

地下水非稳定理论应用中若干问题探讨

刘斌¹,向永²,潘孔钊³

(1.新疆维吾尔自治区地质调查院,新疆 乌鲁木齐 830000;2.新疆维吾尔自治区水利勘测设计研究院,新疆 乌鲁木齐 830000;3.新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一水文地质工程地质大队,新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:地下水的缓慢流动使得对井群开采的场激发产生迟滞响应,从而具有类似“地下水水库”的调蓄能力和漫长的非稳定流调蓄周期.这种调蓄能力是地下水本身固有的,在不同的阶段又具有不同的特点,地下水的调蓄作用与调节作用是不同的两个概念.井群开采产生的非稳定流过程可分为3个阶段,此过程中的开采量(或允许开采量)主要是由动用储存量和排泄减少量组成的,地下水补排始终处于“负均衡”状态,地下水水位将持续下降.以此为论点,笔者对地下水勘察中存在的问题、稳定流应用中造成的片面认识及在非稳定流理论应用中的理解进行了较深刻的分析.

关键词:水文地质;非稳定流;储存量;水位下降

受盛行的地下水稳定流理论影响,很多水文地质工作者在科研和生产实践中仍存在较多的片面认识和见解,影响了非稳定井流理论的进一步普及和发展.在实践中发现问题、解决问题并由此促进水文地质学理论水平的提高,是适应我国经济快速发展的要求.现将作者在长期工作实践中的思考,对非稳定流理论应用中若干问题的见解阐述如下.

1 非稳定井流发展3阶段

在现有相关文献及教科书中^[1,2],描述非稳定井流过程时,都是以2个阶段划分来介绍的.对非稳定流最终是否影响到水文地质单元边界的问题众说纷纭,有的认为可能会影响,有的则认为理论上最终会影响,至于是否影响到边界及水流状态将如何发展则再无从谈及.

实际上,任何一个水文地质单元的地下水在经过许多年开采后,开采过程都已影响到水文地质单元的边界,并明显地对地下水潜水蒸发、自流井流及泉水等自然排泄产生了影响^[3].对这个影响产生的机理,众说纷纭,有的以稳定井流理论来解释,有的以数理统计方法进行分析和预测,也有用非稳定井流来解释,仅是采用非稳定流解释的结论也相差很大,典型案例如济南趵突泉水减少的对策分析^[3].根据实际观察,地下水开采过程中的非稳定井流应存在典型的3个阶段,具体分析如下:

在不到一天的较短抽水时间里,抽水井水位迅速

下降,形成一个以开采井为中心的、向纵深方向快速下降及水平方向有限扩展的降落漏斗,这是抽水的初期阶段,也是非稳定井流的第一个阶段^[2].这期间抽出的水量是由动用漏斗范围内含水层的储存量提供的,含水介质的储水系数对形成的降深大小有很大的影响.在附近观测井的降深历时曲线上,表现为曲线从零降深开始的最陡的一段,观测点降深与其到抽水井的距离近似呈半对数关系.

随着抽水继续,降落漏斗将不断地扩展,但不会存在一个实际降深为零的漏斗边界(即所谓影响半径边界),而会在开采井周围形成一个向周边不断扩展的集流区.集流区内水位下降速率随距抽水井距离增加而减小.在降落漏斗扩展未达到含水层边界前,抽水量主要由集流区内的地下水储存量提供.在降落漏斗水位下降速率逐渐减小的情况下,无疑漏斗范围的扩展是获取储存量的唯一方式,该阶段即是非稳定流的第二阶段^[2],这个阶段一般在数十天内即可形成,该阶段将持续到漏斗扩展到水文地质单元边界为止.该阶段渗透系数的大小对漏斗的扩展速度影响很大.在一般观测井的降深历时曲线上,表现出降深变化由陡变缓的中部曲线段.

当漏斗边界影响到水文地质单元边界时,即进入到漫长的非稳定流第三阶段.这个阶段历时最长,存在于地下水开采的大部分时间,可达几十年甚至百年.在无地下水开采激发补给的前提下,由于开采漏斗的扩展在水平方向上到达边界而受到限制,因此,开采组份是由漏斗近等幅下降提供的动用储存量和含水

收稿日期:2004-05-18;修订日期:2004-07-28

第一作者简介:刘斌(1962-),男,陕西米脂人,高级工程师,1983年毕业于西安地质学院水工系,从事水文地质、工程地质与环境地质的管理工作

层边界排泄减少量(如对水位较敏感、排泄水平面高程较高的潜水蒸发量及泉水溢出量等)组成.该阶段观测孔降深历时曲线表现为曲线末段的渐近线部分.

开采井的非稳定流过程是普遍而又长久存在的,这个非稳定流过程不仅是单元地下水水位不断下降的过程,而且还是地下水储量不断被动用的补排负均衡过程.以地下水同位素测定及数值法预测的这个过程长达数十年至百年^[4],许多已建水源地通过多年运行也证明了这一点^[3].用开采前后地下水水量均衡式或年内丰枯水期地下水水量均衡式通过变形很容易推导出以下公式(1)的形式来表示开采组成^[5].

$$Q_k = Q_b + Wd + Q_p \quad (1)$$

式中: Q_k ——增加的开采量;

Q_b ——开采产生的激发补给量;

Wd ——开采动用的含水层储量;

Q_p ——开采产生的排泄量的减少量;

当新增开采量完全由激发补给量或排泄减少量来提供而不再动用单元内的地下水储量时,地下水开采的非稳定流第三个阶段也就结束了,地下水单元进入补排稳定状态.地下水开采非稳定流各阶段的水位水量变化特征见表1.

储量的动用是地下水开采利用了单元补给量以外的水,从而使地下水具备了类似地表水水库的调蓄特征,而被喻为“地下水库”.从地下水开采前的自然稳定状态到开采非稳定流过程的结束,形成了地下水的一个调蓄过程,可称之为一个调蓄周期.同地表水的一个调蓄过程相比,地下水库的调蓄周期很漫长,它是由地下水缓慢流动及对开采响应的迟滞性所造成的,水利化程度的提高和逐年增加的地下水开采量又延续了这个调蓄周期.

非稳定流第三阶段的普遍性,可以解释清楚为什么一个区域地下水的开采会造成长年水位下降和补排负均衡.同样,它也可以解释说明济南趵突泉一定

会受到自来水厂开采井及上游其它井开采影响,无论它离泉源有多远,同样能说明采取什么样的措施能延缓泉水的减少.

井群开采过程缩短了单元地下水的排泄途径,加快了地下水的循环,同时由于含水层的调蓄作用,使得地下水单元可利用除补给量以外的更多的地下水,相对增加了可恢复的地下水资源可利用量,使得开采对泉水及潜水蒸发量等的时间和幅度影响产生滞后.

在不同的阶段,地下水储量的动用范围和特征是不一样的,当开采水平高程一定时,含水层单元面积大小的调蓄作用比含水层厚度更能发挥作用,与以往认识是有一定差别的.

同地表水库一样,地下水在开采的激发下终究会完成一个完整的调蓄过程和周期的,但由于地下水这个周期的漫长性和开采本身会造成环境灾害隐患(如区域水位下降、吊泵、水质污染、地面沉降及地裂缝等),因此,地下水在这个调蓄周期的开采同时就需要通过人工回灌、地表水与地下水联合调度、跨地区调水等手段来完成水库的“蓄存”或“回补”过程,而不是象地表水一样,按进水 水库调蓄 排(供)水过程有序完成.

在地下水开采过程中,非稳定流过程长期存在,井群开采过程就是动用地下水储量和地下水单元补排水量负均衡的过程,地下水水位的长期下降是由于地下水缓慢渗流所决定的;开采动用的储量在地下水的开采调蓄周期中或结束后早晚都是要回补的,何时回补及如何回补则需人工进行干预.

2 非稳定流思想所带来的变革

2.1 消除稳定流理论的局限性

由于稳定流理论的假设条件在现实中并不存在,所以,裘布依(Dupuit)稳定流公式和济姆稳定流公式只能近似使用于似稳定流条件下井流参数计算中,所

表1 地下水开采非稳定流过程特征一览表
Table1 The characteristic of unsteady flow in groundwater exploitation

阶段划分	持续时间	集水区下降深变化	集水区外漏斗扩展	边界影响边界变化	区内观测井降深历时曲线特征	开采量组成	水文地质单元均衡水量变化
第一阶段	抽水初期,很短	水位快速下降 漏斗未扩展出	无	无	很陡	集水区 储量动用为主	补排负均衡 不影响单元边界
第二阶段	数十个月或年内	水位下降变缓 处于似稳定状态	降深较小,下降速率变缓, 水平方向漏斗扩展加速	无	较缓	集水区 外储量动用为主	补排负均衡 不影响单元边界
第三阶段	数十年甚至百年	水位缓慢下降 水位等幅下降	水平扩展受限,漏斗纵向 下降为主并等幅下降.	引起边界附近水位下降,产生激发 补给或排泄减少	极缓	集水区外储量动用 加上补排变化量	补排负均衡 大幅影响泉水等 单元边界,可能产 生边界激发补给.
结束标志		稳定	稳定	影响消失	稳定,降深不变	补排变化量	补排重新平衡

求参数也只能是近似的.因此,很难用稳定流理论来解释现实中存在的水文地质问题.

根据1870年济姆的理解意图和上述非稳定流思想,可以认为抽水影响半径的概念是不具有普遍意义的,但它给许多供水工程师们带来片面的认识.比如,开采井影响半径以外不会影响其它井组,井群方案设计的重点在于设计好井排布局方式及调整好井群间的非干扰距离等.

现实中的稳定流是不存在的.开采造成非稳定流的长期性表明,只要有地下水开采,地下水储存量就要发生变化,就会产生降落漏斗,无论开采所在水文地质单元有多大、边界有多远,整个区域内的地下水水位都会下降并最终影响到边界.开采区下游地下水水位等幅下降、造成泉水或潜水蒸发量减少的过程是开采漏斗扩展并影响到边界的结果.

2.2 动用储存量是开采量组成的主要部分

无论是利用MODFLOW进行数值模拟中的Budget(即均衡水量计算)计算成果,还是其他人提交的模型计算成果,都会发现一个现象,即在集中供水源地开采预报的大部分时间里,开采量的组成主要是动用储存量,而不是以往人们所认为的“侧向径流补给量”,上述这个现象并非个别或偶然.

以1999年乌鲁木齐市乌拉泊洼地干河子水源地勘探的代表性数值模型研究为例^①, $1\ 500 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 开采10年后,运行期减少的泉水平均占开采量的51%,动用储存量49%.而位于同样单元内的新疆乌拉泊西山应急水源地,远离泉水排泄区,在以 $1\ 000 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 开采20年后,水源地运行期平均减少的泉水量仅占14%,动用的储存量平均占到86%.以上两水源地在运行期都不产生激发补给.

用稳定流理论是无法解释地下水开采过程的水文地质现象的,而以非稳定流理论解释则轻而易举.

2.3 新疆已有的水源地多是调节型

根据公式(1)可以分析出,当水源地开采区位于傍河并且地下水与河水有直接水力联系,或者水源地位于排泄区大的泉域附近时,水源地的开采将直接袭夺河水或者袭夺泉水产生激发补给,从而不需动用所在单元的储存量,地下水调蓄的周期很短,可以产生理论上的稳定型水源地.

新疆地域辽阔,冲洪积扇水文地质单元面积很大,含水层很厚,集中供水水源地一般距单元边界很远,

加上地下水的补给多以垂向入渗补给为主,因此开采产生的激发补给可能性并不大,而地下水的调蓄能力却是很大的;同样地,水源地迅速影响全部泉水或潜水蒸发的可能性也非常小;几十年的地下水开采往往只造成下游泉水的部分减少.

因此,就开采的整个过程来说,新疆水源地地下水的开采多以动用储存量和减少部分泉水量等来提供,水源地是调节型而不是稳定型的.调节型水源地运行的过程将是所在单元地下水水位不断下降的过程及泉水量逐年减少的非稳定流过程.

2.4 地下水的调蓄特征和作用

调节型水源地长期开采过程是不断动用地下水储存量的过程,由于激发补给量的有限性,在水文地质勘察中,研究地下水储存量的调节作用和机理显得非常有实际意义.

储存量动用的过程是开采降落漏斗在水平空间和纵向上发展的过程.水文地质单元面积越大、水源地距补排区越远、含水层愈厚,地下水储存量空间调蓄的能力就越强,对补排区的水量影响滞后就越大.由于水源地开采的长期非稳定性及不同开采时期地下水调蓄特征不同,因此,在水源地开采区及井群的选定上应更多地考虑开采所形成的这些非稳定特征.水源地开采区面积大小以进入开采区的地下水补给量略大于水源地地下水开采量来确定,保证开采集水范围边界水位观测点,在抽水不久后很快达到似稳定状态,主要漏斗区控制在水源地范围内.

非稳定流的开采井群布置时,应按以下顺序考虑:大厚度分段井组开采>开采区井组平均开采>大口井式集中开采.在抽水设备能力及允许设计水位的限制下最大限度利用纵向含水层调蓄能力.

实际上以上2条是集中供水源地非稳定流布井格局设计和井距设计的基本原则.如用以上原则来分析以前勘察过的水源地会发现有许多不合理的地方.

2.5 地下水补排均衡不能代表实际上的水均衡

在现有的生产和科研报告中,无论是现状水平年还是规划水平年的地下水水均衡,一般都指的是地下水补排项平衡,这种水均衡没有反映出开采过程的地下水调蓄作用的过程和阶段,容易产生“负均衡”或“地下水长期超采”的错误理解.实际上,有地下水调蓄作用参与过程的地下水量永远是平衡的,使用补排平衡反映开采后地下水真实补排关系变化是片面的.

从质量与能量守恒的观点来看,任意时刻水文地质单元地下水水流的水量变化都是均衡的,只是由于开采动用了地下水储存量,而使这个关系变得复杂了.

① 董新光,王进,向永,等.新疆乌鲁木齐市乌拉泊洼地地下水数值模拟研究,1999

② 王文科,王进.新疆乌鲁木齐市西山应急水源地数值模型研究,2003

从理解地下水的调蓄和开采激发产生响应的观点出发,地下水的补排均衡是地下水“暗箱”分析,忽略了地下水系统功能,在数值模型计算广泛应用的今天,仍过分强调这种分析是不可取的。

因此,应以公式(1)来表征地下水开采量或允许开采量(或称地下水可利用资源)组成,后者须加约束条件限制。实际上,现有供水规范里用数值法评价地下水允许开采量也是利用的这个原理。

建议以公式(2)表征和分析地下水开采过程及开采阶段中的地下水水流的水均衡状态,即:

$$\begin{aligned} Q_{\text{侧向流入}} + Q_{\text{河谷潜流}} + Q_{\text{田渠渗}} + W_{\text{动用储量}} = \\ Q_{\text{侧向排泄}} + Q_{\text{垂向排泄}} + Q_{\text{人工开采}} + W_{\text{回补储量}} \end{aligned} \quad (2)$$

参 考 文 献

- [1] 石振华,李传亮.城市地下水工程与管理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [2] 李同斌,邹立芝.地下水动力学[M].长春:吉林大学出版社,1995.
- [3] 殷昌平,孙庭芳,金良玉,等.地下水水源地勘查与评价[M].北京:地质出版社,1993.
- [4] 王恒纯.同位素水文地质概论[M].北京:地质出版社,1991.
- [5] 中国冶金建设集团武汉勘察研究总院.供水水文地质勘察规范 GB50027-2001[M].北京:中国计划出版社,2001.

DISCUSSION ABOUT THE APPLICATION OF GROUNDWATER UNSTEADY FLOW THEORY

LIU Bin¹XIANG Yong²,PAN Kong-zhao³

(1.Xinjiang Geological Survey Institute,Xinjiang Urumqi, 830000,China;
2.Xinjiang Survey and Research Institute of Water Conservancy,Urumqi, 830000,China;
3.Hydrogeological Party,Xinjiang,Urumqi, 830091,China)

Abstract:The slow-moving of the groundwater causes sluggish response of the field excitation to well cluster exploitation, so the aquifer has accommodation like a "underground reservoir", store capacity and longtime adjusting cycle of unsteady flow. The adjustment ability of groundwater varied in different stage. Process of producing unsteady flow in well cluster extraction can be divided into three stage, during this process produced quantity is composed of the storage and the decrease that excretion quantity. Under these circumstances, the groundwater of replenishment and drain consistently is in a state of "negative balanced" and the water level will continuously descend. Based on this view, this paper discussed the problems in groundwater exploration and corrected unilateral knowledge to application of unsteady flow theory.

Key words:hydrogeology;unsteady flow;storage;water table drop

下期要目预告

中国西北地壳结构及其演化.....	刘训
层间氧化带砂岩型铀矿床形成机理——以伊犁盆地南缘为例.....	刘陶勇
中国西北地区压性叠加盆地成油特征.....	康玉柱等
伊犁盆地新构造运动特征及其与砂岩型铀矿成矿关系.....	韩效忠等
新疆东天山却勒塔格地区韧性变形带的识别及其意义.....	朱志新等
准噶尔盆地玛湖凹陷油气运移对称性及其意义.....	陈建平
新疆吉木乃县艾丁克罗赛岩体的深部铜镍成矿评价.....	尹意求等
东帕米尔“层控碳酸岩型”铁铜金矿浅释.....	王永新等
花岗岩类填图方法评述与建议.....	谢其山志新等
西秦岭糜棱岩带的成因及构造意义.....	李永军等
马朗凹陷二叠系芦草沟组的储层敏感性分析.....	肖玲
新疆哈密市五堡地区大枣、葡萄特色农业地球化学特征.....	王克卓等
低渗透致密砂岩气藏岩石的孔隙结构与物性特征研究.....	张曙光等
塔河油田石炭系卡拉沙依组砂组沉积相分析与储层评价.....	樊怀阳等
资源一号卫星数据在新疆生态环境与生态建设中的应用.....	孙卫东