

地下水资源开发过程中的异常涨落和水量失调期

徐恒力 支兵发

(中国地质大学工程学院,武汉 430074)

摘要:从地下水系统演化的角度,提出在大规模开采条件下,地下水系统存在异常涨落和水量失调现象,认为正确认识这些现象不仅对深入了解地下水资源属性有着理论意义,而且对制定地下水资源—经济—环境三者之间协调发展的地下水资源开发策略也有着重要的现实意义。

关键词:地下水系统演化;异常涨落;地下水资源;水量失调期。

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)06-0633-05

作者简介:徐恒力,男,教授,1945年生,1967年毕业于北京地质学院,1983年毕业于武汉地质学院北京研究生部,获硕士学位,现从事地下水系统理论与水资源科学管理等方面的研究。

0 引言

在大规模地下水开采区,往往会不同程度地出现地下水位持续下降、水质变异、地面变形等问题。由于这些问题会给地下水资源永续利用和环境质量带来不利的影响,因而倍受人们重视。

长期以来,在地下水资源开发策略问题上,人们认识并不统一。有人将补给资源量作为地下水可采资源量的唯一标准,认为只要开采量小于补给资源量,就不会动用储存资源;有人则认为地下水资源开发不得以环境损害为代价。若出现上述现象,则统统归咎为地下水资源开发不合理。事实表明,这些认识是不正确的。

地下水一旦被持续开采,无论开采量是否超过补给资源量,都会动用和消耗储存资源,使渗流场、水化学场甚至介质结构发生变化,从而引发上述现象。忽视对这些现象出现必然性及其规律的研究,而将其笼统地判为不合理或超量开采的依据,只会造成开采方案与环境保护方案合理性的多重标准以及水资源利用策略无所适从的混乱局面。因此,从地下水系统演化的角度重新认识这些问题,不仅有助于深入了解地下水资源属性,而且对制定地下水资源—经济—环境三者之间协调发展的地下水资源开发

策略也有着重要意义。

1 正常涨落与补排均衡

地下水系统作为分布参数系统,其状态变量是空间坐标和时间的函数。表征地下水系统状态的变量包括地下水位、水质以及岩土介质应力状态,其中以地下水位最具代表性。它们彼此相互联系、相互制约,构成地下水渗流场、水化学场、应力场的分布形态和格局,共同反映地下水系统内部物能传输的运动过程。这是我们研究地下水水动力特征、水化学组分迁移聚集规律以及岩土介质应力—应变关系的重要依据。要评价地下水系统宏观稳定与否或研究其演化进程就必须对各状态变量时序变化规律进行分析^[1]。

众所周知,现代的地下水系统均经历了漫长的地质历史发展过程。这也是地下水系统不断适应外界环境变化的历程。地下水系统作为开放系统,其宏观稳定性取决于外界环境作用是否稳定。纯天然条件下,外界环境的宏观变化十分缓慢。除突发性地质灾害外,其明显的变化只有通过大尺度地质历史研究才能发现。因而,在进行水文地质条件分析时,通常将地下水系统的状态视为宏观稳定。

所谓宏观稳定状态,是指依然存在着环境因素对系统的作用,只不过宏观环境条件如气候分带、植

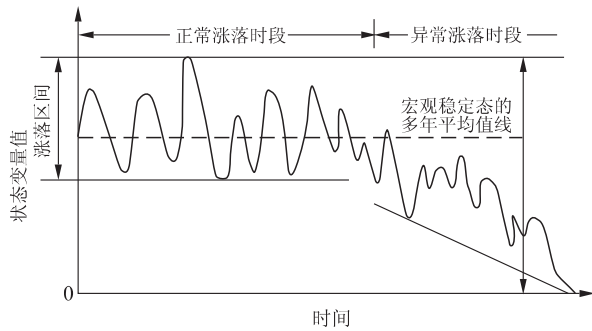


图 1 地下水系统的正常涨落与异常涨落

Fig. 1 Normal fluctuation and anomalous fluctuation in groundwater system

被条件、降水分区相对固定。此时,地下水系统诸状态变量的多年平均值、均方差和波动周期近似为定值。与此同时,短时的环境波动例如年际间降水量丰贫变化、季节性湿旱交替以及旬、日的天气变化,会对地下水系统进行干扰,使各状态变量的任一瞬间值在其多年平均值线附近的有限值域内波动,这种涨落称正常涨落(图 1)。

处于正常涨落的地下水系统即宏观稳定的地下水系统表现出以下 3 个特征:(1)各状态变量的时间序列具有统计意义下的稳定周期或频率,即具有锁频现象。不同系统,因内部结构有别而有不同变动周期,有的与环境因素的运动周期相同,有的则不然,例如中国山东济南岩溶水系统水位动态与降水具有相同的年变化周期,而山西介休洪山岩溶水系统泉流量波动周期长度则为 8 年^①;(2)各状态变量的均值与均方差不会随时间序列的延长出现趋势性变化;(3)地下水系统与外界环境之间输入—响应的统计关系相对固定^[2,3]。这表明,自然条件下,地下水系统内部水量调节以及水压传递在宏观上呈现有序结构。地下水位、水质不会对其多年平均值有超常的偏离及持续上升、下降趋势。

显而易见,对于宏观稳定的地下水系统来说,以其多年平均水位以下重力水的体积来表征的储存资源量基本上为一常量。地下水系统从外界获得的补给量多年平均值——补给资源量,也是个定值。该系统排泄量多年平均值则与该值基本持平。据此,可以看出补给资源量、储存资源量是针对整个地下水系统而言,且是水量的多年平均宏观状况的表征。这既考虑了丰水年份的盈余,又考虑了枯水年份的来量

不足,即水量的涨落过程。故在使用这些概念时,不应再考虑“以丰补欠”的问题。如果评价的范围小于一个完整的地下水系统,如某一人为划定的均衡区,或者统计的时间不是按多年而是按某一年或某一季度考虑,此时计算的水量只能用补给量和储存量来表达。这种情况下,水量均衡分析才有“以丰补欠”的问题。因此,补给资源量、储存资源量和补给量、储存量是两类不同时、空层次的水量概念。目前这些概念的使用仍十分混乱,应引起足够的重视。

2 异常涨落与水量失调

环境的明显改变如作用强度的增减、因素数目的改变,都会使地下水系统原先所处的宏观稳定态受到冲击甚至使其走向失稳的道路。在人类活动日益强烈的今天,人为活动已成为一种新的、十分活跃的环境因素影响地下水系统的行为。除了那些涉及全球气候、生态变化的人为间接干扰外,水资源的开发利用尤其是地下水的开采活动往往是促使大多地下水系统丧失其天然稳定态的最直接、最重要的原因。

采、排地下水和拦截地表水,其实质是在原有地下水渗流场中增加新的“源与汇”。这些源、汇施加的地点和强度不同,有的可能具有区域源、汇的意义,有的则只能起到局部源、汇的作用,从而使地下水渗流场原有水量调节关系与水压传递特征受到干扰,先前有序结构因而分化或解体。例如利用不同时期水头与抽水记录模拟重现的中国河北平原^②和日本浦和地区^[4]地下水渗流场图均清楚地显示了开采井作为新的汇对地下水天然流场的影响(图 2)。随着开采的持续,原先的源区补给功能被削弱,而在盆地最低处即先前的汇区,由于孔隙水压力降低,地层减压释水,在地下深处形成水力圈闭带即新的源区。

地下水流场的改变必然引起水化学场和介质应力场的变化。深部高矿化水迁移途径的改变可导致井中水质恶化;抽水引起的介质孔隙水压力减少,改变原有应力平衡状态从而使骨架附加应力增大,造成地面沉降。伴随地下水系统原先宏观稳定态的丧失,其内部状态变量的涨落也十分活跃,各瞬时值不再被约束在多年平均值上下有限值域内,而是突破其先前多年平均值形成异常涨落(图 1)。此时地下

① 中国地质大学(武汉)水文地质及工程地质系. 山西介休县岩溶水系统及孔隙水系统. 研究报告, 1989.

② 中国地质大学(武汉)环境科学与工程学院. 河北平原水资源开发利用所引起的地质灾害及其防治对策研究, 1998.

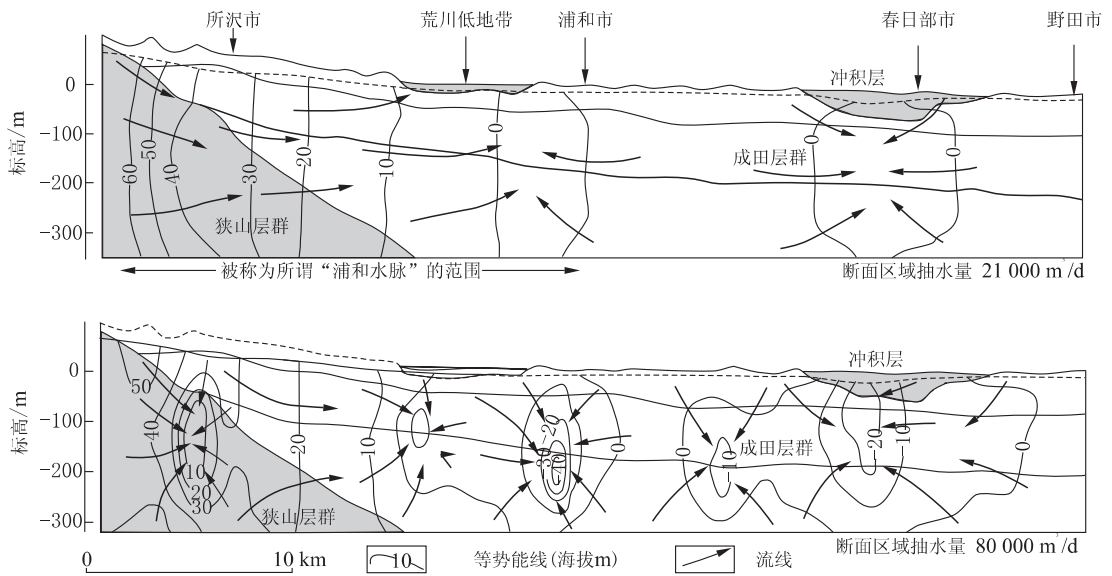


图 2 日本浦和地区地下水剖面流网图(引自文献[2])
 Fig. 2 Profile map showing groundwater flownet in Urawa, Japan

水位动态表现为趋势性的下降态势,多年水位的均方差不断增大,输入—响应不再是定常的函数关系^[5],甚至周期长度也发生改变,表现出宏观非稳态的典型特征(图 1)。

值得注意的是,地下水系统内部状态的变化最初仅出现在抽水井附近,随着时间的延续,影响范围逐渐扩大,最终会波及到排泄区。但在生产实践中,人们更习惯用降落漏斗的范围大小来说明抽水的影响,并认为:周期性的补给量会抑制漏斗的持续扩张,特别是在开采量较少时,漏斗将会保持在某一有限范围内形成张弛有序的周期性震荡。其实,这是误解。在持续抽水条件下,降落漏斗只不过是水位下降空间中中等水位线圈闭的圆形区域。这远小于水位下降的影响范围,而且只要新的宏观稳定态尚未建立,漏斗区的水位还会不断下降。地下水系统储存资源量的消耗不仅表现在漏斗中含水层的疏干,而且也表现在漏斗区外由水位持续下降引起的储存量的减少。

这里不妨用一个例子说明。对于一个以隔水边界圈围的地下水系统而言,假定该系统的补给资源量为 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,在天然条件下,这些补给资源量最终以全排型的泉水出流方式排泄。倘若在该系统内部建立一个开采量恒定为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水源地。开采初期,抽水影响尚未波及泉口时,该地下水系统的总排泄量(泉流量与开采量之和)为 $8 \text{ m}^3/\text{s}$,比天然条件下地下水系统的排泄量多出 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。随着抽水时间的延续,泉流量由 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐渐递减为 $5.9, 5.8, 5.7,$

$\dots \text{m}^3/\text{s}$,最终衰减到 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。如果该过程所经历的时间为 5 a ,那么,在这 5 a 间,虽然开采量($2 \text{ m}^3/\text{s}$)远小于该系统补给量的平均值 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,但系统总排泄量则为 $8, 7.9, 7.8, \dots \text{m}^3/\text{s}$,直到 5 a 末才变为 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。此期间,地下水的总排泄量一直大于其补给量的平均值,而超过平均补给量的水量只能由系统内部储存资源提供。据此可以看出,在正常开采过程中,存在储存资源持续消耗的时期,即水量失调期。在水量失调期内,地下水系统补给资源量等于天然排泄量多年平均值的原宏观稳定状态实际上已不复存在。

基于永续开发利用的考虑,人们在制定地下水开采方案时习惯于把地下水储存资源不得动用和消耗作为原则,但这并不意味着在正常供水实践中,地下水储存资源不会被动用。无论地下水持续开采量大于还是小于补给资源量,地下水都要付出储存资源被消耗的代价。只不过,若持续开采量超过补给资源量,储存资源将被持续消耗,地下水系统将一直处于宏观非稳态,异常涨落也将不断增大,直至地下水系统彻底解体。若持续开采量小于补给资源量,储存资源消耗到一定程度就会停止,地下水系统存在着重建新的宏观稳定态的可能性(图 3)。

不同地下水系统因介质结构的差异、开采地点距天然排泄区的距离及开采量的不同,重建宏观稳定态所需时间即水量失调期长短不一。在开采格局一次到位情况下,一个几百乃至几千 km^2 的地下水

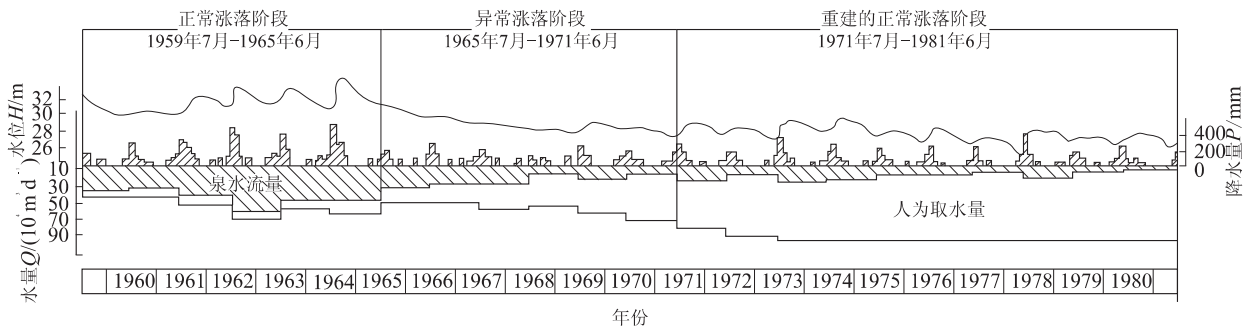
图 3 山东省济南岩溶水系统水位动态^[6]

Fig. 3 Groundwater level regime in Jinan karst water system, Shandong Province

系统,其水量失调期一般可达数年.在实际工作中,开采格局往往难以一次到位,会出现井数递增、井位调整、开采量增大等复杂情况,这都会影响新的宏观稳定态的建立,甚至在整个开采过程中,地下水系统始终处于水量失调期,因而地下水系统状态的异常涨落将是一种长期的现象.显然,异常降落持续时间越长,对环境造成的影响就越大.

3 正常涨落的重建与补排的再次均衡

异常涨落持续时间即水量失调期长短取决于地下水系统内部结构调整、人工源汇与自然源汇相互适应的自组织过程.该过程与两方面条件有关.

一是环境条件^[5],包括:(1)导致天然宏观稳定态破坏的外界作用应在此后相当长时间内保持下去.从供水永续性角度考虑就是开采强度和开采格局应长期保持稳定,不应频繁变动;(2)外界作用强度应有一定的限度.在科技发展水平还达不到按人的意愿塑造地下水系统而不产生水量失衡和各种环境问题的今天,人们只能采取适度开采的策略,力图避免出现失控结局.正因如此,在供水实践中区域地下水开采方案的确定主要依据采水前地下水系统渗流场、水化学场以及补排条件,期望各种取排水设施运行后,地下水系统重建的宏观稳定态尽可能与先前近似,不至于使系统的各种功能尤其是地下水系统的供水功能发生太大变化.

另一个条件就是地下水系统边界的隔离作用.在内部水力联系密切,透水性能好,岩性较均一的地下水系统中,小于补给资源的恒定持续开采量最终可使地下水系统建立新的宏观稳定态.如前面提到的例子,在持续开采 5 a 后,水源地和泉成了两个固定的汇,它们相互配合,共同参与地下水系统与外界

的水量交换过程.人工汇与天然汇所辖的流动系统以流面分开,彼此不相互干扰.每个流动系统的渗流场、水化学场也随之重新组建,形成相对稳定的有序结构,异常涨落再次变为正常涨落.然而,在许多地质结构复杂的地下水系统中,天然条件下,各子系统尚可保持一定水力联系,共处于统一渗流场中.一旦开采强度增大,区域水位降到一定程度,某些内部隔水边界就有可能起隔离作用,使某个子系统从整体中分离出来,成为相对独立的地下水系统.典型的实例可见于中国邯郸地区、山东济南和淄博地区一些穿插于碳酸盐岩之中的岩浆侵入体所形成的砂卡岩金属矿床.在矿床疏干过程中,随水位的降低,岩溶水系统内的岩浆岩体开始发挥其隔水作用,使矿床疏水区从原先的岩溶水系统中分化出来;或者在大规模抽水后,局部隔水层成为上下含水层的隔水边界,下部承压含水层变为无压状态而与上部潜水含水层“脱钩”,成为不同的含水系统.类似情况在一些相变复杂、粘性土分布较广的第四系孔隙水系统中也可见到.总之,对于有内部隔水边界的地下水系统,即使抽水量小于地下水系统的补给资源量,也不能保证恒定开采过程中诸子系统均能重建新的宏观稳定态.内部边界一旦发挥其隔离作用,地下水系统的资源量随系统分化的同时也被肢解,并分配到各子系统中.此后,各子系统将各行其是:开采强度小的子系统可以重建其稳定态,而开采强度超过建立宏观稳定态阈值的子系统,其水位持续下降,储存量不断消耗,仍继续其非稳定态的异常涨落过程.

4 结论

地下水系统的异常涨落和水量失调是研究地下水系统演化过程的重要依据,也是地下水资源开发

过程中普遍遇到的问题。

在持续开采条件下,若开采量小于补给资源量,且井网布局恒定,则储存资源消耗到一定程度就会停止,地下水系统可重建新的稳定态。开采强度越小,开采点距排泄区越近,介质渗透性越好,则水量失调期就越短,储存资源消耗的总量也越少。若开采格局不断变动,储存资源会被持续消耗,地下水系统将一直处于宏观非稳定态,水量失调期也将延续,储存资源消耗总量越多。

在开采量持续大于补给资源量的情况下,新的宏观稳定状态不可能建立,储存资源持续消耗最终导致地下水系统的分化或解体。

诸状态变量的异常涨落延续会使地下水内部结构全面调整。在绝大多数新生界地下水系统中,地下水位持续下降会引发水质变异和岩土变形现象,即开采往往要付出环境损害的代价。从地下水资源—经济—环境三者兼顾的基本原则出发,地下水可采资源量(或合理资源量)的评价应充分考虑维持生态和最基本的地质环境质量的耗水要求,将这部分水从补给资源中扣除,其余部分方可作为供水的可采资源量。

具有内部隔水边界的地下水系统,开采到一定

程度就会出现系统分化现象。为保证供水永续性,除总开采量必须小于补给资源量外,还须根据内部边界特点和异常涨落的发展过程适时调整开采布局。

地下水系统演化过程中,因结构调整,补给资源量也会改变,因此,地下水补给资源的多次评价是必要的。

参考文献:

- [1] 邹珊刚,黄麟维,李继宗,等. 系统科学[M]. 上海:上海人民出版社,1987. 1~466.
- [2] 徐恒力. 地下水系统的进化[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 58~60.
- [3] 徐恒力. 地下水系统外部描述方法与结构辨识[A]. 见:中国地质大学(武汉)水文系,编. 水文地质及工程地质论文集[C]. 武汉:中国地质大学出版社,1992. 9~16.
- [4] 柴崎达雄. 地下水盆地管理:理论与实践[M]. 王秉忱,周文辅,闵连太,等译. 北京:地质出版社,1982. 33~37.
- [5] 徐恒力,陈植华. 地下水系统的时变问题与预测[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1991, 16(1): 35~41.
- [6] 徐恒力. 济南地区岩溶系统水位动态研究及泉水恢复的预测[D]. 北京:武汉地质学院北京研究生部,1983.

ANOMALOUS FLUCTUATION AND WATER-QUANTITY DISEQUILIBRIUM IN GROUNDWATER RESOURCES DEVELOPMENT

Xu Hengli Zhi Bingfa

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The authors of this paper advance, in terms of the evolution of the groundwater system, that the anomalous fluctuations and water-quantity disequilibrium are present in any groundwater system where a large-scale groundwater resources development is underway. The correct understanding of these phenomena is not only of theoretical significance to the further understanding of the attributes of groundwater resources, but also of important practical significance to the planning of the water-resource development strategy reflecting the harmonious relationships among groundwater resources, economy and environment.

Key words: evolution of groundwater system; anomalous fluctuation; groundwater resources; water-quantity disequilibrium.