

水库不平衡输沙及淤积形态

第二章 水库异重流

在库中，只要表层有一定清水，浑水潜入库底形成异重流是一种较普遍的现象。异重流的流动以及其中泥沙淤积和输送等较之明流在现象上有很大的不同，是研究水库淤积所必须了解的。它在水库淤积与冲刷过程中就会有特殊的表现。



2-1 水库异重流



2-1-1 水库异重流的现象

挟沙水流（浑水）进入蓄有清水的水库后，在一定条件下便潜入库底而形成异重流，其典型情况如图 2-1 所示。

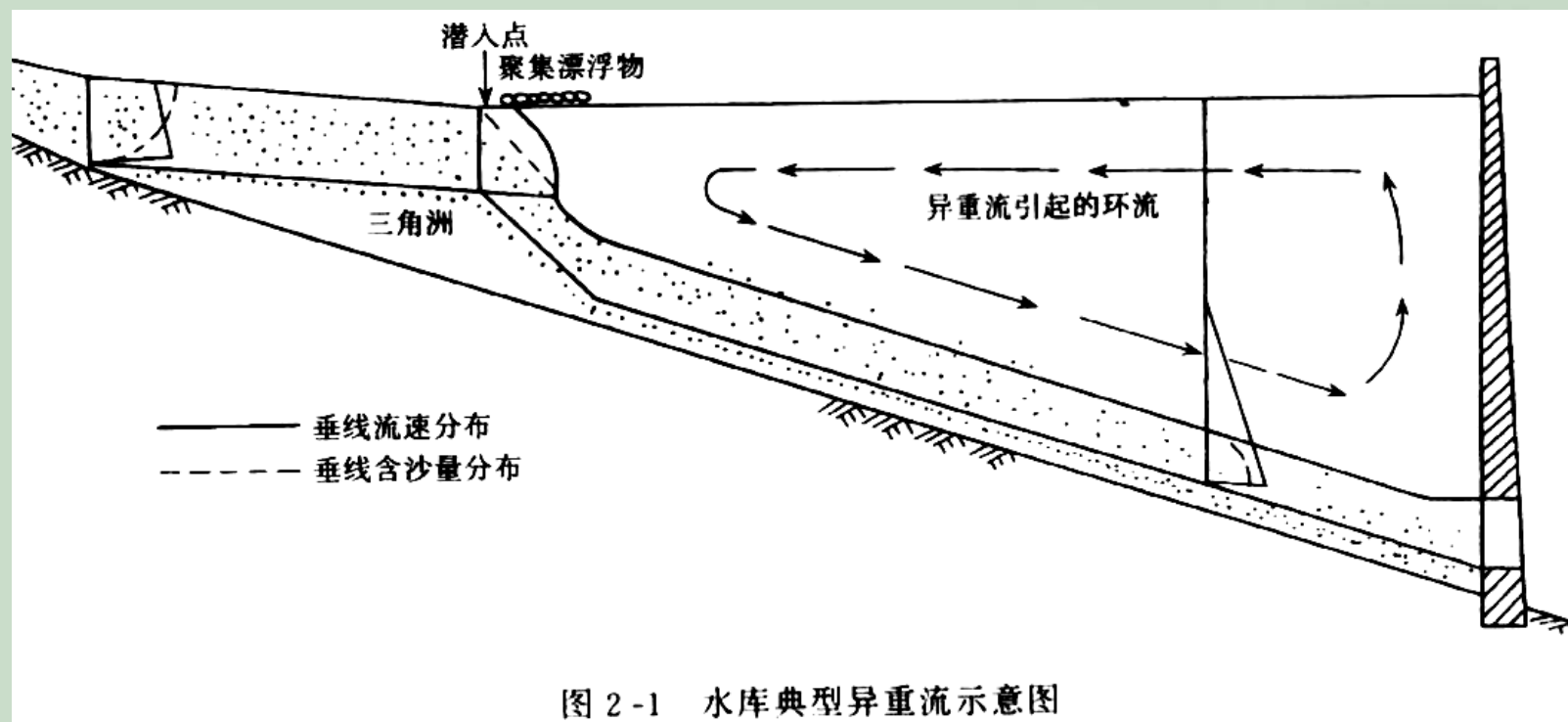


图 2-1 水库典型异重流示意图

浑水潜入形成异重流的地方，称为潜入点。当异重流沿底部运动时，由于交界面的切应力，常常带动上层清水，从而在清水中形成较弱的环流，而且这种环流有时能明显看出，并使潜入点附近成为汇点，上游来的浑水与水库表层清水，均在该点汇合，潜入下去。因此该点常聚集大量漂浮物，这点常成为判断潜入点位置的标志。潜入位置在平面上的分布并不是直线，而是具有舌状（图 2-2），这是由于中间部分流速较大的缘故。

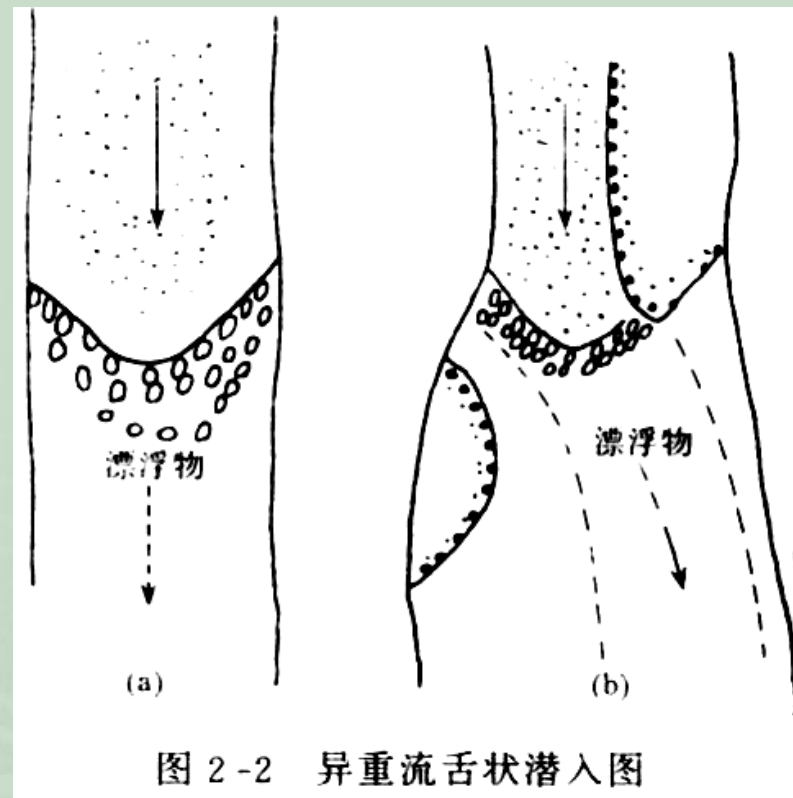


图 2-2 异重流舌状潜入图

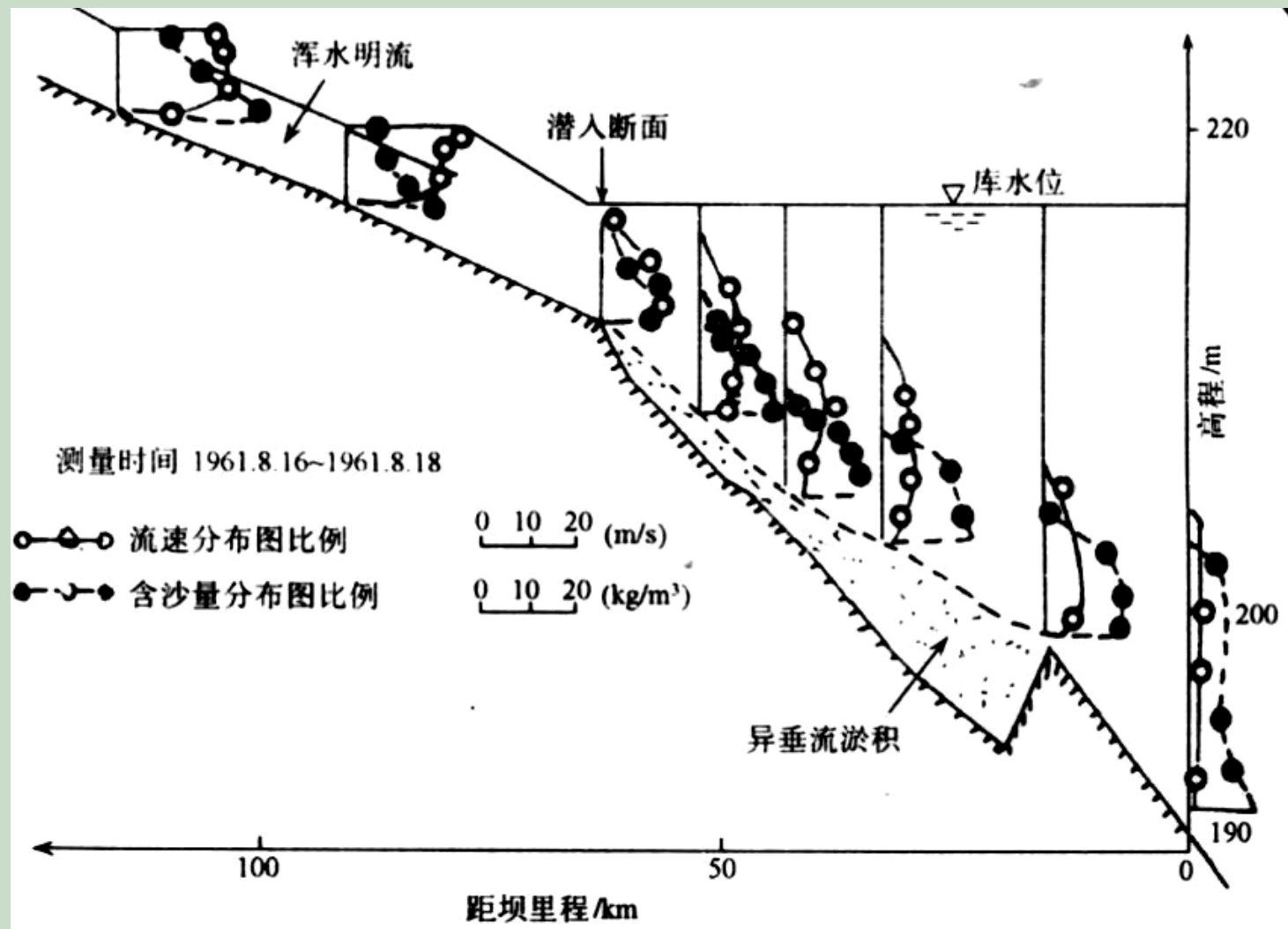


图 2-3 三门峡水库实测异重流的流速和含沙量分布

图2-4为丹江口水库1973年9月观测到的一次中层异重流^[2]。水深20m以上表层清水温度为25⁰C，水深40m以下底层冷水温度为15⁰C以下，潜入点浑水平均含沙量为0.285 kg/m³，这样表层清水（热水）密度为0.9971 g/cm³。中层浑水密度为0.9974 g/cm³，底层冷水密度（在不计含盐量时为0.9991 g/cm³）。可见浑水潜入中层是必然的。

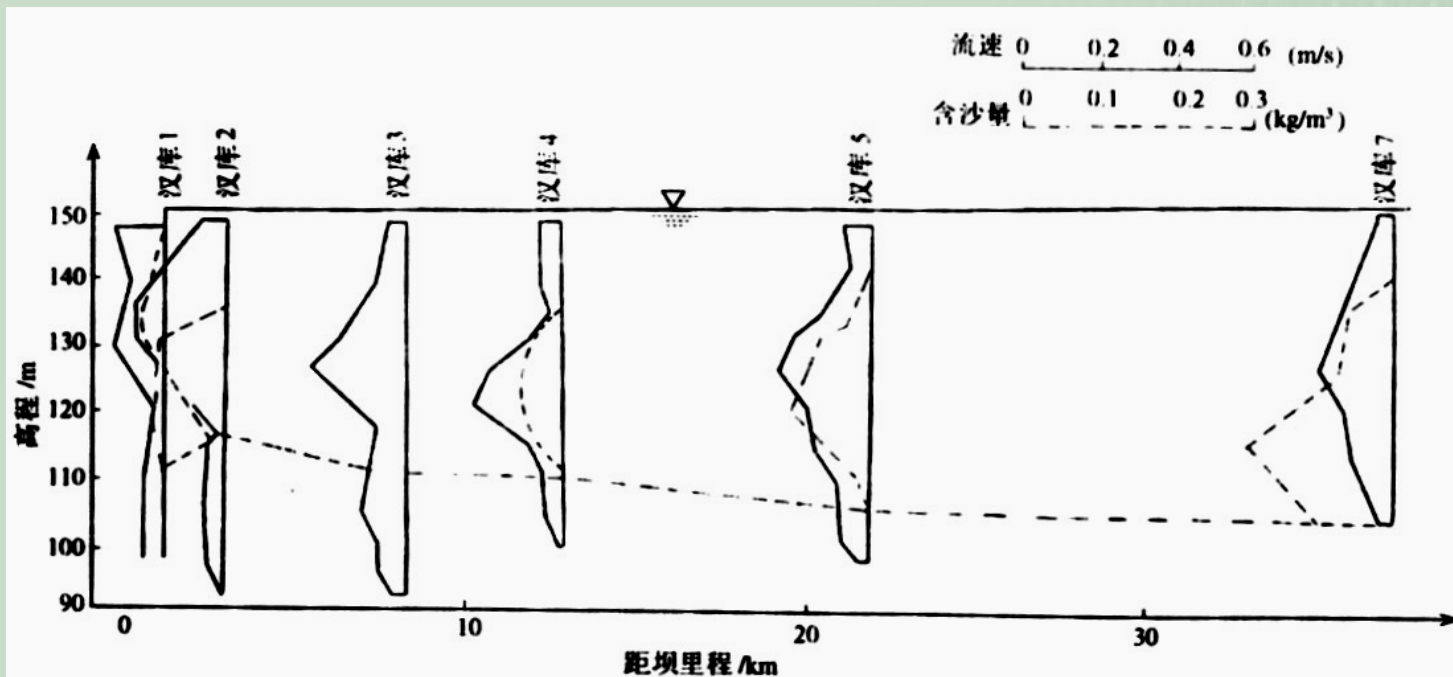


图 2-4 丹江口实测中层异重流

2-1-2 异重流的稳定流动

异重流的运动较之明流运动在现象上有很大的差别。这里最本质的差别是，浑水异重流的流动发生在清水里，受到清水的浮力。要想消去这个浮力，可对清水与浑水同时施加与重力加速度相等的反相加速度 $-g$ 。此时上层清水的容重为零，便可不予考虑，而下沉浑水的容重为

$$\rho' g - \rho_0 g = (\rho' - \rho_0)g = \frac{\rho' - \rho_0}{\rho'} g \rho' = \eta_g g \rho' \quad (2-1-1)$$

由于清水的浮力，浑水的重力加速度减小到 η_g 的量级常为 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ ，故异重流的重力作用大为减弱，与此同时，压力、惯性力和阻力就相对地显得突出。

为了进一步了解这种质的变化，我们看一看异重流二维稳定均匀流动的运动，如图2-6所示。

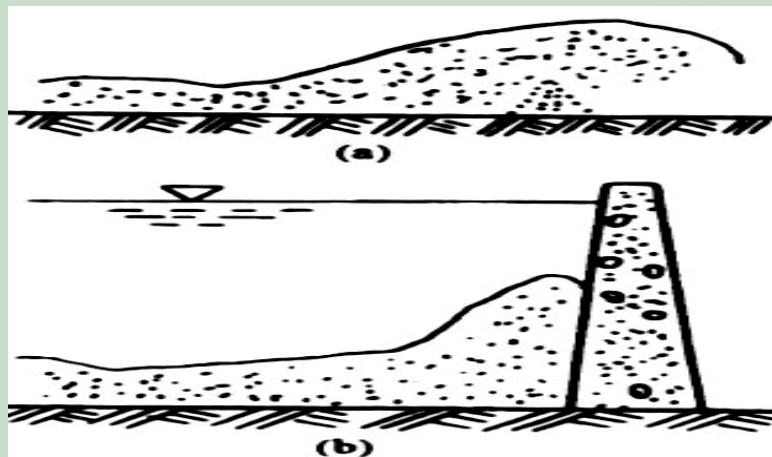


图 2-5 异重流爬高示意图

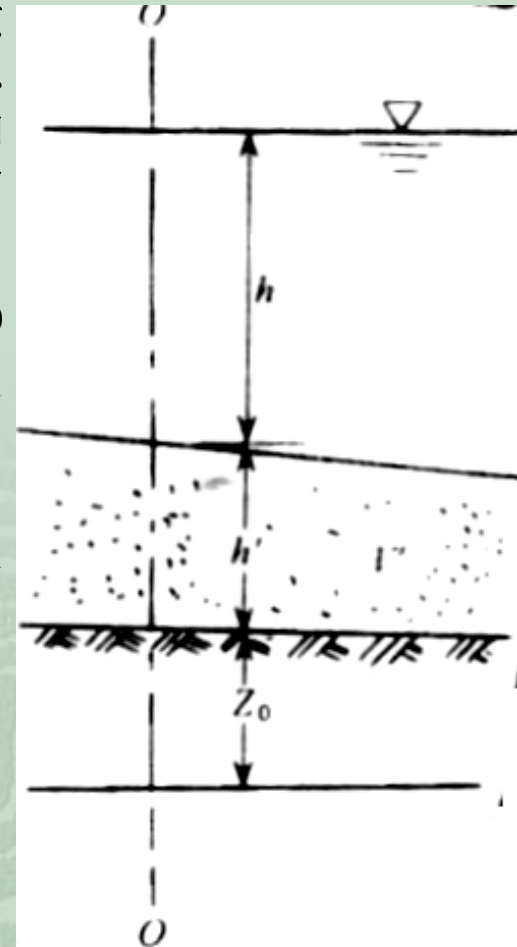


图 2-6 异重流二维均匀流动

$$\gamma' = \gamma_0 + (1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_s}) S \quad (2-1-3)$$

$$\frac{dq}{dx} = h' \frac{dV'}{dx} + V' \frac{dh'}{dx} = 0$$

$$\frac{dV'}{dx} = -\frac{V'}{h'} \frac{dh'}{dx} \quad (2-1-4)$$

$$\frac{dh}{dx} + \frac{dh'}{dx} + \frac{dZ_0}{dx} = 0$$

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{dh'}{dx} - \frac{dZ_0}{dx} \quad (2-1-5)$$

将式 (2-1-2) 除以 γ' ，并对 x 求导数，再将式 (2-1-4)、(2-1-5) 代入，同时用 J_f 表示能坡 $-\frac{dH'}{dx}$ ， J_b 表示底坡 $-\frac{dZ_0}{dx}$ ，加以整理后得^[4]

$$\frac{dh'}{dx} = \frac{J_b - \frac{1}{\eta_g} J_f}{1 - \frac{\alpha V'^2}{\eta_g g h'}} \quad (2-1-6)$$

$$\gamma' H' = \gamma' (Z_0 + h' + \frac{\alpha V'^2}{2g}) + \gamma_0 h \quad (2-1-2)$$

若令 λ' 代表异重流的阻力系数，则

$$V' = \sqrt{\frac{8}{\lambda'}} \sqrt{\eta_g g J_f h'} \quad (2-1-7)$$

$$F_r' = \frac{V'}{\sqrt{\eta_g g h'}} \quad (2-1-8)$$

$$\frac{dh'}{dx} = \frac{J_b - \frac{\lambda'}{8} F_r'^2}{1 - \alpha F_r'^2} \quad (2-1-9)$$



异重流均匀运动

若为均匀流, $\frac{dh'}{dx}=0$, 则由上式得到

$$V' = \sqrt{\frac{8}{\lambda'} \sqrt{\eta_g g h' J_b}} \quad (2-1-10)$$

对于非均匀异重流, 总可以用分段均匀来逼近的, 此时异重流的流速为

$$V' = \sqrt[3]{\frac{8}{\lambda'} \eta_g g \frac{Q}{B} J_b} \quad (2-1-11)$$

厚度 (深度) 为

$$h' = \frac{Q}{V'B} = \sqrt[3]{\frac{\lambda' Q^2}{8\eta_g g J_b B^2}} \quad (2-1-12)$$

对于突然扩散段或者湖泊型水库要适当的考虑其扩散角的影响。在没有其它资料时, 图2-7的经验结果, 也可作为参考。

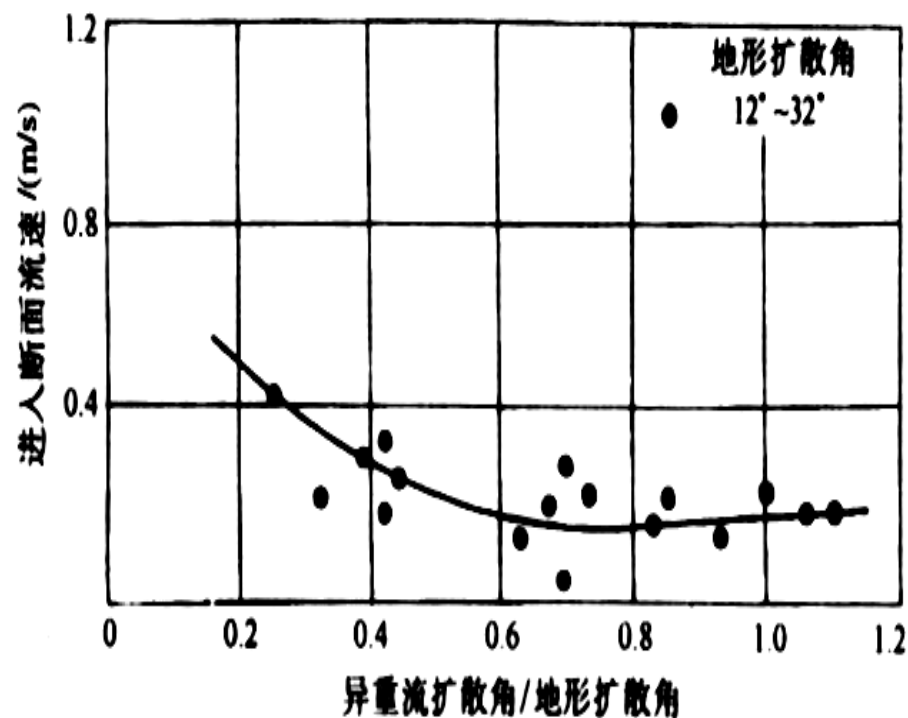


图 2-7 地形扩散角、异重流扩散角与流速三者之间的关系

2-1-3 水库异重流的形成及潜入和持续的条件

2-1-3-1 异重流形成条件

水库浑水异重流的形成，需要具备的基本条件一是形成密度差的两种重量不同的流体，另一是异重流运动（一般为两种密度体的相对运动）需要的能量。根据这两点，结合水库的特点，一般产生浑水异重流具有三个条件：

第一、库内储存一定的清水。

第二、进入的浑水须要一定的含沙量。此时当含沙量不很高时，泥沙粒径应较细。但是否存在着一个明显的界限含沙量？例如前面提到的丹江口水库资料（图2-4）表明，即令含沙量小于 $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ ，仍能形成清浑水的密度差，并发生异重流运动。但在另外一些水库含沙量远较 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 为大时，也不形成异重流，或者潜入后不稳定，又重新浮起。

异重流泥沙中粒径小于 0.01mm 所占的百分数，官厅水库约占80%，红山水库约占86%，丹江水库约占73%，美国米德湖水库约占83%。它们的级配比较见图2-8。

第三、潜入时的浑水应有一定的单宽流量。

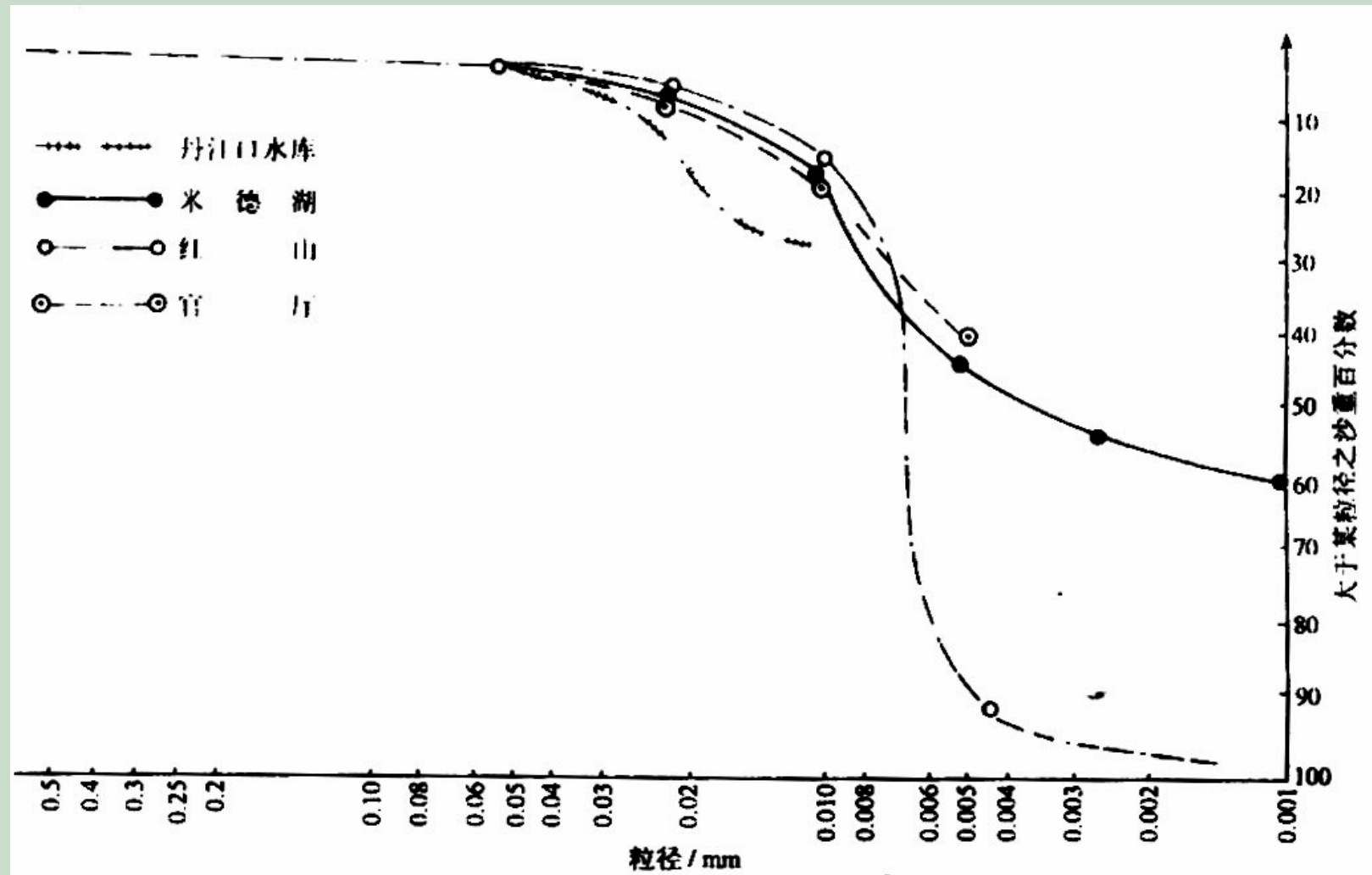


图 2-8 异重流级配实测资料

异重流挟带泥沙粒径的粗细，与异重流平均流速有密切关系^[5]（图2-9及2-10）。图2-10中 D_{90} 表示悬移质颗粒中按重量有90%的比它细。从图2-9的资料可以得到 V/D_{50} 接近一常数，而文献[6]将 D_{50} 换成 $\omega(D_{50})$ 后，仍有 $\omega(D_{50})=0.00225V$ ^[6]，其关系如图2-11所示。

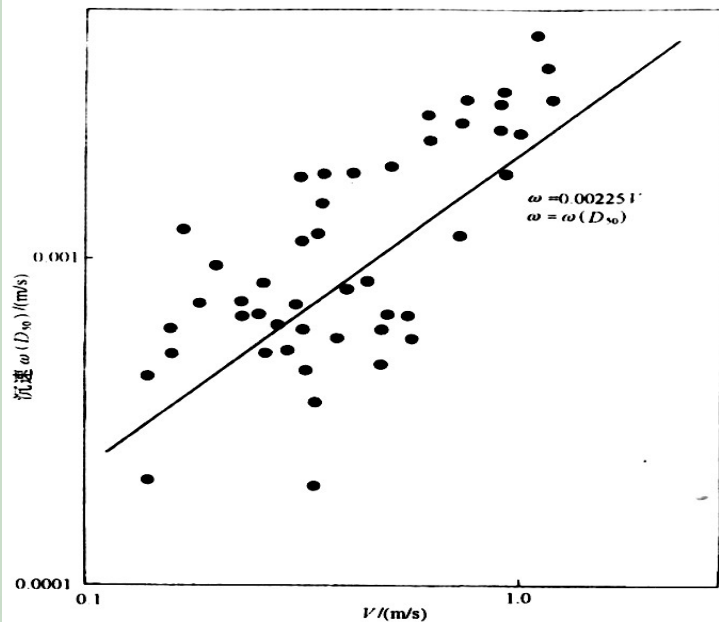


图 2-11 异重流颗粒沉速与流速的关系

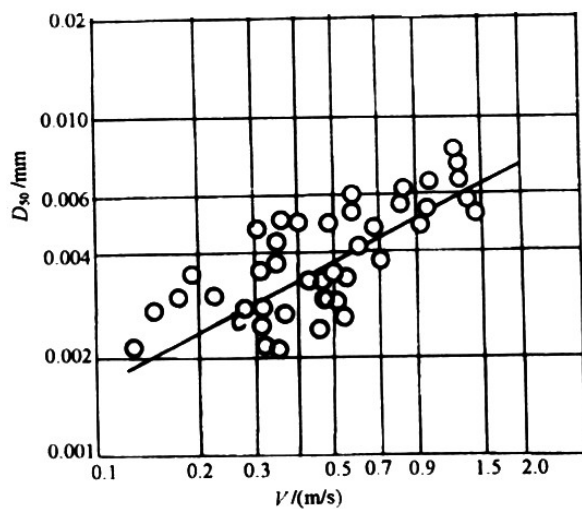


图 2-9 异重流流速 V 与 D_{50} 关系

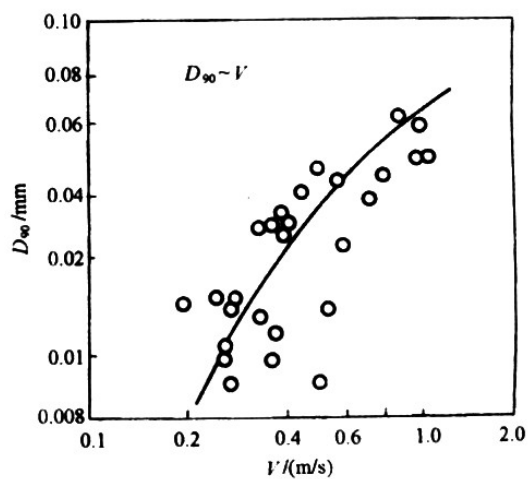


图 2-10 异重流流速 V 与 D_{90} 关系

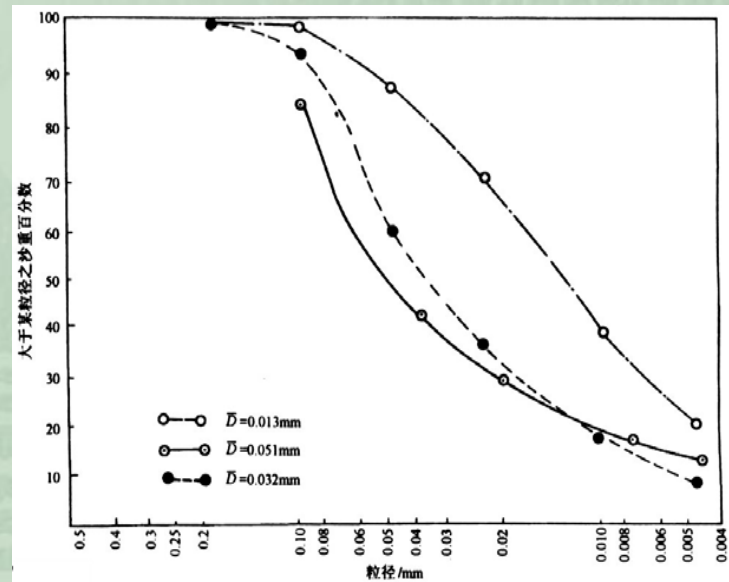


图 2-12 山西小河口水库异重流级配

2-1-3-2 异重流的潜入条件

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{\eta_g g h_0}} = 0.78 \quad (2-1-13)$$

$$F_r^2 = \frac{V^2}{\eta_g g h_0} = 0.60 \quad (2-1-14)$$

$$h_0 = 1.186 \sqrt[3]{\frac{q^2}{\eta_g g}} \quad (2-1-15)$$

$$\begin{aligned} \eta_g &= \frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma'} = \frac{(\gamma_s - \gamma_0)S}{(\gamma_s - \gamma_0)S + \gamma_0 \gamma_s} \\ &= \frac{S}{S + \frac{\gamma_0 \gamma_s}{(\gamma_s - \gamma_0)}} \end{aligned} \quad (2-1-16)$$

$$\eta_g = \frac{0.63S}{\gamma_0} = 0.00063S \quad (2-1-17)$$

$$h_0 = 13.83 \sqrt[3]{\frac{q^2}{gS}} = 6.46 \sqrt[3]{\frac{q^2}{S}} \quad (2-1-18)$$

此处 q 以 m^2/s , S 以 kg/m^3 计, 它们为潜入点的单宽流量和含沙量。

表2-1 异重流潜入点水深与单宽流量及含沙量关系

$q(m^2/s)$				
$h_0(m)$	20	5	1	0.2
$S(kg/m^3)$				
100	10.25	2.39	1.39	0.48
10	22.09	8.77	3.00	1.03
1	41.10	18.92	6.47	2.11
0.1	102.55	40.70	13.92	4.76

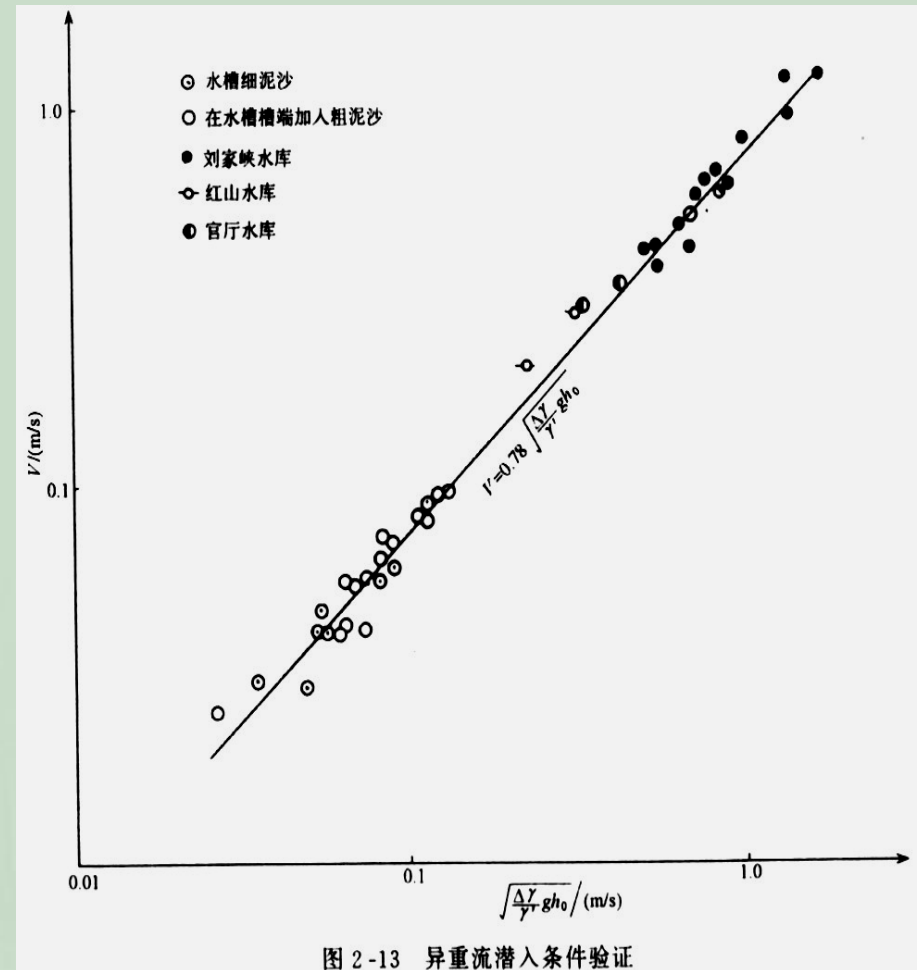
在较稳定条件下异重流运行中一般应满足均匀流动条件

不仅如此，异重流形成还与水库底坡 J_0 有关^[9]。水库底坡在一定程度上决定异重流的均匀流动，事实上在异重流潜入后，经过一定距离，它将为均匀流，其水深为

$$h'_n = \frac{Q}{V'B} = \left(\frac{\lambda'}{8\eta_g g} \frac{Q^2}{J_0 B^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2-1-19)$$

而按潜入条件式 (2-1-14) 潜入点的水深为

$$h_0 = \left[\frac{1}{0.6\eta_g g} \frac{Q^2}{B^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2-1-20)$$



可想而知，若异重流潜入后并变为均匀流，且其水深 $h'_n < h_0$ ，则潜入成功；否则如 $h'_n > h_0$ ，则潜入后变为均匀流的水深将超过表层清水水面，这表示异重流上浮而消失也即潜入不成功。由式（2-1-19）及（2-1-20）可得两个水深的比值

$$\frac{h'_n}{h_0} = \left(\frac{0.6\lambda'}{8J_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2-1-21)$$

当 $\frac{h'_n}{h_0} = 1$ 时，称为临界情况，令此时 $J_0 = J_{0.c}$ ，则

$$J_{0.c} = \frac{0.6\lambda'}{8} = 0.001875 \quad (2-1-22)$$

$J_{0.c}$ 也称为临界值。故异重流形成除满足潜入条件式（2-1-14）外，尚须满足 $h'_n < h_0$ ，或者 $J_0 > J_{0.c}$ 。综合这两种条件在一般情况下异重流水深应满足

$$h' > \max[h_0, h'_n] \quad (2-1-23)$$

即在潜入点^[9]

$$h' = \max[h_0, h'_n] \quad (2-1-24)$$

表2-2 异重流潜入点水深计算

$J_0=0.00300$					
$S \backslash q$	100.0	10.0	2.0	0.5	0.1
100.0	29.98	64.60	110.46	175.35	299.85
20.0	10.25	22.09	37.78	59.97	102.55
5.0	4.07	8.77	14.99	23.80	40.70
1.0	1.39	3.00	5.13	8.14	13.92
0.2	0.48	1.03	1.75	2.78	4.76
$J_0=0.00188$					
$S \backslash q$	100.0	10.0	2.0	0.5	0.1
100.0	29.98	64.60	110.46	175.35	299.85
20.0	10.25	22.09	37.78	59.97	102.55
5.0	4.07	8.77	14.99	23.80	40.70
1.0	1.39	3.00	5.13	8.14	13.92
0.2	0.48	1.03	1.75	2.78	4.76
$J_0=0.00100$					
$S \backslash q$	100.0	10.0	2.0	0.5	0.1
100.0	36.92	79.53	136.00	215.89	369.16
20.0	12.63	27.20	46.51	73.83	126.25
5.0	5.01	10.79	18.46	29.30	50.10
1.0	1.71	3.69	6.31	10.02	17.13
0.2	0.59	1.26	2.16	3.43	5.86
$J_0=0.000200$					
$S \backslash q$	100.0	10.0	2.0	0.5	0.1
100.0	63.13	136.00	232.56	369.16	631.26
20.0	21.59	46.51	79.53	126.25	215.89
5.0	8.57	18.46	31.56	50.10	85.67
1.0	2.93	6.31	10.79	17.13	29.30
0.2	1.00	2.16	3.69	5.86	10.02
$J_0=0.00005$					
$S \backslash q$	100.0	10.0	2.0	0.5	0.1
100.0	100.21	215.89	369.16	586.01	1002.06
20.0	34.27	73.83	126.25	200.41	342.70
5.0	13.60	29.30	50.10	79.53	136.00
1.0	4.65	10.02	17.13	27.20	46.51
0.2	1.59	3.43	5.86	9.30	15.91

2-1-4 异重流的输沙规律

2-1-4-1 异重流的挟沙能力

异重流作为一种水流运动与明渠流是有本质差别的，这一点前面已经作了详细说明。但是异重流挟带泥沙是否与明渠水流有什么差别呢？我们知道水流挟沙主要取决于紊动扩散与重力之间的矛盾，异重流的流速分布虽有一些改变，但整个紊流结构没有质的变化，同时异重流的重力削弱主要指水流而言，至于泥沙的重力作用仍取决于它的比重与浑水容重之差，因此在异重流中这一对矛盾的相互联系不致有什么明显的改变，所以如直接考虑异重流挟带的泥沙与紊动扩散之间的数量关系，则异重流的挟沙能力规律与明渠不应有明显的差别，这就是说明流的挟沙能力公式，例如式（1-3-16），对于异重流也是可以使用的。事实上，沙玉清在分析挟沙能力时^[10]，曾同时引用了异重流与明流的资料，结果未发现异重流资料有什么异常现象。



异重流挟沙能力

$$V = \sqrt[3]{\frac{8}{\lambda'} \eta_g g q J_0} \quad (2-1-11)$$

将其代入

$$S^* = K \gamma_s \left(\frac{V^3}{gh\omega} \right)^m$$

得

$$S^* = K \gamma_s \left(\frac{8}{\lambda'} \frac{\eta_g q J_0}{\omega h} \right)^m \quad (2-1-25)$$

当含沙量不是很大时,

$$\eta_g = \frac{0.63S}{\gamma_0} \quad (2-1-17)$$

$$S^* = K \gamma_s \left(\frac{5.04 \frac{S}{\gamma_0} q J_0}{\lambda' \omega h} \right)^m \quad (2-1-26)$$

式(2-1-26)就是异重流的挟沙能力公式,按照这种方法导出的异重流的挟沙能力与来水含沙量或单宽输沙率有关。当按照式(1-3-16) m 取0.92, K 取 0.926×10^{-4} 以及 λ' 取0.025,则式(2-1-26)为

$$S^* = 0.0122 \gamma_s \left(\frac{S q J_0}{\gamma_0 \omega h} \right)^{0.92} \quad (2-1-27)$$

如果近似的取 $m=1$,则式(2-1-26)给出

$$\begin{aligned} S^* &= 0.0187 \frac{\gamma_s}{\gamma_0} \frac{q J_0}{\omega h} S \\ &= 0.0495 \frac{q J_0}{\omega h} S \end{aligned} \quad (2-1-28)$$



异重流挟沙能力又一形式

现在考虑一种特殊情况，即平衡输沙的情况。此时 $S^* = S$ ，于是式（2-1-26）给出

$$\frac{\omega}{V} = 0.00832 J_0 \frac{\gamma_s^{1.087}}{\gamma_0 S^{0.087}} = 0.0437 J_0 S^{-0.087} \quad (2-1-29)$$

而式（2-1-28）给出

$$\frac{\omega}{V} = K_1 J_0 \quad (2-1-30)$$

综上所述，异重流挟沙能力基本与含沙量成正比，这种看似奇怪的特性其实不是偶然的，它表明，如果异重流含沙量大，按照式（2-1-11）及（2-1-16）需要的 V 也大。在平衡输沙条件下这两者的影响接近相互抵销，而当 $m = 1$ 时，则恰好抵销。

必须记住的是上述结论是在平衡输沙条件下得到的。由于异重流特别是水库异重流输沙很难达到饱和，此时又当别论。

水库异重流总是超饱和输沙

根据实际资料对比，我们可以对异重流输沙规律得出一个重要结论^[9]。由式(2-1-27)有

$$\begin{aligned} \frac{\omega}{V} &= 0.00832 \frac{\gamma_s^{1.087}}{\gamma_0 S^{0.087}} \left(\frac{S}{S^*}\right)^{1.087} J_0 \\ &= 0.0437 \frac{J_0}{S^{0.087}} \left(\frac{S}{S^*}\right)^{1.087} \end{aligned} \quad (2-1-31)$$

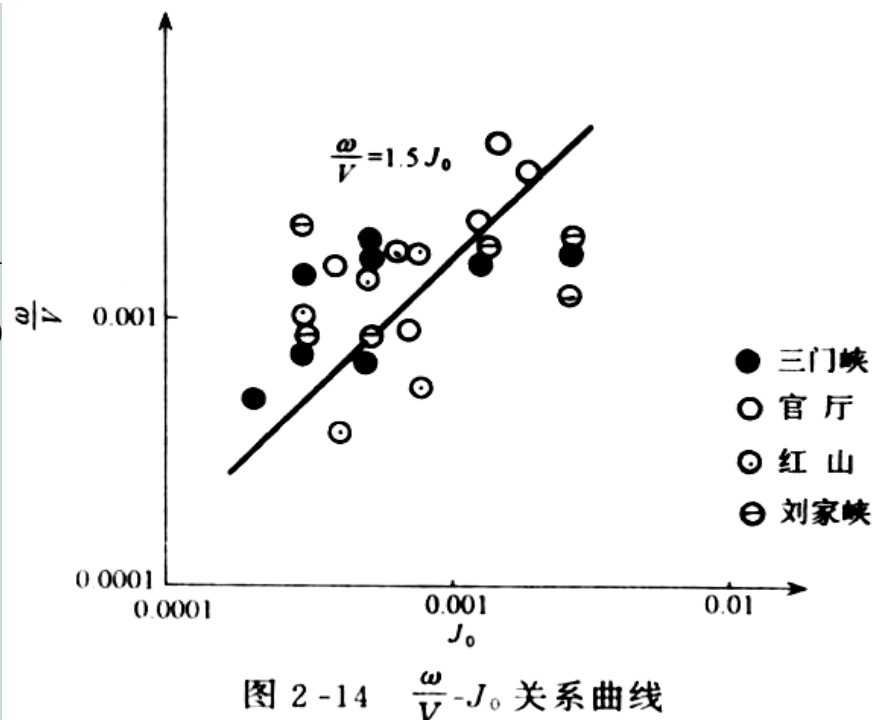


图 2-14 $\frac{\omega}{V}-J_0$ 关系曲线

另一方面，据官厅三门峡、红山、刘家峡等水库异重流资料我们曾经得到^[6]

$$\frac{\omega}{V} = 1.5 J_0 \quad (2-1-32)$$

它证实了在相差一个常数因子时式(2-1-30)是正确的。此处及以上 ω 是计算挟沙能力时的平均沉速。令上述两式相等，则有

$$\frac{S^*}{S} = 0.0387 S^{-0.08} \quad (2-1-33)$$

当 $S = 1 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ 时, $S^* = (0.0387 \sim 0.0283)S$ 。这说明水库异重流的挟沙能力远低于含沙量，属于较强烈的超饱和输沙。这正是除非含沙量很高时，水库异重流总是淤积的道理。

2-1-4-2 异重流的不平衡输沙

正如挟沙能力规律一样，异重流的不平衡输沙规律在本质上与明流也应是一致的，即第一章中有关结果仍然正确。下面将要指出，异重流总是超饱和输沙，即处于淤积状态的不平衡输沙。根据第一章的结果，计算含沙量的公式为

$$S = S^* + (S_0 - S_0^*) \sum_{l=1}^n P_{4.l.0} e^{-\frac{\alpha L}{\lambda_l}} + S_0^* \sum_{l=1}^n P_{4.l.0} \frac{\lambda_l}{\alpha L} (1 - e^{-\frac{\alpha L}{\lambda_l}}) - S^* \sum_{l=1}^n P_{4.l} \frac{\lambda_l}{\alpha L} (1 - e^{-\frac{\alpha L}{\lambda_l}}) \quad (1-4-31)$$

计算悬移质级配的公式为：

$$P_{4.l} = P_{4.l.0} (1 - \lambda) \frac{(\omega_l)^{\nu-1}}{\omega_m} \quad (1-5-16)$$

我们曾利用三门峡水库、官厅水库、红山水库等异重流的资料分别利用上述两式，计算了出库异重流含沙量及级配。计算与实测结果的对比，见表2-3、2-4。从表2-3看出，计算的含沙量和实测的是基本符合的。

表2-3 出库异重流含沙量计算

水库名称	测验日期 年、月、日	测验方法	计算起点至坝址距离(km)	实测出库含沙量 (kg/m ³)	计算出库含沙量S(kg/m ³)	
					详算	简算
官厅	1954.6.30	断面	2.25	23.1	28.1	27.9
	1955.7.11		1.74	30.5	35.6	35.0
	1955.7.12		2.34	45.7	45.8	45.4
红山	1965.7.14		7.308	13.3	25.8	25.7
三门峡	1962.7.28		14.05	51.9	56.8	54.8
	1964.8.16		13.18	51.3	58.7	56.7
	1964.8.16~ 1964.8.17		15.07	75.7	58.7	57.6
	1964.8.13~ 1964.8.2626	主流线	36.06	66.5	67.4	65.9
			9.56	51.8	39.0	38.4
			15.8	66.0	62.0	61.5
			5.96	46.1	52.4	51.6
13.18			74.8	65.5	64.6	
7.22	43.3	45.9	43.2			

表2-4 出库异重流级配计算

水库名称	测验日期	资料类别	各组粒径重量百分数					
			0.25~ 0.10	0.10~ 0.05	0.05~ 0.025	0.025~ 0.010	0.010~ 0.005	<0.005
红山	1965.7.14	实测	0	7	4.5	11.5	25.0	52.0
	1965.7.14	计算	0	0	1.9	11.9	19.2	67.0
三门峡	1962.7.28	实测	0	2.9	10.0	22.4	14.7	50.0
	1962.7.28	计算	0	0.2	3.4	20.4	22.7	53.3
	1964.8.16	实测		1.3	6.6	25.8	22.1	44.2
	1964.8.16	计算		0.5	3.7	20.9	23.7	51.2
	1964.8.16-64.8.17	实测		7.0	14.8	27.4	36.2	14.6
	1964.8.16-64.8.17	计算		0.3	6.1	30.9	43.4	19.3
官厅	1954.6.30	实测	0.3	2.0	5.0	16.5	17.9	58.3
	1954.6.30	计算	0.1	0.8	6.4	16.0	17.9	58.9
	1955.7.11	实测	0.3	1.3	5.9	11.3	17.6	63.6
	1955.7.11	计算	0	0.9	7.7	21.1	18.4	51.8
	1955.7.12	实测	1.4	4.4	9.7	19.8	18.9	45.8
	1955.7.12	计算	0	0.3	2.9	12.7	17.4	66.8

异重流不平衡输沙规律的特殊形式

现在我们根据异重流的具体条件，讨论它的不平衡输沙规律的特殊表现形式。由式(2-1-27)得：

$$\frac{S^*}{S} = 0.0562 \left(\frac{VJ_0}{\omega} \right)^{0.92} S^{-0.08} \quad (2-1-35)$$

这个公式所表示的异重流的含沙量与挟沙能力关系在一定程度上反映了不平衡输沙规律的一个方面。尽管在准均匀流条件下，式(2-1-35)可以表示挟沙能力与含沙量的关系，但是由于这两者都是未知数，因此还不能用来计算含沙量，为此，尚须补充一个方程，这个方程就是不平衡输沙方程，现在从方程

$$\frac{dP_{4,l}S}{dx} = -\frac{\alpha\omega_l}{q}(P_{4,l}S - P_{4,l}^*S^*) \quad (1-4-3)$$

出发。为了使结果更为明显简单起见，我们采用式(2-1-28)代替式(2-1-35)，此时对于非均匀沙得

$$S^*(l) = K_2 \left(\frac{VJ_0 S}{\omega_l} \right)$$

此处 $S^*(l)$ 表示全部泥沙均为 l 组泥沙时的挟沙能力。从而有

$$S^* = \sum_{l=1}^n P_{1,l} S^*(l) = K_2 \frac{VJ_0}{\omega} S$$

其中

$$\frac{1}{\omega} = \sum_{l=1}^n \frac{P_{1,l}}{\omega_l}$$



将上式代入式 (1-4-3), 遂有

$$\frac{dP_{4.l}S}{dx} = -\frac{\alpha\omega_l}{q}(P_{4.l}S - K_2 \frac{VJ_0S}{\omega} P_{4.l}^*)$$

注意到对于淤积情况 $P_{4.l}^* \approx P_{4.l}$ 故

$$\frac{dP_{4.l}S}{dx} = -\frac{\alpha P_{4.l}\omega_l S}{q} + \frac{\alpha K_2}{h} J_0 S P_{4.l} \frac{\omega_l}{\omega} \quad (2-1-36)$$

$$\frac{dP_{4.l}S}{dx} = \left[-\frac{\alpha\omega_l}{q} + \frac{\alpha K_2 J_0}{h} \frac{\omega_l}{\omega} \right] P_{4.l}S \quad (2-1-37)$$

当河宽沿程变化不大时, h 总可以近似的表示为

$$h = h_0 + \frac{h_L - h_0}{L} x \quad (2-1-38)$$

将上式代入式 (2-1-37), 考虑到异重流颗粒细, 忽略平均沉速 ω 沿程变化, 并在0至 L 间积分上式得

$$\ln \frac{P_{4.l}S}{P_{4.l.0}S_0} = -\frac{\alpha\omega_l L}{q} + \frac{\alpha K J_0 L}{h_L - h_0} \frac{\omega_l}{\omega} \ln \frac{h_L}{h_0}$$

即

$$P_{4.l}S = P_{4.l.0}S_0 e^{-\frac{\alpha\omega_l L}{q}} \left(\frac{h_L}{h_0}\right)^{\frac{\alpha K_2 J_0 L \omega_l}{(h_L - h_0) \omega}} \quad (2-1-39)$$

对 l 求和后得:

$$S = S_0 \sum_{l=1}^n \left(\frac{h_L}{h_0}\right)^{\frac{\alpha K_2 J_0 L \omega_l}{(h_L - h_0) \omega}} P_{4.l.0} e^{-\frac{\alpha\omega_l L}{q}} \quad (2-1-40)$$

如果距离 L 不很长,且河宽变化不大,则上式可简化为^[6]

$$S = S_0 \sum_{l=1}^n P_{4.l.0} e^{-\frac{\alpha\omega_l L}{q}} \quad (2-1-41)$$

这个公式与 $S_0^* \ll S_0$ 、 $S^* \ll S$ 条件下,即挟沙能力可以忽略时的公式(1-4-31)完全相同,可见这里的推导是正确的^[6]。式(2-1-41)的验证同样使用了表2-3的实际资料,验证的含沙量列在该表“简算”栏,从中看出式(2-1-41)也是符合实际的。

2-2 异重流淤积与排沙



2-2-1 异重流的淤积

2-2-1-1 流量沿程减少引起的淤积

从官厅水库1956~1957年实测27次资料看^[5],形成异重流后的异重流的流量较之进库断面流量要明显减少,一般要损失14~77.5%,平均损失48.6% (表2-5),相应的输沙率要损失44~92%,平均损失75.8%。输沙率损失比流量损失大,其原因是泥沙大量淤积。这个例子说明潜入段的损失是很大的。

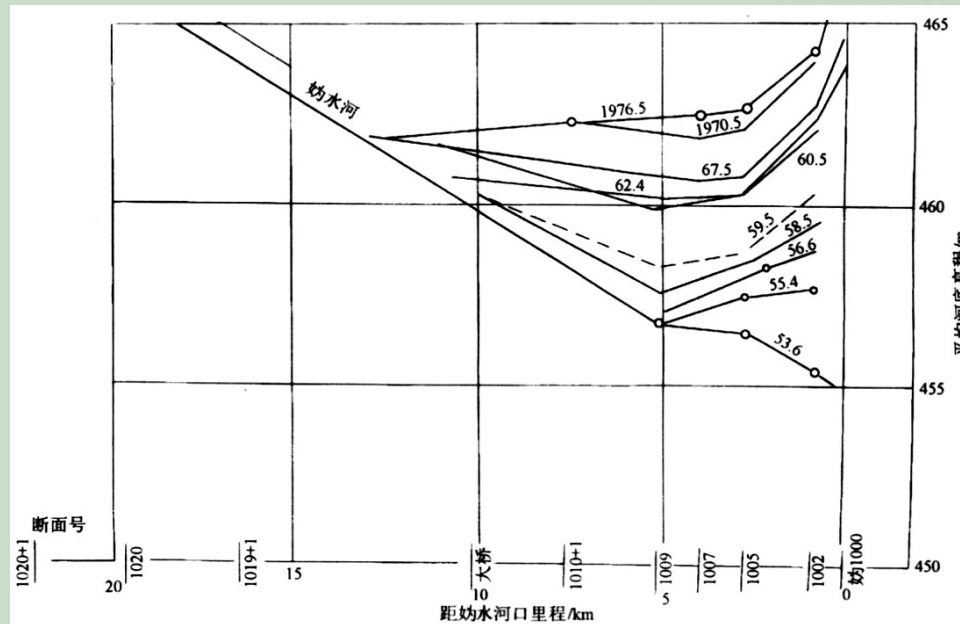


图 2-15 官厅水库奶水河库区河口段淤积纵剖面图

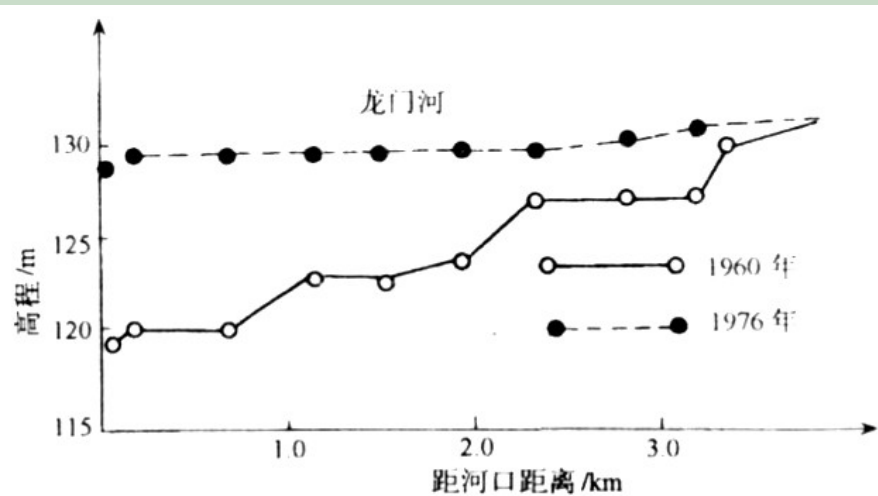


图 2-16 丹江口水库龙门河口段淤积纵剖面

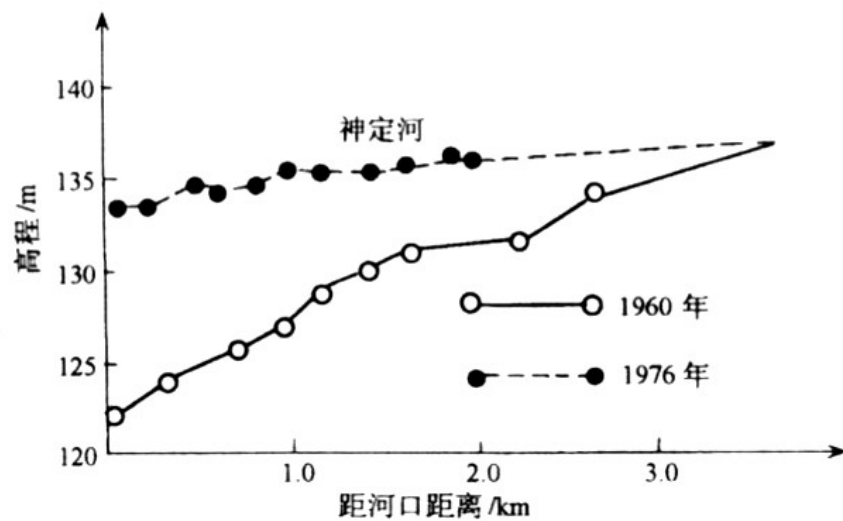


图 2-17 丹江口水库神定河口段淤积纵剖面

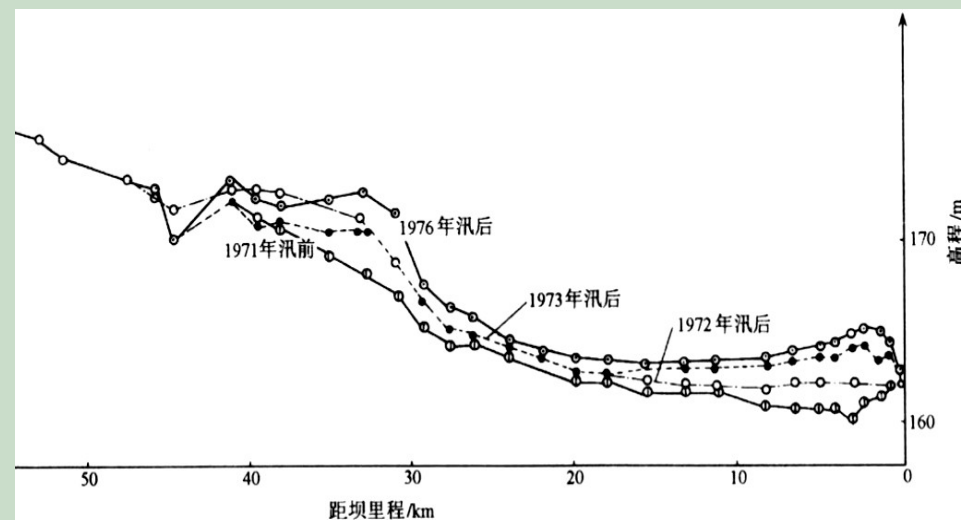


图 2-18 刘家峡水库淤积纵断面

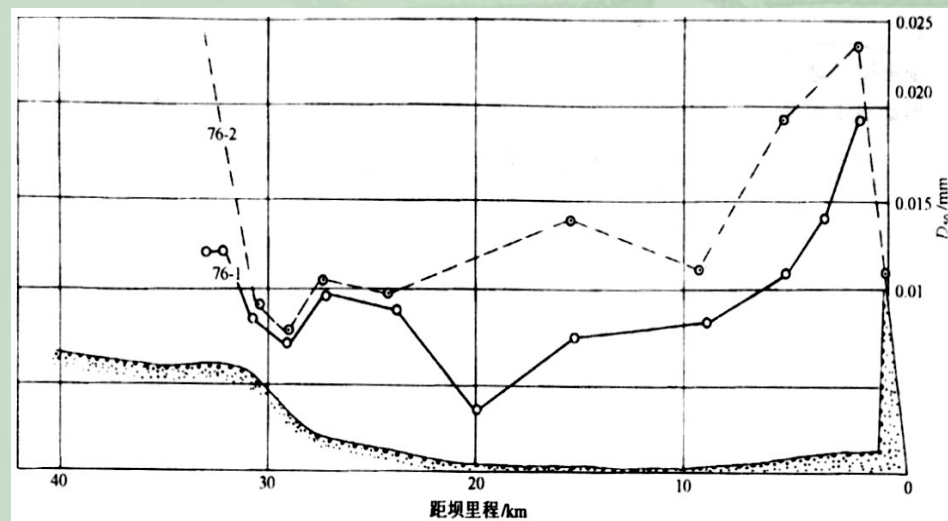


图 2-19 刘家峡水库库底淤积物 D_{50} 沿程变化图

2-2-2 异重流的排沙

- 水库浑水异重流形成后，由于潜入库底过水库面缩小（较之全部水下面积），在同流量下流速反而较之明流为大，因而便于将泥沙向下游输送，有利于排沙。
- 含沙量愈大，流速也愈大，愈有利于将泥沙向坝前输送，而在明流条件下含沙量基本不影响水流速度。
- 利用异重流排沙的主要优点是坝前水位不需要降低，能够以较少的水量排出大量泥沙。
- 异重流排沙效果，因水库的长短、形状、库底坡降、来水来沙量的大小以及坝前泄流设施高程和调度情况而异。表2-7^[1]列出了一些水库异重流排沙的平均效果，可见排沙比变化是很大的。

表2-7 水库异重流排沙比与底坡关系

水库名称	库底坡降 (10^{-4})	排沙比%	统计年数及次数
黑松林	110	61	1964~1972年7次
刘家峡	67	54.7	1972年6次
依利-艾达姆(阿尔及利亚)	30	45	1953~1955年
官厅	14-15	33	1954~1955年12次
冈察斯(美国)	15	15~30	1939~1944年
米径湖(美国)	10	27	1935~1936年4次
三门峡	3.5	13	1961年7次

2-2-2-1 异重流到达坝前的时间

异重流前峰的运动，是属于不稳定流运动，因此到达坝前的时间，严格说，应通过不稳定流来计算，但是作为近似考虑，对于异重流运行的时间 t_2 ，可以由其运行段的长度 L_2 ，按

$$t_2 = \int_0^{L_2} \frac{dx}{V} \quad (2-2-1)$$

计算，将式(2-1-16)代入式(2-1-11)后 V 可以由下式确定：

$$V = K_3(qSJ_0)^{\frac{1}{3}} \quad (2-2-2)$$

此时注意到

$$S = S_0 \sum_{l=1}^n P_{4.l.0} e^{-\frac{\alpha\omega_l x}{q}} \quad (2-2-3)$$

则当单宽流量沿程不变时

$$t_2 = \int_0^{L_2} \frac{dx}{K_3(qSJ_0)^{1/3}} = \frac{L_2}{K_3(qS_0J_0)^{1/3}} \int_0^1 \frac{d\left(\frac{x}{L_2}\right)}{\sum P_{4.l.0} e^{-\frac{\alpha\omega_l L_2 \left(\frac{x}{L_2}\right)}{q}}} \quad (2-2-4)$$



考虑到由于 q 大，潜入点的水深也大，在坝前水位和含沙量变化不大的条件下，潜入点至坝址的距离 L_2 就短，故在一定范围内可以近似的认为相互抵销。这样再加上潜入点及 q 不变的假定，则有：

$$\frac{1}{K_3} \int_0^1 \frac{d(x/L_2)}{\sum P_{4.1.0} e^{-\frac{\alpha \omega_1 L_2}{q} \left(\frac{x}{L_2}\right)}} = \text{常数} = C \quad (2-2-5)$$

于是上式为：

$$t_2 = C \frac{L_2}{(qS_0J_0)^{1/3}} \quad (2-2-6)$$

$$t = t_1 + t_2 \quad (2-2-7)$$

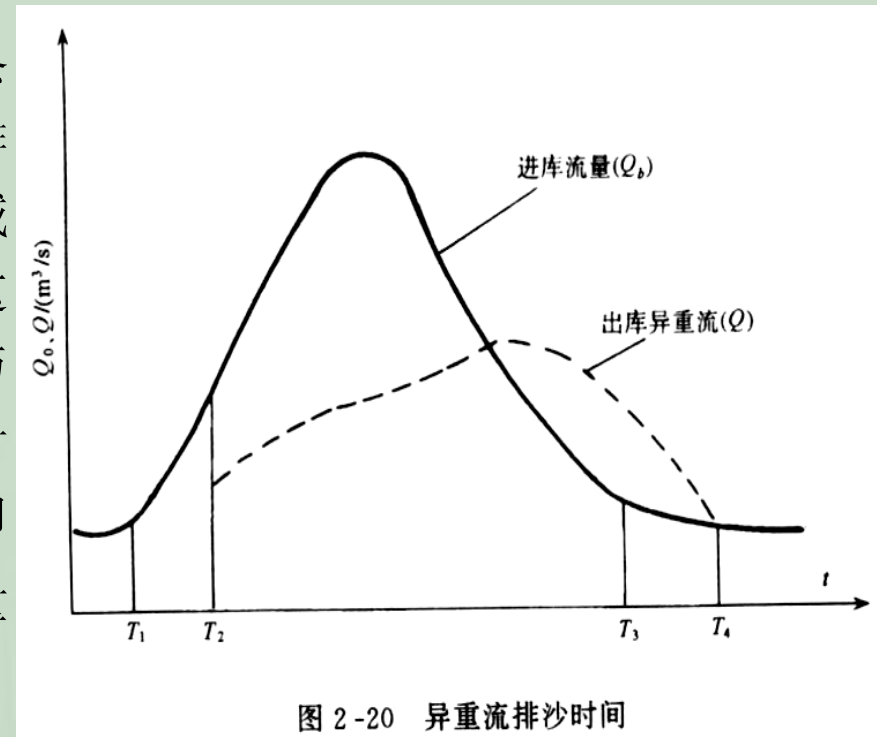


2-2-2-2 有效入库水量

当异重流进库洪峰消失，异重流大多停止运动，在没有形成明显浑水水库的条件下排沙也就结束。因此异重流的有效排沙时间，可以由进库站的洪峰持续时间减去异重流到达坝址的时间而得到^[16]。这样，如图2-20、 T_1 、 T_4 为进库站洪峰起涨与消落的时间， T_4 也是坝前异重流停滞的时间， T_2 为异重流到达坝前的时间，即 $T_2 = T_1 + (t_1 + t_2)$ ，而排沙之前的水量为：

$$W_1 = \int_{T_1}^{T_2} Q_0 dt$$

W_1 为异重流在水库中的体积。



T_3 为与坝前异重流停滞时相应的进库站流量过程线上的时间，即进库站 T_3 时刻的水流到达坝前时(T_4) 异重流恰好消失。当异重流在水库中的体积没有什么变化时，显然 T_3 由

$$\int_{T_3}^{T_4} Q dt = \int_{T_1}^{T_2} Q_0 dt = W_1 \quad (2-2-8)$$

确定， Q 为出库流量。这样，异重流入库水量 W 中的有效部分为：

$$W_2 = \int_{T_2}^{T_3} Q_0 dt = \int_{T_1}^{T_3} Q_0 dt - \int_{T_1}^{T_2} Q_0 dt = W - W_1 \quad (2-2-9)$$

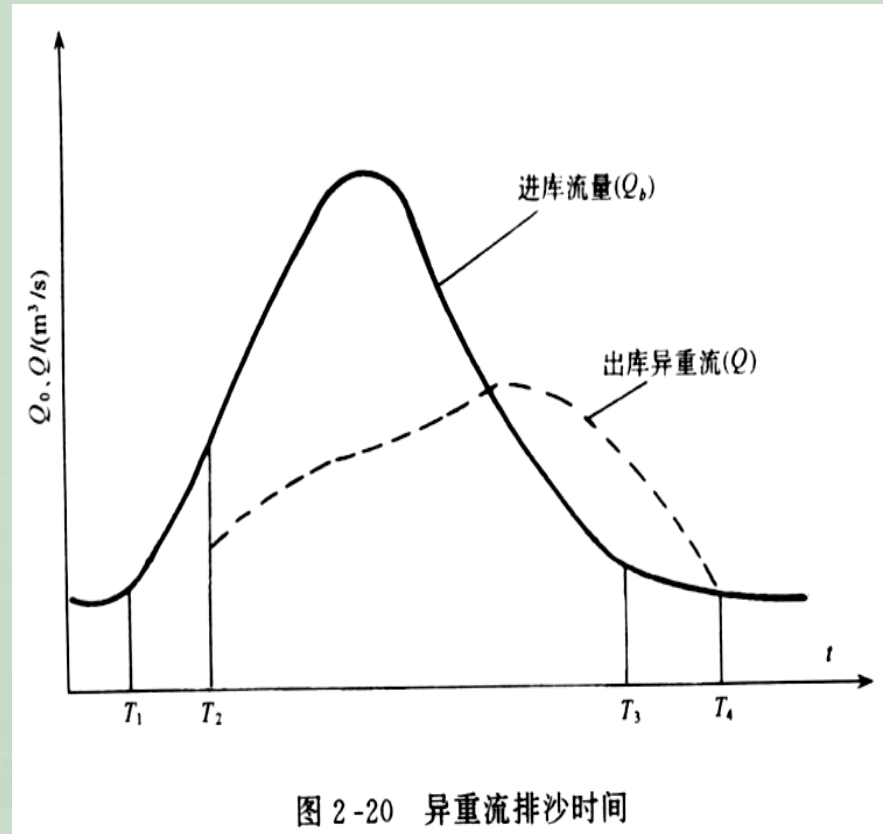


图 2-20 异重流排沙时间

2-2-2-3 底孔高程和闸门的适时开启

若要使异重流能顺利的排出库外，除需知道它到达坝前的时间和厚度外，还必须使排沙底孔的高程设置得恰当。否则，如底孔过高，超过异重流的最大爬高时，不可能将异重流泥沙排出库外，并会损失库内的清水，即令等到形成浑水水库后，能排出一部分泥沙，但排沙效果将大为降低。山西汾河水库泄水底孔高程高出河床 $19.4m$ ，自1960年拦洪蓄水以后，异重流虽然能到达坝前，但因洞底与异重流高差太大，异重流无法排出库外，三年后坝前淤积面上升了15米之后，坝前才开始能排出一小部分异重流。为了使坝前排出异重流顺畅，并且使排出的含沙量尽可能大些，从原则上讲，底孔应尽可能低一些，并分散布置在主槽部分。



2-3 异重流的倒灌及淤积



2-3-1 倒灌异重流形成

设干流浑水潜入支流的静水体，如图 2-21 所示，图 2-21(a)为纵剖面，图 2-21(b)为平面图，如忽略行进流速 U_0 ，则 Bernoulli 方程为

$$rh_0 = \gamma_0 h_2 + \gamma h_1 + \gamma \frac{\alpha U_1^2}{2g} + \xi \gamma \frac{\alpha U_1^2}{2g} \quad (2-3-1)$$

$$\gamma \alpha (1 + \xi) \frac{U_1^2}{2g} = \gamma (h_0 - h_1) - \gamma_0 (h_0 - h_1)$$

$$\eta_g = \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma} \quad (2-3-2)$$

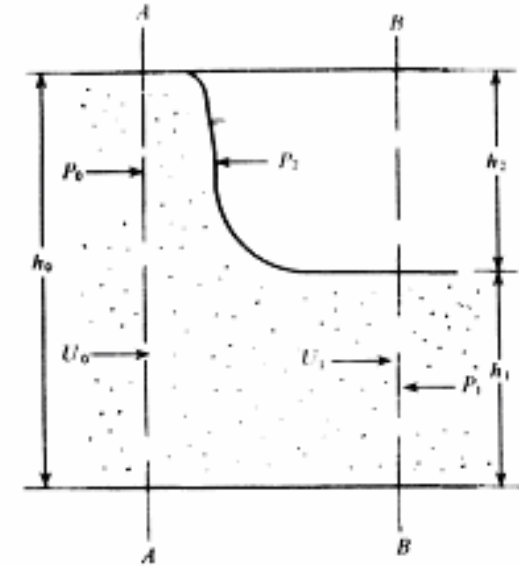
$$K_1 = \frac{h_1}{h_0} \quad (2-3-3)$$

$$U_1 = \sqrt{\frac{2}{\alpha(1+\xi)} (1 - K_1) \eta_g g h_0} \quad (2-3-4)$$

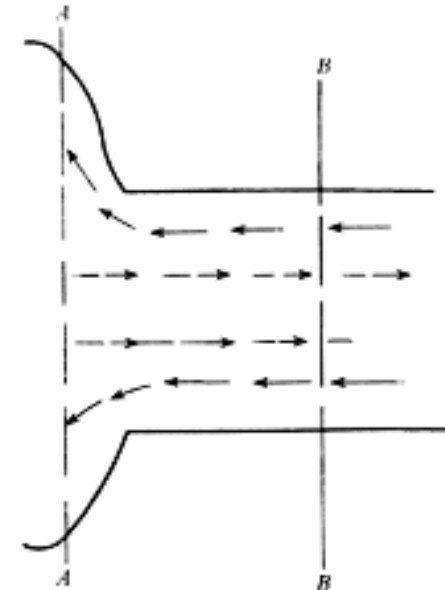
这就是浑水倒灌潜入形成异重流的速度公式。如令

$$K_2 = \sqrt{\frac{2}{\alpha(1+\xi)} (1 - K_1)} \quad (2-3-5)$$

$$U_1 = K_2 \sqrt{\eta_g g h_0} \quad (2-3-6)$$



(a)



(b)

图 2-21 异重流倒灌纵剖面与平面图

K_1 及 K_2 的理论值估计

由于方程(2-3-4)中除 U_1 外，尚包含了 ξ 及 K_1 。即令不考虑 ξ ，也包含了 U_1 及 K_1 ，故需要补充一个方程才能确定。考虑动量方程与其联解。忽略行进流速 U_0 的动量方程为(图 2-21)

$$P_0 = P_1 + P_2 + \frac{\gamma}{g} U_1^2 h_1$$

$$\frac{\gamma}{2} h_0^2 = \frac{\gamma_0}{2} h_2^2 + (\gamma_0 h_2 + \frac{\gamma}{2} h_1) h_1 + \frac{\gamma}{g} U_1^2 h_1 \quad (2-3-7)$$

将上式加以变换，有

$$\frac{U_1^2 h_1}{g h_0^2} = \frac{1}{2} \frac{(\gamma - \gamma_0)}{\gamma} \frac{(h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2} = \frac{1}{2} \eta_g (1 - K_1^2)$$

故

$$\frac{U_1}{\sqrt{g \eta_g h_0}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{(1 - K_1^2)}{K_1}} \quad (2-3-8)$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{(1 - K_1^2)}{K_1}} = \sqrt{\frac{2}{\alpha(1 + \xi)} (1 - K_1)}$$



取 $\alpha = 1$ ，则由上式得

$$K_1 = \frac{1 + \xi}{3 - \xi} \quad (2-3-9)$$

$$K_2 = 2 \sqrt{\frac{(1 - \xi)}{(3 - \xi)(1 + \xi)}} \quad (2-3-10)$$

按一些资料和经验， $K_2 = 0.405 \sim 0.65^1$ ，而以 $K_2 = 0.45 \sim 0.5$ 较多。若取 $K_2 = 0.45$ ，

按照式 (2-3-9) 及 (2-3-10)，则 $\xi = 0.8, K_1 = 0.818$ ，以及 $F_\gamma^2 = \frac{U_1^2}{\eta_g g h_1} = 0.247$ ，

以下暂取此值，若有进一步理论和实际资料根据时，可考虑对其修正。



2-3-2 倒灌异重流流量沿程衰减

由于异重流中泥沙很细，现假设其粒径及沉速变化可以忽略，其次为简单起见，假设异重流上升速度 V_0 沿程不变，即 $V=V_0$ 。至于沿AC方向的河宽 b 是随着 x 而减少，假定其减少量 Δb 与 Δx 成正比。这样，我们有

$$\Delta b = -\beta b \Delta x$$

$$\frac{db}{dx} = -\beta b \quad (2-3-11)$$

积分上式，并取边界条件 $x=0, b=b_1$ ，则

$$b = b_1 e^{-\beta x} \quad (2-3-12)$$

而 b_1 为口门宽度。由图2-22知，在0- x 段，穿过AC面的上浮流量为

$$q = \int_0^x V b dx = V_0 b_1 \int_0^x e^{-\beta x} dx = \frac{V_0 b_1}{\beta} (1 - e^{-\beta x}) \quad (2-3-13)$$



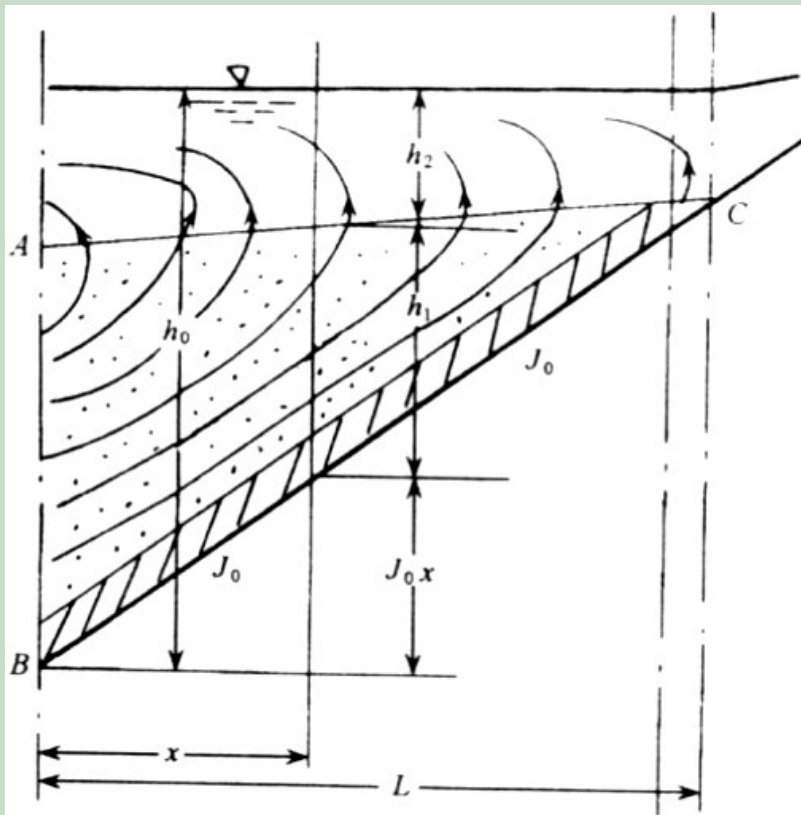


图 2-22 异重流倒灌时异重流
及清水运行概化图形

另一方面，当 $x = L$ ，则上浮流量应为全部异重流的流量 Q_1 ，于是

$$Q_1 = q_L = \frac{V_0 b_1}{\beta} (1 - e^{-\beta L}) \approx \frac{V_0 b_1}{\beta} \quad (2-3-14)$$

由于 βL 很大，此处采用了 $e^{-\beta L} \approx 0$ 。利用上式，式 (2-3-13) 可表为

$$q = Q_1 (1 - e^{-\beta x}) \quad (2-3-15)$$

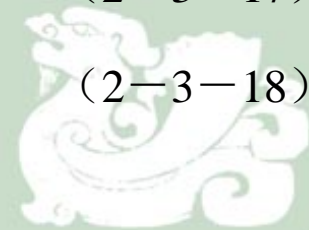
而 x 处剩下的异重流流量为

$$Q = Q_1 - q = Q_1 e^{-\beta x} \quad (2-3-16)$$

注意到在潜入断面 $B-B$ ，

$$Q_1 = b_1 V_1 h_1 \quad (2-3-17)$$

$$V_0 = \beta h_1 V_1 = \beta \frac{Q_1}{b_1} \quad (2-3-18)$$



2-2-3 异重流倒灌长度

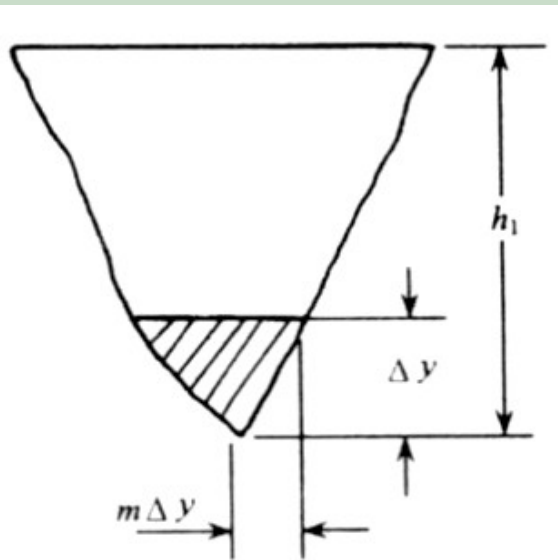


图 2-23 倒灌异重流流管过水面积示意图

如图 2-23，我们取紧贴床面 BC 的一维流管（图中阴影部分），该流管进出断面 B 、 C 处的 Bernoulli 方程为

$$\gamma h_1 + \gamma_0 (h_0 - h_1) + \gamma \frac{U_1^2}{2g} = \gamma J_0 L + \gamma_0 (h_0 - \Delta H - J_0 L) + \gamma \frac{V_0^2}{2g} + \gamma h_w$$

其中 h_0 、 h_1 、 h_2 分别为口门、异重流和清水水深， J_0 为底坡， U_0 为异重流的速度， V_0 为清水上行速度， h_w 为损失的水头。若近似的取异重流的容重 γ 不随距离 L 而变，同时由于底坡 J_0 的值很小，故用 L 代替沿管轴线的倾斜距离 L_0 ，以及忽略两端水面差 ΔH ，则上式为

$$(\gamma - \gamma_0) h_1 + \gamma \frac{U_1^2}{2g} = (\gamma - \gamma_0) J_0 L + \gamma \frac{V_0^2}{2g} + \gamma h_w \quad (2-3-19)$$

其中阻力损失可用

$$h_w = \frac{1}{2} \left[\frac{\lambda}{4R} \frac{L}{2g} U_1^2 + \frac{\lambda'}{4R'} \frac{L}{2g} V_0^2 \right] \approx \frac{1}{2} \frac{\lambda}{4R} \frac{L}{2g} U_1^2 \quad (2-3-20)$$

来表示。方括号中的第一项为用进口速头计算的沿程损失，第二项为用出口速头计算的沿程损失。注意到 $V_0 \ll U_1$ ，故略去第二项。

现在考虑水力半径 R 及阻力系数 λ 。如图 2-23，流管的过水面积为 $m\Delta y^2$ ，故水力半径

$$R = \frac{m\Delta y^2}{2\sqrt{m^2\Delta y^2 + \Delta y^2}} = \frac{m\Delta y}{2\sqrt{1+m^2}} \quad (2-3-21)$$

其中 m 为边坡系数，流管边壁及上层均受有切应力，设切应力为线性分布，则上层切应力即阻力系数为 $\lambda_1 = \lambda_0(1 - \frac{\Delta y}{h_1})$ ， λ_0 为边壁阻力系数，故下层的阻力与上层的阻力之和为

$$\lambda = \lambda_0 - \lambda_1 = \lambda_0 \frac{\Delta y}{h_1} \quad (2-3-22)$$

将式 (2-3-22) 及式 (2-3-21) 代入式 (2-3-20) 再代入式 (2-3-19)，略去速头 $\frac{V_0^2}{2g}$ ，并假设 $m \gg 1$ ，则有 $h_1 + \frac{U_1^2}{2g\eta_g} = J_0L + \frac{1}{2\eta_g} \frac{\lambda_0}{4} \frac{\Delta y}{h_1} \frac{2\sqrt{1+m^2}}{m\Delta y} L \frac{U_1^2}{2g} = J_0L + \frac{\lambda_0}{8} \frac{L}{h_1} \frac{U_1^2}{g\eta_g}$ ，即

$$h_1[1 + \frac{1}{2}F_{r,1}^2] = L(J_0 + \frac{\lambda_0}{8}F_{r,1}^2)$$

故

$$L = \frac{1 + \frac{1}{2}F_{r,1}^2}{J_0 + \frac{\lambda_0}{8}F_{r,1}^2} h_1 \quad (2-3-23)$$

其中 $F_{r,1}^2 = \frac{U_1^2}{g\eta_g h_1}$ 为潜入后的修正福氏数。按前述取 $F_{r,1}^2 = 0.247$ 以及 $\lambda_0 = 0.03$ 后，式(2-3-23) ^[17,18] 为

$$L = \frac{1.13h_1}{J_0 + 0.000926} \quad (2-3-24) \quad 45$$

表 2-8 倒灌长度与坡降关系

J_0 (10^{-4})	L (m)	$J_0 L$
0.0	19964	0.0
10^{-4}	18018	1.8
5×10^{-4}	12964	6.48
10^{-3}	9598	9.60
5×10^{-3}	3119	15.60
7.12×10^{-3}	2297	16.36
10^{-2}	1692	16.92

我们曾用丹江口水库支流异重流倒灌资料^[12]验证了式 (2-3-24), 结果如表 2-9。可见除神定河两者差别较大外, 其余基本符合。

表 2-9 异重流倒灌长度验证

支沟名称	河床坡降 J_0 (10^{-4})	口门水深 h_0 (m)	口门异重流深 h_1 (m)	异重流淤积长度 L (m)	
				实测	计算
三门河	4.387	20.4	16.69	3700	3550
神定河	3.622	22.4	28.40	3700	4532
崛峪川	7.634	18.8	15.38	2160	2030
细峪川	7.459	19.3	15.79	2300	2129
龙门河	3.679	26.9	22.00	5800	5398
运河	1.974	36.2	29.61	10100	11537
曾河	1.548	33.4	27.32	10500	12477
浪河	1.741	34.8	28.47	11000	12066

2-3-4 倒灌异重流含沙量沿程变化及淤积

假设异重流倒灌流动是恒定的，进出微元 $b\Delta x$ 的沙量平衡方程为

$$QS - (Q + \frac{dQ}{dx}\Delta x)(S + \frac{dS}{dx}\Delta x) - \alpha\omega(S - S^*)b\Delta x - V_0Sb\Delta x = 0$$

令 $\Delta x \rightarrow 0$ ，有
$$\frac{d(QS)}{dx} = -\alpha\omega(S - S^*)b - V_0Sb \quad (2-3-27)$$

注意到前述异重流挟沙能力 $S^* \ll S$ ，从而可以忽略，得到

$$\frac{d(QS)}{dx} = -(\alpha\omega + V_0)Sb \quad (2-3-28)$$

将其改写为 $\frac{d(QS)}{QS} = -\frac{(\alpha\omega + V_0)b}{Q}dx = -(\alpha\omega + V_0)\frac{b_1e^{-\beta x}}{Q_1e^{-\beta x}}dx = -(\alpha\omega + V_0)\frac{b_1}{Q_1}dx$ ，在 $x=0$ 至 x 间积

分，并注意到式 (2-3-18)，则输沙率可表为

$$G = QS = Q_1S_1e^{-(\alpha\omega + V_0)\frac{b_1}{Q_1}x} = Q_1S_1e^{-(1 + \frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x} \quad (2-3-29)$$

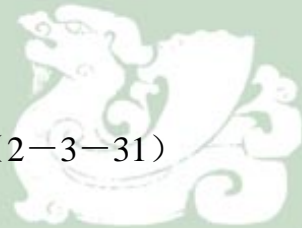
其中 Q_1 、 S_1 为 $x=0$ 也就是潜入点的异重流的流量和含沙量。上式就是输沙率沿程变化方程，这个方程还可分成两个方程

$$\begin{aligned} Q &= Q_1e^{-\beta x} \\ S &= S_1e^{-\frac{\alpha\omega}{V_0}\beta x} \end{aligned} \quad (2-3-30)$$

前者为流量沿程变化方程，后者为含沙量沿程变化方程。而倒灌终端的含沙量为

$$S_L = S_1e^{-\frac{\alpha\omega}{V_0}\beta L} \quad (2-3-31)$$

终端流量近似于零。



输沙率减少分为两部分

在 $0-x$ 段输沙率的减少为^[17,18]

$$\Delta G = Q_1 S_1 - QS = Q_1 S_1 [1 - e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x}] \quad (2-3-32)$$

这些减少的输沙率，一部分淤在 $0-x$ 段的河底，其值为

$$\begin{aligned} \Delta G_1 &= \int_0^x \alpha\omega S b dx = \alpha\omega \int_0^x b_1 S_1 e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x} dx \\ &= \frac{\alpha\omega S_1 b_1}{(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta} [1 - e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x}] = \frac{\frac{\alpha\omega}{V_0}}{(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})} Q_1 S_1 [1 - e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x}] \end{aligned} \quad (2-3-33)$$

另一部分为 $0-x$ 段返回水流带出的泥沙

$$\begin{aligned} \Delta G_2 &= \int_0^x V_0 S b dx = V_0 S_1 b_1 \int_0^x e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x} dx \\ &= \frac{V_0 S_1 b_1}{(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta} [1 - e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x}] = \frac{S_1 Q_1}{(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})} [1 - e^{-(1+\frac{\alpha\omega}{V_0})\beta x}] \end{aligned} \quad (2-3-34)$$

由上述三式，知

$$\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_2 \quad (2-3-35)$$

可看出，若 $\frac{\alpha\omega}{V_0} > 1$ ，则 $\Delta G_1 > \Delta G_2$ ，即输沙率的减少主要是由于淤积；若 $\frac{\alpha\omega}{V_0} < 1$ ，则

$\Delta G_1 < \Delta G_2$ ，即输沙率的减少主要由返回水流带出。

衰减及淤积举例

表 2-10 异重流输沙率沿程衰减及淤积

$\frac{x}{L}$	$\frac{Q}{Q_1}$	$\frac{S}{S_1}$	$\frac{\Delta G}{Q_1 S_1}$	淤积百分数 $\frac{\Delta G_1}{\Delta G}$	带出泥沙百分数 $\frac{\Delta G_2}{\Delta G}$
0.05	0.794	0.631	0.501	0.333	0.166
0.10	0.631	0.398	0.251	0.499	0.250
0.20	0.398	0.159	0.063	0.625	0.312
0.30	0.251	0.0631	0.016	0.656	0.328
0.50	0.100	0.0251	0.002	0.665	0.333
0.70	0.0398	0.00159	0	0.667	0.333
0.90	0.0158	0.000251	0	0.667	0.333
1.00	0.01	0.000100	0	0.667	0.333

曾用上述丹江口水库支流异重流倒灌资料^[12]，验证了公式（2-3-33）并列
入表 2-11。沉速考虑了细颗粒在倒灌运行中速度缓慢，产生一定程度的絮凝，取
 $\omega = 0.0003m/s$ ，相当于 0.01-0.025mm 粒径的平均沉速，干容重按文献[24]确定。

2-3-5 淤积厚度沿程分布

由河床变形方程，注意到式 (2-3-28)，则有

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma'_s} \frac{\partial(QS)}{\partial x} = \frac{\alpha\omega + V_0}{\gamma'_s} S b = \frac{\alpha\omega + V_0}{\gamma'_s} S_1 b_1 e^{-\left(\frac{\alpha\omega}{V_0} + 1\right) \beta x} \quad (2-3-36)$$

故

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right) = -\frac{V_0}{\gamma'_s} \left(\frac{\alpha\omega}{V_0} + 1 \right)^2 \beta S_1 b_1 e^{-\left(\frac{\alpha\omega}{V_0} + 1\right) \beta x} < 0 \quad (2-3-37)$$

可见淤积厚度沿程递减。这正是异重流倒灌形成倒锥体（相对于异重流流动的方向）甚至拦门沙的根据。这里按前面的假设，忽略了 ω 的沿程变化。3-4节中，对于 $\omega = f(x)$ 沿程变化的情况，证明了上式仍然正确。

最后，需要强调的是，由于在淤积过程中，河底坡降 J 变化很大，并不总是 J_0 ，因此严格地说，对于一般异重流倒灌，上述各项计算，应分时段进行。

表 2-11 异重流倒灌淤积验证

支沟 名称	口门 平均 含沙量 (kg/s)	η_g	h_0 (m)	$0.45\sqrt{\eta_g gh}$ $=u'_1$	$B_1(m)$	Q_0 (m^3/s)	$V_0 = \frac{4.60h_1V_1}{L}$	倒灌 时间 t (年)	$\frac{\alpha\omega}{V_0}$ $1 + \frac{\alpha\omega}{V_0}$	倒灌淤积量 (重量 10^4t , 体积 10^4m^3)			
										计算			实测 体积
										重量	干容重 (t/m^3)	体积	
三门河	1.24	0.00077	16.69	0.159	320	849	0.00342	10	0.0214	711	1.0	711	730
神定河	0.951	0.000592	18.40	0.147	100	276	0.00275	13	0.0266	286	1.0	286	191
崞峪河	0.833	0.000521	15.38	0.136	290	563	0.00440	10	0.0167	247	1.0	247	238
细峪川	0.809	0.000503	15.79	0.126	240	471	0.00430	10	0.0172	207	1.0	207	226
龙门河	0.809	0.000503	22.00	0.148	330	1074	0.00278	14	0.0263	1010	0.95	1063	1065
运河	0.722	0.000449	29.61	0.163	130	627	0.00192	14	0.0376	752	0.90	836	862
曾河	0.416	0.000259	27.32	0.119	1100	3576	0.00120	16	0.0588	4417	0.75	5889	6045
浪河	0.196	0.000122	28.47	0.083	250	567	0.000902	16	0.0768	431	0.75	574	1842

谢谢大家！

