

# 单孔多层地下水监测技术在地下水研究中的应用

张宏达 卞振举 Bill Black

(斯伦贝谢水务北京市朝阳区酒仙桥路14号 兆维华灯大厦 100015)

**摘要** 诸如地下水污染羽状体的时空演化、地下水资源管理、核废料地质贮存场地筛选、复杂岩石边坡的稳定性研究、采矿区长期监测,以及二氧化碳的地质埋藏等不同目的的水文地质研究,均要求取样点和监测点的分布尽可能多地覆盖研究区含水系统的各个单元,以便充分认识地下水的时空演化规律和区域水文地质背景。传统的方法是在不同监测井的特定深度安装检测管和入水口滤网,但这种方法的取样点数量通常为高额钻井费用所限制。最佳方案就是在每个井孔的多个深度位置上设置监测点(多层监测),以增加数据密度,因此能更详细地了解现场水文地质条件。本文介绍了一种新型的多层监测(Westbay System)技术,并讨论了该技术在研究复杂水文地质条件方面的应用。

**关键词** 地下水 多层监测 Westbay 系统 特征描述

## 一、导言

要查明垂向和水平方向上地下水水位或化学特征的变化规律,就要对研究区的平面上和垂向上全面布置监测点,使其尽可能多地覆盖含水系统的三维空间。也就是从多个不同的地点以及每个地点的不同深度获取地下水数据。常规的做法就是在很多深度不同的井孔中均安装一套单独的仪器(图1a),常常需要针对每一监测层布置一口井;或者在单一大口径井孔中,将仪器安装到不同的含水层中(图1b),这种方法通常需要井的口径较大,其监测层位也不能太多;Westbay多层监测井则在一口井中完美地实现了分层监测的目标,既不受井径的限制,也不受监测层数的限制(图1c)。

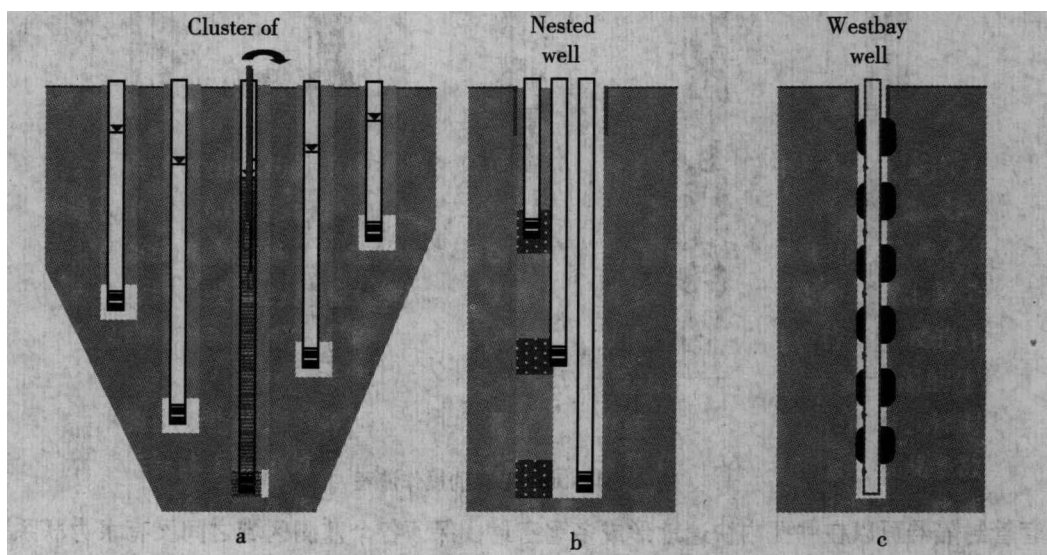


图1 地下水监测井的布置方法

Westbay 多层地下水监测的技术优势在于,不仅大大减少监测井数量,节约时间和经费,而且提高了监测区地下水的密度。实现了在一眼井中对含水层系统中的不连续层段进行流体压力测量、清洗监测层位、采集液体样品、并进行常规的水文地质试验,如抽水(或微水)试验和示踪试验,更加精细地描述水文地质条件,这是其他方法所不具备的。

此外,为了保证地下水监测数据的质量,常常需要对地下水监测设备进行定期测试和校正。

实际上,多数地下水监测装置都不能进行野外现场校正,而 Westbay 系统在设计中充分考虑到了现场校正 (Patton 和 Smith, 1986) 问题,可轻松解决数据质量问题。

## 二、Westbay 系统

Westbay 系统是一种组合式多层地下水监测装置,采用了带有阀口的密闭检查管。通过阀口可以进入井孔的不同深度,在部件实际长度与井深相符的情况下,组合式设计可以在井孔中进行多层段监测。此外,安装前的任何时刻,均可以增加或修改监测层段长度,而不会影响到其他层段,也不会显著地使装置复杂化。

Westbay 系统包括永久性安装在井孔中的套管、手提式压力测量组件、取样探头,以及一些专用工具。套管部件包括各种长度的套管节、常规接箍、两种不同的阀口(测量口和抽水口),以及用来封闭监测区之间环形空间的封隔器(Packer)。Westbay 系统已经在不同的地质和气候环境下用于各种井孔,包括从数米深到超过 1200m 的井孔。

Westbay 系统允许通过独立连通管或单井套管上的阀门,进入每一监测含水层,以详细了解该含水层的压力、水力传导率和水质在垂向上的变化。安装完成后可通过抽水阀口洗井,并可对每个含水层进行水文地质试验,同时无需重复洗井便可进行取样。阀门通常处于关闭状态,可以随时检测外部套管密封情况。

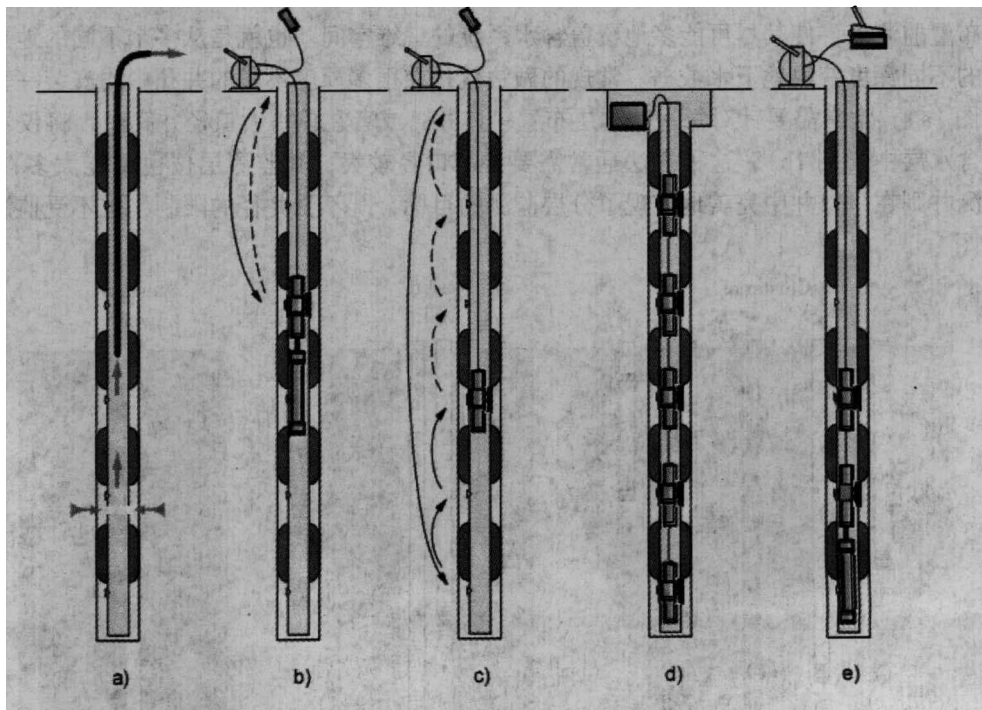


图2 Westbay 系统的操作流程

套管封隔器可以在井孔内快速地形成多重密封,保证各个监测区域之间没有水力联系。井下部件的组合式设计,意味着可以根据安装时现场的实际情况,对监测层段的数量和位置以及密封进行校正。购买设备时,无需知道监测层段的确切深度。

图2 总结说明了 Westbay 系统监测井中的常见操作。包括:

- a) 通过打开的抽取口进行洗井和测试;
- b) 通过测量口进行取样和测试;
- c) 使用单探头来绘制压力分布图;
- d) 使用压力探头和数据记录器组成的仪器串进行自动监测;

e) 使用压力探头和取样探头进行垂向干扰试井。

也可进行井间试验, 压力探头串进行垂向干扰试井, 现场化学分析、示踪试验等。

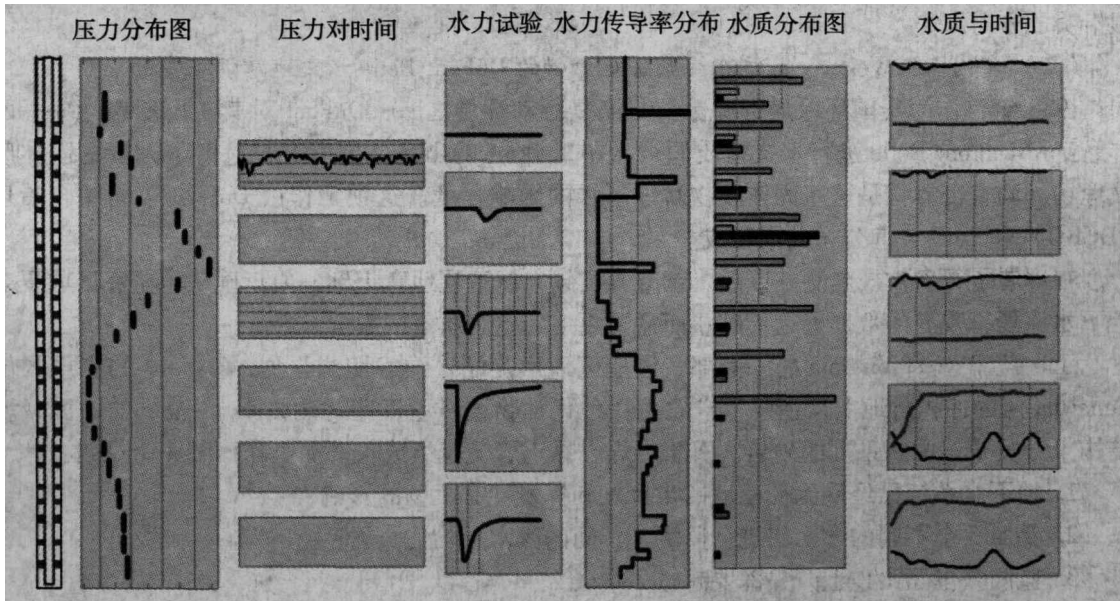


图3 图示一口 Westbay 井采集的数据类型

图3中展示的数据类型可间接由 Westbay 监测井获得。在一口装有 Westbay 系统的单井中进行多个含水层的监测, 进行水文地质试验、水样采集, 利用相应的软件对所取得的数据进行处理, 从而获得图中所示的数据类型, 同时又能保持高标准的质量保证, 这正是 Westbay 系统所独有的。

Westbay 系统配备的现场质量控制程序, 可以定期检验井中装置的安装质量, 并可校验水文地质试验、采样过程、设备运转是否正常。因此, 可以定期采集地下水数据和数据质量检验所需信息。此外, 多余的监测点可以提供重要的验证性数据, 这也是常规监测井无法做到的。

### 三、应用实例

#### (一) 实例一: Westbay 系统用于地下水污染调查

Fort Ord 是美国加利福尼亚中部 Monterey 海湾附近的一个废弃的空军基地, 初步调查发现, 这一地区的污染物四氯化碳已从浅层含水层向下迁移至下部的两层含水层中。由于 100 ~ 150m 深度的含水层岩性主要为粗颗粒的砂砾石, 且长期过量开采, 不仅严重干扰了深部流场, 而且导致了区域性的海水入侵, 使得研究区内的水文地质条件十分复杂, 想要搞清深部含水层的污染程度困难重重。尽管已有几十口常规监测井在运行, 但这些井取得的数据根本不能满足要求。

综合评估了多种监测技术, 研究人员最终认为组合式 Westbay 系统不仅是唯一一种单孔中没有数据容量限制的监测技术, 而且是能够对指定深度含水层监测的最经济有效的解决方案。Westbay 系统的安装分两个阶段, 第一阶段安装的 6 眼 100mm 口径 PVC 套管和多个滤水管的井; 第二阶段安装了 9 眼直接回填的声波钻探井。

通过对多层监测井数据的整理分析, 查明了研究区内含水层中四氯化碳的污染程度, 高质量地完成了这一项目。如果仅用常规监测井取得的数据, 无法对其污染程度进行更为详细的描述, 而且如果常规监测井为完整井, 取得的数据会错误地描述四氯化碳污染程度。在完成委托任务的同时, 还发现了这一地区海水入侵的最新情况, 也就是海水已从加利福尼亚的太平洋海岸向内陆推进了 2.4km。常规监测井数据得出的结论是这一地区地下水中氯离子的最高浓度为 500mg/L,

而其中一眼 Westbay 监测井从该地区主要供水含水层底部取得的水样数据则表明氯离子浓度高达 6000mg/L 以上。这一成果为该地区海水入侵研究提供了有力的证据,也为今后海水入侵长期监测指明了方向。

## (二) 实例二: Westbay 系统在西弗吉尼亚州的 DuPont Belle 水文地质调查中的应用

1988 年,作为美国环保局资源保护与恢复行动计划之一, DuPont 对其工厂所在地——西弗吉尼亚州 DuPont Belle 进行水文地质调查。在 2.4km<sup>2</sup> 的山区,历史上曾遗留了大量的固体废物填埋场,调查目的就是这些固体废物对地下水的影响程度。这项工作由 DuPont 公司综合治理部 (DCRG) 和 URS 咨询公司共同完成。

在部署了很多常规监测井以后,调查人员越来越清醒地意识到,要正确认识研究区内复杂的地下水流场,现有的数据远远不够,而需要更多、更高质量的数据。

工厂位于 West Virginia 的中南部,该地区地形陡峭,沟谷切割强烈,0.4km<sup>2</sup> 的主厂区位于 Kanawha 河的冲积阶地上,主要生产农用特种化学物质。主厂区北侧 2.4km<sup>2</sup> 范围的山区,地层结构十分复杂,由一系列的砂岩、页岩、煤、黏土岩交互组成。监测工作面临 4 个难题:

1. 地下水系统已经受到低浓度的半挥发和挥发性有机物的影响;
2. 要对 5 个不同的含水层进行监测,其间的隔水层均为页岩;
3. 监测井位于山顶上,井深要超过 280m;
4. 陡峭的地形和层状地层可能导致钻孔中短距离内压力发生剧烈变化。

由于在高山地区部署常规监测井群需要耗费大量的时间和高额的资金,迫使 DCRG 不得不考虑其他的解决办法。不仅要求监测技术经济有效,特殊的场地条件也要求监测系统必须具有很高的稳定性。DCRG 经过慎重考虑,最终决定采用 Westbay 多层监测系统。

1994 年,5 套 Westbay 系统被安装在 5 个基岩裸井中,井深均超过 268m,且每眼井都有超过 40 层以上的监测层段。由于从这 5 眼多层监测井中取得的水化学和压力数据不足以正确认识研究区的水文地质条件,所以于 2000 年又增加了 6 眼,2005 年增加了一眼多层监测井。

与其他监测技术相比,对于水文地质条件复杂的地区,安装 Westbay 系统不仅大大增多了含水层的监测层段,而且可以大幅度降低监测成本。

借助于 Westbay 监测井提供的高密度数据,查明了研究区含水系统中挥发性和半挥发性有机物的分布状况及其在水平和垂向上的影响范围,今后还将持续监测有机物在含水系统中的演化过程。同时,利用 Westbay 监测井的压力数据建立了研究区渗流场的三维水文地质概念模型,且已得到项目主管部门的认可。此外, DuPont 公司至今还在使用这些 Westbay 监测井监测这一地区地下水状况,他们也意识到 Westbay 系统的使用使得他们在钻井、野外维护、废物处理方面节约了大笔经费。

## 参考文献

- [1] Patton, F. D. and H. R. Smith. 1986. Design considerations and the quality of data from multiplelevel groundwater monitoring wells. Proc. ASTM Symp. on Field Methods for Groundwater Contamination Studies and Their Standardization. Cocoa Beach, FL.
- [2] Bouwer, H. and R. C. Rice. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, Vol. 12, June 1976.
- [3] Cooper, H. H., Jr., J. D. Bredehoeft, and S. S. Papadopoulos. Response of a finite - diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resources Research, Vol. 3, No. 1, First Quarter 1967.
- [4] Hvorslev, J. M. Time lag and soil permeability in groundwater observations. Bull. 36, U. S. Corps of Eng., Waterways Exp. Sta., Vicksburg, MI, 1951.