

珠江三角洲区域地下咸水的起源与演化

支兵发,姚 普,孔德秀,姜守俊

(广东省地质调查院,广州 510080)

摘 要:地下咸水是一种宝贵资源。珠江三角洲地下咸水广泛分布,但研究程度不高。基于国家地质调查项目获得的第一手资料,从沉积学、水文地球化学角度,对珠江三角洲区域性地下咸水的起源与演化进行了研究,结果表明:地下咸水起源于古海水,与中全新世早期退积作用过程密切相关;沉积压实作用使封存于弱透水层中的海水越流至第四系底部的承压含水层;部分地段地下咸水形成过程中,可能受到了溶滤水的影响,矿物溶解与阳离子交换吸附等作用可能造成地下咸水盐分的富集。

关键词:珠江三角洲;地下咸水;古海水;退积作用;沉积压实作用

中图分类号:P345

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.07008

与地下淡水一样,地下咸水也是一种宝贵的资源。地下咸水可通过资源化技术,用于工业用冷却水和农业灌溉、河道绿化、城镇环卫、养殖、生活用水等^[1],特别是在水产养殖方面有非常广阔的应用前景^[2]。

珠江三角洲地下咸水广泛分布于广州、佛山以南,沙滘、勒流、江门一线以东和东莞石龙以西的广大地区。广东水文地质界的前辈们在 1:20 万广州、江门幅区域水文地质普查报告中将地下咸水形成原因作了简要归纳,认为地下咸水由全新世海侵形成,但并未给出实证。迄今为止,针对珠江三角洲地下咸水的研究很少。Wang 等^[3]研究了珠江三角洲第四系承压含水层地下水盐分来源和水文地球化学过程;蒋方媛等^[4]研究了深圳市宝安区海水入侵和地下水的起源;韩绘芳等^[5]研究了深圳市宝安区海水入侵影响下的地下水化学演化。分别采用宏量组分关系^[3,5]、宏量组分与 Cl^- 关系^[3]、微量组分与 Cl^- 关系^[4]、氢氧同位

素关系^[3,4]以及碳同位素、氢氧同位素与化学指标关系^[3]等方法进行研究。笔者基于近十年国家地质调查项目获得的第一手资料,从沉积学、水文地球化学角度,对珠江三角洲区域性地下咸水的起源与演化进行了研究,对于提高区域水文地质研究程度和促进地下咸水资源的科学开发利用均具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于珠江三角洲经济区的核心地带,濒临南海,毗邻港澳,行政区域涉及广州、深圳、珠海、佛山、中山、东莞、江门等 7 个地级市,属国土开发优化开发核心区域。

研究区主体为三角洲平原,东、西、北面为低山丘陵环绕,其间散布着 160 多个残丘或台地。由于地处亚热带季风气候区,区内春季凉爽、多阴雨,夏季高温湿热、暴雨集中而多洪水,夏秋季多台风,冬季则少严寒且降雨稀少。年平均气温为 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量在 $1\,800\sim 2\,200\text{ mm}$,多集中在 4—9 月份,由北向南降雨量逐渐增多。

收稿日期:2015-04-10

基金项目:中国地质调查局项目(1212010534807, 1212011220013)

作者简介:支兵发(1976—),男,硕士,高级工程师,主要从事水工环地质方面的研究工作。E-mail: zbf_ggs@163.com

研究区位于东江、西江、北江下游,河网发育,经黄茅海与伶仃洋一带崖门、虎跳门、鸡啼门、磨刀门、洪奇门、横门、蕉门、虎门汇入南海,多年平均径流量合计 $6\,700 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。潭江是最大的非珠江水系的河流,主要流经江门市境,经崖门汇入南海。

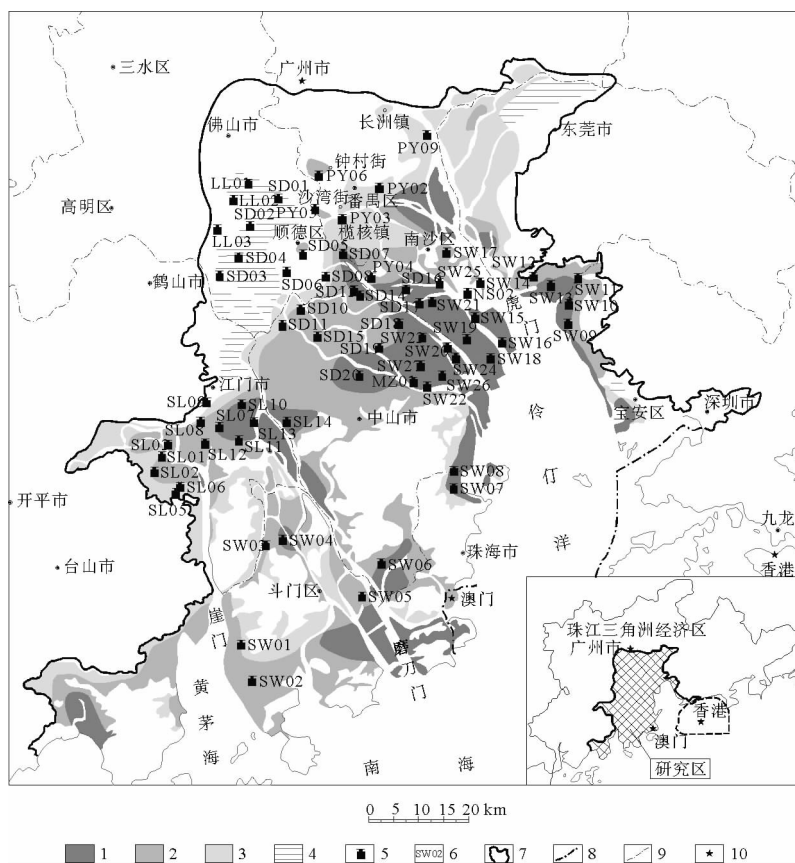
研究区在构造单元上属华南褶皱系粤中坳陷带。地层隶属华南地层大区中的东南地层区,地表出露元古系、震旦系、寒武系、泥盆系、白垩系、古近系、新近系、第四系,其中第四系分布最广,为晚更新世以来的沉积层。岩浆岩主要为燕山期二长花岗岩类。

松散岩类孔隙水广泛发育,含水层岩性包括卵砾石、砾砂、粗砂、中砂、细砂、粉细砂、粉砂,富

水性空间变化大,局部地段水量丰富。孔隙含水层在垂向上大体可划分为下部河流相粗碎屑的孔隙承压含水层和上部细碎屑的孔隙潜水含水层,之间存在相对隔水的三角洲相淤泥或黏土层;2个含水层在平面上呈不连续展布^[6]。基岩裂隙水分布于残丘、台地及附近,含水层岩性主要为砾岩、砂砾岩、砂岩、粉砂岩、变质砂岩和二长花岗岩类,富水性普遍较差。地下水总体径流缓慢,水位年变幅不大。

1.2 野外调查

在1:5万水文地质测绘基础上,在优选区块开展了水文地质钻探,先后施工水文地质钻孔67个(图1)。在水文地质钻探过程中,认真进行了



1 咸水区($M \geq 10 \text{ g/L}$); 2 半咸水区($3 \text{ g/L} \leq M < 10 \text{ g/L}$); 3 微咸水区($1 \text{ g/L} \leq M < 3 \text{ g/L}$); 4 上淡下咸水; 5 采样水文地质钻孔位; 6 采样水文地质钻孔编号(其中,含“SW”的编号为珠江三角洲经济区城市群地质环境综合调查工作项目施工孔的编号简写,其中省略了字母“ZK”,如SW06对应为SWZK06;含字母“SD”、“SL”、“LL”的编号为珠江三角洲地区地下水污染调查评价工作项目施工孔的编号简写,其中省略了字母“ZK”,如SD10对应为SDZK10;含字母“PY”、“NS”的编号为广州城市地质调查项目施工孔的编号简写,前面省略了字母“SW”,如PY02对应为SWPY02); 7 研究区范围; 8 省界; 9 地级市分界; 10 省级行政中心

图1 研究区采样水文地质孔分布

Fig. 1 Location map of hydrogeological boreholes for groundwater sampling in the study area

岩心和水文地质观测,并对钻孔岩心进行详细鉴别、编录,内容涉及第四纪地质、水文地质等方面。钻探施工结束后,对水文地质钻孔扩孔成井,严格做好井管安装、填砾、止水、洗井、试验性抽水、抽水试验等工作。在抽水试验过程中,及时对抽水试验基本观测数据进行了检查与整理。有关工作均严格按照国家有关规程、规范、标准展开。

1.3 样品采集、测试

样品采集开始前,按要求将样瓶清洗干净,并加好保护剂;在各水文地质钻孔抽水试验临近结束前开始采集上述样品,用带 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜的过滤器过滤水样。采用后,将样品置于 $4\ ^\circ\text{C}$ 的冷藏箱内保存,并在 3 日内送达实验室。

样品由广东省物料实验检测中心依据标准 GB/T8538—95、DZ/T0064—93 测定,分析指标包括宏量组分、微量组分等。

1.4 室内综合研究

室内综合研究工作包括第四纪地质、水文地质、水文地球化学等诸方面。在 MAPGIS 平台上进行了综合编图工作,包括第四纪地质图、水文地质图、水文地质钻孔柱状图、水文地质钻孔综合成果图表、水文地质剖面图的编制,并利用 Excel2003 的统计和作图功能对样品测试结果进行处理。

2 结果与讨论

2.1 沉积学

67 个钻孔岩心编录结果显示,地下咸水发育地段第四系底部沉积了河流相砂、砾砂、卵石层,不整合覆于基岩风化壳之上;上覆 2~3 套海相(或海陆交互相)沉积层,每层岩性组合为(淤泥质)粉细砂或含蚝壳中砂、细砂(或蚝壳层)—(粉砂质)淤泥或淤泥质黏土,常见腐叶、贝壳残片,局部见 2 套海相沉积层间存在风化层(花斑黏土、粉质黏土或砂质黏土)。

钻孔岩心第四纪地质综合对比研究结果表明,地下咸水孔揭露了上更新统石排组(Q_{ps})、三角组(Q_{ps})、全新统横栏组(Q_{hl})、东升组

(Q_{hd})、万顷沙组(Q_{hw})、灯笼沙组(Q_{hl})。石排组沉积层多埋藏于低洼的基底或洼地、谷地中,厚 $1.5\sim 14\ \text{m}$ (局部厚度超过 $30\ \text{m}$),埋深 $14\sim 63\ \text{m}$;三角组为一套浅灰、灰白、黄白、红黄色花斑状黏土、粉砂质黏土或砂质黏土层,富含铁质氧化物,厚 $1.8\sim 7\ \text{m}$,埋深 $6\sim 28\ \text{m}$;横栏组为一套海相深灰—灰黑色淤泥、粉砂质淤泥夹粉砂及粉砂质黏土薄层,富含贝壳(或蚝壳层)、腐木等,厚 $3\sim 20\ \text{m}$,埋深 $6\sim 30\ \text{m}$;东升组为一套浅风化的灰黄、浅黄、褐黄色黏土、粉砂质或砂质黏土,富含铁质氧化物,比三角组风化程度浅;万顷沙组为一套以海相与陆相沉积并存的地层,岩性变化大,在中山民众、新会礼乐、双水、顺德北滘等地为海积—冲积的淤泥、黏土,而其他地方则以冲积的中细砂、砂砾为主,局部含腐木(或腐木层),厚 $1\sim 10\ \text{m}$,埋深 $1\sim 12\ \text{m}$;灯笼沙组为一套海陆交互沉积的深灰、灰黄色淤泥、粉砂质淤泥、粉砂质黏土、砂质黏土及细砂层组成,富含贝壳(或蚝壳层),厚 $0.5\sim 12\ \text{m}$,埋深 $0.5\sim 12\ \text{m}$ 。

在空间分布不连续的石排组沉积层是地下水咸水赋存的主要层位。断续分布的三角组风化花斑黏土层为相对隔水层。大面积的横栏组沉积层形成于中全新世早期,大多为含水量大的弱透水路。东升组亦是断续分布的相对隔水层。万顷沙组、灯笼沙组沉积层在部分地段为潜水含水层,在部分地段则为弱透水路。地下咸水分布地段普遍发育 1~3 退积层序(即随深度变小沉积物颗粒由粗变细的沉积序列)(图 2)。

退积层序是退积作用的结果,与海侵持续的过程相对应。在中全新世早期,在珠江三角洲发生了一次覆盖范围最大的海侵^[7],地下咸水 ^{14}C 年龄主要在 $5.9\sim 7.4\ \text{ka BP}$ 之间与之相吻合。因而,研究区广泛分布的地下咸水起源于古海水,与中全新世早期退积作用过程密切相关。在中全新世早期退积过程之后,海水被封存于第四系底部的承压含水层及上覆弱透水路中。中全新统土层平均压缩率高达 $38.11\%\text{[7,8]}$ 。在沉积压实作用下,第四系底部的承压含水层上覆的弱透水路中封存的海水越流至第四系底部的承压含水层,并非为 Wang^[3] 所提出的全新世海侵期海水入渗至第四系底部的承压含水层和全新世海水入侵。

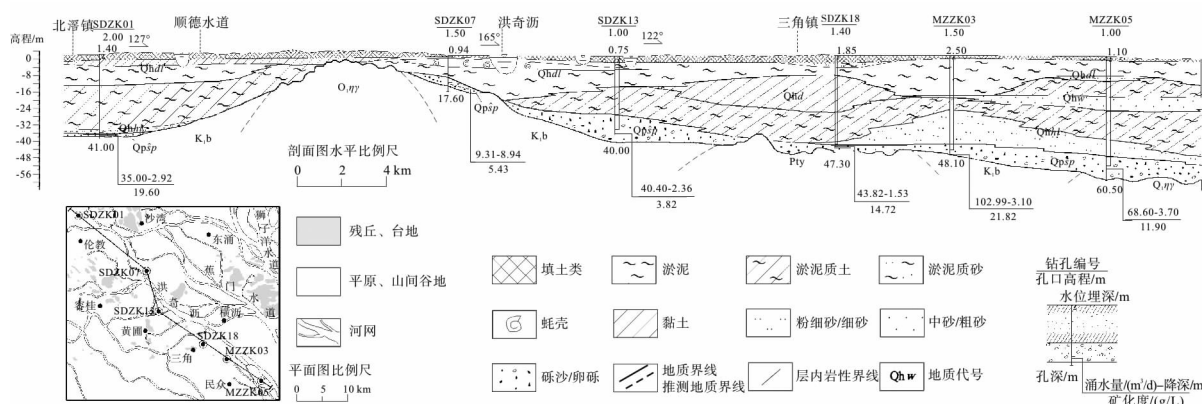


图 2 典型地段地下咸水水文地质剖面

Fig. 2 Hydrogeological profile of saline groundwater in typical location

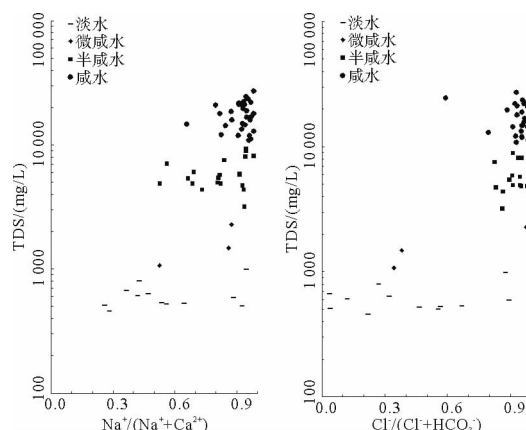
2.2 水文地球化学

在研究区 67 个水文地质钻孔中,有 55 个孔揭露到赋存于第四系底部承压含水层的地下水。TDS 含量 1 068.31~26 868.4 mg/L,其中 3 个孔为微咸水($1 \text{ g/L} \leq \text{TDS} < 3 \text{ g/L}$),20 个孔为半咸水($3 \text{ g/L} \leq \text{TDS} < 10 \text{ g/L}$),32 个孔为咸水($\text{TDS} \geq 10 \text{ g/L}$)。宏量组分中, Cl^- 含量 242.99~14 954.9 mg/L,平均含量 7 090.86 mg/L; Na^+ 含量 129.55~9 330 mg/L,平均含量 3 587.56 mg/L,两者均呈现随 TDS 升高而增大的趋势。阴阳离子含量大小顺序分别为 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。微量组分 Br^- 除 SDZK02、SDZK04、SDZK14、SLZK08 孔未检出(检出限 0.1 mg/L)外,其余孔含量变化范围为 0.11~50.05 mg/L; I^- 含量为 0.017~3.28 mg/L。水化学类型以 $\text{Cl}-\text{Na}$ 为主,占比 83.67%;其次为 $\text{Cl}-\text{Na} \cdot \text{Ca}$,占比 10.91%。

2.2.1 地下咸水起源的识别

研究区地下咸水与 Gibbs^[9]、Feth 和 Gibbs^[10] 所绘制的世界主要河流、湖泊及主要海洋水 TDS 与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 关系对比结果表明,地下咸水总体上与海水所具有的特征较为一致(图 3)。

通常海水的钠氯系数($\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$)平均值为 0.85~0.87^[11-13]。SWZK05、SWZK11、SDZK07 的钠氯系数为 0.86,SWZK20、MZZK05 的钠氯系数为 0.87(表 1),暗示区域地下咸水起源于海水。

图 3 研究区地下水 TDS 与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的关系Fig. 3 Relationship of TDS to $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ and to $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ of groundwater in the study area

Br/Cl (含量)比值常被用作识别地下水盐分来源的示踪剂^[14,15],可指示地下咸水的起源。海水的 Br/Cl 为 3.47×10^{-3} ^[15]。SWZK08 的 Br/Cl 正好为这一数值,保留了地下咸水起源于海水的证据。

野外调查结果表明,区内供水以地表水为主,极少开采地下水,从而不存在大范围海水入侵现象。综合研究认为,区域性分布的地下咸水起源于古海水。

2.2.2 地下咸水演化及影响因素

经过阳离子交替吸附作用的地下水钠氯系数 < 0.87 ^[13,16],在水解和酸化作用下发生岩石矿物溶解导致地下水 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 接近 1^[12],受大气降水淋滤作用影响的地下水钠氯系数一般 > 1 。在地

表 1 研究区地下水水化学系数汇总

Table 1 Summary of hydrogeochemical coefficients of saline groundwater in the study area

样品编号	γ_{Na}/γ_{Cl}	γ_{Ca}/γ_{Na}	γ_{Mg}/γ_{Na}	γ_{Mg}/γ_{Ca}	$\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$	$\gamma_{HCO_3}/\gamma_{Cl}$	γ_{Ca}/γ_{Cl}	TDS/(mg/L)
SWZK01	0.83	0.003 6	0.21	57.80	0.025 0	0.019 7	0.003 0	15 740.98
SWZK02	0.84	0.010 8	0.20	18.92	0.055 9	0.023 8	0.009 1	9 214.41
SWZK04	0.64	0.018 4	0.31	16.75	0.052 1	0.002 4	0.011 9	15 900.09
SWZK05	0.86	0.006 7	0.14	20.28	0.004 2	0.044 9	0.005 8	10 825.93
SWZK06	0.68	0.038 1	0.30	7.76	0.019 5	0.008 0	0.025 7	11 125.00
SWZK07	0.88	0.002 7	0.20	74.39	0.088 9	0.006 0	0.002 4	16 880.58
SWZK08	0.80	0.031 0	0.22	7.00	0.083 5	0.032 4	0.024 7	5 689.36
SWZK09	0.82	0.008 2	0.24	28.73	0.083 8	0.000 6	0.006 7	21 518.64
SWZK10	0.81	0.0083	0.25	29.98	0.068 0	0.007 9	0.006 7	21 120.62
SWZK11	0.86	0.040 4	0.21	5.29	0.103 1	0.092 1	0.034 9	3 165.63
SWZK12	0.80	0.005 7	0.24	42.02	0.078 4	0.018 8	0.004 6	16 715.60
SWZK13	0.62	0.027 4	0.44	16.03	0.059 2	0.010 0	0.016 9	20 769.16
SWZK14	0.80	0.007 0	0.23	32.52	0.013 5	0.003 6	0.005 6	20 799.41
SWZK15	0.75	0.005 9	0.28	46.49	0.062 2	0.018 7	0.004 4	22 206.02
SWZK16	0.76	0.005 8	0.26	44.26	0.031 0	0.040 6	0.004 4	21 087.56
SWZK17	0.95	0.005 5	0.20	36.87	0.256 5	0.026 5	0.005 2	18 672.10
SWZK18	0.70	0.023 8	0.20	8.26	0.029 8	0.000 6	0.016 6	17 875.62
SWZK19	0.58	0.218 3	0.14	0.66	0.001 0	0.028 6	0.127 7	4 845.83
SWZK20	0.87	0.004 1	0.16	39.29	0.001 1	0.025 6	0.003 5	11 837.67
SWZK21	0.73	0.094 8	0.16	1.65	0.004 7	0.055 0	0.069 6	4 884.30
SWZK22	0.79	0.013 1	0.20	15.10	0.001 6	0.037 0	0.010 3	8 057.06
LLZK01	0.95	0.002 1	0.16	76.07	0.000 5	0.147 5	0.002 0	12 892.70
MZZK01	0.88	0.003 1	0.16	53.56	0.000 2	0.024 8	0.002 7	23 505.90
MZZK02	0.75	0.014 6	0.24	16.23	0.048 3	0.000 9	0.010 9	18 571.60
MZZK03	0.73	0.002 6	0.19	72.11	0.000 1	0.020 0	0.001 9	21 821.50
MZZK04	0.96	0.000 9	0.14	154.10	0.000 1	0.044 2	0.000 9	26 868.40
MZZK05	0.87	0.005 3	0.18	34.36	0.000 4	0.027 4	0.004 6	11 904.40
SDZK01	0.75	0.007 2	0.18	24.71	0.000 1	0.074 3	0.005 4	19 597.70
SDZK02	1.17	0.300 9	0.25	0.84	0.001 1	0.942 7	0.351 2	1 483.44
SDZK04	0.78	0.111 5	0.08	0.70	0.002 8	0.014 9	0.087 4	2 269.54
SDZK05	0.82	3.698 1	0.49	0.13	0.038 7	1.113 4	3.040 5	1 068.31
SDZK07	0.86	0.077 3	0.004	0.05	0.052 1	0.068 0	0.066 5	5 430.08
SDZK10	0.43	0.335 2	0.40	1.20	0.024 6	0.001 7	0.144 7	7 010.34
SDZK13	0.77	0.031 1	0.24	7.79	0.001 4	0.088 7	0.023 8	4 355.64
SDZK14	1.17	0.004 2	0.11	26.32	0.000 4	0.399 3	0.004 9	24 497.00
SDZK15	0.76	0.011 1	0.22	19.98	0.004 7	0.028 5	0.008 4	13 311.20
SDZK16	0.77	0.009 3	0.19	20.46	0.001 1	0.024 5	0.007 2	14 736.00
SDZK17	0.54	0.093 5	0.40	4.32	0.066 4	0.025 4	0.050 0	14 699.40
SDZK18	0.75	0.006 0	0.22	36.98	0.000 1	0.047 6	0.004 5	21 990.70
SDZK19	0.41	0.207 3	0.40	1.94	0.012 8	0.003 5	0.085 7	5 355.52
SDZK20	0.54	0.130 7	0.26	2.02	0.000 4	0.000 5	0.070 5	4 322.83
SLZK01	0.58	0.086 7	0.44	5.02	0.012 7	0.007 1	0.050 5	5 734.46

续表

样品编号	$\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$	$\gamma_{\text{Ca}}/\gamma_{\text{Na}}$	$\gamma_{\text{Mg}}/\gamma_{\text{Na}}$	$\gamma_{\text{Mg}}/\gamma_{\text{Ca}}$	$\gamma_{\text{SO}_4}/\gamma_{\text{Cl}}$	$\gamma_{\text{HCO}_3}/\gamma_{\text{Cl}}$	$\gamma_{\text{Ca}}/\gamma_{\text{Cl}}$	TDS/(mg/L)
SLZK02	0.77	0.029 2	0.16	5.63	0.000 3	0.056 9	0.022 6	5 848.16
SLZK03	0.62	0.093 2	0.26	2.75	0.004 2	0.011 9	0.057 9	4 843.38
SLZK07	0.73	0.009 1	0.19	20.58	0.000 0	0.005 0	0.006 6	14 616.20
SLZK08	0.51	0.192 8	0.46	2.36	0.004 7	0.004 9	0.097 5	6 016.01
SLZK10	0.93	0.001 4	0.08	54.69	0.000 1	0.041 4	0.001 3	17 797.90
SLZK11	0.76	0.007 7	0.21	27.22	0.008 5	0.054 3	0.005 8	14 352.70
SLZK13	0.77	0.022 4	0.19	8.57	0.005 8	0.010 7	0.017 4	14 308.70
SLZK14	0.96	0.011 9	0.18	15.04	0.045 4	0.055 2	0.011 4	8 886.66
SWPY02	0.75	0.015 9	0.23	14.71	0.030 9	0.045 5	0.012 0	12 036.93
SWPY03	0.80	0.051 6	0.13	2.60	0.033 4	0.121 1	0.041 4	7 524.56
SWPY05	0.89	0.003 6	0.03	8.40	0.003 0	0.027 0	0.003 3	8 127.95
SWPY06	0.41	0.595 1	0.43	0.71	0.006 2	0.033 3	0.243 2	4 902.58
SWPY09	0.82	0.030 9	0.22	7.18	0.015 0	0.116 7	0.025 4	4 666.98

注: γ 表示毫克当量

下咸水样品的钠氯系数小于海水(特别是 <0.70)的情况下,表明地下水咸水形成过程中 Na^+ 与 Ca^{2+} 发生了离子交换,导致水中 Ca^{2+} 含量增大、 Na^+ 含量减少;SDZK02、SDZK14的钠氯系数 >1 (表1),可能说明地下咸水受到了大气降水淋滤作用的影响;SWZK17、MZZK04、SLZK14、LLZK01的钠氯系数接近于1(表1),可能反映在地下咸水形成过程中水解作用和酸化作用下发生了矿物溶解。

钙钠系数($\gamma_{\text{Ca}}/\gamma_{\text{Na}}$)与镁钠系数($\gamma_{\text{Mg}}/\gamma_{\text{Na}}$)可用来判断地下水形成过程中是否会发生离子交换,并可表征水质演化过程及矿化强度^[17]。SDZK05、SWPY06、SDZK10、SDZK19、SWZK19代表的地下咸水形成过程中离子交换反应较为强烈,其余则较为缓慢。在 $\text{TDS} \geq 10 \text{ g/L}$ 时,钙钠系数、镁钠系数均分别 <0.05 、 0.5 ,表明地下咸水中 Na^+ 含量相对增加,盐分富集。

除SDZK07、SDZK05、SWZK19、SDZK04、SWPY06、SDZK02外,其余样品镁钙系数($\gamma_{\text{Mg}}/\gamma_{\text{Ca}}$) >1.0 ,最大达154.10,平均23.20。镁钙系数 >1.0 的样品代表地下咸水在形成过程中, Ca^{2+} 与淤泥、淤泥质土层的 Na^+ 发生了离子交换,从而使镁钙系数远高于海水(5.5)^[18];镁钙系数 <1.0 的样品代表的地下咸水在形成过程中可能受到溶滤水演化的影响。

硫酸盐系数($\gamma_{\text{SO}_4}/\gamma_{\text{Cl}}$)与重碳酸系数

($\gamma_{\text{HCO}_3}/\gamma_{\text{Cl}}$)可用来反映阴离子演化过程及组分配比变化^[19,20]。研究区96.36%的样品硫酸盐系数 <0.1 ,89.09%样品的重碳酸系数 <0.1 。这总体上说明在地下水形成过程中 Cl^- 异常增多、 SO_4^{2-} 变化不明显,并可能指示了地下水曾在地质历史时期经历了大规模的水质咸化过程。与中全新世早期的海侵过程相吻合。

钙氯系数($\gamma_{\text{Ca}}/\gamma_{\text{Cl}}$)可用于刻画水动力特点^[17]。研究区90.91%样品的钙氯系数 <0.1 ,总体上可能暗示赋存地下咸水的含水层(第四系底部的含水层)水动力条件偏差。与高矿化地下咸水赋存于基底低洼或洼地、谷地之上的含水层在空间上不连续的状况相吻合。

3 结论

(1)珠江三角洲区域性地下咸水起源于古海水,与中全新世早期退积作用过程密切相关;沉积压实作用使封存于弱透水层中的海水越流至第四系底部的承压含水层。

(2)部分地段在地下咸水形成过程中,可能受到了溶滤水的影响;矿物溶解与阳离子交换吸附等作用可能造成地下咸水盐分的富集。

参考文献:

[1] 李 征,任必穷,刘 波. 天津市地下咸水资源化初探[J].

- 海河水利, 2009(2): 12-13.
- [2] 杜岩松. 地下咸水的化学组成及其在对虾养殖中的应用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001.
- [3] Wang Y, Jiao J J. Origin of groundwater salinity and hydro-geochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 438-439: 112-124.
- [4] 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——以深圳宝安区为例[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 23(3): 253-260.
- [5] 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.
- [6] 云祖铿. 珠江三角洲地下水特征[J]. *热带地理*, 1982(1): 46-50.
- [7] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982.
- [8] 韦 惺, 莫文渊, 吴超羽. 珠江三角洲地区全新世以来的沉积速率与沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 328-335.
- [9] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3 962): 1 088-1 090.
- [10] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: Evaporation-crystallization process [J]. *Science*, 1971, 172(3 985): 870-872.
- [11] 张翠云. 莱州湾滨海平原地下卤水的形成及其演化[J]. *中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊*, 1993(9): 73-91.
- [12] 冯 欣, 张亚哲. 深圳地区地下水离子比例系数分析研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(4): 18-20, 24.
- [13] 李建森, 李廷伟, 马海州, 等. 柴达木盆地西部新近系和古近系油田卤水水化学特征及地质意义[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(6): 28-36.
- [14] Edmunds W M. Bromine geochemistry of British groundwaters [J]. *Mineralogical Magazine*, 1996, 60: 275-254.
- [15] 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.
- [16] 林晓英, 曾溅辉, 杨海军, 等. 塔里木盆地哈德逊油田石英系地层水化学特征及成因[J]. *现代地质*, 2012, 26(2): 377-383.
- [17] Somay M A, Gemici U. Assessment of the salinization process at the coastal area with hydrogeochemical tools and geographical information system (GIS): Seluk plain, Izmir, Turkey [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2009, 201(1/4): 55-74.
- [18] 李学礼. 水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
- [19] Kroopnick P. The SO_4 : Cl ratio in oceanic rainwater [J]. *Pac Science*, 1977, 31(1): 91-166.
- [20] Mondal N C, Singh V P. Determining the interaction between groundwater and saline water through major ions chemistry [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 38(1/2): 100-111.

ORIGIN AND EVOLUTION OF REGIONAL SALINE GROUNDWATER IN THE PEARL RIVER DELTA

ZHI Bingfa, YAO Pu, KONG Dexiu, JIANG Shoujun

(Geological Survey of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

Abstract: As a kind of valuable resource, saline groundwater is widely distributed in the Pearl River delta, which is less studied. Based on primary data obtained in the national geological survey program, we implement a targeted study on origin and evolution of the saline using sedimentology and hydrogeochemistry. We find that the saline groundwater is originated from paleo-seawater and highly related to retrogradation process in the early period of middle Holocene. Seawater originally included in less permeable strata leaks to underlying confined aquifer by compaction. Saline groundwater is possibly influenced by lixiviation water in formation process. Mineral dissolution and ion exchange may contribute to the salinity enrichment.

Key words: Pearl River delta; saline groundwater; paleo-seawater; retrogradation; compaction