

基于数量化理论 I 的水文地质点参数确定

孙涛¹, 楚贤峰², 潘世兵¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 吉林省公路勘测设计院, 吉林 长春 130021)

摘要: 分析了目前水文地质参数研究中存在的一些问题, 尝试以抽水试验资料和一般勘探资料为基础, 根据含水层岩性、含水层组的厚度、地层结构等因素对点参数确定的影响, 采用数量化理论 I 对区域水文地质参数进行研究, 建立了含水层渗透系数和给水度数量化理论模型, 结合西北典型干旱灌区地下水流进行实例模拟, 取得了较好的应用效果。

关键词: 地下水流模拟; 参数不确定性; 点参数; 数量化理论

中图分类号: P641.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)03-0285-04

Determination of Hydrogeological Point Parameters Based on Quantification Theory I

SUN Tao¹, CHU Xian feng², PAN Shi bing¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Jilin Institute of Highway Survey and Design, Changchun 130021, Jilin, China)

Abstract: Some problems related to hydrogeological parameters research are analyzed. This paper intends to study the hydrogeological parameters with quantification theory I on the basis of pumping test and ordinary bores with considering rock type, thickness of aquifers, structure of stratum and other factors affecting point parameters, and set up the quantification theoretical model of permeability coefficient k and specific yield μ . Experimental research in typical western arid irrigation areas achieves a better result, it provides new approaches in acquiring more accurate parameters that is essential to water resource evaluation models.

Key words: groundwater flow simulation; parameters uncertainty; point parameters; quantification theory

0 引言

水文地质参数在地下水数值模拟中的地位是举足轻重的, 饱和带地下水流模拟的主要问题仍然是非均质性的区域概化, 模型参数的不确定性会导致计算的水头、流速的不确定, 并影响到地下水资源评价结果的可靠性^[1]。基于“定性分析指导建模”指导思想下的地下水模型, 为了追求“拟合”, 往往过多依赖于调参, 而忽略参数初值的获取及参数优化。对区域含水介质参数的处理没有统一的标准, 导致了对于参数“随意化”的选取。

实际上很多参数并不能依靠定性来确定, 必须根据其影响因素建立相关的分析模型, 做到科学评估各因素的影响大小。王文科认为在地下水系统模型研究中, 必须使用新的观测手段和新的数学方法, 研究和模型相匹配的输入数据和高精度的参数, 提高模型的精度^[2]。

研究和模型相匹配高精度参数获取方法是地下水流数值法研究的重要方向。目前对于点参的研究备受关注, 因为其在数学模型中所起的作用往往比面参更直接, 灵敏度更高。渗透系数 k 和给水度 μ 是最为关键的模型参数, 可靠的获取方法是通过抽

收稿日期: 2006-09-12

基金项目: 世界银行贷款“疏勒河农业灌溉暨移民安置综合开发”项目(1996); 国家自然科学基金项目(50679086; 50679096)

作者简介: 孙涛(1973), 男, 安徽蒙城人, 工程师, 博士, 从事GIS和遥感在水文水资源中的应用研究。E-mail: sunt@jwhr.com

水试验,但相对较昂贵。Roberte 在岩溶地区试验确定导水系数 $T^{[3]}$;陈喜利用抽水实验资料,采用单纯形法在计算机上优选水文地质参数^[4];戴凤君根据大型抽水试验水位和流量资料通过线性规划求逆推算镇江东门一带的含水层参数^[5]。许多学者探讨了利用间接方法确定水文地质参数,如投影内点法^[6]、人工神经网络方法、基因算法^[7]、单纯形搜索法、遗传算法、经验公式分析法等。

1 数量化理论

1.1 数量化理论的引入

综上所述,现在对点参研究多是针对确定性的抽水试验资料、地下水位资料及定量数据的数学处理开展的。对于大区域研究区来说,这些参数的获取和优化有一定的局限性。一是因为勘探孔和试验孔的数量有限,这样得到的含水层参数是局部的,不足以概化整个含水层参数分布;二是在有的地区只有较少的抽水试验资料,而大量是只有含水介质定性数据一般的勘探孔。怎样结合抽水试验和一般勘探资料,将定性数据应用到含水层点参的确定中去,就成为地下水模拟研究中的一个难题。

目前,国内外比较盛行定性数据量化和分析研究。主要包括日本学者建立的数量化理论、模糊数学和数量化理论相结合的模糊数量理论;西方研究的多维标度法(计量性、准计量性和非计量性多维标度法)、列联表分析法;前苏联学者创建的逻辑信息法等。其中,以日本的林知己夫提出的数量化理论应用最为广泛。数量化理论是多元统计学的一个分支,严格地说它是准计量性的多维标度法,已在矿藏地质、气象、林业、交通、环境保护、医学等领域获得了良好应用,主要用于分类、评价、预报、预测和系统优化。根据该理论研究问题的目的不同,可分为Ⅰ~Ⅴ型数量化理论。该理论Ⅰ相当于多元统计的回归分析,Ⅱ相当于多元统计的判别分析,Ⅲ相当于多元统计的对应因子分析,Ⅳ、Ⅴ相当于聚类分析^[8],实际工作中理论Ⅰ、Ⅱ应用较多。

1.2 数量化理论Ⅰ原理

数量化理论Ⅰ原理的核心是把没有用数值表示出来的、用于判断和评价的数据资料,从数量上探索和处理,以解决定性变量如何量化和建立数学模型的问题。理论Ⅰ研究的主要目的是寻找说明变量(自变量)分别对基准变量(因变量)的影响程度并可进行预测,要求基准变量是定量变量,说明

变量可以全部是定量的,也可以都是定性的,或两者兼而有之。从而可充分利用可能收集到的定性、定量信息,使那些难以作详细定量研究的问题定量化,更全面地研究并发现事物间的联系和规律。

把定性说明的变量称为项目(Item),把项目各种可能的情况称为类目(Category)。现考虑一些项目, X_1, X_2, \dots, X_m 。对定量的基准变量进行预测,设 n 个样品中,第一个项目 X_1 有 r_1 个类目, $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1r_1}$, 第二个项目 X_2 有 r_2 个类目, $c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2r_2}$, 第 m 个项目 X_m 有 r_m 个类目, $c_{m1}, c_{m2}, \dots, c_{mr_m}$, 总共有 $\sum_{j=1}^m r_j = p$ 个类目。称 $\hat{\vartheta}(j, k) (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, r_j)$ 为 j 项目的 k 类目在第 i 个样品中的反映,并按式(1)给定

$$\hat{\vartheta}(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 个样品 } j \text{ 项目的定性数据为 } k \text{ 类目时} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1)$$

对于修正的模糊数量化理论,则式(1)变为

$$\hat{\beta}(j, k) = \begin{cases} \beta_k (0 < \beta_k < 1) & \text{当第 } i \text{ 个样品 } j \text{ 项目的定性数据为 } k \text{ 类目时} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

式中: β_{jk} 为 k 类目在 j 项目下的贡献率。

如考虑有 h 个定量变量和 m 个定性变量的情况,假定观测了 n 个样品,定量变量在第 i 个样品中的数据为 $x_i(u) (u=1, 2, \dots, h; i=1, 2, \dots, n)$, 则有反应矩阵 X

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1), & \dots, & x_1(h), & \hat{\vartheta}(1,1), & \dots, & \hat{\vartheta}(1,r_1), & \dots, & \hat{\vartheta}(1,m) \\ x_2(1), & \dots, & x_2(h), & \hat{\vartheta}(2,1), & \dots, & \hat{\vartheta}(2,r_2), & \dots, & \hat{\vartheta}(2,m) \\ \vdots & & \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ x_n(1), & \dots, & x_n(h), & \hat{\vartheta}(n,1), & \dots, & \hat{\vartheta}(n,r_n), & \dots, & \hat{\vartheta}(n,m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

在数量化理论中,一般假定基准变量与各项目、类目的反应间遵从线性模型

$$y_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk} \hat{\vartheta}(j, k) + \varpi & \text{定性数据} \\ \sum_{u=1}^h b_u x_i(u) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk} \hat{\vartheta}(j, k) + \varpi & \text{定性、定量数据} \\ \sum_{u=1}^h b_u x_i(u) + \varpi & \text{定量数据} \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)式(4)根据最小二乘法原理求出 b_u 及 b_{jk} 的最小二乘估计值。已经证明,这个最小二乘估计值是 b_u 及 b_{jk} 的最小方差线性无偏估计值。由反应矩阵 X 得到

$$X^T X b = X^T Y$$
$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$$

$$b=[b_1, b_2, \cdots, b_h, b_{11}, \cdots, b_{1r1},$$
$$b_{21}, \cdots, b_{m1}, \cdots, b_{mr_m}]^T \quad (5)$$

数量化理论模型的精度, 同多元线性回归模型预测模型, 可以用复相关系数来确定, 复相关系数即预测值与实测值之间的相关系数

$$r_{yy}=\sqrt{a}=\frac{\sigma_y}{\sigma_y} \quad a=\frac{\sigma_{yy}^2}{\sigma_y^2 \sigma_y^2} \quad (6)$$

各项目 i 对预测值(目标变量 y)的大小可用偏相关系数 k 来衡量

$$k=\frac{-r_{iy}}{\sqrt{r_{ii} \times r_{yy}}} \quad (7)$$

2 含水层点参确定模型建立

目前数量化理论在水文地质领域中的应用还不多见。笔者尝试采用数量化理论 I 对区域水文地质参数进行研究。影响含水层参数 k 、 μ 因素众多, 内在影响是含水介质的粒度成分、矿物成分。土的颗粒大小和形状及级配影响土中空隙的大小及形状, 因而影响渗透性。土中含有亲水性较大的粘土矿物或有机质时, 也会大大降低土的渗透性。另外, 还有含水层结构构造的影响。其中既有定性因素, 又有定量因素。笔者尝试以抽水试验和一般勘探资料为基础, 根据含水层岩性、含水层组的厚度、构造断裂、地层结构等点参影响因素, 结合数量化理论 I 分析评价含水层参数。此次研究将场地尺度的参数向区域尺度延伸, 为解决水文地质参数尺度效应提供了一个重要途径。

建立数量化理论模型首先要合理设置评价项目和类目, 这直接影响所建模型的精度^[9], 影响因素可概化为定量和定性因素(表 1)。

表 1 水文地质参数数量化理论模型中影响因素设置

Tab. 1 Affecting Factors of Hydrogeological Parameters in the Quantification Theory Model

目标变量	因素	项目	类目	影响因子范围
渗透系数 $k(Y_1)$	定量因素	上覆第四系厚度(X_1)	实值	{0.7, 0.8, 0.9}
		含水层厚度(X_2)		
	定性因素	含水层岩性		
		$\tilde{a}(1, m) m=1, 2, 3$		
		砂卵石		
给水度 $\mu(Y_2)$	定性因素	砂卵石	{0.7, 0.8, 0.9}	{0.7, 0.8, 0.9}
		含砾中粗砂		
		单层		
		含水层结构		
		$\tilde{a}(2, n) n=1, 2, 3$		
构造断裂	有	有	{0.8, 0.9}	{0.8, 0.9}
		无		
		$\tilde{a}(3, l) l=1, 2$		

定量因素: 含水层厚度、上覆第四系厚度; 定性因素: 含水层岩性(砂、砾、卵)、含水结构(单层、双层、多层结构)、有无构造断裂。基准目标变量分别取渗透系数 k 和给水度 μ 。影响因子采用一组给定的模糊范围值{0.7, 0.8, 0.9}和{0.8, 0.9}。

3 实例应用

选取西北典型干旱区疏勒河流域昌马、花海、双塔三大灌区作为典型研究区。通过水文地质详查工作, 在对工作区内前人工作成果进行充分收集、整理、分析的基础上, 结合灌区水文地质条件, 建立基于数量化理论的灌区水文地质点参确定研究。

根据灌区的实际抽水试验孔(14 个单孔抽水试验孔和 9 个多孔抽水试验孔), 选择有代表性的 84 个钻孔资料(总进尺 4 228.7 m)分析, 使其能尽量考虑各种存在的情况, 避免因子在其中一个类目或几个类目上反应全为零^[10]。表 2 列出了部分抽水试验孔资料。

表 2 研究区部分抽水试验孔资料

Tab. 2 Pumping Tests Data in the Research Area

编号	孔位	孔深/m	含水层岩性	含水层厚度/m	地下水类型	计算渗透系数/(m·d ⁻¹)
1	全湾四队	76.50	粗砂	22.40	承压水	4.17
2	毕家滩	76.80	砂砾石	20.00	微承压水	64.60
3	南渠	112.65	砂砾石	5.10	承压水	26.56
4	腰站子	60.67	粗砂	3.82	微承压水	35.46
5	青山	70.20	砂卵石	40.00	潜水	30.18
6	布隆吉	50.10	砂砾石	8.20	微承压水	23.90
7	小宛	80.10	砂砾石	67.40	潜水	11.80
8	向阳	61.80	砂砾石	46.20	微承压水	55.40
9	白旗堡	30.08	粗砂	13.20	微承压水	24.20
10	全湾四队	35.00	含砾砂	5.30	潜水	3.52

研究中对模糊参数范围的 18 组组合计算结果比较, 表明{0.9, 0.8, 0.9}组合具更好的相关性。渗透系数 k 推求中的{0.9, *, *}组合为例(表 3), 列出其 6 个组合对应的模型取值及相关系数。复相关系数表示模型预测的精度, 各项目的“影响度”可以用偏相关系数来确定。表 4 为偏相关系数及各项目对基准变量的影响程度。

数量化理论模型计算得到的是典型样点上的参数值。根据地质统计 Krigin 方法插值得到全区渗透系数和给水度等值线。在地下水模型分区确定过程中, 加载到模型计算区, 优化得到灌区的初始含水层参数的分区及其初始值。图 1、2 分别是

根据地下水抽水试验和根据数量化理论计算后得到的研究区渗透系数等值线图。

表 3 {0.9, *, *}组合定性类目取值及对应组合的相关系数

Tab.3 Selected Category Data and Corresponding Correlated Coefficients in the Combination of {0.9, *, *}					
组合	砂卵石砾石	砂砾石	含砾中粗砂	单层	双层
1	0.9	0.05	0.05	0.7	0.15
2	0.9	0.05	0.05	0.7	0.15
3	0.9	0.05	0.05	0.8	0.10
4	0.9	0.05	0.05	0.8	0.10
5	0.9	0.05	0.05	0.9	0.05
6	0.9	0.05	0.05	0.9	0.05

组合	多层	有断裂	无断裂	相关系数
1	0.15	0.8	0.2	0.9436
2	0.15	0.9	0.1	0.9361
3	0.10	0.8	0.2	0.9089
4	0.10	0.9	0.1	0.9866
5	0.05	0.8	0.2	0.9126
6	0.05	0.9	0.1	0.9035

表 4 研究区各项目对水文地质参数的影响度
Tab.4 Influences of Various Items to Hydrogeological Parameters

项目	偏相关系数	影响程度
上覆第四系厚度	0.085	V
含水层厚度	0.658	II
含水层岩性	0.838	I
含水层结构	0.249	IV
构造断裂	0.432	III

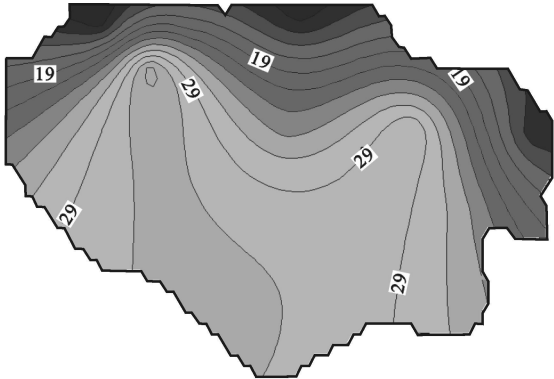


图 1 根据抽水试验得到的渗透系数 k 等值线
Fig.1 Isolines of Hydraulic Conductivity k Obtained from Pumping Test

4 结语

由于抽水试验点数量有限,而且在山前冲洪积扇部位没有资料,得到的渗透系数代表性较差,推

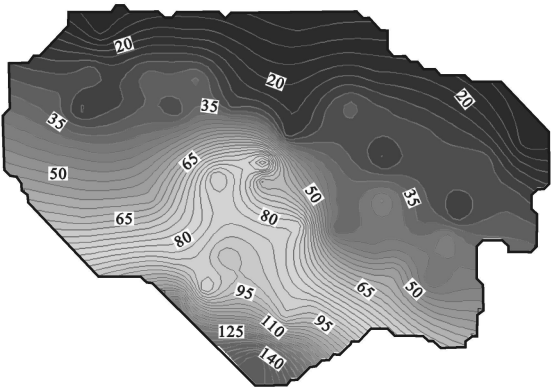


图 2 根据数量化理论得到的渗透系数 k 等值线
Fig.2 Isolines of Hydraulic Conductivity k Obtained from Quantification Theory

广到整个研究区域效果不好,而由数量化理论得到的渗透系数曲线则明显反映了区域含水层参数的整体趋势及其细部特征。

将数量化理论方法引入到区域水文地质参数确定中,充分利用水文地质调查和试验取得的各种定性、定量数据,得到的结果更符合实际。在数量化理论模型中各影响因子的权重可以结合专家经验,这在一定程度上有助于解决含水层参数由场地尺度向区域尺度延伸中的尺度效应问题,提高地下水模型研究的精度。

参考文献:

[1] 魏林宏,束龙仓,郝振纯.地下水流数值模拟的研究现状和发展趋势[J].重庆大学学报:自然科学版,2000,23(增刊):50-52.

[2] 王文科,李俊亭.地下水流数值模拟的发展与展望[J].西北地质,1995,16(4):52-56.

[3] Roberte Mace.Determination of Transmissivity from Specific Capacity Test in Karst Qquifer[J]. Groundwater, 1997, 35(5):739-742.

[4] 陈喜,李英,乔雪红,等.含水层水文地质参数自动优选方法[J].工程勘察,1998(2):40-43.

[5] 戴凤君.线性规划法在推求水文地质参数中的应用[J].水文,2000,2(增刊):42-44.

[6] 杨兰合,杨国勇.内点法在反求水文地质参数中的应用[J].煤田地质与勘探,1994,22(4):42-44.

[7] 金菊良,朱春龙,杨晓华.水文地质模型参数的一种数值方法[J].长春科技大学学报,1998,28(2):176-185.

[8] 杨毅恒,韩燕,徐兵,等.多维地学数据处理技术与方法[M].北京:科学出版社,2002.

[9] 黄炎和,林敬兰,蔡志发,等.影响福建省水土流失主导因子的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):36-40.

[10] Hayashi C. On the Prediction of Phenomena from Qualitative Data and the Quantification of Qualitative Data from the Mathematic Statistical Point of View[J]. Annals of the Institute of Stat Math, 1952,3:69-98.