

## 上海市地下水的矿化度时空演化规律研究

王玉强<sup>1,2</sup>, 柳建设<sup>1\*</sup>

1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620

2. 华东政法大学基建处, 上海 201620

**摘要:** 本文采用 SPSS17.0 软件分析了 2001~2013 年上海市地下水的矿化度, 探讨了潜水层及第 II~V 承压含水层的矿化度时间演化趋势和垂直分布规律。研究发现: 从时间演化总体趋势来看, 潜水含水层、第二承压含水层和第四承压含水层的矿化度呈增加趋势, 表明水质趋向盐化和恶化; 其余各含水层矿化度呈降低趋势, 表明水质趋向良性。从垂直方向分布情况来看, 潜水含水层和第二、第五承压含水层的矿化度高于其他含水层, 同时第二承压含水层的矿化度变化幅度显著。

**关键词:** 上海市; 地下水矿化度; 时空演化; 垂直分布

**中图分类号:** X523

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2016)01-0124-05

## A Study on the Spatial-temporal Evolution Law of the Salinity of Groundwater in Shanghai City

WANG Yu-qiang<sup>1,2</sup>, LIU Jian-she<sup>1\*</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering/Donghua University, Shanghai 201620, China

2. Infrastructure Department/East China University of Political Science and Law, Shanghai 201620, China

**Abstract:** This paper analyzed the salinity of groundwater in Shanghai City from 2001 to 2013 with SPSS17.0 software and explored the spatial-temporal evolution trend and vertical distribution law of salinity in the unconfined aquifer and from the second to the fifth confined aquifer. The results showed that in terms of time-space evolution trend, there was an increasing trend in the salinity in the unconfined aquifer, the second and the fourth confined aquifer to indicate the salinization and deterioration of water. The salinity in other aquifers was decreasing to indicate the improvement of water. From the perspective of vertical distribution, the salinity in the unconfined aquifer, the second and the fifth aquifer were higher than others, meanwhile, there was a significant variation in the salinity of the second confined aquifer.

**Keywords:** Shanghai City; salinity in groundwater; spatial-temporal evolution; vertical distribution

在现代城市的飞速发展过程中, 城市建设对地下水的需求越来越大, 而过量开采地下水、污染环境等人类活动干扰和破坏了地下水环境原有的天然平衡状态, 进而导致地下水水质不断恶化、地下水环境污染愈益严重。业内学者对水环境污染问题从不同层面进行研究。其中, 地下水矿化度问题对土壤盐渍化格局有着直接影响, 相关研究也较多。如王欣宝等<sup>[1]</sup>, 苏里坦等<sup>[2]</sup>, 王水献等<sup>[3]</sup>, 马兴旺等<sup>[4]</sup>, 孙月等<sup>[5]</sup>, 胡涛等<sup>[6]</sup>以及吕晓立等<sup>[7]</sup>分别对河北地区、新疆三工河流域、开孔河流域、民勤、石羊河流域以及山东省武城县、兰州市地下水矿化度的时空分布特征进行了研究, 并针对以上区域的地下水矿化度问题提出对策。通过相关文献分析发现, 尚未有对上海地区地下水矿化度问题的专题研究, 这与上海的经济龙头地位不相适应。因此, 本文拟借助翔实的数据, 对上海经济快速发展时期(2001~2013)地下水矿化度的时间演化趋势和垂直方向分带分布规律进行研究, 以便为合理开发利用地下水资源提供一定思路 and 支撑。

### 1 研究区概况

上海市地处东经 120°52'至 122°12', 北纬 30°40'至 31°53'之间, 位于太平洋西岸, 亚洲大陆东沿, 中国南北海岸中心点, 长江和黄浦江入海汇合处。北界长江, 东濒东海, 南临杭州湾, 西接江苏和浙江两省。上海市现辖区总面积为 6340.5 km<sup>2</sup>, 其中陆地面积 6218.65 km<sup>2</sup>, 长江口水域面积 1107 km<sup>2</sup>, 滩涂面积 376 km<sup>2</sup>, 海岸线长 448.66 km。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

**收稿日期:** 2014-12-20

**修回日期:** 2015-04-20

**基金项目:** 上海市重点学科建设项目(B604)

**作者简介:** 王玉强(1971-),男,博士,高级工程师,主要从事环境规划和工程经济管理与研究工作. E-mail:1375044408@qq.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:liujianshe@dhu.edu.cn

I-V 含水层)，六个隔水层（滞水层）。

### 2 研究数据来源

本次研究所用的上海市潜水含水层及第II~V承压含水层 2001~2013 年地下水总矿化度的原始数据，均来自上海市规划和土地资源管理局发布的 2001~2013 年《上海市地质环境状况公报》<sup>[8]</sup>。相关数据还包括上海市环境保护局发布的 2000~2013 年《上海市水环境保护情况统计数据》<sup>[9]</sup>、上海市水务局发布的 1998~2013 年《上海市水资源公报》<sup>[10]</sup>。数据分析处理工具为 SPSS17.0 软件。

### 3 结果与分析

#### 3.1 地下水矿化度的时间演化趋势分析

3.1.1 潜水含水层矿化度的时间演化趋势 根据图 1 可知，潜水含水层矿化度与时间序列呈非线性三次曲线关系。根据表 1 可知，潜水含水层矿化度与演化时间序列变量的数学模型如下：

回归模型构建： $y=b_0+b_1t+b_2t^2+b_3t^3$

拟合曲线模型： $y=74.814+212.325t-20.889t^2+0.638t^3$

（公式中， $y$ ——潜水含水层矿化度； $t$ ——演化时间序列）

经F检验，该模型具有一定的显著性水平（ $P=0.059$ ），可以解释54.5%的变异因素（ $R^2=0.545$ ），还有45%左右的变异无法解释。

表 1 潜水含水层矿化度演化模型汇总和参数估计值

Table 1 Summary of evolutionary models of the salinity in the unconfined aquifer and parameter estimation

方程 Equation	模型汇总 Summary of models					参数估计值 Parameter estimation			
	$R^2$	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	Sig.	常数 Constant	$b_1$	$b_2$	$b_3$
三次曲线 Cubic curve	0.545	3.595	3	9	0.059	74.814	212.325	-20.889	0.638

注:因变量—潜水含水层矿化度质量浓度含量(mg/L); 自变量—时间序列

Note: Dependent variable—the concentration of salinity in the unconfined aquifer(mg/L); Independent variable—time series

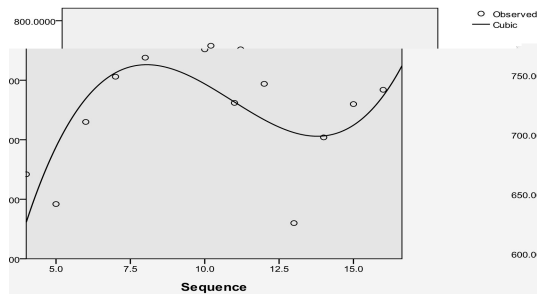


图 1 潜水含水层矿化度时间演化趋势图(mg/L)

Fig.1 The trend of spatial-temporal evolution of salinity in the unconfined aquifer (mg/L)

3.1.2 第二承压含水层矿化度的时间演化趋势 根据图 2 可知，第二承压含水层矿化度与时间序列呈“U”型非线性二次曲线关系。根据表 2 可知，第二承压含水层矿化度与演化时间序列变量的数学模型如下：

回归模型构建： $y=b_0+b_1t+b_2t^2$

拟合曲线模型： $y=1737.697-240.269t+11.827t^2$

（公式中， $y$ ——第二承压含水层矿化度； $t$ ——演化时间序列）

经F检验，该模型显著性水平较高（ $P < 0.05$ ），具有理想的统计学意义；可以解释48.2%的变异因素（ $R^2=0.482$ ），还有52%左右的变异无法解释。

表 2 第二承压含水层矿化度演化模型汇总和参数估计值

Table 2 Summary of evolutionary models of the salinity in the 2<sup>nd</sup> confined aquifer and parameter estimation

方程 Equation	模型汇总 Summary of models					参数估计值 Parameter estimation		
	$R^2$	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	Sig.	常数 Constant	$b_1$	$b_2$
三次曲线 Cubic curve	.482	4.649	2	10	.037	1737.697	-240.269	11.827

注:因变量—第二承压含水层矿化度质量浓度含量(mg/L); 自变量—时间序列

Note: Dependent variable—the salinity in the 2<sup>nd</sup> confined aquifer(mg/L); Independent variable—time series

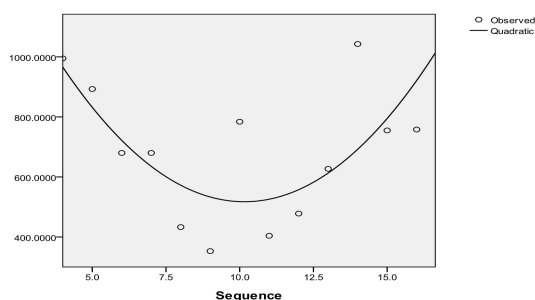


图 2 第二承压含水层矿化度时间演化趋势图(mg/L)

Fig.2 The trend of spatial-temporal evolution of the salinity in the 2<sup>nd</sup> confined aquifer (mg/L)

3.1.3 第三承压含水层矿化度的时间演化趋势 根据图 3 可知, 第三承压含水层矿化度与时间序列呈非线性三次曲线关系。根据表 3 可知, 第三承压含水层矿化度与演化时间序列变量的数学模型如下:

回归模型构建:  $y=b_0+b_1t+b_2t^2+b_3t^3$

拟合曲线模型:  $y=1126.123-210.846t+20.169t^2-0.604t^3$

(公式中,  $y$ —第三承压含水层矿化度;  $t$ —演化时间序列)

经F检验, 该模型显著性水平很高 ( $P=0.01$ ), 具有理想的统计学意义; 可以解释70.2%的变异因素 ( $R^2=0.702$ ), 还有30%左右的变异无法解释。

表 3 第三承压含水层矿化度演化模型汇总和参数估计值

Table 3 Summary of evolutionary models of the salinity in the 3<sup>rd</sup> confined aquifer and parameter estimation

方程 Equation	模型汇总 Summary of models					参数估计值 Parameter estimation			
	$R^2$	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	Sig.	常数 Constant	$b_1$	$b_2$	$b_3$
三次曲线 Cubic curve	.702	7.053	3	9	.010	1126.123	-210.846	20.169	-604

注:因变量—第三承压含水层矿化度质量浓度含量(mg/L);自变量—时间序列

Note: Dependent variable—the salinity in the 3<sup>rd</sup> confined aquifer(mg/L); Independent variable—time series

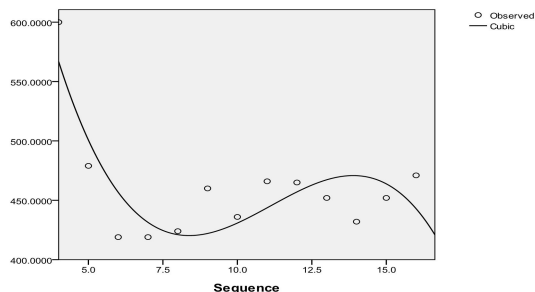


图 3 第三承压含水层矿化度时间演化趋势图(mg/L)

Fig.3 The trend of spatial-temporal evolution of salinity in the 3<sup>rd</sup> confined aquifer (mg/L)

3.1.4 第四承压含水层矿化度的时间演化趋势 根据图 4 可知, 第四承压含水层矿化度与时间序列呈非线性三次曲线关系。根据表 4 可知, 第四承压含水层矿化度与演化时间序列变量的数学模型如下:

回归模型构建:  $y=b_0+b_1t+b_2t^2+b_3t^3$

拟合曲线模型:  $y=858.231-116.984t+14.251t^2-0.509t^3$

(公式中,  $y$ —第四承压含水层矿化度;  $t$ —演化时间序列)

经F检验, 该模型显著性水平比较低 ( $P > 0.05$ ), 统计学意义不明显; 可以解释33%的变异因素 ( $R^2=0.33$ ), 还有67%左右的变异无法解释。

表 4 第四承压含水层矿化度演化模型汇总和参数估计值

Table 4 Summary of evolutionary models of the salinity in the 4<sup>th</sup> confined aquifer and parameter estimation

方程 Equation	模型汇总 Summary of models					参数估计值 Parameter estimation			
	$R^2$	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	Sig.	常数 Constant	$b_1$	$b_2$	$b_3$
三次曲线 Cubic curve	.330	1.476	3	9	.286	858.231	-116.984	14.251	-0.509

注:因变量—第四承压含水层矿化度质量浓度含量(mg/L);自变量—时间序列

Note: Dependent variable—the salinity in the 4<sup>th</sup> confined aquifer(mg/L); Independent variable—time series

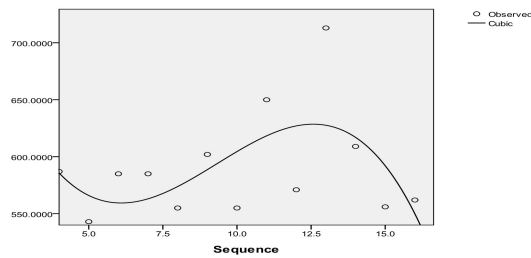


图 4 第四承压含水层矿化度时间演化趋势图(mg/L)

Fig.4 The trend of spatial-temporal evolution of salinity in the 4<sup>th</sup> confined aquifer (mg/L)

3.1.5 第五承压含水层矿化度的时间演化趋势 根据图 5 可知, 第五承压含水层矿化度与时间序列呈非线性三次曲线关系。根据表 5 可知, 第五承压含水层矿化度与演化时间序列变量的数学模型如下:

回归模型构建:  $y=b_0+b_1t+b_2t^2+b_3t^3$

拟合曲线模型:  $y=1337.797-196.493t+18.656t^2-0.598t^3$

(公式中,  $y$ —第五承压含水层矿化度;  $t$ —演化时间序列)

经 F 检验, 该模型显著性水平较高 ( $P < 0.05$ ), 具有明显的统计学意义; 并且可以解释 67.6% 的变异因素 ( $R^2=0.676$ ), 还有 32%左右的变异无法解释。

表 5 第五承压含水层矿化度演化模型汇总和参数估计值

Table 5 Summary of evolutionary models of salinity in the 5<sup>th</sup> confined aquifer and parameter estimation

方程 Equation	模型汇总 Summary of models					参数估计值 Parameter estimation				
	$R^2$	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	Sig.	常数 Constant	$b_1$	$b_2$	$b_3$	
三次曲线 Cubic curve	.676	6.268	3	9	.014	1337.797	-196.493	18.656	-.5980	

注:因变量—第五承压含水层矿化度质量浓度含量(mg/L);自变量—时间序列

Note: Dependent variable—the salinity in the 5<sup>th</sup> confined aquifer (mg/L); Independent variable—time series

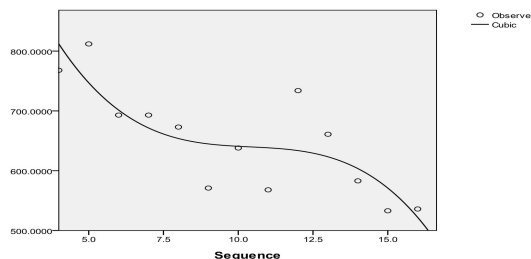


图 5 第五承压含水层矿化度时间演化趋势图(mg/L)

Fig.5 The trend of spatial-temporal evolution of salinity in the 5<sup>th</sup> confined aquifer (mg/L)

### 3.2 地下水矿化度的空间分布分析

上海市地下水各承压含水层地下水矿化度垂直方向分带分布情况详见表 6 和图 6。

表 6 上海市各承压含水层地下水矿化度空间分布描述统计

Table 6 Statistics of the spatial distribution of the salinity in groundwater confined aquifers in Shanghai City

项目 Item	潜水层矿化度 Salinity in the unconfined aquifer	承压II层矿化度 Salinity in the 2 <sup>nd</sup> confined aquifer	承压III层矿化度 Salinity in the 3 <sup>rd</sup> confined aquifer	承压IV层矿化度 Salinity in the 4 <sup>th</sup> confined aquifer	承压V层矿化度 Salinity in the 5 <sup>th</sup> confined aquifer
N 有效	13	13	13	13	13
N 缺失	9	9	9	9	9
均值	722.384615	683.307692	459.615385	590.230769	651.000000
均值的标准误	13.3476870	61.3142792	12.9810209	12.9724332	24.7865245
标准差	48.1257701	221.0717774	46.8037364	46.7727731	89.3690849
偏度	-.786	.050	2.461	1.741	.268
偏度的标准误	.616	.616	.616	.616	.616
峰度	-.362	-.927	7.466	3.283	-.919
峰度的标准误	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191
极小值	630.0000	353.0000	419.0000	543.0000	533.0000
极大值	779.0000	1043.0000	600.0000	713.0000	812.0000

注:相关指标均根据上海市2001~2013年度地质环境状况公报中数据计算<sup>[6-8]</sup>

Note: The relevant indexes were calculated according to the data of the 2001-2013 Annual Bulletin of Geological Environment of Shanghai City (mg/L)<sup>[6-8]</sup>

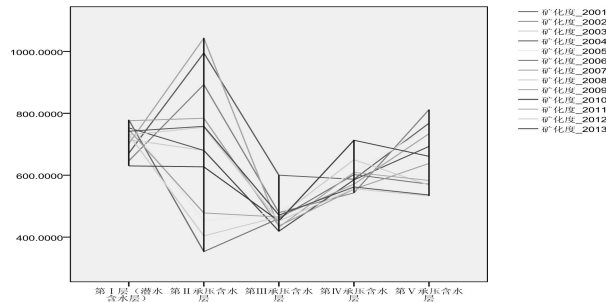


图 6 上海市承压含水层地下水矿化度的空间分布图(mg/L)

Fig.6 Spatial distribution of the salinity in confined aquifers in Shanghai City (mg/L)

### 4 结论

以上研究结果表明，一方面，从时间演化总体趋势来看，上海市潜水含水层、第二承压含水层和第四承压含水层的矿化度呈增加趋势，表明水质出现盐化和恶化趋势；其余各含水层矿化度呈降低趋势，表明水质趋向良性发展。具体来看，在上海市各个承压含水层中，潜水含水层和第三、第五承压含水层矿化度与时间序列呈复杂的非线性三次曲线关系，其中潜水含水层模型具有一定的显著性水平 ( $P=0.059$ )，第三、第五承压含水层模型均比较显著 ( $P < 0.05$ )。第二承压含水层矿化度与时间序列呈“U”型非线性二次曲线关系，模型显著性水平较高 ( $P < 0.05$ )。其余含水层模型显著性水平均偏低 ( $P > 0.05$ )，统计学意义不明显。另一方面，从垂直方向空间分布情况来看，上海市潜水含水层和第二、第五承压含水层的地下水矿化度较高于其他几个承压含水层，同时第二承压含水层的地下水矿化度变化幅度非常大。

笔者结合相关文献与本研究结果，认为上海市地下水矿化度分布出现以上时空变异规律的主要原因如下：一是由于对地下水超量开采，尤其是从早期的浅层含水层开采发展到现在的深层含水层开采；二是由于对地下含水层人工回灌，与开采量趋势相同的是回灌量也从早期的浅层含水层回灌发展到现在的深层含水层回灌；三是由于海水入侵。上述原因中，尤其是前两条原因，虽然在一定程度上缓解了上海地区地面沉降的速度，但却极有可能给地下水环境带来一定程度的负面影响。从矿化度在时间和空间尺度上的演化规律来看，与地下水实际开采量和回灌量的变动趋势非常接近，这说明人为因素确实对上海市地下水环境的天然平衡状态产生了较大的干扰破坏作用。鉴于目前矿化度方面的研究基本上都是其它地区的<sup>[1-7]</sup>，罕见上海地区地下水矿化度的专题研究，而各个地区的地质环境、人文环境、水文环境等各有不同，研究结果之间可比性不强，因此，本研究主要应用在上海环境规划中。结合以上研究结果，我们建议，上海地区在制定控制地面沉降的政策和措施时，须充分考虑到对地下水环境的保护，使控制地面沉降与保护地下水环境质量两者之间达到适度平衡。

### 参考文献

[1] 王欣宝,尚琳群,李玉龙,等.环渤海河北地区地下水环境演化研究[J].地质调查与研究,2004(3):149-156  
 [2] 苏里坦,宋郁东,张展翔,等.新疆三工河流域地下水矿化度的时空变异及其分形特征[J].地质科技情报,2005,24(1):85-90  
 [3] 王水献,王云智,董新光,等.开孔河流域浅层地下水矿化度时空变异及特征分析[J].水土保持研究,2007,14(2):293-296  
 [4] 马兴旺,吕贻忠,李保国,等.绿洲土地利用影响地下水矿化度时空变化模拟模型的构建[J].自然资源学报,2009,24(2):268-275  
 [5] 孙月,毛晓敏,杨秀英,等.西北灌区地下水矿化度变化及其对作物的影响[J].农业工程学报,2010,26(2):103-108  
 [6] 胡涛,高佩玲,孙晓俊,等.基于GIS的地下水矿化度分布特征研究[J].中国农村水利水电,2013(4):32-35,39  
 [7] 吕晓立,邵景力,刘景涛,等.兰州市区地下水矿化度分布特征及成因分析[J].干旱区资源与环境,2013(7):23-27  
 [8] 上海市规划和土地资源管理局.上海市 2001 年-2013 年地质环境状况公报[EB/OL].(2015-02-23).<http://www.shgtj.gov.cn/dzkc/>  
 [9] 上海市环境保护局.上海市水环境保护情况统计数据(2000-2013 年)[EB/OL].(2015-02-28).[http://www.sepb.gov.cn/hb/fa/cms/shhj/list\\_login.jsp?channelId=2074](http://www.sepb.gov.cn/hb/fa/cms/shhj/list_login.jsp?channelId=2074)  
 [10] 上海市水务局(上海市海洋局).上海市 1998 年-2013 年水资源公报[EB/OL].(2015-02-23).<http://222.66.79.122/BMXX/default.htm>