

# 论岩溶水系统预报时边界条件问题

崔光中 朱远峰

(地质矿产部岩溶地质研究所)

## 一、问题的提出

七十年代以来,国内用线性渗流确定性模型对地下水系统进行数值模拟(反求参数,预报人工流场),已取得丰富的成果和经验,但也存在一些问题。其中重要的问题之一是模型预报时边界条件的非确定性。对于该问题虽然有不同的解决办法,也有一些较大的分歧,至今还缺乏一套科学依据较严密的处理原则和求值方法。

由于岩溶地下水往往具有“三水”转化迅速,含水介质导水能力强,且非均质各向异性明显的特点。预报时边界条件不合理势必会造成计算成果有很大的偏差。本文收集1975年以来公开发表的(个别属内部)大型岩溶供排水数值计算成果十一份(五份作者参加过野外工作,其中三份作者是计算的主要参加者),对边界条件及处理方式作了初步分析,并提出处理这类边界问题不成熟的意见。

## 二、岩溶水系统的边界类型

十一个供(排)水源地的资料简化汇入表(图)1中。各岩溶水系统(一级单元)自然流场补给、排泄形式和开采后人工流场补给形式统计于表2、3。(一个水源地可能具有多种补、排形式)

从十一个供(排)水源地的统计,岩溶水系统(区域单元)一级的边界性质,按其封闭程度(与外部的水量交换程度)划分,可有封闭、半封闭和开放三种。封闭系统,基本上属于当地露头接受补给,由附近的岩溶泉水排泄,与其它系统不发生水量交换关系;反之,属于开放系统的有广大补给区及补给水源,又有开阔的迳流区和向外系统排泄的边界;而属于半封闭系统的边界,它们之间的封闭程度有很大差别。有些处于断陷盆地,迳流条件不好(如河北临城,山东召口);有的却处于具有大区域松散含水层覆盖下天窗垂直入渗补给(淮北闸河平原的二电厂),或与地表水补给关系密切的岩溶泉域内(河北邯郸黑龙洞泉域内的王凤、邢台百泉泉域内的王窑和冯村)。上述三种类型基本反映出我国岩溶水系统的形成受地质构造控制,封闭程度则属于补给排泄条件的综合情况,它客观上决定了岩溶水量计算的背景值。

由于工作程度和评价需要,岩溶水计算区往往只涉及较小范围而不是一个完整的单元。计算预报属于开采后的人工流场,它的边界性质与上述一级单元的天然流场状态的边界性质常常有根本差别。统计所知除宝坻、南京东郊和临城三个点外,其余8个都是计算区远远

表1 大型岩溶水供排水源地边界条件统计

Table 1. Statical table (chart) of boundary condition about large karst groundwater supply or drainage base

| 名称                                                         | 岩溶水系统 (一级单元) |      |       | 计算区人工流场                              |         |     |
|------------------------------------------------------------|--------------|------|-------|--------------------------------------|---------|-----|
|                                                            | 边界类型         | 补给形式 | 平面示意图 | 边界条件                                 | 概化模式示意图 |     |
|                                                            |              |      |       |                                      | 平面图     | 剖面图 |
| 山东莱芜王屋山铁矿<br>(构造陷盆地 $O_2$ )<br>半封闭系统                       | ①            | ③    |       | 界入海<br>第四纪砂砾石覆盖带向天窗<br>断层接触带水头到达天窗向边 |         |     |
| 天津武清石化供水源地<br>(巨厚松散层覆盖向斜盆地 $O_1+2$ )<br>封闭系统               | ③            | ②    |       | 第四纪冲积层底定水头越流补给                       |         |     |
| 河北邯郸王窑铁矿<br>(山前地堑地垒群 $O_2$ )<br>半封闭系统                      | ①            | ③    |       | 区域透流带出水口距水头边界                        |         |     |
| 山东淄博白口铁矿<br>(穹窿构造周边隔水 $O_2$ )<br>封闭系统                      | ①            | ③    |       | 垂直天窗入海补给<br>周边水口远距固定水头边界             |         |     |
| 河北邯郸冯村铁矿<br>(半封闭系统 $O_2$ )                                 | ①            | ③    |       | 区域透流带出水头边界                           |         |     |
| 南京东郊供水源地<br>(半封闭系统 $O_2$ 式向斜 $T_2$ )<br>150km <sup>2</sup> | ①            | ③    |       | 边界垂直天窗入海补给<br>区域透流带出水头边界             |         |     |

续表 1

| 名称           | 岩溶水系统 (一单元) |           |       |                                                         | 计算区人工流场 |     |
|--------------|-------------|-----------|-------|---------------------------------------------------------|---------|-----|
|              | 边界类型        | 天柱顶天窗排灌形式 | 平面示意图 | 边界条件                                                    | 平面图     | 剖面图 |
| 河南焦作煤矿 (中马村) | ① ② ③       | ① ② ③     |       | 断层进水—水头或流量边界                                            |         |     |
| 河北城城煤矿       | ① ②         | ① ②       |       | 构造顶托排灌转化为反补给<br>河流入渗转化为第四系潜流补给                          |         |     |
| 河北邯郸王庄煤矿     | ① ③         | ①         |       | 断层段段进水口水头边界                                             |         |     |
| 湖南邵东王庄煤矿     | ①           | ①         |       | 地表水垂直入渗<br>进口水头边界露头区反                                   |         |     |
| 安徽淮北二电厂供水源地  | ① ②         | ① ②       |       | 方面为无限边界 (李干变水头)<br>入渗：第四纪冲积层、北、西、东、二<br>灰岩：进水量水头边界垂直向天面 |         |     |



1. 隔水边界 (①确定, ②不确定) 2. 第四系覆盖天窗垂直入渗 3. 进水边界 (不确定)  
4. 反补给边界 (不确定)

补给形式: ①露头入渗 ②河流入渗 ③天窗入渗

排灌形式: ①泉排 ②天窗顶托 ③区域潜流

小于自然单元区,而这些计算区的进水边界主要为区域迳流带的进水口(水头边界)以及第四系含水层通过天窗垂向入渗。除灰岩露头直接受大气降水入渗外,上述这两种边界也反映出岩溶水系统在人工开采流场时接受补给的主要形式。

表2 岩溶水系统(一级单元)自然流场补给,排泄形式统计表

Table 2. Statistical table of recharge and discharge mode of natural flow field in karst groundwater system

| 补 给 形 式         | 个 数 | 排 泄 形 式               | 个 数 |
|-----------------|-----|-----------------------|-----|
| 灰 岩 露 头 直 接 入 渗 | 10  | 岩 溶 泉 ( 包 括 流 入 河 流 ) | 10  |
| 河 流 渗 入         | 4   | 天 窗 顶 托               | 6   |
| 天 窗 垂 直 入 渗     | 3   | 区 域 潜 流               | 4   |

表3 开采后人工流场补给形式统计表

Table 3. Statical table of recharge mode of artificial flow field in karst groundwater system under exploitative condition

| 补 给 形 式                     | 个 数                       | %  |
|-----------------------------|---------------------------|----|
| 灰 岩 露 头 直 接 渗 入             | 9                         | 81 |
| 通 过 第 四 系 与 灰 岩 接 触 天 窗 越 流 | 7                         | 63 |
| 其 中 ,                       | 定 水 位 越 流                 | 1  |
|                             | 变 水 头 ( 双 重 结 构 联 立 求 解 ) | 1  |
|                             | 定 流 量 入 渗                 | 5  |
| 其 中 ;                       | 侧 向 进 水 边 界               | 9  |
|                             | 迳 流 带 进 水 口 定 水 头         | 7  |
|                             | 迳 流 带 进 水 口 变 水 头         | 1  |
|                             | 断 层 与 弱 含 水 层 接 触 变 水 头   | 1  |

经过分析认为,上述计算区对进水口按定水头边界处理,在长期和大量的供(排)水状态下,边界水位能否保持固定很值得怀疑。据初步调查,如宝坻水源地原来供水边界定在奥陶纪灰岩向斜构造东部,由沙流河冲洪积扇水向下伏的砾石层入渗,通过与 $O_2$ 灰岩直接接触的天窗地段垂向补给。该地段的区域地下水位为+20米标高,计算时为了保险已降低至+16米,但当供水水量还不到原计算的50%时,实际水位已低于计算预测的数值。又如湖南斗笠山煤矿,计算中将东北进水口定为+134米标高定水头边界,多年来矿山排水虽然水量变化不大,但分水岭不断外推,已远超过原划定的位置。如果继续往东北方向迁移,一旦与涟水河发生联系,情况便要发生根本变化。至于有些计算区采用变水头边界,根据大型抽水中心点与边界水位的降深变化规律,求出半经验(统计)的线性或非线性函数关系,再下推预报计算时的边界值,虽然比前面的做法要好些,但下推过大仍可出现偏差。有些计算区将岩溶

水分水岭定为固定性的隔水边界，也存在分水岭可能迁移的情况。

综上所述，由于岩溶水系统存在开放和半开放（半封闭）的边界，或是由于预报时采取小范围的不能固定的进水边界，这些边界都不能在预报前确定其在人工抽排过程中的变化。属于这类边界的，有地下水分水岭，断层弱透水边界，变水头越流补给边界、进水口（或排泄口转化为进水口）边界等等。其特点是当岩溶水系统内因强烈抽排水导致大范围的水位下降时，边界另一侧的补给水源不具备“无限”的补偿能力，因而边界水位发生变化（不能定水头），这样便产生边界条件的非确定性问题。

### 三、问题的讨论

#### 1. 关于岩溶水系统的边界性质问题

作为地下水系统的一种形式，岩溶水系统是以岩溶含水介质为地下水贮存和运动的四维空间。这个系统有其本身特有的结构、边界条件以及完整的补、迳、蓄、排的体系。岩溶水系统经过条件概化后就是人们所称的岩溶水文地质模型。

从集合论的观点，岩溶水系统是含有复杂的岩溶水“元素”组成的集合  $K$ ，属于具有  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $t$  四维空间的完全集合的  $\Omega$  的子集。岩溶水系统有其值域范围  $D$ ，当岩溶水系统（集合）与其它系统（集合）相交，其交集就是岩溶水系统的边界。如以  $P$  代表大气降水系统， $S$  代表地表水系统， $N_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别代表非可溶岩系统的不含水层、弱含水层和松散含水层， $K_1$  和  $K_2$  代表不同的两个岩溶水系统，或同一系统中两个岩溶水子集，它们的交集有如下水文地质意义：

$K \cap P$  岩溶含水体（简称灰岩）露头接受大气降水的补给区（边界）

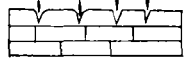
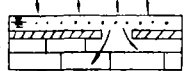
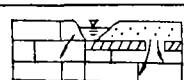
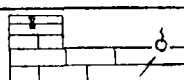
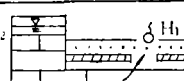
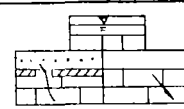
$K \cap S$  灰岩接受地表水补给或向地表水排泄的边界（包括某些岩溶泉）

$K \cap N_i$  灰岩与非可溶岩的接触边界

$N_1$  为隔水边界， $N_2$  为弱透水边界， $N_3$  则为补给或排泄的天窗。它们可

表 4 岩溶水系统补给排泄模式

Table 4 The patterns of recharge and discharge of karst groundwater system

| 基本补给模式                                                                                                                         | 边界性质                              | 模型表达式                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  大气降水<br>露头入渗                                | $K \cap P$                        | $+e(x, y, t)$                                                                                                              |
|  大气降水入渗<br>松散层后通过<br>岩溶天窗补给                 | $K \cap N_3 \cap P$               | $+ \eta (H_1 - H_2)$                                                                                                       |
|  河流入渗补给                                     | $K \cap S$<br>$K \cap N_3 \cap S$ | $\begin{cases} H_{r1}(x, y, t) \\ q(x, y, t) \end{cases}$                                                                  |
| 基本排泄模式                                                                                                                         | 边界性质                              | 模型表达式                                                                                                                      |
|  岩溶泉排泄<br>(长年性、季节性<br>或雨季溢洪)                | $K \cap S$                        | $-Q(x, y, t)$                                                                                                              |
|  通过岩溶天窗向<br>松散覆盖层顶托<br>补给                   | $K \cap N_3 \cap S$               | $-Q(x, y, t)$<br>$-\eta_1 (H_1 - H_2)$                                                                                     |
|  转化为松散<br>覆盖层迳流<br>或区域迳流，<br>出水口排泄<br>构造水排泄 | $K \cap N_3$<br>$K_1 \cap K_2$    | $-\eta_1 (H_1 - H_2)$<br>$-\sigma \cdot (T_{(1-2)} \nabla h)$<br>$\begin{cases} H_{r1}(x, y, t) \\ q(x, y, t) \end{cases}$ |

以是断层接触或整合、不整合接触

$K_1 \cap K_2$  以地下水分水岭形式存在的隔水边界；断层（隔水或阻水）边界；地下迳流进出水口边界。

岩溶水系统的补给、排泄模式、边界性质的数学表达式列入表4。一个完整的岩溶水系统，往往具有上述一种或数种边界；而  $K \cap S$  即岩溶水系统以大泉形式集中排泄，形成地表固定水流； $K \cap N_3$  岩溶水通过天窗越流接受补给或排泄，则是岩溶水系统补给和排泄的主要形式。总的来说，边界性质是根据岩溶水系统与外系统水有无交换，以及交换方式来确定。不同的岩溶水系统的水文地质特征，是由其客观存在的边界条件所支配。目前在一些水资源评价或涌水量计算文献中往往用很大篇幅重复叙述已成熟的计算方法，但对于关键性的边界条件的论证则一笔略过，这些偏向值得注意和纠正。

## 2. 关于预测开采形成人工流场后的边界问题

当岩溶水系统处于大量开发或排水疏干，用  $W$  代表抽排水的方式和强度，这时岩溶水系统出现新的边界条件  $K \cap W$ 。在强烈岩溶化地区，当抽排水强度大，降落漏斗将会迅速扩展最后达到区域（系统）边界。这时以  $K \cap W$  为漏斗中心就成为人工流场的内边界（排泄边界），区域的补给边界则为外边界。

当所研究的岩溶水系统  $K$  的空间范围  $D$  不随抽排水而改变，采用带分布参数的确定性模型来预报人工流场时的水头分布，其使用条件是不仅要知道内边界，还要知道外边界条件，即要在预报前知道整个内外边界的水位或流量变化的全过程。内边界可由人工控制而给出，而外边界，除非是具有真正的定水头边界或隔水（零流量）边界，否则都要出现非确定性的边界问题。

以有限元法离散确定性数学模型后，给出最简化的线性代数方程组的表达式，可说明人工流场的水位预报对边界水位和边界流量的依赖关系：

$$\left[ \frac{D_m \cdot m}{2} + \frac{E_m \cdot m}{2 \Delta t} \right] H_m(t) = \frac{Q(t)}{2} L_m - \left[ \frac{D_m \cdot n}{2} + \frac{E_m \cdot n}{2 \Delta t} \right] H_{n,0} \\ - \bar{Q}_m - \left[ \frac{D_m(n-m)}{2} + \frac{E_m(n-m)}{2 \Delta t} \right] H_{(n-m)}(t)$$

式中： $H_m(t)$ —— $t$ 时刻计算结点的水位。

$D$ 、 $E$ ——分别代表带导水系数和储水系数参数的系数矩阵

$H_{n,0}$ ——结点初始水位

$Q(t)$ —— $t$ 时刻侧向流入（出）的边界单宽流量

$\bar{Q}_m$ ——垂向补给量与抽水井水量之和（流入为正，流出为负）

$L_m$ ——II类边界点的宽度

$m$ ——内结点及II类边界点之和

$n$ ——总结点数

$\Delta t$ ——时间步长

从上式可知，要解出  $H_m$  结点在  $t$  时刻的水位（即人工流场的水头分布值），应知道同

一时刻 $Q(t)$ 或 $H_{(n-m)}^{(t)}$ 的水头值。

$Q(t)$ : II类边界问题

$H_{(n-m)}^{(t)}$ : I类边界问题

$Q(t)$ 与 $H_{(n-m)}^{(t)}$ : 同时存在时为混合边界问题。

由此可知,在确定计算范围时,尽可能要将计算区的边界与原来的岩溶水系统(已查明)的自然边界一致,保持完整的岩溶水系统 $K$ 以及其值域 $D$ ;即要尽可能消除因为计算区范围缩小而增加外边界不确定的因素(例如宝坻和斗笠山)。

如果存在不确定边界,按照已有的两种处理方式:①排水疏干计算时往往转化为定水头边界;供水时,加大区域范围采取隔水边界(条件近似的处理);②给出下推水位变化的半经验公式(大型抽水模拟处理)进行处理,都必须有较严格的约束条件。此外,还有人对此类水头边界的处理,以简化边界几何形态,采用解析解的方法来算出不同时间段的边界水头变化作为数值解的边界函数,也同样应严格的论证采用解析解时的结构(均质含水层)和边界(无限含水层)条件,与计算区的相似性。对于脱离具体的水文地质条件,单纯依靠计算方法来解决边界条件问题的作法不宜提倡。

### 3. 流量(II类)边界的预测问题

对于岩溶地下水分水岭,统计资料中有两个计算区按隔水(零流量)边界处理;另一个按定水头边界给出。后者的处理显然不太合适。在长期预测计算中,岩溶地下水分水岭是否能够在两个岩溶水系统之间作为隔水边界存在,值得认真分析研究。在下列情况下,地下水分水岭才有可能长期存在而不迁移或消失:

(1)峰丛山区灰岩水力坡度变得很陡,甚至出现不连续水位的地段;

(2)灰岩导水性极微弱的地段;

(3)远离内边界,大面积灰岩出露(或大范围松散含水层越流补给),入渗条件很好。

尽管如此,特别是在第三种情况下也需要作水均衡的论证才能认为上述处理是正确。

对于河流通过第四系松散含水层入渗,或第四系对灰岩天窗越流入渗的计算,则有如下的处理方式:

①当第四系含水层厚度不大时,则可考虑将第四系含水层疏干至底板,然后转化为向岩溶水系统定流量注水的大井来处理(固家台)

②当有较大的地表水体成为经常性的补给源时,则应考虑转化为第一类越流系统处理(宝坻);

③当岩溶水系统被大面积含水丰富的松散含水层覆盖时,则应考虑按双重结构问题处理。即给出两含水层系统天窗连接条件,再分别给出两含水系统的边界条件,联立求解两层的水头函数。在这种情况下,河水对岩溶水系统的补给就转化为对第四系含水层在大面积变水头越流问题的处理(淮北二电厂)。

### 4. 水位(I类)边界的预测问题

将非确定性边界(主要是进水口、具有无限延伸的岩溶含水层等)转化为定水头边界处

理时,对于供水资源评价要格外慎重,至少应加三个约束条件。

(1) 定水头边界的位置要放在比原来边界“足够”远的距离。距离的远近决定于进水口岩溶含水体的导水性和进水口外的补给条件。定水头的标高既要考虑口外区域地下水位及其年变幅,也要考虑到内外边界作用下,漏斗(浸润)曲线经过进水口时的形态。当进水口地段岩溶发育随深度有明显减弱时,应注意是否会出现水力“门槛”的现象,如是就要转化为定流量边界。

(2) 预报计算的每个时段,都要算出通过进水口的流量值;特别是后期的拟稳定流入量,要和进水口外的区域可能补给量均衡,并要有充分资料(主要是区域迳流率和入渗系数)加以论证。

(3) 预报的时间要严格限制,不能过长。

对于采取半经验方程下推边界水位的方法(固家台、王凤),比转化为定水头边界更接近于未来实际情况。采用这种方法也要有如下约束条件:

(1) 有足够大的抽(排)水强度,使计算区内及进水口边界附近的水位有较大幅度的下降值,并且产生口内外明显的水头差;

(2) 最好能作多次不同降深的拟稳定抽水试验,找出中心水位与边界水位降深的函数关系;

(3) 预测计算时的水位边界下推值不能过大,但同样应有区域可能补给量来论证。进水管口的进水量应与岩溶水系统的开放程度相适应。

#### 四、结 语

1. 在岩溶水的预测计算时,应尽可能将计算边界取到自然边界上。当边界存在非确定性因素,而用数值方法求解线性渗流确定性模型时,目前多采用边界条件近似方法来处理。将不确定性的边界转化为定水头边界、隔水边界或无限边界,或是根据大型抽水试验求出中心降深与边界水位降深的变化规律,用外推的方法预测边界水位,都必须给出约束条件以及对边界条件的论证要求,否则将会使预报计算出现严重脱离实际的计算结果偏差。

2. 由于岩溶水系统K与地表水系统S,大气降水系统P三者关系密切。这三个系统的相交程度基本上达到并集KUSUP,因此岩溶地区特别是南方裸露型的岩溶区,“三水”资源要统一评价,地表水与岩溶水的预报要与气象预报统一考虑。

3. 为了解决带分布参数的确定性模型(白箱模型)预报时出现的非确定性边界问题,有必要将边界放在系统的交集部位,以大气降水补给区或地表水作边界。例如在岩溶峰丛山区可根据历年气象资料给出一定频率条件下的降水量或最大可能降水量,以此作输入信息。用系统理论或回归分析(黑箱)方法,求出输出信息作为补给区入渗量,并转化为侧向迳流的Ⅱ类边界。即将确定性模型与统计(随机)模型结合构成灰箱,这是值得进一步探索的方向。

4. 有关岩溶水管道流或非线性渗流模型及边界问题,应加强研究或总结。

## 参 考 文 献

- [1] 山东大学数学系、山东固家台矿堵水办公室 电子计算机在矿床疏干计算中的应用 水文地质技术方法(第三辑) 地质出版社 1977年
- [2] 地科院水文地质工程地质研究所、河北省地质局第十二地质队、北京大学数学系 用有限元法预测王窑矿区矿坑涌水量的方法探讨 综合治理和利用矿床大面积地下水(经验汇编) 煤炭工业出版社 1979年
- [3] 河北地质学院水文地质系电算电模拟小组 解非稳定流向的R—C电网络模拟方法 同上
- [4] 山东大学数学系、山东冶金局金岭铁矿地测科 矿坑涌水量预测数值方法与召口矿区的计算实例 水文地质技术方法(第六辑) 地质出版社 1978年
- [5] 薛禹群、谢春红等 三维流问题的里兹有限元解在矿山疏干中的应用 水文地质工程地质 地质出版社 1981年第3期
- [6] 余国光、林学钰等 应用“有限元法”预测复杂大水岩溶矿床 邯邢水文地质勘探资料汇编 煤炭部邯邢水文勘探指挥部出版 1981年
- [7] 崔光中 岩溶充水矿床涌水量数值计算的水文地质模型 河北地质学院院报 1979年第1期
- [8] 阮森森 用有限元预报水位的方法与问题的分析 地下水资源评价理论与方法的研究 地质出版社 1982年

## ON THE PROBLEM OF BOUNDARY CONDITION IN KARST GROUND WATER SYSTEM FORECASTING

Cui Guangzhong Zhu Yuanfeng

(*Institute of Karst Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources*)

### Abstract

The boundary of a karst groundwater system may be described as its set product with other systems by virtue of the notion of set theory. The boundary of karst groundwater system can be defined as confined, semiconfined or open type, according to the amount of water exchanged in the product of sets.

The emphasis of this paper is laid on summarizing the problem of indefinite boundary which appears in forecasting groundwater resources stored in extensive karstified systems calculated with numerical method by Chinese hydrogeologists since the 1970's. The factors that cause the indefinite boundary and the approximate method currently used for solving the problem are discussed. Finally, the authors put forward the way of calculation and the controlling conditions in groundwater forecasting for yielding (II) or water level(I) boundary.