

基于水化学的东海岛海水入侵时空变化特征

南学良, 杜 军, 李培英, 张志卫, 李 平

(国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:海水入侵对海岛海岸带地区地下淡水以及生态景观的变化存在重要影响,是该区域重要的灾害地质问题之一。海水入侵区域由于受到不同时段、地段地下淡水补给等可变因素影响,具有时空变化的特性。以东海岛东南部为主要研究靶区,利用三线图法对该区域 2012 年 12 月~2014 年 8 月周期性监测数据进行研究分析,并以 HCO_3^- 和 Cl^- 为划分依据,构建海水入侵程度的划分标准,对不同时期的海水入侵情况做了研究。分析表明,监测期内东海岛经历了多次海水入侵-后退过程,入侵量分别为 56.7%、51.1%、56.4%、42.7%、36.5%、76.9%、66.8% 和 75.8%, 年际对比表明,东海岛海水入侵有日趋加重趋势。

关键词:东海岛;海水入侵;水化学;时空变化

中图分类号:X43;P641.12

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)04-0052-05

海水入侵是滨海地带含水层水动力条件在自然或人为因素影响下发生改变,破坏了地下淡水与海水之间的动态平衡,致使海水或高矿化度的咸水沿含水层向内陆方向侵入的过程与现象。海水入侵发生在海陆接触区域,是水文循环中海陆交换的重要体现,同时也是一种可导致淡水水质咸化的海岸带灾害地质类型。

目前,世界上许多沿海地区遭受海水入侵的危害,导致大部分地区水质恶化,土地板结、盐渍化,给海水入侵区带来了多方面的不良影响和巨大危害^[1-2]。20 世纪 80 年代以来,中国渤海、黄海沿岸不同程度出现了海水入侵加剧现象,其中以山东省莱州湾沿岸最为突出^[3-5],渤海沿岸、珠江三角洲、长江三角洲、北部湾和海南岛等地区均有海水入侵现象发生^[6]。

本文通过对东海岛布设监测井的周期性监测数据的分析,构建了海水入侵程度的划分标准,对研究区海水入侵的时空变化做了研究。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

东海岛(20°54'~21°08'N, 110°09'~110°33'E)位于广东湛江东南,雷州半岛东部,面积约 286km²,海岸线

长 139.66km;岛内地势平坦,地貌以平原为主;属于亚热带海洋季风气候,1975~2010 年,东海岛年平均降雨量 1316.4mm,最大年降雨量 2020.7mm(1985 年),最小年降雨量 698.3mm(1987 年)。年平均温度为 23.6℃,最高年平均气温为 24.4℃(1987 年),最低年平均温度为 22.8℃(1984 年)。

研究区位于东海岛东南部,地形平坦,植被发育,高位养殖池散布于环滨海带向内陆 500~1000m 范围内^[7]。

东海岛岩性以第四系(Q)为主(见图 1),地下水系统主要由新生代松散岩类孔隙含水岩组构成^[8]。潜水含水层总体较薄,岩性以全新统(Q₄)、上更新统(Q₃)和中更新统(Q₂)砂、细砂及粘土为主,含水层厚度及岩性变化较大,地下水赋存条件较差。潜水主要接受降水入渗补给和地表水体的入渗补给,排泄以潜流入海和垂直下渗补给下伏微承压水为主。微承压含水层由下更新统(Q₁)砂、砾石,与弱透水的粘土和亚粘土等组成的不等厚互层,厚度 5~30m。微承压水接受上覆潜水垂向补给,排泄方式为向下补给中层承压水和水平径流潜流入海。

中层承压含水层岩性为下更新统(Q₁)粗砂、砾砂及中细砂,由 9~11 个含水层组成,总厚度 50~90m。中层水与浅层水之间以 10~25m 厚的下更新统(Q₁)粘土相隔,

收稿日期:2016-10-02

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项(201405037-3, 201005010)

作者简介:南学良(1990-),男,甘肃通渭人,硕士,主要从事灾害地质与工程地质研究。E-mail:naxl09@163.com

通讯作者:杜军(1974-),男,山西晋中人,研究员,博士,主要从事海洋灾害地质研究。E-mail:dujun@fio.org.cn

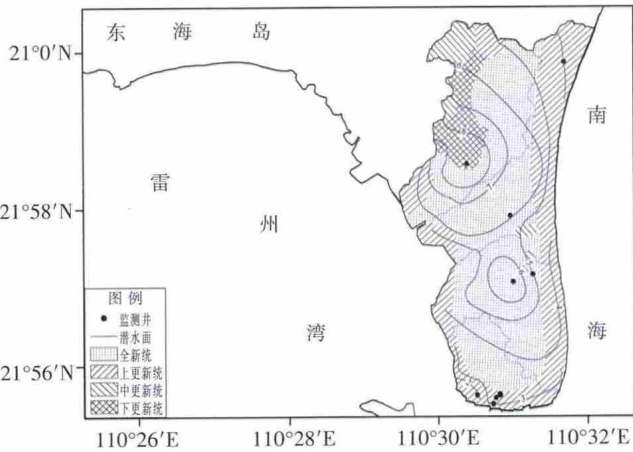


图 1 研究区域位置

Fig.1 The location of the study area

含水层顶板埋深一般大于 30m。该层厚度由东往西增加,颗粒变粗,单层厚度增大。地下水主要接受上覆浅层水的越流补给和南侧雷州湾底部相应含水层淡水的侧向补给,受到人工大量开采的影响,地下水总体上为由南向北径流,排泄方式以径流排泄和人工开采为主。

深层承压含水层岩性为上新统(N_x)砾石、砾砂及中粗砂,共有 5~10 个含水层,总厚度一般为 35~150m。该层地下水接受上层含水层的越流补给和西南侧侧向来水补给,深层含水层水位呈现南高北低分布特征,地下水由南向北径流,并通过湛江湾底部相应含水层排泄至大陆漏斗区;地下水主要消耗于侧向径流排泄和人工开采。

1.2 测井布设和数据来源

2012 年 12 月~2014 年 8 月间,国家海洋局第一海洋研究所对东海岛东南部布设的 11 口监测井(图 1),基本信息见表 1。

表1 监测井基本信息

Table1 The basic information of the monitoring wells

测井	经度/°	纬度/°	井深/m	水深/m	离岸距离/km	地理位置
W1	20.927	110.514	7	2	0.337	东南村
W2	20.927	110.514	10	4	0.326	东南村
W3	20.927	110.514	10	7	0.316	东南村
W4	20.925	110.512	4	3	0.109	东南码头
W5	20.927	110.513	3	2	0.243	东南码头
W6	20.927	110.509	5	2	0.224	东南林场
W7	20.965	110.516	28	6	1.067	下寮村
W8	20.976	110.506	39	9	0.747	盐灶村
W9	20.951	110.517	12	7	1.098	后湖村
W10	20.998	110.528	9	4	0.368	冼屋村
W11	20.953	110.521	8	5	0.643	北寮村

注:W6 因不可抗力,2013 年 11 月后不再监测

通过对东海岛监测井水质的调查,每月对各监测井所取水样及时做 EC(25℃)测量以及 Cl⁻和 TDS 分析,每三月对各监测井所取水样及时做主要离子分析。由于地下水的水化学成分比地表水和海水的水化学成分复杂,选择地下水中分布广、含量多的 Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺7 种离子作为研究海水入侵的主要检测对象。

本文以 2012 年 12 月、2013 年 2 月、2013 年 5 月、2013 年 8 月、2013 年 11 月、2014 年 2 月、2014 年 5 月以及 2014 年 8 月间对东海岛各监测井地下水样所做的 7 种主要离子检测分析结果作为主要数据来源,对东海岛地下水的水化学特征加以分析。

2 研究方法

地下淡水和正常海水的水化学特征不同(见表 2),在海水入侵的不同阶段,地下水状态也发生变化,因此,不同的海水入侵的阶段,地下水水化学特征也不同。基于此,利用地下水水化学特征将海水入侵过程划分为不同的阶段,并对各阶段进行赋值,利用插值方法在研究区内将海水入侵的时空变化状态表示出来。

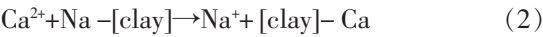
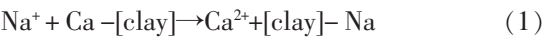
表2 地下淡水和正常海水水化学特征对比(mg/L)

Table2 The chemistry characteristics of the fresh underground water and normal sea water

水样	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	类型
地下淡水	48.1	18.8	33	0.45	240.1	40.8	23	CaCO ₃
正常海水	413	1294	10760	387	142	2712	19353	NaCl

地下水形成过程中离子交换对其水化学类型的形成有较大影响,因此,离子交换是海水入侵研究中重要的研究方法^[9]。大多数矿物表面均带有自由负电荷,这些自由负电荷通过与水合阳离子结合而达到饱和,其饱和程度与水合阳离子的相对丰度和吸附特性成正比,因此,大多数矿物表面吸附着阳离子,其吸附能力与阳离子交换容量和水化学组分有关。

在地下淡水中,离子交换以 Ca²⁺和自由负电荷达到饱和为主,水化学类型为 CaCO₃ 型;正常海水的离子交换为 Na⁺和自由负电荷达到饱和,NaCl 型为其主要水化学类型。在海水入侵区,当淡水被海水取代时,自由负电荷脱离原吸附的 Ca²⁺和部分的 Mg²⁺,由 Na⁺代替,使得海水硬度升高;相反的,当海水受到 CaCO₃ 型淡水的稀释淡化时,将发生多种离子交换过程,最终由 Ca²⁺替换出自由负电荷吸附的 Na⁺,淡水被相应的软化。因此,在海水入侵的过程中存在如下离子交换反应^[10]:



式(1)、(2)所表示的是海水入侵过程中所涉及的极端离子交换过程,在海水入侵的不同阶段,随着咸淡水界面的移动变化,离子交换过程也在不断发生变化,以咸淡水界面的离子交换最为激烈。

海水入侵过程中,Cl⁻与(HCO₃⁻+CO₃²⁻)之比是确定海水入侵情况的重要水化学指标,按照Cl⁻/(HCO₃⁻+CO₃²⁻),将海水入侵阶段划分为未入侵(<50%)、轻度入侵(50%~66.6%)以及重度入侵(>66.6%)三个阶段^[11]。

研究中,以地下淡水和正常海水的连线为咸淡水的分界线,以阴离子HCO₃⁻和Cl⁻为划分指标,将地下水状态分为8个阶段(见表3),地下淡水以CaCO₃型水为主,正常海水以NaCl型水为主,海水入侵过程中咸淡水之间经历多次离子交换过程以及多次咸淡水转变过程。从三线图(见图2)可以看出,CaCO₃型水为主的地下淡水受到海水入侵的影响,水中Na⁺、Cl⁻不断增加,使得HCO₃⁻的在地下水中的百分含量下降,Ca/Na发生离子交换,使得多种离子混合存在,地下水类型变为以混合NaHCO₃为主,混合有混合Ca(HCO₃)₂型水。随着海水入侵的加剧,地下水中HCO₃⁻不再是主导阴离子,而Cl⁻浓度不断增大,使得地下水类型向混合NaCl和混合CaCl不断转变。当Cl⁻浓度成为主导阴离子后,此时地下水类型以NaCl型为主,说明地下水已经和正常海水的特性相近,随海水入侵的继续深入,将变为正常海水。相反的,当正常海水受到地下淡水的稀释冲刷,Na/Ca发生离子交换的程度随淡水量的增加而增大,随着淡水量的增加,正常海水类型从NaCl型向混合CaCl型水转变,海水盐度下降,当Cl⁻和HCO₃⁻

的百分含量相当时,属于多种类型水混合,但以混合CaCl、混合MgCl型水为主要类型。随着淡水的不断冲刷和海水的不断淡化,HCO₃⁻成为主导阴离子,水化学类型也逐渐变为混合Ca(HCO₃)₂型,其水化学性质与地下淡水基本接近。

3 结果和讨论

三线图是地下水研究的重要方法,图2以地下淡水和正常海水的连线作为咸淡水分界线,将研究区监测水样表示出来。为了更直观的表达海水入侵的过程,地下水水样水化学性质分布图^[9,12],以Ca²⁺、Na⁺阳离子为横坐标,以HCO₃⁻、Cl⁻为纵坐标将所有水样结果在图3中表示,仍然以地下淡水和正常海水的连线作为咸淡水分界线。

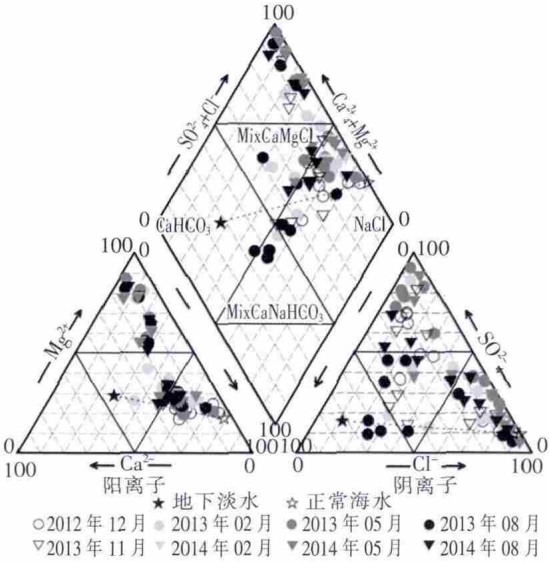


图2 地下水水样三线图

Fig.2 The groundwater samples in the piper diagram

表3 地下水水质状态划分依据

Table3 The basis of groundwater quality classification

地下水状态	阳离子	阴离子	约束条件/%	赋值	范围	颜色
地下淡水	Ca ²⁺	HCO ₃ ²⁻	HCO ₃ ²⁻ >50	2	≤2.5	深蓝色
f ₃	MixNa ⁺	MixHCO ₃ ²⁻	50≥HCO ₃ ²⁻ >33.3	3	2.6~3.5	深蓝色
f ₂	MixNa ⁺	MixCl ⁻	33.3<Cl ⁻ ≤50	4	3.6~4.5	蓝色
f ₁	Na ⁺	Cl ⁻	50<Cl ⁻ ≤66.6	5	4.6~5.4	绿色
分界线					5.5	-----
s ₁	Ca ²⁺	MixHCO ₃ ²⁻	50≥HCO ₃ ²⁻ >33.3	6	5.6~6.5	浅绿色
s ₂	MixCa ²⁺	MixCl ⁻	33.3<Cl ⁻ ≤50	7	6.6~7.5	黄绿色
s ₃	MixCa ²⁺	Cl ⁻	50<Cl ⁻ ≤66.6	8	7.6~8.5	黄色
正常海水	Na ⁺	Cl ⁻	Cl ⁻ >66.6	9	>8.5	橙色

注:1.Mix表示以相应离子为主的混合地下水状态;2.f₁、f₂、f₃、s₁、s₂、s₃分别表示海水入侵的不同状态

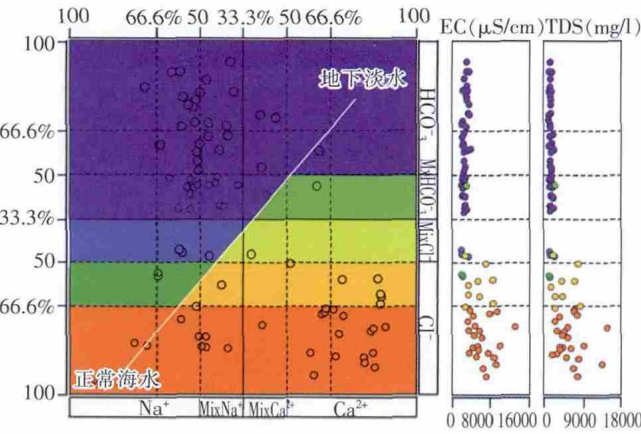


图3 地下水水样水化学性质分布图

Fig.3 The hydrochemical properties distribution of the groundwater samples

依据三线图和地下水水样水化学性质分布图以及地下水水质状态划分依据,获得了研究区各监测期海水入侵时空变化情况(见图4)。通过对研究区各监测期地下水状态的分析统计(见表4),所得结果如下:

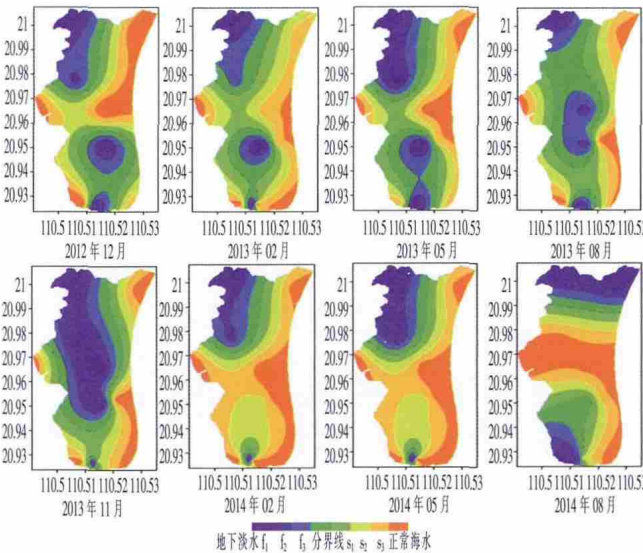


图4 海水入侵时空变化图

Fig.4 The temporal and spacial variations of the seawater intrusion

表4 海水入侵统计表 (%)

Table4 The basic information of the seawater intrusion

日期	地下淡水	f ₃	f ₂	f ₁	s ₁	s ₂	s ₃	正常海水	入侵量	总量
2012.12	3.0	7.8	25.0	7.6	4.5	20.5	16.7	15.0	56.7	100
2013.02	2.5	1.5	15.9	28.9	23.1	10.0	15.8	2.3	51.1	100
2013.05	3.6	13.7	21.4	4.8	23.1	11.8	16.3	5.2	56.4	100
2013.08	1.5	4.4	20.8	30.6	18.8	13.7	8.8	1.5	42.7	100
2013.11	8.9	24.5	16.0	14.1	13.5	10.4	9.3	3.3	36.5	100
2014.02	2.6	6.0	8.5	6.0	5.2	21.8	30.8	19.0	76.9	100
2014.05	4.5	13.5	7.8	7.4	6.9	3.5	38.1	18.3	66.8	100
2014.08	9.7	6.1	1.6	6.9	3.6	3.2	27.2	41.8	75.8	100

(1)2012 年 12 月,海水入侵量占研究区总面积的 56.7%,正常海水入侵占 15.0%主要分布在研究区东北沿海,该区域地下水以 NaCl 型水为主,受到海水入侵作用最强烈。s₃ 占 16.7%主要为混合 CaCl 型水。s₂ 是入侵区面积最大的部分,占到 20.5%,以混合 CaCl 型水为主但混合 Ca(HCO₃)₂ 型水所占比例也在增加。s₁ 是海水入侵的混合区,占 4.5%,与 f₁ 占 7.6%发生激烈的离子交换,随着海水和淡水量的变化而发生相互转化,是海水入侵变化最活跃的区域。在无入侵区,地下淡水区仅占 3.0%,主要是 CaCO₃ 型水。f₃ 占 7.8%,地下水类型以混合 NaHCO₃ 为主,f₂ 占 25.0%,是无入侵区的

主要地下水状态,以混合 NaCl 为主,也是离子间进行复杂离子交换的区域。

(2)2013 年 2 月,海水入侵量为 51.1%较 2012 年 12 月有所下降,就海水入侵区各地下水水质状态中,正常海水减少了 12.7%,s₁ 增加了 18.6%,s₂ 减少了 10.5%,说明该阶段海水入侵有减退的趋势。无入侵区,f₁ 增加 11.3%,说明海水入侵区后退。

(3)2013 年 5 月,海水入侵量为 56.4%,较 2 月增加 5.3%,在海水入侵区,除了正常海水增加了 2.9%外,s₂、s₃ 均有增加,但变化量不大。无入侵区除 f₃ 减少 24.1%以外,其他水质状态均有增加。说明 2 月海水入侵减退后,水质变化向地下淡水演变,但后续入侵已经开始。

(4)2013 年 8 月,入侵量为 42.7%,较 5 月减少 13.7%。除 s₂ 稍有增加外,其余均有减少;无入侵区,f₁ 增加了 25.8%,其余均有减少。说明海水入侵后退较大,但大多处于混合区。

(5)2013 年 11 月,入侵量为 36.5%,与 5 月相比,正常海水增加了 1.8%,s₃ 增加了 0.5%,s₂ 增加了 3.3%,s₁ 减少了 5.3%;地下淡水增加了 7.4%,f₁ 增加了 20.1%,f₂ 减少了 4.8%,f₃ 减少了 15.5%。说明海水入侵大面积后退,但在沿海区域海水入侵水质变咸。

(6)2014 年 2 月,海水入侵量 76.9%,比 13 年 11 月增加 40.4%。除了 s₁ 减少 8.3%外,其余均有增加,正常海水增加 15.7%,s₂ 增加 11.4%,s₃ 增加 21.5%;f₁ 减少了 8.1%,f₂ 减少了 7.5%,f₃ 减少了 18.5%,地下淡水减少了 6.3%。说明海水入侵区扩大,向中部延伸,未入侵区仅在研究区西北和西南有分布。

(7)2014 年 5 月,入侵量 66.8%,较 2 月减少 10.1%,正常海水变化不大,s₁ 增加了 1.7%,s₂ 增加 11.4%,s₃ 减少了 7.3%。地下淡水增加了 1.9%,f₃ 增加了 7.5%,f₂ 变化不大,f₁ 增加 1.4%。说明海水入侵有后退的趋势。

(8)2014 年 8 月,入侵量 75.8%,较 5 月增加了 9.0%。正常海水增加了 23.5%,s₁ 减少了 3.3%,s₂ 变化不大,s₃ 增加了 10.9%;地下淡水增加了 5.2%,f₁ 变化不大,f₂ 增加了 6.2%,f₃ 增加了 7.4%。说明海水入侵加剧,但是淡化区延续了 5 月海水入侵退化的过程,通过离子交换,地下淡水增加。

4 结论

本文以东海岛东南部研究区内布设监测井为研究对象,2012 年 12 月~2014 年 8 月间的周期性监测

数据为依据,通过对各种离子对海水入侵的影响的分析,以 Cl^- 和 HCO_3^- 为地下水水质状态的划分条件,建立了地下水水质状态的划分依据。旨在通过对研究区检测并监测数据的分析,对研究区海水入侵的时空变化过程进行研究。

(1) 年际对比可以看出,海水入侵是个动态变化的过程。从2012年12月到2014年8月间,研究区海水入侵量分别为56.7%、51.1%、56.4%、42.7%、36.5%、76.9%、66.8%和75.8%,但研究区地下淡水分布区域比较固定,主要分布在研究区西北部 and 南部,但其所处面积有所变化。

(2) 入侵程度可以看出,虽然海水入侵量年际变化较大,但总体处于入侵加重状态。通过同期对比,2013年11月海水入侵量为36.5%,比2012年12月海水入侵量减少了20.2%,2014年2月海水入侵量为76.9%,比2013年2月增加了25.8%,2014年5月海水入侵量为66.8%,比2013年5月增加10.4%,2014年8月海水入侵量75.8%,比2013年8月增加33.1%。

(3) 海水入侵过程方面,一次海水入侵过程要经历各种不同的离子交换阶段,咸水从入侵区向未入侵区扩散的过程中,随着海水量的增加,海水入侵面向未入侵区扩散较快;随着未入侵区淡水补给的增加,海水入侵面开始后退。所以,海水入侵过程中,通常是一次入侵还未结束,又有一次入侵已经开始,使得海水入侵的时空变化总处于动态变化过程。

参考文献:

- [1] 郭占荣,黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003,23(3):10-15. (GUO Zhanrong, HUANG Yipu. Comprehensive study on seawater intrusion [J]. Journal of China Hydrology, 2003,23(3):10-15. (in Chinese))
- [2] 丁玲,李碧英,张树深. 海岸带海水入侵的研究进展 [J]. 海洋通报, 2004,23 (2):82-87. (DING Ling, LI Biying, ZHANG Shushen.

- Development in researches on seawater intrusion of coastal areas [J]. Marine Science Bulletin, 2004,23(2):82-87. (in Chinese))
- [3] 刘杜娟. 中国沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2004,15(1):31-36. (LIU Dujuan. The situation and analysis of salinity intrusion in coastal areas [J]. China Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004,15(1):31-36. (in Chinese))
- [4] 李振函,张春荣,朱伟. 日照市沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 水文地质工程地质, 2009,5:129-132. (LI Zhenhan, ZHANG Chunrong, ZHU Wei. The present and analysis of the sea water intrusion in coastland of Rizhao [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009,5:129-132. (in Chinese))
- [5] QI ShanZhong, QIU Qiulan. Environmental hazard from saltwater intrusion in the Laizhou fult, Shandong province of China [J]. Natural Hazards, 2011,56:563-566.
- [6] SHI Lei, JIAO JiuJimmy. Seawater intrusion and coastal aquifer management in China: a review [J]. Environment Earth Science, 2014,72:2811-2819.
- [7] 苏洁,王金生. PCR-DGGE 法分析湛江东海岛海水入侵引起的土壤微生物群落结构变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013,49 (4):312-317. (SU Jie, WANG Jinsheng. Variation in soil microbial community structure induced by seawater intrusion in east island of Zhanjiang city, Guangdong province, China: a PCR-DGGE study [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013,49 (4):312-317. (in Chinese))
- [8] 周鹏鹏,李国敏. 大陆岛地下水动力学特征—以湛江东海岛为例[J]. 水文地质工程地质, 2013,40(1):12-18. (ZHOU Pengpeng, LI Guomin. The hydrodynamic characteristics of groundwater in continental island—an example from Donghai island, Zhanjiang [J]. Hydrogeology&Engineering Geology, 2013,40(1):12-18. (in Chinese))
- [9] Elena Giménez-Forcada. Space/time development of seawater intrusion: A study case in Vinaroz coastal plain (Eastern Spain) using HFE-Diagram, and spatial distribution of hydrochemical facies[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517:617-627.
- [10] Appelo, C.A.J., Geirnaert, W. Processes accompanying the intrusion of saltwater[J]. Geologia Applicata e Idrogeologia, 1983,18:29-40.
- [11] C.R. Suribabu, S. Ravindar. Tracing the evidence of sea water intrusion in the coastal aquifer of Adhirampattinam, India, using hydro-chemical analysis [J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2012,18(2):90-100.
- [12] Giménez-Forcada. Dynamic of seawater interface using hydrochemical facies evolution diagram [J]. Ground Water, 2010,48(2):212-216.

Analysis of Temporal and Spatial Variation of Seawater Instruction in Donghai Island Based on Hydrochemistry

NAN Xueliang, DU Jun, LI Peiying, ZHANG Zhiwei, LI Ping

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Seawater intrusion exists a significant impact on variation of the groundwater and ecological landscape in the islands and coastal zone, which is one of the important geological disasters of the regions. Due to the influence of the fresh groundwater supply and other variable factors in the different time intervals and spaces, seawater intrusion areas have the characteristics of temporal and spatial variation. Taking the southeast of the Donghai Island as the main research target, this paper used the method of piper diagram to analyze the measured data from December 2012 to August 2014, divided the grade of seawater intrusion according to the content of HCO_3^- and Cl^- , and studied the seawater intrusion in different periods. The analysis show that the Donghai Island underwent many processes of seawater intrusion, of which the percentages are 56.7%, 51.1%, 56.4%, 42.7%, 36.5%, 76.9%, 66.8% and 75.8% respectively.

Key words: Donghai Island; seawater intrusion; hydrochemistry; temporal and spatial variation