

## 基于参数灵敏度分析的地下水数值模拟研究——以黑龙江桦南县为例

高翠萍<sup>1</sup>, 杜新强<sup>2</sup>, 杨悦锁<sup>1</sup>, 贾思齐<sup>1</sup>

(1. 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110044; 2. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林长春 130021)

**摘要** 采用正交试验法对地下水流数值模拟中的参数灵敏度进行分析, 以黑龙江省桦南县为例, 根据研究区实际的水文地质条件选取了潜水的降水入渗补给系数、渗透系数、给水度、弱透水层的垂向渗透系数以及承压水的渗透系数和弹性释水系数 6 个参数进行研究, 每个参数选取 5 个水平值。结果表明: 潜水含水层的渗透系数对模型计算水位的影响最大, 因此在利用 Visual MODFlow 做水资源评价前查明研究区的水文地质参数特别是潜水的渗透系数对于正确建立模型十分必要。

**关键词** 灵敏度分析; 正交试验法; 数值模拟; 地下水

**中图分类号** S273.4 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)20-053-03

## Study on Groundwater Numerical Simulation Based on Parameter Sensitivity Analysis—A Case Study of Huanan County in Heilongjiang Province

GAO Cui-ping<sup>1</sup>, DU Xin-qiang<sup>2</sup>, YANG Yue-suo<sup>1</sup> et al (1. Key Laboratory of Regional Environment & Eco-remediation of Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044; 2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment of Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130021)

**Abstract** The orthogonal experimental method was used to do the parameter sensitivity analysis of groundwater numerical simulation in Huanan County of Heilongjiang Province. 6 parameters including feed coefficient of precipitation infiltration, permeability coefficient, water supply degree, vertical permeability coefficient of weak permeable layer, permeability coefficient of confined water, elastic storativity, were considered to do sensitivity analysis according to the hydrogeological conditions, and 5 level values of each parameter were selected. The results showed that the permeability coefficient of unconfined aquifer has the greatest impact to the water level calculated by the numerical simulation model. It is necessary to find out the hydrogeological parameters especially the permeability coefficient of unconfined aquifer when doing water resource evaluation by use of Visual MODFlow.

**Key words** Sensitivity analysis; Orthogonal experiment method; Numerical simulation; Groundwater

地下水流数值模拟已经成为地下水资源评价的重要方法, 然而在建立数值模拟模型的过程中要对水文地质条件进行概化。概化使得模型参数具有不确定性, 最终导致模型计算结果的不确定性。灵敏度分析能够评价模型中各个参数的不确定性对模型运行结果的影响, 因此, 在做地下水流数值模拟的过程中, 对模型参数进行灵敏度分析非常必要<sup>[1]</sup>。参数灵敏度分析是基于数理统计原理分析的不确定性方法<sup>[2]</sup>, 是地下水流数值模拟中不可或缺的一个步骤, 目的是确定参数的不确定性对模型的影响程度<sup>[3]</sup>。在参数识别的过程中, 若某个参数的微小变化能引起计算结果较大程度的改变, 则表明该参数的灵敏度较高; 反之, 则较低。灵敏度分析方法种类很多, 如多元回归法、正交试验法、区域灵敏度分析法、普适似然度不确定性估计法等<sup>[4]</sup>。笔者以黑龙江省桦南县为例, 利用 Visual MODFlow 软件对地下水流进行模拟, 将正交试验法<sup>[5-6]</sup>引入参数灵敏度分析中, 并选取了潜水的降水入渗补给系数、渗透系数、给水度、弱透水层的垂向渗透系数以及承压水的渗透系数和弹性释水系数 6 个参数进行灵敏度分析。

## 1 研究区概况

黑龙江省佳木斯市桦南县城(图 1), 东西长约 12 km, 南北宽约 8 km, 面积 96 km<sup>2</sup>。多年平均气温 3.1 ℃, 多年平

均降水量 552 mm, 多年平均水面蒸发量(E601)约 1 340 mm。根据地下水的补给、径流、排泄条件及水力联系等特征将含水层划分为潜水含水层和承压含水层<sup>[7]</sup>。

## 2 模型的建立

**2.1 水文地质概念模型的建立** 研究区潜水的天然水力坡度为  $1.1 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-2}$ , 承压水的天然水力坡度为  $1.3 \times 10^{-3} \sim 7.4 \times 10^{-3}$ , 流场较为平缓, 渗流基本符合达西定律, 潜水和承压水之间通过越流进行水量交换, 且水流各要素随时间变化, 因此整个渗流区域地下水的运动特征为三维非稳定流; 水文地质参数随空间变化, 概化为非均质各向同性。综上所述, 该研究将水文地质概念模型概化为非均质各向同性的三维非稳定流模型。潜水含水层北部边界为河流, 因此, 将北部边界概化为水头边界, 其他边界根据地下水流场概化为流量边界; 承压含水层所有的边界均根据地下水流场概化为流量边界, 弱透水层侧向边界概化为隔水边界。模型顶部为潜水面边界, 主要接受大气降水补给, 同时以垂直蒸发的形式排泄; 模型底部有相对隔水的泥岩, 概化为不透水边界。

**2.2 数学模型的建立** 根据水文地质概念模型, 建立如下地下水流数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) + \varepsilon = S \frac{\partial h}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega \\ k_x (\frac{\partial h}{\partial x})^2 + k_y (\frac{\partial h}{\partial y})^2 + k_z (\frac{\partial h}{\partial z})^2 - \frac{\partial h}{\partial z}(k_z + p) + p = \mu \frac{\partial h}{\partial t}, (x, y, z) \in \Gamma_0 \\ h(x, y, z) |_{t=0} = h_0(x, y, z), (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t), (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ k_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t), (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (1)$$

**基金项目** 辽宁省创新团队项目(LT2015017); 沈阳市科技创新专项资金(F15-113-9-00)。

**作者简介** 高翠萍(1986-), 女, 内蒙古通辽人, 助理工程师, 从事地下水数值模拟及地下水污染修复研究。

**收稿日期** 2016-06-08

式中,  $\Omega$  为渗流区域;  $h$  为地下水位标高, m;  $k_x, k_y, k_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的渗透系数, m/d;  $k_0$  为边界法向方向的渗透系数, m/d;  $S$  为自由面以下含水层的单位储水系数 (1/m);  $\varepsilon$  为含水层的源汇项, m/d;  $p$  为潜水面的蒸发及降水补给量

等, m/d;  $\mu$  为潜水含水层重力给水量;  $\Gamma_0$  为渗流区域的上边界, 即地下水的自由水面;  $\Gamma_1, \Gamma_2$  为渗流区的第 1 类、第 2 类边界;  $q$  为二类边界单位面积流量,  $m^3/(m^2 \cdot d)$ 。

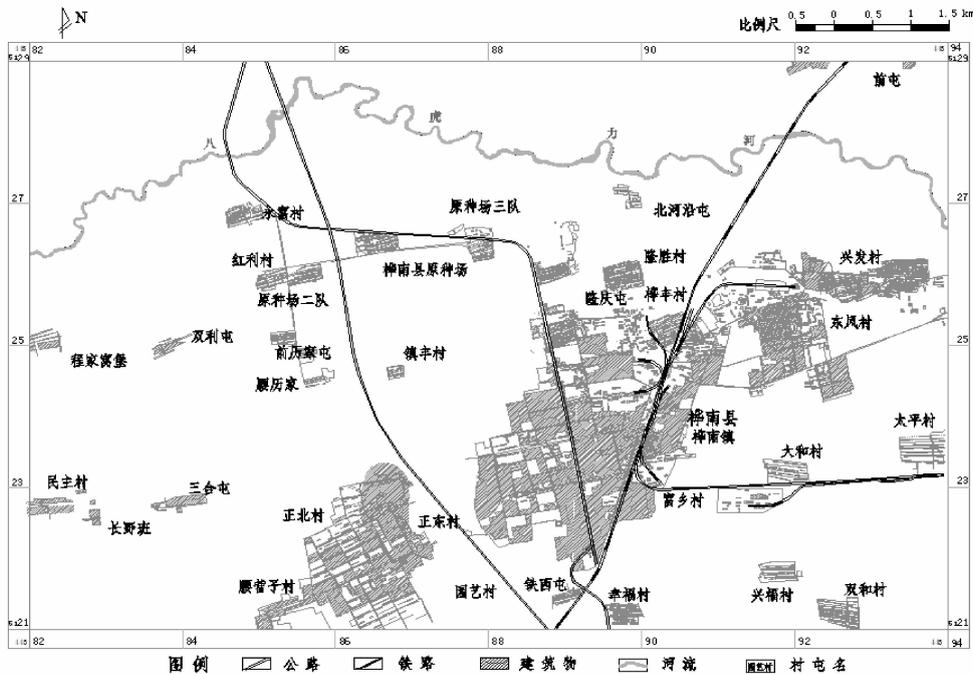


图 1 研究区区位示意

Fig. 1 The location of study area

**2.3 数值模型的建立及求解** 该模型应用了 Visual MODFLOW 软件, 方法是在计算区域内采用矩形剖分和线性插值, 应用伽辽金有限差分法进行求解。网格长 120 m, 宽 80 m, 网格剖分情况见图 2。该水位统测时间是 2009 年 11 月 11 日至 2010 年 10 月 31 日, 选取 2009 年 11 月 11 日至 2010 年 5 月 6 日为识别期, 共分为 36 个时段, 2010 年 5 月 6 日至 10 月 31 日为验证期, 共分为 36 个时段。经过模型的识别和验证, 最后确定水文地质参数见表 1, 水位拟合情况见图 3、4。

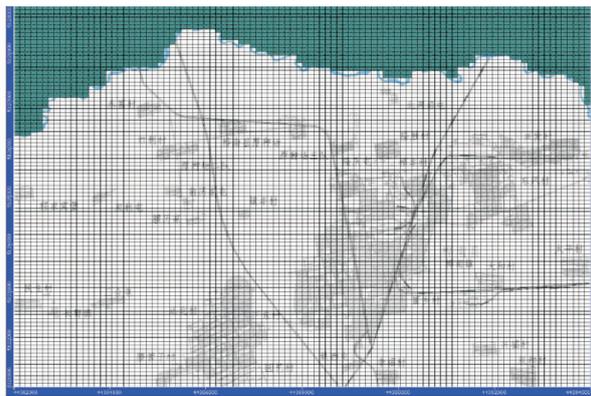


图 2 模型网格平面

Fig. 2 Model grid plane

表 1 识别后水文地质参数值

Table 1 Value of hydrogeological parameters after identification

分区 Partition	潜水 Ground water			承压水 Confined water	
	渗透系数( $k$ ) m/d	给水度( $\mu$ )	降水入渗补 给系数( $\alpha$ )	渗透系数( $k$ ) m/d	弹性释水 系数( $\mu^*$ )
I	0.10	0.02	0.11	0.12	0.000 98
II	17.00	0.43	0.11	0.17	0.000 90
III	15.00	0.09	0.28	0.10	0.000 99

注: I、II、III 分别表示潜水含水层、承压水含水层及弱透水层的 3 个分区。

Note: I, II, III stands for phreatic aquifer, confined aquifer and weak permeable layer.

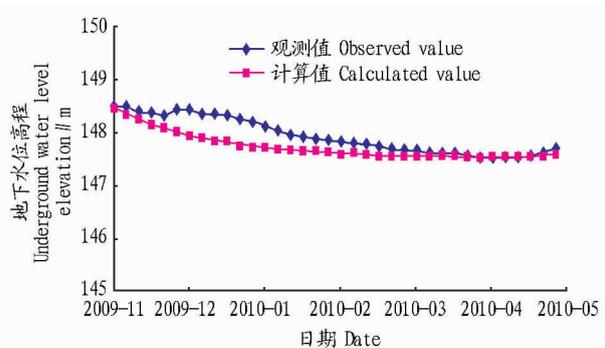


图 3 93 号井识别期水位拟合情况

Fig. 3 The fitting of water level in the identification stage of No. 93 well

**3 灵敏度分析**

根据研究区的实际水文地质条件, 同时综合数值模型, 选取了潜水的降水入渗补给系数、渗透系数、给水度、弱透水

层的垂向渗透系数、承压水的渗透系数和弹性释水系数进行分析, 选取的水平数为 5, 即第 3 个是已识别的参数, 其余为

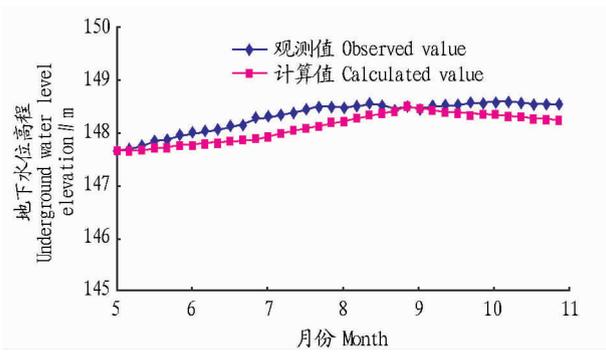


图 4 93 号井验证期水位拟合情况

Fig. 4 The fitting of water level in the verification stage of No. 93 well

已识别的参数上下浮动 10% 和 20% (表 2)。

表 2 各参数不同水平值

Table 2 Different levels of each parameter

水平 Levels	分区 Partition	潜水含水层 Phreatic aquifer			弱透水层垂 向渗透系数 (D) Vertical permeability coefficient of weak permeable layer	承压含水层 Confined aquifer	
		降水入渗补给系数 (A) Feed coefficient of precipitation infiltration	渗透系数 (B) Permeability coefficient	给水度 (C) Water supply degree		渗透系数 (E) Permeability coefficient	弹性释水系数 (F) Elastic storativity
1	I	0.088	0.080	0.005 6	0.000 008	0.096	0.000 784
	II	0.088	13.600	0.344 0	0.000 080	0.136	0.000 720
	III	0.224	12.000	0.072 0	0.000 400	0.080	0.000 792
2	I	0.099	0.090	0.006 3	0.000 009	0.108	0.000 882
	II	0.099	15.300	0.387 0	0.000 090	0.153	0.000 810
	III	0.252	13.500	0.081 0	0.000 450	0.090	0.000 891
3	I	0.110	0.100	0.007 0	0.000 010	0.120	0.000 980
	II	0.110	17.000	0.430 0	0.000 100	0.170	0.000 900
	III	0.280	15.000	0.090 0	0.000 500	0.100	0.000 990
4	I	0.121	0.110	0.007 7	0.000 011	0.132	0.001 078
	II	0.121	18.700	0.473 0	0.000 110	0.187	0.000 990
	III	0.308	16.500	0.099 0	0.000 550	0.110	0.001 089
5	I	0.132	0.120	0.008 4	0.000 012	0.144	0.001 176
	II	0.132	20.400	0.516 0	0.000 120	0.204	0.001 080
	III	0.336	18.000	0.108 0	0.000 600	0.120	0.001 188

注: I, II, III 分别表示潜水含水层、承压水含水层及弱透水层的 3 个分区。

Note: I, II, III stands for phreatic aquifer, confined aquifer and weak permeable layer.

表 3 L<sub>25</sub>(5<sup>6</sup>) 正交试验结果

Table 3 L<sub>25</sub>(5<sup>6</sup>) orthogonal test design

试验号 Test No.	A	B	C	D	E	F	敏感度指数 Sensitivity index
1	1	1	1	1	1	1	43.950
2	1	2	2	2	2	2	8.610
3	1	3	3	3	3	3	0.002
4	1	4	4	4	4	4	5.660
5	1	5	5	5	5	5	18.950
6	2	1	2	3	4	5	32.850
7	2	2	3	4	5	1	12.100
8	2	3	4	5	1	2	8.800
9	2	4	5	1	2	3	6.250
10	2	5	1	2	3	4	20.390
11	3	1	3	5	2	4	30.620
12	3	2	4	1	3	5	6.480

接下表  
(下转第 104 页)

根据表 2 中的影响因素和水平,选择了正交试验 L<sub>25</sub>(5<sup>6</sup>) (表 3)。根据表 3 中的因素及水平值,在 Visual MODFLOW 中输入相应参数的对应值进行试验,共 25 次,将每次试验结果的水位值输出,将水位值代入式(2),计算每个试验的敏感度指数<sup>[3]</sup>。

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (h_{ij}' - h_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, L 为敏感度指数, m<sup>2</sup>; m 为长观孔个数 (有 10 个长观孔, m 取 10); n 为识别阶段各长观孔水位观测次数 (观测次数为 35, n 取 35); h<sub>ij</sub>' 为敏感度试验时计算的与各长观孔观测时刻对应的水位, m; h<sub>ij</sub> 为识别阶段与各长观孔观测时刻对应的计算水位, m。计算得到的敏感度指数见表 3。由表 3 可知,对地下含水系统计算水位的影响从大到小依次为 B、F、E、D、C、A。

优工艺参数组合,即增塑剂施加量9%、喷嘴空气压力0.40 MPa、选择辊速比1:1.28、辊压力0.20、0.20、0.050 MPa,在该工艺条件下的滤棒综合质量较好且稳定性较高。该部分结果与常纪恒等研究结果不尽相同<sup>[8-14]</sup>,这可能与试验所用的丝束规格、增塑剂固化效率及评价方法等的不完全相同所致,各加工单位应立足本厂实际进行分析及设置,以达到切实有效提高滤棒加工质量的目的。

另外,通过对分切滤棒到目标长度后的压降变化规律的研究可知,滤棒实际分切均值均比理论分切均值大,并且切后4支滤嘴压降差异较大,极差平均为80 Pa,这容易使整支卷烟压降产生较大波动,从而使烟支吸阻超标,影响卷烟内在品质。分切滤棒后压降产生差异的原因还不明确,亦无公开发表的相关研究,将进一步对该项内容进行深入研究分析,找出影响滤棒在分切后压降差异的原因,并进一步对提高分切后滤棒压降稳定性的控制方法进行探索研究,以准确指导生产,稳定卷烟质量,达到精益生产的目标要求。

#### 参考文献

[1] 赵乐,邓永,谢复炜,等.醋纤和丙纤滤嘴对烟气挥发性、半挥发性成分释放量的影响[J].烟草科技,2010(5):42-45.

- [2] 盛培秀,王月江,黄小雷,等.含有醋酸纤维素的纤维纸及滤棒的开发与性能研究[J].烟草科技,2014(1):5-11.
- [3] 兰中于,张峻松,彭忠,等.醋纤滤嘴中添加丙二醇对卷烟品质的影响及应用研究[J].轻工科技,2013(6):147-148.
- [4] 王建民,王晓斌,苏东赢,等.沟槽滤嘴对卷烟感官品质及风格的影响[J].烟草科技,2015(7):70-74.
- [5] 贾伟萍,常纪恒,王宏生.活性炭孔结构对卷烟烟气过滤效率的影响[J].当代化工,2010,39(5):596-599.
- [6] 徐晔,盛培秀,常建勇.环境湿度计滤棒成型工艺参数对醋纤丝束飞花量的影响[J].烟草科技,2011(2):5-8.
- [7] 黄晓飞,刘会杰,莫自柳,等.KDF2滤棒成型机组开松速比对吸阻的影响[J].河南科技,2012(17):77.
- [8] 常纪恒,赵荣,余振华,等.滤棒成型工艺参数与质量稳定性的关系[J].烟草科技,2007(1):5-9.
- [9] 魏步建,李清华,常纪恒,等.滤棒成型工艺参数优化研究[J].烟草科技,2007(10):14-17.
- [10] 赵红霞.KDF2成型机设备参数对滤棒质量的影响[J].科技创新导报,2013(28):47-49.
- [11] 邢建基.滤棒成型加工参数分析与优化[J].中国科技纵横,2013(4):98.
- [12] 魏瑞广,张小杭,廖培培.KDF2滤棒成型机设备参数研究[J].装备制造技术,2013(6):168-170.
- [13] 徐培刚,李焕威,何艳明,等.KDF2滤棒成型的应用研究[J].广东化工,2014,41(15):70-71.
- [14] 吴伟超.KDF2滤棒成型机加工参数的优化研究[J].轻工科技,2015(3):97-98.
- [15] 刘文卿.实验设计[M].北京:清华大学出版社,2005:64-71.

(上接第55页)

续表3

试验号 Test No.	A	B	C	D	E	F	敏感度指数 Sensitivity index
13	3	3	5	2	4	1	2.510
14	3	4	1	3	5	2	11.310
15	3	5	2	4	1	3	26.700
16	4	1	4	2	5	3	31.840
17	4	2	5	3	1	4	13.100
18	4	3	1	4	2	5	2.400
19	4	4	2	5	3	1	5.990
20	4	5	3	1	4	2	19.540
21	5	1	5	4	3	2	25.600
22	5	2	1	5	4	3	9.830
23	5	3	2	1	5	4	4.840
24	5	4	3	2	1	5	11.650
25	5	5	4	3	2	1	57.640
R	7.01	138.67	9.19	10.19	13.85	14.98	

#### 4 结论

参数灵敏度分析选取的6个介质参数的敏感度指数大小代表其影响数值模拟结果的强弱,研究结果表明,在用Visual MODFlow建立的研究区地下水数值模型中,分别将以上6个介质参数做相同幅度的改变,重新运行计算出的观测孔处的水位动态,与改变参数前的相比,变化幅度不同,其中改变潜水含水层的渗透系数变化幅度最大,因此在利用Visual MODFlow做水资源评价前应查明研究区的水文地质参数特别是潜水的渗透系数,这对于正确建立模型十分必要。

#### 参考文献

- [1] 束龙仓,刘佩贵,刘波,等.傍河水源地数学模型的参数灵敏度分析:以辽宁省北票市某傍河水源地为例[J].工程勘察,2006(8):29-31.
- [2] 薛禹群,谢春红.地下水数值模拟[M].北京:科学出版社,2007.
- [3] 翟远征.鄂尔多斯白垩系盆地乌兰陶勒盖水源地地下水数值模拟中介质参数的敏感度分析[D].长春:吉林大学,2008.
- [4] 张丽华,苏小四,孟祥菲,等.地下水流数值模拟参数全局灵敏度分析[J].中国农村水利水电,2014(8):92-97.
- [5] 苗胜军,李长洪,文俊,等.基于正交试验设计的滑带土参数敏感性分析[J].中国矿业,2007,16(9):76-79.
- [6] 郝静,贾仰文,张永祥,等.应用正交试验法分析地下水流模型参数灵敏度[J].人民黄河,2015(9):66-68.
- [7] 高翠萍.黑龙江省桦南县地下水资源评价与合理开发利用研究[D].长春:吉林大学,2012.