

雷州半岛东岸地下水 Br^- 变化及其与 宏量离子的关系研究

黄向青, 甘华阳, 路剑飞, 张顺枝, 潘毅

(国土资源部广州海洋地质调查局, 海底矿产重点实验室, 广东 广州 510760)

摘要: 依据雷州半岛东岸 J1、J2 测井地下水潮周期取样测试数据, 对 Br^- 含量、变化及其与其它宏量离子的关系进行了分析。结果显示: Br^- 主要来源于海水侵染, 测井基本类型为 $\text{Na} + \text{K} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg} - \text{Cl} \cdot \text{SO}_4$, J2 为 $\text{Na} + \text{K} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg} - \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ 。J1 测井 Br^- 平均含量为 11.69 ~ 14.35 mg/L, J2 测井 Br^- 平均值约为 J1 的一半, 各测井 Br^- 统计特征随测次而有所变化。进一步结合 Br^-/Cl^- 比值和测井环境, 认为 J1 更具有海洋相, 为海水入侵混合稀释型, J2 为河口-海洋相互作用型; Br^- 相对变幅与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等海相阴离子相近, 说明 Br^- 也同样积极参与海水入侵; Br^- 与各宏量离子的相关性随测井而异, Br^- 与阳离子的比值以 Na^+ 的最低, K^+ 的最高, Mg^{2+} 居于其间; 毫克当量比值区间频率多表现为左偏、坦峰、尖峰的分布形态, 尤其是 J2 测井, 但 $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{K}^+$ 的比值接近正态。毫克当量比值的相关性与质量比值相关性是保持一致的, Br^-/Na^+ 、 Br^-/Cl^- 线性关系良好, 并进行了最小二乘线性拟合。

关键词: 地下水; Br^- 分布; 宏量离子; 离子关系; 雷州半岛

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0068-06

Variation of Br^- in groundwater and its relationship with other main ions along eastern coast of Leizhou peninsular

HUANG Xiangqing, GAN Huayang, LU Jianfei, ZHANG Shunzhi, PAN Yi

(Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, MLR, Guangzhou 510760, China)

Abstract: According to the lab data on groundwater samples during two tidal cycles from monitoring wells J1 and J2 along eastern coast of Leizhou Peninsular, the paper analyzed the anion Br^- 's concentration, variation and relationship with other main ions. The results demonstrate that Br^- comes mainly from seawater intrusion, and the basic types of measured well are $\text{Na} + \text{K} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg} - \text{Cl} \cdot \text{SO}_4$, and the types of J2 is $\text{Na} + \text{K} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg} - \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$; the average content of Br^- in J1 is 11.69 ~ 14.35 mg/L and the concentration of Br^- in J2 is almost half in J1's. Br^- statistical characteristics every well change with the number of measurement. Combined with the ratio of Br^-/Cl^- and the environment of measured well, it is thought that J1 primarily has sea-phase and J2 has river-sea phase in term of Br^-/Cl^- ; Br^- owns almost the same relative amplitudes with Cl^- and SO_4^{2-} , which show Br^- also actively takes part in the process of seawater intrusion; the correlation of Br^- with other ions also varies with wells and the ratio of Br^- to Na^+ is the lowest among the ratio of Br^- to cations. the highest is K^+ ; the ratio of Br^- to Mg^{2+} is in the meantime. The frequency in the region of milligram equivalent ratio chiefly appears the distribution forms of left lean, sharp peak and flat peak, especially in well J2, the ratio of $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{K}^+$ is close to normal. The relativity of milligram equivalent ratio and mass equivalent ratio is consistent. The linear relationship between Br^-/Na^+ and Br^-/Cl^- is good. The paper finally made linear LST fitness.

Key words: groundwater; variation of Br^- ; main ions; relationship of ions; Leizhou peninsular

溴是很好的海相指示元素, 滨海受到海水侵染、水质恶化的测井, 均有 Br^- 和其它卤素的同步出现。

收稿日期: 2014-01-19; 修回日期: 2014-02-26

基金项目: 国土资源部中国地质调查局“我国重点海岸带滨海环境地质调查与评价”项目(1212010914020)

作者简介: 黄向青(1964-), 女, 广东人, 高级工程师, 从事海洋地质环境研究。

但由于其含量很低,又是非水质评价要素,受到的关注少,研究多集中在同族的 Cl⁻ 之上^[1-5],近来展开了对华南滨海地下水 Br⁻ 的研究,但集中在珠江口部分岸段^[6-7]。溴与其它元素的关系在研究地下水方面有重要应用。溴也是生命元素之一,但过量的溴以及溴氧化物溴酸盐会引起生物毒性,需要加强这方面的监测研究。华南第一半岛雷州半岛作为火山岩岛,岩层裂隙广布,地下水赋存量丰富,生活饮用、农业、养殖、生产基本靠抽取地下水,尤其是近年来经济发展较快,用水量增大,形成了以湛江为中心的地下水水位漏斗。监测表明,局部岸段的地下水水位已下降至海平面以下,出现了海水入侵,滨海地下水咸化加重。海水入侵导致 Br⁻ 含量同步增加,东岸测井实测最大含量为 20.00 mg/L,以东的硃洲岛最大含量接近 16.00 mg/L^[8-10]。

1 数据来源和质量控制

为掌握华南滨海地区湿地环境,向防灾减灾提供科学依据,中国地质调查局“华南西部滨海湿地地质调查与生态环境评价”项目,于 2012 年 7 月-8 月在雷州半岛东岸的 J1、J2 测井进行了浅层地下水取样测试(测井深度 40 m)。前者位于东寮岛东北部马草港村,后者位于南渡江河口。采用两个潮周期之内逐时取样的方法(表 1),分析项目有 Br⁻ 和阳离子、阴离子等,分析执行标准为 DZ/T 0064-

93,由湛江粤西地质工程勘察院实验测试部门负责^[10]。测试过程中采用标准物质和加标回收控制准确度,采用重复分析的方法进行精密度控制,每一分析批次都同时进行了空白试验,以考查试剂和实验环境的受控程度,测试质量参数满足分析方法要求,标准物质分析结果和加标回收测定的合格率为 100%。

2 Br⁻ 的含量分布、变化以及来源

2.1 Br⁻ 的含量特征

J1 测井位于东岸海岛东寮岛上,海域宽阔,以北为雷州湾,以南为琼州海峡东口,地下水类型为 Na + K · Ca · Mg - Cl · SO₄, J2 测井位于 J1 测井以北、雷州半岛东部中段的南渡河出海口边,淡水作用比较明显,地下水类型为 Na + K · Ca · Mg - Cl · SO₄ · HCO₃。J1 测井第 1 测次 J1-1 的 Br⁻ 含量为 10 ~ 13.00 mg/L,平均为 11.69 mg/L, J1-2 为 12.00 ~ 18.00 mg/L,平均为 14.35 mg/L,变异系数不到 0.10(表 2); J2 测井 J2-1 测次为 2.00 ~ 8.00 mg/L,平均为 4.13 mg/L, J2-2 为 1.60 ~ 11.00 mg/L,平均为 6.69 mg/L,平均值明显低于 J1 测井,但变化却比较大,变异系数为 0.36 ~ 0.40(表 2)。偏态与峰值表明了数据分布的形态,即数据的集中或者分散程度。经统计,Br⁻ 在偏态上各有正负,但峰态以正值即以尖峰为主。

表 1 雷州半岛东岸 2012 年地下水测井取样测试情况表

测井	测次	日期	时段	取样间隔/h	样品数量/组	测试数量/组
J1	J1-1	07-22-07-23	2:00-次日 3:00	1	26	26
	J1-2	08-09-08-10	14:00-次日 15:00	1	26	26
J2	J2-1	07-29-07-30	22:00-次日 23:00	1	26	26
	J2-2	08-19-08-20	12:00-次日 13:00	1	26	26

表 2 测井地下水 Br⁻ 含量变化统计特征 mg/L

测井	测次	最低	最高	平均	变异系数	偏态	峰值
J1	J1-1	10.00	13.00	11.69	0.06	-0.73	0.73
	J1-2	12.00	18.00	14.35	0.09	0.83	1.39
J2	J2-1	2.00	8.00	4.13	0.36	0.44	0.38
	J2-2	1.60	11.00	6.69	0.43	-0.35	-0.85

Br⁻ 含量区间频率分布也显示总体上分布并不均匀,特别是 J1 测井,一是频率差异较大,二是区间不连续,即某些区间频率为 0,例如 J1-1 的 10 ~ 10.5 mg/L 区间(图 1)。J1 测井 J1-1 测次以 11.5 ~ 12.00 mg/L 区间频率最高, J1-2 测次以 13 ~

14.00 mg/L 频率最高, J2 测井 J2-1 测次以 3.00 ~ 4.00 mg/L 的频率最高, J2-2 测次相对均匀一些,有 3 个区间频率相近。

2.2 Br⁻ 的来源和类型

一般陆地浅层地下水中 Br⁻ 含量很低,源于大气降水的地下水在淋溶和蒸发作用下 Br⁻ 的含量也都很低微,在华南滨海地区低于 0.3 mg/L,并且岩盐对地下水 Br⁻ 的贡献一般 < 0.4 mg/L^[11-12]。但本测井高出十余倍甚至数十倍。再对比相邻硃洲岛的抽灌海水养殖虾池的 14.25 mg/L 和受到比较严重海水影响的测点平均值 15.65 mg/L, J1 测井略低或者接近, J2 测井明显要低,但比受到微咸水影响

的 2.12 mg/L 又明显要高^[13]。测井周围为砂质和粘土质沉积物互层,距离高潮线较近,与周围海水有水力联系,水位为潮位响应型,尤其是在 J2 井, Br^-

与其它海相离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等几乎是同步进退,联系比较密切,再结合测井类型,表明 Br^- 主要来自海水侵袭。

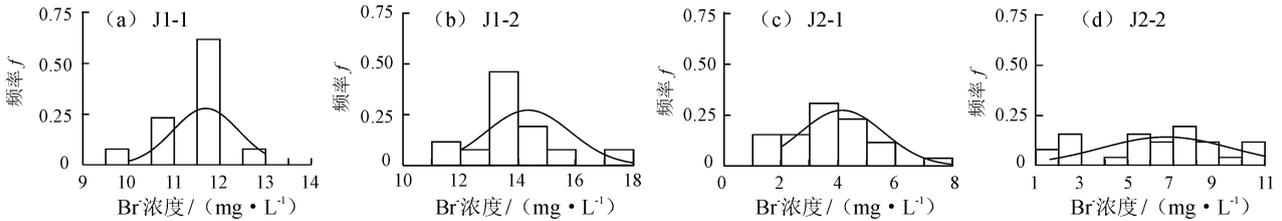


图1 测井地下水 Br^- 含量区间频率 f 和正态分布拟合曲线

虽然测井 Br^- 主要来自海水,但由于所处环境不同, Br^-/Cl^- 特征也有所不同:①两个测次的 Br^-/Cl^- 平均值与海水接近,在海水曲线上下波动,其比值更具有海洋相(图2),为海水侵入混合稀释型;②J2测井由于淡水补充比较及时,淡水和海水相互作用明显,两个测次 Br^-/Cl^- 平均比值明显提高,非海水稀释和大气降水来源可解释。其原因一是淡水对海水的稀释过程中,溴盐的溶解度与氯盐的溶解度相近或者还要大一些,两者不是同步降低, Br^- 降低的幅度要低于 Cl^- ,二是含 Br^- 污染物质随河水侧向渗进,这种情况在其它河流附近也有出现^[14-15],三是河口在沉积过程中有机质埋藏比较丰富,会导致 Br^- 的增高,故J2测井为河流和海水共同作用型。

3 Br^- 的潮周期变化特征

J1测井长期为海水所侵入, Cl^- 含量高,有蒸发浓缩趋向。在潮周期里,其 Br^- 围绕平均值作上下波动,无明显趋势;J2测井的J2-1测次也是基本如此,但由于淡水水势较强,波动幅度明显大(图3),

J2-2测次 Br^- 有上升趋势,线性拟合方程为 $y = 0.1467x + 4.7114$, x 为逐时样品序数。

虽然 Br^- 含量远低于 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等宏量阴离子,绝对方差等也是如此,但以逐时绝对偏差/平均值恒量的相对变幅则是三者相近的,在表示相对高低的三角图上数据点集中在中部(图4),说明 Br^- 同样积极参与海水入侵过程,在J1测井相对变幅 $83.62\% \sim 125.44\%$, J2测井为 $48.44\% \sim 193.70\%$ 。

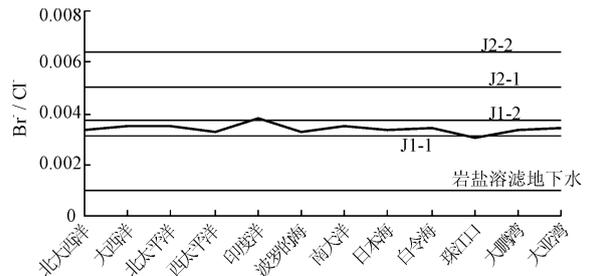


图2 测井地下水 Br^-/Cl^- 测次平均值与海洋以及邻近岛屿的比较

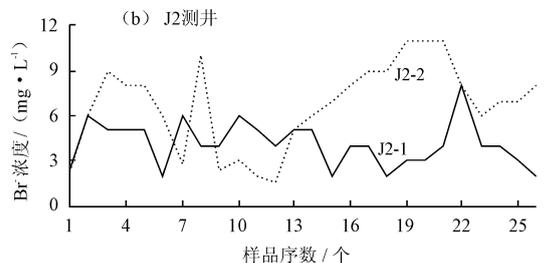
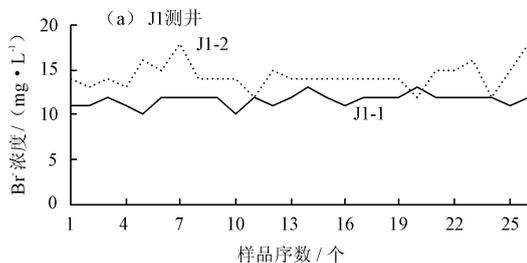


图3 测井地下水 Br^- 浓度随测次的变化过程

4 Br^- 与其它宏量离子的关系

4.1 相关性

相关性计算检验显示,①J1测井 Br^- 与各宏量离子的相关性并不好,相关系数很低,在 $-0.25 \sim$

0.31 之间(表3),但并非表明 Br^- 与其中 Cl^- 、 Na^+ 等海相要素不是同一来源,主要是如上所述,J1测井多由海水所占据,淡水作用力弱,要素变化不大,自我调节力较差,离子有自行变化的趋向,波动相位错开;②在J2测井 Br^- 与其它离子的关系改善,随

海水同进退,与淡水互相推动,与 Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 关系均为正相关或显著正相关,尤其是与 Cl⁻、Na⁺,显示 Br⁻ 与 Cl⁻ 等离子的相关性随测井类型和环境条件而变。尤其是 J2 测井的 Br⁻ 与 Mg²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻ 之间的相关系数与其它滨海测井接近,表示既有自身特性,也有共性;③ 各测井与 HCO₃⁻ 相关性并不好,表明其有陆相另外成因。

进一步研究 Br⁻ 与 Cl⁻ 的相互关系。如上所述的原因,J1 测井中,Br⁻ 与 Cl⁻ 变化并不同步,各有特点,线性拟合显示趋势不明显,相关系数 $r < 0.15$;J2 测井均存在明显的线性关系,尤其是第 2 个测次,相关系数 r 分别是 0.74、0.95, R^2 分别是 0.5428 和 0.9096,与前人的研究结果基本相符^[17]。

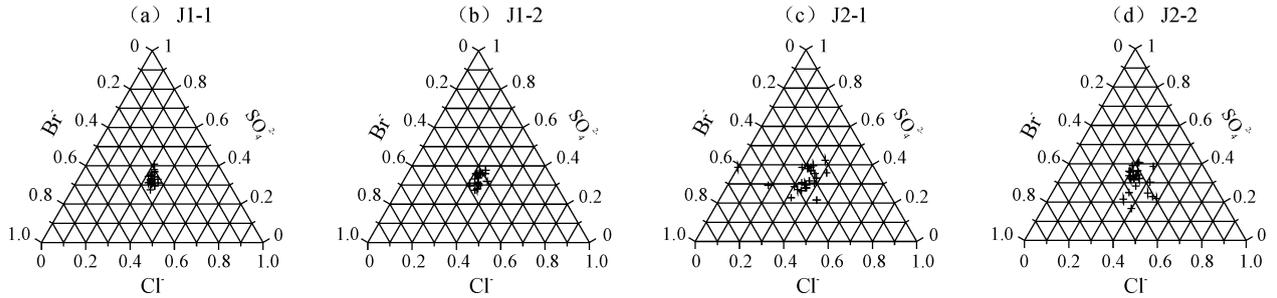


图4 测井地下水 Br⁻ 与其它宏量阴离子在测次的相对振幅比例

表3 测井地下水 Br⁻ 与其它宏量离子的相关系数

测井	测次	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
J1	J1-1	0.10	-0.02	-0.04	0.14	0.04	0.31
	J1-2	-0.23	0.26	-0.14	0.08	-0.15	-0.25
J2	J2-1	0.65	0.66	0.67	0.74	0.62	0.23
	J2-2	0.88	0.93	0.95	0.95	0.84	-0.16

4.2 Br⁻ 与其它宏量离子的比值特征

4.2.1 质量含量比值 以上表明地下水体系中的要素是相互动态联系的,离子之间的比值可反映海水入侵过程之中它们的行为以及分配。从质量含量比值统计分布来看,J1 测井 J1-1 测次 Br⁻ 与其它宏量离子比值偏态均为右偏(负值),但尖峰(正值)和坦峰(负值)不一,J1-2 则以左偏(正值)和尖峰为主;J2-1 测次均为左偏,以尖峰为主,J2-2 测次则是正负偏态、峰态各有出现。可见比值统计形态如同其含量一样,也随测次而有所变化(表4)。

表5 为测井地下水 Br⁻ 与主要宏量离子质量含

量比值统计表,从表中看出,Br⁻ 与阳离子的比值以 Na⁺ 的最低,K⁺ 的最高,Mg²⁺ 居于其间,阴离子中以 Br⁻/Cl⁻ 最低,Br⁻/SO₄²⁻、Br⁻/HCO₃⁻ 则各有高低。具体是,① J1 测井 Br⁻/Mg²⁺ 为 0.04 ~ 0.07,Br⁻/K⁺ 为 0.35 ~ 0.55,Br⁻/Na⁺ 为 0.007 ~ 0.010。Br⁻ 与阴离子的比值以 Cl⁻ 的最低,HCO₃⁻ 最高,SO₄²⁻ 介于其中。与 Cl⁻ 为 0.003 ~ 0.005,与 SO₄²⁻ 为 0.01 ~ 0.03,与 HCO₃⁻ 为 0.10 ~ 0.20;② J2 测井 Br⁻/Mg²⁺ 为 0.04 ~ 0.16,Br⁻/K⁺ 为 0.14 ~ 0.48,Br⁻/Na⁺ 为 0.01 ~ 0.03;Br⁻ 与 Cl⁻ 的 0.003 ~ 0.014,与 SO₄²⁻ 的为 0.02 ~ 0.11,与 HCO₃⁻ 为 0.01 ~ 0.06;③ 不同测井类型有不同比值特征,J1 测井为低 Br⁻/Mg²⁺、Br⁻/Cl⁻、Br⁻/SO₄²⁻ 和高 Br⁻/K⁺、Br⁻/Na⁺、Br⁻/HCO₃⁻ 组合,J2 测井则与其相反。尽管上述比值有变化,但代表性比值即中值、平均值、模数比较接近(表5),尤其是前两者,表明数据变化有一定规律性和集中性,总体代表性较好。

表4 测井地下水 Br⁻ 与主要宏量离子比值的统计分布表

测井	测次	项目	Br ⁻ /Mg ²⁺	Br ⁻ /K ⁺	Br ⁻ /Na ⁺	Br ⁻ /Cl ⁻	Br ⁻ /SO ₄ ²⁻	Br ⁻ /HCO ₃ ⁻
J1	J1-1	偏态	-0.34	-0.73	-0.48	-0.71	-0.05	-0.27
		峰态	-0.64	0.88	-0.23	0.42	1.05	-0.18
	J1-2	偏态	1.00	0.89	0.57	0.45	0.56	0.99
		峰态	0.71	1.99	0.77	1.25	-0.94	2.48
J2	J2-1	偏态	0.79	0.92	2.41	2.84	0.56	0.50
		峰态	0.59	0.79	8.08	10.55	-0.55	0.14
	J2-2	偏态	2.52	-0.91	-0.46	-0.62	2.14	-0.24
		峰态	10.70	-0.03	-0.14	-0.09	5.49	-1.00

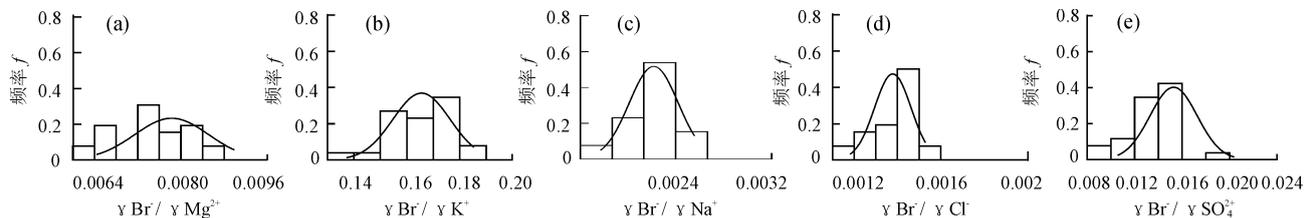
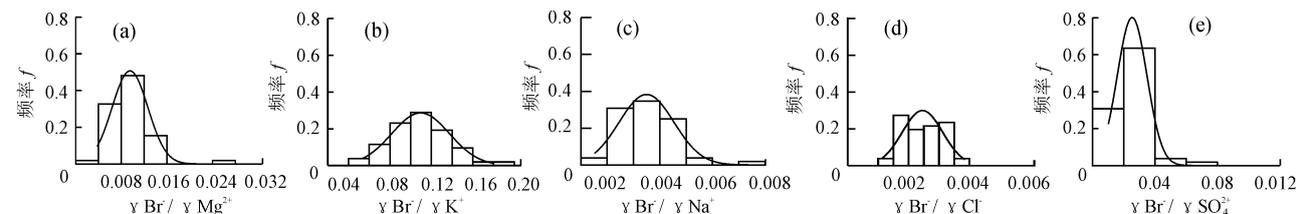
表5 测井地下水 Br⁻与主要宏量离子质量含量比值统计表

测井	测次	项目	Br ⁻ /Ca ²⁺	Br ⁻ /Mg ²⁺	Br ⁻ /K ⁺	Br ⁻ /Na ⁺	Br ⁻ /Cl ⁻	Br ⁻ /SO ₄ ²⁻	Br ⁻ /HCO ₃ ⁻
J1	J1-1	平均	0.018	0.051	0.440	0.008	0.003	0.025	0.111
		置信区间	±0.0007	±0.002	±0.015	±0.0003	±0.0001	±0.002	±0.004
		中值	0.018	0.052	0.449	0.008	0.003	0.026	0.113
		模数	0.019	0.056			0.003	0.027	0.113
	J1-2	平均	0.021	0.053	0.435	0.009	0.004	0.018	0.135
		置信区间	±0.001	±0.004	±0.022	±0.0005	±0.0002	±0.002	±0.010
		中值	0.020	0.051	0.432	0.009	0.004	0.017	0.133
		模数	0.020	0.052	0.426			0.017	0.130
J2	J2-1	平均	0.039	0.054	0.279	0.011	0.005	0.039	0.020
		置信区间	±0.006	±0.008	±0.042	±0.0022	±0.0010	±0.007	±0.004
		中值	0.039	0.052	0.260	0.010	0.005	0.037	0.019
		模数	0.020	0.052			0.004	0.028	0.023
	J2-2	平均	0.063	0.071	0.303	0.013	0.006	0.045	0.037
		置信区间	±0.009	±0.011	±0.032	±0.0013	±0.0010	±0.009	±0.008
		中值	0.068	0.071	0.315	0.0136	0.006	0.040	0.038
		模数	0.068	0.076	0.328		0.007		

* 置信区间的显著水平参数 $\alpha=0.01$,下同。

4.2.2 毫克当量比值 J1 测井 $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{Mg}^{2+}$ 为 0.006~0.011,平均为 0.008, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{K}^+$ 为 0.133~0.207,平均 0.165, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{Na}^+$ 为 0.0021~0.0033,平均为 0.0025, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{Cl}^-$ 为 0.0011~0.0022,平均为 0.0014, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{SO}_4^{2-}$ 为 0.008~0.020,平均为 0.013。Br⁻与上述三种阳离子和两种阴离子 Cl⁻和 SO₄²⁻ 比值区间频率分布多从左偏为主,形态上坦峰、尖峰均有(图5)。还同步测量了 HCO₃⁻ 含量, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{HCO}_3^-$ 为 0.075~0.154。

J2 测井 $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{Mg}^{2+}$ 为 0.004~0.024,平均为 0.010, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{K}^+$ 为 0.053~0.180,平均 0.110, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{Na}^+$ 为 0.0022~0.0081,平均为 0.0030, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{Cl}^-$ 为 0.0012~0.0062,平均为 0.0019, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{SO}_4^{2-}$ 为 0.010~0.062,平均为 0.025。

图5 J1 测井地下水 Br⁻与主要宏量离子的毫克当量比值区间频率 f 分布图6 J2 测井地下水 Br⁻与主要宏量离子的毫克当量比值区间频率 f 分布

由于淡水作用比较强烈,比值区间频率差异较大,分布不均比较明显,除了 $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{K}^+$ 接近正态之外,多从左偏为主,形态多为尖峰(图6)。另外, $\gamma\text{Br}^-/\gamma\text{HCO}_3^-$ 为 0.006~0.047。

4.2.3 比值之间的关系 经过相关性计算检验显示,① J1 测井 Br⁻与其它离子质量含量比值之间相关系数为 -0.31~0.98(表6中1对角线上方),J2 测井(表6中1对角线下方)为 0.14~0.98。与阳离子的比值相关性较好,表明来源的一致性;② J1 测井 Br⁻/SO₄²⁻与其它比值的相关性一般并不好,应是 SO₄²⁻在海水入侵过程中参与了氧化还原;③ 虽然前述 HCO₃⁻与各要素相关性并不好,但作为咸化指标 Br⁻/HCO₃⁻与各比值关系则有所改善,在 J1 测井相关系数最高为 0.80,J2 测井为 0.68。

表6 测井地下水 Br⁻ 与主要离子质量含量比值之间的相关系数

	Br ⁻ /Mg ²⁺	Br ⁻ /K ⁺	Br ⁻ /Na ⁺	Br ⁻ /Cl ⁻	Br ⁻ /SO ₄ ²⁻	Br ⁻ /HCO ₃ ⁻
Br ⁻ /Mg ²⁺	1	0.74	0.66	0.64	0.38	0.47
Br ⁻ /K ⁺	0.75	1	0.65	0.61	0.41	0.56
Br ⁻ /Na ⁺	0.73	0.90	1	0.98	-0.17	0.80
Br ⁻ /Cl ⁻	0.75	0.87	0.98	1	-0.25	0.84
Br ⁻ /SO ₄ ²⁻	0.71	0.52	0.56	0.51	1	-0.31
Br ⁻ /HCO ₃ ⁻	0.68	0.58	0.46	0.50	0.14	1

综上所述,Br⁻/Na⁺与Br⁻/Cl⁻两对相关性特别突出,线性相关系数均为0.98,线性拟合R²在0.9149~0.9884之间,斜率在0.3397~0.4974之间,以J2测井要高。毫克当量比值的相关关系是与质量比值一样的,这是由当量性质所决定,以上关系同样是当量比值的特征的反映。

5 结 语

(1)测井Br⁻主要来自海水侵染,含量随测井和不同潮期而有改变。J2测井低于J1测井,但变化性较大,统计分布形态随测次而有所变化。J1测井Br⁻显示出保守性,J2测井Br⁻叠加了河流渗入。J1测井为海水稀释混合型,J2测井河流-海水共同作用型。

(2)测井Br⁻含量在潮周期里多为上下波动,在淡水作用较强的J2测井,波动幅度明显要大。虽然Br⁻含量远低于Cl⁻、SO₄²⁻,但其相对变幅则是与两者相近,说明Br⁻同样活跃地参与海水入侵。

(3)Br⁻与Cl⁻的关系视测井类型而异,有线性相关显著型和相关不显著型。

(4)对应不同的测井类型,J1测井Br⁻与阳离子的当量比值为0.0021~0.2070,γBr⁻/γCl⁻为0.0011~0.0022,γBr⁻/γSO₄²⁻为0.008~0.020,γBr⁻/γHCO₃⁻为0.075~0.154;J2测井依次为0.0022~0.1800、0.0012~0.0062、0.010~0.062、0.006~0.047。表征总体分布的平均值、中值等比较接近,比值有一定代表性。以Br⁻/Na⁺与Br⁻/Cl⁻两者线性关系最好。

参考文献:

[1] 樊丽芳,陈植华.深圳滨海地带海水入侵判定界限值的确定[J].勘察科学技术,2004(2):16-20.
 [2] 杨巧凤,李文鹏,王瑞久.深圳沿海表层海水与地表水关系的地球化学分析[J].水文地质工程地质,2010,37(1):45-48.
 [3] 杜中,李占斌,李鹏,等.海水入侵区地下水氯值统计及其

规律运用[J].水资源与水工程学报,2008,19(4):83-85.
 [4] 殷建平,谢强,孙宗勋,等.深圳沿岸海水入侵灾害现状研究[J].海洋环境科学,2011,30(4):541-545.
 [5] 张奎山,刘继先,赵欣萍.深圳市饮用水溴酸盐风险调查研究[J].给水排水,2008,34(S1):111-113.
 [6] 蒋方媛,韩绘芳,陈加红,等.地下水微量元素与同位素特征对海水入侵和地下水起源的指示意义——以深圳市宝安区为例[J].东华理工大学学报(自然科学版),2009,32(3):253-260.
 [7] 杨巧凤,李文鹏,王瑞文.深圳大沙河河水与海水关系的水文化学识别[J].水文地质工程地质,2010,37(2):32-35+41.
 [8] 曾黄锦.雷州半岛地下水开发利用对环境的影响分析[J].水利水电快报,2006,27(7):8-10+21.
 [9] 陈苑.碓洲岛地下水水质咸化和海水入侵主要成因及对策[J].大众科技,2011(4):114-115.
 [10] 广州海洋地质调查局.广东西部(雷州半岛)滨海湿地地质调查及生态环境评价报告[R].广州:广州海洋地质调查局,2013.
 [11] 杨巧凤.深圳海岸带地表水和浅层地下水的水文地球化学[D].硕士学位论文,北京:中国地质大学,2009.
 [12] 蒋方媛,韩绘芳,陈加红,等.地下水微量元素与同位素特征对海水入侵和地下水起源的指示意义——以深圳市宝安区为例[J].东华理工大学学报(自然科学版),2009,32(3):253-260.
 [13] 张文杰,谭红兵,陈喜,等.广东碓洲岛地下水化学演化及成因机理[J].水文,2012,32(3):51-58+59.
 [14] 许炼烽,林尹,仓恒瑾,等.雷州半岛地表水体非点源污染物时空变化特征研究[J].生态环境,2005,14(6):830-834.
 [15] 杨永亮,刘崑,刘晓端,等.辽宁省西部和沈阳地区河水及地下水中溴的分布与污染特征[J].环境化学,2009,28(6):924-928.
 [16] 张正斌,陈镇东,刘莲生等.海洋化学原理和应用-中国近海的海洋化学[M].北京:海洋出版社,1999.
 [17] 秦俊法,马长颖.溴与其他卤族元素及卤水溴、氯含量与矿化度的相关关系[J].广东微量元素科学,2011,18(11):1-18.