

# 水文与水污染

高维真

(华东水利学院水文系)

研究环境科学复杂的水污染问题,必然要遇到下列两个客观因素:一是工业、农业及生活污水的排放;一是承纳排放污水的水体本身。

污水排入水体、污水中的污染物质和水体的水量进行混合、稀释、扩散、输送,伴随着的是发生自净过程。因此,水体的特性与规律的研究,尤其是污水进入水体后,与水体活动规律作为统一体来研究,就显得特别重要。这就提出了水文科学和环境科学相互渗透的新课题,即环境水文学的课题。

在研究水污染的工作过程中,无论是进行水质监测(包括监测站网的布设)、水质调查、水质评价、水质预测预报、水质规划与管理等都离不开水体水文的研究。水污染基本理论,如扩散理论、自净规律,预报模型及规划方案的研究,同样都是和水文规律密切相关,所以水文是水污染研究的重要基础。

## (一)

以河流这一水体为例,在研究河流水质污染时,密切有关的是河道特征和水文特征这两方面。

(1) 河道特征主要指:河长、河道地形、河宽、水深、横断面、比降、弯曲系数、河底冲刷与淤积、河系分布特征等。

在研究经常性污水排放(如污染源调查、布设水质监测站网等)和事故性污染,以及计算水污染自净过程,作水质预测预报时,都需要对现场河段进行详细调查,并在大比例尺(或自行野外草测)地图上标出(污染源),量

算河段长度(公里),河流比降(‰表示)及其沿程的转折变化,河底冲淤情况等。

工厂排污入河,污水与河水达到完全混和时的断面距离,有时需要调查与计算。而污水混和是与水流的紊动性有关的,这就和河道特征如横断面(水深、河宽),河流弯曲系数  $K_n = \frac{L}{l}$ , ( $l$ ——河流两端间直线长度; $L$ ——河流实际长度,均以公里计)和水面比降有密切关系。一般在弯曲系数大、比降陡、流速快情况下,完全混和的河段距离就短。

如果河道既深且宽,污水排入河流后,在很长的距离内都不会完全混和时,则在靠岸边形成一条污染带,水污染成为污染带的研究,属于二元或三元问题,它比上述完全混和后一元问题的研究要复杂得多。

河系分布特征(当然还有污染源分布状况)和几何形态,是关系到水质监测站网的布设、水系水质预测预报、水系水质规划,以至于整个水系的污染控制与管理。在相同污染条件下,支流汇入多和流量增加的河流,稀释、扩散作用就加强。

(2) 水文特征主要指:河道中污水向下游流去的汇流时间、流速、流量、水温等。这些都是研究河水污染的稀释、扩散、自净的重要因素,也是进行水质预测预报与水质规划的重要参数。

大家知道,污染物质(排污水)进入河流后,其运动变化特点是河中水流及水中污染物的物理、化学和生化等运动演化综合作用的结果。

水流的运动变化(不稳定流条件)可用圣·维南方程组(连续方程,运动方程)来表达;而水中污染物的运动演化可建立水质方程。也就是说,研究水污染的运动变化有下列三个方程(只考虑顺流向 $x$ 的变化并且旁侧无入流时的情况):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{连续方程})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} = g(i - J) \quad (\text{运动方程})$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + K_1 C = 0 \quad (\text{水质方程})^*$$

式中,  $Q$  为流量;  $u$  为流速;  $C$  为污染浓度;  $K_1$  为自净系数;  $t$  为时间;  $A$  为横断面积;  $H$  为水深;  $g$  为重力加速度;  $i$  为底坡;  $J$  为水力坡度。

由方程可见,水文特征主要是流量( $Q$ )、流速( $u$ )。而在确定自净系数  $K_1$  时,还包括了推求河道两断面间的河段汇流时间,其余则都属于上述的河道特征。

## (二)

河道受污的水流汇流时间和流量,是计算自净过程持续时间和自净系数所必须的,因而对研究污水稀释,水污染程度及预测预报都很重要。

河段汇流时间  $\Delta t = \frac{L}{u}$  ( $L$ ——汇流的河段长,  $u$ ——河段平均流速)的推求,及其使用于确定自净系数( $k_1$ , 这里  $K_1 = 2.31k_1$ ), 要注意河流水文状况(如流量是稳定或不稳定)和污水排放情况(浓度是否稳定)等。

当河段流量不变, 污染物从上游均匀且稳定地流进河段上断面时, 如测得上、下断面  $A$ 、 $B$  两点的污染物浓度分别为  $C_A$ 、 $C_B$ , 且推得上断面汇流到下断面的时间为  $\Delta t$ , 则:

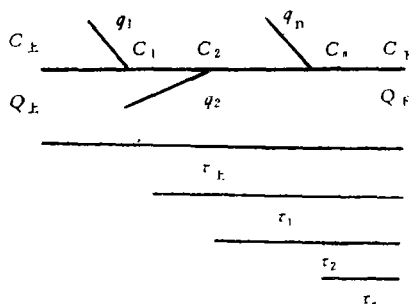
$$k_1 = \frac{1}{\Delta t} \lg \frac{C_A}{C_B}$$

如果污染物流进河段是不稳定的, 则要

考虑  $C_A$  的水团, 汇流到下断面  $B$  点的汇流时间, 并测得  $C_B$ 。或者测得上、下断面平均汇流时间  $\Delta t$ , 同时连续测得上、下断面的流量(不稳定有变化时)和相应的污染浓度( $C$ ), 则:

$$\int_{\Delta t}^{t+\Delta t} Q_T C_T dt = \int_0^t Q_{\perp} C_{\perp} dt \times 10^{-k_1 \Delta t}$$

如果有支流或地下水流入, 使流量发生变化, 则必须考虑由此而产生的稀释作用, 如图所示, 在上、下断面之间, 有若干支流汇入,



设各支流的流量为  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , 在汇入点的污染物质浓度为  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , 上、下断面流量分别为  $Q_{\perp}, Q_T$ , 水流从上断面及汇入点到达下断面的汇流时间分别为  $\tau_{\perp}, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , 并假设河段间的自净系数  $k_1$  不变, 则得:

$$Q_T C_T = Q_{\perp} C_{\perp} 10^{-k_1 \tau_{\perp}} + q_1 C_1 10^{-k_1 \tau_1} + q_2 C_2 10^{-k_1 \tau_2} \dots + q_n C_n 10^{-k_1 \tau_n}$$

其中

$$Q_T = Q_{\perp} + q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

这样, 通过测定这些点的流量及污染浓度, 即可求得  $k_1$  值。如果有较大的地下水汇入, 则上述第二式不成立, 因而影响求得  $k_1$  值的精度。

传统的河流自净方程为:

$$\frac{dC}{dt} = -K_1 C$$

积分得:

$$C_t = C_0 e^{-K_1 t}$$

\* 略去扩散项。

换为常用对数,以 10 为底则,

$$C_t = C_0 10^{-k_1 t}$$

式中,  $C_0$  为初始的污染浓度;  $C_t$  为汇流时间  $t$  后的污染浓度;  $K_1$ ,  $k_1$  为自净系数。

此式没有考虑研究河段流量的增加,所以如考虑研究河段水文情况,流量的增加所引起的稀释,则可引入稀释倍数:

$$n = \frac{Q_L}{Q_0}$$

式中,  $Q_L$  为随着河段  $L$  增长而增加的流量;  $Q_0$  为原河段流量。

于是可得河流稀释自净方程式:

$$C_t = \frac{C_0}{n} 10^{-k_1 t}$$

关于河段汇流时间的推求,在有实测水文资料的河道上,可利用水文观测点的水位( $H$ ),流速( $u$ )关系曲线  $u = f(H)$  来确定,或利用等流时线的作图法来确定。

在无实测水文资料的河道上,对小河,一般在进行水质调查监测时,可放浮标跟踪测定,或者划分相类似的水文地理区域(对中、小河),利用已有的实测水文资料,进行地区综合,绘出流速、水面比降与流量的相关图,应用于无实测资料的河段,据以确定汇流时间。

### (三)

为了进行水质规划,合理地确定污水排放和水处理程度,在进行水质预测时,常需要把污染浓度折算成年平均流量时的或低于年平均流量时的浓度值,或重新计算成一定时段,给定保证率(频率)流量的浓度值。

要进行这样的计算,偶尔地测定几次流量是无济于事的,应该着眼于研究河流某一地段总的水文情况。研究重要的污染河段,最好能有相应的水文站,否则要选择邻近相似流域作参考,用水文学的一套方法,比拟近似确定。

在有水文站实测资料时,计算发生枯季

严重污染时的流量,其保证率一般采用 80%、85%、90%、95% 等,最常用的是采用 95% 保证率的流量。推求的方法是绘制枯水经验频率曲线。首先按所需枯水时段(对于水污染常用时段为 7 天),摘录水文站实测最小七天流量值,并求其时段平均流量,然后:

(1) 按流量的数值大小重新排列,由最小值为 1,开始标定各个序数( $m$ );

(2) 根据公式  $\frac{n+1}{m}$  [ $n$  是年数(项数),  $m$  是序数],计算每项数值的重现期( $T$ );

(3) 在机率格纸上,对应计算出的重现期,点绘每项数值;

(4) 目估定出一条紧密配合各点据的平滑曲线。

由此曲线即可求得所需要的重现期枯水流量。

所谓重现期,就是“平均多少年出现一次(多少年一遇)”的意思。频率( $p$ )与重现期( $T$ )的关系,一般有两种表示法:当研究最大洪水或年径流,用大于或等于某一流量的( $Q_i$ )的重现期  $T$ (年),  $T = \frac{1}{p}$ 。当研究枯水时,则常采用小于某一  $Q_i$  的频率  $p'$ ,其重现期  $T$  亦为  $T = \frac{1}{p'}$ 。 $p$  与  $p'$  存在如下关系,即  $p' = 1 - p$ 。据此,可对洪水与枯水的频率和重现期作相互转换。

但是往往由于水文实测资料的年系列不长(如小于 20 年系列),而又要求得较稀遇的流量(如推求 20 年或更多年一遇的枯水流量),如把上述经验频率曲线外延,则存在任意性。所以实用上大多设法选配一条符合水文现象统计特性,又具有固定方程式的数学曲线来进行外延。统计上这类曲线很多,我国水文上经常使用的是皮尔逊 III 型曲线。对枯水流量,目前尚无更适当的其他线型。

皮 III 型理论曲线有三参数,这就要据观测系列计算参数,然后查“皮 III 型数值表”,进行适线。不过这种现成的数值表是用于确

定大于所指定随机事件的频率来制成的,而枯水流量频率曲线是用表示小于所指定随机事件的重现期,因此必须注意把表中查得的频率,按上述洪、枯水频率和重现期的关系,换算成相应的小于随机事件的重现期。例如前已述及,研究水污染通常采用流量频率  $p = 95\%$ ,如换成枯水时的频率应为  $p' = 1 - 0.95 = 0.05$ ,其重现期  $T = \frac{1}{p'} = \frac{1}{0.05} = 20$  (年),即指 20 年一遇的枯水流量。

研究水污染的河段,有时只有一个水文站(在河段的上断面或下断面处,甚至在河段之外附近处),如果要推求河段中某一断面的流量(称为“研究断面”)其控制的流域面积与水文站断面控制的流域面积相差不大(仅 3—5%)时,且自然地理条件又大致相似,则可直接移用水文站的资料。而如果流域面积相差在 10—15% 时,则可用最简单的水文比拟(自然地理条件要大致相似),即流域面积比例法,直接推求研究断面的流量:

$$Q = \frac{F}{F_0} Q_0$$

式中,  $Q$ 、 $F$  分别为研究断面的流量与流域面积;  $Q_0$ 、 $F_0$  分别为水文站的流量与流域面积。

而当河段上、下游有水文站,也可用面积比推求河段中间断面的流量。设上、下游两站的流域面积相差不到 10—20%, 则中间断面的流量为:

$$Q = Q_1 + (Q_2 - Q_1) \left( \frac{F - F_1}{F_2 - F_1} \right)$$

式中,  $Q$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为研究断面、上、下游站的流量;  $F$ 、 $F_1$ 、 $F_2$  分别为研究断面、上、下游站的流域面积。

研究水污染常用枯水流量,而枯水流量一般是由地下水补给,因此其与河长的关系将较与流域面积的关系密切,因此中间断面的流量也可用下式求之:

$$Q = Q_1 + (Q_2 - Q_1) \left( \frac{L - L_1}{L_2 - L_1} \right)$$

式中,  $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  分别为研究断面、上、下游

水文站至河源的主河长度。流量符号意义同前式。

#### (四)

在河段中,由于汛期的暴雨洪水,河段受污染的河水得以稀释,污染浓度下降,有的厂矿利用这种暴雨洪水,在允许的范围内,提高排放标准,把平时蓄存的污水有计划地,适时地排放(当然有的污染物是不允许这样做的)。这就要进行洪水预报,以便确定提高排放标准的允许范围。在枯水时期,河段污染程度可能由于流量变小而日趋严重。对此,如有枯水预报,并结合厂矿(生产)、城镇(生活)排污情况,就可预知以后河段水污染趋势,以便采取措施,限制污水排放。

可见洪水预报与汛期水质(安全排放的)预报;枯水预报与枯季水质(危险警告的)预报密切相关。短期的洪水、枯水预报可提供河段来水量,流速等数值,作为水质预报模型的输入参数,进行短期水质预报,以便对河段水质作出短期的调整措施,也就是水质调度、管理的工作。

在工业和生活造成污染的城市,在过量施用化肥与农药的农田,由于暴雨的冲刷,形成雨水污水混合径流,即所谓城市径流、农业径流,最后汇入入河。这就要研究城市暴雨径流、冲刷、污水形成规律以及农业径流的冲刷产污规律,包括野外现场的实验研究。

例如为了研究农业径流的产污量,就需要建立野外代表性农作分布管理的“农业污水试验场”,在几千平方米或更大的场地上分布典型的农作物,采用代表性的农作管理方法(施肥与农药),进行灌溉或降雨径流农业污水出流的实验研究,并用下式计算污染物来量负荷,以便推广应用于流域上相似地区,来推求污染物来量负荷。

$$P = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^T C_i R_{ijh} A_{ij}$$

(下转第 14 页)

解度(毫克/升);  $C$  为氧在河水中的浓度(毫克/升);  $K$  为河泥耗氧系数(天<sup>-1</sup>);  $K_s$  为 Michaelis 或饱和常数(毫克/升)。

3. 图 2 中的曲线  $a$  和  $b$  分别表示溶解氧浓度随时间变化的观测值和计算值的结果。曲线  $a$  和  $b$  相当一致。

在反应的初始阶段, 溶解氧浓度  $C$  非常接近于  $C_0$ , 即  $C_0/C$  接近于 1, 在方程 (6) 中  $K_s \ln \frac{C_0}{C}$  项可以忽略, 这时方程变为  $C = C_0 - Kt$ 。事实上, 这个方程指出溶解氧浓度消耗速度是一个零级反应关系, 这时溶解氧浓度随时间线性地减少。随着时间的进展, 溶解氧浓度  $C$  很快地就远离  $C_0$ , 这时  $K_s \ln \frac{C_0}{C}$  项就不再能忽略不计。耗氧速度变成与溶解氧浓度有关的一个表达式, 并且变得越来越慢(如图 3 所示), 耗氧速度是时间的函数。

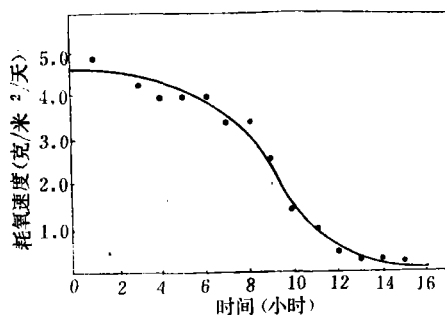


图 3 河泥耗氧速度随时间的变化

4. 河泥耗氧速度随溶解氧浓度的变化曲线示于图 4。

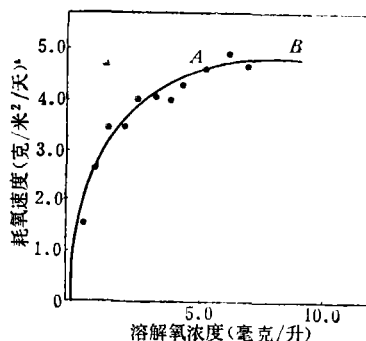


图 4 溶解氧浓度同耗氧速度的关系

在曲线的  $AB$  段, 河泥的耗氧速度同水中溶解氧的浓度无关。在曲线的  $OA$  段, 河泥的耗氧速度随着河水中溶解氧浓度的增加而增加, 并呈一级反应关系。

5. 实验还指出, 河泥的耗氧速度在河泥深于 3 厘米时与其深度关系不明显, 但与河泥和河水交界面的面积有很大关系。

本工作是在英国水研究中心 Stevenage 实验室的 J. H. N. Garland 教授指导下进行的, 在此谨致谢意。

计算机计算程序略

## 参 考 文 献

- [1] Fair, G. M. et al; *Sewage Works Journal*, **13**, 2 (1941).
- [2] Rolley, H. L. J. et al; *Water Research*, **1**, 759 (1967).
- [3] Hargrave, B. T., *Limnol. Oceanog.*, **14** 801 (1969).
- [4] Pamatmat, M. M. et al., *Limnol. Oceanog.*, **18** 611 (1973).
- [5] Brewer, W. S. et al; *Water Research*, **11**, 471 (1977).

(上接第 70 页)

式中,  $P$ ——污染物负荷, 以公斤/年计;  $R_{ijk}$ ——在  $i$  型土壤上, 作物管理方法  $j$ , 由降雨  $h$  产生的地表径流, 以毫米水深计;  $A_{ij}$ ——土壤  $i$  型、作物分布管理  $j$  的土地面积上产生地表径流的面积, 以平方公里计;  $C_j$ ——作物管理方法  $j$  的农业污水浓度, 以毫克/升计;  $M, N$  和  $T$ ——土壤类型数, 作物管理种类和一年中降雨次数。

由上所述, 研究水污染和水文学的许多学科如水文测验、水文调查水文实验、径流形成原理、水文预报、水文计算等都有密切的关系。可以预见, 随着水源保护事业的开展, 水文学与环境学(水污染)将进一步地相互渗透、结合, 新的分支学科——环境水文学必然获得迅速的发展。

(参考文献从略)