

黄河三角洲浅层地下水化学特征与演化

曹建荣¹, 徐兴永², 于洪军², 黄 翀³

(1. 聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 2009年4月~2010年3月连续2年对黄河三角洲19口地下水监测井进行观测并对地下水离子化学成分分析,探讨了该区域浅层地下水化学成分、水化学类型及演化规律,为揭示区域地下水环境特征和演化具有现实意义。结果表明,黄河三角洲地区地下水pH值变化较小,地下水埋深较浅且年内变化幅度为1.0~3.0 m,但矿化度和各离子差异明显,地下水以Na⁺、Cl⁻占绝对优势;矿化度较低的测井的离子浓度变幅较小,反之,矿化度高的测井离子浓度变幅较大;地下水化学类型分为氯化物型、重碳酸盐氯化物型、重碳酸盐氯化物硫酸盐型和硫酸盐重碳酸盐型四大类型,主要包括Na⁺-Cl⁻、Na⁺-Cl⁻·HCO₃⁻、Na⁺-Cl⁻·HCO₃⁻·SO₄²⁻、Na⁺-HCO₃⁻·Cl⁻·SO₄²⁻和Na⁺-SO₄²⁻·HCO₃⁻六种类型,氯化物型主要分布于广饶县咸水入侵区和滨海区域,重碳酸盐氯化物型主要分布于黄河三角洲保护区内,重碳酸盐氯化物硫酸盐型分布在广饶县咸水入侵区,硫酸盐重碳酸盐型主要分布在靠近黄河流路附近;根据黄河三角洲流路变迁和Gibbs模型,黄河三角洲地区水样化学组成均落在Gibbs提出的Boomerang Envelope模型右上翼,表明研究区水样化学组成主要受蒸发和沉淀作用,海水控制起次要作用,土地利用变化、灌溉、施肥等人为活动的影响亦不能忽视。

关键词: 地下水埋深; 水化学; 水化学类型; Gibbs模型; 演化; 黄河三角洲

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)12-0078-08

doi: 10.11759/hyqx20131112002

水资源是基础自然资源,是生态环境的控制性因素之一。同时又是战略性经济资源,是一个国家综合国力的重要组成部分。自20世纪70年代以来,随着世界人口剧增,经济高速发展,全球用水量急剧增长,水污染日益严重。水资源,尤其是地下水成为制约我国社会经济可持续发展与生态环境建设最重要的因素之一^[1-4]。长期以来,气候干旱和以水资源开发利用为核心的大强度人类经济活动,不仅使河流水系的水质水量时空分布产生改变,而且强烈干扰与之有密切水力联系的地下含水层^[5-6]。地下水环境的变化对区域经济和生态平衡稳定起到了举足轻重的作用^[7]。而地下水水化学类型是地下水化学成分集中体现,是地下水循环途径和整个水流系统特征的反映,因此,了解地下水水化学类型的分布规律,不仅有助于认识区域地下水水文地球化学特征,而且对深入研究区域地下水的循环特征、水动力场特征和环境演化过程均有重要意义^[8]。而区域地下水水文地质特征和水文地球化学性质又决定了地下水运移演化的方向及规律,所以,对地下水水化学的时空变异特征与演变规律研究,可以更好地揭示地下水与环境的相互作用机制,

对区域生态系统的健康稳定有着极其重要的现实意义。

地下水作为黄河三角洲地区水循环的重要环节,对河口湿地自然保护区的存在与发展,以及营养盐经含水层向海输运和粉砂淤泥质海岸的稳定性等,都有重要作用^[4]。学者曾对黄河三角洲地区局地地下水、咸水的形成和演变^[9]、典型区域地下水动态分析和空间变异性^[10]、水化学特征及营养盐入海通量^[11-12]以及地下水与耕层土壤积盐空间分异^[13]、地下水主控水盐因子^[14]、地下水开发的适宜性评价^[15]等做过相关研究。但由于黄河三角洲地区地下水主要是微咸水、咸水,资源开发价值不大,长期未得到关注。仅有的研究局限于村镇区域或未深入剖析地

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2014-03-24

基金项目: 国家科技支撑计划(2010BAC68B00); 国家973重点基础研究发展规划项目(2010CB951200); 海洋公益专项(2011418020); 山东省科技攻关(2013GHY11518); 山东省自然科学基金(ZR2010DL008, Y2008E27); 山东省高等学校科技计划项目(J11LE54); 聊城大学博士启动基金

作者简介: 曹建荣(1977-),男,山东安丘人,博士,讲师,研究方向: 海洋地质与水文地质, E-mail: caojianrong@lcu.edu.cn

下水的整体分布和形成演化过程, 尚未从全区的角度针对浅层地下水的空间分布、水化学特征、类型和演化规律进行详细研究。为此, 本研究利用研究区域内逐月连续观测的 19 个测井, 2009~2010 年的水位水质监测数据, 探讨了该区域地下水化学成分特点、水化学类型及时空分布特征, 分析地下水埋深、pH 值、主要离子间的相关性, 并根据黄河流路的变迁结合 Gibbs 模型探索研究区的地下水迁移和演化规律。为合理利用地下水资源、开发利用和保护黄河三角洲湿地资源提供科学依据和管理思路, 也为黄河三角洲高效生态经济区的开发建设和黄河下游生态调度等提供科学参考。

1 研究区概况

1.1 自然概况

研究区属典型的温带半湿润气候, 并具有明显的大陆性气候特点: 四季分明, 干湿明显, 温差大, 夏季炎热, 冬季干冷; 多年平均降水量 537.4 mm, 多年平均蒸发量 1 470~2 246 mm, 多年平均气温为 11.7°C, 无霜期历年平均 217.8 d。该区属于现代黄河三角洲范畴, 主要以现状海岸线和 1855 年改道来的古海岸线为界, 总面积约 5 077.7 km², 包括东营市河口区和垦利县绝大部分行政区域, 包含胜利油田及黄河三角洲国家级自然保护区。该区地势平坦, 南高北低, 西高东低, 海拔高度低于 11 m, 自然比降为 1/8000~1/12000。现代黄河三角洲属于小清河以北黄泛平原区, 处于黄河尾间河段的冲淤交替、以淤为主的状态, 按照地貌、沉积物和构造条件制约, 浅层地下水主要赋存于第四系上部的冲积、海积层中的松散沉积物孔隙含水层中, 粉砂和黏土质粉砂是地下水的赋存介质。

1.2 水文地质条件

研究区地貌类型主要为河道高地、决口扇、泛滥平原和洼地, 黄河作为该区的主要分水岭把现行河道和刚废弃的刁口流路形成三角叉状, 整个现代三角洲可分为 3 个大的水文地质单元(图 1): A 区、B 区和 C 区。宏观上, 这 3 个水文地质单元的地下水各有一主流方向, A 区的主流方向为 NNW; B 区的主流方向为 SEE; C 区的主流方向为 NEE。整个三角洲地下水流向呈扇型放射状^[16]。浅层地下水可分为 3 种类型: 一种是分布于小清河以南的面状分布的浅层地下淡水; 一种为三角洲近黄河大堤随黄河水的

不断深入构成的带状地下淡水透镜体和赋存于古河道主流带、小扇顶或决口扇泛滥区的高透水性砂体, 该水层薄且受季节变化控制, 补给主要为洪水期河水侧向渗流及沼泽、湖泊、水库、渠系、农田灌溉渗漏; 第三种则广泛分布于全区的微咸水和咸水, 面积最大, 为黄河尾间摆动过程中经过长期蒸发积聚和沉淀浓缩而成的。

2 监测井布设和研究方法

为系统调查黄河三角洲地区浅层地下水, 2009 年 4 月, 在黄河三角洲地区布设海水入侵监测井 19 口(图 1)。监测井为专用井, 口径统一为 12 cm, 取水层位全部为潜水层, 钻井深度在 10 m 左右。地下水位与水质每月监测一次。水位测量采用平尺水位计, 地下水样采集深度为水面以下 1 m。监测井主要分布于黄河两岸、黄河故道和黄河灌区, 分别针对河流、古河道和灌区进行水位、水质(八大离子和 Br⁻)、电导率(EC)、矿化度(TDS)监测。

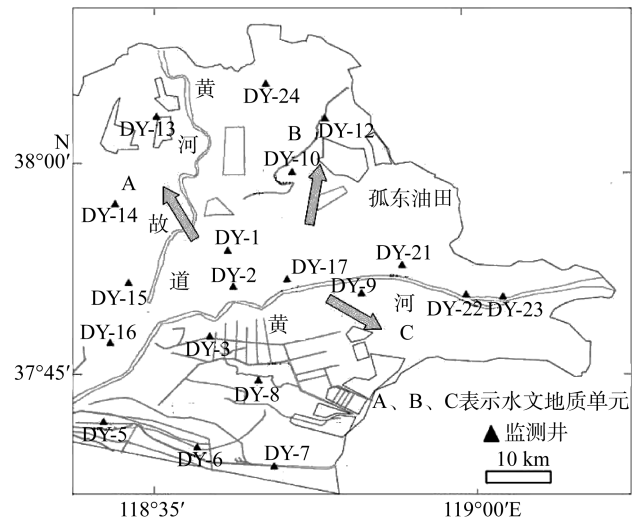


图 1 黄河三角洲地下水监测井分布图

Fig.1 Groundwater monitoring wells in the Yellow River Delta

监测频率为每月 1 次, 每次进行地下水埋深监测和水化学样品分析, 密封后送入实验室进行化学分析, 分析内容及方法为: TDS 为残渣烘干重量法, pH 值由 pHS-3C 型数字式酸度计测定, 电导率由 YSI-EC300 型电导率仪测定, Br⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg⁺ 离子由 IC-2800 离子色谱仪测定, CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 通过双指示剂法测定, 测试指标总共 12 项。

3 结果与分析

3.1 地下水主要离子特征

3.1.1 地下水主要离子空间变化特征

黄河三角洲地下水统计特征见表 1。从表 1 可见,黄河三角洲地下水 pH 值变化不大,变化范围介于 6.72~7.95,平均值为 7.06;电导率和矿化度的变化规律是一致的,电导率的变化范围为 0.11~4.47 S/m,平均值为 1.75S/m,矿化度变化范围为 0.80~32.89 g/L,平均值为 12.73 g/L。黄河三角洲地下水电导率和矿化度分别在黄河断面 DY-16 样井和 DY-23 样井出现了峰值,DY-23 样井最高,分别为 4.47 S/m,32.89g/L;选取地下水样中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 四种主要阳离子和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 四种主要阴离子进行测定,结果显示:4 种阳离子中以 Na^+ 含量最高,变化

范围为 243.60~11 752 mg/L,平均值为 4 137.59 mg/L, K^+ 含量最低,变化范围 11.04~599.60 mg/L,平均值仅为 101.40 mg/L;阴离子中以 Cl^- 含量最高,变化幅度为 201.40~23 118 mg/L,平均值为 9 227.60 mg/L,其次为 SO_4^{2-} ,变化范围为 0.00~4 496.00 mg/L,平均值为 970.17 mg/L, CO_3^{2-} 含量最低。在同一断面距离河道远近方向上,pH 值基本表现为先减小后增大的趋势;不同断面随距离河道远近变化表现出的规律有所不同,黄河故道断面上和灌区 pH 较大。总之,地下水以 Na^+ 、 Cl^- 占绝对优势;矿化度较低的测井的离子浓度变幅较小,反之,矿化度高的测井离子浓度变幅较大。

基于 ArcGIS9.3 软件,采用克里金差值法(Kriging)得到黄河三角洲地下水埋深分布图和矿化度分布图(图 2、图 3)。黄河三角洲地区浅层地下水主要是微咸水、咸水和卤水及一些地下淡水透镜体,

表 1 地下水水质分析结果

Tab.1 The results of groundwater hydro chemical quality

统计指标	水质监测指标(mg/L)								电导率 (S/m)	pH	TDS (g/L)
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}			
最大值	599.60	11752	1420	2274.40	23118	533.63	4496	50.94	4.47	6.72	32.89
最小值	11.04	243.60	78.32	87.98	201.40	70.272	0	0	0.11	7.95	0.80
平均值	101.40	4137.59	495.97	705.96	9227.60	213.62	970.17	12.34	17.52	7.06	12.73
标准偏差	92.21	2977.18	9181.88	391.61	6591.52	348.67	372.30	1.35	7.25	7.25	7578.29
变异系数	88.46	109.86	153.19	137.88	106.42	56.20	69.61	10.45	102.69	56.59	158.93

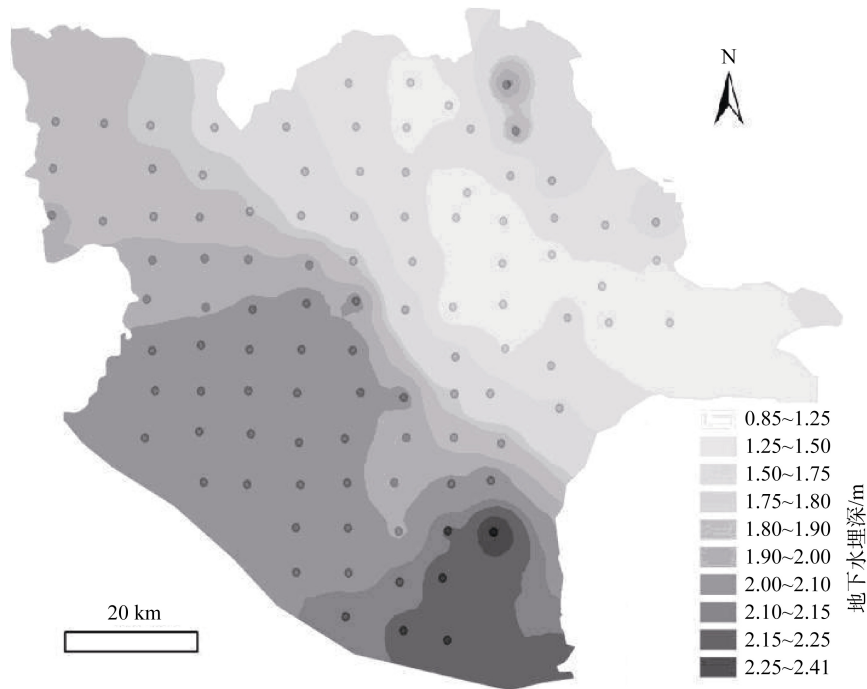


图 2 黄河三角洲地下水埋深

Fig.2 Groundwater Depth in the Yellow River Delta

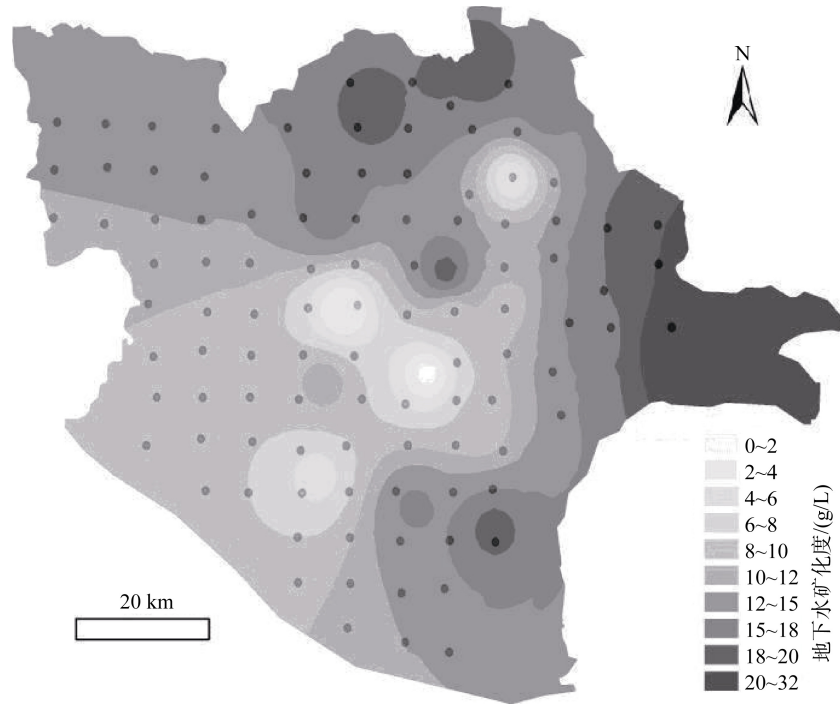


图3 黄河三角洲地下水矿化度

Fig.3 Groundwater mineralization in the Yellow River Delta

河积粉沙和潮汐沉积物是地下水赋存介质。地下水普遍埋藏较浅, 约为0~3 m。地下水埋深的分布规律(图2): 总体上以鱼洼为支点的现代黄河三角洲区域基本上遵循沿黄河河道附近地下水埋深较浅, 越远离河道埋深越深; 滨海以及河间洼地由于海拔较低, 为地下水浅埋区, 其他区域埋深相对较深。黄河三角洲浅层地下水矿化度的演化主要受到成陆时间、距海远近和地下水埋深几个要素的影响。地下水矿化度在空间上分布的总的规律为(图3), 由内地向沿海方向地下水矿化度逐渐增加, 近内陆部分矿化度较低, 一般20 g/L 左右; 沿海地带地下水矿化度较高, 局部地区甚至大于30 g/L, 其他大部分地区地下水矿化度大于10 g/L。此外, 矿化度较低的测井离子浓度变幅较小, 反之, 矿化度高的测井离子浓度变幅较大。矿化度变化幅度较大, 为1.21~21.05 g/L, 平均值为4.54 g/L。

3.1.2 地下水化学类型特征

矿化度是地下水各组分浓度变化的总指标, 可用来表征水文地球化学作用的过程, 同时也能很好地反映地下水中物质组分总体上的分布特征和变化趋势, 按照地下水矿化度分类标准, 根据实验分析结果, 黄河三角洲地下水大致可分为淡水、微咸水、咸水和卤水 4 种类型, 其中卤水与第四纪卤水密切

相关^[16]。

地下水化学类型的划分采用舒卡列夫分类法, 主要根据 6 种离子 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 所占比重。黄河三角洲的浅层地下水可划分为氯化物型、重碳酸盐氯化物型、重碳酸盐氯化物硫酸盐型和硫酸盐重碳酸盐型四大类型, 主要包括了 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{HCO}_3^-$ 、 SO_4^{2-} 、 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-$ 六种子类型。氯化物型主要分布于广饶县咸水入侵区和滨海区域, 重碳酸盐氯化物型主要分布于黄河三角洲保护区, 重碳酸盐氯化物硫酸盐型分布在广饶县咸水入侵区, 硫酸盐重碳酸盐型主要分布在靠近黄河流路附近; 对地下水水样水化学参数进行统计分析, 研究区 Cl^- 和 Na^+ 非常高, 其次是 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 HCO_3^- 比较低, 而 CO_3^{2-} 非常低, 阴、阳离子浓度平均值大小顺序依次分别为: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, 总体上, 以 Na^+ 和 Cl^- 为主, 呈现海(咸)水入侵区地下水的典型特征^[16-17]。刁口河流路至 2010 年 6 月已停止行河 34 a, 故道入海口两侧存在开放式海岸(海边未筑防潮堤坝), 加之古河道发育地区表层沉积物粒度大, 形成了海水入侵的最有利通道。对各水样主要离子质量浓度百

分比的分析可知, 研究区黄河现行河道两侧(地下水补给区)的 $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^- \text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}\text{-Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^- \text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{HCO}_3^-$ 等复杂类型水快速过渡到 $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ (或 $\text{Mg}^{2+}\text{-Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$)及 $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ 型水, 并在海岸滩涂区(排泄区)演化成 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ 这一简单类型的地下水, 因此形成了以 Na^+ 和 Cl^- 为主的水质。

3.1.3 地下水水化学特征量相关分析

相关性分析可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。计算黄河三角洲

各断面地下水化学特征量的 Pearson 相关系数, 如表 2 所示。通过表 2 可以清晰地看出, 从整个研究区来看, Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 TDS 的相关性极高, 说明该 4 种离子是地下水矿化度高低的控制者。阳离子之间均呈现显著的正相关, 其中以 Na^+ 和 Mg^{2+} 的相关系数最高, 这表明地下水中镁的来源及其在地下水中的分布与钠相近, pH 值与各离子和 TDS 呈现出负相关, 其中与 Ca^{2+} 的相关性最为显著, 其次为 Mg^{2+} 和 Cl^- , 说明研究区氯化盐的浓度对地下水 pH 值有一定的影响。

表 2 地下水化学特征量相关系数矩阵

Tab.2 The correlation matrix of groundwater hydrochemical components

	pH	TDS	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
pH	1							
TDS	-0.851**	1						
Cl^-	-0.806*	0.806*	1					
SO_4^{2-}	-0.419*	0.573*	0.488*	1				
HCO_3^-	-0.365	0.266	0.237	-0.207	1			
Na^+	-0.804*	0.972**	0.754	0.547*	0.355*	1		
Mg^{2+}	-0.848**	0.958**	0.779*	0.508*	0.395*	0.961**	1	
Ca^{2+}	-0.925**	0.894**	0.817*	0.575*	0.340*	0.857**	0.919**	1

注: **在 0.01 水平上显著相关; *在 0.05 水平上显著相关

3.2 地下水化学演化规律及原因分析

3.2.1 地下水演化规律分析

地下水化学类型由地下水流经处经历的岩石岩性、径流速度、地球化学反应特征和人类活动等因素决定。通常地下水化学类型从补给区到排泄区有如下变化规律: $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$ [17]。绘制地下水 Piper 三线图, 运用图解法分析, 黄河三角洲地区地下水水化学特征与演变规律, 发现该研究区亦遵循此规律, 下游(三角洲出口)占绝对优势的阴离子为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。从 2009 年和 2010 年黄河三角洲地下水 Piper 三线图可以清晰看出, 研究区地下水化学类型较为复杂, 大部分离子分布在菱形区域右侧顶点附近, 表明研究区非碳酸碱金属(原生盐度)超过 50%, 地下水化学性质以碱金属和强酸盐为主[18]。2010 年沿河道地下水化学类型由 $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{HCO}_3^- \text{Na}^+$ 型过渡为 $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Na}^+ \text{Mg}^{2+}$ 型再到 $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ 型水; 而 2010 年则由 $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Na}^+$ 型过渡为 $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Na}^+ \text{Mg}^{2+}$ 型再到 $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ 型水, Cl^- 和 Mg^{2+} 含量增多, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 减少, Na^+ 含量变化不大。

在天然地下水水化学场形成和演化的漫长历史

进程中, 地壳中多种化合物溶于水随着水文循环一起迁移, 经历不同环境使其数量、组成及存在形态不断变化, 两方面因素影响它的变化: 一是地层岩石、土壤中元素和化合物的物理化学性质; 二是各种环境因素, 如天然水的酸碱性质、氧化还原状况、有机质的数量与组成, 以及各种自然环境条件等。根据 2009~2010 年黄河三角洲地下水化学类型的变化, Cl^- 元素组成的矿物如岩盐, 矿物溶质不会通过水岩相互作用添加或缺失, 通常认为 Cl^- 浓度的改变只是由于蒸发浓缩、原始降雨组成的补给水, 混合其他地下水不同浓度的 Cl^- 或基岩孔隙水中 Cl^- 的弥散作用而受到影响; SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 同时减少, 说明石膏的溶解对研究区水化学成分有一定的影响, Mg^{2+} 主要来源于含 Mg 矿物如白云石、泥灰岩等碳酸盐类沉积物[19], 研究区所有水样 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} > 1$, 根据海水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 一般大于 1 的特征, 可能是在三角洲形成过程中, 海水所含有的 Mg^{2+} 进入地表水或者土壤中所致; 从 2009~2010 年地下水化学类型的变化来看, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 的平均摩尔比分别为 6.16 和 1.6, 考虑 Ca^{2+} 的缺失还有部分原因是由蒸发-沉淀作用和离子交换作用引起。

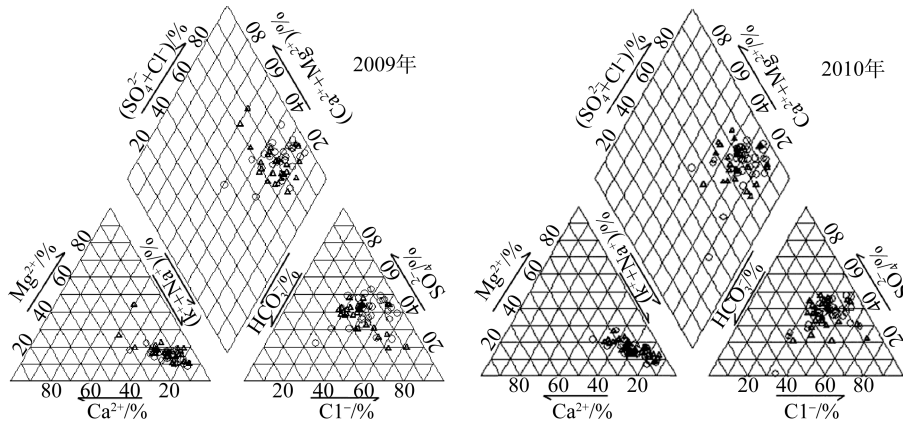


图4 黄河三角洲地下水 piper 三线图

Fig.4 Piper plots of the chemical analysis of groundwater in the Yellow River Delta

3.2.2 地下水演化机理分析

对于离子起源的自然影响因素, Gibbs^[20]根据世界河流、湖泊及主要海洋水 TDS 与 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 、TDS 与 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 关系图区别出大气降水、岩石风化和蒸发-结晶作用 3 种天然水化学成分的起源机制。通常, 高矿化度的河流(如干旱区的河流)又具有较高的 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 值或 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 值(接近于 1), 代表此种河水的点分布在图的右上角, 反映了干旱地区蒸发结晶作用对河水的影响^[21-22]。图 5 的 b、c 图可以清晰看出, 2009 和 2010 年所采黄河三角洲地下水化学组成大部分落在 Gibbs 模型内, 有个别点未落到模型内, 主要是因为采样区受到人为干扰所致。大部分水化学组成位于模型的右上端, 甚至接近于海水分布范围, 表明该地区地下水离子自然起源的优势机制是蒸发沉淀及结晶作用, 但岩石

风化作用亦起微弱影响; 另外根据离子测试分析结果, 大部分黄河三角洲浅层地下水样中含有 Br^- , 表明该地下水与海水有密不可分的水力联系, Gibbs 模型分析结果有 1/3 样点接近于海水分布范围, 尤其是黄河流路区刁口附近, 表明黄河三角洲浅层地下水形成不仅与黄河有密切水力联系, 还与海洋作用有密切联系。

引起研究区水质变化的另一个不容忽视的原因便是人类活动的影响。陈亚宁等^[23]研究亦认为塔里木河干流年径流量变化的主要驱动力是人类活动, 即源流平原区和干流区大量引水灌溉以及各种水利设施对自然水循环的改变等。周孝明等^[24]通过野外实地调查和相关资料分析, 发现塔里木河下游地表水文解体、地下水位下降、水质恶化、植被衰败等生态系统退化的社会经济影响因素, 认为产业结构

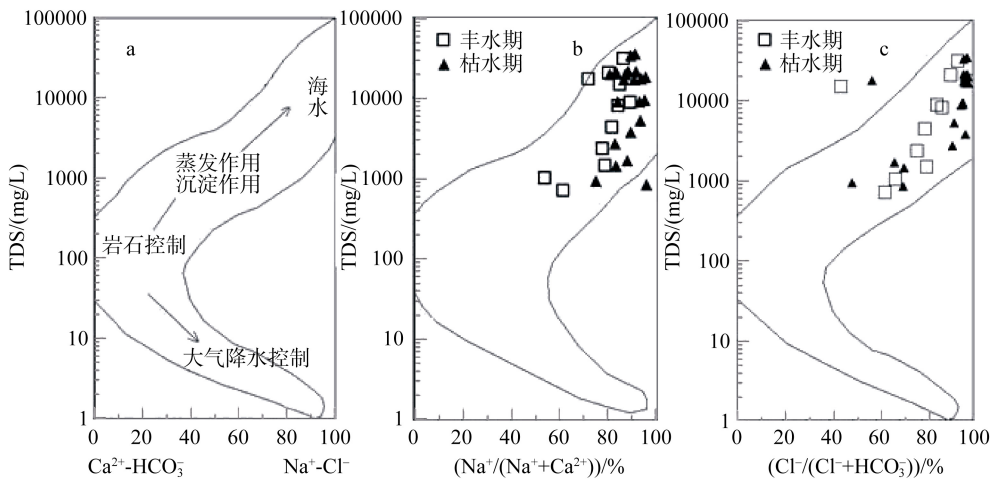


图5 黄河三角洲地下水水化学 Gibbs 分布模式图

Fig.5 Plots of the major ions within the Gibbs boomerang envelope for groundwater in the Yellow River Delta

a. Gibbs 水化学 Boomerang Envelope 模型; b, c 黄河三角洲丰枯季地下水化学组成 Gibbs 分布

a. Boomerang Envelope mode of Gibbs water chemistry; b, c Gibbs figure of composition of groundwater chemistry in dry and wet season in the Yellow River Delta

不合理是导致流域下游地区水资源紧张、生态退化的根源；人类生产和社会经济发展使大气化学成分(如 CO_2 、 CH_4 等)发生变化,从而引起气温升高、蒸发加大、水循环加快以及区域水循环改变等变化,并且这种变化的时间尺度可持续几十年到几百年;另外土地利用变化、农田灌溉、水渠挖凿等作用于流域下垫面的影响对水循环的影响更为明显。

4 结论

(1) 黄河三角洲地下水 pH 值变化不大,变化范围介于 6.97~8.67,平均值为 7.97;电导率和矿化度的变化规律是一致的,电导率的变化范围为 0.11~4.47 S/m,矿化度变化范围为 0.7960~32.8900g/L。阳离子中以 Na^+ 含量最高, K^+ 含量最低;阴离子中以 Cl^- 含量最高, CO_3^{2-} 含量最低。不同断面随距离河道远近变化表现出的规律有所不同,在同一断面距离河道远近方向上, pH 基本表现为先减小后增大的趋势;不同断面随距离河道远近变化表现出的规律有所不同,黄河故道断面上和灌区 pH 较大。地下水矿化度在空间上分布的总的规律为,由内地向沿海方向地下水矿化度逐渐增加,还发现,矿化度较低的测井的离子浓度变幅较小,反之,矿化度高的测井离子浓度变幅较大。

(2) 研究区 Cl^- 和 Na^+ 非常高,其次是 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 HCO_3^- 比较低,而 CO_3^{2-} 非常低。黄河三角洲的潜水含水层是黄河携泥沙沉积作用形成的,因此在形成初期流路附近的地下水含盐量低、水质较好;随着黄河的改道,由于海水的上溯,以及强烈的潜水蒸发,地下水各种离子的浓度逐渐增加,部分滨海地区的地下水的含盐量甚至超过海水;长期的蒸发使得地下水的水位逐渐降低。当地下水的埋深达到一定深度,地下水的补给和排泄达到平衡,此时地下水将不再被咸化而达到一种稳定的状态。黄河三角洲地下水水质的演化规律为:形成-咸化-稳定。

(3) 研究区由黄河现行河道两侧(地下水补给区)的 $\text{Na}^+ \text{-Mg}^{2+} \text{-Ca}^{2+} \text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+} \text{-Na}^+ \text{-Ca}^{2+} \text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+ \text{-Mg}^{2+} \text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-} \text{-HCO}_3^-$ 等复杂类型水快速过渡到 $\text{Na}^+ \text{-Mg}^{2+} \text{-Ca}^{2+} \text{-Cl}^-$ (或 $\text{Mg}^{2+} \text{-Na}^+ \text{-Ca}^{2+} \text{-Cl}^-$) 及 $\text{Na}^+ \text{-Mg}^{2+} \text{-Cl}^-$ 型水,并在海岸滩涂区(排泄区)演化成 $\text{Na}^+ \text{-Cl}^-$ 这一简单类型的地下水,因此形成了以 Na^+ 为主的水质。2009 和 2010 年的 Gibbs 图表明,该地区地下水离子自然起源的优势机制是蒸发沉淀及结

晶作用,加上离子分析结果,黄河三角洲地下水还与海洋有密切水力联系,与海洋作用关系密切。

参考文献:

- [1] Von Asmuth J, Mass K. The method of impulse response moments: a new method integrating groundwater and eco-hydrological modeling[J]. IAHS Publ, 2001, 269: 51-58.
- [2] 杨玲媛,王根绪.近 20a 来黑河中游张掖盆地地下水动态变化[J].冰川冻土,2005,27(2): 290-296.
- [3] Batelaan O, Smed F De t, Triest L. Regional groundwater discharge: phreatophyte mapping, groundwater modeling and impact analysis of land-use change[J]. Journal of Hydrology, 2003, 275: 86-108.
- [4] 范晓梅.黄河三角洲地下水动态及其生态效应[D].南京:河海大学,2007.
- [5] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等.中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J].自然资源学报,2002,17(3): 322-326.
- [6] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等.新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J].生态学报,2007,27(2): 539-544.
- [7] 刘英,包安明,陈曦.塔里木河下游地区地下水空间分布动态模拟[J].资源科学,2006,28(5): 95-101.
- [8] 郜银梁,陈军锋,张成才,等.黑河中游灌区水化学空间变异特征[J].干旱区地理,2011,34(4): 575-583.
- [9] 姚秀菊,王洪德,张福存,等.黄河三角洲地下淡水(微咸水)的形成与演化[J].地球学报,2002,23(4): 375-378.
- [10] 李胜男,王根绪,邓伟,等.黄河三角洲典型区域地下水动态分析[J].地理科学进展,2008,27(5): 49-56.
- [11] 廖小青.黄河三角洲地区地下水及其营养盐入海通量研究[D].青岛:中国海洋大学,2005.
- [12] 袁瑞强.黄河三角洲浅层地下水特征及其向海输送[D].青岛:中国海洋大学,2007.
- [13] 姚荣江,杨劲松.黄河三角洲典型地区地下水位与土壤盐分空间分布的指示克立格评价[J].农业环境科学学报,2007,26(6): 2118-2124.
- [14] 安乐生,赵全升,叶思源,等.黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应[J].水科学进展,2011,22(5): 689-695.
- [15] 潘世兵,王忠静,孙江涛.基于 GIS 的黄河三角洲地下水开发适宜性评价模型[J].水文地质工程地质,2001,5: 33-36.

- [16] 张效龙, 孙永福, 刘敦武. 黄河三角洲地区地下水分
析[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(6): 26-28.
- [17] 苏乔, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾南岸滨海平原地下
水水化学特征[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(2): 163-169.
- [18] 温小虎, 仵彦卿, 常娟, 等. 黑河流域水化学空间分
异特征分析[J]. 干旱区研究, 2004, 24(1): 1-6.
- [19] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘探,
1983, 6: 6-11.
- [20] 马金珠, 李相虎, 黄天明, 等. 石羊河流域水化学演
化与地下水补给特征[J]. 资源科学, 2005, 27(3):
117-122.
- [21] 陈静生, 陶澎, 邓宝山, 等. 水环境化学[M]. 北京: 高
等教育出版社, 1987: 87-91.
- [22] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 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, 2006, 17(1): 20-28.
- [23] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M].
北京: 科学出版社, 2010: 89-91.
- [24] 周孝明, 陈亚宁, 李卫红, 等. 近 50 年来塔里木河流
域下游生态系统退化社会经济因素分析[J]. 资源科学,
2008, 30(9): 1389-1396.

Research on the variation and evolution of groundwater chemistry in the Yellow River Delta

CAO Jian-rong¹, XU Xing-yong², YU hong-jun², HUANG Chong³

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. the First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Received: Nov., 12, 2013

Key words: hydrochemical characteristics, hydrochemical type; groundwater; evolution; the Yellow River Delta

Abstract: The chemical composition, hydrochemical type and evolution rule of the groundwater in the Yellow River Delta were analyzed through two years continuous observation of the 19 groundwater monitoring wells in the Yellow River Delta. The results show that the pH change of groundwater in the Yellow River Delta is small; the groundwater depth is shallow and the yearly range is 1.0 to 3.0 m, however the salinity and the difference of ions are obvious. The groundwater is mainly composed with Na^+ and Cl^- . The range of ion concentration of low salinity is small. On the other hand, the range of ion concentration of high salinity is large. The chemical types of groundwater can be divided into type of chloride, bicarbonate, chloride, bicarbonate, chloride sulfate and sulfate bicarbonate. It mainly includes the $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$, $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^-$, $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Na}^+ \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ and $\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^-$. The chloride type is mainly distributed in saltwater intrusion area and coastal area of Guangrao County; the carbonate chloride type is mainly distributed in the Yellow River Delta protection area; the bicarbonate chloride sulfate type is mainly distribution in salt-water intrusion zone of Guangrao County; sulfate bicarbonate type is mainly distributed close to the Yellow River flow. According to the changes of flow of the Yellow River Delta and Gibbs models, the chemical composition of the water in the Yellow River Delta both falls in the upper wing of Gibbs Boomerang Envelope model. In conclusion, all of that indicate that water chemical composition in the study area is mainly controlled by the action of water. The evaporation and deposition play a secondary role. The impact of human activity such as land use change, irrigation, fertilization also cannot be ignored.

(本文编辑: 刘珊珊)