

上海地区第四系地下水流系统特征

宋保平¹, 方正²

(1. 石家庄学院 资源与环境系, 河北 石家庄 050035 2. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

摘要: 上海地区地下水流系统是长江三角洲系统的一个子系统, 但由于河口三角洲这一独特环境, 使其独具特征. 第四纪海平面的升降与河口三角洲沉积两种作用此消彼长, 成为主导本区地下水流系统形成与演化的重要因素, 地下水主要通过大气降水的淡化稀释作用、越流混合作用和阳离子交换作用进行化学演化. 研究表明, 各含水层无论封闭程度、水动力特征、水化学特征及其演化方式, 均有明显不同, 据此在研究区划分出三个地下水流系统.

关键词: 地下水流系统 水化学演化 上海地区

中图分类号: P641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-6188(2004)06-0057-05

长江河口地区第四纪地层十分发育, 其中蕴藏的丰富地下水成为本区重要的淡水资源. 自20世纪60年代以来, 上海市政府部门及有关科研单位在水文地质调查、地下水化学特征、局部地区地下水流三维水动力模型、咸/海水入侵现状、控制地面沉降等方面开展了大量工作, 取得了显著成果. 但是由于各专题研究目的的限制, 地下水流系统角度的研究较为薄弱, 导致对地下水资源的组成的认识和地下水资源的评价出现较大的误差, 并且至今对该地区的咸/淡水界线与动态情况仍不明. 本文依据大量基础资料(多年地下水动态观测资料、85个水文地质钻孔分析及大量水化学分析资料), 结合我们的前期研究工作^{[1](P209-218)[2](P89-96)}, 以地下水动力和水化学特征与演化研究为基础, 对区内地下水流系统进行研究, 拟为建立地下水流系统数值模型、水资源评价等方面提供参考.

1 地质背景

资料表明^{[3](P15-20)}, 研究区在第三纪与毗邻的东海隆起均表现为区域性侵蚀, 并缺失渐新世—中新世沉积, 只有零星的玄武质岩浆沿北北东向断裂喷溢; 从上新世至第四纪, 东海盆地、苏北盆地等一起进入区域性沉降阶段; 上海地区正处于苏北凹陷的南缘, 所以本区的第四系基底地形表现为西南高、东北低. 这一基底地形奠定了本区古河道和三角洲展布和沉积物发育的基本格局, 也确立了本区地下水动力场的宏观格局.

晚第三纪以来, 区内新构造运动以持续不均匀沉降为主要特征, 相继沉积了200~350m厚的第四纪松散碎屑沉积地层, 且自杭州湾北岸向长江口逐渐趋于增厚. 根据85个钻孔资料, 埋深150m以下地层为下更新统, 岩性主要为杂色粘土和砂互层, 属河流—湖泊沉积; 埋深150m以上属于中更新世、晚更新世和全新世沉积, 岩性主要为灰色粘土和灰色砂、粉砂相间, 属海陆交互相沉积.

巨厚的松散沉积物, 成为地下水赋存的主要场所, 因此成为上海地区重要的地下淡水资源. 上海地下水赋存条件和分布规律受控于区域地貌、地层岩性及厚度. 习惯上, 将地下水划分为一个潜水或微承压含水层, 五个承压含水层(自上向下依次为I~V含水层), 六个隔水层(滞水层)^{[4](P78)}.

2 地下水动力特征

由于本区第四系基底总体上由西南向东北方向倾斜, 因此区域地下水流方向为东北向. 但因埋藏条件不同, 地下水动力条件存在明显差异.

收稿日期 2004-03-18

作者简介 宋保平(1971-), 男, 陕西宜川人, 石家庄学院资源与环境系副教授, 博士.

2.1 潜水、微承压地下水

区内潜水水力坡度为万分之一,迳流条件差,并被地表水体切割而受其控制。潜水位起伏随地势变化而变化。在嘉定县城—莘庄—闵行—奉贤奉城—南汇泥城一线的北西—南东向宽阔条带,地下水位较高,为 3.0~4.0m,是区内潜水的地下水分水岭,故地下水由此分水岭向两侧流动。水位动态长期观测结果表明,大气降水成为本区潜水、微承压水的主要补给源,地表水入渗为辅助补给源,蒸发蒸腾作用是主要的排泄途径。据计算,大气降水入渗补给量最多 19.936 亿 m^3/y ,最少为 10.202 亿 m^3/y ,多年平均 14.971 亿 m^3/y ,长江水对沿岸潜水的侧向补给量为 0.055 7 亿 m^3/y ,淀山湖的侧向补给量为 0.000 237 亿 m^3/y ,而蒸发消耗的潜水量为 14.934 亿 m^3/y 。据氢同位素测定^{[5](p22-28)},1980 年潜水中氘含量为 21.3TU(北郊)和 35.6TU(浦东),与 1979~1980 年期间本区雨水中氘平均含量(30TU)接近,证明潜水的形成时间较新,地下水更新较快。

2.2 承压水

天然条件下,承压水通过西部、西北部邻区的同层承压水在区域地下水流的驱动下,向区内缓慢地侧向迳流补给。I、II、III 含水层之间,由于隔水层缺失或较薄或隔水性较差,越流现象较为普遍,可使上下含水层不同水质发生混合作用。

地下水同位素组成研究表明^{[5](p22-28)},第 III 含水层在高桥及其邻近地区在 1980 年测得氘含量为 6.26~8.27TU,在研究区西南部的金山、奉贤一带出现 4.8~10.7TU 的氘含量,说明有 20 世纪 60 年代的现代水已影响了该层地下水边缘地带,而在其余大部分地区和其他各承压含水层内,地下水氘含量在上海境内普遍小于 2TU,即地下水形成于 20 世纪 50 年代以前。第 II~V 层地下水碳-14 年龄均大于 16 ka B.P.,且在平面分布上看不出明显的迳流迹象。在垂向上埋深越大,地下水越老,与含水层层序一致^{[6](p219-224)}。

造成以上地下水同位素特征的原因可能在于:承压水在区域地下水流的驱使下到达东海陆架含水层系统(已属于长江三角洲前缘),含水介质颗粒细,孔隙度低,地下水排泄出路不通畅,迳流交替十分迟缓。

3 地下水化学场特征

地下水化学场是地下水形成与演化的结果,可以说它是不同含水层的封闭条件、水动力条件、水化学演化的“指示剂”。

3.1 TDS 统计特征

应用概率统计方法,对区内取自各个含水层中 256 个地下水样的矿化度(TDS)进行了统计分析。TDS 概率累积分布(图 1)表明,I~III 含水层中 $\text{TDS}>3\text{g/l}$ 的咸水均呈现出两个斜率不同的分布特征(第 III 含水层两种斜率差异相对不显著),两种斜率临界点对应的 TDS 值分别为:I 含水层 7g/l,II 含水层 8g/l,III 含水层 11g/l,IV 含水层 1.5g/l。两种 TDS 分布斜率可揭示不同成分水的混合作用^{[7](p38-126)},印证了水动力特征所提及的第 I~III 含水层中越流混合现象的普遍性;IV、V 含水层中 $\text{TDS}>1.4\text{g/l}$ 的咸水累积频率只以一种斜率分布,说明其来源相对比较单纯,而 $\text{TDS}<1\text{g/l}$ 的淡水明显与微咸水、咸水有不同来源。

从图 2 可以看出,第 I 层承压水的 TDS 均大于 1g/l,多分布在 3~10g/l 之间,最高值(达 17.6g/l)取自南汇县城东海岸的 7 号井;第 II 层承压水的 TDS 多为 0~9g/l,最高值出现在崇明岛最东端前哨农场的 35 号井,达 22.81g/l;第 III 层承压水的 TDS 集中在 0~3g/l 之间,最高值出现崇明岛东端向化镇的 36 号井中,为 20.08g/l;第 IV 含水层中淡水占很大比例,TDS 集中在 0.2~1g/l,最高值为 8.03g/l,出现在奉贤县城南侧的 20 号井中;第 V 含水层中同样以淡水为主,TDS 分布在 0.5~1.3g/l 之间,最高值在南汇县大团镇的 17 号井中,为 3.15g/l。即 I~III 含水层 TDS 分布特征相似,以微咸水、咸水为主,TDS 高值区沿海岸带分布;第 IV、V 含水层以淡水主,最高值相对偏西部。

3.2 TDS 空间分布特征

地下水 TDS 分布等值线图(图 2B)显示,第 V 含水层中淡水大面积分布,微咸水、咸水(TDS 最检测值只有 3.15g/l)呈团块状零星分布于研究区北部、南部及东南部;第 IV 含水层中虽然最高 TDS 高可达 20.08 g/l,咸水分别以南汇和奉贤为中心,呈孤立的团块状圈闭,并被淡水、微咸水包围,少量微咸水分布在崇明岛中部和东部;从第 III 到第 I 含水层,地下水 TDS 变化趋势明显:(1)淡水面积逐渐缩小;(2)咸水分布区

向西北和西部方向扩展;(3)TDS 高值区(17.6~22.81g/l)均分布在崇明岛北部、东部和南汇、奉贤海岸带, 向内陆和长江口沿岸 TDS 降低。

我们注意到,研究区地处东海之滨,地下水赋存的地质环境(第四纪松散堆积物)长期以来受到了海平面波动的影响。根据第四纪古地理古环境研究成果^{[8][P156][9](P436-447)[10](P181-191)[11](P109-128)},本区无论在更新世还是全新世,沉积环境始终遭受海侵影响,在第四纪地层中已至少发现 4~7 次较为明显的海侵事件(图 2A),且海侵强度具有从早至晚逐渐增强的特征,这与本区的淡/咸水分布规律相吻合。另外,地层中至今从未发现有石膏、盐岩等蒸发矿物,地下水中的 SO_4^{2-} 离子含量极低,从而排除本区地下水中咸水为蒸发浓缩作用成因的可能性。

为了进一步证明海水入侵对本区地下水化学的影响,我们对 78 个水化学样做了各含水层地下水中 Cl^- 、 HCO_3^- (meq/l)在阴离子总量中所占的比例平均值(附表),并将其与 TDS 比较。淡水、微咸水 Cl^- 与阴离子总和之比均小于 0.85,咸水、盐水均大于 0.85。所有水样的 HCO_3^- 与阴离子总和之比均小于 0.85。而研究区地下水样的 TDS 均大于 0.05g/l。因此,本区淡水化学成份多为上游(西部)岩石风化或含水介质中矿物质溶解而成,微咸水、咸水、盐水的原始来源明显与海水有关。

不过Ⅳ、Ⅴ含水层情况与其他含水层有所区别,在它们形成时地势就比较高的南部地区(含水层部分缺失),不易受弱海侵事件影响,但两个含水层中有限的咸水体却正分布于此。据钻孔揭露,图 2B 中,45、20 号钻孔附近Ⅳ、Ⅲ层之间仅由厚度不到 2m 的粉砂质粘土与细粉砂组成,而上下含水层水位差可达 1.5~2.0m,同样 17 号钻孔附近的Ⅳ、Ⅴ层之间也有类似情况。从图 2B 中我们也发现Ⅳ、Ⅴ含水层中咸水体均匀呈团块状分布,通过对两个区域的水化学分析数据的相关分析^{[11](P209-218)},结果证明这些咸水是上部Ⅲ含水层中的咸水经过越流混合作用而形成的,与海侵事件无关。

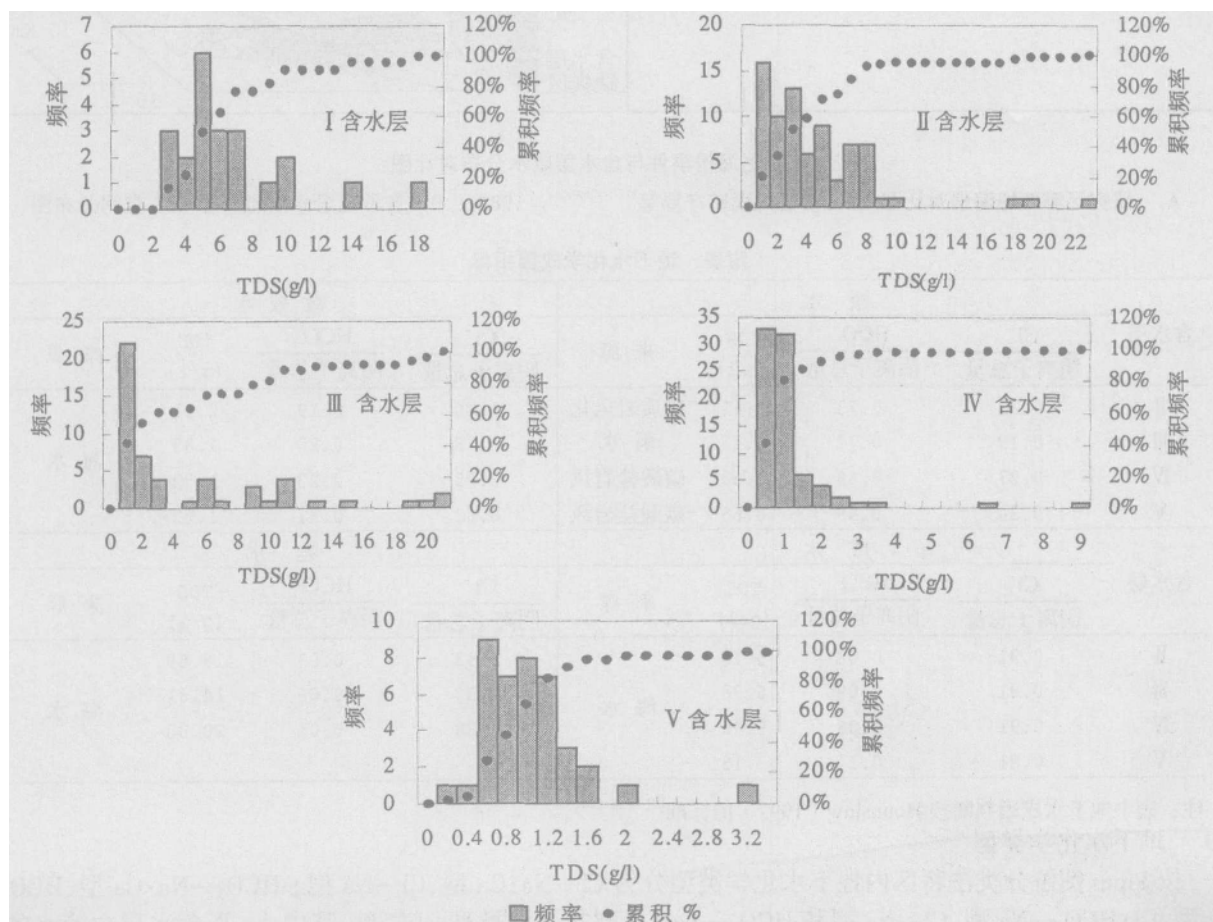


图 1 地下水 TDS 概率分布直方图及累积频率

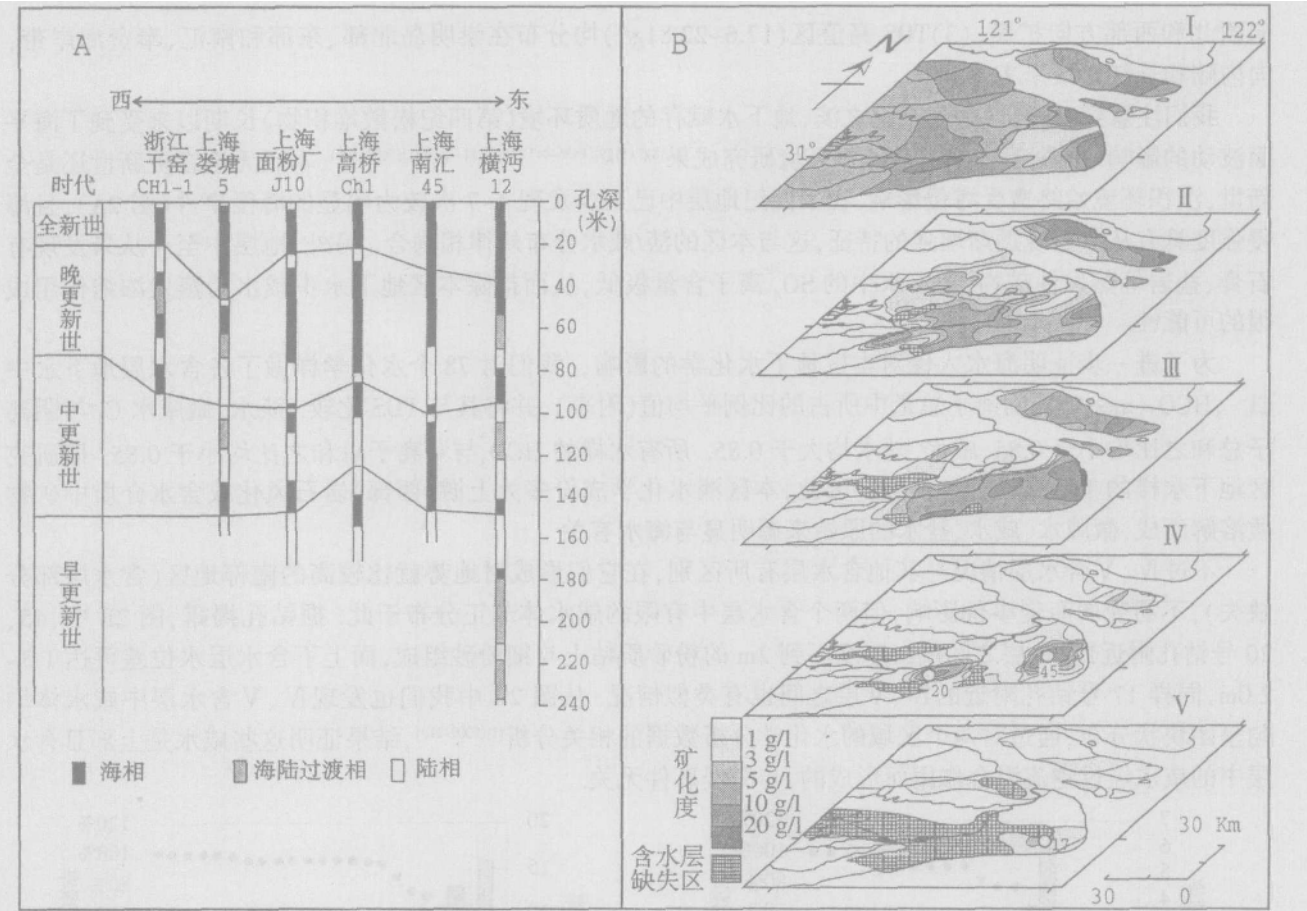


图 2 研究区海侵事件与含水层咸水分布对比图
A, 研究区第四纪海侵对比图(据江苏省地质矿产局等^[11](P109-128), 1986); B, 各承压含水层地下水 TDS 空间分布图

附表 地下水化学成因指标

淡 水					微 咸 水				
含水层	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	来 源	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	来 源	
	阴离子总量	阴离子总量	(g/l)		阴离子总量	阴离子总量	(g/l)		
Ⅱ	0.23	0.73	0.51	硅质岩风化	0.80	0.19	2.01	海 水	
Ⅲ	0.19	0.77	0.46	雨 水	0.78	0.20	1.85		
Ⅳ	0.27	0.68	0.60	碳酸盐岩风	0.75	0.22	1.62		
Ⅴ	0.34	0.59	0.65	碳酸盐岩风	0.63	0.31	1.22		
咸 水					盐 水				
含水层	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	来 源	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	来 源	
	阴离子总量	阴离子总量	(g/l)		阴离子总量	阴离子总量	(g/l)		
Ⅱ	0.92	0.08	5.73	海 水	0.93	0.03	19.69	海 水	
Ⅲ	0.91	0.09	6.88		0.92	0.06	14.81		
Ⅳ	0.91	0.06	5.91		0.88	0.01	20.08		
Ⅴ	0.81	0.11	3.15						

注: 表中地下水成因判断按 Hounsflow (1997) 的标准^[7](P38-126)。

3.3 地下水化学类型

按 Piper 图解分类法将区内地下水化学类型分为 Cl—Na·Ca 型、Cl—Na 型、HCO₃—Na·Ca 型、HCO₃—Na 型、Cl·HCO₃—Na 型、Cl—Na 型和 HCO₃—Na·Ca 型共 7 种类型^[11](P209-218)。其中 I ~ III 含水层中淡水的水化学类型以 HCO₃—Na·Ca 型为主,微咸水、咸水的水化学类型主要为 Cl—Na·Ca 型,盐水则为 Cl—Na 型。

水. 水化学类型自西向东的平面分布依次为 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型. IV~V 含水层以淡水为主,与 I~III 含水层相比,硫酸根离子略有偏高,钠离子略有降低,但仍较富集,钙、镁离子明显减少,很明显是由于发生了较强烈的阳离子交换作用,使得地层中粘土矿物中的钠离子与地下水中的钙离子相互交换,造成富钙型水向富钠型水演化. 其水化学类型平面分布为:围绕咸水,由外向内大致依次为: HCO_3-Na 型、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}$ 型、 $\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型.

4 地下水流系统划分

正如第四系沉积地层系统一样,长江河口地区地下水流系统是长江三角洲地下水流系统的一部分,在区域地下水流驱使下,水动力宏观格局是自西或西南向东或东北方向流动. 通过上述地下水环境系统特征分析,对研究区地下水埋藏深度、含水层的封闭程度、水动力特征、水化学特征及演化方式已有一个较为清晰的认识,据此在研究区划分出三个地下水流系统:

浅部地下水流系统:包括微承压含水层底板以上含水层、滞水层,厚度 10~45m. 地下水环境较开放,水化学演化以地表水特别是大气降水的淡化稀释作用为主,使咸水体分布在地势较低洼的内陆和东部沿海地区. 地下水动力单元包括大气水或地表水下渗流和蒸发泄水流,水质更新相对较迅速.

中部地下水流系统:范围是 I 层顶板至 III 层底板,厚度 80~120m. 咸水大面积分布的格局受历史时期海侵事件控制,越流混合作用较普遍,致使地下咸水 TDS 累积频率呈两种斜率分布. 阳离子交换作用主要发生在淡水区内,强度不大. 地下水动力单元包括越流和区域地下水流,造成化学类型明显的自西向东平面分布特征. 由于地下水处于半封闭状态,水质更新缓慢.

深部地下水流系统:范围是 IV 层顶板至 V 层底板,厚度 150~220m. 以淡水为主,咸水体呈团块状分布,它是上部咸水通过越流混合作用形成的,与海侵事件无关. 阳离子交换作用是地下水化学演化的主要方式,造成本系统中多为钠型水. 地下水动力单元包括区域地下水流和越流,其中越流并不普遍. 由于区域地下水流十分缓慢,加上地质环境封闭,地下水基本处于迟滞状态,不易更新.

参考文献:

- [1]宋保平,张先林,方正.长江河口地区第四系地下水化学演化机制[J].地理学报,2000,55(2).
- [2]过仲阳,陈中原,王张华.长江河口地区第四纪地下咸淡水界面的动态变化[J].古地理学报,2001,3(3).
- [3]陈颐亨.东海新生代构造运动对比[J].上海地质,1988,(3).
- [4]上海市水文地质工程地质队.上海市水文地质普查总结报告(1:20 万)[R].1987-12.
- [5]袁兆盾,孙翠玉,卫克勤.上海地区地下水的同位素组成及其水文地质意义[J].上海地质,1983,(2).
- [6]郝爱兵,王开宁,哈承佑.历史海平面变化对上海地区地下水的影响[J].地质论评,1998,44(2).
- [7]A.W.Hounslow. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*[M]. Boca Raton: Lewis Publisher, 1995.
- [8]江苏省地质矿产局,浙江省地质矿产局,上海经济区地质中心.长江三角洲地区水文地质工程地质综合评价报告[R].1986-04.
- [9]陈中原,杨文达.长江河口地区第四纪古地理古环境变迁[J].地理学报,1991,46(4).
- [10]Chen Zhongyuan, Chen Zhenglou and Zhang Weigou. *Quaternary Stratigraphy and Trace-Element Indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with Special Reference to Marine Transgressions*[J]. Quaternary Research, 1997, 47(2).
- [11]闵秋宝,汪品先.论上海地区的第四纪海进[J].同济大学学报(海洋地质版),1979,(2). (责任编辑 张 转)

Characteristics of groundwater flow system in Shanghai area

SONG Bao-ping¹, FANG Zheng²

(1. Department of Resources and Environment, Shijiazhuang College, Shijiazhuang 050035, China;

2. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract Groundwater flow system of Shanghai area is part of regional flow system of Yangtze River delta; however, it has its own characteristics due to special environment of estuarine delta. Interaction of Quaternary sea-level fluctuation and estuarine delta sedimentation had played important roles in affecting formation and chemical evolution of groundwater. There are mainly three ways of groundwater chemical evolution: dilution by atmospheric precipitation, mixture of different waters through leaky system, and exchange of cation. Study reveals that the obvious differences exist for different aquifers in term of deepness, hydraulic dynamic, and chemical characteristics and evolution, so three groundwater flow system is divided in study area.

Key words groundwater flow system; water chemical evolution; Shanghai region