

深圳沿海带浅层地下水的稳定同位素与地球化学

杨巧凤¹, 李文鹏², 王瑞久²

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 在深圳沿海带取 64 件浅层地下水样品, 作常规离子水化学和氢氧稳定同位素测试, 来识别深圳沿海带海水入侵程度。采用主要离子比值 $-Cl^-/Br^-/Cl^-$ 比值和 piper 三线图等水文地球化学方法以及氢氧稳定同位素 $\delta D - \delta^{18}O$ 、 $\delta^{18}O - Cl^-$ 结合分析水样数据。分析发现 $Cl^- < 300mg/L$ 的样品均来源于降水入渗补给, 没有海水混入; $300mg/L < Cl^- < 885mg/L$ 之间无样品; $Cl^- > 885mg/L$ 的 12 件样品均有海水混合, 系降水(淡水)和海水的混合水。

关键词: 浅层地下水; 稳定同位素; 地球化学; 海水入侵

中图分类号: P736.4; P592

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)05-0026-07

为了查明深圳沿海地带地下水咸化以及海水入侵的发生过程, 研究海水入侵对海岸带城市发展的影响, 提出了“深圳市海水入侵地质灾害调查与防治对策研究”项目。本文重点研究海岸带地下水开采、海水养殖和填海工程对地下水水质的影响以及地下水受海水混合的情形。综合多种分析方法鉴定地下水样品中的海水成分。

1 研究区概况

深圳市地处广东省南部, 东临大亚湾和大鹏湾, 西濒珠江口和伶仃洋, 北部与内陆相连, 南部除罗湖口岸至沙头角一带和香港以深圳河相隔, 其余均为临海海岸带, 海岸线总长约 300km。全区断裂构造较发育, 山体坡度较陡, 切割强烈, 地表水系较为发育, 大小河流共 160 余条。东部地区以低山丘陵为主。西部地区总体地势较平坦, 是各种工业以及人类居住的重要场所。研究区主要含水层是以冲洪积层为主的松散岩类孔隙含水层, 主要岩性为卵石、细砂、粉细砂。地下水埋深较浅, 随地形变化, 一般 1.5 ~ 4.5m。从区域上看, 孔隙含水层受基岩分割呈支离破碎分布, 补径排状态相互独立。西部海岸带因城市建设而大范围人工填海, 形成了一种新的水文地质单元, 在封存海水的上方回填堆积土石而形成孔隙含水层。

2 样品数据

2008 年 8 月在深圳市沿海带共取 64 件浅层地下水样, 井深 0.84 ~ 8.67m, 样品的位置分布见图 1。野外现场取样测井深、水温、pH 值和电导率, 样品室内检测水化学常规离子由深圳市勘察测绘院有限公司完成, 所有水样水化学分析包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 和 Br^- , 限于篇幅, 仅列部分水样 13 件 ($Cl^- > 885mg/L$ 的共 12 件海水混合样, 以及样品 369 号, 该淡水样具明显同位素蒸发效应, 视为参照点) 分析数据如表 1 所示。水样的稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 值, 由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室分析测定。

3 数据分析与讨论

为了便于在图上作对比分析, 本文以 Cl^- 浓度为计量, 将不同浓度的水样分为三组:

A 组: $Cl^- < 100mg/L$ 的样品, 共 40 件;

B 组: $100 < Cl^- < 1000mg/L$ 的样品, 共 13 件;

C 组: $Cl^- > 1000mg/L$ 的样品, 共 11 件。

图 2 表示六种离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 的比值(以 mg/L 值计)与 Cl^- 的关系, 采用双对数坐标表示。图中的横线表示相应离子理论上的海水稀释线(seawater dilution line), 线上的离子/ Cl^- 比值等于海水比值(marine ratio), 所以又称海水比值线^[2-3]; 图 3 表示稳定同位素 $\delta D - \delta^{18}O$ 的关系, 图中的斜线表示全球大气水线 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$; 图 4 是 $\delta^{18}O - Cl^-$ 关系; 图 5 是卤族元素 $Br - Cl$ 关系, 图中三条斜线从上到下分别表示 Br/Cl 比值为 1×10^{-3} 、 3.47×10^{-3} 和 1×10^{-2} , 其中 $Br/Cl = 3.47 \times 10^{-3}$ 表示海水稀释线,

收稿日期: 2009-08-17; 修订日期: 2010-03-31

作者简介: 杨巧凤(1984-), 女, 硕士, 主要从事水文地球化学和同位素方面研究。

E-mail: yqf8323522@126.com

$\text{Br}/\text{Cl} = 1 \times 10^{-3}$ 表示石盐溶解线, $\text{Br}/\text{Cl} = 1 \times 10^{-2}$ 代表了有机物污染(例如牲畜污物)的高值;图 6 是 piper 三线图。

本文图中 A、B、C 三组样点分别用 $\circ$ 、 Δ 、 $\bullet$ 表示,其中图 2 仅在图 2a 上标出了 C 组样点的点号,图 3、

图 4、图 5、图 6 中也只标出 C 组样点的点号。另外,在 B 组样品中,365 号样点 Cl^- 浓度为 885.89mg/L,其余均小于 300mg/L,中间明显出现一段样点空白,所以图上加注 365 号以做详细分析。

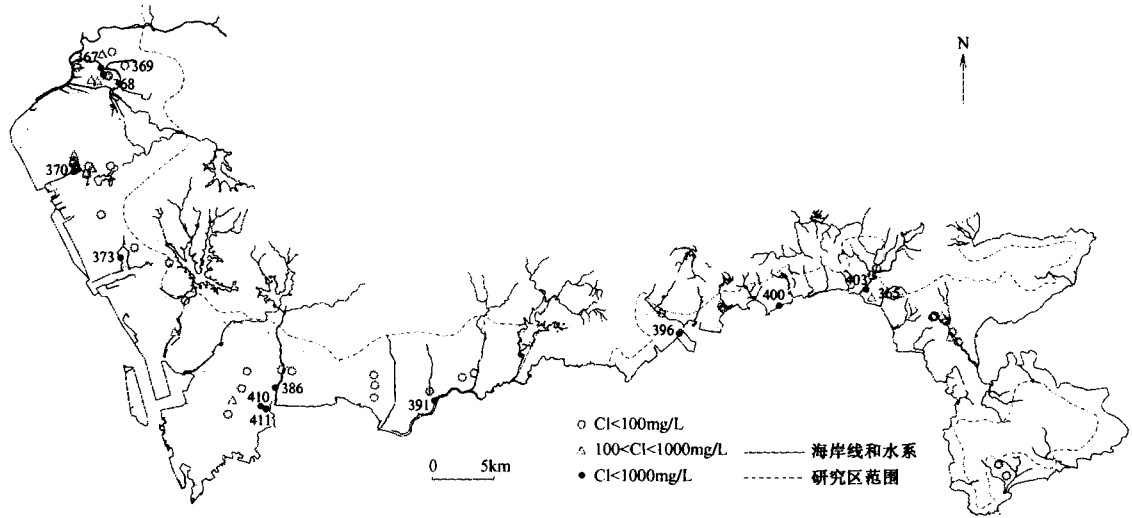


图 1 取样点位置分布图

Fig. 1 Location of samples

表 1 部分取样点水化学和稳定同位素数据

Table 1 Hydrochemistry and stable isotopes data of samples

序号	深度 (m)	主要离子浓度 (mg/L)									δD ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰
		Ca	Mg	Na	K	SO_4	HCO_3^-	CO_3	Cl	Br		
369	1.92	15.37	1.55	30.50	4.90	10.00	55.31	0.00	39.72	0.20	-5	-1.1
365		34.46	62.75	142.60	19.50	100.00	41.85	0.00	885.89	3.00	-17	-3
396	4.28	102.50	111.97	1 120.00	26.00	150.00	122.48	0.00	1 787.47		-40	-7.5
411	2.3	287.44	19.09	1 660.00	100.00	60.00	102.71	0.00	2 206.33	8.00	-31	-6
391	3.3	188.82	331.06	1 800.00	45.00	300.00	99.50	0.00	2 372.03	8.00	-32	-6.1
400	8.67	179.37	497.66	4 600.00	130.00	700.00	86.92	26.03	6 134.80	24.00	-37	-7.1
386	3.24	146.86	277.58	4 350.00	90.00	200.00	892.28	0.00	6 383.55	4.00	-20	-4
410	0.87	335.69	560.26	7 500.00	120.00	600.00	166.90	0.00	7 220.74	16.00	-23	-4
370	2.73	358.75	684.28	6 400.00	140.00	1 000.00	173.84	0.00	8 485.92	21.00	-14	-2.6
373	1.82	358.75	995.32	9 000.00	220.00	500.00	446.46	0.00	11 033.81	24.00	-14	-2.9
403		512.51	715.39	8 100.00	120.00	1 000.00	118.53	0.00	11 739.98	20.00	-5	0.1
367	1.5	528.52	1 055.83	10 100.00	160.00	800.00	463.63	0.00	12 754.34	25.00	-13	-3.1
368	0.84	461.26	1 461.88	9 400.00	180.00	1 400.00	122.48	0.00	13 328.84	28.00	-26	-4.3

3.1 A 组样品 ($\text{Cl}^- < 100\text{mg/L}$)

首先,在 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl} - \text{Cl}$ 图(图 2a)中,样点都远远偏离较 Ca/Cl 、 K/Cl 的小;而 Na/Cl 比值(图 2e)基本位于海水稀释线上,部分点有所跳动。在土壤带, CO_2 溶解于水生成碳酸,碳酸离解出 H^+ 和 HCO_3^- , H^+ 与土壤带花岗岩碎屑的风化矿物发生反应,使得矿物中的 Ca 、 K 、 Na 和 Mg 等成分分别以 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 和 Mg^{2+}

高于海水稀释线;同时 Ca/Cl 、 K/Cl 和 Mg/Cl 的比值(图 2b - d)也都高于海水稀释线,其中 Mg/Cl 的比值的离子形式与余下的 HCO_3^- 一同进入水体^[1-2]。这个过程会大大增加 HCO_3^- 的浓度,因此 HCO_3^-/Cl 远高于海水稀释线; Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 三种阳离子也高于稀释线。因为图 2 上以海水稀释线作为对比线,地下水中主要离子/ Cl 比值的增大的反映显然受海水比值的



Fig.2 relationships between major ions ratios and chloride

不产生 Cl,海相蒸发盐溶解主要是 K、Na、Mg 的氯化物。

前面已说明本组样品为大气降水来源,这些点在 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图(图 3)上分布在全球大气水线上方附近, $\delta^{18}O$ 值位于 $-8.5\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 范围。根据国际原子能机构(IAEA)香港监测点(地理位置 22.32N, 114.17E, 高程海拔 65m)资料^[5], 观测时间 1961 年 1 月 ~ 1987 年 11 月共 193 次数据统计, 降水 $\delta^{18}O$ 平均值 -5.01‰ , 加权平均值为 -6.70‰ 。对比之下, A 组地下水的稳定同位素范围沿全球大气水线向左下方延伸, 可能和下面二个原因有关。A 组地下水的补给来源除了当地大气降水外, 还有引自广东省山区水源的水库水, 由于高程效应和大陆效应的原因。另外, 由于

水样均取自浅层地下水(地下水面之下5m以内),且于雨季,体现了雨量效应或因水面二次蒸发而冷凝形成雨滴^[6]。此外,369号样点偏离本组样点的分布域,偏离了全球大气水线,证明水样经受过蒸发效应。所以,除369号外,全部样点位于当地大气降水分布域(图3)。

本组样点的 Br^- 浓度为 $0.1 \sim 0.3 \text{ mg/L}$ 。若无其他因素影响,水样仅仅来源于大气降水,理论上样点则应位于海水稀释线上,而 $\text{Br}-\text{Cl}$ 关系主要分布在与纵轴平行的3条纵线上。本区降水入渗的地面环境^[7-10]可能有4种情况:①地面含石盐污染物(例如城市污水和固体垃圾渗液);②地面植被吸收水中部分 Br ;③海水浪花蒸发盐的溶解;④地面含有有机质污染物的溶解。 Br/Cl 比值相对海水的 Br/Cl 比值而言,①②趋小,③等同,④趋大。在 $\text{Br} = 0.1 \text{ mg/L}$ 时,样品的 Br/Cl 比值介于海水稀释线和石盐溶解线之间。在 $\text{Br} = 0.2 \text{ mg/L}$ 时,样品的 Br/Cl 比值出现二种分布趋向:一种分布于海水稀释线之上,和 $\text{Br} = 0.1 \text{ mg/L}$ 情况相同;另一种分布于海水稀释线之下,反映 Br/Cl 值在增大,地面环境含有有机质污染物的溶解,象牲畜家禽粪便和化粪池污水^[8-9]。在 $\text{Br} = 0.3 \text{ mg/L}$ 时,样品的 Br/Cl 比值主要和地面环境含有有机质污染有关。

若水样为海水和淡水的混合,则在三线图上应靠近海水点位置分布。本组样点偏离海水点,分布范围比较广泛,说明本组样点都无海水混合迹象。由于水体溶解了大气和地面污染物、海水浪花蒸发盐以及土壤带风化矿物,导致各个样点化学成分形成过程和组成比例都不一样,所以图面上样点分布非常分散,说明地面入渗位置环境的差异^[7],而这种差异已经把电荷平衡误差包括在内。

A组浅层地下水样根据4个方面关系的分析,都证明为大气降水来源,经由地面入渗地下形成,无任何海水混合痕迹。同时证明图3上369号水样经受过蒸发效应。

3.2 B组样品 ($100 < \text{Cl}^- < 1\,000 \text{ mg/L}$)

本组样品除了365号 ($\text{Cl}^- = 885.89 \text{ mg/L}$) 以外,其余12件均 $\text{Cl}^- < 300 \text{ mg/L}$ 。

从6张离子比值关系图上可以看出,除365号样点之外,本组样点分布都比较集中,且与A组样点的分布位置一致。但随着 Cl^- 浓度的增大,各离子与 Cl 的比值有逐渐减小的趋势,表明源自土壤带风化矿物的溶解量已趋于稳定,随同污染物和蒸发盐继续加入,因此当 Cl^- 浓度增大,比值稍有减小。

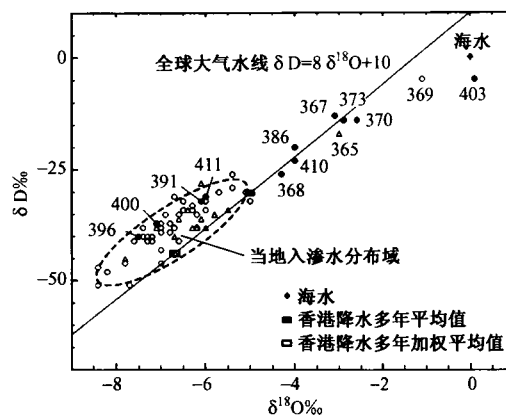


图3 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图例同图1)

Fig.3 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$

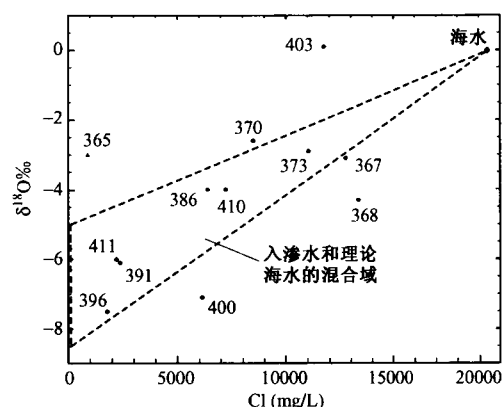


图4 $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}$ 关系图(图例同图1)

Fig.4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and Cl

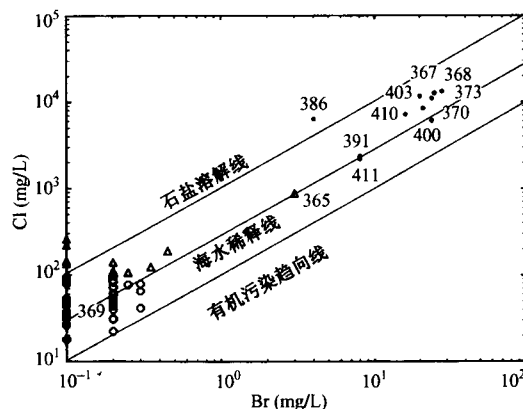


图5 $\text{Br}-\text{Cl}$ 关系(图例同图1)

Fig.5 Relationship between bromine and chloride

而365号样点, HCO_3^-/Cl 、 Ca/Cl 和 Na/Cl 比值偏离海水稀释线,主要因为地下水(淡水)中溶解了风化矿物以及污染物的加入,导致 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 的增长。 K 、 Mg 、 SO_4 与 Cl 的比值基本上都位于海水稀释

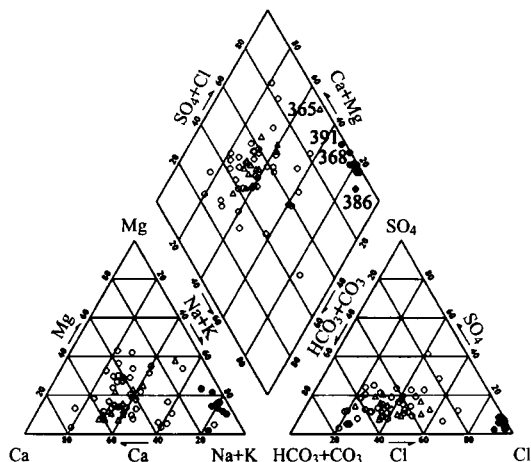


图 6 piper 三线图(图例同图 1)

Fig. 6 Piper diagram

线附近。它提示当淡水和海水以一定比例混合时,原先淡水中浓度明显高的成分在混合后尚有遗存,而淡水中浓度低的成分在混合后被海水掩饰掉。一般来说,当海水混合比例增大到一定程度,基本就靠近海水稀释线分布。

图 3 中,本组样点除 365 样点外,都与 A 组样点位置分布重合,都位于当地大气降水稳定同位素值的分布范围,说明这些水样都来源于大气降水,经由地面入渗补给。而样品 365 位于当地降水域和海水点之间。图 4 用 $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}$ 关系表示理论海水和淡水的混合域^[11]。根据图 4 分布位置,365 号点位于混合域上方,判读为淡水与海水的混合,同时存在蒸发效应。

本组样品(除 365 号点)在 Br-Cl 关系图上都高于海水稀释线,说明本组样品溶解了地面石盐组份或入渗时受地面植被吸收适量 Br。当 $\text{Br} = 0.1\text{mg/L}$ 时,样点均高于石盐溶解线,当 $\text{Br} > 0.1\text{mg/L}$ 时,样点都介于海水稀释线和石盐溶解线之间。相对 A 组而言,随 Cl^- 含量增大,有机物污染的比例趋小,被掩饰了,这和城市发展中污染的变化有关。而 365 号样点位于海水稀释线上,可以确认混合了海水,因为和主要离子比值以及稳定同位素数据的判读一致。

在三线图上,除去 365 号点以外,本组样点均重叠分布在 A 组样点的范围,这种组合表现出与 A 组样品具有相同的特征。365 号点偏离海水点位置, $\text{Ca} + \text{Mg}$ 离子比例有一定的增大,说明海水混入比例小,未能完全掩盖淡水特征。总之,本组样品中 $100\text{mg/L} < \text{Cl}^- < 300\text{mg/L}$ 样点的各种分布特征都与 A 组样品一致,均系大气降水来源,入渗过程依据当地不同位置受到不同程度的地面污染影响,化学组成比例存在一定的差

异。

结合 A 组样品结果,本项研究中 $\text{Cl}^- \leq 300\text{mg/L}$ 的样点共 52 件,均为大气降水来源,经由地面入渗补给,无任何海水混入。此外,365 号样点存在地下水和海水混合,且水体存在蒸发效应。

3.3 C 组样品($\text{Cl}^- > 1\,000\text{mg/L}$)

C 组样品 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值随 Cl^- 浓度增大明显减小,并趋近海水稀释线。在非碳酸盐岩地区,入渗水到达地下水面以后,通常 HCO_3^- 不再增大^[4],所以图 2 上 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 关系的散点分布域近似反映出地下水(或淡水)和海水之间的混合。淡水一端以 $\text{Cl}^- < 300\text{mg/L}$ 的样点群为代表,海水一端以海水稀释线为代表,因为深圳沿岸表层海水化学成分差异较大。 Ca/Cl^- 、 SO_4/Cl^- 和 Cl^- 关系的散点群也呈类似混合域分布。其中 SO_4/Cl^- 混合域的海水一端明显低于海水稀释线,推测存在 2 种原因:海水本身早先受到河水的稀释^[12],还可能发生混合水的 SO_4 还原^[3]。C 组样点在 Na/Cl^- 、 K/Cl^- 和 Mg/Cl^- 关系上基本靠近海水稀释线分布,但存在跳动现象,推测其原因很多,可能有混合水和地层之间存在离子交换或混合水受严重污染等^[4]。

图 3 中,A、B 组 $\text{Cl}^- < 300\text{mg/L}$ 的样点分布基本上覆盖了当地大气降水域,在该降水域和理论海水点之间,C 组水样共分布有 7 个点。而这 7 个样点在图 4 上分布在混合域内的为 5 个样,证明它们的水分子是由海水和降水混合组成。而样点 368 和 403 分布在混合域(图 4)外,403 样点说明既有海水和降水的混合,还存在水体的蒸发效应。368 样点位置除了有海水和降水的混合外,还可能存在两种情况(图 4):一种是溶解了氯化物盐类(样点横向移动),另一种是稳定同位素的雨量效应(样点纵向移动)。

另外,C 组水样分布在当地大气降水域(图 3)内有 4 个样点。而在图 4 上分布于混合域内有 3 个样点,证明由海水和降水混合组成。样点 400 号分布在混合域外,解释同 368 号样点。

依据图 3、4 的分析结果,C 组样品(共 11 件)大致可以归纳如下:水源由海水和降水混合为主的样品共为 8 件(图 4 混合域内);样点 403 号既是降水和海水的混合,又曾经历蒸发效应(图 4 混合域的上方);样点 368 号和 400 号既是降水和海水的混合,可能还受到两方面的影响,溶解地面或地层中氯化物盐类和同位素的雨量效应(图 4 混合域的下方)。

C 组样品(396 号样点未测 Br)在 Br-Cl 关系图(图 5)上都分布在海水稀释线或者该线的上方,除了

386 样点分布在石盐溶解线的上方外,余下样点的分布界于海水稀释线和石盐溶解线之间偏下一些,说明淡水和海水的混合水中盐分主要源于海水,或者说以海水盐分为主^[8]。而倾向海水稀释线上方分布,说明混合水中,无论淡水或者海水,都有来自污染物和蒸发盐的干扰,推测主要成分是石盐。

C 组样点在三线图(图 6)上偏离海水点稍远的样点有 368、391 和 386,余下均紧靠海水点分布,证明这些样品的化学组成比例近似于海水^[13~14]。在海水和淡水混合中,海水的溶质部分占主导地位,明显掩饰掉淡水带入的电荷平衡误差^[12~13]。根据图 5 和图 6 上分布位置,样点 386 明显反映水样中 K + Na 的比例大于海水,可能溶解了石盐。样点 391 和 368 样点沿阳离子轴偏离,可能存在混合水成分和地层之间的离子交换^[14],也可能受污染物的影响。

C 组样品共 11 件,通过上述 5 种关系分析,证实均存在海水混入,也就是淡水和海水的混合水。分析过程中,曾出现双解,例如 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系分析 C 组样品有 4 个点位于当地大气降水域,既可解释为大气降水溶解盐分,也可解释为降水和海水的混合(图 4)。而这 4 个点在主要离子/Cl-Cl 关系、Br/Cl-Cl 关系和三线图解上均有海水化学成分,倾向海水混入。样点 386 不仅淡水和海水有混合,同时溶解大量石盐。实际上单种方法都存在多解,一定要不同方法相互补充、鉴别和印证,才能得到合理解释。本文所用方法简单可归纳为表 2。

表 2 地球化学/同位素用法
Table 2 Geochemical and isotope tools

方法	功用			
	识别淡水	识别淡水 和海水混合	识别 蒸发效应	识别盐分 溶解 (含污染物)
主要离子/Cl-Cl	●	●		
$\delta D-\delta^{18}O$	●	●	●	
$\delta^{18}O-Cl$		●	●	●
Br-Cl		●		●
三线图	●	●		

4 结论

(1) 本区浅层地下淡水样品($Cl^{-} < 300mg/L$ 共 52 件)的水分子(H_2O)都源自大气降水补给(包括河水、水库水等),经由地面入渗,而化学组分比例明显有别于海水,它们的补给组合如下:

a. 风化矿物的溶解,主要产生阳离子和 HCO_3^{-} ,

不产生 Cl^{-} 和 Br^{-} , HCO_3^{-} 含量受土壤带 CO_2 输入限制,因为每一研究区的环境(例如地面植被,土壤组成等)具有一定的类似性;

b. 海水浪花蒸发盐的溶解,这类蒸发盐经水溶解主要产生 Na^{+} 和 Cl^{-} ,而且 Na/Cl 和 Br/Cl 比值近似海水比值;

c. 污染物溶解或混入污染水体,化学成分具有不确定性,但从污染物来源判断可以参考当地环境和 Br/Cl 比值解读;

d. 降水携带的化学成分,相比以上三个来源可以忽略不计。

其中海岸带大量水汽可由波浪撞击产生,水滴和蒸发盐微粒通过风的搬运沉积到陆地,其沉积量随着离海岸线的下风向距离增大而急剧减小。这是沿海地区一种普遍现象。随 Cl^{-} 浓度从 $100mg/L$ 向 $300mg/L$ 增大时, HCO_3^{-}/Cl^{-} 、 Ca/Cl 和 K/Cl 比值都明显趋小,反映出风化物溶解已趋稳定,而地面可溶盐和污染物仍在增长。而 $300mg/L < Cl^{-} < 885mg/L$ 之间出现间断,该空白区表明研究区淡水样品和混合样品的分离界限,同时反映出本区淡水溶质输入是受到限制的。

(2) 本区源自淡水和海水混合的样品($Cl^{-} > 885mg/L$ 共 12 件)的水分子(H_2O)都源自大气降水和海水的混合,其主要离子/Cl 比值恰好处在以 $Cl^{-} < 300mg/L$ 淡水样品为一端元和海水稀释线为另一端元的混合域范围。同样,Br-Cl 关系和 piper 三线图分布也都符合淡水和海水的混合。

(3) 发生淡水和海水混合的样点位置主要分布在沿岸的填海区 and 河口区。前者填海改为陆地,在表层形成新淡水体,漂浮在海水之上,在二者交界面发生混合,所以不同位置不同井深可以取到不同 Cl^{-} 浓度的水样,例如 396、410 和 411 等样点。后者因潮汐作用,海水不仅向边岸,还沿河口河道往返运动,在地下水开采井附近容易招致海水混入。例如 367、368 样点为工业区于上世纪 90 年代因强力开采地下水而招致海水入侵。386 和 403 分别处于大沙河和葵涌河的海水倒灌地段。此外还有引海水养殖,造成海水入渗地下,导致地下水咸化,例如 373 样点。

致谢:本次研究以“深圳市海水入侵地质灾害调查与防治对策研究”项目为依托,该项目主要由深圳市勘察测绘院有限公司承担,并完成野外取样工作,中国地质环境监测院参与水文化学和同位素研究工作。感谢深圳市勘察测绘院有限公司雷呈斌教授对作者的指导,并感谢赵海权、汪磊和汪文富工程师提供的帮助。

参考文献:

- [1] Freeze, R A Cherry, J A. Ground Water [M]. Prentice-Hall, Inc, 1979: 269 - 273.
- [2] Vengosh, A Ben-Zvi, A. Formation of a salt plume in the Coastal Plain aquifer of Israel: the Be'er Toviyya region [J]. Journal of Hydrology, 1994, 160: 21 - 52.
- [3] Yamanaka, M Kumagai, Y. Sulfur isotope constraint on the provenance of salinity in a confined aquifer system of the southwestern Nobi Plain, central Japan [J]. Journal of Hydrology, 2006, 325: 35 - 55.
- [4] Appelo C A J, Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution [M]. 1993: 22 - 24.
- [5] Rozanski, K, Araguas-Araguas, L Gonfiantini, *et al.* Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Continental Isotope Indicators of Climate [J]. American Geophysical Union Monograph. 1993: 1 - 36.
- [6] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in Hydrogeology [M]. America: Lewis Publishers. 1999.
- [7] Lorrai M, Fanfani L, Lattanzi, *et al.* Processes controlling groundwater chemistry of a coastal area in SE Sardinia [C] // In Wanty, R. B. and Seal II, eds., Water-Rock Interaction, Taylor and Francis Group, London. 2004: 439 - 443.
- [8] Edmunds W M. Bromine geochemistry of british groundwaters [J]. Mineralogical Magazine, 1996, 60: 275 - 284.
- [9] Alcalá F J, Custodio E. Using the Cl / Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal [J]. Journal of Hydrology, 2008, 359: 189 - 207.
- [10] Salama R B, Utto C J, Fitzpatrick R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization [J]. Hydrogeology Journal, 1999 (7): 46 - 64.
- [11] Hiroshiro Jinno K, Berndtsson R. Hydrogeochemical properties of a salinity-affected coastal aquifer in western Japan [J]. Hydrological processes, 2006, 20: 1425 - 1435.
- [12] 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 - 49.
- [13] 杨巧凤,李文鹏,王瑞久. 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.
- [14] Boluda-Botella N, Gomis-Yagues V, Ruiz-Bevia F. Influence of transport parameters and chemical properties of the sediment in experiments to measure reactive transport in seawater intrusion [J]. Journal of Hydrology, 2008, 357: 29 - 41.

Hydrogeochemistry and stable isotopes of shallow groundwater in coastal Shenzhen

YANG Qiao-feng¹, LI Wen-peng², WANG Rui-jiu²

(1. Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 100195, China;

2. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Hydrochemical composition of major ions and stable isotopic values of hydrogen and oxygen of 64 shallow groundwater samples in coastal Shenzhen were tested to determine the extent of seawater intrusion. A combination of hydrogeochemistry (major ions/Cl versus Cl, Br/Cl ratio and piper diagram) and stable isotopes methods (δD - $\delta^{18}O$ relation, $\delta^{18}O$ -Cl plot) were used to analysis the data of samples. The study indicate that 52 samples with salinities lower than 300mg/L Cl^- recharged by atmospheric precipitation. 12 samples with concentration of chloride higher than 885mg/L were mixing water of fresh water and seawater. And the relationships between major ions/Cl and Cl show a discontinuity in the chloride concentration range between 300 and 885mg/L.

Key words: shallow groundwater; stable isotopes; geochemistry; seawater intrusion

责任编辑:张若琳