

第六章 河流子程序包

概念及程序化

河流及溪流是向地下水系统提供水源还是排泄地下水，取决于河溪与地下水之间的水力梯度。使用河流子程序包的目的是模拟地面水与地下水系统间的水流。因此，地下水流动方程（公式(26)）中受渗流影响的每个计算单元必须添加能表明地下水渗流流出地表或地面水入渗的参数项。

图32将一条河流分成若干河段，每段完全被包含在一个单独的计算单元之中。河流与含水层之间的水力联系由各河段与其所在的计算单元之间的渗流来模拟。

图33-a的剖面图表示开敞的河流与地下水系统之间夹有一层低渗透性的河床底积物的状况。图33-b将该系统加以理想化，河流—含水层间水力联系用一个简单的水力传导系数表示，并且视之为一维流动。图33所示的系统有利于说明河流—含水层水力联系的模拟并将其概念化。然而在很多场合下，这种低渗透性河床底积层可能并不存在，但只要对所使用的各项条件及参数进行适当的推断分析，由图33的概念所形成的模拟方法仍然能够用来表达这些情形。

图33-b表示一个包含有河段的计算单元之横剖面，其理想化的水力传导系数图解示于图34中。用来计算水力传导系数块体的长度为通过该计算单元的河段长， L ；宽为河床宽度， W ；渗流距离为河床底积层厚度， M ；河床底积物的渗透系数由 K 表示。假定可测定的河流与含水层间水头损失仅产生于河床底积层本身，即在河床底积层的底面和其下面的模型计算单元表示的位置之间无明显的水头损失。并且进一步假定，河床底积层之下对应的计算单元保持完全饱和状态，即河水位不会低于河床底积层底面以下。在这些假定下，河流和地下水系统之间的流量为：

$$QRIV = \frac{KLW}{M}(HRIV - h_{i,j,k}) \quad \text{或} \quad (63-a)$$

$$QRIV = CRIV(HRIV - h_{i,j,k}) \quad (63-b)$$

这里 $QRIV$ 是河流与含水层之间的流量，水流由河流流向含水层时取正值； $HRIV$ 是河流的水位； $CRIV$ 是河流—含水层互相连接的水力传导系数（ KLW/M ）； $h_{i,j,k}$ 是河流河段所在

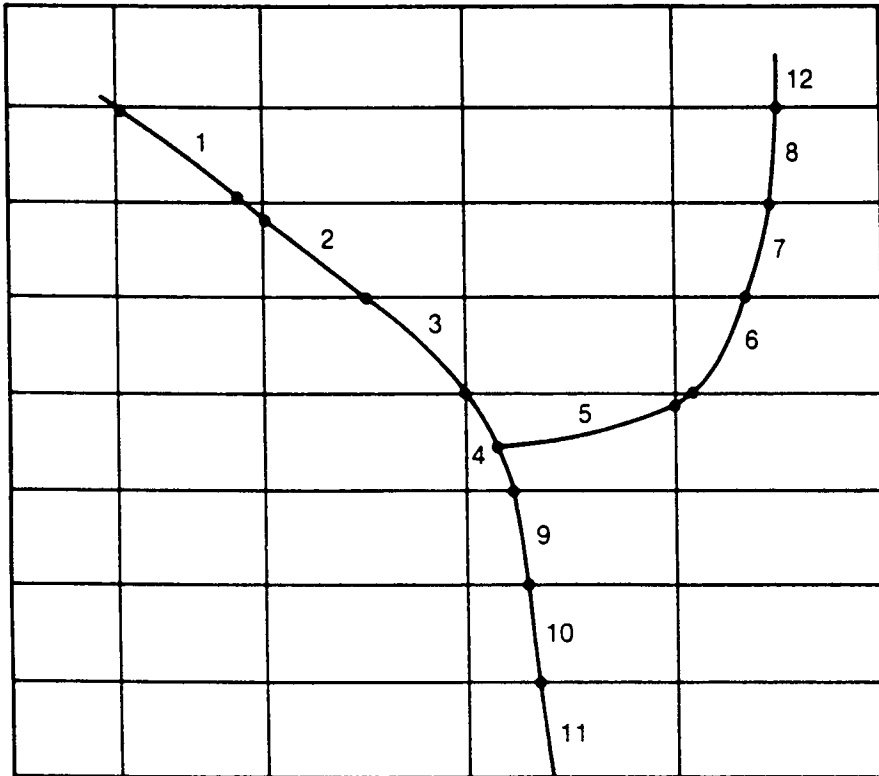


图 32. 河流离散为河段的示意图。一些小河段被忽略。

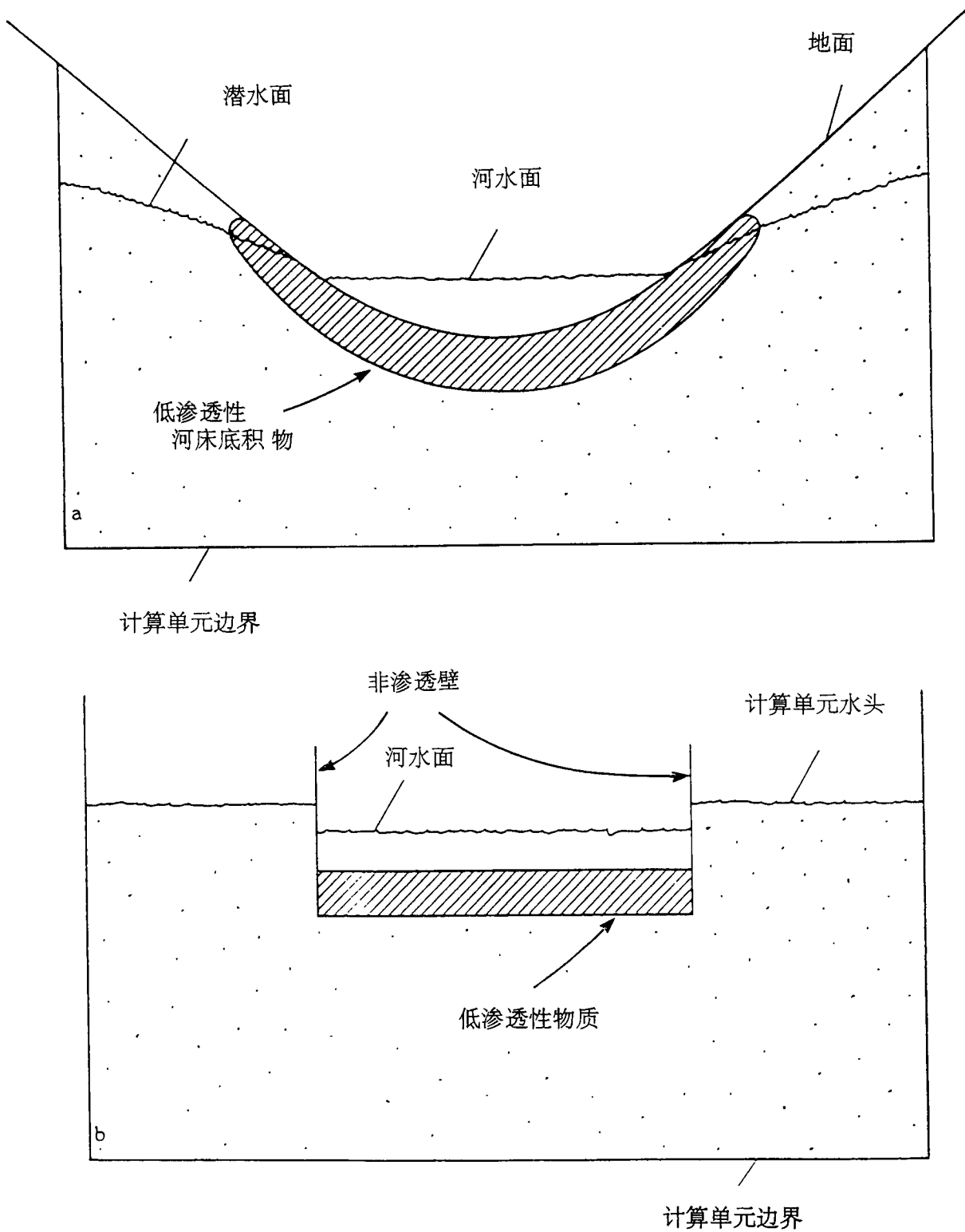


图 33 (a) 有河流出现的含水层横剖面图和 (b) 河流—含水层相互连接概念的示意图。

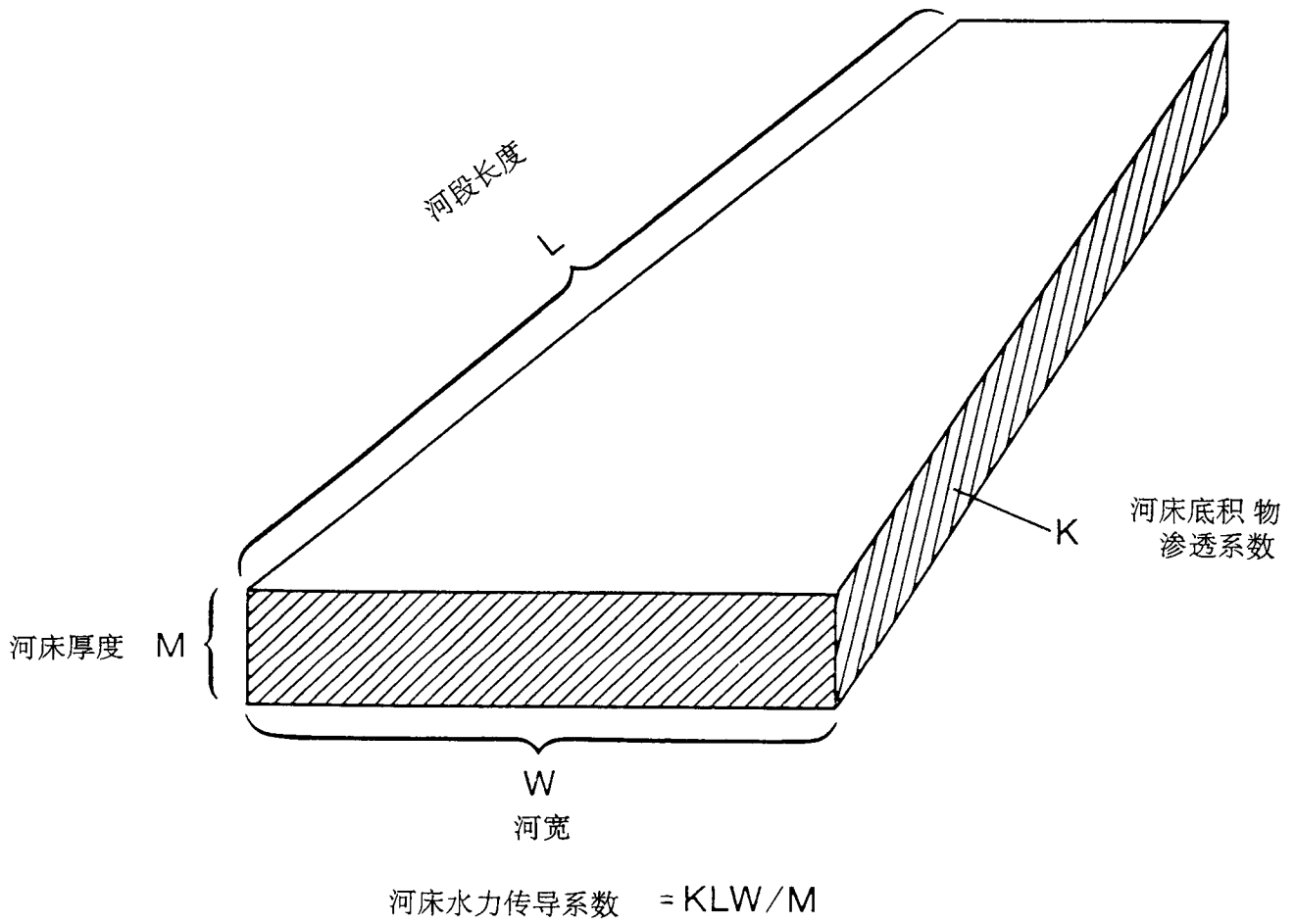


图 34. 单个计算单元中河床水力传导系数的理想化模型示意图。

的计算单元的水头。

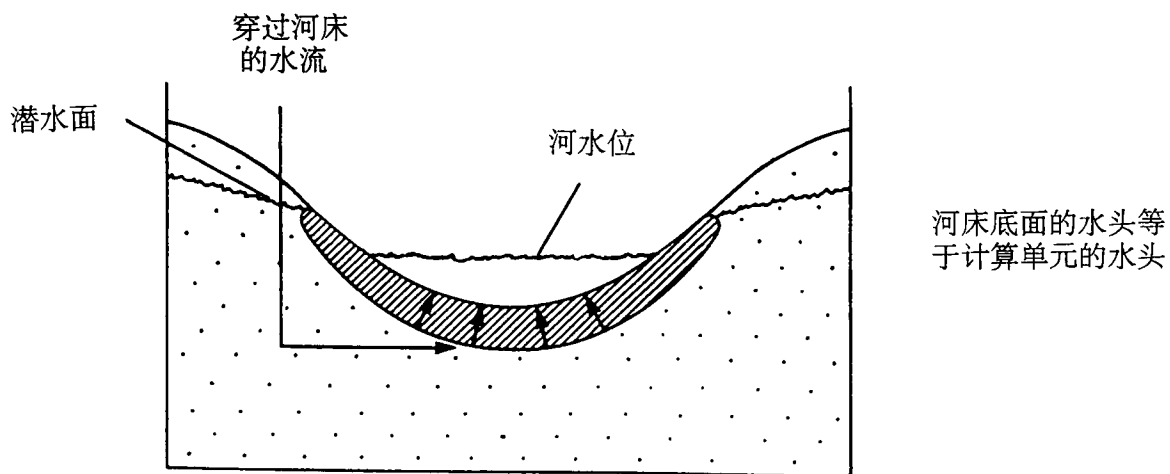
若满足假定条件，即所有水头损失都产生于水流通过的河床底积层，那么公式(63)的应用是直观明了的。然而，在更为通常的情况下，公式(63)必须同时适用于河床没有底积物的情形，或水头损失不局限于河床底积层这一层的情况。遇到这些情形时，务必单独列出水力传导系数这一项， $CRIV$ ，将其代入公式(63-b)中，把河流至计算单元 (i,j,k) 所在的深度位置间的流量，与相应的水头损失联系起来。这种类型的水流通常为三维流过程。通过一个单独的水力传导系数来表达这一水流，不过是一种近似的做法。如果有可靠的野外河流渗流测量及其相应的水头差资料，则可用于计算有效水力传导系数。不然，则要选择一或多或少随意的水力传导系数值，并在模型校正过程中加以调整。在工作中，选择水力传导系数起始值，可遵循一定的规律。例如，所假定的水流横切面面积通常应该与计算单元内河道宽度和河段长度之乘积为同一数量级；所假定的渗流距离不应超过河床与计算单元 (i,j,k) 的垂直间距。另外，如果在这个间距内可辨别区分出不同的层来，这些层通常应当作一系列串联的水力传导系数来处理，以便求得一个等价水力传导系数。可是，总的来说，应当认识到，仅用水力传导系数这一项来表示一个三维流过程，这种方法本身是一个经验做法，在模型校正时几乎总是需要进行调整。

当含水层水头处于一定范围内时，用公式(63)模拟河流—含水层水力联系通常会得到可以接受的近似结果。可是，在大多数情况下，当含水层水头下降到一定位置之下时，河流渗流不再依赖于含水层中的水头。回到河床底积层这一概念，便可想象到这一情形。公式(63)所描述的情形示于图35-a中；含水层水位高于河床底积层的底面时，流经该底积层的流量与河流和含水层的水头差成正比。在图35-b中，含水层水位已经下降至河床底积层底面之下，在其下形成了一个非饱和带。如果假定河床底积层本身保持饱和，河床基底处某点的水头可简单地视为该点的高程。若该高程指定为 $RBOT$ ，穿过河床底积层的流量可由下式给出：

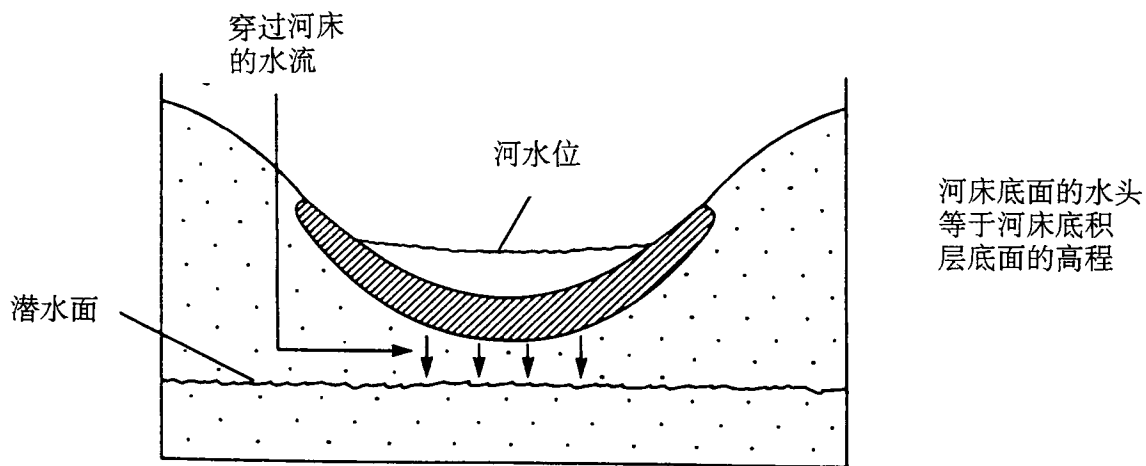
$$QRIV = CRIV(HRIV - RBOT) \quad (64)$$

这里 $QRIV$ ， $CRIV$ ，以及 $HRIV$ 已在公式(63-b)中作了定义。显然，水头低于 $RBOT$ 之后，再继续下降不会增加穿过河床底积层的流量，因为我们已经假定水头损失主要由河床底积层产生。只要水头保持在 $RBOT$ 之下，流量会保持由公式(64)所给定的常量值。以下描述的模型，便利用了这些概念来模拟河流—含水层的水力联系：即河流与计算单元 (i,j,k) 之间流量的模拟由下面一套方程来实现：

$$QRIV = CRIV(HRIV - h_{i,j,k}), h_{i,j,k} > RBOT$$



A



B

图35. 河床底积层底面之水头与计算单元水头关系的剖面示意图。计算单元之水头等于潜水面高程。

$$QRIV = CRIV(HRIV - RBOT), h_{i,j,k} \leq RBOT \quad (65)$$

河流与计算单元 (i,j,k) 之间的流量, 以水头 $h_{i,j,k}$ 作为变量, 按公式(65)计算得到的结果示于图36。当 $h_{i,j,k}$ 等于河流水位 $HRIV$ 时, 流量为零。当 $h_{i,j,k}$ 值变大时, 流量取负值, 也就是说, 地下水流向河流; 当 $h_{i,j,k}$ 值变小时, 流量取正值, 也就是说, 河水流向含水层。在 $h_{i,j,k}$ 达到 $RBOT$ 之前, 这个正流量随 $h_{i,j,k}$ 降低而线性增加, 此后, 流量保持为常量值。

无论河床底积层出现与否, 类似公式(65)及图(36)的河流—含水层水力联系通常普遍可见。例如, 一旦在河流与含水层之间出现非饱和的情况, 则河流向含水层的渗流与含水层的水头无关。而且在多数情况下, 甚至在非饱和带出现之前, 这种独立的不相关关系就已经建立起来。图37中含水层水位已经降到河床之下足够低的位置, 在河床与区域地下水面之间呈现一个窄小的饱和连接带。细心观察图37, 便会发现该饱和连接带的水头梯度必趋于单位值, 进一步降低区域地下水面将不会增加该梯度。因此, 类似于图37的情况一旦形成, 河流渗流量与含水层的水头进一步下降无关。图37所示的情形本身是野外状况的一种简化。野外也许常常涉及到河流下有饱和与非饱和的复杂组合形式。可见, 在所有这些情况下, 河流的渗流量必然会在某点过渡为与含水层水头无关, 不受水头继续下降的影响。

如果水文状况表明, 河流渗流量会随当地地下水面高程下降而增加, 但当地下水位达到图37所示的高程 h_l 时, 河流渗流量会达到极限, 这时 $RBOT$ 应取值 h_l 。因为图37中河流之下的垂向水力梯度近似等于1。自河流进入计算单元 (i,j,k) 的渗流量由 KLW 的乘积近似给出, 这里 K 为河流下面饱和介质的垂向渗透系数, 与前述相同; L 为穿过计算单元 (i,j,k) 的河段长; W 为河宽。与上述极限渗流的估计值及 $RBOT$ 选用的值连贯对应的一项, 河流—含水层水力传导系数 $CRIV$, 可通过 KLW 替代 $QRIV$ 而求解出来。由此得出:

$$CRIV = \frac{KLW}{HRIV - RBOT} \quad (66)$$

概括地说, 如果可以预料河流渗流的极限条件符合图37的模型, 向极限渗流的过渡预料会在某潜水面高程, 那么应该选择该潜水面高程为 $RBOT$, 而且从(66)式可计算出 $CRIV$ 的值。基于公式(65)的处理方法应该可以合理地近似模拟河流—含水层的水力联系。

在河流—含水层水力联系的简化模型中, 我们假定这种水力联系与河段在计算单元内

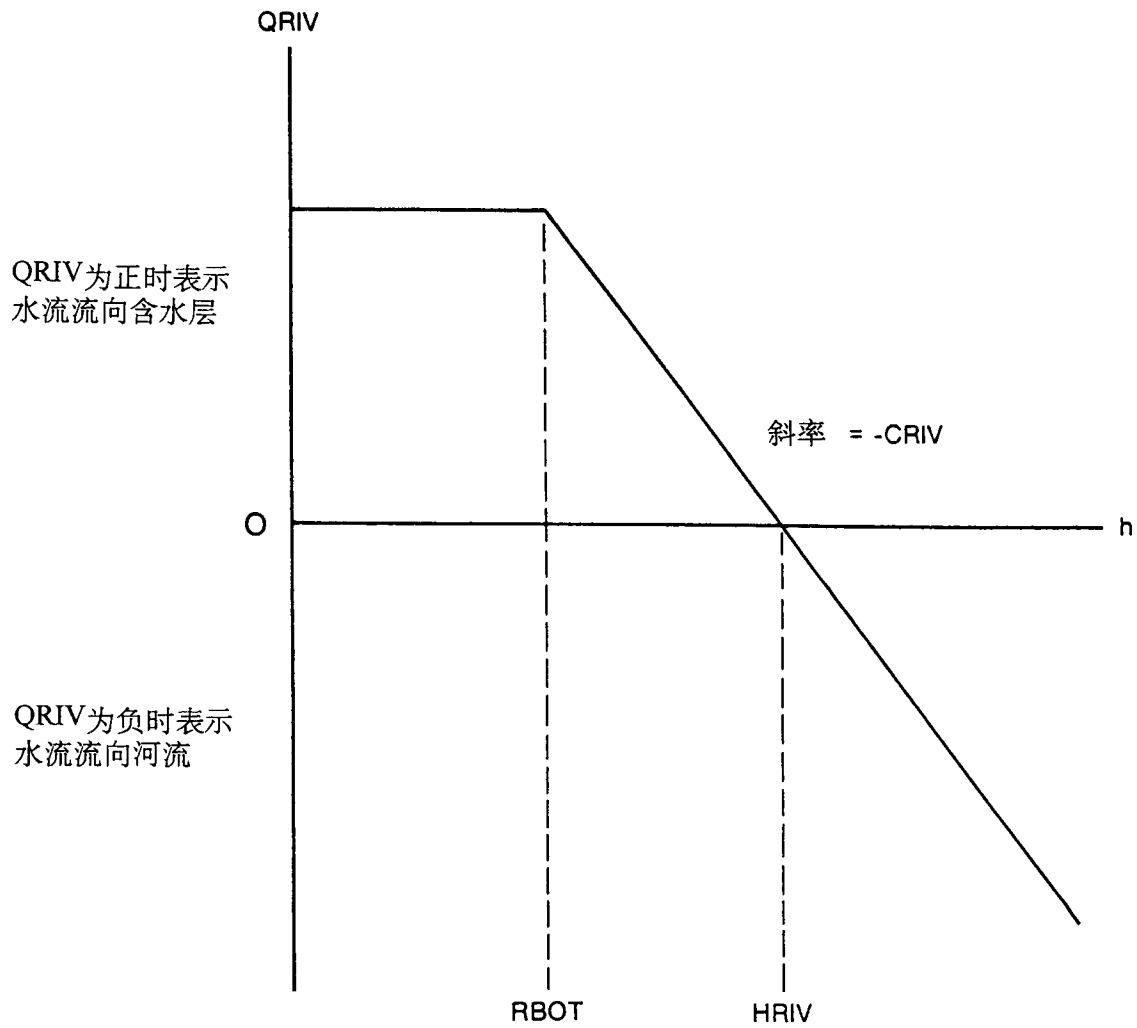
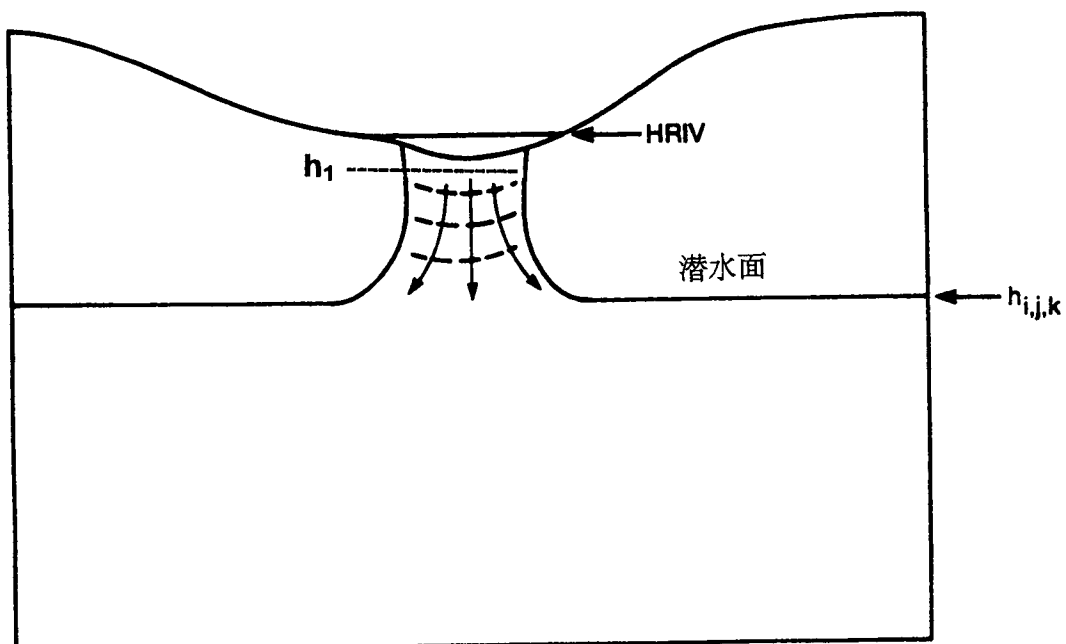


图36. 河流流向某计算单元的流量， $QRIV$ ，与该单元之水头变量的关系示意图。
 $RBOT$ 为河床底积层底面高程， $HRIV$ 为河水位。



----- 等水头线

图 37 单位水力梯度下的河流极限渗流示意图。

的位置无关，每一河段内河流水位是均匀一致的，且在每个应力期内都为常量。后一假定意味着河流的状况在每个应力期内不发生显著变化—例如，河流不会变为干枯状态或漫出河岸，或这样的状况虽然发生但持续时间很短，不致于影响河流—含水层的水力联系。

描述每条河流段的数据由用户在每个应力期内定义。每个河流段的输入数据有六项，包括河段所出现的计算单元的层号、行号和列号，以及计算渗流要用到的三个参数—河水位($HRIV$)，河流—含水层相互连接的水力传导系数($CRIV$)，和“河床底面高程”，或河流渗流达到极限时的高程位置($RBOT$)。

对于有河段出现的每个计算单元，每次迭代开始时，在流动方程中都相应添加河流渗流项。是选用公式(63)还是(64)来计算河流渗流，则通过比较该计算单元的最新水头值和河底标高 $RBOT$ 的值而决定。因为这个选择过程在每次迭代开始时就已完成，最新的水头值($HNEW$)是上一次迭代求得的值。因此，检查判断究竟使用哪一个河流渗流方程，比起渗流的计算要滞后一次迭代。如果选用公式(63)则 $CRIV$ 这一项添加到 $HCOF$ 中，而将 $CRIV * HRIV$ 这一项添加到 RHS 中。如果选用公式(64)，则将 $-CRIV(HRIV-RBOT)$ 添加到 RHS 中。

河流子程序包输入数据及格式

河流(RIV)子程序包的输入由IUNIT(4)所指定的文件设备号读入。

对每次模拟:

由子程序RIV1AL读入的数据包括

- 1.数据名称: MXRIVR IRIVCB
 输入格式: I10 I10

对每个应力期:

由子程序RIV1RP读入的数据包括

- 2.数据名称: ITMP
 输入格式: I10
3. 数据名称: 层号 行号 列号 河水位 水力传导系数 河床底面高程
 Layer Row Column Stage Cond Rbot
 输入格式: I10 I10 I10 F10.0 F10.0 F10.0
 (该输入为每一河段为一记录。若ITMP为负或零, 则不予输入本项。)

输入数据说明

MXRIVR: 各应力期中有效河段的最大数目。

IRIVCB: 标示符和文件设备号。

若IRIVCB>0, 是文件设备号。当ICBCFL (见输出控制) 被设定时, 将各计算单元的河流渗流量按该设备号输出。

若IRIVCB=0, 将不打印或输出单元间河流渗流量。

若IRIVCB<0, 当ICBCFL被设定时, 在标准输出文件中打印各河流段的流量。

ITMP: 标示符和计数器。

若ITMP<0, 重复使用上一应力期的河流数据。

若ITMP≥0, ITMP是当前应力期中有效河段的数目。

- Layer:** 含有该河段计算单元所在的层号。
- Row:** 含有该河段计算单元所在的行号。
- Column:** 含有该河段计算单元所在的列号。
- Stage:** 河流的水位高程。
- Cond:** 河床水力传导系数。
- Rbot:** 河床底积层底面的高程。

第七章 补给子程序包

概念及程序化

使用补给子程序包 (RCH) 的目的是模拟地下水系统的面状补给。面状补给的通常是由降水入渗补给地下水系统形成。本模型中的补给定义为:

$$Q_{Ri,j} = I_{i,j} * DELR_j * DELC_i \quad (67)$$

其中, $Q_{Ri,j}$ 是水平面上某一计算单元(i,j)的补给率, 用单位时间水流量积量表示。 $I_{i,j}$ 是施加在该计算单元面积 $DELR_j * DELC_i$ 上的补给通量 (用单位时间长度单位表示)。补给率 $Q_{Ri,j}$ 施加到位于(i,j)的柱体上某一单个计算单元。没必要让补给发生在同一垂向柱体的不同深度上, 这是因为自然补给多是从顶部进入地下水系统的。最简单的情形是地下水系统的上界面出现在第一层内; 可是, 当潜水面升高或降低时, 地下水系统的上界面在各点的位置将随时间而变化。稍后将叙述如何通过MODFLOW规定的三种选择, 对接受补给的每个垂向柱体指定接受补给的计算单元。补给(RCH)子程序包可用于模拟降水以外的其它水源补给, 如人工补给。若需要在同一垂向柱体上不止一个计算单元接受补给, 那么可用井流子程序包。井流子程序包允许对模型中任一计算单元进行补给或排泄。

补给子程序包将每个应力期 (除非选择了使用前一应力期的补给通量) 的补给通量 $I_{i,j}$ 读入到一个二维数组 $RECH_{i,j}$ 中, 然后将补给通量的值乘以计算单元在水平面上的面积 $DELR_j * DELC_i$, 求得 $Q_{Ri,j}$ 的值, 并将其储存在 $RECH$ 数组中。如何选择垂向柱体上接受补给的计算单元, 可通过补给方式选择符 $NRCHOP$ 和补给层号数组 $IRCH$ 来指定。补给方式选择项包括: (1) 补给指定到模拟层第一层; (2) 补给指定到垂向柱体上任一计算单元, 并由二维数组 $IRCH_{i,j}$ 中的层号确定; (3) 假若计算单元上方没有定水头计算单元, 补给指定到位于最上面的有效计算单元。对于第一种以及第二种选择, 如果指定接受补给的计算单元是不透水的, 实际上没有接受补给。至于第三种选择, 因为已经假定补给将被定水头水源截获, 如果垂向柱体上有定水头计算单元以及其上方有无效计算单元, 那么该垂向柱体实际上没有采纳补给。模型读取的补给通量, 必须采用与其它模型参数相一致的长度和时间单位, 如米/天。

给定水平面上计算单元位置(i, j)以及由补给选择项所确定的垂向位置k, 相应的补给

量 $Q_{Ri,j}$ ，将会在矩阵方程求解时，从 $RHS_{i,j,k}$ (公式(26)或(29)) 中减去。每次迭代都对所有接受补给的计算单元进行此项计算。按原有定义，补给是不受含水层水头影响的，所以水头系数 $HCOF_{i,j,k}$ 不添加任何值。

在实际工作中，应仔细考虑所研究的问题及上述三种选择，再决定选用哪一种选择。例如，图38所示情形，用一个横剖面模型来模拟补给，河流向地下水渗流，以及地下水渗流进入河流（图38-a）。按照第五章描述的潜水水平方向水力传导系数计算的规定，模型中有效计算单元在模拟过程中被逐渐调整以近似表达地下水水面，结果每个垂向柱体中最上方的有效计算单元大致落在潜水面。这个过程给出了有效、定水头、以及无效计算单元的最终分布情况，见图38-b。

图38-c说明采用上述第一种选择时，模型的补给分布情况。该选择只允许对模型最顶层补给。当潜水面低于第一层之底面标高时，含水层将无法获得应有的补给。这样做显然会低估整个潜水面所获得的补给量。

图38-d说明采用第二种选择时的补给分布。这里假定用户在模拟之前已根据预先估计的潜水面的位置而指定了接受补给的计算单元。但由于预先估计的潜水面与模拟所得的最终结果有些出入，用户指定为接受补给的计算单元中，有四个已转换成无效计算单元，因而无法接受补给。

图38-e是采用第三种选择时的模拟结果。这种选择最适合这种特定情形。在这项选择下，除定水头计算单元用来表示河流外，补给进入每个垂向柱体最上面的有效计算单元。从而模拟了补给条件下的潜水面形状。

就典型的降水补给来说，第三种选择最为常用。用户不需判定哪一个是垂向柱体中最上面的有效计算单元。因为程序具备了在模拟过程中对此作自动判断的功能。不过，在第一层中有不透水计算单元的地方，补给不应该穿透至下伏层位时，也用得着第一种选择，否则MODFLOW会将补给加至不透水层之下的含水层之中。当然，第三种选择仍然可用于这种情形，只要将不可透水的计算单元的补给率指定为零即可。用户应选用最方便指定输入数据的选择项。与此类似，当第一层以外的层位露出地表，同时指定层位的补给不应该穿透不透水计算单元进入下伏含水层，或许用得着第二种选择。在衡量所作选择是否最佳时，应考虑的其他因素是，比起第一、三种选择来，第二种选择占用更多的计算机存储空间。

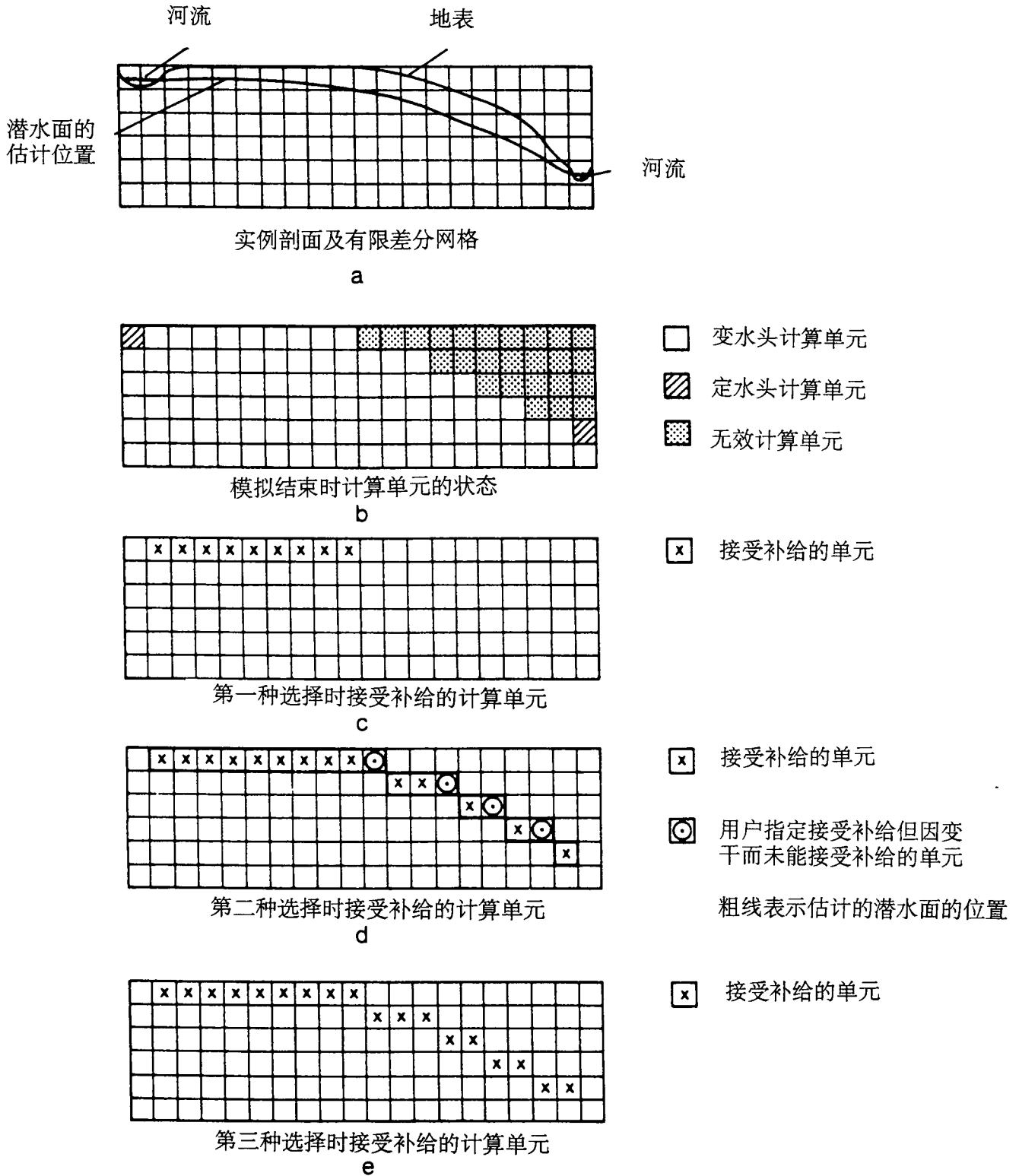


图38. 补给子程序包中三种选择下接受补给的计算单元。

间，而第三种选择比第一、二项选择需用较多计算时间。

补给子程序包输入数据及格式

补给 (RCH) 子程序包的输入从IUNIT(8)指定的文件设备号读取。

对每次模拟:

由子程序RCH1AL读取的数据包括

1. 数据名称: NRCHOP IRCHCB
输入格式: I10 I10

对每个应力期:

由子程序RCH1RP读取的数据包括

2. 数据名称: INRECH INIRCH
输入格式: I10 I10
3. 数据名称: RECH (NCOL, NROW)
读取模块: U2DREL

若补给方式选择符等于2

4. 数据名称: IRCH (NCOL, NROW)
读取模块: U2DINT

输入数据说明

NRCHOP: 补给方式选择符。补给通量由一个二维数组给出, 每个垂向柱体取一个值。于是, 每个垂向柱体均有某一个计算单元接受补给, 而选择项代号则确定垂向柱体中哪一个计算单元接受补给。

1—补给仅至模型最顶层;

2—补给的垂向分布由数组IRCH指定;

3—由每个垂向柱体中位置最高的有效计算单元接受补给。定水头计算

单元截断补给, 并防止其向更深部位渗透。

IRCHCB: 标示符和设备号。

若IRCHCB>0, 其值为设备号。当ICBCFL (见输出控制) 被设定时, 将各计算单元的补给量按该设备号输出。

若IRCHCB≤0, 将不打印或输出计算单元间补给量。

INRECH: RECH数组的读取标示符。

若INRECH≥0, 读取补给通量数组RECH。

若INRECH<0, 重复使用上一应力期的补给率。

INIRCH: IRCH数组的读取标示符。

当NRCHOP为2时, 若INIRCH≥0, 读取补给层号数组 (IRCH)。

若INIRCH<0, 重复使用上一应力期的补给层号数组IRCH。

注: 当NRCHOP为1或3时, INIRCH则被忽略。

RECH: 补给通量 (LT^{-1})。仅在INIRCH大于或等于零时读取。

IRCH: 补给层号数组, 决定垂向柱体中接受补给的层号。仅当NRCHOP为2且INIRCH大于或等于零时读取。

使用第一种选择时的补给子程序包的输入样单

数据项	说明	输入记录
1	{NRCHOP, IRCHCB}	1 0
2	{INRECH}第一应力期	1
3	补给通量数组的控制记录	12 3.17E-8 (10F4.0) 4
	补给通量	1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.1 1.0 1.0 1.0 1.0 1.1 1.0 1.0 1.0 1.1 1.1 1.0 1.0 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1
2	{INRECH}第二应力期	-1
2	{INRECH}第三应力期	-1
2	{INRECH}第四应力期	1
3	补给通量数组的控制记录	12 3.17E-8 (10F4.0) 4
	补给通量	1.2 1.2 1.2 1.2 1.3 1.2 1.2 1.2 1.3 1.4 1.2 1.2 1.3 1.4 1.4 1.0 1.0 1.0 1.1 1.1 1.2 1.3 1.3 1.4 1.4 1.3 1.3 1.4 1.4 1.4

使用第二种选择时补给子程序包的输入样单

数据项	说明	输入记录
1	{NRCHOP, IRCHCB}	2 0
2	{INRECH, INIRCH}第一应力期	1 1
3	补给通量数组的控制记录	0 3.17E-8
4	补给层号数组的控制记录	12 1 (20I2) 3
		1 2 2 2 3 1 2 2 2 2

		1 1 2 2 2	
		1 1 1 1 2	
		1 1 1 1 1	
		1 1 1 1 1	
2	{INRECH, INIRCH}第二应力期	1	-1
3	补给通量数组的控制记录	0	1.56E-8
2	{INRECH, INIRCH}第三应力期	-1	-1

[译注: 样单中的数据可能不符合格式要求, 仅供参考]。

第八章 井流子程序包

概念及程序化

在MODFLOW中, 使用井流子程序包是为了模拟井流对地下水系统的影响。在一个应力期内, 并以给定流量从含水层中抽水 (或向其注水), 其流量不受井所在计算单元的大小及水头影响。在本章的讨论中, 我们假定模拟的对象为实际的抽水井或注水井。

井流子程序包的操作是, 在每个模拟应力期间, 并以指定流量从含水层抽水或向含水层注水。负的流量值 Q 表示抽水井, 而正的流量值则表示注水井。

每个应力期开始时, WEL1RP模块为每个井读取4个值—即井所在计算单元的行号、列号、层号, 以及抽水或注水的流量, Q 。在每次迭代求解矩阵方程时, MODFLOW都将从每个井所在的计算单元的RHS值 (公式(26)或(29)) 中减去流量 Q 的值。在多口井位于同一个计算单元里的情况下, 在求RHS这项值时, 每口井都分别进行此项计算。因此, 用户给一个计算单元内各井所赋的流量值, 在程序运行时, 实际上被累计起来以获得该计算单元总的井流量。对这样类型的多层井, 可用一组单层井表示, 即每个井只与多层井所穿透的层中的某一层相连通, 每个井在每一应力期中都定义有一单独流量项 Q 。若采用这种方法, 多层井的流量必须以某种方式人为地分配给每个单层, 而不是靠程序本身进行分配。常用的方法是把井流量按每层的导水系数大小分配, 即:

$$\frac{Q_1}{Q_w} = \frac{T_1}{\sum T} \quad (68)$$

其中 Q_1 是给定应力期某特定井自第一层的抽水量, Q_w 是这一应力期该井的总抽水量, T_1 是第一层的导水系数, $\sum T$ 则代表该井穿透的所有层位的导水系数总和。再次提醒注意, 用公式(68), 或其它办法分配抽水量, 应由用户对每应力期每个穿透多层的井人为地进行, 并作为输入数据输给MODFLOW。

在现有的MODFLOW中, 一口多层井由多口不相联的单层井代替, 故不能反映由于井本身引起的层之间的水力联系; 所以不能完全代表实际情况。一个能较好解决多层井问题的子程序包正处于开发过程之中。[译注: 到现在为止, 原文中提到的新子程序包还没有问世, 但美国地质调查局Bennett等人于1982年提出的多层井的解决方法值得读者参考。]

井流子程序包输入数据及格式

井流子程序包 (WEL) 的输入从UNIT(2)所指定的文件设备号读取。

对每次模拟:

由子程序WEL1AL读取的数据包括

1. 数据名称: MXWELL IWELCB
输入格式: I10 I10

对每个应力期:

由子程序WEL1RP读取的数据包括

2. 数据名称: ITMP
输入格式: I10
3. 数据名称: Layer Row Col Q
输入格式: I10 I10 I10 F10.0
(该项输入为每口井一项记录。若ITMP为负或零, 则不输入本项。)

输入数据说明

MXWELL: 所有应力期中使用的最大井数。

IWELCB: 标示符和文件设备号。

若IWELCB>0, 是文件设备号。当ICBCFL (见输出控制) 被设定时, 将各井的流量从此设备号输出。

若IWELCB=0, 将不打印或输出井的流量。

若IWELCB<0, 当ICBCFL被设定时, 在标准输出文件中打印出各井的流量。

ITMP: 标示符和计数器。

若ITMP<0, 重复使用上一应力期的井流数据。

若 $ITMP \geq 0$, $ITMP$ 是当前应力期中有效井的数量。

- Layer: 该井所在计算单元的层号。
Row: 该井所在计算单元的行号。
Col: 该井所在计算单元的列号。
Q: 抽、注水流量。正值表示注水而负值表示抽水。

井流子程序包输入样单

数据项	说明	输入记录			
1	{MXWELL, IWELCB}	6	24		
2	第一应力期 {ITMP}	4			
3	第一口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	5	6	-0.17
3	第二口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	6	3	-0.23
3	第三口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	7	7	-0.77
3	第四口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	9	2	-0.32
2	第二应力期 {ITMP}	-1			
2	第三应力期 {ITMP}	-1			
2	第四应力期 {ITMP}	6			
3	第一口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	6	5	-0.73
3	第二口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	9	4	-0.32
3	第三口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	5	6	-0.17
3	第四口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	6	3	-0.43
3	第五口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	7	7	-0.77
3	第六口井 {层号, 行号, 列号, 流量}	2	9	2	-0.32

[译注: 样单中的数据可能不符合格式要求, 仅供参考。]

第九章 沟渠子程序包

概念及程序化

使用沟渠子程序包的目的是模拟农用排水沟渠的排水效果。农用排水沟渠从含水层中排泄地下水，其所排水量正比于含水层的水头与某一固定水头或高程之差。其中要求含水层水头高于这一固定的高程，而当含水层水头低于该固定水头高程时，则无排水效果。本章叙述如何模拟实际的沟渠。

图39是某计算单元的横剖面图，用来说明沟渠模拟的概念模型。其中假定沟渠中仅部分有水，因而沟渠的水头大约等于其半高处的高程 $d_{i,j,k}$ 。模型所计算的计算单元 (i,j,k) 的水头 $(h_{i,j,k})$ ，实际上是该计算单元的水头平均值，而且通常假定在沟渠一定距离之外的区域水头值在该计算值上下。沟渠的水头 $d_{i,j,k}$ 只局限于沟渠之内一而不是将其延伸至整个计算单元。在沟渠与含水层水头 $h_{i,j,k}$ 之间的区域，垂向面上存在辐射流或半辐射流，其特点通常为，越接近沟渠，水头梯度越大。在地下水流向沟渠过程中的水头损失是形成水头差 $h_{i,j,k} - d_{i,j,k}$ 的原因之一。另一方面，若沟渠附近的水力渗透系数与计算单元 (i,j,k) 的平均渗透系数不同，那么在含水层与沟渠直接相邻的地方也会造成一部分的水头损失。通常这是因为渠道周围填充材料的透水性与含水层透水性有所不同而引起的（图40）。

最后，水头损失还发生在排水管壁，其值大小取决于管道开口的数目和开口的尺寸，以及这些开口被化学沉淀物，或植物根系阻塞的程度，等等。

上面讨论的三个过程（向沟渠的汇聚流动，流经与沟渠直接相邻的具有不同渗透系数的物质材料，以及流经排水管壁）每种情形引起的水头损失大小可假定与沟渠系统的排水量 QD —即从计算单元 (i,j,k) 排到沟渠的排水量成正比。因为这些水头损失以串联系列形式发生，其总水头损失 $h_{i,j,k} - d_{i,j,k}$ 也可认为与 QD 成正比。沟渠子程序包已将该方法编入计算程序中。也就是说，已经假定排水功能由下述一对公式描述：

$$QD_{i,j,k} = CD_{i,j,k}(h_{i,j,k} - d_{i,j,k}) \quad \text{当 } h_{i,j,k} > d_{i,j,k} \quad (69)$$

$$QD_{i,j,k} = 0 \quad \text{当 } h_{i,j,k} \leq d_{i,j,k} \quad (70)$$

公式(69)中的系数 $CD_{i,j,k}$ 是个综合（或等效）水力传导系数，用来描述沟渠与计算单元 (i,j,k) 的区间总水头损失。其中假定计算单元 (i,j,k) 的水头为 $h_{i,j,k}$ ，其大小取决于流向沟渠

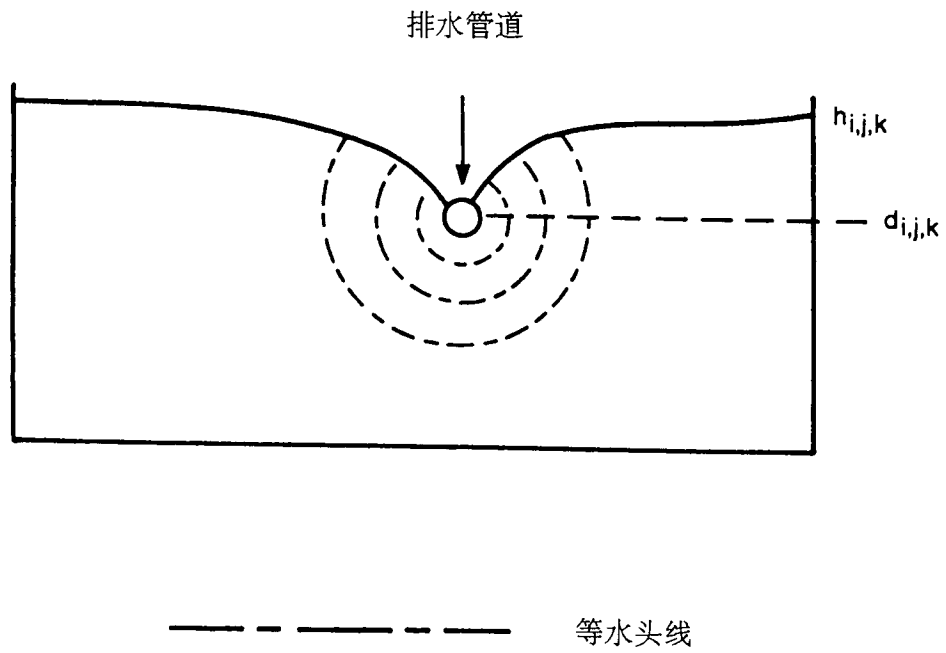


图39. 计算单元(i, j, k)的汇聚水流之水头损失横剖面示意图。

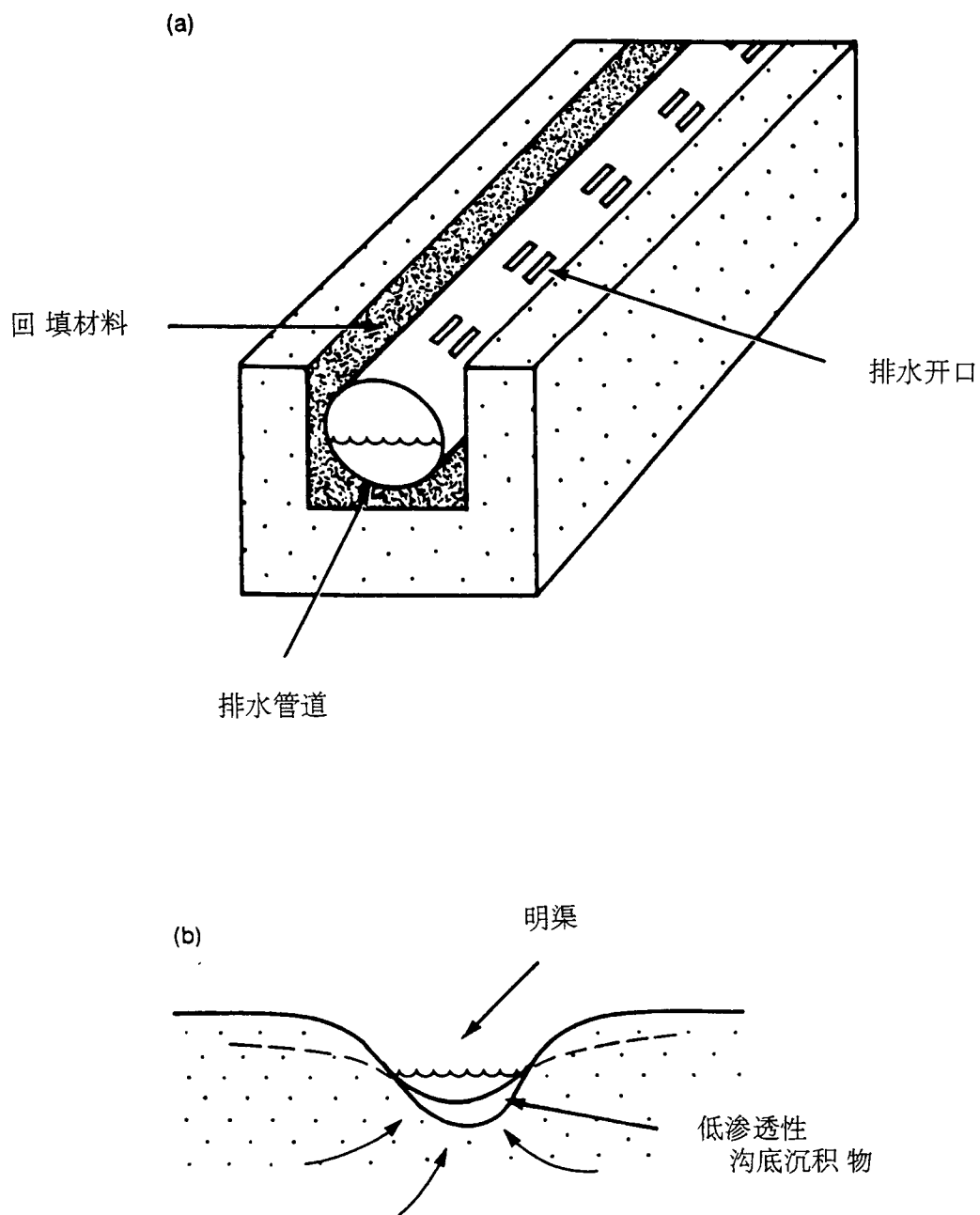


图40. 沟渠的直接相邻区域内水头损失的影响因素:

(a)回填沟中埋设的排水管道和(b)明渠。

的汇聚水流的形式特点、沟渠自身特点及其直接相邻的环境。

我们可以推导出近似表达这三种水流过程的水力传导系数的公式，求得 CD 值，然后计算等价的系列水力传导系数值。每个过程的水力传导系数可用一维水流公式求得。取决于待模拟的沟渠系统的具体特点，所用的公式会很不相同。因此，这里不列出 CD 的通用表达式。这样做的另一个原因是，在大多数情况下，这种类型明确的表达式要求详细但通常却无法得到的数据资料。例如沟渠周围的水头分布的详尽资料，沟渠附近含水层的水力传导系数，回填材料的分布，回填材料的水力渗透系数等。实践中，更为常见的做法是，根据实测的 QD 值及 $h-d$ 值，用公式(69)计算 CD 值。如果不知道 $h-d$ 的准确值，那么在模型校正时对 CD 加以调整，直至 QD 的值吻合实测值。

图41是公式(69)和(70)所定义的 QD 对 $h_{i,j,k}$ 变量的函数曲线图；该函数和地表河流与含水层间流量的函数相似。不同之处是，沟渠只能排水而不允许水流流向含水层。 QD 取正值以表示水流是流向沟渠。实际上，只要对河流子程序包的参数进行适当选择，同样也可用来模拟沟渠的排水效果。

因公式(69)中 $QD_{i,j,k}$ 项被当作是流出计算单元 (i,j,k) 的流量，对每个受沟渠影响的计算单元，只要水头 $h_{i,j,k}$ 高于沟渠水位，必须将此项从方程(24)的左边减除。这在沟渠子程序包中体现为，对每个受沟渠影响的计算单元，MODFLOW检验其水头大小，以判断是否超过沟渠内水位高程，若属实，则在联立求解矩阵方程时，把 $-CD_{i,j,k}$ 项加到 $HCOF_{i,j,k}$ (公式(26))而把 $-CD_{i,j,k}d_{i,j,k}$ 项加到 $RHS_{i,j,k}$ 中去。

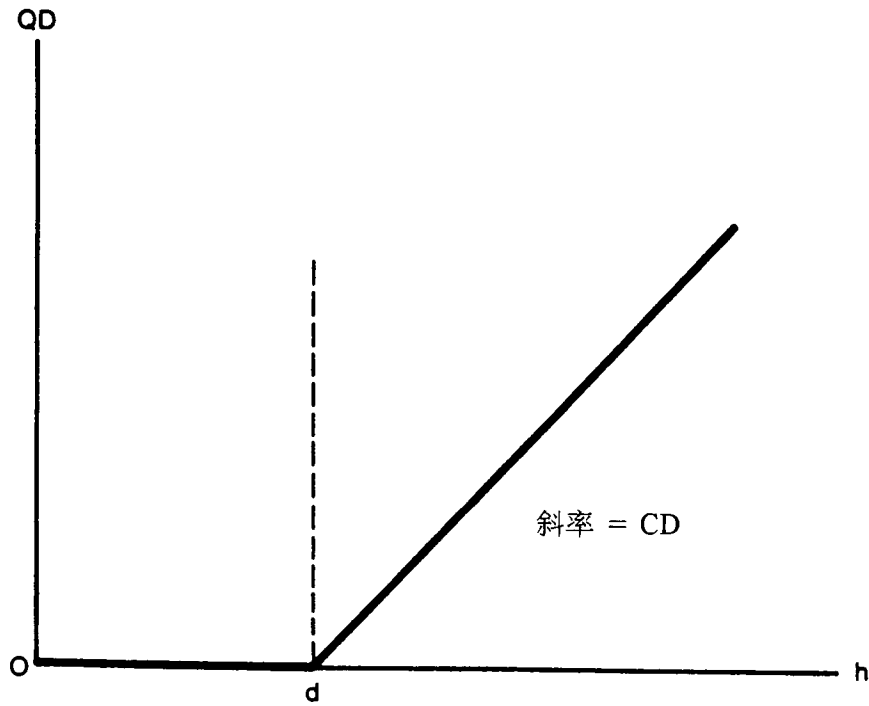


图41. 流入沟渠的流量 QD 对计算单元之水头 h 的图解。
其中， d 为沟渠之设定水位， CD 为水力传导系数。

沟渠子程序包输入数据及格式

沟渠(DRN)子程序包的输入从IUNIT(3)所指定的文件设备号读取。

对每次模拟:

由子程序DRN1AL读取的数据包括

- | | | |
|----------|-------|--------|
| 1. 数据名称: | MXDRN | IDRNCB |
| 输入格式: | I10 | I10 |

对每个应力期:

由子程序DRN1RP读取的数据包括

- | | | | | | |
|----------|-------|-----|-----|-----------|-------|
| 2. 数据名称: | ITMP | | | | |
| 输入格式: | I10 | | | | |
| 3. 数据名称: | Layer | Row | Col | Elevation | Cond |
| 输入格式: | I10 | I10 | I10 | F10.0 | F10.0 |

(该项输入为每段沟渠一项由记录组成, 若ITMP为负或零, 则不输入本项。)

输入数据说明

MXDRN: 所有应力期中使用的沟渠段的最大数目。

IDRNCB: 标示符和文件设备号。

若IDRNCB>0, 是文件设备号。当ICBCFL (见输出控制) 被设定时, 将在各沟渠段的流量从该设备号输出。

若IDRNCB=0, 将不打印或输出沟渠的流量。

若IDRNCB<0, 当ICBCFL被设定时, 在标准输出文件中打印各沟渠段的流量。

ITMP: 标示符及计数器。

若ITMP<0, 重复使用前一应力期的沟渠数据。

若ITMP≥0, ITMP为当前应力期中有效沟渠的数量。

- Layer: 该沟渠段所在计算单元的层号。
- Row: 该沟渠段所在计算单元的行号。
- Col: 该沟渠段所在计算单元的列号。
- Elevation: 沟渠中水位高程。
- Cond: 是含水层与沟渠接触界面的水力传导系数。

沟渠子程序包输入样单

数据	说明	输入记录
1	{MXDRN, IDRNCB}	3 55
2	{ITMP} 第一应力期	3
3	{层号,行号,列号,高程,水力传导系数}第一段沟渠	2 6 4 220.0 0.7
3	{层号,行号,列号,高程,水力传导系数}第二段沟渠	2 7 4 225.0 0.9
3	{层号,行号,列号,高程,水力传导系数}第三段沟渠	2 5 4 210.0 0.7
2	{ITMP} 第二应力期	-1
2	{ITMP} 第三应力期	-1
2	{ITMP} 第四应力期	2
3	{层号,行号,列号,高程,水力传导系数}第一段沟渠	2 5 4 210.0 0.8
3	{层号,行号,列号,高程,水力传导系数}第二段沟渠	2 6 4 220.0 0.7
2	{ITMP} 第五应力期	0
2	{ITMP} 第六应力期	-1

[译注：样单中的数据可能不符合格式要求，仅供参考。]

第十章 蒸发蒸腾子程序包

概念及程序化

蒸发蒸腾子程序包 (EVT) 用于模拟由于植物蒸腾作用以及地下水饱和带直接蒸发的水量。模拟方法假定: (1)当地下水面处于或高于某指定“ET界面”的高程时, 蒸发蒸腾损失在该地下水面位置达到最大值, 而该速率大小则由用户指定; (2)地下水面在ET界面之下的埋深达到某指定的间距, 即本文所指的终止深度或截止深度时, 即停止蒸发蒸腾作用; (3)地下水面介于这两个界限之间时, 蒸发蒸腾量随地下水面高程呈线性变化。

这可用公式表达为:

$$R_{ETi,j} = R_{ETM,j} \quad h_{i,j,k} > h_{si,j} \quad (71)$$

$$R_{ETi,j} = 0 \quad h_{i,j,k} < h_{si,j} - d_{i,j} \quad (72)$$

$$R_{ETi,j} = R_{ETM,j} \left\{ \frac{h_{i,j,k} - (h_{si,j} - d_{i,j})}{d_{i,j}} \right\} \quad h_{si,j} - d_{i,j} \leq h_{i,j,k} \leq h_{si,j} \quad (73)$$

其中 $R_{ETi,j}$ 是计算单元面积 $DEL R_j * DEL C_i$ 内每单位面积地下水面蒸发蒸腾损失率, 用单位面积单位时间内水量体积表示; $h_{i,j,k}$ 是出现蒸发蒸腾的计算单元的水头, 或地下水面高程; $R_{ETM,j}$ 是 $R_{ETi,j}$ 的最大可能值; $h_{si,j}$ 是ET界面高程, 或蒸发蒸腾达到最大值的地下水面标高; $d_{i,j}$ 是截止或终止深度, 当 $h_{si,j}$ 至 $h_{i,j,k}$ 的距离大于 $d_{i,j}$ 时, 蒸发蒸腾作用即告结束。

在进行有限差分计算时, 需要提供给定计算单元的蒸发蒸腾损失的水量。对于有蒸发蒸腾损耗的计算单元, 这可以表达为单位面积的损失率与水平面上计算单元面积, $DEL R_j * DEL C_i$ 的乘积, 即

$$Q_{ETi,j} = R_{ETi,j} * DEL R_j * DEL C_i \quad (74)$$

其中

$Q_{ETi,j}$ 是蒸发蒸腾量, 单位为单位时间内通过计算单元面积 $DEL R_j * DEL C_i$ 的水的体积量。

若 (与 $R_{ETM,j}$ 相对应的) $Q_{ETi,j}$ 最大值指定为 $Q_{ETM,j}$, 公式(71)—(73)可表达为体积排泄量的形式:

$$Q_{ETi,j} = Q_{ETM,j} \quad h_{i,j,k} > h_{si,j} \quad (75)$$

$$Q_{ETi,j} = 0 \quad h_{i,j,k} < h_{si,j} - d_{i,j} \quad (76)$$

$$Q_{ETi,j} = Q_{ETM,i,j} \left\{ \frac{h_{i,j,k} - (h_{si,j} - d_{i,j})}{d_{i,j}} \right\} \quad h_{si,j} - d_{i,j} \leq h_{i,j,k} \leq h_{si,j} \quad (77)$$

图42是公式(75)——(77)所表达蒸发蒸腾损耗量 $Q_{ETi,j}$ 对其所在计算单元的水头变量的函数关系图解。ET函数与河流函数或沟渠函数的数学形式相似。不同的是，ET函数的线性部分的上下边界均为常量，而不是仅仅由下边界所限。

蒸发蒸腾只从垂向柱体中某一计算单元蒸取水。用户可通过两种选择具体指定该计算单元（即第k层）。第一种选择是，蒸发蒸腾总是发生在模型的最上面的一层中；而第二种选择，用户在垂向柱体ij中指定发生蒸发蒸腾的计算单元所在层位。若这两种选择所指定的计算单元是不透水或定水头计算单元，则蒸发蒸腾作用的影响忽略不计；所输入的蒸发蒸腾率值的大小不会改变模拟结果。

对水平面内每个计算单元(i,j)位置，EVT子程序包将每个应力期（除非欲使用前一应力期的值）的 R_{ETM} 值（单位时间单位面积的最大蒸发蒸腾损失率），读入一个名为EVTR的数组内。这些值随即被乘以计算单元面积 $DEL R_j * DEL C_i$ ，以求得每个计算单元的最大蒸发蒸腾水量 Q_{ETM} ；MODFLOW用这些最大蒸散发水量替换EVTR数组中 $R_{ETM,i,j}$ 的值。因此数组EVTR的输入数据是单位面积最大蒸发蒸腾率，取量纲 $L T^{-1}$ 。然而，程序在执行计算时，EVTR数组的数据项则是最大蒸散发水量，其量纲为 $L^3 T^{-1}$ 。

ET界面高程的值即 $h_{si,j}$ （或最大蒸发蒸腾面所在的地下水水面高程），由EVT子程序包读入二维数组SURF内；截止或终止深度值则读入二维数组EXDP内。因为公式(75)——(77)中的 $Q_{ETi,j}$ 项已定义为含水层的排水项，所以必须从公式(24)左边减去此项。至于公式(26)中的HCOF和RHS项，则在EVT子程序包内以下列方式进行计算：

- 1) 若 $h_{i,j,k} < (h_{si,j} - d_{i,j})$ ，计算单元(i,j,k)的HCOF或RHS不作调整；
- 2) 若 $h_{i,j,k} > h_{si,j}$ ，将 $Q_{ETM,i,j}$ 加到 $RHS_{i,j,k}$ 中；
- 3) 若 $(h_{si,j} - d_{i,j}) \leq h_{i,j,k} \leq h_{si,j}$ ，将 $-Q_{ETM}/d_{i,j}$ 加到 $HCOF_{i,j,k}$ 上，并将 $-Q_{ETi,j} \left\{ \frac{h_{si,j} - d_{i,j}}{d_{i,j}} \right\}$ 加到 $RHS_{i,j,k}$ 上。

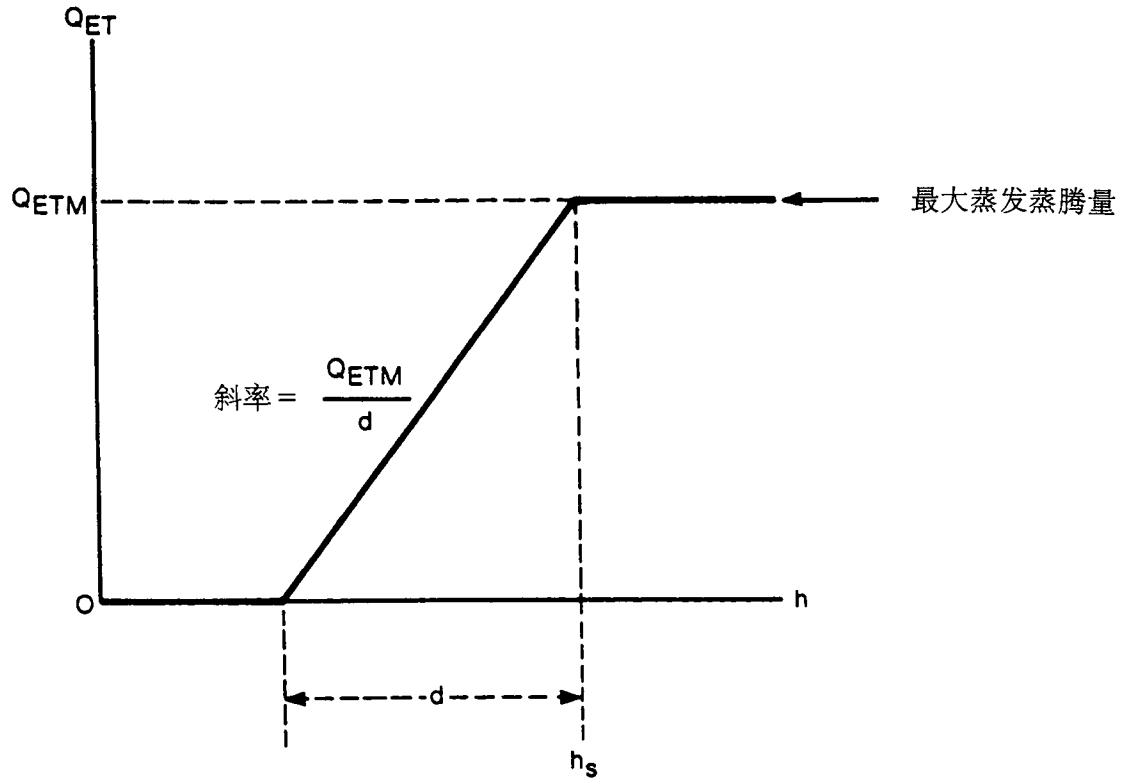


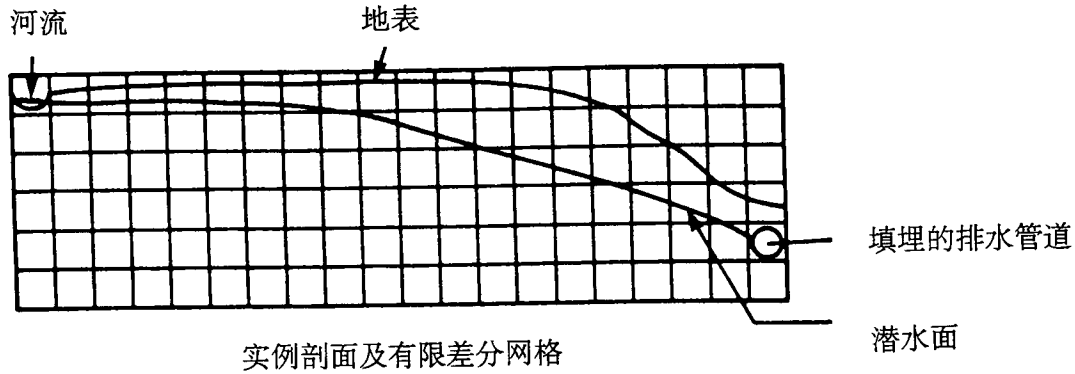
图42. 一个计算单元中体积蒸发蒸腾量, Q_{ET} , 作为水头, h , 的函数图解。
其中 d 为截止深度, h_s 为ET界面高程。

蒸发蒸腾作用最大值所对应的地下水面高程 $h_{s,i}$ 值，通常应当作计算单元面积 $DEL R_j^*$ $DEL C_i$ 范围内地表平均高程；截止或终止深度 $d_{i,j}$ 通常假定在地表下6至8英尺的范围内（尽管气候因素，深根湿地植物等等，可能会引起相当可观的变化）。当计算单元面积范围内地表高程到地下水面的深度变化较大时，应当谨慎运用EVT子程序包及选择公式(77)中的各种参数，否则有可能得到错误的结果。

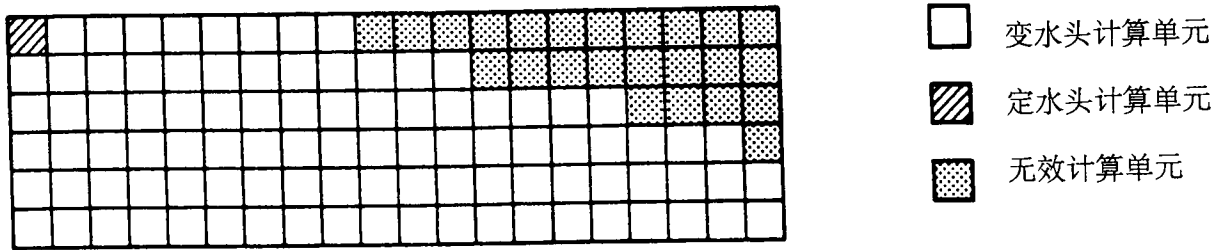
用户可利用该子程序包的设定选择项来指定特殊情况下蒸发蒸腾作用出现的层位。但是运用时也需谨慎。图43所示情形与补给子程序包所讨论的相似，横剖面模型被逐渐调整以近似表达地下水面，其中使用了水平面方向潜水含水层的水力传导系数的求算方法（见第五章）。以图43-a水文剖面图为例，模拟得到的变水头、无效（无渗流）计算单元的最终分布，示于图43-b。

在第一种选择下（图43-c），蒸发蒸腾仅发生于模型的最上面的一层；由于无效单元的出现，模型右半部分的蒸发作用也因此消失。这样一来就无法模拟野外的真实情况。

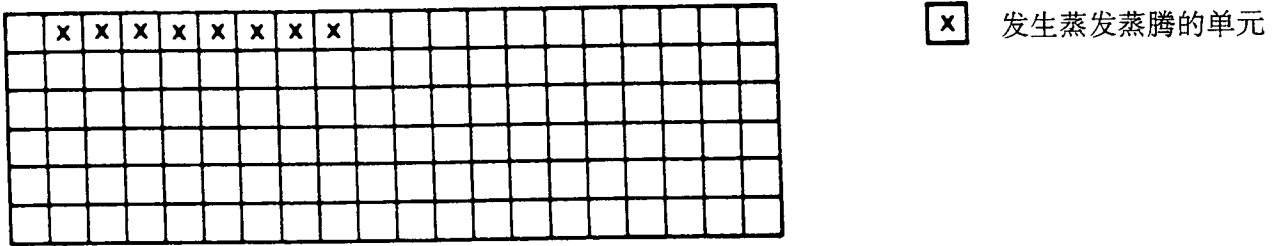
用第二种选择所得的水文剖面图示于图43-d。这里假定模拟是逐个阶段进行的。根据每一阶段模拟后的潜水面位置，用户应相应调整发生蒸发蒸腾作用的计算单元，以真实地模拟野外的情况。



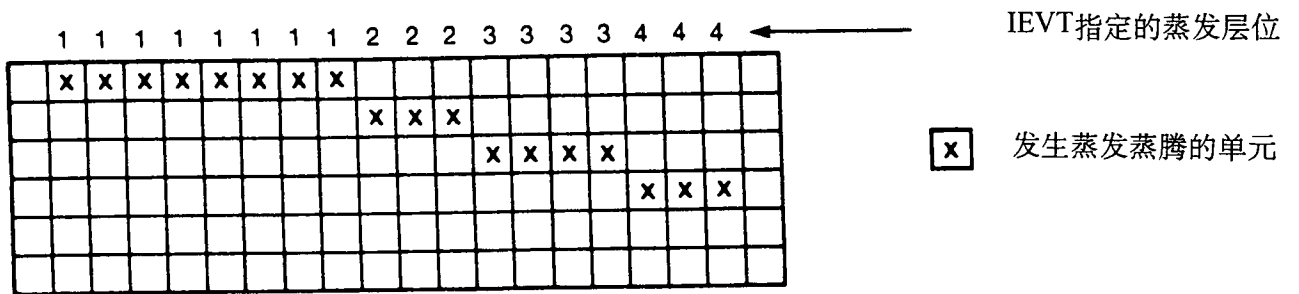
a



b



c



d

图43. 蒸发蒸腾子程序包中两种选择时发生蒸发蒸腾的计算单元。

蒸发蒸腾子程序包输入数据及格式

蒸发蒸腾 (EVT) 子程序包的输入数据从IUNIT(5)所指定的文件设备号读取。

对每次模拟:

由子程序EVT1AL读取的数据包括

- | | | |
|----------|--------|--------|
| 1. 数据名称: | NEVTOP | IEVTCB |
| 输入格式: | I10 | I10 |

对每个应力期:

由子程序EVT1RP读取的数据包括

- | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 2. 数据名称: | INSURF | INEVTR | INEXDP | INIEVT |
| 输入格式: | I10 | I10 | I10 | I10 |
3. 数据名称: SURF
读取模块: U2DREL
4. 数据名称: EVTR
读取模块: U2DREL
5. 数据名称: EXDP
读取模块: U2DREL

若ET选择项NEVTOP等于2

- | | |
|----------|--------|
| 6. 数据名称: | IEVT |
| 读取模块: | U2DINT |

输入数据说明

NEVTOP: 蒸发蒸腾选择指示符。ET参数 (ET界面, 最大ET率, 终止深度) 在二维数组 SURF, EVTR, 以及EXDP中指定。每一垂向柱体对应一个值。于是, 每垂向柱体只对一个计算单元进行计算。选择指示符具体确定将对垂向柱中哪些计算单元进行蒸发计算。

1—仅对模型顶层的计算单元进行蒸发蒸腾计算。

2—用户指定IEVT数组中垂向柱体上发生蒸发蒸腾的计算单元。

IEVTCB: 标示符及文件设备号。

若IEVTCB>0, 表示文件设备号。当ICBCFL (见输出控制) 设定时, 将从该文件设备号输出各计算单元的蒸发蒸腾量。

若IEVTCB≤0, 将不打印或输出蒸发蒸腾量。

INSURF: ET界面 (SURF) 读取标示符。

若INSURF≥0, 将读取ET界面高程的数组。

若INSURF<0, 将重复利用上一应力期的ET界面数据。

INEVTR: 最大蒸发蒸腾率 (EVTR) 读取标示符。

若INEVTR≥0, 将读取最大蒸发蒸腾率数组。

若INEVTR<0, 将重复利用上一应力期的最大蒸发蒸腾率。

INEXDP: 终止深度 (EXDP) 读取标示符。

若INEXDP≥0, 将读取终止深度 (EXDP) 数组。

若INEXDP<0, 将重复利用上一应力期的终止深度。

INIEVT: 蒸发层位数组读取标示符。该数组仅在蒸发蒸腾选择指示符 (NEVTOP) 等于2时使用。

若INIEVT≥0, 将读取蒸发层位数组 (IEVT) 。

若INIEVT<0, 将重复使用上一应力期的蒸发层数组。

SURF: ET界面的高程。

EVTR: 最大蒸发蒸腾率 (单位面积水量(LT⁻¹))。

EXDP: ET终止深度。

IEVT: 蒸发层位数组。对每一个水平面位置, 它代表发生蒸发蒸腾的层位。仅当蒸发蒸腾选择指示符等于2时才需使用该数组。

第一种选择下蒸发蒸腾子程序包输入样单

数据项	说明	输入记录
1	{NEVTOP, IEVTCB}	1 0
2	第一应力期{INSURF, INEVTR, INEXDP, INIEVT}	1 1 1
3	ET界面数组控制记录	27 1.(10F5.0) 4
		710 715 720 725 730
		715 720 725 730 735
	ET界面值	720 725 730 735 740
		725 730 735 740 745
		730 735 740 745 750
		735 740 745 750 755
4	最大蒸发蒸腾率数组控制记录	0 9.65E-7
5	终止深度数组控制记录	0 10.0
2	第二应力期{INSURF, INEVTR, INEXDP, INIEVT}	-1 1 -1
4	最大蒸发蒸腾率数组控制记录	0 8.23E-7
2	第三应力期{INSURF, INEVTR, INEXDP, INIEVT}	-1 1 -1
4	最大蒸发蒸腾率数组控制记录	27 9.65E-7 (10F4.0) 4
		1.2 1.2 1.2 1.2 1.3
		1.2 1.2 1.2 1.3 1.4
	蒸发蒸腾率	1.2 1.2 1.3 1.4 1.4
		1.0 1.0 1.0 1.1 1.1
		1.2 1.3 1.3 1.4 1.4
		1.3 1.3 1.4 1.4 1.4

第二种选择下蒸发蒸腾子程序包输入样单

数据项	说明	输入记录
1	{NEVTOP, IEVTCB}	2 45
2	第一应力期 {INSURF, INEVTR, INEXDP, INIEVT}	1 1 1 1
3	ET界面数组控制记录	27 1.(10F5.0) 4
		710 715 720 725 730

		715	720	725	730	735		
	ET界面值	720	725	730	735	740		
		725	730	735	740	745		
		730	735	740	745	750		
		735	740	745	750	755		
4	最大蒸发蒸腾率数组控制记录	0 9.65E-7						
5	消失深度数组控制记录	0	10.0					
6	蒸发层位数组控制记录	12		1 (2012)			3	
		1	2	2	2	3		
		1	2	2	2	2		
	蒸发层位数	1	1	2	2	2		
		1	1	1	1	2		
		1	1	1	1	1		
		1	1	1	1	1		
2	第二应力期{ INSURF, INEVTR, INEXDP, INIEVT}	-1	1		-1		-1	
4	最大蒸发蒸腾率数组控制记录	0 8.23E-7						

[译注: 样单中的数据可能不符合格式要求, 仅供参考。]