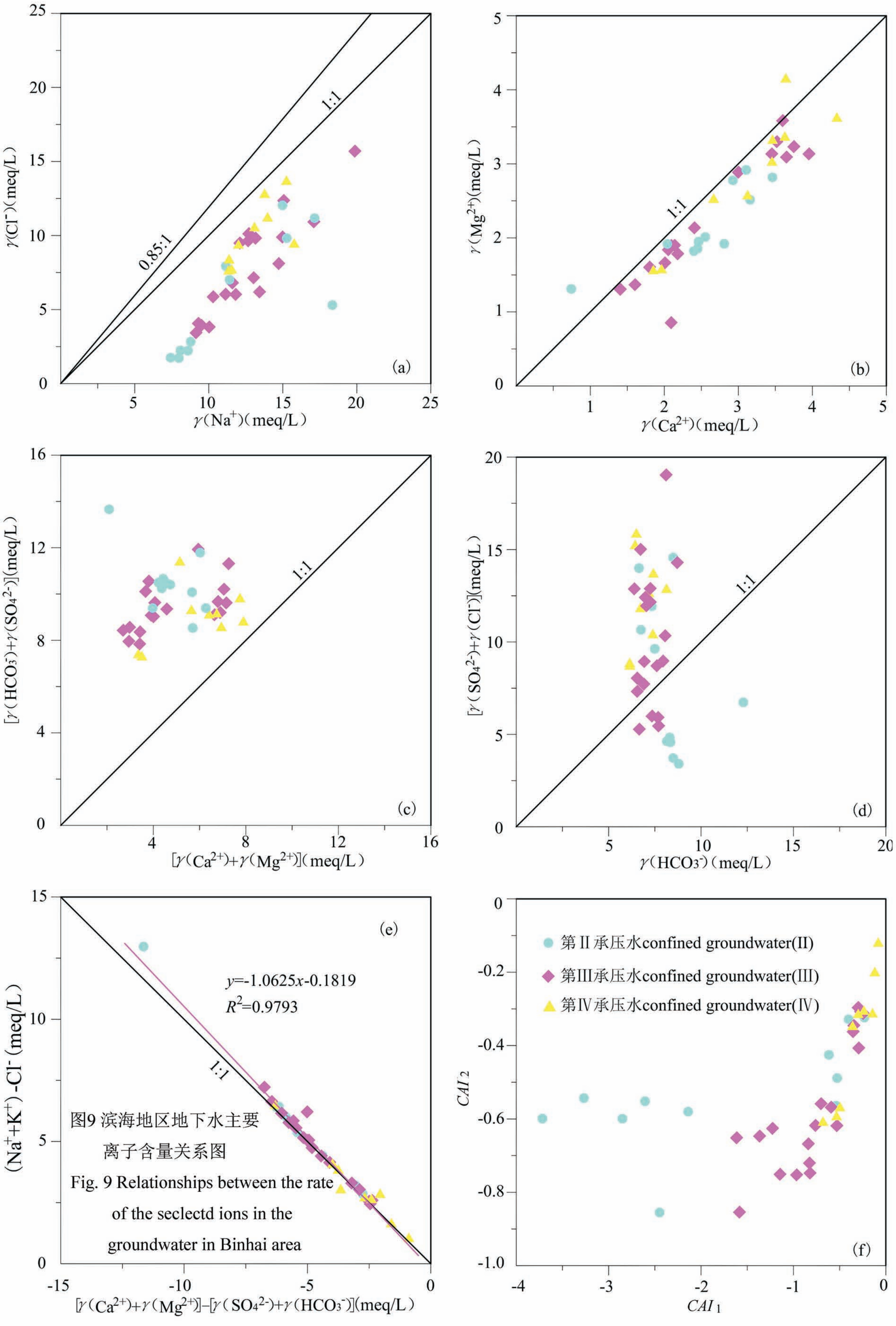

图9 滨海地区地下水主要离子含量关系图

Fig. 9 Relationships between the rate of the seclectd ions in the groundwater in Binhai area

压水的 $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$ 分别为 0.58～1.47（平均值 1.15）、1.00～21.48（平均值 1.20）、0.87～1.26（平均值 1.12）（图 9b），远大于海水钙镁比值（1∶5），表明研究区内深层地下水受到现代海水入侵或与海相沉积水混合可能性低。

研究区新近系—第四系地层发育，厚度 300～600 m，岩性以粉质黏土、黏土及粉砂—粗砂为主，下伏砂岩、泥岩、灰岩等，含有较多的硅酸盐、碳酸盐等矿物，是地下水化学成分的源泉。地下水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 以及 SO_4^{2-} 一部分主要来自碳酸盐岩或蒸发盐岩的风化溶解（袁利等，2022），因此，采用 $\frac{\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})}{\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})}$ 值来判别地下水中的这些离子的可能来源。根据图 9c 所示，全部地下水样均分布于 1∶1 等当量线上方，也就是说 $\frac{\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})}{\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})}$ 值均小于 1，表明研究区深层承压水中 HCO_3^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐矿物或硫酸盐矿物的溶解和蒸发盐岩的溶解，碳酸盐矿物的溶解次之。

进一步绘制 $\gamma(HCO_3^-)$ 与 $[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(Cl^-)]$ 散点图（图 9d）。大约 76% 以上的水样位于 1∶1 等当量线上方，表明研究区地下水中蒸发盐岩的溶解作用强于碳酸盐矿物的溶解作用。第Ⅳ承压水的水样点全部位于 1∶1 等当量线上方，表明越往深层地下水蒸发盐岩溶解作用对地下水化学组分形成的影响越大。

采用 $[\gamma(Na^+)-\gamma(Cl^-)]$ 与 $\{[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]-[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(HCO_3^-)]\}$ 之间的相关性可以较好的反映出阳离子交换作用是否明显（Zhu Gaofeng et al., 2010）。一般当 $\frac{\gamma(Na^+)-\gamma(Cl^-)}{[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]-[\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})]}$ 值接近 −1 时，表明地下水中阳离子交换作用明显（李政，2022）。通过绘制 $[\gamma(Na^+)-\gamma(Cl^-)]$ 与 $\{[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]-[\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})]\}$ 关系散点图（图 9e），表明研究区内深层地下水各类型地下水均沿着斜率 −1.0625 的呈直线分布（$R^2=0.9793$），线性拟合很好，也说明了研究区阳离子交换作用在地下水化学组份形成中起着重要的作用，且呈负相关性，导致研究区地下水 $\gamma(Na^+)$ 浓度随着 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]$ 浓度的降低而增加，这也是地下水中 $\gamma(Na^+)$ 浓度偏高的原因。

为了进一步研究地下水中阳离子的交换作用强弱，采用地下水氯碱指数（*CAI*）来判别。

$$CAI_1=\frac{\gamma(Cl^-)-\gamma(Na^+)-\gamma(K^+)}{\gamma(Cl^-)} \quad (1)$$

$$CAI_2=\frac{\gamma(Cl^-)-\gamma(Na^+)-\gamma(K^+)}{\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(HCO_3^-)} \quad (2)$$

根据式 1、式 2，绘制 CAI_1、CAI_2 散点图（图 9f），所有水样的 CAI_1 与 CAI_2 均为负值，表明地下水中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 与含水层中的 Na^+、K^+ 发生了离子交换，导致地下水中 Na^+ 浓度升高，Ca^{2+}、Mg^{2+} 浓度降低。

Schoeller 图可以清楚的显示所取地下水样品中 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-} 等主要离子的浓度变化和地下水化学变化趋势（Machiwal and Jha, 2015）。从图 10 可以看出，第Ⅱ、第Ⅲ承压水部分样品组分曲线形状差异较大，主要表现在 Cl^- 离子浓度波动幅度比较大，也说明了第Ⅱ、第Ⅲ承压水存在多种化学类型的混合或者地下水化学类型的形成受到多种因素的影响。第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水各参数浓度值在图中大部分呈现出平行线趋势，表明研究区地下水的水化学演变规律基本相似，也表明了研究区取样点地下水补给来源基本一致（姜体胜等，2017；王亚维等 2019）。

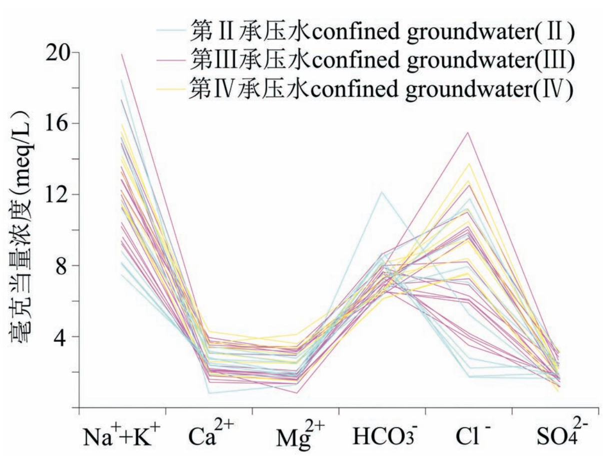

图 10 滨海地区地下水 Schoeller 图

Fig. 10 Schoeller diagram of the groundwater in Binhai area

4.3 地下水超采对深层地下水化学特征影响

研究区浅层地下水（潜水、第Ⅰ承压水）水质较差，在自然状态下，浅层地下水与深层地下水（第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水）之间由于有较厚的黏性土相隔，故深、浅层地下水之间一般无水力联系。但是随着地下水超采的历史进程，滨海县城附近地下水位埋深达到最大 30 m 以上，随着地下水位不断下降和地

下水降落漏斗的形成和发展，水力坡度变大，水交替变强，加剧了地下水对围岩溶解等水动力作用，最终会导致地下水水化学组分发生变化。虽然从本次所取的水样样本分析，尚未发现因地下水超采等人类活动对地下水化学成分影响的直接证据，但是，地下水超采引起的深层地下水水位下降对深层地下水资源的安全构成一定威胁，若任其发展，则后果十分严重，对此应予以高度重视。

另外，不规范成井方法对深层地下水化学特征的变化有较大的影响。施工人员缺乏成井质量和地下水资源保护意识，施工过程中没有严格按有关规范操作，对浅层地下水以及第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水不同含水层没有严格止水或止水不当，成井质量差，使得浅、深层地下水不同含水层发生水力联系，尤其是水质较差的浅层地下水补给深层地下水，使深层地下水水化学特征改变，恶化了研究区内的地下水系统水文地质条件和地下水环境质量。

5　结论

（1）滨海县域范围内深层地下水为中—弱碱性水，不同地下水类型、不同地域 TDS 值存在差异。研究区 TDS 除西南角小于 1.0 g/L，其他区域 TDS 在 1.0～1.5 g/L 之间，其中第Ⅱ承压水东北角新滩盐场 TDS 高达 1.90 g/L。总体上 TDS 由西向东（由陆向海）呈增大趋势。

（2）研究区深层地下水化学类型主要有 $HCO_3^-\cdot Cl^-$—Na^+ 型、$Cl^-\cdot HCO_3^-$—Na^+ 型、HCO_3^-—Na^+ 型三种类型，分布上存在地域分带性。第Ⅱ承压水陈涛—蔡桥以西为 HCO_3^-—Na^+ 型，以东为 $Cl^-\cdot HCO_3^-$—Na^+ 型，仅在界牌—樊集—滨淮以西为 $HCO_3^-\cdot Cl^-$—Na^+ 型；第Ⅲ承压水陈涛—北坍以西为 $HCO_3^-\cdot Cl^-$—Na^+ 型，以东为 $Cl^-\cdot HCO_3^-$—Na^+ 型；第Ⅳ承压水全区均为 $Cl^-\cdot HCO_3^-$—Na^+ 型。随深度增加，地下水水化学类型由多元向单一转变。

（3）水—岩作用是研究区内深层地下水化学组分的主要控制因素，且阳离子交换作用活跃，地下水超采等人类活动目前对深层地下水化学组份的影响甚微。深层地下水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 等主要来源于硅酸盐矿物的溶解，Na^+、SO_4^{2-}、Cl^- 等主要来源于蒸发盐岩、硫酸盐矿物的溶解，也有少量来源碳酸盐岩的溶解。深层地下水中 Na^+ 的增高主要受到阳离子交替吸附作用影响。

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）

白华，杨会峰，孟瑞芳，徐步云，闫晓雪. 2023. 保定平原区地下水化学特征及演化. 地质评论，69(6)：2216～2228.

代景良，戴姜栗原. 2021. 乡土植物在地域性城市园林景观中的应用研究——基于柽柳属植物在东营市城市园林景观中的应用. 现代农业研究，27(1)：67～68.

丁小凡，方樟，高晗，刘柱光，李继森. 2021. 基于人为开采响应的小尺度地下水可持续性评价——以吉林省大安市为例. 南水北调与水利科技（中英文），19(6)：1175～1183.

付昌昌，李向全，张岩，毛磊，龚绪龙. 2017. 盐城滨海平原地下水质量现状及健康风险评价. 水资源与水工程学报，28(5)：54～60.

付昌昌. 2015. 淮河流域沿海平原深层地下水水化学特征及咸水成因. 导师：林学钰，苏小四. 长春. 吉林大学硕士学位论文：1～76.

侯国华，高茂生，党显璋，陈广泉. 2021. 江苏盐城滨海地区浅层地下咸水的水盐来源及咸化成因. 海洋地质与第四纪地质，41(4)：48～59.

黄敬军，陆华. 2004. 江苏沿海地区深层地下水开发利用现状及环境地质问题. 水文地质工程地质，31(6)：64～68.

姜体胜，曲辞晓，王明玉，胡波. 2017. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析. 干旱区资源与环境，31(11)：122～127.

靳博文. 2022. 保定平原地下水环境演化机制与调控对策研究. 导师：王文科. 西安. 长安大学硕士学位论文：1～91.

李政. 2022. 石家庄平原区地下水水化学特征研究. 导师：李铎，范存良. 石家庄. 河北地质大学硕士学位论文：1～102.

陶小虎，王赫生，龚建师，许乃政，檀梦皎，胡小雨，戴飞虎，孟显超，朱春芳，周锴锷，李亮. 2023. 苏北阜宁县地下水水化学特征及成因分析. 华东地质，44(3)：357～366.

王亚维，王中美，王益伟，褚双燕. 2019. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及水质评价. 节水灌溉，2019(6)：60～66.

吴平，闫中永，李英，黄小琴，徐兆祥，童彦钊. 2019. 青铜峡市北部地下水水化学特征及成因分析. 宁夏工程技术，18(4)：379～384.

徐玉琳. 2002. 江苏省南通市深层含水系统地下水水质咸化特征及成因分析. 中国地质灾害与防治学报，13(2)：47～51.

许益青，李瑞敏，刘永生，靳孟贵. 2010. 保定平原区潜水水化学演化特征及成因初探. 地质通报，29(8)：1228～1238.

薛东青，谢明忠，李少虎，杜丽媛，刘咏康，李鹏. 2022. 河北省任丘市浅层地下水化学特征及形成机制. 地质论评，68(1)：245～252.

杨淇翔，陈南祥. 2012. 基于集对分析与三角模糊数耦合的地下水环境质量评价. 中国农村水利水电，(8；总 358)：38～42.

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.

袁利，蒋少杰，汪定圣，李婷. 2022. 宿州市城区地下水化学特征及成因机制研究. 地质论评，68(4)：1555～1566.

张福洋，程伍群，冉红达. 2017. 保定市平原区地下水位变化规律及影响因素分析. 水电能源科学，35(8)：128～132.

张岩，付昌昌，毛磊，龚绪龙，李向全. 2017. 江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理. 长江流域资源与环境，26(4)：598～605.

赵瑞科，曹文庚，杨会峰，王凤元，李元杰，陈南祥. 2018. 呼和浩特盆地地下水演化特征研究. 人民黄河，40(5)：78～82，88.

周慧芳，谭红兵，张西营，张文杰，孙雪. 2011. 江苏南通地下水补给源、水化学特征及形成机理. 地球化学，40(6)：566～576.

Bai Hua, Yang Huifeng, Meng Ruifang, Xu Buyun, Yan Xiaoxue. 2023&. Chemical characteristics and evolution of groundwater in

Baoding Plain. Geological Review, 69(6): 2216～2228.

Dai Jingliang, Dai Jiangliyuan. 2021&. Study on the application of native plants in Regional Urban Landscape-based on the application of tamarix in Dongying City landscape. Modern Agriculture Research, 27(1): 67～68.

Ding Xiaofan, Fang Zhang, Gao Han, Liu Zhuguang, Li Jisen. 2021&. A small-scale groundwater sustainability assessment based on the response of artificial mining: A case study of Da ′an City, Jilin Province. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology (in Chinese and English), 19(6): 1175～1183.

Fu Changchang, Li Xiangquan, Zhang Yan, Mao Lei, Gong Xulong. 2017&. Groundwater quality evaluation and the health risk assessment of Yancheng Coastal Plain. Journal of Water Resources and Water Engineering, 28(5): 54～60.

Fu Changchang. 2015&. The hydrochemical characteristics and processes for salinity sources of the deep confined groundwater in the coastal plain of Huai river basin. Jilin University: 1～76.

Gibbs R J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170(3962): 1088～1090.

Hou Guohua, Gao Maosheng, Dan Xianzhang, Chen Guangquan. 2021&. Water and salt sources and salinization of shallow saline groundwater in the coastal area of Yancheng, Jiangsu. Marine Geology & Quaternary Geology, 41(4): 48～59.

Huang Jingjun, Lu Hua. 2004&. Aquifers and environmental geological problems in the coastal areas in Jiangsu Province. Hydrogeology and Engineering Geology, 31(6): 64～68.

Jiang Tisheng, Qu Zhixiao, Wang Mingyu, Hu Bo. 2017&. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater and the origin in the Pinggu plain, Beijing. Journal of Arid Land Resources and Environment, 31(11): 122～127.

Jin Bowen. 2022&. Study on Evolution Mechanism and ControlCountermeasures of Groundwater Environment in Baoding Plain. Chang′an University, 1～91.

Li Zheng. 2022&. Study on the Chemical characteristics of groundwater in Shijiazhuang plain. Hebei GEO University: 1～102.

Machiwal D, Jha M. K. 2015. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. Journal of Hydrology: Regional Studies, 4: 80～110

Tao Xiaohu, Wang Hesheng, Gong Jianshi, Xu Naizheng, Tan Mengjiao, Hu Xiaoyu, Dai Feihu, Meng Xianchao, Zhu Chunfang, Zhou Kai E, Li Liang. 2023&. Hydrochemical characteristics and genesis of the groundwater in Funing County, NorthenJiangsu. East China Geology, 44(3): 357～366.

Wang Yawei, Wang Zhongmei, Wang Yiwei, Chu Shuangyan. 2019&. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of karst groundwater in Guiyang. Water Saving Irrigation, (6): 60～66.

Wu Ping, Yan Zhongyong, Li Ying, Huang Xiaoqin, Xu Zhaoxiang, Tong Yanzhao. 2019&. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the North of Qingtongxia . Ningxia Engineering Technology, 18(4): 379～384.

Xu Yiqing, Li Ruimin, Liu Yongsheng, Jin Menggui. 2010&. Discussion on the evolution characteristics of phreatic water hydrochemistry of Baoding plain, Hebei, China. Geological Bulletin of China, 29(8): 1228～1238.

Xu Yuling. 2002&. The salted properties and its origin for deep aquifer system in Nantong City. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 13(2): 47～51.

Xue Dongqing, Xie Mingzhong, Li Shaohu, Du Liyuan, Liu Yongkang, Li Peng. 2022&. Chemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Renqiu City, Hebei Province. Geological Review, 68(1): 245～252.

Yang Qixiang, Chen Nanxiang. 2012&. A coupling model of set pair analysis and triangular fuzzy numbers for evaluation of groundwater environmental quality. China Rural Water and Hydropower, 358(8): 38～42.

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.

Yuan Li, Jiang Shaojie, Wang Dingsheng, Li Ting. 2022&. Study on hydrochemical characteristics and formation of groundwater in urban district of Suzhou. Geological Review, 68(4): 1555～1566.

Zhang Fuyang, Cheng Wuqun, Ran Hongda. 2017&. Variation of groundwater level and its influencing factors analysis in plain area of Baoding City. Water Resources and Power, 35(8): 128～132.

Zhang Yan, Fu Changchang, Mao Lei, Gong Xulong, Li Xiangquan. 2017&. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of the groundwater in Yancheng, Jiangsu province. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 26(4): 598～605.

Zhao Ruike, Cao Wengeng, Yang Huifeng, Wang Fengyuan, Li Yuanjie, Chen Nanxiang. 2018&, Study on evolution characteristics of groundwater in Hohhot Basin. Yellow River, 40(5): 78～82, 88.

Zhou Huifang, Tan Hongbing, Zhang Xiying, Zhang Wenjie, Sun Xue. 2011&. Recharge source, hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Nantong, Jiangsu Province. Geochimica, 40(6): 566～576.

Zhu Gaofeng, Su Yonghong, Huang Chunlin, Feng Qi, Liu Zhiguang. 2010. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Heihe River Basin, northwest China. Environmental Earth Sciences, , 60(1); 139～153.

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of deep groundwater in Binhai County, northern Jiangsu

WANG Mingpeng[1,2)]

1) *College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power*, *Zhengzhou*, 450045;

2) *Jiangsu Province Hydrogeological and Engineering Geological Survey Brigade*, *Huaian*, *Jiangsu*, 223005

Objectives: The groundwater resources in Binhai County are aboundand, and the deep groundwater is one of the most important sources of water supply for local residents, living and production. In order to investigate the hydrochemical characteristics and control factors of the deep groundwater in Binhai County, Northern Jiangsu Province, and to safeguard the development and water supply security of groundwater resources.

Methods: The study collected a total of 43 samples of deep groundwater (the Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ pressurized aquifers) and seawater. Combined with the hydrogeological conditions and current situation of groundwater exploitation, statistical analysis, Piper trilinear diagram, Gibbs diagram, Schoeller diagram, ion correlation analysis and ion ratio and other methods were used to analyze the chemical composition of groundwater and spatial distribution characteristics and to investigate the controlling role and formation mechanisms of the hydrochemical components of deep groundwate.

Results: ① the deep groundwater within the Binhai County region is typocally moderately alkaline, with notable variations in Total dissolved solids (TDS) levels across different aquifers. This variations tend to increase from west to east (from land to sea). ② The hydrochemical characteristics of groundwater have the obvious zonation patterns. The main hydrochemical types of the secong confined groundwater are $Cl^- \cdot HCO_3^-$—Na^+ and HCO_3^-—Na^+ types; the main hydrochemical types of the third confined groundwater are $Cl^- \cdot HCO_3^-$—Na^+ and $HCO_3^- \cdot Cl^-$—Na^+ types; the hydrochemical types of the fourth confined groundwater is $Cl^- \cdot HCO_3^-$—Na^+ type. With the increase of depth, hydrochemical types have changed from pluralism to singleness. ③ The hydrochemical characteristics of the study area are affected by water—rock cation exchange, rock weathering and dissolutionare the main controlling factor. Moreover, the cation exchange is active. Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, etc. in deep groundwater mainly come from the dissolution of silicate rock, While, Na^+, SO_4^{2-}, Cl^-, etc. mainly come from the dissolution of evaporite saline rocks and sulfate rock.

Conclusions: The current hydrochemical characteristics of deep groundwater have not yet been significantly affected by human activities such as long-term over-exploitation of groundwater. To avoid or slow down risk of deep groundwater salinization and other environmental issues, it is recommended to reasonably distribute deep groundwater extraction wells and reasonably regulate the amount of withdrawals. These results findings have important implications for groundwater sustainable development and environmental protection in such water-receiving areas of the coastal area of Jiangsu Province.

Keywords: deep groundwater; hydrochemical characteristics; hydrochemistry genesis; ion ratio; Binhai County

Acknowledgements: This artical was supported by "investigation of groundwater resources and geological environment in Binhai County, Jiangsu Province, China".

First author: WANG Mingpeng, male, born in 1973, doctoral candidate., professor of senior engineer, mainly engaged in hydrogeology, engineering geology and environmental geology; Email: ahwmp@163.com

Manuscript received on: 2023-12-22; Accepted on: 2024-06-22; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.065 **Edited by**: ZHANG Yuxu