

基于 T-PROGS 的地下水三维数值模拟及应用

靳 萍^{1,2}, 邵景力¹, 李长青³, 崔亚莉¹, 张连胜⁴

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京派得伟业信息技术有限公司, 北京 100097;

3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 河南省新乡水工院, 新乡 453002)

摘要: 首先阐述转移概率地质统计软件(T-PROGS)基本原理, 然后充分利用已知钻孔的岩性信息, 应用地质统计学条件模拟技术建立研究区水文地质结构模型; 在此基础上, 采用基于概念模型的方法建立研究区水文地质概念模型; 最后通过水文地质单元流(HUF)软件包实现二者有机集成, 最终建立和识别研究区地下水三维数值模型, 水文地质参数以岩性赋值, 并应用该模型进行水源地开发利用方案预测, 得出水源地日供水 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 是有保障的, 其可开采资源量为 $26.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

关键词: 转移概率; 数值模拟; 水源地; 可开采资源评价

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0021-06

科学正确地评价地下水资源是水资源可持续发展的关键^[1~2]。在地下水资源的定量分析研究中, 建立能较真实反映实际流场特点的地下水数值模拟模型是地下水资源评价与管理的重要研究方法^[3~6]。其中, 水文地质结构的认识是影响地下水数值模拟模型的一个重要因素。

GMS 软件中的 T-PROGS (Transition Probability Geostatistical Software) 称为转移概率地质统计软件^[7~8], 其运行过程实际上是通过分析已有的空间地质数据, 利用统计学方法对空间各单元的地质情况进行插值模拟, 然后建立误差目标函数, 计算各种模型的误差, 寻求最佳模型的过程。它主要包括三部分: 计算地质变量的转移概率; 利用马尔可夫链模拟地质变量的空间变化; 进行条件模拟及最优化选择。

采用 T-PROGS 建立的水文地质结构模型能够反映岩相的空间分布情况, 即每个离散网格上的岩性情况, 由于它们之间相互独立, 数据量非常庞大, 因此, 引入 HUF (Hydrogeologic Unit Flow) 软件包^[9~12]。其工作步骤为: 对网格岩性进行组合, 其原则是将具有相近水文地质特征的岩性组合起来, 并且体现同一深度上发育有不同的岩相, 同一岩性可以在不同深度上发育的特点; 将组合好的岩相在空间中重新离散, 得到离散的水文地质单元, 这些水文地质单元具有统一的岩

相且任何一个水文地质单元在垂向上不重复, 相同岩相的水文地质单元具有相同的水文地质参数; 根据离散的水文地质单元叠加组合计算模拟层位的几何形状, 对于所有的模拟层位, 采用该处的水文地质单元来计算每个剖分网格内的水文地质参数值, 这些参数包括水平和垂直方向的渗透系数、给水度、释水系数等。

该方法的优势主要体现在 3 个方面: 采用传统方法概化得到的水文地质结构模型具有很大的主观性, 通常在模型软件的外部完成, 主要用于实现模型软件中对研究区分层, 而该方法将水文地质结构模型统一到模型软件中进行处理; 采用该方法建模, 通过水文地质单元反映地下水系统, 不再依赖于模型的分层;

不同于传统方法以参数分区的形式来反映研究区的水力特性, 而是根据岩性进行水文地质参数赋值, 然后通过 HUF 完成模拟层中水文地质参数的计算。其缺点则在于需要较为均匀分布的钻孔岩性资料。

1 研究区概况

研究区位于濮阳市南部李子园一带^[13] (图 1), 地处黄河冲积平原下游, 地形平坦, 略有起伏, 面积约 300 km^2 , 多年平均降水量为 592 mm , 蒸发量为 1726.26 mm , 区内引黄渠系交错纵横, 连接成网。第四系浅层含水层组属于黄河冲积层, 随着不同时期黄河摆动, 粘性土与砂层在空间上交错叠置, 砂层在平面上呈片状或带状分布, 在剖面上呈多层状出现, 砂层之间多为粉土、粉质粘土, 厚度薄, 呈透镜体出现, 隔水性能差, 该含水层组地下水属于潜水或微承压水。

金堤河以南地区, 即本次数值模拟的研究区, 区内

收稿日期: 2008-06-12; 修订日期: 2008-09-08

作者简介: 靳萍 (1980-), 女, 博士研究生, 地下水科学与工程专业。

E-mail: helenjinping @163.com

浅层地下水开发利用程度较低,无集中性开采,主要为居民生活用水零星开采及分散性农田灌溉用水开采,2002年浅层地下水开采总量为 $4386.44 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

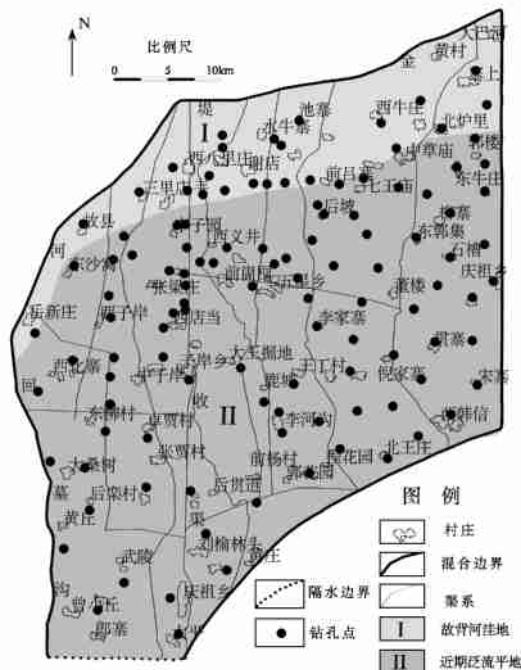


图1 研究区概况及钻孔分布图

Fig.1 Survey diagram of the study area and distribution diagram of the boreholes

2 水文地质结构模型

利用 T-PROGS 模块建立研究区水文地质结构模型步骤如下:首先,完成研究区 114 眼钻孔岩性概化,考虑研究区含水层介质沉积环境特点,按照浅层含水层组岩性的水力特性,将种类繁多的岩性概化描述为四大类,分别为粉质粘土、粉土、细砂和中细砂,水文地质参数根据岩性进行赋值,其概化分类见表 1。

然后,将研究区进行网格剖分,平面上以 $200\text{m} \times 200\text{m}$,垂向上以 2m 进行剖分,通过 T-PROGS 模块计算,得到实际钻孔四种概化岩性的转移概率曲线和马尔可夫转移概率曲线,通过两者的拟合,来确定所搭建的水文地质结构模型在垂向上的模拟效果,再将该结果应用到水平面上,通过模型调参,最终得到反映研究区水文地质条件的结构模型(图 2),形象反映研究区含水层组随着不同时期黄河的摆动造成黄河主流带和泛流带的相间分布,粘性土层与砂层在空间上交错叠置;研究区内含水砂层主要分布在金堤河到李子园一带,与水源地所选位置相一致,向南推移粘性土的含

量逐渐增多(图 3)。

表 1 岩性概化分类表

Table 1 Category of the materials generalization

概化岩性	原始岩性
粉质粘土	粉质粘土,粘土、亚粘土,淤泥质粉质粘土,粉质粘土夹薄层粉砂,钙质粘土,粉质粘土夹钙核,粉质粘土夹粉土,粉质粘土与粉砂互层,钙积层等
粉土	粉土,亚砂土,粉土夹薄层粉砂,粉质粘土等
细砂	细砂,粉细砂,粉细砂夹薄粘土,粉砂,细砂夹薄粘土,细砂夹薄粉土,粉砂-细砂,细砂与粉土互层等
中细砂	中细砂,中砂,细砂夹卵石,细中砂,砂砾石等

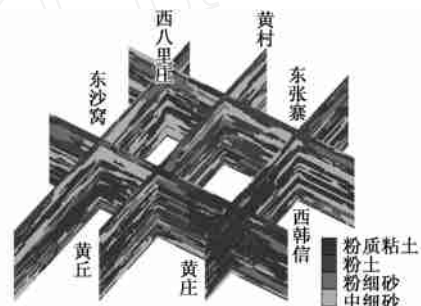


图2 研究区联合剖面图

Fig.2 Combination cross-section of the study area

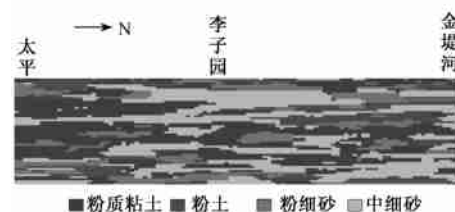


图3 太平-李子园-金堤河南北向剖面图

Fig.3 S-N cross-section of Taiping-Liziyuan-Jindihe

3 水文地质概念模型和数学模型

3.1 水文地质概念模型

研究区北部和西部边界均为自然边界,分别以金堤河和回墓沟为界,两侧地下水具有一定的水力联系,概化为混合边界;东部和东南部均为人为划定边界,以边界对水源地不存在太大影响为宜,同样概化为混合边界;南部边界则根据等水位线图判定为隔水边界。垂向上以潜水含水层自由水面作为上边界,通过该边界与外界发生水量交换,在潜水含水层和微承压含水层之间存在有厚度较薄且分布不连续的粘性土层,隔水性能较差,故在垂向上分两层,且底板埋深在 100m 左右的潜水含水层为本次研究的重点;根据区内钻孔资料揭示浅层含水层组和中层含水层组之间存在分布

较稳定的隔水性能良好的粘性土层,故浅层含水层底板作为隔水边界,深度约200m左右。

研究区属于典型的引黄灌区,以丰收渠为界,丰收渠以东地下水总体流向向北;丰收渠以西,南部总体流向向西;北部总体流向偏向西北,部分排入金堤河。区内主要接受河渠渗漏、降雨入渗、农灌回渗等补给,主要以蒸发、人工开采以及通过边界进行排泄。

$$\left\{ \begin{array}{l} S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + p \quad x, y, z, t \quad 0 \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p \quad x, y, z, 0, t \quad 0 \\ h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0 \quad x, y, z \\ \left(\frac{h_y - h}{n} \right) - K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_3 = 0 \quad x, y, z, 3, t \quad 0 \\ \left(\frac{\partial h}{\partial n} \right) \Big|_4 = 0 \quad x, y, z, 4, t \quad 0 \end{array} \right.$$

式中: ——渗流区域;

h ——含水层的水位标高(m);

K_x 、 K_y 、 K_z —— x 、 y 、 z 方向的渗透系数(m/d);

K_n ——边界面法向方向的渗透系数(m/d);

S ——自由面以下含水层贮水率(m^{-1});

μ ——潜水含水层在潜水面上的重力给水度;

——含水层的源汇项;

p ——潜水面的蒸发和降水等;

h_0 ——含水层的初始水位分布(m);

0 ——渗流区的上边界,即地下水的自由表面;

3 ——含水体的混合边界;

4 ——渗流区的下边界,即承压含水层底部的隔水边界;

\vec{n} ——边界面法线方向。

4 模型识别与验证

在水文地质结构模型的基础上,采用 GMS 中提供的基于概念模型的方法(MAP 模块)选择 HUF 程序包建立研究区地下水数值模拟模型。

首先,选择2002年为模拟期,依据影响地下水各要素的变化规律,特别是引黄渠系,体现地下水动态随灌溉和季节的变化规律,将模拟期划分为17个应力期,将研究区在平面上以200m×200m的网格进行离散,垂向上分潜水含水层和微承压含水层;

其次,将初始条件、边界条件和各源汇项数据在 MAP 模块中进行处理:在 GMS 中,潜水面边界条件处

3.2 数学模型

在水文地质结构模型和区内地下水流动特征^[14](水平运动为主,垂向运动为辅)分析的基础上,将研究区地下水系统概化为非均质平面各向同性、空间三维、非稳定地下水系统。该概念模型可用如下偏微分方程进行描述:

理为潜水含水层随着潜水位降低或升高,潜水含水层重力释水和储水;根据研究区内地下水位埋深以及包气带岩性绘制降雨入渗分区;考虑到引黄渠系的水文过程受人为控制,且其渗漏量和影响范围受水文天数、渠道长度以及渠系衬砌和水位埋深的影响,通过对各渠系渗漏量及附近长观孔地下水动态特征的分析,各类渠系影响带的范围从两侧各2000m到400m不等;农田回渗则根据区内灌溉方式划分为井灌区、渠灌区和井渠并用区;潜水蒸发则主要在前人研究成果的基础上确定区内蒸发极限埋深为4.2m;人工开采由于缺乏区内具体的分散性井开采资料,按照生活用水定额以及井灌区和井渠并用区灌溉定额进行分区概化,按照应力期在 MAP 模块中完成赋值并自动生成 MODFLOW 网格数据,通过 HUF 软件包实现网格源汇项数据和网格岩性数据有机结合,然后进行地下水数值模拟计算。其岩性水文地质参数见表2。

表2 岩性水文地质参数表

Table 2 Hydrogeologic parameters of the materials

岩性	水平渗透 系数(m/d)	垂向渗透 系数(m/d)	给水度	贮水率 (1/m)
粉质粘土	2.0	0.04	0.0485	0.000 329
粉土	5.0	0.1	0.083	0.000 262
细砂	10.0	1.0	0.09	0.000 2
中细砂	22.0	2.2	0.10	0.000 199

最后,通过流场拟合宏观把握区内地下水流动特点(图4),再选择典型地区——主力引水渠边、井灌区(集中开采区)和井渠并用区的长观孔进行水位动态拟

合(图5),即从时间上和空间上完成所建地下水流数值模拟模型识别并进行均衡分析。

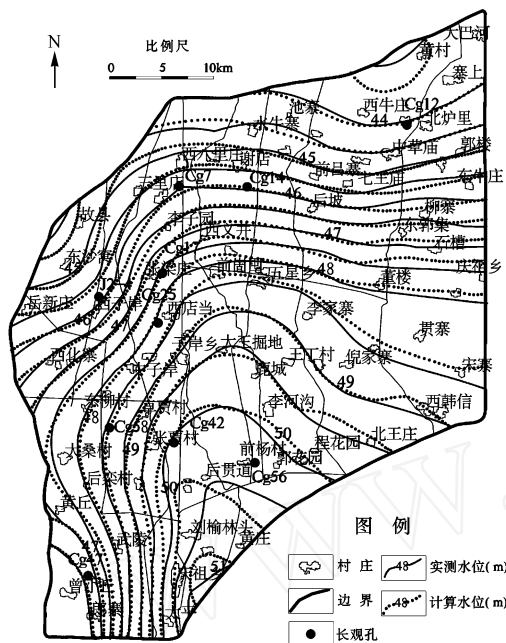


图4 2002年末流场拟合图

Fig.4 Fitting contour by the end of 2002

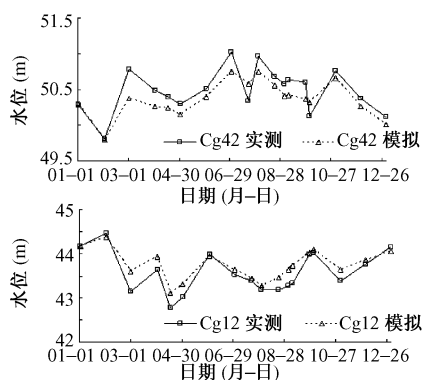


图5 观测孔水位过程线拟合图

Fig.5 Fitting curve of the observation wells

5 模型应用

5.1 水源地模拟预测

在上述地下水流数值模拟模型的基础上进行水源地模拟预测。水源地规划布设51眼开采井(图6),规划开采量为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。选择2003年1月1日为初始时刻,预测水源地运行10年(即2012年)地下水流场和动态变化趋势,其补排项均选择最近10年研究区资料,按照已有的模型分区进行赋值,预测期末水位降深(图7),可以看出水源地开采必然造成区内地下水位的下降,并形成月牙状的降落漏斗,漏斗中心最大水位

降深为5.5m;地下水动态变化曲线(图8),在遭遇连续2个特枯水年并保证水源地正常供水后,水位下降显著,随着平水年和丰水年补给量增加,地下水位将有所回升,充分说明该地具备建水源地的条件,具有较强的调节能力。

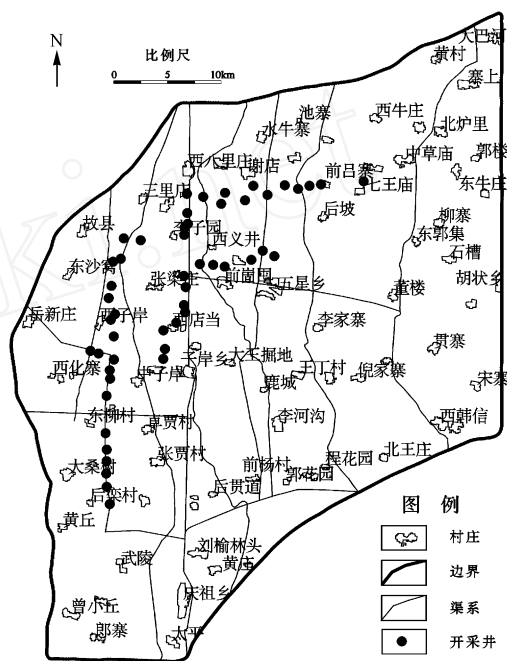


图6 水源地开采井布局图

Fig.6 Distribution diagram of the well field

5.2 水源地开采程度分析

水源地开采程度分析的前提条件为:保证当地居民生活用水及工农业用水开采,故水源地开采后地下水位不得低于40m;能够最大限度地掠夺蒸发量,不引起环境地质问题,得出水源地开采水位埋深不得低于10m;开采井群中心最大水位降深不大于含水层厚度的1/2,即开采井群中心最大水位降深不得大于5.5m。利用模型的手段计算分析水源地在开采状态下和非开采状态下各水均衡要素的变化特征,对水源地开采保证程度进行分析,得出设计开采方案下水源地开采量由3部分组成:一部分来自减少的蒸发量,占水源地开采量的53.25%;一部分来自通过边界减少的排泄量和增加的补给量,占水源地开采量的21.62%;另一部分来自含水层释水量,占水源地开采量的25.13%。水源地在很大程度上掠夺了蒸发量,因此,水源地日开采 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 是有保障的。

5.3 可开采资源评价

在论证水源地规划开采布局和开采量保证程度的基础上,分析得出研究区南部和东南部地下水位埋藏

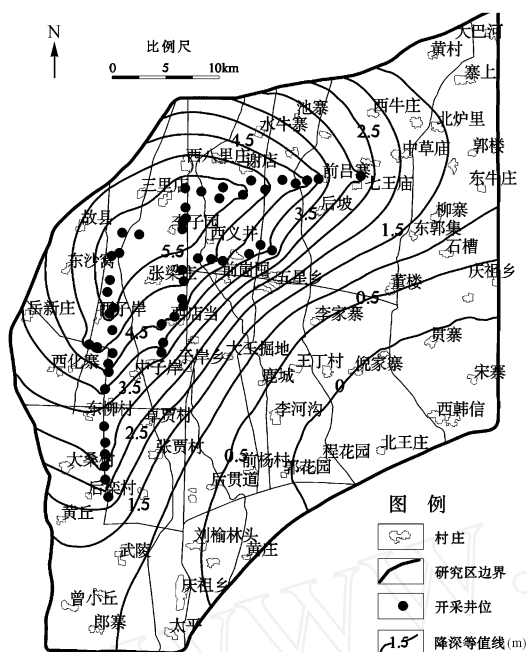


图7 预测期末水位降深图

Fig.7 Dropdown at the end of predict period

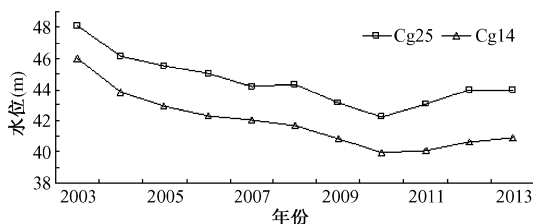


图8 预测期观测孔水位过程线

Fig.8 Water level curves of the observation wells during the prediction period

依然较浅,通过合理布井仍具有一定的开采前景。已知水源地在开采状态下袭夺的蒸发排泄量为 $4.27 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (占非开采条件下蒸发排泄量的 37.89%),故初步判断水源地开采仍可袭夺剩余蒸发排泄量的 37.89%,为 $2.65 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由此得出水源地可开采资源量由三部分组成:原有开采量 $15.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水源地开采量 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和目前开采条件下仍然可以袭夺的蒸发量 $2.65 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,共 $26.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。总的说来,研究区已有很高的开采程度。

6 结论

运用 GIS 中的 T-PROGS 模块,全面利用已知钻孔岩性信息建立研究区水文地质结构模型,基于概念模型方法建立水文地质概念模型,并通过 HUF 实现二者集成,最终建立研究区地下水流数值模拟模型,证明水

文地质参数按照岩性赋值是可行的。运用所建模型论证得出李子园水源地具备较强的调节能力,日供水 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 是有保障的,并基于规划开采条件评价其可开采资源量为 $26.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

此外,在实践过程中发现采用 MAP 模块建立水文地质概念模型明显较网格化方法便捷,但是对于面状分区较多且形状不规则的情形,完成概念模型数据向网格数据转化过程中往往存在较大误差。

参考文献:

- [1] 曹剑锋,迟宝明,王文科,等.专门水文地质学[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] 朱学愚,钱孝星.地下水水文学[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [3] 孙纳正.地下水流的数学模型和数值方法[M].北京:地质出版社,1981.
- [4] 薛禹群,谢春红.地下水数值模拟[M].北京:科学出版社,2007.
- [5] 游进军,王浩,甘泓.水资源系统模拟模型研究进展[J].水科学进展,2006,17(3):425-429.
- [6] 钱家忠,吴剑锋,朱学愚,等.地下水资源评价与管理数学模型的研究进展[J].科学通报,2001,46(2):99-103.
- [7] Steven F Carle. T-PROGS: Transition Probability Geological Software Version 2.1[S]. Reston: U S Geological Survey, 1999.
- [8] 何芳,吴吉春.基于马尔可夫链的多元指示地质统计模型[J].水文地质工程地质,2003,30(3):28-32.
- [9] Brigham Young University, Environmental Modeling Research Laboratory. Groundwater Modeling System Tutorials Volume II[S]. 2002.
- [10] Brigham Young University, Environmental Modeling Research Laboratory. Groundwater Modeling System Tutorials Volume I[S]. 2002.
- [11] Arlen W Harbaugh, Edward R Banta, Mary C Hill, et al. MODFLOW-2000, The U S Geological Survey Modular Groundwater Model: User Guide to Modularization Concepts and The Groundwater Flow Process[S]. Reston: U S Geological Survey, 2000.
- [12] Evan R Anderman, Mary C Hill. MODFLOW-2000, The U S Geological Survey Modular Groundwater Model - Documentation of the Hydrogeological-Unit Flow (HUF) Package[S]. Denver: US Geological Survey, 2000.
- [13] 李珂凌,宋丽红.濮阳市地下水位下降及其防治[J].水文地质工程地质,2004,31(1):79-81.

Application of T-PROGS to a 3-D numerical simulation of groundwater flow

JIN Ping^{1,2}, SHAO Jing-li¹, LI Chang-qing³, CUI Ya-li¹, ZHANG Lian-sheng⁴

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing PAIDETM Information Technology CO. LTD., Beijing 100097, China;

3. China Institute for Geo Environmental Monitoring, Beijing 100081, China;

4. Xinxiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Xinxiang 453002, China)

Abstract: The transition probability geostatistical software is introduced in this paper. On the basis of borehole data, the hydrogeological structure model in the study area is constructed by using geostatistics condition simulation, and the hydrogeological conceptual model in the study area is constructed by using conceptual model approach. With the aid of hydrogeologic-unit flow package, the integration and the 3-D numerical simulation of groundwater in the Liziyuan wellfield is built and calibrated, and the parameters are defined by lithology. By using this method, water supply of $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in the Liziyuan wellfield is secured, and the safe yield is $26.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$.

Key words: transition probability; numerical modeling; wellfield; safe yield evaluation

责任编辑:汪美华

(上接第 15 页)

Influence of Ca^{2+} contents on the particle release

XIANG Chang-sheng¹, HAN Zhi-yong², LIU Tong-hua³, SUN Lu-qian⁴

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Earthquake Bureau of Anqiu Country, Anqiu 262100, China;

4. College of Design and Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the batch and level sand column experiments, and with the study object of NaCl and CaCl_2 mixed solution, the particle release process influenced by Ca^{2+} contents was examined in this paper. The critical total ionic strength (CTIS) values were brought forward under different Ca^{2+} contents. The research results indicate that the Ca^{2+} not only cannot result in particle release, but also restrain the release process obviously and intensively, and the existence of the Ca^{2+} will result in the descending of the concentration values which induces particle release. When the Ca^{2+} contents were 5%, 10% and 20%, the corresponding CTISs were 0.02, 0.007 and 0.0005mol/L, respectively. There was not particle release when the content of Ca^{2+} was 100%. All the above CTISs were much lower than that of the single NaCl solution of $0.06 \pm 0.005 \text{ mol/L}$. The CTISs become lower with the increasing Ca^{2+} content, which validates the restraining effect of the Ca^{2+} on the particle release.

Key words: particle release; water sensitivity; critical total ionic strength; porous media

责任编辑:汪美华