

水迁移系数与岩溶发育程度之间 关系的初步探讨

罗文斌 金鸣岐

(地质矿产部水文地质工程地质研究所)

引 言

水迁移系数^①是表示地下水由孔隙向裂隙中迁移的参数,它的大小与孔隙、裂隙的发育程度有关。因此,在岩溶孔隙——裂隙含水层中水迁移系数的大小与岩溶发育程度有着直接的关系。为了研究这个问题,我们对河北王窑矿区、山东莱芜顾家台矿区、广东海南岛崖县大茅磷矿矿区及天津宝坻水源地等地的岩溶孔隙——裂隙含水层抽水试验资料进行了分析研究,对上述各地水迁移系数进行了计算,对水迁移系数数值变化范围(大小)及其与岩溶发育程度的关系有了深入的认识。本文对这一工作及工作成果总结如下。

一、孔隙——裂隙含水层轴对称无越流非稳定径向流基本微分方程 及定解条件

$$\frac{n_2 \beta \omega}{K_2} \cdot \frac{\partial S_2}{\partial t} - \left(-\frac{\partial^2 S_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_2}{\partial r} \right) + \frac{n_2 \beta \omega}{K_2} \varepsilon \int_0^t e^{-\varepsilon(t-\tau)} \frac{\partial S_2}{\partial \tau} d\tau = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{初始条件: } S_2 \Big|_{t=0} = 0$$

$$\text{边界条件: } S_2 \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0$$

$$r \frac{\partial S_2}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow 0} = -\frac{Q}{2\pi T_2}$$

① 参考“南京东郊水源地溶孔隙——裂隙含水层地下水运动规律及开采资源计算方法”一文,江苏第一水文地质队等1981年。

式中: n_1 、 n_2 ——分别表示孔隙度和裂隙度

K_2 ——表示裂隙的渗透系数

S_2 ——裂隙水水头降

$\beta\omega$ ——水的压密系数

方程(1)是在孔隙—裂隙发育均匀, 即在每个微元体积中孔隙和裂隙体积之比不变; 模式微元体中各点具有孔隙, 裂隙双重水头, 并分别用平均水头表示; 孔隙体积比裂隙体积大得多, 裂隙导水系数比孔隙的大得多, 当压力降低时, 水由孔隙经裂隙流向水井; 含水层骨架是刚性的, 即不考虑含水层骨架的弹性压缩等基本假设上建立的。

方程(1)考虑 $\sqrt{\frac{n_2\beta\omega\lambda}{K_2} + \frac{n_1\beta\omega\varepsilon}{K_2} \cdot \frac{\lambda}{\lambda+\varepsilon} \cdot r}$ 较小时, 经拉氏逆变换得出如下的近似解:

$$S_2 = \frac{Q}{4\pi T_2} \left[2.3 \lg \frac{2.25 T_2 t}{S r^2} + \int_{\varepsilon t} \left(1 + \frac{n_1}{n_2} \right) \varepsilon t \frac{e^{-u}}{u} du \right] \dots\dots\dots (2)$$

(2)式可解分为两部分, 其中第一部分即为纯孔隙含水层泰斯解的简化形式(即雅可布解), 这说明孔隙—裂隙含水层地下水流动与纯孔隙流具有根本相同之点。解的第二部分与迁移系数 ε 有关, 同时也影响水头的变化, 但随时间的增加,

$$\int_{\varepsilon t} \left(1 + \frac{n_1}{n_2} \right) \varepsilon t \frac{e^{-u}}{u} du \text{ 的值愈小, 对 } S_2 \text{ 的影响就小, 所以称该项为延}$$

迟项。

当 t 值较大时, 即 S 在半对数坐标上出现直线段后, $w(\varepsilon t) \rightarrow 0$, 因此, 计算 S 时可用雅可布法。

计算水迁移系数 ε 是利用抽水试验观测水位随时间变化资料。首先做 $S-\lg t$ 曲线图(图1), 把图上的曲线 I 延长与 S 轴相交, 从图上看, 曲线 I 的前期为曲线, 后期为直线; A 点为曲线 I 和纵轴的交点, B 点是直线部分延长与横轴的交点, $S_B = 0$, 曲线 I 的直线段对应于一个对数周期的降深为 ΔS , 利用这些特殊点确定导水系数、弹性贮存系数以及水迁移系数。

具体作法如下:

1. 导水系数 T_2 的确定

从公式(2)中略去积分部分, 考虑图1的直线部分得到:

$$\frac{2.3 Q}{4 \pi T_2} = \Delta S, \text{ 即 } T_2 = \frac{2.3 Q}{4 \pi \Delta S} = 0.183 \frac{Q}{\Delta S}$$

2. 弹性贮存系数 S 的确定

利用B点 ($S_B = 0$) 表示(2)式第一部分为零, 即得:

$$\frac{2 \cdot 25 T_2 t_B}{S r^2} = 1, \text{ 即 } S = \frac{2 \cdot 25 T_2 t_B}{r^2}$$

3. 水迁移系数 ε 的确定

利用A点, 从图上量得A点降深 S_A , 而 t_A 为已知, 由公式(1)得:

$$S_A = \frac{2 \cdot 3 Q}{4 \pi T_2} \lg \frac{2 \cdot 25 T_2 t_A}{S r^2} +$$

$$\frac{Q}{4 \pi T_2} w(\varepsilon t_A)$$

式中 $w(\varepsilon t_A)$ 表示井函数

算出上式右端的值以后, 查井函数相交于 $w(u)$ 的 u , 而 $u = \varepsilon t_A$, 所以查出 u 后即可算得 ε 。

也可不必把曲线延长与 S 轴相交, 只要肯定 t 时已经偏离了直线, 则由初期 t_0 的水位降 S_0 得:

$$S_0 - \frac{2 \cdot 3 Q}{4 \pi T_2} \lg \frac{2 \cdot 25 T_2 t_0}{S r^2} = \frac{2 \cdot 3 Q}{4 \pi T_2} w(\varepsilon t_0)$$

再用上述方法求 ε 即可。

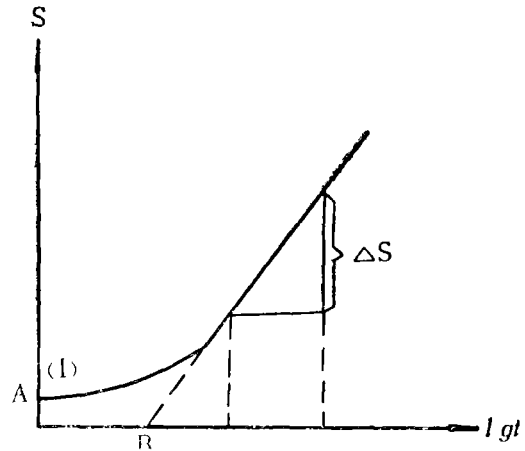


图1 $S-lgt$ 曲线图

Fig. 1 Curve of $S-lgt$

二、实 例

为了研究水迁移系数与岩溶发育程度之间的关系, 我们利用海南岛崖县大茅磷矿矿区, 山东莱芜顾家台矿区的抽水试验资料, 计算水迁移系数。

1. 海南岛崖县大茅磷矿矿区

(1) 矿区的水文地质概况

大茅矿区位于海南岛崖县, 为南北向狭长的盆地, 矿区的东北西三面低山丘陵环绕, 相对高差150—350米, 形成一个完整的水文地质单元。矿区的汇水面积约47平方公里, 南部有一个狭长的排泄口。盆地内除中和岭等少数残丘外, 大部分是山间冲洪积层, 地势北高南低。

矿区构造特点是以断裂为主, 褶皱次之。地层呈单斜产出, 断裂构造按其走向分两组, 即与地层走向近似一致的纵断层和与地层走向交切的横断层。褶皱则多被断层破坏, 残存褶皱仅有田边岭向斜, 廖练岭向斜。

矿区内分布的主要有寒武、奥陶系含水岩组。寒武系以白云岩、石英砂岩为主, 中间夹

从图3中曲线的直线段上,找出对应时间一个对数周期的 ΔS ,然后进行计算。

1) 计算导水系数 T_2

已知: $\Delta S = 1.08$ 米, $Q = 1900$ 米³/日

$$T_2 = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta S} = \frac{2.3 \times 1900}{4 \times 3.14 \times 1.08} = 322.157 \text{ 米}^2/\text{日}$$

2) 求弹性贮存系数 S

将图3中的直线段延长与 $\lg t$ 轴相交于 S_B

$$S_B = 0 \quad t_B = 0.0597 \text{ 日} \quad r = 167.85 \text{ 米}$$

$$S_B = \frac{Q}{4\pi T_2} \left[2.31 \lg \frac{2.25 T_2 t_B}{S r^2} + w(\epsilon t_B) \right]$$

$$\because \lg = \frac{2.25 T_2 t_B}{S r^2} = 0 \quad \frac{2.25 T_2 t_B}{S Q^2} = 1$$

$$\therefore S = \frac{2.25 \times 322.157 \times 0.0597}{167.85^2} = 0.00153$$

$$\text{即 } S = 1.53 \times 10^{-3}$$

3) 计算水迁移系数 ϵ

在图3中找出 S_0 降深时的 t_0

已知 $S_0 = 0.27$ 米 $t_0 = 100$ 分

$$S_0 = \frac{0.183Q}{T_2} \lg \frac{2.25 T_2 t_0}{S r^2} + \frac{0.08Q}{T_2} w(\epsilon t_0)$$

$$\frac{0.80}{T_2} w(\epsilon t_0) = S_0 - \frac{0.183Q}{T_2} \lg \frac{2.25 T_2 t_0}{S r^2}$$

$$0.471 w(\epsilon t_0) = 0.27 - 0.166$$

$$0.471 w(\epsilon t_0) = 0.104$$

$$w(\epsilon t_0) = 0.220$$

查井函数表得: $\epsilon t_0 = 1.1454$

$$\epsilon = 0.01145 = 1.115 \times 10^{-2}/\text{分}$$

各孔的水迁移系数列于表1。

4) 水迁移系数与岩溶发育之间的关系

表1中水迁移系数数值的大小与各孔的岩溶发育程度关系密切。观测孔42、203、201的水迁移系数数值为 $1.145 \times 10^{-2} \sim 1.23 \times 10^{-3}$ 比较大,它们正好位于 F_5 断层附近,钻孔的岩溶率

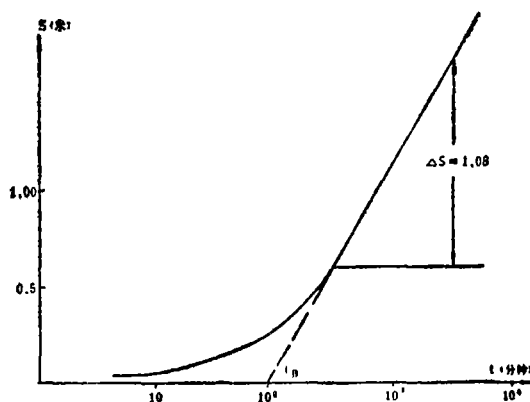


图3 201孔S—lgt曲线图

Fig. 3 S-lgt curve of No. 201 observation borehole in Damao mine area

在 20% 以上, 而 42 号孔的岩溶率最高为 41.1%, 计算的水迁移系数为 4.62×10^{-3} , 抽水时的延滞效应在 150 分钟内发生。

观测孔 202、193 不在断层带近附, 岩溶率比较低, 在 3.76% 左右, 计算出的水迁移系数值为 $8.75 \times 10^{-4} - 2.5 \times 10^{-4}$ 之间, 这两个孔的延滞效应在 400—580 分钟内发生。

2. 山东莱芜顾家台矿区

(1) 矿区的水文地质概况

顾家台矿区位于矿山背斜之西翼。区内构造以断裂为主, 褶皱次之。主要构造形迹有:

弧形断裂: 由两条大致平行的弧形断层组成, 沿盆地北部及东部的低山丘陵区呈弧形展布。它的次一级构造由于南北向强烈扭应力的作用, 派生有八里沟向斜, 矿山背斜等。

东西向断裂: F_1 压性断层, 沿盆地南部边缘近东西展布, 它的次一级构造本区亦较发育。另外, 近期活动的东西向压性结构面有 F_2 、 F_3 、 F_4 等, 但其规模较小。

该区主要含水层为中奥陶系灰岩, 大理岩等, 对坑道充水威胁最大。还发育有石炭、二叠系地层及燕山期闪长岩岩体。

一般近岩体的灰岩、大理岩岩溶发育程度比远离岩体的发育强烈。近岩体的钻孔线岩溶率一般达 30% 以上, 而远离岩体的小于 10%。浅部岩溶较深部发育强烈, 但浅部溶洞多被充填。因而, 主要富水带位于含水岩层的中上段, 其下限为 2—250 米处 (图 4)。

(2) 抽水试验

该矿区于 73 年 11 月 9 日开始抽水, 由两个抽水孔进行。主孔位于矿区中心富水性最强的部位, 相距 15.4 米。抽水量 $Q = 8533.728 \text{ 米}^3/\text{日}$ 。

(3) 水迁移系数的计算

选择了 9 个观测孔, 将各孔的 4150 分钟的观测资料, 绘制各孔的水位降深和时间的半对数曲线图。按前面的公式计算, 结果列于表 2。

(4) 水迁移系数与岩溶发育程度之间的关系

表 2 的各水迁移系数值的大小, 反映了其与岩溶发育程度之间的密切关系。

观测孔 CK521、ZK571、CK530 的水迁移系数比较大, 为 $1.23 \times 10^{-2} - 1.772 \times 10^{-2}$ 之间。从钻探资料看, 这些孔的裂隙溶洞发育, 全孔平均线岩溶率为 62% 以下, 抽水时间的延滞

表 1 大茅矿区水迁移系数计算结果表

Table 1 Calculation results of water migration coefficient in Damao mine area

孔 号	与主孔的距离 (米)	水迁移系数 (1/分)
201	167.85	1.145×10^{-2}
42	253.99	4.62×10^{-3}
203	101.36	1.23×10^{-3}
181	333.15	2.03×10^{-3}
205	331.73	2.44×10^{-3}
202	393.86	2.5×10^{-4}
11	487.80	2.1×10^{-3}
27-1	226.25	1.65×10^{-3}
193	92.45	8.75×10^{-4}

表 2 顾家台矿区水迁移系数计算结果表

Table 2 Calculation results of water migration coefficient in Gujiatai mine area

孔 号	与主孔的距离 (米)	水迁移系数 (1/分)
ZK575	1727.225	3.146×10^{-4}
ZK521	218.110	1.772×10^{-2}
ZK572	1184.86	1.23×10^{-2}
ZK12	3024.861	5.84×10^{-3}
ZK4	1762.18	1.925×10^{-3}
CK520	570.0	4.44×10^{-3}
CK530	316.354	1.52×10^{-2}
ZK574	1601.356	4.6×10^{-3}
ZK576	1408.445	4.02×10^{-3}

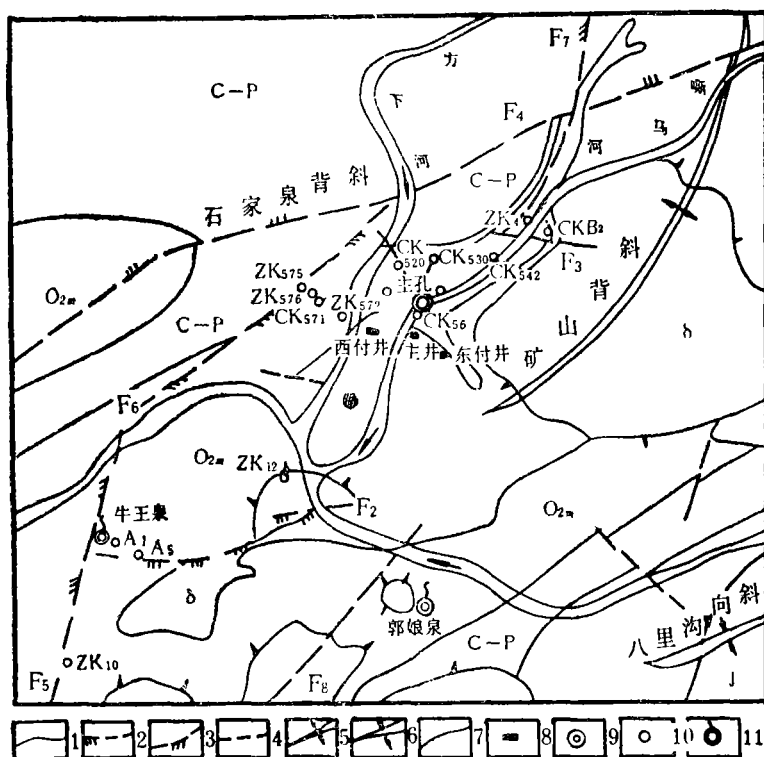


图4 顾家台矿区基岩地质与观测孔分布简图

Fig. 4 Schematic map showing geological configuration of bedrock and distribution of observation borehole in Gujiatai mine area

- 1.地质界线 2.压性断层 3.压扭性断层 4.性质不明断层 5.背斜轴 6.向斜轴 7.第三系分布范围
8.矿坑及竖井 9.抽水主孔 10.观测孔(井) 11.泉

效应在10~15分钟发生。观测孔ZK574、ZK576、CK520、ZK 4、ZK 12等孔的水迁移系数较大,在 1.925×10^{-3} — 5.84×10^{-3} 之间。据钻探资料,岩芯采取率小于66%,溶洞比较发育,抽水时的延滞效应在100分钟左右发生。而ZK575孔的水迁移系数较小,为 3.146×10^{-4} 。该孔位于矿区西部,靠近F₆断层,岩溶不发育,抽水时的延滞效应在1000分钟以上发生。

结 论

在研究水迁移系数与岩溶发育程度之间的关系时,得出以下几点看法:

(1)水迁移系数是研究岩溶孔隙——裂隙含水层中地下水流动新的重要参数,它的计算方法较简便,可利用短时间的抽水试验资料进行计算。尤其在初期阶段的水资源评价,更为适用。

(2)从上面的计算可看出,观测孔在断层带附近,岩溶较发育及钻孔岩溶率较高的,计算

出的水迁移系数较大，一般在 10^{-2} — 10^{-3} 之间。抽水时的延滞效应在几分钟到300分钟之间发生。

(3)在勘探区资料较少的情况下，利用群孔抽水试验，计算水迁移系数，可进一步了解该地区的岩溶发育程度及含水层的富水性，为选择水源地段提供依据。

由于时间短，资料少，计算出的水迁移系数不够全面，文中不妥之处，请批评指正。

PRELIMINARY DISCUSSION ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE WATER MIGRATION COEFFICIENT AND THE DEGREE OF KARST DEVELOPMENT

Luo Wenyu Jin Mingqi

*(Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ministry of Geology
and Mineral Resources)*

Abstract

On the basis of many pumping data, a great deal of water migration coefficient is calculated in each well and analyzed in this paper. The calculation results indicated that water migration coefficients of observation wells, which are located in the fault belts or their influence belts and in strong karst developed zones or higher karst rate of drill core, range from 10^{-2} to 10^{-3} , and their delayed effect of time occurs between a few minutes to three hundred minutes during the pumping, otherwise the coefficients are smaller in other places. Therefore, it is a close relationship between the water migration coefficient and the degree of karst development in karst regions.

更正：《中国岩溶》1984年第三卷第二期的P31表1中，北台期上边的波折线应改为代表连续沉积的直线，北台期下边的直线应改为代表剥蚀面的波折线。