

# 海陆过渡界面浅层地下水可溶性 $\text{SiO}_2$ 的变化特征

——以雷州半岛和海南岛滨海地区为例

黄向青, 何海军, 甘华阳, 路剑飞, 潘毅

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

**摘要:** 硅为重要的地球化学元素, 滨海地区作为地下水海陆过渡带, 对地下水重要化学成分  $\text{SiO}_2$  的研究有助于进一步掌握海陆界面的水岩过程。在华南典型火山成因的雷州半岛和海南岛进行环岛浅层地下水连续取样和化学测试, 分析模拟了可溶性  $\text{SiO}_2$  的变化、组成以及溶解平衡。结果表明: 该地区地下水多为 Na—Cl 型, 偏碱性, 处于风化溶滤、蒸发浓缩状态或两者之间的过渡类型; 地下水中可溶性  $\text{SiO}_2$  含量为 2.80 ~ 106.0 mg/L, 各测井变化较大, 与周边环境条件有关, 源自矿物溶解、海水入侵及其路径上的水岩作用; 单个测井同一时段水样可溶性  $\text{SiO}_2$  含量呈波动变化, 不同时段也变化明显; 可溶性  $\text{SiO}_2$  以单分子正硅酸  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  占据绝对优势, 硅酸盐各类矿物呈现溶解、饱和、平衡的状态共存并且自身状态相互转化。总体来看, 研究区地下水的饱和和矿物种类比例偏高, 因此, 滨海地下水作为海陆过渡界面的高矿化度的开放体系, 盐效应有促进不同矿物溶解或者饱和的作用。概而言之, 上述可溶性  $\text{SiO}_2$  的水—岩过程受到多种因素影响, 需要进一步加强研究。

**关键词:** 滨海地区; 浅层地下水; 海水入侵; 可溶性二氧化硅;  $\text{SiO}_2$  变化特征

中图分类号: P342<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0062-06

## Variation characteristics of dissolved $\text{SiO}_2$ in sea-land transition interface of shallow groundwater: Taking Leizhou Peninsula and Hainan Island coastline as examples

HUANG Xiangqing, HE Haijun, GAN Huayang, LU Jianfei, PAN Yi

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

**Abstract:** Due to the importance of silicon as a geochemical element, in coastal zone which is the transition zone of groundwater in coastal area, the study of the important chemical composition of groundwater  $\text{SiO}_2$  helps to further grasp the lithosphere rock process of sea-land surface. The continuous sampling and chemical tested of shallow groundwater were conducted in the typical volcanic caused region of south china, i. e., along shoreline of Leizhou Peinsula and Hainan island. The change, composition and dissolving balance of dissolved  $\text{SiO}_2$  in shallow underground water were analyzed. The results revealed that, the types of underground water was primarily Na - Cl type, alkaline, either weathered and leached, evaporation concentration or transitional type between the two. Ranging from 2.8 to 106.0 mg/L with significant spatial and time variation for different test wells, the concentration of dissolved  $\text{SiO}_2$  was related to nearby environment and derived from mineral dissolution, seawater intrusion and water - rock activity effect. The concentration series of dissolved  $\text{SiO}_2$  varied even for the single test well at the same period, also changed significantly in the different periods.  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  was the absolutely dominant among three chemical species of dissolved  $\text{SiO}_2$ . Different silicate minerals had coexistence of dissolution, saturation and r balance states and mutually transformed between different states of themselves. Overall, the proportion of saturated mineral species in groundwater of the study area was high. Therefore, coastal groundwater as the sea - land transition interface on the open system of high salinity, salt had a promoting effect on dissolve or saturation of different minerals. In general, the water - rock process of soluble  $\text{SiO}_2$  was affected by many factors, needed further strengthen the research.

**Key words:** coastline area; shallow underground water; seawater intrusion; dissolved  $\text{SiO}_2$ ; characteristics

收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2017-01-10

基金项目: 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, 广东郁南人, 高级工程师, 从事地质环境研究。

of dissolved SiO<sub>2</sub> chang

硅是重要的生物地球化学元素与造岩成分,其迁移、分布与变化是基本的研究内容,虽然二氧化硅的溶解度一般较低,但含硅矿物积极参与了地下水水-岩过程。国外对包括海岸带地区包括 Si 元素的地下水化学过程分析和模拟予以了重视<sup>[1-2]</sup>。目前已有对雷州半岛、海南岛河流、流域地下水的 SiO<sub>2</sub> 的研究,对局部陆海断面进行了地下水水文地球化学演化模拟<sup>[3-5]</sup>,但对其海陆过渡界面滨海地区的地下水中 SiO<sub>2</sub> 的综合分析模拟较少。

雷州半岛与海南岛均为华南典型的火山岛,铝硅酸盐岩类或铝硅酸盐碎屑岩类广布,沿海为滨海平原、火山台地、山地以及丘陵残积,广大陆区的地下水为酸性、以重碳酸盐为主的淡水。在华南西部近岸所取钻孔除了十余米上部为全新统浅海沉积物之外,之下更新统为陆相沉积物<sup>[6]</sup>,研究区域钻孔

含硅碎屑矿物和沉积物组分分布见图 1。由图 1 可见,碎屑颗粒以石英(二氧化硅)和硅酸盐长石含量占据绝对优势,ZK4 和 ZK8 钻孔石英平均含量分别为 87.5% 和 85.3%、长石含量分别为 4.43%、4.49%。还含有黑云母、白云母、电气石、角闪石等其它种类的硅酸盐矿物(图 1(a)、1(b))。丰富的含硅碎屑颗粒是可溶性二氧化硅的基本来源,围岩多以砂、粉砂组分为主,两者为 44%~81%,但黏土也具有一定含量,在某些层位占据优势,最高达 74%,三者含量高低相间,某些沉积层位有砾石杂夹(图 1(c)、1(d))。砂的主要成分为石英,常为胶结状或团块,偶见风化泥岩,二十余米也见有侏罗系基地,呈全风化状。总体来说以第四纪湛江组为主,岩性变化较大,孔隙比平均为 0.35~0.60,较为松散,有利于地下水的交换与渗透。

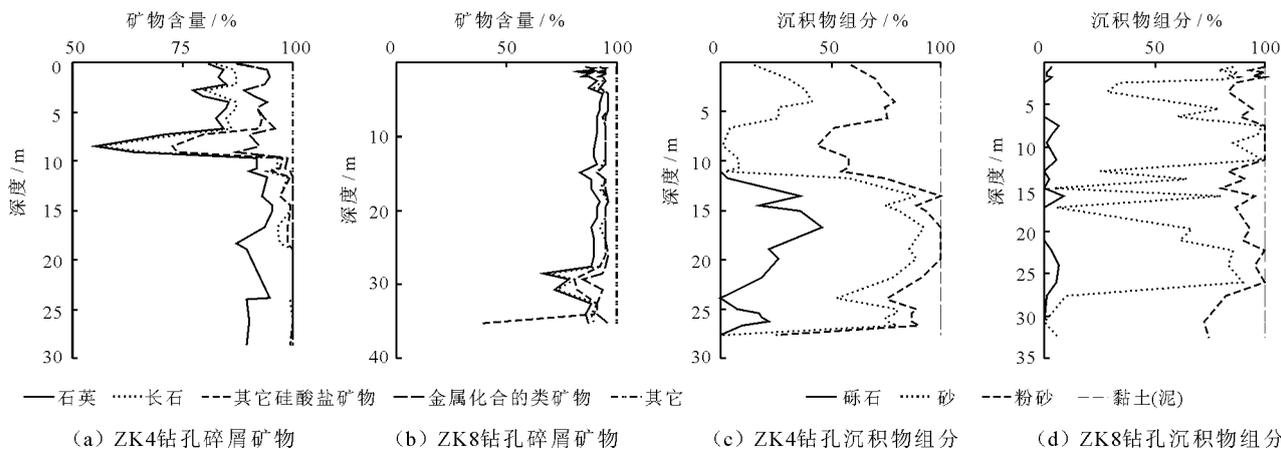


图 1 区域钻孔含硅碎屑矿物和沉积物组分累计分布

## 1 取样及其实验测试

该区浅层地下水主要接受大气降雨、地表水渗入,以蒸发蒸腾、越流、人工开采方式排泄,滨海地区还有向海排出的途径。浅层水一般 50m 以浅,包括潜水、微承压水和中层承压水,中砂、细砂、粗砂、砾砂以及粘土混杂或者相间,透水性较好。雷州半岛的井位于东岸的新寮、南渡河口、东海岛东北端,而海南岛的则呈环岛分布,顺时针依次为海口、文昌、万宁、陵水、三亚、水东、东方、昌化、儋州、澄迈。取样位置位于高高潮线以上,均为在大、小潮期各选择一天进行 26 h 连续取样,取样间隔为 1 h(表 1),共取得 26 × 2 组/井样品,现场进行水温测量,平均取样深度 20 m。完成时段 2012-2015 年,每年 6-8 月相同时段逐区完成测井取样。样品实验测试依据为 DZ/T 0064-93,

SiO<sub>2</sub> 采用硅钼蓝法,同步进行主要离子 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、TDS(溶解性固体总量)、硬度、总碱度、pH 等的实验室测试,pH 和水温在现场使用仪器仪表测量<sup>[7-8]</sup>。实验测试质量控制方法依照 DZ/T 0130.6-2006 执行<sup>[8]</sup>,准确度控制、加标回收测定合格率均为 100%,精密度控制抽取的样品重复分析结果的相对偏差范围合格率为 100%。

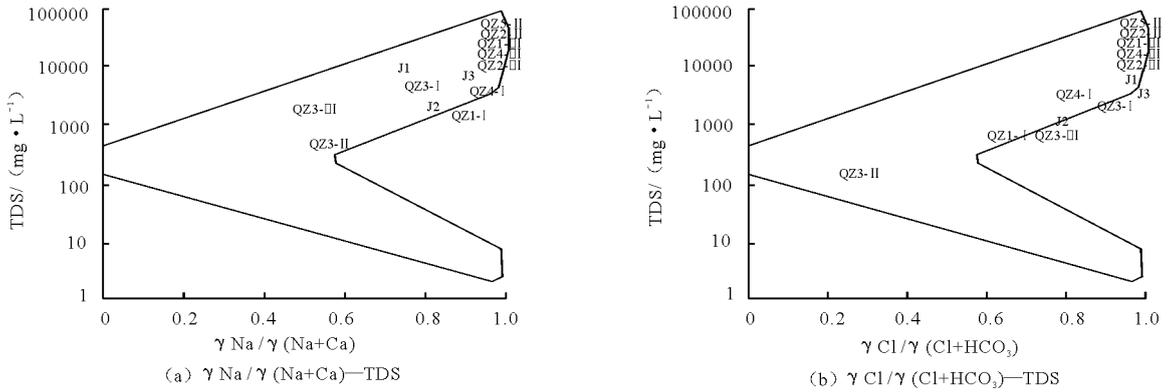
## 2 研究结果

### 2.1 测井地下水的水-岩作用特征

2.1.1 水-岩作用特征 采用 Gibbs 关系图来反映水-岩作用特征<sup>[9-10]</sup>。可见散点分布不同,表明有较大的水岩作用差异。 $\gamma_{Na}/\gamma_{(Na+Ca)}$ —TDS 散点分布反映出测井分布于风化-溶滤和蒸发-浓

缩区间,区间端点分别是南部 QZ3 和右顶端集聚区即南部 QZ5、QZ2 和西北部的 QZ1、QZ2、QZ4,共有 3 种类型:(1)前者为风化—溶滤类型,主要受到水化学作用,岩盐贡献较大且略有蒸发趋向;(2)后者为蒸发—浓缩类型,主要受蒸发浓缩影响;(3)两者之间为雷州半岛 J1、J2、J3 和海南岛东北部的 QZ3、

QZ4 和西北部 QZ3 测井,为处于风化—溶滤走向蒸发—浓缩的过渡类型,尤以 J1、J3 测井最为明显,表明受到水化学和蒸发浓缩的共同作用(图 2a)。由于在该过渡区 J1 和西北部 QZ3 又要偏上一些,表明其趋向又更为明显, $\gamma_{\text{Cl}}/\gamma_{\text{(Cl+HCO}_3)}$ —TDS 基本反映出同样特征(图 2b)。



注: I 表示东北部; II 表示南部; III 表示西北部

图 2 测井地下水的 Gibbs 水—岩作用类型(图(a)、(b)纵坐标为对数坐标)

2.1.2 蒸发—浓缩水岩作用类型成因探讨 主要阳离子 Na、Mg、K、Ca 等具有较好的正相关性,其变化序列具有波动性、周期性、同步性,且波动相对振幅接近,与海水进退关系密切,为海水对浅层地下水的侵入所致,而岩石地球化学成因为次。钻井深度平均为 40 m,可能有掩埋于深层的承压古海水释放,但这种情况应属少有。综合测井地下水类型可见,多为碱性偏碱性,个别为淡水,多为微咸水—盐水类型,矿化度高,处于自然风化溶滤的只是个别测井,多为蒸发—浓缩型或者过渡型(见表 1)。表明以上滨海地区地下水具有海陆过渡带或者混合带的特征。

2.1.3 可溶性  $\text{SiO}_2$  与 pH 的相关性 由于受到多种因素影响,可溶性  $\text{SiO}_2$  含量又总体偏低,部分测井与 pH 很弱,相关系数绝对值低,但部分测井关系明确。雷州半岛东部 J3 井、海南岛东北部 QZ3 井和 QZ4 井、南部 QZ5 井为显著负相关,相关系数为  $-0.83 \sim -0.89$ ,说明偏酸条件有助于硅酸盐的溶解,以自身 pH 调控为主;东北部 QZ1 井、南部 QZ2 井出现显著正相关,相关系数  $0.59 \sim 0.94$ ,说明以海水入侵影响为主。

## 2.2 测井可溶性 $\text{SiO}_2$ 含量和变化

2.2.1 含量统计 受周边围岩水文地质环境条件影响,测井可溶性  $\text{SiO}_2$  含量变化较大。总体来说,雷州半岛各测井可溶性  $\text{SiO}_2$  含量居中,海南东北岸和南岸最低,西北岸最高,平均依次为  $25.2 \text{ mg/L}$ 、 $11.57 \sim 16.3 \text{ mg/L}$ 、 $33.1 \text{ mg/L}$ ;雷州半岛测井含量

范围在  $8.3 \sim 34.9 \text{ mg/L}$  之间,海南岛东北岸为  $8.9 \sim 30.0 \text{ mg/L}$ ,南岸为  $2.8 \sim 22.3 \text{ mg/L}$ ,西北岸为  $5.2 \sim 106.0 \text{ mg/L}$ ,在西北岸 QZ3 的微咸水类型测井出现丰富的可溶性  $\text{SiO}_2$ ,应与围岩含有丰富硅酸盐有关,且数据进一步显示该井游离  $\text{CO}_2$  很高, pH 值平均 7.00 偏酸性,促成矿物溶解度加大<sup>[11-12]</sup>。统计上含量中值与平均值差异不大,显示数据具有稳定性和代表性(见表 2)。

2.2.2 逐时变化 每隔 1h 的可溶性  $\text{SiO}_2$  含量变化序列显示具有波动性,存在个别异常峰值,可能受到局部因素影响,但不影响总体趋势。波动变化的方式有:①几乎上下波动,线性趋势线斜率很低,趋向不明,有雷州半岛东岸的 J2、J3 测井(图 3(a))和海南岛东北岸 QZ3、南岸 QZ5、西北岸 QZ1 测井(图 3(a)~3(d));②同趋向性波动即两个时段变化趋向相同,有海南岛南岸的 QZ2、QZ3 和西北岸的 QZ2(图 3(c)、3(d));③反趋向性波动方式即两个时段变化趋向相反,有海南岛东北岸 QZ4 和西北岸 QZ3(图 3(b)、3(d))。趋向明显的这两种波动方式之中,部分出现良好的线性趋向,有海南岛东北岸 QZ1 和南岸 QZ3 井,其线性拟合  $R^2 > 0.6000$ 。如上所述,西北岸 QZ3 测井可溶性  $\text{SiO}_2$  含量很高,变化曲线明显独立于其它测井(图 3(d))。

2.2.3 逐段变化 以上测量时段内可溶性  $\text{SiO}_2$  的相对变幅为  $6.02\% \sim 10.10\%$ ,但前后两个测量时段之间同样存在变化。雷州半岛测井时段相对变幅为  $-6.67\% \sim -3.27\%$ ,海南岛东北部测井为

-11.01% ~ -2.83%, 两者较为相近, 表现略微稳定一些; 海南岛南部和西北部测井多数变化明显, 最大降幅为 -183.20%, 最大升幅为 46.70%, 但也有几乎不变的测井, 例如南部的 QZ3 淡水类测井, 变化幅度仅为 1.40%。总体来看, 微咸水以下类型测井的 SiO<sub>2</sub> 含量变幅较小, 尤其是淡水井, 这是由于陆相地下水的可溶性 SiO<sub>2</sub> 基本达到了平衡, 受外界影响不大, 具有一定的封闭性, 而盐水类测井受到海水周期进退的影响甚大<sup>[13]</sup>。

2.2.4 可溶性 SiO<sub>2</sub> 高含量现象的探讨 以上可见

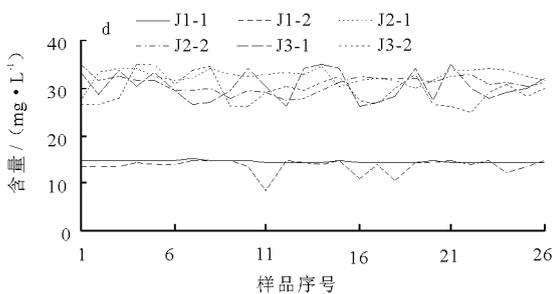
表 1 测井地下水类型

统计项目	雷州半岛						海南岛						
	东部			东北部			南部			西北部			
	J1	J2	J3	QZ1	QZ3	QZ4	QZ2	QZ3	QZ5	QZ1	QZ2	QZ3	QZ4
矿化度	咸水	微咸	咸水	微咸	咸水	咸水	盐水	淡水	盐水	盐水	盐水	微咸	盐水
水岩作用	过渡	过渡	过渡	过渡	过渡	过渡	蒸浓	风溶	蒸浓	蒸浓	蒸浓	过渡	蒸浓
主要组分	Na - Cl												
酸碱性	碱性	碱性	酸性	碱性									

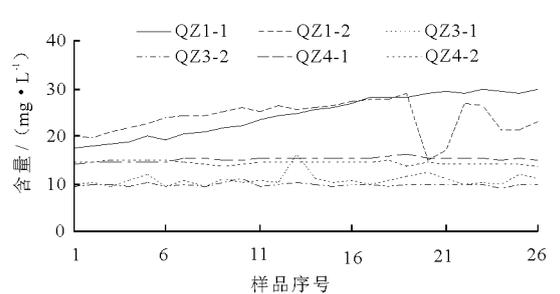
表 2 测井地下水可溶性 SiO<sub>2</sub> 含量统计

mg/L

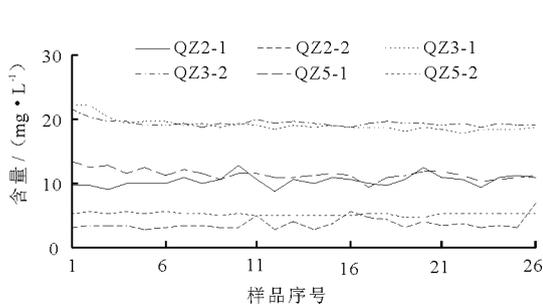
统计项目	雷州半岛						海南岛						
	东部			东北部			南部			西北部			
	J1	J2	J3	QZ1	QZ3	QZ4	QZ2	QZ3	QZ5	QZ1	QZ2	QZ3	QZ4
矿化度	咸水	微咸	咸水	微咸	咸水	咸水	盐水	淡水	盐水	盐水	盐水	微咸	盐水
最低	8.3	27.2	24.8	15.0	8.9	13.6	2.8	17.9	4.7	5.2	9.5	87.2	8.3
最高	15.3	34.9	34.7	30.0	16.2	16.0	12.8	22.3	13.5	9.6	24.1	106.0	22.0
平均	14.1	31.6	30.0	24.2	10.2	14.7	7.1	19.3	8.3	7.3	16.3	95.4	13.4
中值	14.4	31.8	29.6	24.8	9.9	14.6	7.8	19.2	7.6	7.5	16.4	95.2	14.3



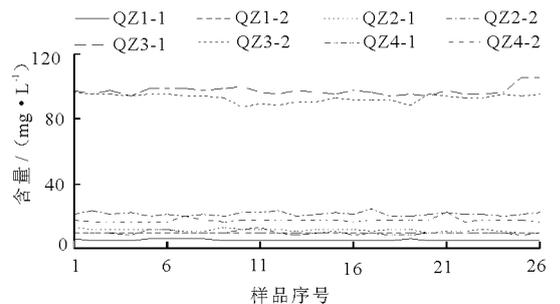
(a) 雷州半岛东部



(b) 海南岛东北部



(c) 海南岛南部



(d) 海南岛西北部

图 3 测井地下水可溶性 SiO<sub>2</sub> 含量序列变化 (J1 - 1 表示 J1 测井第 1 测量时段, 其余相同)

海南岛西北部 QZ3 井的可溶性 SiO<sub>2</sub> 极其丰富, 含量特高, 最高达到 106.0mg/L, 平均为 95.4mg/L, 远高于一般地表水、地下水背景值<sup>[14-15]</sup>。同时表明受到淡水控制, 只受到一定程度的海水影响, 以风化溶滤为主, pH 为 6.6 ~ 7.4 为中性略偏酸, 游离 CO<sub>2</sub> 活跃, 平均为 14.6 mg/L, 含量高于大部分测井, 来自大气交换或者微生物活动, 钙离子、镁离子含量较高, 占阳离子的 36.4% ~ 48.0% (见表 3), 也表明周边沉积物可能含有丰富的黏土矿物, 各化学组分比值显示, 该井为富含硅酸盐、碳酸盐围岩环境。

表3 测井地下水化学组分比值

化学组分比	其它测井		西北部 QZ3 测井	
	范围	平均	比值	特征
$\gamma(\text{Ca} + \text{Mg}) / (\gamma(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3))$	0.39 ~ 0.70	0.57	1.26	富硅酸盐
$(\gamma\text{Na} / \gamma\text{Ca}) / (\gamma\text{Mg} / \gamma\text{Ca})$	0.65 ~ 1.50	0.94	0.23	富白云石
$\gamma(\text{SO}_4 + \text{Cl}) / \gamma\text{HCO}_3$	0.03 ~ 2.70	0.55	0.07	富碳酸盐
$\gamma(\text{Na} + \text{K}) / \gamma\text{Cl}$	0.70 ~ 1.57	1.02	0.42	贫岩盐

### 2.3 测井地下水可溶性 $\text{SiO}_2$ 的组分

2.3.1 化学组分 利用 PHREEQC 模拟得到可溶性  $\text{SiO}_2$  组分(化学物种)有  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ 、 $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ 、 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  3种。正硅酸  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  其比例为 94.54% ~ 99.09% 占据了绝对优势。上面以说明各测井为偏碱性或者碱性,强碱性未有出现,不具备出现偏硅酸的环境条件<sup>[16]</sup>。余下有微量的  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ , 比例在 0.58% ~ 5.46% 之间,  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  极其低微几乎为 0。 $\text{H}_4\text{SiO}_4$  与可溶性  $\text{SiO}_2$  含量关系密切,相关系数为 0.76 ~ 0.99,经检验为显著正相关,几乎联动变化。

2.3.2 组分活性 绝大部分  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  的活性(对数表示)介于 -3.97 ~ -3.25,唯有西北部的微咸水类测井 QZ3 井偏高几乎一个量级,为 -2.79。差值为正值,介于 0.001 ~ 0.070 之间; $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  活性为 -6.20 ~ -4.81,均为负值,为 -0.13 ~ -0.05。 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  活性为 -11.74 ~ -9.26,差值为负值 -0.55 ~ -0.18。以上表明电中性单分子  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  的活性在风化浓缩类测井会略高,而带电的  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ 、 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  两者则在以 TDS 衡量的高离子浓度、高矿化度之下活性降低。

### 2.4 硅酸盐矿物的溶解平衡

2.4.1 饱和系数 SI 地下水矿物处于溶解和饱和之动态过程之中<sup>[17]</sup>。上述模拟结果还显示硅酸盐矿物共有 6 种,即玉髓(Chalcedony)、石棉(Chrysotile)、石英(Quartz)、海泡石(Sepiolite)、海泡石(d)(Sepiolite(d))和滑石(Talc),饱和系数 SI 介于 -22.00 ~ 10.80 之间,即在溶解和饱和之间变化。玉髓、石棉、海泡石三者溶解、饱和均有存在,石英几乎都为饱和,而除了海南岛南部 QZ5 井,海泡石(d)均为溶解。雷州半岛的 J3 测井由于酸性较高,Talc 为溶解,其它均为饱和(见表 4);进一步还显示,盐水类型测井玉髓的 SI 负值较大,例如海南岛南部的 QZ2、QZ5 测井达到 -0.35 和 -0.44,有促进其溶解的趋向,而石棉、海泡石、滑石的 SI 正值偏大,有促进其饱和饱和的趋向,同时石英 SI 偏低,有促进其溶解的趋向,海泡石(d)亦为如此,可见高盐度或者高矿化度也具有饱或者溶解效应(见表 4)。

2.4.2 溶解平衡比例 各状态矿物种类比例表明,以高饱和和比例者最多,有雷州半岛 J2 测井和海南岛东北部所有测井、西北部 QZ2 至 QZ4 测井,饱和比例为 0.62 ~ 0.83;溶解和饱和相近的有雷州半岛 J3 测井以及海南岛南部的 QZ2、QZ3 和西北部的 QZ1 测井;最少为高溶解比例者,仅有雷州半岛东部的 J1 井和海南岛南部的 QZ5 井,溶解比例最高达 0.83;个别测井达到暂时溶解平衡,其概率为 0.01(见表 5)。表明受到海水入侵影响,微咸水—盐水类型测井增加了饱和矿物之种类,而淡水类型例如海南岛南部的 QZ3 测井,则基本相近。

表4 测井地下水硅酸盐矿物 log SI 范围

区域	分区	测井	类型	玉髓	石棉	石英	海泡石	海泡石(d)	滑石
雷州半岛	东部	J1	咸水	-0.08	-0.35	0.32	-0.61	-3.54	3.21
		J2	微咸	0.26	0.67	0.66	0.62	-2.30	4.90
		J3	咸水	0.25	-6.69	0.65	-4.30	-7.22	-2.48
	东北部	QZ1	微咸	0.11	0.21	0.51	0.01	-2.97	4.18
		QZ3	咸水	-0.28	3.34	0.11	1.39	-1.62	6.53
海南岛	东北部	QZ4	咸水	-0.08	1.01	0.32	0.24	-2.73	4.58
		QZ2	盐水	-0.35	3.06	0.05	1.16	-1.78	6.09
		QZ3	淡水	0.01	-1.70	0.40	-1.45	-4.44	2.07
	南部	QZ5	盐水	-0.44	-0.15	-0.04	-1.11	-4.06	2.71
		QZ1	盐水	-0.33	2.91	0.07	1.06	-1.92	6.01
		QZ2	盐水	0.06	3.36	0.46	2.04	-0.93	7.22
		QZ3	微咸	0.70	1.08	1.10	1.54	-1.46	6.24
西北部	QZ4	盐水	-0.12	4.48	0.27	2.41	-0.59	8.00	

表 5 测井地下水硅酸盐矿物溶解平衡相态平均比例

相态	雷州半岛						海南岛						
	东部			东北部			南部			西北部			
	J1	J2	J3	QZ1	QZ3	QZ4	QZ2	QZ3	QZ5	QZ1	QZ2	QZ3	QZ4
矿化度	咸水	微咸	咸水	微咸	咸水	咸水	盐水	淡水	盐水	盐水	盐水	微咸	盐水
溶解	0.65	0.17	0.49	0.26	0.33	0.37	0.40	0.51	0.83	0.40	0.20	0.17	0.23
饱和	0.35	0.83	0.50	0.73	0.66	0.62	0.59	0.44	0.16	0.59	0.80	0.83	0.73
平衡	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04

### 3 结 论

(1) 区域硅酸盐岩类发育, 元素和矿物以二氧化硅和石英为主, 成为地下水可溶性二氧化硅物质基础, 地层常有砂砾, 较为松散, 有利于地下水交换。地下水水岩作用类型有风化—溶滤、蒸发浓缩以及两者之间过渡类型, 从阳离子的正相关性和同步性来看, 为海水对浅层地下水的侵入所致, 该滨海地区地下水具有海陆过渡带的特征。

(2) 可溶性 SiO<sub>2</sub> 与 pH 的关系有弱、负相关和正相关, 在测量时段内具有波动性, 不同时段之间具有差异性。虽然其含量总体偏低, 但个别测井含量特高。含量的变化、类型的不同以及关系的多样化均与周边环境条件有关。

(3) 模拟分析显示: 可溶性 SiO<sub>2</sub> 组分(化学物种)有 H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>、H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 3 种, 以前者占绝对优势, 单分子 H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> 的活性在海水影响下基本不变, 而带电的 H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 两者则活性降低; 硅酸盐矿物共有 6 种, 饱和系数 SI 介于 -22.00 ~ 10.80 之间, 处于溶解、饱和不同状态。以高饱和比例者最多, 高溶解比例较低, 达到平衡者比例很低, 也很短暂。作为重要的成岩元素和地下水组分, 海水影响下的滨海地下水可溶性 SiO<sub>2</sub> 的行为、分布、变化等需要予以更多关注。

### 参考文献:

- [1] Askri B. Hydrochemical processes regulating groundwater quality in the coastal plain of Al Musanaah, Sultanate of Oman[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 106: 87-98.
- [2] Telfeyan K, Johannesson K H, Mohajerin T J, et al. Vanadium geochemistry along groundwater flow paths in contrasting aquifers of the United States: Carrizo Sand (Texas) and Oasis Valley (Nevada) aquifers[J]. Chemical Geology, 2015, 410: 63-78.
- [3] 韩绘芳, 蒋方媛, 王 谊. 海水入侵影响下的地下水化学演化及其指示意义——以深圳市宝安区为例[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(4): 1-5.
- [4] 滕彦国, 左 锐, 王金生, 等. 区域地下水演化的地球化学研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 127-136.
- [5] 张文杰, 谭红兵, 陈 喜, 等. 广东碛洲岛地下水化学演化及成因机理[J]. 水文, 2012, 32(3): 51-59.
- [6] 广州海洋地质调查局. 北部湾广西近岸海洋地质环境与地质灾害调查报告[R]. 广州: 海洋环境地质与工程地质调查所, 2013.
- [7] 广州海洋地质调查局. 雷州半岛东部滨海湿地地质调查与生态环境评价报告[R]. 广州: 海洋环境地质与工程地质调查所, 2013.
- [8] 广州海洋地质调查局. 海南岛西北部滨海湿地地质调查与生态环境评价报告[R]. 广州: 海洋环境地质与工程地质调查所, 2014-2016.
- [9] 孙 逊, 高志华, 李路华. 二氧化硅和锶的地球化学迁移影响因素研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3346-3347.
- [10] 柳富田, 方 成, 秦雅飞, 等. 曹妃甸地区地下水水化学形成作用分析[J]. 地质调查与研究, 2011, 34(3): 220-227.
- [11] 周 训, 张 华, 赵 亮, 等. 浅析广西北海市偏酸地下水的形成原因[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 850-856.
- [12] 张 华, 周 训, 沈 晔, 等. 广西北海市地下水系统水化学特征的分析[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 613-618.
- [13] 黄向青, 甘华阳, 路剑飞, 等. 雷州湾东海岛滨岸地下水水化学要素变化特征与水质现状[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 59-65.
- [14] 常春荣, 朱治强. 海南省主要河流及地下水硅含量的分布规律[J]. 华南农业大学学报, 2006, 12(4): 6-10.
- [15] 刘庆宣, 王贵玲, 张发旺. 地下水中微量组分 H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 富集的地质地球化学环境[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 575-578.
- [16] 李 霄, 林学钰, 都基众, 等. 齐齐哈尔市潜水水化学演化规律分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 814-826.
- [17] 陈 盟, 吴 勇, 高东东, 等. 广汉市平原区浅层地下水水化学演化及其控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(3): 831-841.