

# 用数学地质方法研究岩溶含水层富水性变化趋势

康凤群 (武汉地质学院)

## 一、方法简述

水文地质现象都具有一定的规律性, 其重要表现之一就是变化的趋势。在预测岩溶含水层富水性变化规律上, 主要是用趋势分析的方法, 研究岩溶在钻孔中的高度, 抽水试验出的渗透系数和单位涌水量的空间变化规律。常利用多项式函数或付里叶级数所代表的曲面, 根据最小二乘法的原理, 来拟合该地段岩溶特征的空间分布, 用所确定的函数来描述该岩溶特征的趋势变化。将钻孔实测岩溶值(渗透系数、单位涌水量)分成两部分, 趋势部分和偏差(剩余)部分。趋势部分反映区域性的变化规律, 受大范围系统性因素控制, 偏差部分反映局部范围的变化特征, 是局部因素、随机因素(包括观测误差)共同造成的。

趋势分析用于岩溶含水层数据处理时, 经常把趋势部分 $\hat{z}_i$ 解释为区域背景, 而把偏差部分解释为局部岩溶发育地段的影响。

假设在平面上有 $n$ 个点 $(x_i, y_i)$ , 相应的观测值为 $z_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 用二次多项式

$$\hat{z}_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4xy_i + a_5y_i^2$$

来拟合观测值的趋势变化。平面称为二次趋势面, 记

$$Q = \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [z_i - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4xy_i + a_5y_i^2)]^2 \quad (1)$$

根据最小二乘法原理, 使 $Q$ 达到最小的曲面是最佳的拟合趋势面。

解 求极值的线性方程组可求出各系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ , 从而求得趋势面方程。有了趋势面方程就可求出各点的趋势值和偏差值 $(z_i - \hat{z}_i)$ 。趋势分析可以在一定空间, 二度空间或三度空间内进行。选择几次趋势为宜取决于客观对象的实际变化情况。

## 二、应用实例

### (一) 某岩溶充水矿床水文地质条件

矿区位于湖盆地南部边缘丘陵区, 洪水期, 北、东、西三面环水。主要矿体均埋藏在当地侵蚀基准面和湖水以下。矿区内主要含水层为嘉陵江灰岩(大理岩), 岩溶发育, 含水较丰富, 单位涌水量 $0.23-1.019$ 升/秒·米, 渗透系数 $0.126-1.565$ 米/日, 为矿体顶板含水层。沿成矿接触带附近的火成岩裂隙含水层, 单位涌水量 $0.023-0.037$ 升/秒·米。矿区西部和南部广泛分布的火成岩为相对隔水层(图1)。第四系砂砾石层位于湖相粘土层之下, 与下伏大理岩接触。矿区属水文地质条件复杂类型。

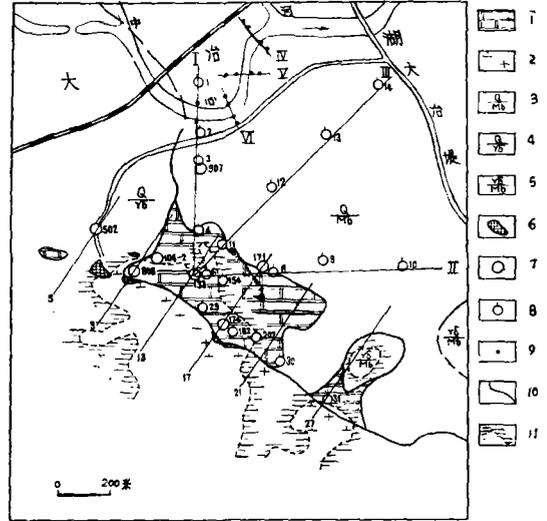


图1 矿区水文地质平面图

1—大理岩; 2—火成岩; 3—第四系下伏大理岩; 4—第四系下伏火成岩; 5—火成岩下伏大理岩; 6—矿体; 7—抽水试验钻孔; 8—观测孔; 9—专门水文地质浅孔; 10—地质界线; 11—历年最高洪水位。

### (二) 对大理岩岩溶发育特征及富水性的认识

#### 1. 岩溶发育程度及分布规律

区内大理岩均位于当地侵蚀基准面以下。矿区西部大理岩被侵入岩穿插, 包裹, 成为捕虏体; 在矿区东部大面积分布, 但地表无出露, 为第四系地层所覆盖, 与侵入岩成“S”型接触。经钻探验证, 大理岩向北东直插入湖底, 与东部中低山区露出的二迭系, 三迭系灰岩连成一片, 向北西与某岩溶矿区北部湖区大理岩相连。

岩溶现象以溶洞为主, 一般溶洞高 $0.3-4$ 米。全区见大理岩钻孔104个, 其中见溶洞钻孔62个, 钻孔溶洞能见率为60%。总计大小溶洞221个, 溶洞总高435.75米。其中溶洞高大于1米的, 占溶洞总数的55%, 大于5米的, 占溶洞总数的8%。全区平均岩溶率3.6%。

岩溶发育总的特征是: 1) 沿接触带发育强, 远离接触带较弱, 大部分溶洞沿“L”形接触带分布(图2); 2) 9至19线, 自西向东溶洞发育由强到弱。在标高负160米以上, 10线钻孔溶洞能见率达86%, 平均岩溶率为10.9%。19线钻孔溶洞能见率为2%, 岩溶率仅0.3%。

在垂向上, 由浅到深岩溶发育程度总的规律是由强变弱。

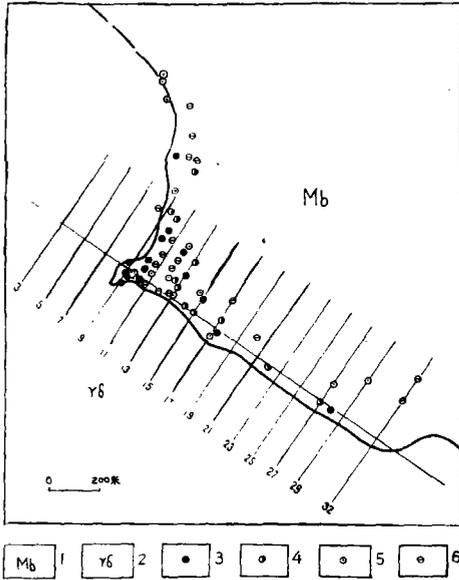


图 2 溶洞沿接触带分布图

1—大理岩； 2—火成岩； 3—溶洞总高大于10米钻孔；  
4—溶洞总高10—5米钻孔； 5—未见溶洞钻孔； 6—溶洞总高  
小于5米钻孔

## 2. 大理岩岩溶含水层的富水性

矿区内进行了7个孔的抽水试验，（包括群孔抽水，见表1）。

从表1可知含水层的富水性很不均一。如906号孔在孔深131.6米以上遇溶洞总高16.27米，钻孔单位涌水量1.019升/秒·米，平均渗透系数1.517米/日，而171孔，孔深至300.83米未遇溶洞，但溶蚀裂隙很发育，抽水过程中泥砂较多，富水性很弱，水位降低23.71米，单位涌水量0.231升/秒·米，平均渗透系数0.126米/日。沿接触带近矿体地段富水性较强（906孔），近接触带而被火成岩穿插的地段次之（104孔），湖区最弱（171孔）。

通过抽水试验表明，含水岩层是水力联系密切的统一整体。如174孔抽水时，矿区内17个观测孔均有所下降，当主孔降深12.43米时，距离主孔1090米的014观测孔水位下降0.38米。主孔周围170米范围内的观测孔水位下降1.53—8.43米，最大降落漏斗影响半径（北东方向）达1340米，形成椭圆形降落漏斗。

## （三）用趋势分析方法研究岩溶含水层富水性变化规律

### 1. 岩溶发育规律

从矿区62个遇有岩溶的钻孔中，选40个钻孔，利用趋势分析方法，计算岩溶在空间分布及其发育规律。

表 1

孔号	地面标高 (米)	水位埋深 (米)	岩性	最大降深 (米)	涌水量 (升/秒)	单位涌水量 (升/秒·米)	平均渗透系数 (米/日)
906	31.09	16.41	白云质大理岩	15.42	12.847	1.019	1.517
907	14.65	-0.05	白云质大理岩	14.27	8.267	0.579	0.647
104	21.07	4.40	白云质大理岩	16.09	10.78	0.67	1.56
133	21.29	7.30	白云质大理岩	22.71	17.70	0.77	0.95
174	39.56	23.15	白云质大理岩	12.43	6.65	0.53	0.98
171	14.83	-0.25	白云质大理岩	23.71	5.48	0.23	0.126
157	14.73	-0.35	白云质大理岩	8.43	2.53	0.30	0.217

在水文地质图上根据水文地质边界条件定好零点及x、y轴坐标，量出各钻孔在x轴方向，y轴方向至零点的距离和每个钻孔内岩溶的厚度(z)，然后进行趋势面分析的计算，求趋势方程系数、趋势方程、趋势值和岩溶厚度趋势面(图3)。

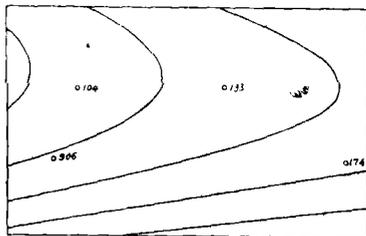


图 3 岩溶厚度二次面趋势图

所得的一次趋势面表明西南岩溶趋势厚向东北逐渐变薄，二次趋势面(图3)表明岩溶趋势厚度变化与一次趋势面变化略有不同，沿抛物线变化，即由西向东岩溶趋势厚度逐渐变薄和北部趋势等高线间距逐渐变宽。这一现象说明，岩溶在西部沿抛物线包围的方向发育厚度大，向东部和两边特别是南边岩溶逐渐不发育，厚度变薄。抛物线顶端排列的方向，基本为大理岩与火成岩接触带的位置，由于火成岩沿接触带侵入，导致接触带附近的大理岩产生较多的裂隙和破碎，有利于地下水的活动，促进了岩溶发育，故趋势值高。此外从图上还可了解矿区大理岩岩溶发展总的趋势，全区向东北方向大理岩分布广泛，因远离接触带，岩溶发育逐渐减弱。

### 2. 渗透系数变化规律

# 实验推断法的探讨

宋克强 (冶金工业部安徽地质公司)

预测地下水量的实验推断法在水文地质工作中获得了广泛应用。笔者利用实验推断法和电算技术,对抽水要素的表达式类型进行挑选,提出对实际资料拟合得最好的预报方程。根据这一原则,参与回归分析的抽水各要素也可增减或替换。用疏干面积代替半径要素,获得较好的效果。笔者收集了九个矿区抽、放水实例,用自编的ALGOL程序,在计算机上进行了计算。

由于供水水文地质工作中研究涌水量曲线方程的经验公式法以及矿区水文地质工作中的相关分析法或相关比拟法,常常需要进行近乎开采性实验来获得数据,并且预报采用外推方法,所以将上述方法统称为实验推断法。相关分析则是这一方法所依赖的数学工具。

## 一、抽水要素间最佳关系式的选择

笔者编制了一个用实验推断法预测涌水量的通用程序,程序中提供了36种曲面类型,以供挑选拟合程度最好的表达式。其步骤是:

1. 输入 $S, Q, r$ 的观测数据;
2. 对各数据做初步变换。本次程序采用了倒数、对数变换,对 $S$ 还增加了 $\frac{S}{Q}$ 的变换,得 $S', Q', r'$ 。
3. 对 $S', Q', r'$ 做标准化变换

$$S''_i = \frac{S'_i - \bar{S}'}{\sigma_{S'}}, Q''_i = \frac{Q'_i - \bar{Q}'}{\sigma_{Q'}}, r''_i = \frac{r'_i - \bar{r}'}{\sigma_{r'}} \quad (1)$$

其中, 
$$\left\{ \begin{aligned} \bar{S}' &= \frac{1}{n} \sum S'_i, \bar{Q}' = \frac{1}{n} \sum Q'_i, \bar{r}' = \frac{1}{n} \sum r'_i, \\ \sigma_{S'}^2 &= \sum (S'_i - \bar{S}')^2, \sigma_{Q'}^2 = \sum (Q'_i - \bar{Q}')^2, \\ \sigma_{r'}^2 &= \sum (r'_i - \bar{r}')^2 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

4. 假定各要素经初等变换后具线性关系,则表达式的一般形式可以写为:

$$S' = b_0 + b_1 Q' + b_2 r' \quad (3)$$

根据 $S', Q', r'$ 的不同组合,能构成36个以(3)式为形式的线性回归方程。对每一类型做相关分析,计算回归系数 $b_0, b_1, b_2$ 和复相关系数 $R$ ;

5. 对复相关系数 $|R| > 0.8$ 的类型,计算到余标准离差 $\sigma$ ,作 $F$ 检验,并在输入设计降深与设计坑道引用半径后,预测矿坑涌水量。

6. 选择复相关系数最大与剩余标准离差最小的方程做为研究区抽水要素的最佳表达式,并取其水量计算结果,做为预报数值。

利用这个程序,在DJS-8机上计算了安徽、山东、湖南江西等地九个矿区实例。

通过实例计算,可以看出:

1. 在所给的36种曲面方程类型中,有三分之一以上的复相关系数都大于0.7,可见,以此做为表达式的精度标准是不足为据的;

2. 目前使用较多的表达式,如:

$$\ln S = b_0 + b_1 \ln Q + b_2 \ln r \quad (4)$$

显然在多数场合下能满足复相关系数大于0.7的要求,但是它实际的拟合总不是最好的;

3. 根据最小剩余标准离差和最大相关系数选择的最佳表达式出现较多的形式有:

$$\ln S = b_0 + b_1 \ln Q + b_2 r \quad (5)$$

$$\text{和} \quad \ln S = b_0 + b_1 Q + b_2 r \quad (6)$$

两种。有 $\frac{S}{Q}$ 和有倒数变换参加的表达式,一般情况下抽水诸因素间的相关程度不是很密切的。

4. 用最表达式预测的水量都比用(4)式计算的小。用(4)式预测的矿坑涌水量都有比实际偏大的倾向。

在含水层的不均质和各向异性比较明显时,引进疏干面积( $W$ )来代替距离因素,新的回归方程形式为

$$S' = b_0 + b_1 Q' + b_2 W' \quad (7)$$

用面积因素代替距离因素后,对三个矿区作了对比计算。用疏干面积进行回归后,最佳表达式的复相关系数都在0.99以上,说明这种因素的替换收到了良好的效果。

利用该矿区七个抽水试验孔计算出的渗透系数作趋势分析。作法也是在矿区水文地质图上先定好零点及 $x, y$ 轴坐标,量出每个抽水孔在轴 $x$ 方向,  $y$ 轴方向至零点的距离。以每个抽水孔计算出的渗透系数为 $\alpha$ 。用同样方法得出渗透系数趋势图(如图4)。

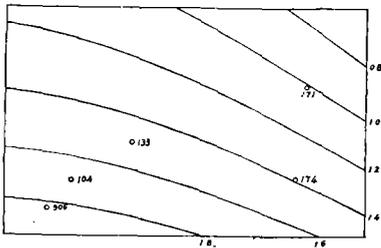


图4 渗透系数二次面趋势图

从渗透系数一次,二次趋势图分析,西南趋势值高向东北逐渐降低。透透性变化规律大致与岩溶发育情况相对应。从渗透系数趋势图分析,还可大致估计各地段渗透系数的大小。

## 3. 单位涌水量变化趋势

应用上面7个抽水试验孔资料,只是将 $\alpha$ 值进行变换,用单位涌水量代替渗透系数。

从单位涌水量一次和二次趋势图均表明,西南方向单位涌水量趋势值高,向东北方向单位涌水量趋势值逐渐降低。其变化规律与渗透系数相似。

综上所述,通过趋势分析,研究了本矿区水文地质各参数的变化规律,从岩溶厚度、渗透系数、单位涌水量三个趋势图分析,可以看出它们在空间的变化趋势及彼此的相互关系。