

探测地下水参数的同位素示踪仪及其应用

陈 建 生

(江苏省农业科学院原子能应用研究所)

摘 要

本文简述了同位素示踪技术测定地下水参数的基本原理和方法。应用碘-131 作为示踪剂,在一口井中探测地下水的流向、流速、垂向流,监测坝基渗漏,以及研究地下水的补给等。介绍了一种探测地下水参数的同位素示踪仪,其测量深度大于 300m, 流向测定误差小于 $\pm 3\%$, 流速测定范围为 0.01—100m/d。

传统的测定地下水流向流速的水文方法是钻三口或更多的井,通过测定这些井中所揭示的那一层含水层的水位来确定地下水的流向,通过抽水试验测定出各层含水层的渗透系数。应用同位素示踪技术和测量探头,可在一口井中同时测定出地下水的流向、渗透流速或垂向流。该法可以节约钻井数量,减小钻孔直径。这种方法自 Moser 和 Mairkofer 等人分别于 1957 年和 1963 年提出以来,随着物理学与核探测技术的发展,各种用于单井中测流向和流速的探头相继问世,受到各国水文物探工作者的重视。

我们采用热释光探测器 (TLD), 直读电离室 (IC) 和荧光照相定位方法,研制成功一种新型的探测地下水流向探头,采用 NaI 晶体探测器制成流速探头,组合成为探测地下水参数的同位素示踪仪。该仪器设计新颖,独创,造价低,测流向和定位均准确可靠,精度达到或优于西德 Drost (1983) 探头测量精度,可广泛地应用于水文、地质、坝基检漏、地下水开发、环境保护、农业、石油等领域。

一、同位素示踪法测定地下水参数原理

1. 单井示踪仪测流向原理

放射性示踪剂投入到井中后,迅速与井中的水混合。含水层中的地下水直接或通过滤管

进入井中,然后由井壁的另一侧流出,井中的放射性同位素与水流一起运动,也同时被带出,由井管的滤水孔及井周围填砾的孔隙进入含水层。同位素示踪剂在井中逐渐呈不对称分布,水流补给方向最低,沿水流运动方向浓度最高。我们选用能自发衰变产生 γ 射线的同位素作为示踪剂。将六组 TLD 和六支 IC 相间放置在测量探头的 12 个方位上,IC 和 TLD 相邻夹角为 30° ,探测器组所围的中心放置铅柱,用以屏蔽低能 γ 射线。探头外壳厚 1mm,用以屏蔽低能 γ 射线。测量结束后取出 IC 和 TLD,直接读出 IC 值,在 TL 仪上测量出 TLD 值,画出流向图,或通过计算重心和矢量方法求出流向,误差小于 $\pm 10^\circ$ 。

2. 单井稀释法测流速原理

在井中无垂向流的情况下,示踪剂浓度在有滤管的井水中的变化满足稀释定理,渗透流速 v_t 与井中浓度的变化满足如下关系式:

$$v_t = \frac{\pi(r_1^2 - r_0^2)}{2\alpha r_1} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (1)$$

式中 C_0 为初始浓度, C 为 t 时间的浓度, t 为测量时间, r_1 为井半径, r_0 为探头半径, α 为校正系数。作出的 $-\frac{\pi(r_1^2 - r_0^2)}{2\alpha r_1} \ln C$ 与 t 的关系曲线是一条直线,该直线的斜率即为渗透流速 v_t 。

我们还可以利用 TLD 或 IC 测定的累积

照射量值 ΣX_i 计算出地下水的渗透流速。公式推导如下:

假设投放至井中某一段同位素示踪剂是均匀分布的, 探测器各组位于这段水柱的中心位置, 于是水柱中各点内的同位素对探测器的照射量可用下面的微分方程表示:

$$dX = \frac{K_i dJ_i}{r^2} dt, \quad (2)$$

式中 K_i 为照射量常数, $dJ_i = Cdv$,

$$C = C_0 e^{-K_1 v_c t},$$

$$C_0 = \frac{J_{r0}}{2h\pi r_i^2}$$

在柱坐标下,

$$dv = 2\pi\rho d\rho dz,$$

忽略水的屏蔽和衰变常数的影响, 总照射量的微分表达式为

$$dX = \frac{K_i \cdot J_{r0} \cdot 2\pi\rho d\rho dz}{2h\pi r_i^2(\rho^2 + z^2)} e^{-K_1 v_c t} dt, \quad (3)$$

式中 J_{r0} 为投源活度 (mCi), K_1 为稀释因子, h 为井投水柱半高, v_c 为井中流速。对(3)式积分得

$$X = \frac{KJ_{r0}}{v_c h r_i^2} \left[h \ln \frac{r_i^2 + h^2}{h^2} + 2r_i \operatorname{tg}^{-1} \frac{h}{r_i} \right] (1 - e^{-K_1 v_c t}), \quad (4)$$

当 $v_c t$ 很大时, $e^{-K_1 v_c t} \rightarrow 0$, 又 $v_i = v_c / \alpha$, v_i 的计算公式可简化为

$$v_i = \frac{KJ_{r0}}{hr_i^2 \alpha \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i} \left[h \ln \frac{r_i^2 + h^2}{h^2} + 2r_i \operatorname{tg}^{-1} \frac{h}{r_i} \right], \quad (5)$$

式中 K 为待定系数, n 为探测器数目。

由于计算中采用了许多近似条件, 所以用(5)式计算的流速仅是半定量的。

3. 垂向流速的测定

垂直水流的测量对于划分渗透区域与地层的性质有重要意义。在大多数情况下, 垂直水流的出现表明存在着两个或更多的渗透层有独立的补给, 并且渗透层间被不透层隔开。这些

垂直水流向上或向下, 每年中, 它们的垂向流速分布及其随时间的变化关系可以为人们了解含水层的特性提供有用的资料。测量垂向流速随深度的变化提供了渗透带的位置和地下水在渗透带流进或流出的情况。在与非渗透层对应的井段里, 水流速率不随深度而变化。

垂向流速的测定采用峰-峰法或累积法^[1,2], 通过在井中两点探测示踪峰经过两点的时间, 可求出垂向流速, 如在井中多点测量示踪峰, 可得到垂向流速分布图。将两只测速探头串在一起(中间间距 1—2m)进行测量, 由于探头在井中不运动, 可使测量更加准确可靠。

根据通过长度为 Δh 的滤水管流入和流出的流量 ΔQ 可以计算出地下水渗透速度 v_i ^[1]。

$$v_i = \frac{\Delta Q}{\Delta h \cdot b}, \quad (6)$$

式中 b 为含水层水源水流的宽度, 当垂向流速 $v_v \gg v_i$ 时, b 取 $2\pi r_i$ 。

二、同位素示踪仪简介

地下水示踪仪是由探头、投源器、地面仪表、电缆、钢丝绳、暗箱等几部分组成。探头的井下部分包括投源器、测流向装置、测流速装置等。测流向装置和测流速装置合称流速流向探头, 如图 1 所示。TLD 和 IC 探测器用于测流向, 安置在铅柱的外槽中。三张 3# 放大相纸放置在定位有机玻璃盒的表面。探头外安置了扶正器, 它是由四片弹簧构成, 有 $\phi 100\text{mm}$ 和 $\phi 170\text{mm}$ 两种规格, 它具有收缩性, 能保证探头在井中始终处在井的中心位置, 还可防止探头在上下过程中卡在井中。

1. TLD 探测器

热释光磷光体受到辐射照射时会吸收一部分能量, 并可在常温下长期储藏起来。当加热时, 这部分能量就以发光形式释放出来, 经过光电转换, 将电信号记录下来。在这里, 光子产额与元件所受照射量成正比, 因此可以通过测量光子数来探测各种射线。

我们选用的 TLD 探测器是由特殊的 $\phi 2 \times$

12mm 玻璃管内装入 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 磷光体组成的，它的灵敏度高，分散性小(精选小于3%)，测量照射量的范围宽(为 0.1mR—300R)，衰退小，每月在常温下衰退小于 2%，受温度和湿度的影响小。反复使用 100 次灵敏度无变化。由于 TLD 探测器测量下限小于 0.1mR，故可用于特殊场合，如流速很慢或很快时。TLD 探测器的测量灵敏度高于 IC 探测器，示踪同位素用量少 ($< 1\text{mCi}$)。其主要缺点是要采用 TL 测试仪读数，并要退火处理。

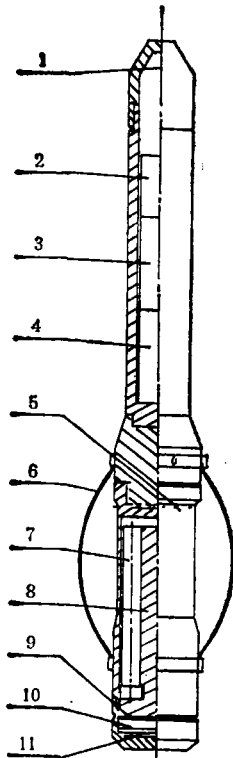


图 1 地下水流速流向探头

- 1—电缆；2—前置放大器；3—光电倍增管
4—NaI 晶体；5—测向探头；6—扶正器；
7—TLD 探测器或 IC 探测器；8—铅柱；
9—相纸；10—涂有荧光的磁针；11—装满有机液体的定位盒

2. IC 探测器

IC 探测器结构如图 2 所示。它是由石英丝验电器，电离室，物镜及标尺，目镜，充电装置等组成。

IC 探测器工作前要使用充电器给 IC 探测器充至一定电压。作为内电极的验电器，由于

物理

同性电荷斥力，指示线相对于支撑架而张开一定的角度，张开角度的大小正比于充电电位的大小。通过物镜、目镜组成的光学显微镜，从标尺上观察时，指示线应刚好在零点位置，且漏电

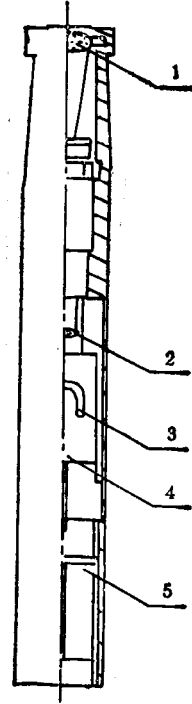


图 2 IC 探测器结构

- 1—目镜；2—物镜与标尺；3—石英丝验电器；4—电离室；5—充电装置

微弱。当有 γ 射线及 X 射线照射时，电离室内的空气将被电离成正负离子对，由于电离室壁和验电器之间的电场作用，离子向两极运动，中和了验电器的电荷，使验电器电位降低，此时指示线向满刻度方向移动。由于形成的离子数多少与所受照射量成正比，因此可以从验电器的读数的变化确定所受照射量的大小。IC 探测器可在试验现场测出流向值。

3. 定位装置

采用荧光照相定位法进行定位。定位盒安装在探头底部，由透明有机玻璃盒制成。盒内装有一个磁针，在磁针北极端和定位盒面参考点上涂有荧光素。盒内充满有机液体，可以克服磁针旋转时的重力和摩擦力，提高定位精度。在井斜不超过 10° 的情况下，定位基本无偏差。测量前，将相纸紧贴在有机玻璃盒面上，荧光对相

纸长时间曝光(一小时以上)而产生潜象。测量完后,及时从探头中取出相纸,经显影、定影处理后,探头在井中的方位便可定出。将通过 TLD 和 IC 探测器测出的流向标在定位相纸上,从而可以准确地定出地下水的实际流向。

4. 地面测流速仪表

地面测速仪表可用于记录井下放射性同位素强度随时间的变化。NaI 晶体探头将接收到的 γ 射线经光电倍增管与前置放大器后,由电缆将信号传递给地面接收仪表。仪表具有的功能包括瞬时扫描计数显示、自动定标、液晶显示。扫描记数时间为 1s,显示 1s,连续进行。扫描过程中蜂鸣器发出与记数率成正比的频率信号,使查找峰值极为方便。

三、应用效果

放射性同位素示踪技术和我们研制的示踪仪已在国内十多个工程项目中得到应用,取得了满意的结果。主要的应用领域有:

1. 水库坝基测渗漏

我国有水库 8 万余座,其中库容在 1 亿立方米以上的大型水库有 200 余座。这些水库在我国农业生产与国民经济发展中起着重要作用。在这些大型水库中又有大约几十座水库的大坝存在着严重的渗漏问题,因而不能按设计标准发挥其效益。要“诊断”这些病险水库的病因,从而对症下药,解决问题就必须测量大坝渗漏的流速与流向。

南京水利科学研究院同位素应用组从事水文和水利方面的放射性示踪技术研究多年,主要应用于大型病险水库大坝渗漏观测。

(1) 羊毛湾水库位于陕西省乾县,是我国重点病险水库之一。该水库大坝座落在石灰岩地区,坝基渗漏严重,右坝肩曾发生管涌破坏,至今还存在渗透破坏的隐患。在该坝区,地下水埋藏很深,最深可达 100 余米。利用示踪仪测定了坝区 10 个灰岩孔内地下水流向。由此取得了坝区地下水流场的完整实测资料。

(2) 南川水库是一座大型水库,位于湖北

省咸宁市南形。该水库大坝座落在一组平行坝轴线的断裂带上,岩石破碎,岩溶发育,左右坝肩和大坝坝基都存在着严重的渗漏问题。特别担心的是两岸坝肩绕渗会向大坝方向集中,从而威胁大坝安全。应用示踪仪测定了左坝肩部位若干钻孔内地下水流向,取得了与多孔示踪法测量结果相符合的资料,从而明确判定左坝肩绕坝渗漏不会向大坝集中。以上结论和判断对大坝整险加固设计有重要参考价值。

(3) 海子水库是北京市的第三大水库,位于北京东郊。该水库自建立以来,由于地质构造和施工质量等问题,南付坝出现严重渗漏。由于该坝水文地质条件复杂,仅采用物探方法探测地下水活动情况困难,例如,当出现地段地层倾角基本垂直时,地震物探法无法进行勘测。通过对坝基的普查,证实有一条渗透带存在。由于这条主渗带是绕过坝肩由山区穿过的,虽渗漏较为严重,在库区外低洼处形成了泉,但对大坝的威胁并不十分严重。此结果也与高精度测温、电法等结果相吻合。

(4) 大寨水库位于云南省龙武区龙武镇西南,该坝建于河谷断裂的砂页岩体之上,填坝土料为风化破碎的砂页岩杂粘土,土质不均,碾压质量差。由于坝基清基不彻底,河床的淤泥流砂,腐植树不均未清除,因此渗漏严重,总渗漏量达 50l/s,危及大坝安全及下游居民的生命财产。应用示踪仪在坝基上测出渗漏流向,然后在下方进行灌浆封堵,经封堵处理后,漏水全部断流。

2. 在岩溶地区应用

岩溶地区地下水分布及活动复杂,岩溶地区地下水探测,水资源评价是水文物探工作者感到十分困难的一项工作,研究费用极高。应用同位素示踪方法及示踪仪在基岩孔中测出地下水的流向、流速、垂向流速和分布情况,这是传统的水文物探采用的抽水试验方法所不能做到的。现已在四川广元,山东兖州、枣庄,江苏南京,河北等地的基岩孔中进行了实测,下面以山东枣庄地下水试验场为例说明其应用。

枣庄试验区建立在奥陶纪石灰岩地区,约

百余平方公里,整个试验区呈东西宽、南北窄的矩形,四个边界为高地或环山,中南部低洼,南部有地表径流流出试验场。试验区中部有火成岩墙大构造,将试验区划分为东西两区。试验区主要含水层为 2.5—10m, 30—75m, 130—160m 不等,含水层裂隙溶洞发育。我们在雨季和旱季分三次对试验区的 20 多口井进行了流速、流向和垂向流的测量,分别测出了浅层与深层地下水的运动方向,测出了流速和不同季节里地下水的运动规律。发现雨季时,大部分井中有 10—20m/d 的垂向流,由浅层向深层补;旱季时,水位下降明显,试验区边缘地带可下降 20 多米,并且流速很慢。通过试验初步查清,试验区内浅层地下水流向试验区内,汇集到中部,由南边流出试验区,基本与地表径流方向一致。深层地下水的流向实测表明,火成岩墙构造在这里是阻水构造,雨季时,西边界的深层地下水流向试验区外,旱季时流向试验区内,表明西边界分水岭下的深层水是连通的。测量结果还表明,中南部也是深层水流出试验区的主要通道。

3. 地下水弥散系数的测定 在污染治理研究中,常常要评价污染源对地下水已经造成的和将要造成的危害,而要评价环境,进行野外弥散试验是必要的。实验表明,当液体流动时,示踪剂逐步散布,而在水流区域中不断扩大,并超出单独根据平均地下水流速所预计的区域范围之外。这种散布现象称为多孔介质的水动力弥散,它是一种不稳定和不可逆的过程。

要预测地下水水质的污染,必须知道弥散系数 D 与弥散度 α_L 。地下水弥散系数可用野外实验求得。方法是先打一口投源井,再在主流向方向上距投放井不远处钻二至三口接受井,将同位素示踪剂 I-131 在投源井下,应用示踪仪在相邻夹角不大于 30° 的接受井中测量,测出计数率 N 随时间 t 的弥散曲线,通过求解弥散方程,可得到弥散系数 D 与弥散度 α_L 的计算公式。我们用 I-131 模拟 Cl^- , Na^+ 的弥散,测量出 I-131 弥散后的时空曲线,从而得到海河某段纵向弥散系数 $D_x = 3.45m^2/d$,

弥散度 $\alpha_L = 0.251m$ 。在对山西太原汾河河谷进行多次弥散试验后,得到 $D_x = 7.5 \times 10^{-2}m^2/d$, $D_y = 2.1 \times 10^{-3}m^2/d$ 。这些参数对于海水入侵海河后对两岸环境的影响评价及矿区污水对太原古交地下水的污染评价有着重要意义,并且是评价的主要依据。采用同位素示踪技术及示踪仪进行现场弥散试验,可以在不取样的情况下现场测定这些参数,比取样测定法更准确、可靠,节约试验费用。

4. 黄河测渗试验 由于泥沙长期沉积,黄河下游一带河床已高出地表面,成为典型的地上河。黄河水位高于地下水位,河水不断向两岸渗透。计算河道两岸的渗透量,必须测定地下水流场。应用放射性同位素示踪方法完成河床西侧一排断面井的测量,准确地掌握了地下水流场的分布情况和大坝的渗透性,并为确保堤坝的安全,提出了相应的措施。

1987 年 6 月初,我们在黄河的枯水期对山东省东阿县艾山一段黄河西岸的一个断面上进行了同位素示踪和稀释测渗试验。艾山段黄河流向基本朝正北方向,该段河床为第四纪覆盖层,岩性特征为粘土、亚粘土、亚砂土、粉砂和细砂等五种岩层互层,在 30m 左右见到第三纪覆盖层,40m 左右为基岩(石灰岩)。通过一个断面八口井的测量,计算出该地段枯水期的黄河向西岸的渗透流量是 $1363.5m^3/d$ (每 1000m)。在雨季到来时,河的水位上升,渗透流量也相应增加。根据多口井中的同位素试验结果,该地段尚不存在危及坝基安全的强渗流带。

同位素技术作为物理学的分支应用在地下水方面,受到了水文、物探专家们的高度重视。应用微量的放射性示踪剂测定地下水的参数是近年发展起来的一项新技术,由于这项技术的应用,使获得的水文参数更加直观和可靠。

由于测井的示踪同位素的危险性也很小,每次测量同位素碘-131 的用量一般为 0.1—2mCi,选用的同位素具有短的半衰期和低的毒性因子等特点,不会对操作人员产生有害的辐射危害,也不会对环境造成污染。

(下转第 220 页)