

海南岛南部沿岸地下水水化学要素变化及海水入侵特征

袁晓婕,黄向青,甘华阳,黄磊

(中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 510075;

国土资源部海底矿产资源重点实验室,广州 510075)

摘要:对位于海南岛南部滨岸测井地下水进行了大小潮周日取样及其化学测试。结果显示,化学要素含量及变化特征随潮期、测井位置而变化,由于所处环境的不同,QZ2和QZ5监测井的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量相近,而 Mg^{2+} 的差异较明显,前者平均高出后者18.82%,表明QZ2监测井受到海水入侵。QZ2、QZ5监测井阳离子以 Na^+ 、阴离子以 Cl^- 占优, Na^+ 所占平均比例为83%~85%、 Cl^- 为87%~88%,显示出海水的影响;QZ3监测井以 HCO_3^- 占优,比例为62%~63%, Ca^{2+} 也占据较大优势,为淡水所控制。QZ2、QZ5监测井SAR依次为57.95~63.24、57.20~63.13,QZ3监测井为2.17~4.42,前两者明显要高很多。QZ2、QZ5监测井地下水盐碱化风险程度很高,QZ3为一般。

关键词:海南岛南部;地下水;化学要素;海水入侵

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.08005

海南岛地跨南海地台及华南褶皱系五指山褶皱带,区内地层发育较齐全,地质构造错综复杂,岩浆岩广泛分布。海南岛南部地形整体呈中部高,向东、南、西降低,向海倾斜,由山地、丘陵、平原顺序逐渐递降,构成层状垂直分布和环状水平分布带。主要构造带由九所一陵水断裂带、崖城—藤桥断裂带等组成^[1],沿构造带分布有燕山期一系列花岗岩体和同安岭、牛腊岭等火山岩,形成一条东西向花岗岩穹隆构造和火山岩带。海南岛气候属于海洋性热带季风气候^[2],东部与南部为不规则日潮混合潮,日潮约占半个月,半日潮平均为11天。

海南岛地下水资源丰富,沿岸分布有湿地、红树林、珊瑚礁、海草等宝贵资源^[3-5],但由于人口的不断增加和经济的快速发展,地下水的抽取使用规模越来越大,水位有持续下降的趋势,对环境生态和生活产生很大影响^[6,7],但是由于各方面条件限制,关于海南岛滨海地下水要素方面的研究还较少。本文以地下水主要离子为研究对象,分析总结了测井地下水的周期变化规律和海水入侵特征。

1 数据来源

于2014年6月,对海南岛南部的陵水县黎安港QZ2测井、三亚市三亚湾QZ3测井和东方市板桥镇下园村QZ5测井在大潮、小潮进行了地下水取样分析(表1),测试项目为离子含量、溶解性固体总量(TDS)等,测试执行标准为《地下水水质检验方法》(DZ/T0064-93)。

收稿日期:2017-05-03

基金项目:国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金课题(KLMMR-2014-A-07)。

作者简介:袁晓婕(1985—),女,博士,工程师,主要从事水文地球化学、海洋环境等方面的研究工作。E-mail: jieer17@163.com

表 1 地下水监测井 25 小时水位观测

Table 1 Observation of groundwater monitoring wells in 25 hours

井号	观测及取样时间(年/月/日 时:分)	潮位	地下水取样(组)
QZ2	2014/06/13 08:30—2014/06/14 09:30	大潮	26
	2014/06/19 17:00—2014/06/20 18:00	小潮	26
QZ3	2014/06/13 12:00—2014/06/14 13:00	大潮	26
	2014/06/19 10:00—2014/06/20 11:00	小潮	26
QZ5	2014/06/27 09:00—2014/06/28 10:00	大潮	26
	2014/06/19 10:00—2014/06/20 11:00	小潮	26

2 化学要素变化特征

2.1 主要阳离子含量变化

2.1.1 大潮期

大潮期, QZ2 监测井 K^+ 含量为 406~458 mg/L, Na^+ 为 10 700~12 200 mg/L, Ca^{2+} 为 384~430 mg/L, Mg^{2+} 为 1 330~1 520 mg/L, 平均值依次为 430、11 415、408 和 1 422 mg/L; QZ3 监测井 K^+ 为 9.8~11.2 mg/L, Na^+ 为 68.7~129.0 mg/L, Ca^{2+} 为 49.8~61.5 mg/L, Mg^{2+} 为 8.3~9.0 mg/L, 平均值依次为 10.7、80.3、58.4、8.6 mg/L; QZ5 监测井 K^+ 为 432~492 mg/L, Na^+ 为 10 200~11 600 mg/L, Ca^{2+} 为 382~432 mg/L, Mg^{2+} 为 1 150~1 290 mg/L, 平均值依次为 451、10 592、397、1 197 mg/L(表 2)。

2.1.2 小潮期

小潮期, QZ2 监测井 K^+ 含量为 385~426 mg/L, Na^+ 为 10 900~11 900 mg/L, Ca^{2+} 为 390~623 mg/L, Mg^{2+} 为 1 230~1 380 mg/L, 平均值依次为 401、11 254、413、1 298 mg/L; QZ3 监测井 K^+ 为 10.3~11.4 mg/L, Na^+ 为 67.8~119.0 mg/L, Ca^{2+} 为 42.2~63.6 mg/L, Mg^{2+} 为 7.3~8.4 mg/L, 平均值依次为 10.9、78.4、56.9、7.9 mg/L; QZ5 监测井 K^+ 为 362~419 mg/L, Na^+ 为 10 200~11 400 mg/L, Ca^{2+} 为 398~438 mg/L, Mg^{2+} 为 1 210~1 360 mg/L, 平均值依次为 391、10 735、416、1 266 mg/L(表 2)。

偏态与峰态反映了数据集中和分散的程度。大潮期间 QZ2、QZ3 监测井以右偏为主, 多为尖峰, QZ5 监测井则全为左偏尖峰; 小潮期 QZ2 全为左偏, 坦峰为主, QZ3 各有左偏、右偏, 尖峰和

坦峰均有, QZ5 全为左偏, 以坦峰为主, 可见数据统计形态随测量时段而有所变化。

大潮期, 在 QZ2 监测井的上述阳离子变异系数均为 0.03, 变化比较稳定, 而 QZ3 监测井除了 Na^+ 变化较大之外, 变异系数为 0.02~0.05, QZ5 变异系数介于 0.02~0.03; 小潮期 QZ2 的变异系数有所增加, 在 0.02~0.11 之间, QZ3 基本维持在 0.03~0.14, QZ5 监测井几乎不变, 均为 0.03。

QZ2 和 QZ5 监测井的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量相近, 而 Mg^{2+} 的差异较明显, 前者平均高出后者 18.82%, 表明 QZ2 监测井受到海水入侵, 且入侵路径上的水-岩作用更为明显, 颗粒介质发生了阳离子置换和含镁矿物溶解。

2.2 主要阴离子含量变化

2.2.1 大潮期

大潮期, QZ2 监测井 Cl^- 含量为 19 100~21 200 mg/L, SO_4^{2-} 为 2 300~2 660 mg/L, HCO_3^- 为 118~128 mg/L, 平均值依次为 20 138、2 519、126 mg/L; QZ3 监测井 Cl^- 为 83.3~160.0 mg/L, SO_4^{2-} 为 35.0~49.9 mg/L, HCO_3^- 为 197~242 mg/L, 平均值依次为 96.8、37.9、227 mg/L; QZ5 监测井 Cl^- 为 17 000~19 100 mg/L, SO_4^{2-} 为 2 320~2 580 mg/L, HCO_3^- 为 158~168 mg/L, 平均值依次为 17 827、2 427、168 mg/L(表 3)。

2.2.2 小潮期

小潮期, QZ2 监测井 Cl^- 为 18 400~19 800 mg/L, SO_4^{2-} 为 2 400~2 780 mg/L, HCO_3^- 为 123~128 mg/L, 平均值依次为 18 838、2 594、125 mg/L; QZ3 监测井 Cl^- 为 80.5~142.0 mg/L, SO_4^{2-} 为 39.3~49.3 mg/L, HCO_3^-

表2 监测井地下水潮周期阳离子含量统计

Table 2 The content of cations of groundwater monitoring wells in tide period /(mg/L)

测量时段	监测井	统计项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
大潮期	QZ2	最小	406	10 700	384	1 330
		最大	458	12 200	430	1 520
		平均	430	11 415	408	1 422
		偏态	-0.09	-0.13	0.09	-0.11
		峰态	-0.69	-0.50	-0.80	-0.37
		变异系数	0.03	0.03	0.03	0.03
	QZ3	最小	9.8	68.7	49.8	8.3
		最大	11.2	129.0	61.5	9.0
		平均	10.7	80.3	58.4	8.6
		偏态	-0.92	2.61	-1.88	0.12
		峰态	0.46	6.48	3.66	1.07
		变异系数	0.03	0.19	0.05	0.02
	QZ5	最小	432	10 200	382	1 150
		最大	492	11 600	432	1 290
		平均	451	10 592	397	1 197
偏态		1.46	1.87	1.90	1.08	
峰态		3.46	5.33	5.50	1.74	
	变异系数	0.03	0.03	0.02	0.03	
小潮期	QZ2	最小	385	10 900	390	1 230
		最大	426	11 900	623	1 380
		平均	401	11 254	413	1 298
		偏态	0.69	0.66	4.80	0.34
		峰态	0.74	0.53	23.88	0.87
		变异系数	0.03	0.02	0.11	0.03
	QZ3	最小	10.3	67.8	42.2	7.3
		最大	11.4	119.0	63.6	8.4
		平均	10.9	78.4	56.9	7.9
		偏态	-0.84	2.63	-1.28	0.33
		峰态	0.66	8.42	1.33	1.66
		变异系数	0.03	0.14	0.10	0.03
	QZ5	最小	362	10 200	398	1 210
		最大	419	11 400	438	1 360
		平均	391	10 735	416	1 266
偏态		0.07	0.33	0.23	0.64	
峰态		0.09	-0.34	-0.62	-0.07	
	变异系数	0.03	0.03	0.03	0.03	

表3 监测井地下水潮周期阴离子含量统计

Table 3 The content of anions of groundwater monitoring wells in tide period /(mg/L)

测量时段	监测井	统计项目	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
大潮期	QZ2	最低	19 100	2 390	118
		最高	21 200	2 660	128
		平均	20 138	2 519	126
		偏态	-0.04	-0.11	-1.00
		峰态	-0.93	-0.81	0.11
		变异系数	0.03	0.03	0.02
	QZ3	最低	83.3	35.0	197
		最高	160.0	49.9	242
		平均	96.8	37.9	227
		偏态	2.64	2.71	-1.87
		峰态	6.55	7.03	3.77
		变异系数	0.21	0.10	0.05
	QZ5	最低	17 000	2 320	158
		最高	19 100	2 580	168
		平均	17 827	2 427	168
偏态		1.04	0.56	-5.10	
峰态		3.16	0.02	26.00	
	变异系数	0.02	0.03	0.01	
小潮期	QZ2	最低	18 400	2 400	123
		最高	19 800	2 780	128
		平均	18 838	2 594	125
		偏态	1.04	0.15	0.33
		峰态	1.08	0.18	-2.06
		变异系数	0.02	0.03	0.02
	QZ3	最低	80.5	39.3	202
		最高	142.0	49.3	237
		平均	95.0	41.8	226
		偏态	2.18	2.20	-1.31
		峰态	6.81	7.95	4.10
		变异系数	0.13	0.05	0.03
	QZ5	最低	17 700	2 370	153
		最高	19 100	2 540	163
		平均	18 223	2 445	158
偏态		0.56	0.20	-0.79	
峰态		-0.46	-1.09	4.18	
	变异系数	0.02	0.02	0.01	

为 202~237 mg/L,平均值依次为 95.0、41.8、226 mg/L;QZ5 监测井 Cl^- 为 17 700~19 100 mg/L, SO_4^{2-} 为 2 370~2 540 mg/L, HCO_3^- 为 153~163 mg/L,平均值依次为 18 223、2 445、158 mg/L。

QZ2 监测井大潮期 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为右偏和坦峰,小潮期则为左偏和尖峰,QZ3 监测井在大潮期、小潮期均为左偏和尖峰,QZ5 监测井在大潮期为左偏和尖峰,小潮期为左偏和坦峰; HCO_3^- 多与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为相反统计形态。两个测量时段 QZ2 监测井变异系数为 0.02~0.03,QZ5 为 0.01~0.03,两者均变化很小,结合以上 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量和阳离子含量,两监测井均已被海水所控制;QZ3 的变异系数为 0.05~0.21,变化较大, Cl^- 和 SO_4^{2-} 明显低很多,为淡水所控制,但也受到 Cl^- 等的侵染。

2.3 其他化学要素含量变化

2.3.1 游离 CO_2 和可溶性 SiO_2

QZ2 监测井在两个测量时段的游离 CO_2 均为 0,应是生物降解活动微弱以及出现 CO_2 逸出而致;QZ3 监测井在两个测量时段的游离 CO_2 依次为 6.2~8.8、2.6~8.8 mg/L,QZ5 监测井在大潮、小潮期依次为 5.3~8.8、2.6~12.3 mg/L。

监测井所在区域气候湿热,铝镁硅酸盐岩层在风化作用下使得地下水含有可溶性 SiO_2 ,溶解的 SiO_2 再进一步生成正硅酸和偏硅酸,但两者平衡常数很小,含量都很低。大潮期,QZ2 监测井可溶性 SiO_2 为 8.8~12.8 mg/L,平均为 10.4 mg/L,QZ3 监测井为 17.9~22.3 mg/L,平均为 19.2 mg/L,QZ5 监测井为 9.4~13.5 mg/L,平均 11.4 mg/L;小潮期 QZ2 监测井为 SiO_2 为 2.8~6.8 mg/L,QZ3 监测井为 18.9~21.6 mg/L,QZ5 为 4.7~5.7 mg/L,平均依次为 3.7、19.5、5.2 mg/L。QZ3 监测井均高于 QZ2 和 QZ5,后两者接近。

2.3.2 总溶解固体 TDS、硬度、电导率和 pH 值

在大潮期,QZ2 监测井地下水总溶解固体 TDS 为 34 400~38 600 mg/L,平均为 36 465 mg/L;QZ3 监测井为 404~529 mg/L,平均为 427 mg/L;QZ5 为 31 900~35 600 mg/L,平均为 33 054 mg/L。小潮期,QZ2 监测井为 34 000~

36 800 mg/L,平均 34 908 mg/L;QZ3 监测井 385~501 mg/L,平均为 424 mg/L;QZ5 为 31 300~35 400 mg/L,平均为 33 458 mg/L。QZ2、QZ5 监测井 TDS 均维持在较高水平,变异系数在 0.02~0.03 之间不等,变化不大,相对来说,QZ3 变化最大,变异系数为 0.05~0.08。

大潮期 QZ2 监测井地下水的总硬度为 6 469~7 327 mg/L,平均为 6 878 mg/L;QZ3 监测井为 160~190 mg/L,平均为 182 mg/L;QZ5 为 5 552~6 248 mg/L,平均为 5 784 mg/L。小潮期,QZ2 监测井的总硬度为 6 050~6 756 mg/L,平均为 6 357 mg/L;QZ3 为 136~193 mg/L,平均为 174 mg/L;QZ5 为 5 975~6 701 mg/L,平均为 6 249 mg/L。QZ2、QZ5 监测井硬度高且接近,而 QZ3 监测井为最低,与以上 TDS 是相对应的。

2.3.3 pH 值

大潮期 QZ2 监测井为 pH 为 8.34~8.67,平均为 7.41;QZ3 监测井为 7.88~8.00,平均为 7.92;QZ5 监测井为 7.86~8.39,平均 7.99。小潮期,QZ2 监测井 pH 为 8.32~8.38,平均 8.36;QZ3 监测井 pH 为 7.62~8.13,平均 7.78;QZ5 监测井 pH 为 7.92~8.23,平均 8.10。QZ2、QZ5 监测井的 pH 值与海水 pH 值几乎一致,尤其是 QZ2 监测井。

2.3.4 电导率

大潮期,QZ2 的电导率为 58.5~65.6 mS/cm,平均为 62 mS/cm;QZ3 电导率 0.688~0.897 mS/cm,平均 0.726 mS/cm;QZ5 为 54.2~60.5 mS/cm,平均 56.2 mS/cm。小潮期,QZ2 的电导率为 57.9~62.6 mS/cm,平均 59.4 mS/cm;QZ3 电导率 0.656~0.854 mS/cm,平均 0.722 mS/cm;QZ5 为 53.3~60.3 mS/cm,平均 57.0 mS/cm。QZ2、QZ5 监测井接近,QZ3 监测井明显要低很多。电导率和 TDS、总硬度是相互联系的,存在着对应关系。

综上所述,QZ2、QZ5 监测井阳离子以 Na^+ 、阴离子以 Cl^- 占优, Na^+ 所占平均比例为 83%~85%、显示出海水的影响, Cl^- 为 87%~88%;QZ3 监测井以 HCO_3^- 占优,比例为 62%~63%, Ca^{2+} 也占据较大优势,为淡水所控制。

2.4 潮周期内要素波动特征

2.4.1 主要阳离子的波动特征

主要阳离子含量随时间而波动变化, QZ2、QZ5 监测井以 Na^+ 的绝对波幅最大, QZ3 监测井的 Na^+ 、 Ca^{2+} 两者相近(图 1)。

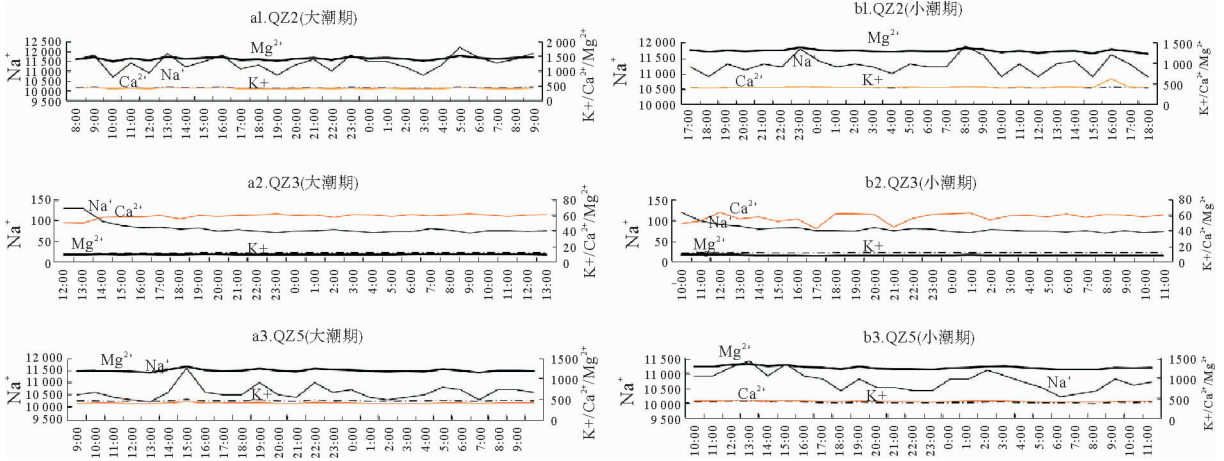


图 1 地下水监测井阳离子含量(mg/L)潮周期时序变化

Fig. 1 The variation of cations of groundwater monitoring wells in tide period

2.4.2 主要阴离子的波动特征

阴离子逐时变化也具有同样特征, 以 Cl^- 绝对振幅最大, HCO_3^- 较为稳定。 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-}

极值出现时刻有对应性(图 2)。QZ2 监测井 CO_3^{2-} 含量很低, QZ3、QZ5 监测井则都为 0。

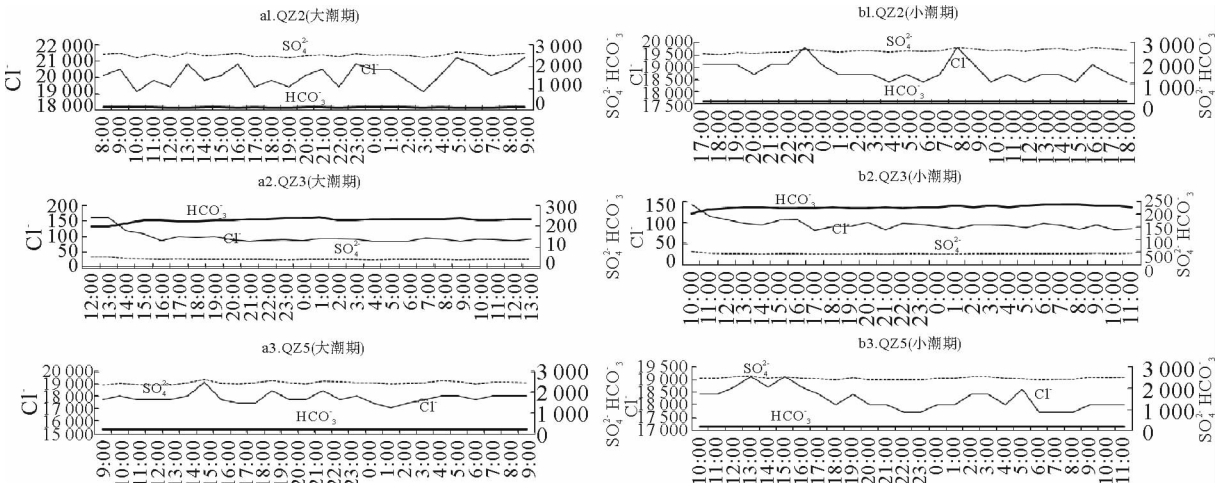


图 2 监测井地下水阴离子含量(mg/L)潮周期时序变化

Fig. 2 The variation of anions of groundwater monitoring wells in tide period

2.4.3 相对波动特征

由于各离子的含量及性质不同, 无量纲比较可在同一基础上了解它们之间的变化与联系(图 3)。可见, QZ2、QZ5 监测井的阳离子和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 阴离子相对波幅即标准化变量 s 同步甚至是几乎重合, 即它们的来源和活跃程度是一样的, HCO_3^- 变化过程与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 有所错位甚至反

相, 说明监测井 HCO_3^- 的陆源性。

地下水离子体系是相互关联的, 由于环境条件的变动和响应, 比例既保持一定的稳定性, 也有一定的变动性^[7,8]。如前所述, 绝对振幅以高含量离子 Na^+ 、 Cl^- 为最大, 但相对振幅则不同, 各测量时段 QZ2、QZ5 监测井的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 接近; QZ3 监测井 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相

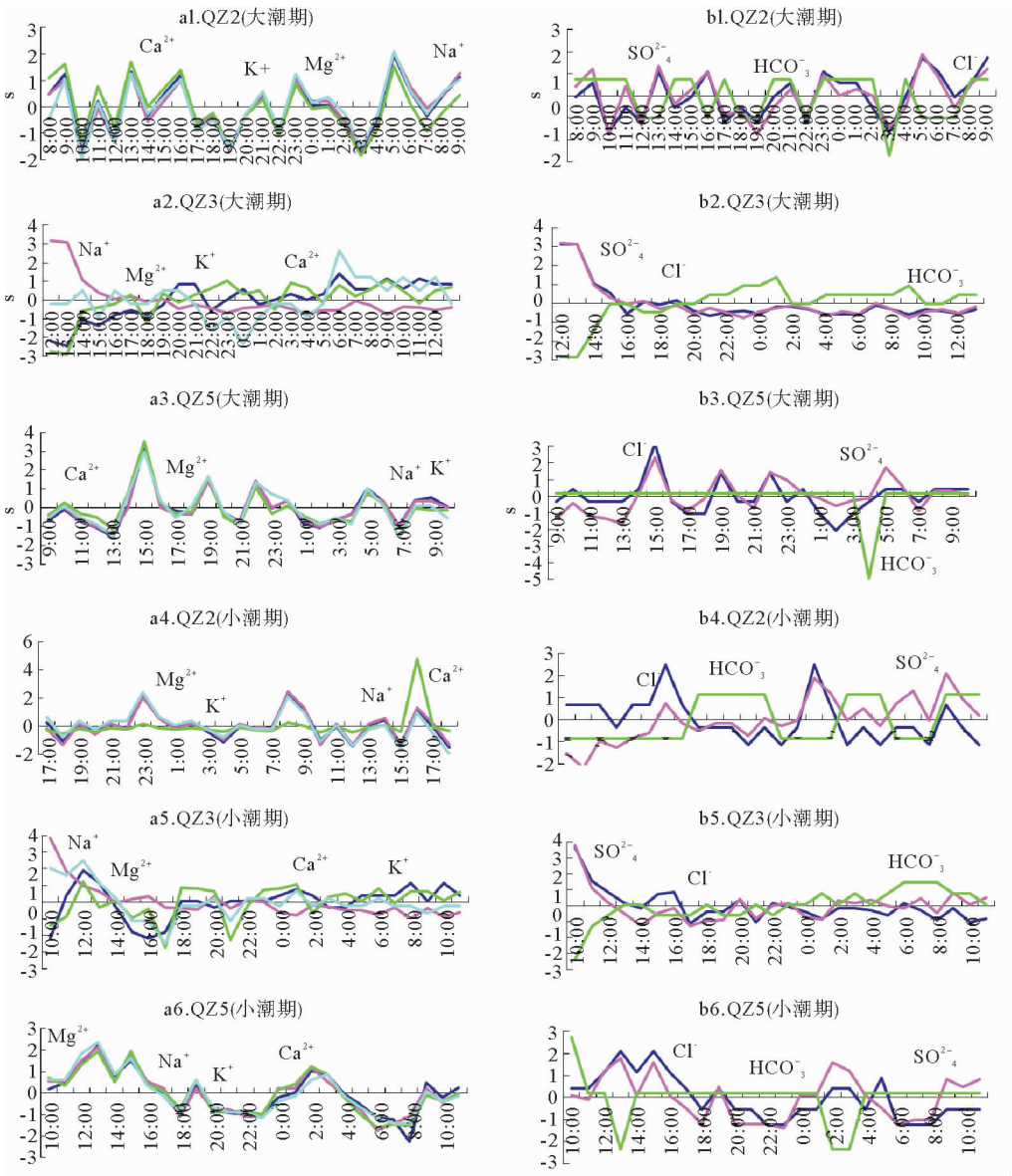


图 3 监测井地下水离子标准化变量 s 潮周期时序变化 (s 为地下水离子标准化变量)

Fig. 3 The time series change graph of the groundwater ion standardization variable s of monitoring wells in tide cycle

对振幅差异较为明显。

可溶性 SiO_2 相对振幅为 1.84%~18.57%，以 QZ2 监测井最高，TDS 为 1.42%~4.99% 之间，总硬度为 1.94%~5.96%，pH 为 0.15%~3.23%，电导率为 1.40%~4.96%，各相对振幅量级接近。

3 海水对滨海地下水入侵的生态效应

3.1 地下水水质恶化

海水入侵使得 Cl^- 、 Na^+ 以及其他海相离子

大量进入。地下水一般大气降水电导率在 2~100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间，河水在 50~100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，海水为 50 mS/cm，工业排放水为 5~15 mS/cm，卤水 100~250 mS/cm。QZ2、QZ5 监测井电导率平均在 56.2~62.0 mS/cm 之间，明显高于工业排放水，且随时间变化不大，说明其长时间维持在高值区，需要引起关注，加强对地下水的长期监测。

常用 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 来表示地下水组分来源判据。海水中的 Mg^{2+} 一般含量较高， $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 一般较大^[9]。QZ2、QZ5 监测井比值 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 均很高，介于 3.51~5.88，绝大多

数超过 4.90,明显有海相组分的侵入,QZ3 则很低,为 0.21~0.28。海水入侵导致发生阳离子的交换效应,尤其是 QZ2 监测井, $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 平均为 5.20~5.74,QZ5 监测井平均为 4.96~5.01,可见在其海水入侵路径上发生了较明显的 Na—Mg 交换。这种阳离子交换作用一方面使得含水介质吸附的海相离子富集,出现盐碱化,另一方面又使得大量 Mg^{2+} 被置换进入地下水,使得地下水硬度增高。

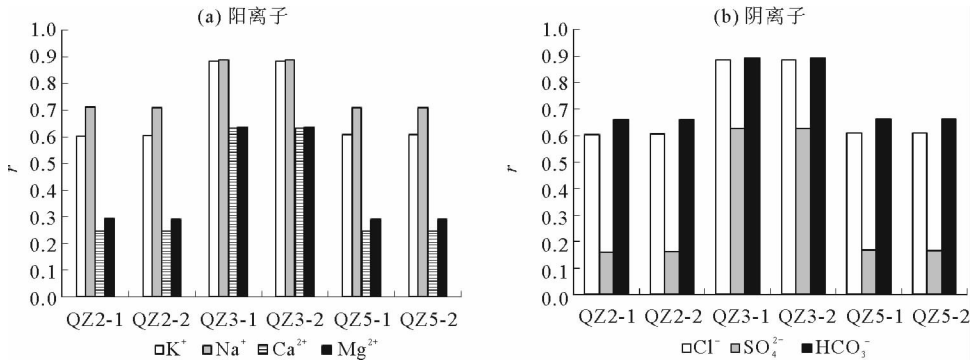


图 4 监测井地下水离子活度系数 *r* 潮周期平均值

Fig. 4 Tide periodic average value of groundwater ion activity coefficient *r* in monitoring wells

析显示 TDS 与电导率有密切关系,呈现显著线性相关,因此,对电导率的长期监测结果可很好地反映地下水 TDS 的水平。

海相离子输入使得离子含量升高,离子强度 *I* 也明显地增大(图 5),监测井总体离子强度 QZ2 与 QZ5 两者接近,QZ3 很低。QZ2 的 *I* 为 854.30~975.78 mmol/L,QZ5 监测井为 802.42~898.10 mmol/L,由于海水组分低,QZ3 监测井的 *I* 为 11.77~15.35 mmol/L,明显偏低很多。

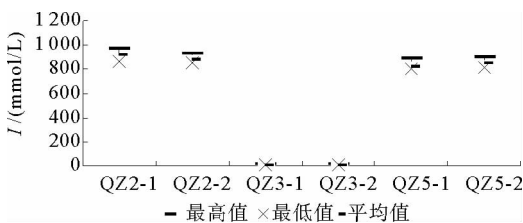


图 5 监测井地下水潮周期离子强度 *I* 值分布

Fig. 5 The value distribution of the periodic ion intensity *I* of groundwater monitoring wells

3.2 盐效应加强

地下水大量的离子加入使得地下水离子活度 *r* 降低,盐的溶解度加大。QZ2、QZ5 监测井地下水离子活度 *r* 为 0.25~0.71,QZ3 为 0.63~0.89 (图 4)。前面已经可见,溶解矿物种类以氯盐和硫酸盐为主,明显高于沉淀矿物,大部分饱和系数 *SI* 很低,未有达到溶解平衡,使得监测井总溶解固体 TDS 很高。作为水质的重要指标 TDS,分

3.3 咸化加剧

如前所述,监测井总溶解固体 TDS 含量较高,增加变化比较稳定,主要离子为 Cl^- 和 Na^+ ,不仅大幅度提高原有离子的含量,而且还有新的离子出现,例如卤素 Br^- 的出现,使得地下水总盐量同步增加。一般地下水可分为如下几类^[10,11]: ①淡水 <1 g/L;②微水咸 1~3 g/L 为;③咸水 3~10 g/L;④盐水 10~50 g/L;⑤卤水 >50 g/L。因此,海水入侵导致监测井 QZ2、QZ5 为盐水,但由于 QZ3 监测井受到的影响轻微,仍然保持淡水类型(表 4)。

表 4 监测井地下水潮周期内咸水类型
Table 4 Saline water type of groundwater monitoring wells in tide cycle

测量时段	监测井	咸水类型	测量时段	监测井	咸水类型
大潮期	QZ2	盐水	小潮期	QZ2	盐水
	QZ3	淡水		QZ3	淡水
	QZ5	盐水		QZ5	盐水

3.4 盐碱化

钠吸附比(SAR) Na^+ 是海水中首位的阳离子,其含量比淡水要高出 2~4 个数量级。受海水侵染的地下水及土壤中 Na^+ 含量升高,超过一定限度则会导致土壤次生碱化,这是重侵染区盐渍土形成过程之一。美国盐渍土实验室提出的 SAR 即是衡量灌溉水质的钠危害程度的一个水化学指标^[12-16],其表达式为:

$$\text{SAR} = \frac{r\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+})}}$$

式中:SAR 为钠吸附比,综合了主要阳离子 Na^+ 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的毫克当量比值,表示盐碱化程度或者盐碱化趋向;

r 为毫克当量,选用 /GH 为海水入侵判断指标之一,既可以使我们从咸淡水中主要阳离子比值角度判断海水侵染程度又可以从土壤环境化学方面考察海水侵染的影响。

计算结果显示,QZ2、QZ5 监测井 SAR 依次为 57.95~63.24、57.20~63.13,QZ3 监测井为 2.17~4.42,前两者明显要高很多。

根据一般滨海地区盐碱化风险程度划分标准,SAR<2 为轻微,2<SAR<4 为一般,4<SAR<10 为较高,SAR>10 为高。可见,QZ2、QZ5 监测井地下水盐碱化风险程度很高,QZ3 为一般(表 5)。

表 5 监测井地下水潮周期内盐碱化程度

Table 5 Degree of salinization of groundwater monitoring wells in tide cycle

测量时段	监测井	咸水类型	测量时段	监测井	咸水类型
	QZ2	高	小潮期	QZ2	高
大潮期	QZ3	一般		QZ3	一般
	QZ5	高		QZ5	高

4 结论

(1)大潮期离子含量明显高于小潮期,不同潮时含量不同,一般高潮高于低潮。由于所处环境的不同,QZ2 和 QZ5 监测井的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量相近,而 Mg^{2+} 的差异较明显,前者平均高出后

者 18.82%,表明 QZ2 监测井受到海水入侵,且入侵路径上的水-岩作用更为明显,颗粒介质发生了阳离子置换和含镁矿物溶解。

(2)在大、小潮期,可溶性 SiO_2 含量 QZ3 监测井均高于 QZ2 和 QZ5,后两者接近。QZ2、QZ5 监测井 TDS 均维持在极高水平,变化不大,相对来说,QZ3 变化较大;QZ2、QZ5 监测井硬度高且接近,而 QZ3 监测井为最低,与 TDS 相对应的;QZ2、QZ5 监测井的 pH 值与海水 pH 值几乎一致,尤其是 QZ2 监测井;QZ2、QZ5 监测井接近,QZ3 监测井明显要低很多。电导率和 TDS、总硬度是相互联系的,存在着对应关系。

(3)QZ2、QZ5 监测井阳离子以 Na^+ 、阴离子以 Cl^- 占优, Na^+ 所占平均比例为 83%~85%、显示出海水的影响, Cl^- 为 87%~88%;QZ3 监测井以 HCO_3^- 占优,比例为 62%~63%, Ca^{2+} 也占据较大优势,为淡水所控制。

(4)主要阳离子含量随时间而波动变化,QZ2、QZ5 监测井以 Na^+ 的绝对波幅最大,QZ3 监测井的 Na^+ 、 Ca^{2+} 两者相近。阴离子逐时变化也具有同样特征,以 Cl^- 绝对振幅最大, HCO_3^- 较为稳定。 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 极值出现时刻有对应性。QZ2 监测井 CO_3^{2-} 含量很低,QZ3、QZ5 监测井则都为 0。绝对振幅以高含量离子 Na^+ 、 Cl^- 为最大,但相对振幅则不同,各测量时段 QZ2、QZ5 监测井的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 接近;QZ3 监测井 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相对振幅差异较为明显。

(5)QZ2、QZ5 监测井比值 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 均很高,明显有海相组分的侵入,QZ3 则很低。QZ2 监测井,在其海水入侵路径上发生了较明显的 Na-Mg 交换。海水入侵导致监测井 QZ2、QZ5 为盐水,但由于 QZ3 监测井受到的影响轻微,仍然保持淡水类型。QZ2、QZ5 监测井 SAR 依次为 57.95~63.24、57.20~63.13,QZ3 监测井为 2.17~4.42,前两者明显要高很多。QZ2、QZ5 监测井地下水盐碱化风险程度很高,QZ3 为一般。

参考文献:

- [1] 晁会霞,韩孝辉,杨志华,等.对海南岛大地构造特征的新探索[J].地学前缘,2016,23(4):200-211.
- [2] 唐少霞,赵志忠,毕华,等.海南岛气候资源特征及其开

- 发利用[J]. 海南师范大学学报:自然科学版, 2008, 21(3): 343-346.
- [3] 周祖光. 海南岛地下水资源特征与开发利用[J]. 水资源保护, 2005, 21(3): 48-51.
- [4] 王道儒, 吴钟解, 陈春华, 等. 海南岛海草资源分布现状及存在威胁[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(1): 34-38.
- [5] 吴钟解, 吴 瑞, 王道儒, 等. 海南岛东、南部珊瑚礁生态健康状况初步分析[J]. 热带作物学报, 2011, 32(1): 122-130.
- [6] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15.
- [7] 黄向青, 林进清, 甘华阳, 等. 雷州半岛东岸地下水化学要素变化以及海水入侵特征[J]. 地下水, 2013, 35(3): 38-42.
- [8] 姚锦梅, 周 训, 谢朝海. 广西北海市海城区西段含水层海水入侵地球化学过程研究[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 136-144.
- [9] 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.
- [10] 孙振宇, 宋献方, 卜红梅, 等. 秦皇岛洋河-戴河流域浅层地下水咸化程度评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 356-361.
- [11] 陈 苑. 硃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.
- [12] 黄栋声, 何 军. 广西北海市滨海地带咸化地下水化学特征[J]. 低碳世界, 2016(36): 128-130.
- [13] 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.
- [14] 常艳娥, 黎广钊. 北海市海水养殖区海水入侵特征及对地下水的影 响——以南流江三角洲平原为例[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(18): 11057-11060.
- [15] 王 丹, 陶志刚, 李昌存. 唐山沿海海水入侵地下水水质评价[J]. 海洋地质前沿, 2006, 22(6): 10-14.
- [16] 赵 建. 海水入侵水化学指标及侵染程度评价研究[J]. 地理科学, 1998, 18(1): 16-24.

VARIATION IN CHEMICAL ELEMENTS OF GROUNDWATER ALONG THE SOUTH COAST OF HAINAN ISLAND AND SIGNIFICANCE TO SEAWATER INTRUSION

YUAN Xiaojie, HUANG Xiangqing, GAN Huayang, HUANG Lei

(Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China ;

Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China)

Abstract: The data of 2014 from monitoring wells in South Coast of Hainan Island was studied during the times of neap tide and spring tide. Variation in chemical elements of the groundwater is adopted for revealing its relation with seawater intrusion. Our results show that chemical element concentration varies with tidal cycles, location of wells and surrounding environment. In the wells of QZ2 and QZ5, the contents of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} are quite close, but Mg^{2+} is obviously different. In the well QZ2, it is 18.82% higher than that in well QZ5, suggesting that the well QZ2 is more severely affected by seawater. Na^+ and Cl^- are the dominant ions in both the wells of QZ2 and QZ5. The average ratio of Na^+ is 83%~85%, Cl^- is 87%~88%, showing effects of seawater. In the well QZ3, HCO_3^- is the dominant, the content is 62%~63%, and Ca^{2+} also occupies a large proportion, showing the predominance of fresh water. The SAR of QZ2 and QZ5 wells are 57.95~63.24 and 57.20~63.13 respectively. However, it is 2.17~4.42 in well QZ3, obviously lower than those in QZ2 and QZ5. As the conclusion, wells QZ2 and QZ5 have higher risk of salinization.

Key words: South Hainan Island; groundwater; chemical element; seawater intrusion