

文章编号:0559-9350(2020)07-0827-08

## 论抽水的降落漏斗范围、影响半径与环境影响范围

王军辉, 王峰

(北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 针对降落漏斗范围、影响半径与环境影响范围等3个既有联系又有区别的水文地质问题, 从其科学性和实用性两个角度, 开展了系统研究工作。首先, 针对降落漏斗范围, 通过一般的数学模型进行了深入的理论研究, 研究结论得到了Dupuit模型和Theis模型等2个成熟井流模型的验证。然后, 针对影响半径, 在国内外经典文献基础上, 以地下水水动力学发展史为主线, 对其理论基础进行了科学分析, 着重分析了其模型基础和几何意义, 梳理了其理论上的不足和主要存在争议之处, 进而分析了其适用性和实用性, 同时对非Thiem模型中的广义影响半径也进行了类似研究, 得到了关于各类井流模型影响半径的一般共性认识。最后, 结合抽水的环境风险评估和环境监测的需要, 提出了“抽水环境影响范围”概念(包括一、二类环境影响范围)和一般求解方法, 并根据实际应用需要, 提出了Theis模型环境影响范围的解析解, 其科学性和实用性得到了一个实际典型案例的验证。

**关键词:** 地下水; 井流; 降落漏斗; 影响半径; Dupuit公式; Theis公式; 环境影响

**中图分类号:** X523

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20200112

### 1 研究背景

在地下水抽采过程中, 抽水系统与含水系统之间会通过降落漏斗发生相互作用。一方面, 在降落漏斗水力梯度驱动下, 抽水系统周围形成一定范围的“补给区”, 使抽水系统能得到含水系统的稳定补给, 从而保证抽水能够持续进行下去。对于单井稳定流模型, 这种“补给区”大小可以等效地以“影响半径”来描述, 这是地下水资源评价和降排水工程中所关注的问题<sup>[1-2]</sup>; 另一方面, 抽水引起的降落漏斗, 会在一定范围内将会引起一系列的环境效应(如地面沉降、塌陷、植被枯竭和污染物运移等等), 环境效应发生的范围即“环境影响范围”, 这是地质灾害工程与环境工程中所关注的问题<sup>[3-5]</sup>。由于“影响半径”与“环境影响范围”都与降落漏斗相关, 二者在理论和实践中容易引起混淆, 需要做一系列的研究, 主要表现在如下3点:

其一, 如何从理论上对降落漏斗范围进行严格意义的界定。“降落漏斗”是由抽水(排水)而形成的漏斗状的水头(水位)下降区<sup>[6]</sup>。虽然, “降落漏斗范围”理论上被公认是由抽水引起的非零降深范围<sup>[7-9]</sup>, 但在实践中, 降落漏斗范围的确定更多是基于地下水位监测数据的定性分析<sup>[10-11]</sup>, 而受监测网布置影响, 很难得到严格意义上“非零降深范围”。因此, 需要从地下水动力学角度进行研究, 这不仅对降落漏斗范围的确定和地下水监测工作本身具有重要理论指导意义, 而且作为影响半径和环境影响范围研究的重要基础, 对于相关易混淆的基本问题正本清源也大有帮助。

其二, 如何从理论与实践两个角度澄清“影响半径”, 以达到对该类争议较大问题的一般共性认识。“影响半径”是地下水动力学中一个经典术语, 也是长期以来广受热议的问题, 其最早源于1863年法国学者Dupuit在其环岛模型(即Dupuit模型)中提出的“可渗透环岛半径”(法语原文 le rayon

收稿日期: 2020-02-12; 网络首发时间: 2020-05-26

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200526.1551.001.html>

作者简介: 王军辉(1973-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质方面科学研究和技术咨询研究。

E-mail: wjh1223@sina.com

du massif filtrant)<sup>[12]</sup>。后来德国学者 Thiem 通过近似假设(后来 Bear 称这种假设为 quasi-steady flow<sup>[7]</sup>, 薛禹群称其为“似稳定流”<sup>[13]</sup>), 将“环岛模型”进一步推广到更具广泛实践意义的无限含水层中(即 Thiem 模型)<sup>[7]</sup>。不同于 Dupuit 模型中“原生环岛”, Thiem 模型中的环岛只有在降落漏斗形成后才表现出来, 因此, Thiem 一开始将这种模型中的“可渗透环岛半径”称为“降落漏斗范围”(德语原文 reichweite des absenkungstrichters)<sup>[7]</sup>。美国学者 Todd 又更加形象地将其改称为“影响半径”(radius of influence of the well)<sup>[8]</sup>, 这便是影响半径的由来, 并指出其“不一定是可观测的”, 而是一个“近似经验处理”。之后, Bear 首次在概念上将其明确为一个水文地质参数(parameter)<sup>[9]</sup>。自此, 影响半径作为一个参数, 在理论研究和工程实践中有着广泛的应用, 但由于其概念发展过程的复杂性, 目前不同学者对其理解仍存在较大差异, 争议也较大<sup>[13-20]</sup>, 需要从理论上对影响半径进行系统的梳理、分析, 并从实际应用效果上予以澄清, 以达到对影响半径的一般共性认识。

其三, 如何从理论与方法上来界定地下水开采的环境影响范围。近几十年来, 为满足经济发展和人类建设活动的需要, 地下水开采的力度也日益加大。大到以满足水资源需求为目的的区域性地下水开采, 小到为某个具体工程施工为目的的降排水, 由此都会造成不同尺度的渗流场变化, 进而引起的诸多环境问题(如地面沉降、塌陷、植被枯竭和污染物运移等)也日益突出<sup>[3-5]</sup>。实践中为有效防控这些环境风险, 需要开展两项重要工作: 一是在开采方案设计阶段的环境风险评估; 二是在地下水实际开采过程中的环境监测。显然, 在这两项工作中, 抽水的环境影响范围是一项重要的技术、经济与环境指标, 这是因为: (1)在地下水开采方案设计阶段, 环境影响范围大小确定直接关系到所涉及到的主要环境风险要素类型, 反过来又影响了开采方案的可行性, 有时甚至成为评判其可行性的一票否决因素; (2)在开采活动中的环境监测中, 环境影响范围直接决定了对环境风险的有效控制程度和监测成本。目前关于抽水的环境影响范围理论与方法的研究很少, 而在工程实践中多以“影响半径”来界定环境影响范围, 显然无论在基本概念上还是精度都存在许多问题, 争议很大; 而若用“降落漏斗范围”来界定环境影响范围, 显然又过于保守。因此, 需要对该类问题的基本概念和方法论做全新探讨。

针对上述理论研究和工程实践中遇到的既有联系又有区别的 3 个新、老水文地质问题, 本文开展了如下系统研究工作。

## 2 降落漏斗范围

**2.1 边界线及其水力学特征** 从地下水动力学角度来说<sup>[7-9]</sup>, 由于抽水引起的降落漏斗范围的边界线为降深为零的等值线。为科学地讨论这个问题, 以承压水含水层中抽水的平面二维流非稳定流模型为例(潜水含水层类似), 并剔除渗流场非抽水引起自然水位波动干扰, 进行降落漏斗范围研究, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \sum_{i=1}^m \delta(x_i, y_i) Q_i = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y) \in D \\ H(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y) & (x, y) \in D \\ H(x, y, t) \Big|_{B_1} = H_1(x, y) & (x, y) \in B_1 \\ T_{nn} \frac{\partial H}{\partial \bar{n}} \Big|_{B_2} = \bar{q}(x, y) & (x, y) \in B_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $H$  为水头函数;  $x, y$  为笛卡尔平面坐标;  $t$  为抽水时间;  $x_i, y_i$  为第  $i$  口井的平面坐标;  $Q_i$  为第  $i$  口井的抽水量;  $m$  为抽水系统的井总数;  $\mu^*$  为弹性释水系数;  $H_0$  为抽水前的水头分布, 仅当  $\frac{\partial H}{\partial t} \neq 0$  时才有该项, 否则蜕化为稳定流模型, 该项就自然不存在;  $H_1$  为给定水头边界上水头分布;  $T_{xx}$ 、 $T_{yy}$  和  $T_{nn}$  分别为  $x$  轴、 $y$  轴和给定流量边界  $B_2$  法向的导水系数值;  $D$ 、 $B_1$  和  $B_2$  分别为模型的渗流域、给定水头边界和给定流量边界;  $\bar{n}$  为给定流量边界  $B_2$  外法向矢量;  $\bar{q}(x, y)$  为给定流量边界  $B_2$  的单宽流量。

2.1.1 降落漏斗范围边界线的位置 利用模型(1)可以求解抽水后  $t$  刻的水头分布  $H(x, y, t)$ , 由此可以得到降深分布, 即

$$s(x, y, t) = H(x, y, t) - H_0 \quad (x, y) \in D \quad (2)$$

式中:  $s(x, y, t)$  为抽水系统引起的任一点  $(x, y)$  处  $t$  时刻的降深; 其他符号同前。

由于降落漏斗范围边界线为降深为正数与 0 的区域分界线, 因此有:

$$s(x, y, t)|_{D_1} \geq 0 \quad (x, y) \in D_1, \text{ 且 } " = " \text{ 仅当 } (x, y) \in \Gamma_1 \text{ 成立。} \quad (3)$$

式中:  $D_1$  为降落漏斗范围,  $\Gamma_1$  为  $D_1$  的外边界线。

显然, 从渗流的连续性来看, 在模型(1)边界以内任一点  $(x, y)$ , 只要抽水量不为零(即  $\sum_{i=1}^m \delta(x_i, y_i)Q_i \neq 0$ ), 其降深都是非零的, 因此降落漏斗范围边界线  $\Gamma_1$  不可能在边界  $(B_1+B_2)$  以内, 那么是否恰好落在边界上呢? 对于给定水头边界  $B_1$  很好理解, 由于  $B_1$  上水头不受抽水影响, 其上任一点均满足  $s(x, y, t)=0$ ; 而对于在给定流量边界  $B_2$ , 虽然在其内侧  $B_2^-$ , 不一定满足  $s(x, y, t)=0$  (以  $q(x, y)=0$  的隔水边界作为特例, 在抽水过程中, 显然  $B_2^-$  的降深是非零的), 而在其外侧  $B_2^+$ , 由于不受抽水影响, 因此依然满足  $s(x, y, t)=0$ , 只是函数  $s(x, y, t)$  在  $B_2$  内外两侧不一定连续而已。因此, 降落漏斗范围的边界线( $\Gamma_1$ )与模型(1)的边界( $B_1+B_2$ )完全重合。

2.1.2 降落漏斗范围边界线水力梯度分布特征 根据地下水动力学原理, 可以定义模型(1)的渗流域内任一点抽水引起的水力梯度(以下简称“水力梯度”), 即

$$\vec{i}(x, y, t) = -\frac{\partial H(x, y, t)}{\partial \vec{l}} - \vec{i}_0 \quad (x, y) \in D \quad (4)$$

式中:  $\vec{i}(x, y, t)$  为抽水系统引起任一点  $(x, y)$  处  $t$  时刻的水力梯度矢量;  $\vec{l}$  为抽水某个时刻沿着地下水流动方向的距离矢量;  $\vec{i}_0$  为初始水力梯度矢量, 由初始水头函数  $H_0(x, y)$  确定。

利用前述降深分布类似分析方法, 可以证明只有在模型的给定流量边界  $B_2$  上和给定水头边界  $B_1$  上(外侧  $B_1^+$ )水力梯度为零, 因此降落漏斗范围边界线附近水力梯度为零。

上述研究表明, 降落漏斗范围是抽水系统对含水系统的极限侧向影响范围, 其边界线附近降深与水力梯度均为零, 且与抽水系统渗流边界完全重合, 而与具体抽水工况和抽水时间均无关。因此, 在方法论上, 确定降落漏斗范围即为确定抽水系统的渗流边界, 需要根据抽水系统所在的水文地质条件综合分析判断得到, 而不能直接通过模拟、监测或试验等方法得到。

**2.2 典型模型验证** 为更加直观地说明上述结论的科学性, 可以用如下两个典型的单井抽水模型来予以验证。

2.2.1 可渗透环岛抽水的 Dupuit 模型 法国学者 Dupuit(1863)假想在一个理想的可渗透环岛圆心抽水, 并由此可以推导得到任意位置的水位降深表达式(此处为方便问题讨论, 对原著中 Dupuit 公式略作等效变化), 即

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{L}{r} \quad (r_w \leq r \leq L) \quad (5)$$

式中:  $r$  为影响半径范围内距离抽水井任意距离;  $s$  为  $r$  对应的降深;  $Q$  为抽水量;  $L$  为可渗透环岛半径;  $r_w$  为井径, 其他符号同前。

根据式(5), 对于任意大小的非零抽水量  $Q$ , 只有当  $r=L$  时(即环岛边缘线上)才满足  $s=0$ , 因此该条件下降落漏斗边界线为可渗透环岛的边缘线, 即渗流边界。同时, 当  $r=L$  时, 虽然水力梯度  $-\frac{Q}{2\pi TR} \neq 0$ , 但对于  $r>L$  的任意范围, 由于  $s=0$ , 其水力梯度为零, 与前述得到的普遍结论一致。

2.2.2 无限含水层抽水的 Theis 模型 美国学者 Theis(1935)假想在理想无限承压含水层中抽水(即 Thies 模型), 并由此得到著名的 Theis 公式, 即

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (6)$$

其中

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{\exp(-x)}{x} dx$$
$$u = \frac{\mu^* r^2}{4\pi T t}$$

式中： $W$ 为井函数； $u$ 为井函数自变量；其他符号同前。

根据式(6)，可以得到对于任意大小的非零抽水量 $Q$ 和抽水以后的任意时刻 $t$ ，只有当 $r \rightarrow \infty$ 时，才有 $s \rightarrow 0$ ，因此该条件下的降落漏斗范围在距离抽水井无穷远处，与无限含水层中抽水的渗流边界重合。同时，当 $r \rightarrow \infty$ 时，任意时刻的水力梯度才趋于零，也与前述得到的普遍结论一致。

### 3 影响半径

本次研究中着重对常见的无限含水层抽水的Thiem模型影响半径进行系统的澄清和分析，同时，对一些非Thiem模型的广义影响半径也进行类似分析，以形成对各类形式影响半径的统一认识。

**3.1 Thiem模型中的影响半径** 受法国学者Dupuit模型启发(详见式(5))启发，Thiem基于大量试验数据提出了Thiem模型<sup>[7]</sup>，即认为在无限含水层中较长时间抽水后，抽水井附近某个区域范围内(距离抽水井 $R$ )的将达到似稳定流<sup>[9,13]</sup>，且 $R$ 以外的水头变化可以忽略，这样此时也能得到类似于式(5)的Dupuit公式<sup>[7]</sup>，即

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \quad (r_w \leq r \leq R) \quad (7)$$

式中： $R$ 为影响半径；其他符号同前。

对比式(7)中的 $R$ 与式(5)中的 $L$ ，由于二者在Dupuit公式中的位置相同，因此都是反映含水系统对抽水系统的一种补给能力，陈雨孙(1977)甚至称其为“引用补给半径”<sup>[18]</sup>。但由于二者模型基础不同， $R$ 与 $L$ 相比，在理论严谨性还有差距，这也是 $R$ 目前容易引起争议之处。

#### 3.1.1 影响半径的理论基础分析

(1)模型的经验性及其误差的不可评价性。由于Thiem模型是基于无限含水层，理论上达不到严格意义上的稳定流，而只能达到经验层面的似稳定流，实际上还是满足Theis模型的非稳定流，那么在实践中，抽水达到什么程度才能认为达到似稳定流？这涉及到非稳定流与稳定流两个模型之间误差问题，相关学者已经做了有意义的探索，如薛禹群针对水力梯度，研究认为当井函数自变量 $u \leq 0.01$ 时，Theis公式和Dupuit公式的计算结果的相对误差不足1%<sup>[13]</sup>，后来万力针对渗透系数的上述两个公式计算结果的研究也得到类似结论<sup>[21]</sup>。这些结论都很好地从不同侧面揭示了 $u$ 小到一定程度，非稳定流有接近稳定流的趋势这一客观事实，但仍不能直接用来定量评价似稳定流的误差。这是因为，即使当 $u \leq 0.01$ 时，根据Jacob等人研究成果<sup>[9]</sup>，Theis公式(6)近似表达为

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25 T t}{r^2 \mu^*} \quad \left( 0 < \frac{r^2 \mu^*}{4 T t} \leq 0.01 \right) \quad (8)$$

显然，式(8)虽然已经在结构上与式(7)很接近，但其中仍然含有时间变量 $t$ ，无法像水力梯度或渗透系数那样定量评价2个模型之间的误差，这是因为二者是基于完全不同假设条件，而不是“特例与一般”的关系。

(2)无实际几何意义及其值的不确定性。由于 $R$ 的模型基础在理论上的上述不足，造成其几何意义上的不明确，主要表现为如下两点：①根据Todd和Bear的研究，在无限含水层中，式(7)主要适用于距离抽水井较近区域，而无限含水层降落漏斗范围在距离抽水井无穷远处，因此 $R$ 远达不到降落漏斗范围；②虽然在推导式(7)时，用到了 $s|_{r=R} = 0$ 的条件<sup>[9,13]</sup>，但根据陈雨孙进一步研究，为确保式(7)计算精度，距离变量 $r$ 需要控制在 $0.2R$ 以内<sup>[19]</sup>，因此实际上( $r=R, s=0$ )这一点在含水系统中是不存在的。上述两点说明， $R$ 并不代表含水系统中某个具体几何位置与抽水井的距离，是没有实际

几何意义的，也是不可观测的，而只能利用式(7)反演得到，因此 $R$ 值也仅仅是为了满足计算的一个“抽象参数”<sup>[9,13,19]</sup>。同时，该参数值又不像其他水文地质参数(如渗透系数等)那样理论上完全取决于水文地质条件本身，而多少会受抽水工况影响，数值上带有一定不确定性。

3.1.2 关于影响半径的适用性和实用性 大量工程实践表明，虽然影响半径理论上存在上述不足，但在工程实践中仍具有很好的适用性和实用性，这是因为：(1)虽然无限含水层中似稳定流理论依据不强，目前的研究也还很难量化评价其误差，但至少已经很好地揭示了这种趋势的客观存在<sup>[13, 21]</sup>，且大量抽水试验都很好地反映了较长时间抽水后，距离抽水井附近区域水位会很容易达到似稳定状态，虽然似稳定有“近似”成分，但已足以满足工程精度要求；(2)虽然影响半径 $R$ 是无实际几何意义的“抽象参数”，但由于其一般用于解析解，而解析解的特点本身就是基于许多条件的等效概化，因此为满足某种计算目的而引入一个无几何意义的“抽象参数”也无可厚非；虽然 $R$ 值带有一定不确定性，但 $R$ 是以对数形式出现在公式中，对计算结果影响也不大，尤其是对精度本来就有限的解析解影响就更微不足道，大量工程实践也充分说明了这一点。

3.2 非Thiem模型中的广义影响半径 自然界存在一些非Thiem模型抽水条件下，其解析模型在数学形式上也与Dupuit公式相同，因此部分学者将其中与式(7)中 $R$ 对应项也称为影响半径<sup>[9,19,22]</sup>，为区分前述习惯上的影响半径，此处称其为“广义影响半径”。工程实践中常见的有2类典型广义影响半径(参见表1)。

表1 常见2种广义影响半径一览表

模型名称	模型基础			广义影响半径
	渗流状态	补给条件	数学表达式	
傍河井流模型 (Forchheimer, 1886; Bear, 1972)	稳定流	河流侧向 补给	$Q = \frac{2\pi T s_w}{\ln \frac{2a}{r_w}}$ ; $a$ 为抽水井距离河流的垂直距离。	$2a$
有越流补给井流模型 (Hantush—Jacob, 1946)		垂向越流 补给	$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.12B}{r}$ ( $r_w \leq r < 0.35B$ ); $B$ 为越流因子	$1.12B$

根据上述2种广义影响半径，结合其模型基础，可以对它们几何特征和确定方法做如下进一步分析，详见表2。

表2 常见2种广义影响半径几何特征和确定方法一览表

广义影响半径	几何特征		确定方法
	与距离变量 $r$ 的关系	与降落漏斗范围的关系	
$2a$	$r = r_w \ll 2a$	$2a$ 远小于降落漏斗范围(为一侧与河流重合，且圆心距离河流无穷远、半径无穷大的圆)。	理论上可直接通过几何方法测量得到，但实践中对以抽水试验反演得到。
$1.12B$	$r < 0.31 * 1.12B$	$1.12B$ 远小于降落漏斗范围(为以抽水井为圆心半径无穷大的圆)。	理论上可直接根据 $B$ 计算得到，但实践中多以抽水试验反演得到。

上述分析表明，和影响半径类似，广义影响半径也是反映含水系统对抽水系统补给能力(侧向或垂向)，且由于上述2个广义影响半径的模型基础都是严格意义上的稳定流，其模型基础似乎要严谨，但囿于各自模型成立的约束条件(表1)，其距离变量 $r$ 也都要比广义影响半径小得多(参见表2)，且其广义影响半径值一般也都远小于降落漏斗范围。因此，和影响半径类似，广义影响半径依然是无实际几何意义、满足特定解析模型计算的“抽象参数”，且实践中也多以抽水试验反演得到。

## 4 环境影响范围

4.1 一般环境影响范围 不同环境风险源对渗流场要素敏感程度是不同的，如：有些环境风险源对

降深较为敏感(如地面沉降和植被枯竭),而有些环境风险源对水力梯度比较敏感(如污染物运移和饱和粉细砂的渗透变形),这样可以根据需要分别定义一类环境影响范围(以降深大小界定)和二类环境影响范围(以水力梯度大小来界定)。

假设某工程对抽水引起降深承受能力为 $[s]$ ,可以定义一类环境影响范围如下,即

$$s(x,y,t)\Big|_{D_1^*} \geq [s] \quad (x,y) \in D_1^*, \text{且} " = " \text{仅当} (x,y) \in \Gamma_1^* \text{成立} \quad (9)$$

式中:  $D_1^*$ 为一类环境影响范围;  $[s]$ 为环境承载能力所允许的降深;  $\Gamma_1^*$ 为  $D_1^*$ 的边界线。

同理,假设某工程针对抽水引起水力梯度允许值为 $[i]$ ,可以定义二类环境影响范围如下,即

$$\bar{i}(x,y,t)\Big|_{D_2^*} \geq [i] \quad (x,y) \in D_2^*, \text{且} " = " \text{仅当} (x,y) \in \Gamma_2^* \text{成立}。 \quad (10)$$

式中:  $D_2^*$ 为二类环境影响范围;  $[i]$ 为环境承载能力所允许的水力梯度;  $\Gamma_2^*$ 为  $D_2^*$ 的边界线。

利用数学模型(1)求出降深和水力梯度分布,然后再由式(9)或式(10)确定环境影响范围。模型(1)主要针对一般抽水问题而言的,多数情况下需要用到数值解,对于一些理想条件下,可以用解析解。

环境影响范围是抽水系统对含水系统的环境影响程度,属于降落漏斗范围的一部分,除了与抽水工况、水文地质条件自身关系比较密切相关外,还与环境风险源的特点以及国家相关法律法规和技术标准有关,带有一定“主观色彩”,这也是其与降落漏斗范围及影响半径的明显不同之处。在方法论上,除了数学模型预测和现场监测外,还应注重对环境风险源特点的分析研究,确定技术、经济和环保的环境影响的目标允许值。

**4.2 典型抽水模型环境影响范围解析解的讨论** 以常见的无限承压含水层中非稳定流抽水Theis模型为例,进行讨论。根据Theis公式(6)并联立式(9),可以得到一类环境影响范围半径表达式,即

$$R_1^*(t) = \sqrt{\frac{4\pi T t W^{-1}\left(\frac{4\pi T [s]}{Q}\right)}{\mu^*}} \quad (11)$$

式中:  $R_1^*(t)$ 为Theis抽水模型的 $t$ 时刻一类环境影响范围半径;  $W^{-1}$ 为井函数 $W$ 的反函数;其他符号同前。

联立式(6)和式(10),可以得到二类环境影响范围半径,即

$$[i] = \frac{Q}{2\pi T R_2^*(t)} \exp\left(-\frac{\mu^* R_2^*(t)^2}{4\pi T t}\right) \quad (12)$$

式中:  $R_2^*(t)$ 为Theis抽水模型的 $t$ 时刻二类环境影响范围半径;其他符号同前。

式(12)为关于  $R_2^*(t)$ 的非线性隐式方程,可以通过Newton法迭代计算得到  $R_2^*(t)$ 具体值。

当根据相关条件或经验可以判断  $\frac{\mu^* R_2^*(t)^2}{4\pi T t} < 0.01$ 时,式(12)可以进一步简化为与其相对误差不足1%的显示表达式,即

$$R_2^*(t) = \frac{Q}{2\pi T [i]} \quad (13)$$

从式(13)可以看出,当  $\frac{\mu^* R_2^*(t)^2}{4\pi T t}$ 足够小(抽水时间足够长或距离抽水井足够近),二类环境影响范围数值上与时间近似无关。

**4.3 案例分析** 在北京通州副中心某处有一深大基坑,涉及到一个岩性为粉细砂、厚约为15 m的无限承压水含水层的降水问题。根据抽水试验分析结果与降水设计资料,相应含水层导水系数 $T$ 为315 m<sup>2</sup>/d,弹性释水系数 $\mu^*$ 为 $10^{-4}$ ,影响半径约800 m,单井涌水量约85.5 m<sup>3</sup>/h。本基坑周边无规律分布多个古建筑和市政基础设施,对地面沉降比较敏感,依据相关规范估算,敏感工程处承压水水头允许降深 $[s]$ 为1.5 m;同时,基坑周边零星分布有多处小型污染场地,承压水经受到局部污染,根据主要特征污染物和相关规范,要求抽水期间污染场地处该层承压水允许水力梯度 $[i]$ 为2‰。为尽可能减少和规

避对周边环境的影响,需要分析单井持续抽水1年后环境影响范围,以为工程降水施工期间的环境监测(包括地面沉降、污染物运移)方案设计提供依据。

将上述水文地质参数分别代入式(11)和式(13)中,计算得到持续抽水1年后的一、二类环境影响半径分别如下,即

$$R_1^*(365) = \sqrt{\frac{4\pi T t W^{-1} \left( \frac{4\pi T [s]}{Q} \right)}{\mu^*}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 315 \times 365 \times W^{-1} \left( \frac{4\pi \times 315 \times 1.5}{85.5 \times 24} \right)}{10^{-4}}} = 1220 \quad (14)$$

$$R_2^*(365) = \frac{Q}{2\pi T [i]} = \frac{85.5 \times 24}{2\pi \times 315 \times 2\%} = 518 \quad (15)$$

由此得到一、二类环境影响半径分别为1220 m和518 m。显然若统一按影响半径800 m作为环境监测范围,这对于沉降监测方案来说存在风险源未控制全的问题,而对于水质监测方案来说,存在监测范围过大和成本过高问题,尤其是对于一些特征污染物的监测。

## 5 结论

(1)降落漏斗范围是抽水系统对含水系统渗流场(含水头和水力梯度等)理论上所能达到的极限侧向影响范围,其边界线与模型的边界完全重合,而与具体的抽水工况无关。降落漏斗范围需要根据基础水文地质条件综合分析确定。

(2)影响半径(含广义影响半径)是表征含水系统对抽水系统一种补给能力,其所谓的“影响”实际上是“含水系统对抽水系统的影响”,属于含水系统自身的性质,这一点有别于降落漏斗范围,且在数值也要远小于后者,一般用于(似)稳定流。影响半径在物理上是无实际几何意义而仅仅为满足某种解析模型计算的“抽象参数”,其确定方法一般基于水文地质试验数据的解析模型计算。

(3)抽水的环境影响范围是抽水造成渗流场变化而带来的环境效应范围大小,属于降落漏斗范围的一部分,反映了抽水系统对含水系统的环境影响程度,根据影响环境的渗流场要素类型,可以分为一类和二类环境影响范围。环境影响范围与水文地质条件、抽水工况、抽水时间以及周边环境类型均有密切关系。环境影响范围一般需要根据环境类型,通过模型实时预测来确定,并在实际抽水过程中通过动态环境监测结果进一步完善。

致谢:中国水利水电科学研究院的赵进勇教授、河海大学的黄勇教授和南京大学的祝晓彬博士为本文研究提供了经典外文原著文献;在本文评审过程中,同行专家给予了悉心指导和中肯建议,作者在此一并表示感谢!

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 钱学溥,于义强. 引用影响半径理论公式及其应用[J]. 工程勘察, 2019, 47(6): 43-49.
- [ 2 ] 张缓缓,刘启蒙,张丹丹,等. 引用影响半径R对矿井涌水量预计结果的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(4): 59-62.
- [ 3 ] 白明洲,陈云,师海. 山岭隧道施工诱发地下水位下降环境风险评价[J]. 铁道工程学报, 2016, 208(1): 5-10, 15.
- [ 4 ] 王军辉,陶连金,韩焯,等. 北京地区多层含水层中施工降水诱发地面沉降的实时预测[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(2): 251-260.
- [ 5 ] 梁策,草荣高,曹广祝. 抽水对含水层中污染物迁移影响的试验研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(1): 23-28.
- [ 6 ] 中华人民共和国国家标准. 水文地质术语(GB/T14157-93)[S]. 国家技术监督局, 1993.
- [ 7 ] THIEM G. Hydrologische Methoden[M]. Gebhardt, Leipzig, 1906.
- [ 8 ] TODD D K. Ground Water Hydrology[M]. New York: Wiley, 1959.
- [ 9 ] BEAR J. Hydraulics of Groundwater[M]. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1979.

- [ 10 ] 陈社明, 王威, 刘宏伟, 等. 河北省某扩建煤矿地下水流场变化数值模拟[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 70-73, 77.
- [ 11 ] 孙亚乔, 钱会, 张黎, 等. 银川地区地下水环境演化[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 51-54.
- [ 12 ] DUPUIT J. Etudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement des Canaux de Couverts et a Travers les Terrains Permeables[M]. 2nd ed. Paris: Dunod, 1863.
- [ 13 ] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学[M]. 北京: 中国地质出版社, 2010.
- [ 14 ] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [ 15 ] 陈崇希. 影响半径稳定井流模型与可持续开采量: 地下水动力学一个基本理论问题的分歧—与薛禹群院士商榷[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 1003-1008.
- [ 16 ] 薛禹群. 关于稳定井流模型和Dupuit公式的讨论—对陈崇希教授“商榷”一文的答复[J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1252-1256.
- [ 17 ] 陈崇希. 对《水文地质调查规范(1: 50 000)》的若干讨论和建议[J]. 水文地质工程地质, 2018, (1): 173-174.
- [ 18 ] 陈雨孙. 单井水力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1977.
- [ 19 ] 陈雨孙, 颜明志. 抽水试验原理与参数测定[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985.
- [ 20 ] 陈雨孙, 姚道圣, 花仁荣, 等. 试论“影响半径”[J]. 勘查技术资料, 1976(6): 1-29.
- [ 21 ] 万力. 裘布依公式与泰斯公式中渗透系数间的关系[J]. 水文地质工程地质, 1987(2): 61-62, 56.
- [ 22 ] 進士喜英, 西垣誠. 水収支を考慮した揚水に伴う影響圏半径に関する一考察[J]. 地下水学会誌, 2008, 50(2): 65-82.

## Discussion on the range of groundwater depression cone, radius of influence and scope of environmental impacts during pumping

WANG Junhui, WANG Feng

(BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** Aiming at the three hydrogeological problems, such as the range of groundwater depression cone, radius of influence and scope of environmental impacts which are closely related to and different from each other, systematic research work is carried out from the perspective of theory and practicability. Firstly, according to the range of groundwater depression cone, through the analysis of a general mathematical model, theoretical research is carried out, whose conclusion has been verified by two mature well flow models, i.e. Dupuit model and Theis model. Secondly, aiming at radius of influence, based on the classic literatures, taking the history of groundwater dynamics as the main thread, scientific analysis of its theoretical basis is carried out, which focus on its model basis and geometric significance, and upon which its theoretical deficiencies and main controversial points are combined, and then its applicability and practicability is analyzed. Meanwhile, similar analysis on the generalized radius of influence in non-Thiem model is also carried out, upon which the common understanding of radius of influence has been obtained. Finally, according to the needs of environmental evaluation and environmental monitoring during pumping, the concept of "scope of environmental impacts during pumping" (including first type and second type) and its general solution method are proposed, and according to the practical application, the analytical solution of scope of environmental impacts during pumping of Theis model is proposed, whose scientific nature and practicability is verified by a typical case.

**Keywords:** groundwater; well flow; groundwater depression cone; radius of influence; Dupuit formula; Theis formula; environmental impact

(责任编辑: 祁 伟)