

# 深层地下水及其可利用性分析

刘花台, 郭占荣

(厦门大学海洋与环境学院, 厦门 361005)

**摘要:** 深层地下水是指地质历史时期特定气候条件下形成的、现代补给来源很少、恢复更新速度极其缓慢的地下水。国内外专家对区域大型沉积盆地中的深层地下水的运移机制存在不同的认识, 根本的分歧在于是否存在水力连续性。尽管在学术上存在着主张和反对开采深层地下水的争论, 但实际情况却是世界上许多干旱国家和地区正在开采或计划开采深层地下水, 并且作为主要的供水水源。深层地下水的开采主要是开采其储存量, 其可利用限度取决于是否允许消耗其储存量及允许消耗多少储存量。开采战略要么是选择长期开采要么是选择替代解决办法, 如果选择前者, 那么分阶段、分层位开采并给予其足够恢复、更新的时间是非常必要的。

**关键词:** 深层地下水; 运移机制; 储存资源; 可利用限度

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)02-0124-05

## 1 引言

相比较而言, 地下水作为一种重要水源具有地表水所不具备的一些优越性, 如分布范围广, 不易被污染, 不易因蒸发而受损失, 供水和水质比较稳定, 可以就地取水, 可利用程度高并可分阶段有计划地开采利用等。正因为如此, 地下水通常是种重要的供水水源, 特别是在干旱、半干旱地区, 地下水资源在供水中起到了不可替代的作用。

事实上, 大多数干旱、半干旱国家和地区都主要是通过开采地下水提供了其大部分甚至是全部所需的供水水源, 地下水在总用水量构成中占有相当大的比例。例如, 利比亚、阿曼、巴林、卡塔尔为 100%, 科威特除淡化海水外亦全部用地下水, 阿联酋为 77%, 沙特阿拉伯超过 75%, 阿尔及利亚和以色列为 67%, 西班牙列旺特地区为 50%~60%、加那利群岛为 100%, 美国加利福尼亚、得克萨斯、内布拉斯加、堪萨斯、佛罗里达、阿肯色、亚利桑那、俄克拉荷马、新墨西哥、南达科他和特拉华诸州等比较干旱的地区地下水供水量均占全州总用水量的近 40%~60% (其中亚利桑那州为 62%), 澳大利亚中部和西部也主要依赖地下水。在我国, 北方地区供水也很大程度依赖地下水, 如河北

省、山西省、北京市、河南省的地下水供水量占总供水量的比重分别达到 74.3%、66.8%、64.5%、56.7%。

随着经济的发展、人口的增加, 对水资源的需求量越来越大。由于地表水开发利用程度接近极限或者因污染而不能利用, 由于浅层地下水开采程度很高以至于疏干, 或者因浅层地下水属于劣质水无法利用等种种原因, 深层地下水的开发利用越来越受到重视。但是, 目前在深层地下水的形成、运移等机理方面还存在不同学术观点, 在深层地下水能否开发利用方面仍存在意见分歧。所以, 加强深层地下水的勘察和研究是今后水文地质工作任务之一。

## 2 深层地下水内涵

深层地下水是指地质历史时期特定气候条件下形成的、现代补给来源很少、恢复更新速度极其缓慢、补给周期长、几乎不受气候波动影响的地下水。由于深层地下水多数是承压的, 所以有时又称作深层承压水。“深层”不是“深度”的概念, 主要是针对地下水有无补给或补给快慢而言的, 以区别于积极参与现代水循环的浅层地下水。深层地下水通常埋藏于地下深部, 但深度不是区分深层地下水与浅层地下水的绝对标准。

深层地下水并不是一点补给都没有, 也不是绝对静止不动的。深层地下水的循环周期长, 其年龄一般在数千年以上, 河北平原深层地下水年龄分布为几千年到 5 万年<sup>[1~2]</sup>, 银川平原深层地下水年龄在 2 000~6 500a 之间<sup>[3]</sup>。相对于人类所利用的时间尺度而言, 深层地下水基本上可以看作是一种不可再生资源, 它的开采主要是消耗其储存量。

收稿日期: 2007-05-28; 修订日期: 2007-07-11

基金项目: 近岸海域的海底地下水排泄及其海洋生态环境效应研究(40672166)

作者简介: 刘花台(1967), 女, 副教授, 主要从事水文地质学及环境科学方面的研究和教学工作。

E-mail: lht@xmu.edu.cn

### 3 深层地下水运移机制的两种基本观点

国内外有关专家学者对区域大型沉积盆地中的深层地下水的运移机制存在不同的认识,根本的分歧在于是否存在水力连续性。

加拿大艾伯塔研究委员会的 József Tóth 教授是一位从事沉积盆地流体研究的资深学者。在 20 世纪 60 年代发表了有关沉积盆地流体运移机制方面的文章。他认为,区域水力连续性是岩体结构的表象特征。在特定时间尺度、可测的时段里,如果盆地内任意一点的压力变化能引起另一点的变化,那么就可以认为地下岩体在这一时间尺度上具有水力连续性<sup>[4]</sup>。

József Tóth 教授的观点也许代表了大多数从事水文地质工作的学者的观点。在有关地下水动力学教科书中,就是以水力连续性作为理论基础。越流概念的普遍使用就说明了这一点。

在水文地质实践中,水力连续性的观点被广泛使用。法国著名水文地质学家 P J Margat 教授 1992 年 11 月在开罗提交的《萨哈拉和萨赫勒大型盆地含水层开发与研究计划考察报告》中,指出:“尽管现时含水层恢复很微弱,但不是没有恢复。这些含水层的地下水不是静止的,只不过水的运移速度极其缓慢,且不受气候波动的影响。尽管地下水取自不可恢复的储量,但与像石油那样的静止储量还是不一样。”<sup>[5]</sup>

英国伯明翰大学资深教授 J W Lloyd 在中东和北非的大型沉积盆地地下水研究中做了大量工作。他在对广泛分布于阿拉伯半岛和非洲东北部大部地区并构成沙特阿拉伯和约旦国家主要含水层——寒武—奥陶砂岩含水层的研究中,通过对地质资料、勘探资料、含水层水力试验、同位素、水化学等综合信息的研究说明,砂岩含水层在其整个厚度上具有水力联系,现代补给很少,地下水运移速度极其缓慢,含水层目前属于疏干性开采<sup>[6]</sup>。

然而,有部分水文地质学者则认为,水力连续性的观点也许在浅层地下水系统中是适用的,但在地下深部,随着温度、压力、岩石压密作用的影响加大,不同含水层之间的相互联系几乎不存在,取而代之的是彼此隔离的地下水圈闭系统(或地下水圈闭体),相当于封存水,水力连续性的观点不再适用。

1995 年,以色列水文地质学家 Emanuel Mazor、Vladimir Fridman 及其合作者使用非水力连续性的观点来研究沉积盆地中地下水圈闭体的存在及其特征。他们通过对澳大利亚自流盆地中的深层地下水、以色列

内盖夫沙漠中的地下水以及以色列阿拉伯干裂谷中的地下水的研究,证明地下水圈闭体不仅存在于古老的沉积盆地之中,还存在于小规模较年轻的沉积层序之中<sup>[7~8]</sup>。

Emanuel Mazor 认为<sup>[9]</sup>,地下水圈闭体的应用或许可开辟一个新的经济应用领域,其潜在的经济价值可能比传统的承压含水层大。这是因为圈闭体中的地下水是一种非再生资源,它与污染源隔绝,可作为应急水源。另外,解压的圈闭体可作为废料处置场所,以及回灌水、油或气体的地下贮存空间。

尽管深层地下水的形成和运移机理存在不同的学术观点,但是,深层地下水不同于开放型的积极参与现代水循环的浅层地下水,在这一点上是存在共识的。深层地下水无论是在理论基础、评价方法方面,还是在开发利用、规划管理方面,都有别于浅层地下水。

### 4 深层地下水可利用性及可利用限度

深层地下水由于其恢复更新十分缓慢,补给周期很长,其开采主要是消耗储存量,几乎是用一点少一点,因而,在深层地下水可否利用方面,国内外学者一直存在意见分歧。

法国著名水文地质学家 P J Margat 教授和联合国教科文组织科学技术区域办公室负责阿拉伯国家事务的水资源专家 K F Saad, 1989 年在 Nature Resources 上发表文章《深部含水层:沙漠下面有水矿藏吗?》,该文曾被广泛转载和引用,他们对开发利用深层地下水持肯定态度,文中说“过度开采和禁止开采都是要避免的错误。……开采地下水储量通常是可行的,并且有时别无选择;不科学的开采或不懂得开采这两种情况都应加以批评。”“在一个缺乏水资源的国家里,非再生水资源的利用也许是刺激经济发展的一条有效途径……”。这种看法恐怕代表了绝大多数水文地质工作者的想法。

尽管在学术上尚存在着支持和反对开采深层地下水的争论,然而实际情况却是世界上许多干旱国家和地区正在开采或计划开采深层地下水,有的已经有几十年,甚至上百年的历史。澳大利亚大自流盆地,从 1880~1970 年,开采了  $350 \times 10^8 \text{ m}^3$  的地下水,其中 70% 为深层地下水;美国亚利桑那州,60 年中在该区含水层中开采了  $2250 \times 10^8 \text{ m}^3$  的地下水,其中 90% 为深层地下水。在我国,根据有关统计,从 1975~1995 年,河北平原深层地下水累计消耗储存量  $247.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,平均每年  $12.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[10]</sup>;杭嘉湖平原自 20 世

纪60年代以来累计开采深层地下水  $26 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在埃及,正计划增加努比亚深层地下水的开采量,从1975年的  $3.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  增加到2025年的  $24 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

看来,争论深层地下水是否可以开采已经没有必要,因为世界上那么多国家和地区不同程度地正在利用它,其可利用性是不言而喻的。关注的焦点应该放在如何合理地开采深层地下水上。

在开采条件下,深层地下水的开采量一般由四部分组成,即侧向补给量、越补给流量、含水砂层弹性释水量和粘性土层压密释水量。沧州地区深层地下水开采量中,含水砂层的弹性释水量占24.36%,粘性土层压密释水量占36.45%,浅层含水层越流量占36.19%,侧向补给量仅占3%<sup>[11]</sup>。由于含水砂层弹性释水量和粘性土压密释水量所占比例达到60.81%,所以开采深层地下水引起的地面沉降也是显著的。据国家地震局第一形变监测中心多期监测资料,沧州地区最大沉降点(沧州市津德57基)地面沉降总量达1131mm。天津平原深层地下水开采量中,浅层地下水越流补给量占38.2%,粘土性压密释水量占41.3%,弹性释水量占5.6%,侧向流入量占14.9%<sup>[12]</sup>。

以上分析说明,深层地下水并不是一点补给都没有。深层地下水开采量来源于两部分,一部分来源于可恢复的补给量(侧向补给量和越流补给量),例如,河北平原在现状开采条件下,保持现状水位不降低,深层地下水的平均补给量为  $14.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[10]</sup>; M A Habermehl 在研究澳大利亚大自流盆地时指出:“……水井的抽水造成了大范围的水位下降,水力梯度变陡,这便使地下水系统得到更多的补给。根据模型的估算,自从盆地的地下水被开发以来,地下水的补给量已从每天  $220 \times 10^4 \text{ m}^3$  增加到  $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。现在新的近似稳定的状态已经形成,总补给量和排泄量又重新趋于平衡……”<sup>[13]</sup>。另一部分来源于不可恢复的量,即储存量(含水砂层弹性释水量和粘性土层压密释水量)。

既然深层地下水存在少部分可恢复的补给量,那么其可利用性是毋庸置疑的,至少可恢复的补给量是可以开采的。如果其开采量超过可恢复的补给量,那么就要消耗储存量。所以,深层地下水的可利用限度取决于是否允许消耗及允许消耗多少储存量。

根据国内开采深层地下水的经验,允许消耗储存量主要取决于地面允许沉降量。从理论上讲开采地下水都会引起或多或少的地面沉降。地面沉降在一定程度内是允许的,不同类型的地区允许地面沉降量是不同的,一般是根据地面沉降所造成的危害程度(灾害)

来确定允许沉降量的。相对来说,大、中城市经济发达,人口密集,建筑众多,地面沉降的危害程度大,所以对地面沉降的年沉降速率和最大沉降量有严格的要求,深层地下水的开采量、开采层位和开采时间严格受年允许沉降量、最大允许沉降量的限制。

天津市从1959~1993年,形成了市区、塘沽区、汉沽区、大港区等沉降中心,沉降中心最大累计沉降量分别达到2.73,3.01,2.54,0.97m。1966~1985年,地下水开采量达到历史以来的最高峰,年均开采量  $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地面沉降也急速发展,年沉降量达到80~100mm。1985年之前,第二承压含水组是主要的开采层位,其开采量占总开采量的40%~50%,其沉降量也约占总沉降量的50%。1985年之后,采取控制地面沉降措施,年地面沉降量控制在15mm,同时调整开采层位,将400m以下的第四和第五承压含水组作为主要开采层位。而要使年地面沉降量控制在15mm,深层地下水的年开采量必须小于  $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[13]</sup>。

1965年,上海市地面沉降出现明显的灾害特征。1921~1998年,上海市中心城区地面平均累计沉降1870.2mm,年均沉降量约23.9mm。1956~1998年,上海市中心城区地面平均累计沉降959mm,年均沉降量约22.3mm。1994~1998年,上海市中心城区地面平均累计沉降105.5mm,年均沉降量约21.1mm。近年来,上海市将年地面沉降量控制在小于10mm/a,这样第二、三、四和五含水层地下水位分别不得低于-18,-20,-60,-60m。为了达到上述标准,全市深层地下水年允许开采量仅有  $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中第二、三、四、五承压含水层允许开采量分别为  $1699.7 \times 10^4$ ,  $1968.8 \times 10^4$ ,  $6657.5 \times 10^4$ ,  $2077.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

相反,在其他一些情况下,开采深层地下水可以不受地面允许沉降的限制,而主要限制于经济和技术能力。也就是说,在经济和技术条件允许的情况下,不受地面允许沉降限制的地区可以开采更多的储存量。这样的地区包括:(1)远离滨海的广大农村地区,农业灌溉开采深层地下水,即使地面沉降量比较大,多属于面上的均匀地面沉降,不会造成严重的危害;(2)在荒漠区,个别石油、采矿企业开采深层地下水,地面沉降也不会造成严重的危害;(3)开采前第四系地层的深层地下水,因为地层已经经历压密过程和成岩作用,开采条件下降量很有限。

## 5 深层地下水开发利用的战略抉择

由于深层地下水的开采主要是消耗储存量,所以

其开采的决策往往面临双重选择:一是必须抉择是否开采该深层地下水;二是必须选择其开采方式和开采方案。

尽管世界上许多干旱国家和地区正在开采或计划开采深层地下水,支持开采的呼声远高于禁采,但是,反对开采者并非完全没有道理。从长远看,深层地下水的耗竭不仅可能影响到子孙后代的用水“安全”,而且还有可能对生态环境造成不良后果<sup>[14]</sup>。这至少提醒人们在决定开采深层地下水时应避免只追求眼前利益的短视行为,而必须从可持续发展的战略高度审慎决策,并必须大力加强深层地下水的勘查评价及相关的水文地质工作,以达到科学规划部署和合理开发利用的目的。

正如法国著名水资源专家 J Margat 教授指出的那样:开采深层地下水既取决于经济政策又取决于储水层规模,过度开采和禁止开采都是应避免的错误,不科学地开采或不懂得如何开采都应受到抨击。也许这代表了当前国际上比较主流的看法和做法<sup>[15]</sup>。

一旦决定开采具体的深层地下水,面临的主要问题便是选择什么样的开采战略,是选择长期开采战略还是选择替代解决办法,换言之,是选择可持续发展还是选择经济增长优先。如果选择长期开采战略,那么就要制定详细的开采规划和方案。例如,要搞清楚每年可恢复的补给量,什么时候动用储存量,每年开采多少量,如何轮换开采层位等。如果选择替代解决办法,那么意味着在短期内要开采完所有的深层地下水允许开采量,所以预先选择好可替代的水源就显得尤其重要,如开辟新的水源地、跨地区调水、海水或咸水淡化、废水或污水再利用等。

## 6 建议

目前我国 20 多个省(市、区)都在不同程度地开采深层地下水,而且华北平原、苏锡常地区、杭嘉湖平原等地区深层地下水的累计开采量已很可观,开采深层地下水引发的环境地质问题(地面沉降)也较突出。所以,今后一段时期加强深层地下水的勘查和研究应属当务之急。

(1) 深层地下水的形成、运移方面国内外学者仍存在不同的观点,问题的关键是对深层地下水的调查、勘探、研究不全面、不深入。所以,要加大投入全方位多手段地开展深层地下水研究。

(2) 尽量开发利用当地的浅层地下水,深层地下水作为应急水源或后备水源。由于浅层地下水积极参

与现代水循环,补给、更新速度快,可开采量大,开采保证程度高,而且容易开发利用,所以任何地区如果需要开发利用地下水,那么最好首选开发利用浅层地下水。如果遇到枯水季节或枯水年份,浅层地下水的开采不能满足需要,或者即使是丰水年份浅层地下水的开采也不能满足需水要求,在这种万不得已的情况下可以考虑开采深层地下水,把深层地下水作为浅层地下水供不应求时的应急水源。

(3) 分阶段、分层位开采深层地下水,给予深层地下水足够恢复、更新的机会。深层地下水一般是由多层含水层组成的,彼此之间通过粘性土层发生水力联系,但联系通常不是很紧密,基本上每个承压含水层是一个相对独立的含水子系统,各自有自己的补给、径流、排泄途径。所以,开发利用深层地下水时,钻孔最好是分层止水,不提倡混合井。这样,在开采深层地下水时,就可以有目的、有计划地分层开采,使每个含水层都有机会进行恢复更新。同时,分层开采还便于有针对性地控制地面沉降。

由于深层地下水补给少,径流途径长,交替更新速度缓慢,所以,深层地下水的开采方式就应该有别于积极参与现代水循环的浅层地下水,应该给予深层地下水足够的休养时间,以便其在开采后能有足够的时间恢复、更新。

## 参考文献:

- [1] 张光辉,费宇红,陈宗宇,等.海河流域平原深层地下水补给特征及其可利用性[J].地质论评,2002,48(6):651-658.
- [2] 董悦安,何明,蒋崧生,等.河北平原第四系深层地下水<sup>36</sup>Cl同位素年龄的研究[J].地球科学,2002,27(1):105-109.
- [3] 苏小四,林学钰,董维红,等.银川平原深层地下水<sup>14</sup>C年龄校正[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(5):830-836.
- [4] József Tóth. Hydraulic continuity in large sedimentary basins[J]. Hydrogeology Journal, 1995, 3(4):4-16.
- [5] 地质矿产部地质环境管理司.国外干旱区地下水资源勘查开发利用现状与趋势[R].1995.
- [6] 地质矿产部地质环境管理司.国外干旱区地下水资源勘查评价方法现状与进展[R].1997.
- [7] Emanuel Mazar. Stagnant aquifer concept Part 1. Large scale artesian systems Great Artesian Basin, Australia [J]. Journal of Hydrology, 1995(173):219-240.
- [8] Vladimir Fridman, Emanuel Mazar, Alexander Becker, et al.. Stagnant aquifer concept Part 3. Stagnant

- miniaquifers in the stage of fomatation, Makhtesh Ramon, Israel[ J]. Journal of Hydrology, 1995( 173): 263- 282.
- [ 9 ] Emanuel Mazor, D Gilad, V Fridman. Stagnant aquifer concept Part 2. Small scale artesian systems Hazeva, Dead Sea Rift Valley, Israel[ J]. Journal of Hydrology, 1995( 173): 241- 261.
- [ 10 ] 段永侯, 肖国强. 河北平原地下水资源与可持续利用[ J]. 水文地质工程地质, 2003, 30( 1): 2- 7.
- [ 11 ] 郭永海, 沈照理. 从地面沉降论河北平原深层地下水资源属性及合理评价[ J]. 地球科学, 1995, 20( 4): 416- 420.
- [ 12 ] 王家兵, 李平. 天津平原地面沉降条件下的深层地下水资源组成[ J]. 水文地质工程地质, 2004, 31( 5): 35- 38.
- [ 13 ] 西安地质矿产研究所. 澳大利亚大自流盆地译文集[ C]. 2002.
- [ 14 ] 张人权. 地下水资源特性及其合理开发利用[ J]. 水文地质工程地质, 2003, 30( 6): 1- 5.
- [ 15 ] 张光辉, 王金哲. 海河流域中东部平原区深层地下水补给与释水机制探讨[ J]. 水文, 2002, 22( 3): 7- 11.

## An analysis of deep groundwater and its utilization

LIU Huar tai, GUO Zharr rong

( College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Fujian 361005, China)

**Abstract:** Deep groundwater is defined as an unusual groundwater with small amount of recharge, slow renewal speed, long recharge cycle as well as little impact by climate fluctuations. Deep groundwater formed in geological historic periods with special climate conditions. Because most of the deep groundwater is confined, it is also called deep confined water. The experts from home and abroad have different viewpoints about the deep groundwater occerring in large sediment basins, including the formation mechanism, transport characteristics and availability, and the focus of the disputes is the hydraulic continuity. However, most of the specialists accept the point of view of hydraulic continuity. While some of the experts argue against the exploitation of deep groundwater. The long history of hundreds of years of the utilization of deep groundwater proves that the deep groundwater is allowed to be exploited, and the deep groundwater becomes the primary source of water supply in some of the arid and semiarid regions or countries. Exploitation of deep groundwater is mainly extracting the reserves. The allowable exploitation limit of deep groundwater depends on the allowable consuming reserves, and limit indicators usually are environmentally geological disasters (e. g., land subsidence). The exploitation strategies for deep groundwater are either long term development or choosing substitutable resolutions. If choosing the former, it is necessary that the deep groundwater is exploited according to the stages and layers and enough time is needed to renew the water.

**Key words:** deep groundwater; transport mechanism; storage resource; allowable limitation

责任编辑: 汪美华

• 封面介绍 •

## 三峡库区地质灾害治理凸现巨大综合效应

从2001年至今, 国务院已先后安排100多亿元专用资金, 开展了三峡库区地质灾害的治理和监测预警。全部完成了受156m蓄水影响的县级以上城市、乡镇所在地的不稳定库岸防护工程, 切实保证了涉水城镇的库岸稳定。通过对243处崩塌滑坡实施治理工程, 使受威胁的港口、码头和道路得到了保护, 使位于长江库岸受175m蓄水淹没影响的崩塌滑坡隐患完全消除, 保护了长江航运的安全。通过实施搬迁避让和监测预警工程, 已成功预警滑坡险情236处。群测群防监测系统已成功预警了干将坪等72处滑坡, 使15213人的生命财产得到了有效保护。

目前, 三峡库区地质灾害治理项目进展顺利, 地质灾害发生频率得到了有效控制。三峡水库156m水位蓄水以来, 全库区没有发生重大地质灾害和因灾造成的重大人员伤亡事件。