利用 γ 射线测定黄河泥沙含量

黄河水利委员会
水利科学研究所 新技术应用研究组

黄河是我国第二条大河。它从青藏高原的巴颜喀拉山奔腾而下一泻四千八百多公里,注入渤海湾。由于黄河的中上游流经水土流失严重的黄土高原,每年给下游带来十六亿吨的泥沙使河床淤积高于地面,解放前年年泛滥成灾,给黄河流域的人民带来很大危害。

为了响应毛主席提出的“要把黄河的事情办好”的伟大号召,变害河为利河,及时、准确地测报黄河的泥沙含量,对防洪、治沙、根治黄河有着十分重要的意义。过去测量黄河的含沙量是用取样称重法,这种方法不仅测量的结果误差大,而且还要花费大量的人力,在急流取样操作中,有时还会造成落水死亡的重大事故,测量结果往往受取样的限制,误差较大。在采用光电测沙、电导测沙、超声测沙等方法时,由于河水沙大、流急和泥沙颗粒级配随时变化等因素的影响,也没有得到满意的结果。后来,在反复实践过程中开始利用 γ 射线测定含沙量的研究,于1971年6月试制成功两台数字型晶体管 $\gamma-\gamma$ 河水含沙量计。经过抗震、高气温、大湿度等一系列基本性能的试验,1971年汛期在黄河某断面进行了三个月的连续生产性试用,测到了该断面历史上最大含沙量记录786公斤/立方米,最小测到10公斤/立方米。用 $\gamma-\gamma$ 含沙量计测得的500多次测点数据与取样法所得数据比较,其对比均方根偏差为 $\pm 6\%$ 左右,仪器的测量范围、精度、稳定性、可靠性等方面均能满足国家水文测验规范的规定,而且还具有直接和连续测量、计算简便和及时

测报沙峰的优点。

现将利用 γ 射线测定黄河泥沙含量的理论依据、测量仪器和方法、野外实验结果简要介绍如下。

一、理论依据

$\gamma-\gamma$ 法测定河水含沙量的原理与 $\gamma-\gamma$ 法测定淤泥密度的原理相同。实际上,含沙的河水跟含水的淤泥本质上都是水—沙二元体系。利用中等能量 γ 射线源散射法测定河水含沙量的理论依据,可概括如下几点:

1. 泥沙的化学成分主要由轻质元素组成,它不随着地区的不同而改变,与中等能量 γ 射线相互作用,主要为康-吴效应。即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum P_i Z_i / \sum P_i A_i \simeq \frac{1}{2}, \\ \mu \gg \tau \simeq x \simeq 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\mu \gg \tau \simeq x \simeq 0, \quad (2)$$

式中, P_i 为某组分在单位体积内部分含量, Z_i 为某组分的等效原子序数, A_i 为某组分的等效原子质量数, μ 、 τ 和 x 分别为康-吴效应、光电效应和电子对生成所决定的吸收系数。

2. 泥沙—水二元体系的等效原子序数与原子质量数的比 Z_w/A_w 随含沙量大小而不同,因为水的 $Z_B/A_B = 0.56$,沙的 $Z_S/A_S = 0.50$;但 Z_w/A_w 仍为样品密度 ρ 的单值函数:

$$Z_w/A_w = \frac{1}{\rho_S - \rho_B} \left(\rho_S \frac{Z_S}{A_S} - \rho_B \frac{Z_B}{A_B} \right) - \frac{\rho_S \rho_B}{\rho(\rho_S - \rho_B)} \left(\frac{Z_S}{A_S} - \frac{Z_B}{A_B} \right). \quad (3)$$

本文1972年10月6日收到。

也就是说, γ 射线在含沙的河水介质中的散射系数 μ_K 仍为介质密度 ρ 的单值函数:

$$\mu_K = \sigma(b\rho - b') \quad (4)$$

$$b = \frac{\rho_s N}{\rho_s - \rho_B} \left(\frac{Z_s}{A_s} - \frac{Z_B}{A_B} \right) + \frac{NZ_B}{A_B};$$

$$b' = \frac{\rho_s N}{\rho_s - \rho_B} \left(\frac{Z_s}{A_s} - \frac{Z_B}{A_B} \right) \rho_B.$$

式中, N 为阿伏伽德罗常数, Z_s 、 Z_B 分别为泥沙和水的等效原子序数, A_s 、 A_B 分别为泥沙和水的等效原子质量数, σ 为散射截面, ρ_s 、 ρ_B 分别为泥沙和水的密度。

3. 把泥沙的几何形状看作对测量没有影响(这是我们采用 $Cs^{137}\gamma$ 源的主要依据)。即:

$$dI/dD \approx 0, \quad (5)$$

式中, I 为散射强度, D 为泥沙的几何因素, 一般代表泥沙颗粒大小。

这里必须指出(5)式只有在中等能量的 γ 射线作用下成立*。根据文献记载采用低能源粒径影响显著^[1]。

4. 饱和度等于 1 的水—泥沙体系是具有良好加和性的二元体系。含沙量 W (公斤/立方米) 与介质密度 ρ (克/立方厘米) 有以下关系式:

$$W = 1000 \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_B} (\rho - \rho_B), \quad (6)$$

式中, ρ_s 为泥沙颗粒本身的密度, 一般为 2.65 克/立方厘米, ρ_B 为水的密度。

5. 仪器的测量探头由于做成比较好的流线形, 测量时对流速流线的干扰很小, 可以看作对测定含沙量是没有影响的。

6. 数学表示式。综合上述对散射强度 I 与含沙河水介质密度 ρ 的关系, 给出以下表示式:

$$\begin{cases} I = F(\phi\rho^h - \phi'\rho^{h-1})e^{-\lambda'\phi\rho}, \\ F = K'e^{\lambda'\phi'}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, K' 为与放射源强度、源到探测器的距离有关的仪器常数, e 为自然对数底, λ' 为与放射源初始能量、源到探测器的距离有关的常数, h 为经验常数,

$$\phi = \frac{1}{\rho_s - \rho_B} \left(\rho_s \frac{Z_s}{A_s} - \rho_B \frac{Z_B}{A_B} \right),$$

$$\phi' = \frac{\rho_s \rho_B}{(\rho_s - \rho_B)} \left(\frac{Z_s}{A_s} - \frac{Z_B}{A_B} \right).$$

对于 Z/A 为常数的介质, 如对两组分 $Z_s/A_s = Z_B/A_B$ 的介质时, $\phi' = 0$, 则 I 与 ρ 的关系式同前人发表的关系式:

$$I = K\rho^h e^{-\lambda\rho}, \quad (8)$$

$$\text{式中, } K = K' \frac{Z_w}{A_w}, \quad \lambda = \lambda' \frac{Z_w}{A_w}.$$

含沙量 W 与介质密度 ρ 的关系式已由(6)式表出。这里必须指出, 水的密度 ρ_B 与温度有关, 并影响着介质等效原子序数与等效原子质量数的比值, 故当温度变化较大时, 需要进行温度校正。

二、测量仪器和方法

仪器是由晶体管自动定标器和测量探头两部分组成。测量探头外壳为具有流线形的铅鱼, 铅鱼头部贮存放射源, 尾部装置探测器, 以导线将探测器与自动定标器联接。与同类型的仪器比较具有以下特点:

1. 晶体管自动定标器的时标采用音义振荡器, 其长时间稳定性为 5×10^{-5} 秒/8 小时, 配合晶体管猝灭电路和 G. M. 计数管, 每 50 秒的累计数为 3×10^5 次时, 统计误差小于 $\pm 0.2\%$ 。

2. 测量简便迅速。在野外每测一次的时间为 50 秒。

3. 测量范围大, 约从 10 公斤/立方米到 800 公斤/立方米。

4. 探头采用带晶体管猝灭电路的 G. M. 计数管, 该电路可将一般 G. M. 计数管死时间减小到 7 微秒, 可提高计数速率和延长计数管寿命十倍以上。从而提高了仪器的稳定性和精度。这种带晶体管猝灭电路的探测器, 具有成本低、简便、耐潮性能好、易于掌

* 我们曾采用平均粒径在 0.5 毫米和 0.05 毫米的两种沙样作过验证, 没有明显影响。

图 1
—— $\gamma - \gamma$ 法观测； ×····· 横式采样观测

握和温度系数小的优点。

5. 放射源用 50 毫克镭当量的 Cs^{137} ，测量时源从铅鱼头部贮存器中由微型电机控制移到铅鱼腹部窗口，保持源到探测器的距离为 45 厘米，进出重复误差不超过 0.1 毫米，可远距离操作，保管运输比较安全。

6. 为了消除放射源的衰减、温度变化、计数管老化等因素的影响，采用准相对测量方法，即在水流平稳的条件下用准确取样对该仪器校正一次。这比目前国外介绍的相对测量方法要简便得很多。

三、野外实验结果

1. 通过黄河汛期三个月的连续测验得到某断面完整的含沙量变化过程曲线（部分曲线见图 1）。其中记录了两次超过该断面历史上最高记录的沙峰，并初步揭示了水峰与

沙峰出现的时间关系。

2. 测量 18 条含沙量垂线分布曲线和 10 次横断面输沙率。所得结果表明 $\gamma - \gamma$ 法比取样法更符合泥沙分布的规律，反映出 $\gamma - \gamma$ 法具有较高的代表性和可靠性。

3. 测量精度，从 10 公斤/立方米到 800 公斤/立方米，与取样法对比的均方根偏差为 $\pm 6\%$ ，这里包括了取样法本身的误差，误差比例占有多少，尚待进一步研究。

4. 实践证明，由于 $\gamma - \gamma$ 法能够迅速测定河水含沙量，及时提供沙量情报，这就为在黄河下游不失时机地开闸引黄放淤创造了有利条件，更好地为生产服务。

参 考 文 献

- [1] Car-Brion, K. G., 1968 *British Patent*, 1, 127, 344.