

水庫異重流問題

中国科学院水利科学研究所河渠研究所著
水利电力部

水利电力出版社

前 言

水庫异重流問題这一研究課題是因为黄河三門峽水庫要修建而在 1956 年初提出来的，黄河通过陝县的多年平均輸沙总量为 13.6 亿吨，占黄河年輸沙总量的 84%，因此，在三門峽水庫的上游干支流梯級开发和水土保持工作发生成效以前攔截了黄河大量的泥沙，水庫淤积問題成为了一个严重的問題。需要研究的問題是如何减少水庫的淤积，延長使用年限。当时提出的問題是是否可以利用异重流輸沙和排淤。然而，当这問題提出时許多問題对我们还是不明確的，即三門峽水庫能不能产生异重流和异重流究竟能不能通过回水長达 200 公里的距离。当然，不明確的問題本身就是要研究的問題。根据我們所知，当时对水庫异重流問題的研究的基本情况是这样：

水庫异重流現象是发现在二十几年前〔1〕，从那时起就开始了异重流的研究工作。但是根据手头文献，直到一二年前为止，对水庫异重流产生的基本原因还没有完全一致的意見和有利的論証，至于怎样估算异重流挟沙数量，和在这有异重流产生的水庫的淤积規律与适合于本情况的淤积計算方法等都是悬而未決的問題。这是一方面。另一方面，在洪水和泥沙的来源与性質相仿的永定河官厅水庫，从 1953 年起就开始了水庫泥沙水文觀測，在二三年前，虽然在觀測中发现了异重流，但限于当时国内对本問題的研究水平，也不能肯定并进行分析，从而做出正确結論。而官厅水庫这几年来在泥沙觀測上所累积的大量資料，对分析研究黄河象三門峽水庫淤积和异重流这样的

問題，無疑是有很大科學和實際意義的。

基於以上情況，所以我們在開始進行三門峽水庫異重流研究的同時，就對國內外發現異重流並進行詳細觀測的水庫的觀測資料進行分析。國內水庫是官廳水庫；國外水庫是美國的米德湖。與此同時，我們還進行了一些模型和水槽試驗。通過了這些工作，並由於進行這一工作是和蘇聯列寧格勒工業大學和列寧格勒水電設計院取得密切聯繫並取得他們幫助的，我們不但對三門峽水庫這樣一個具體而複雜的異重流問題有了比較明確的了解，為設計部門提出過一些成果和建議，而且使我們對異重流一般的產生和運動規律等問題的認識有了一定的提高。

在有異重流的水庫中，淤積現象和異重流現象是密切不可分割的，在異重流現象的實質被揭露以後，通過實測資料分析和室內試驗對這種河流的水庫淤積規律也有了比較明確的了解。

由於目前我國的水利建設正以高速度向前發展，為了對今後在多沙的河流規劃和設計中型水庫時提供參考意見，根據我們的工作經驗編寫了這個小冊子，以供各方面參考。本書系集體寫作。參加執筆的同志有侯暉昌、焦恩澤、彭潤澤、黃寅、吳德一和呂秀貞諸同志。

最後必須說明，由於完成本工作的時間比較迫促，特別由於上面所說的，即水庫異重流問題還是很新穎的問題，對一些問題的看法和計算方法還不一定成熟和正確，並且其中還存在不少未解決的問題。因此，希望讀者批評指正，意見請寄北京西郊水利科學研究院河渠研究所。

1958年10月

目 录

一、为什么水庫会发生异重流(异重流产生条件)	5
二、水庫异重流运动的一般規律	14
三、建筑物布置和运转对排泄异重流的影响	19
四、怎样估計异重流挟沙数量和三角洲淤积数量	26
五、有异重流的水庫的淤积規律和淤积計算方法探討	32
六、水庫异重流計算和淤积計算示例	43
七、对在黄土高原和丘陵地区今后修建中型水庫的 规划、設計和調节运用的意見	45
八、結語	49
参考文献	50

一、为什么水庫会发生異重流 (異重流产生条件)

在我国华北和西北地区，一方面在汛期暴雨頻繁，强度很大；另一方面在这些地区有广幅的黄土高原和黄土丘陵，由于过去沒有做好水土保持工作，而且由于黄土缺乏結構，顆粒很細，因此在汛期往往成为严重的水土流失季节。日积月累的水土流失結果一方面造成这些地区的沟壑縱橫，土地破碎，严重影响到这些地区的农业生产的发展；另一方面大量泥沙为汛期的地表徑流帶走，并汇入河流中。这种为汛期徑流所挟运的泥沙，除了在运动、汇集过程中落淤了大部分以外，其余的一部分則流归支干河流，形成这些地区的河流汛期急漲急退的挟帶大量泥沙的洪峯，这現象是众所周知的。

以永定河流域为例：上游年平均降雨量为 300 至 400 公厘，雨量最多的七月約占年雨量的 30% 至 40%，上游的平均侵蝕模数約为 1,650 吨/平方公里/年，而部分地区最高值达 5,000 吨/平方公里/年以上。而官厅水庫以上流域面积为 42,540 平方公里，年平均輸沙总量高达 7,000 万吨，而年平均含沙量則高达 36 公斤/公方。在上述輸沙总量中接近 90% 的泥沙都是由上游暴雨所形成的伏汛所帶來的，汛期洪峯次数很多，但持續時間很短，大洪峯亦只維持一至二天之間，而汛期最大含沙量則可达 400 公斤/公方之多。永定河不但汛期来沙量很大，而且泥沙顆粒很細，中数粒徑 d_{50} 接近 0.02 公厘。

图 1-1 表示官厅水庫进庫站統計水文过程綫(2、3、4)。

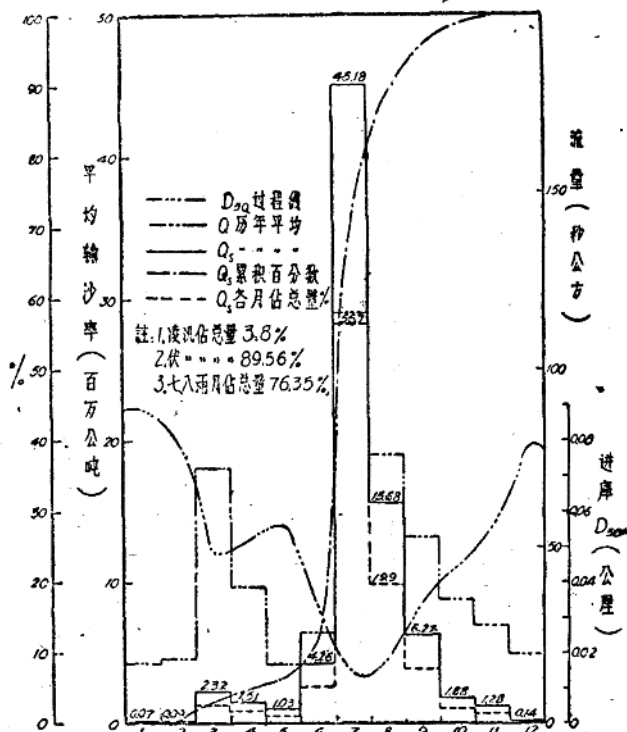


图 1-1 永定河官厅水文站过程线

这种急漲急退的挟帶大量細顆粒的泥沙的渾流洪峯在进入水庫回水曲綫段以后, 就会发生如下現象: 首先是因为水面坡度变小, 过水断面增大, 流速减緩, 因此水流挟沙能力减弱, 其中較粗的顆粒受重力影响沉淀下来, 形成水庫三角洲。其次, 較細的顆粒則进入水庫后仍能悬移渾水中不沉, 这种大量細顆粒悬移結果改变了水流的物理性質, 其中最主要的是造成

渾水比重比水庫的清水比重大。因此，就促使進入水庫的渾水不是逐漸在水庫水体中擴散，而是潛近庫底。由於水庫底部具有一定的底坡（原河床底坡），因此使具有比重差的底部渾流具有一定的位能，以促使它在潛水情況下向水庫前運動，這就是我們一般所稱的水庫異重流。如果這種渾流能沿庫底作長距離運動，並來到水庫壩前，同時，如果這時靠近庫底輸水道閘門開放，則在下游要發現長時期的渾流出庫現象。圖 1-2 是實測官廳水庫異重流縱斷面分布圖。

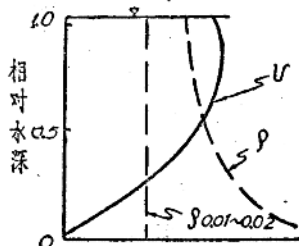


圖 1-2

從上面簡單的敘述可以看出：由於進庫的洪峯和沙峯都發生在汛期，因此異重流的出現也是汛期。在官廳水庫就是這樣。

這種重合原因是因為汛期進庫流量峯和沙峯，包括形成異重流的細顆粒的沙峯，出現時間相應之故。一般說，異重流出現期和汛期是不一定重合的。在分析美國米德湖的進出庫水文資料和異重流資料中我們就發現：米德湖的汛期是在 5、6、7 月，但在这期間不產生異重流；而在 3、4 月和 9、10 月的小洪峯反而產生異重流。其原因主要是汛期入庫細顆粒所占比例很少，不能形成一定的比重差的底部渾流，並在水庫水体中擴散消失之故〔5〕。

在談到水庫為什麼會產生異重流的時候，必須嚴格區分兩個問題。一是渾流潛入庫底的可能性；其次是異重流維持水下長距離運動的可能性。按理說，具有一定細顆粒含沙量的渾流（即粗顆粒在三角洲沉澱以後的渾流），是經常可以潛入水下

的，但是潛入水下的渾流却不一定都能維持長距離水下運動。官厅水庫觀測證明：汛期在庫內發現異重流的次數比來到壩前的異重流或排泄往下游的次數要多。換句話說，有些異重流雖然產生了，但可能經過一段長距離（小于水庫回水長度）以後就滯留和擴散了。底部渾流的運動過程是很複雜的，但從這裡可以看出，上面所說的由於細顆粒懸移其中所造成的渾流比重較 1 為大，在象水庫這樣的小的底坡情況下，僅僅是使渾流能在水下作長距離運動的必須條件，而不是充分條件。以下我們將詳細討論到，決定異重流能否作長距離運動的另一個條件是一定的進庫洪峯總量（在細顆粒含沙量足夠大的前提下）和一定的峯型（即大于某流量的持續時間超過一定值）。

因此，所謂異重流產生條件，其主要內容是異重流作長距離的持續的運動的條件。

根據上面的敘述，除了要有一定的庫底坡外，異重流的產生條件可以歸納為如下四個方面：

(1) 必須要有一定進庫流量值，在一定的庫底坡和含沙量情況下就是一定的異重流的深度和流速值。

(2) 相當於上述流量或大于上述流量的洪峯持續時間。一句話，即決定於一定的進庫峯型。

(3) 最小的含沙量值，即渾流最小比重差。

(4) 包含在異重流里面的泥沙顆粒必須足夠細小。即其泥沙顆粒粒徑應有一最大界限值。

在這裡，庫底渾流依靠懸移在其中的泥沙以改變其物理性質和密度，使異重流運動獲得動力（假定 (1) (2) 條件都已具備）。這是一方面。另一方面，泥沙又依靠渾流的流動所造成的紊動以達到懸移。因此，水庫異重流運動是水流和懸移在其中的泥沙相互作用并互為因果的結果。因為這種原因，就使得

异重流能够在水庫下作長距离(目前記錄長达一百多公里)运动而基本上不发生沉淀。

对实际的水庫异重流观测資料的分析和室內試驗給上面提出的四个方面的异重流产生条件提供了具体数据。

首先談异重流顆粒粒徑最大界限值。

根据水庫异重流观测时取样的顆粒分析結果可以断定：粗顆粒在三角洲前后完全沉淀以后的稳定的級配中，90%以上的顆粒都小于0.015公厘。因此，粗略地可認為异重流所能挟帶的最大顆粒是在0.01公厘至0.02公厘之間。官厅水庫异重流顆粒大小为 $d_{90}=0.01$ 公厘，米德湖的 $d_{90}=0.014$ 公厘。除此之外，顆粒級配曲綫形狀也有分歧。所以形成这种差别，估計除了顆粒分析方法本身存在一定的誤差以外，还因为粒徑小于0.02公厘的顆粒已属于粗粒膠体，受重力的影响很小，至于顆粒級配曲綫不同則可能由于流域泥沙来源不同所致。 $d<0.02$ 公厘的顆粒不受重力影响可以从多方面来証明，最明显的是判断在明流中相当于这种顆粒范围的泥沙含沙量的垂綫分布，黄河水文站測驗和黃委科研所的室內試驗証明：含沙量值是直綫分布，也就是底部含沙量值和水流表面含沙量值完全相同(图1-2)。相当于明流含沙量直綫分布的最大顆粒范围就是相当于异重流所挟帶的最大顆粒范围，即直徑为0.01公厘到0.02公厘范围内的顆粒，这事实說明，异重流的运动是和重力作用微弱的顆粒相联系的。也就是說明流的輸沙能力問題和水庫水下异重流輸沙問題是有質的差別的。

其次，談关于产生异重流的最小含沙量值。要探求这个值在实际上不大可能，但接近此值的产生异重流的实测进庫的含沙量可以根据观测資料求出，其值約在10至15公斤/公方左右。要很准确求出这个界限含沙量值对我们也沒有实际意义，

因为在我国北方多沙河流的条件下，水库异重流产生季节都在汛期，而汛期含沙量总是大于上值，因此从含沙量来看，产生异重流的条件是具备的。而且，由于汛期沙峯也和洪峯一样具有猛漲猛退性質，因此产生异重流的界限也是很明显的。

关于异重流产生条件的第一、二方面，即进庫最小流量值和峯型的問題，則是一个比較复杂的問題，需要在下面作詳細叙述。

由于我国河流汛期含沙量大而顆粒細的特点，所以，异重流发生不发生基本上决定于进庫洪峯。以下我們將要談到，异重流的阻力損失比較大，因此虽然急漲急退的洪峯在进庫断面能够給予异重流运动以不穩定的性質，但經過一定的傳播距离以后，异重流則成为相当穩定的运动。所以，进庫有不同峯型，則在下游(异重流的)应有相当的穩定流量值和持續時間值。在泄水閘开放时出庫流量决定于壩前水位；而异重流在庫內的持續時間則表现为渾水出庫持續時間。根据官厅水库的实测成果分析，我們的确找到了进庫洪峯和渾水出庫的持續時間的关系，如图 1-3。

上图中横座标代表进庫一次洪峯的洪水总量，單位为 10^6 公方；縱座标为渾水出庫持續時間，單位为小时；參变数为水库回水長度(由于官厅水库在开始運轉的头兩年水位漲落不定，所以从官厅的資料得到了一系列的水库回水長度值)。

进庫洪峯总量决定异重流出庫持續時間的實質是能够产生异重流的进庫流量持續時間决定异重流出庫的持續時間。这“實質”我們是这样揭示出来的：首先，根据官厅水库每次产生异重流的进出庫水文过程綫，可以大致决定在洪峯上漲时当进庫流量在 ≥ 200 公方/秒时开始产生异重流；而在 $Q_i \leq 50$ 公方/秒时則异重流消灭(相当的进庫河寬約 950 公尺)。根据这

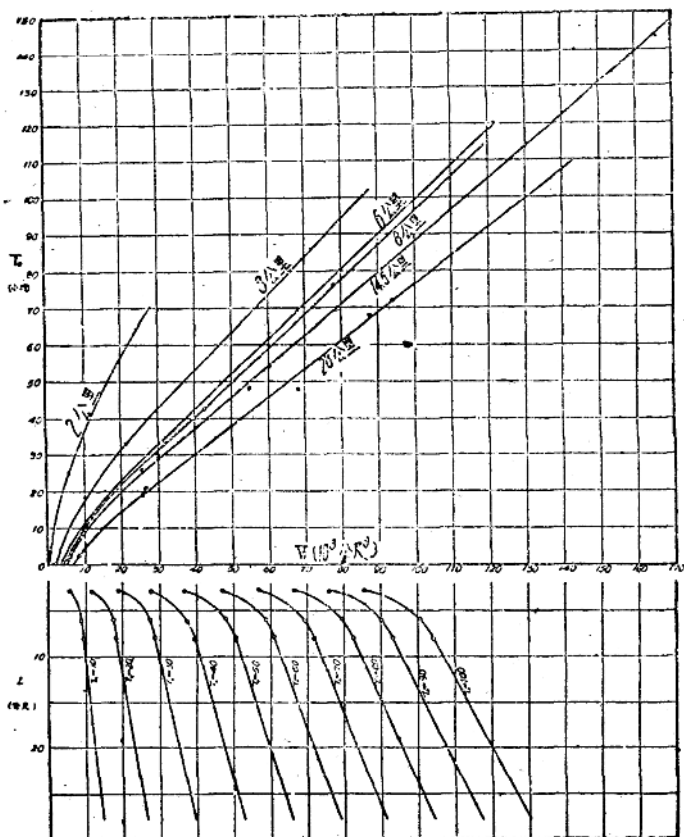


图 1-3

两个数值我们可以找出每一次进库洪峰的持续时间，以相应于以上 Q_1 值进库持续时间和异重流出库持续时间为纵横座标，仍以回水长度为参变数，可以得出如图 1-4 的关系线；而且一次进库洪水总量和每次的进库持续时间也成—很好的关系（图

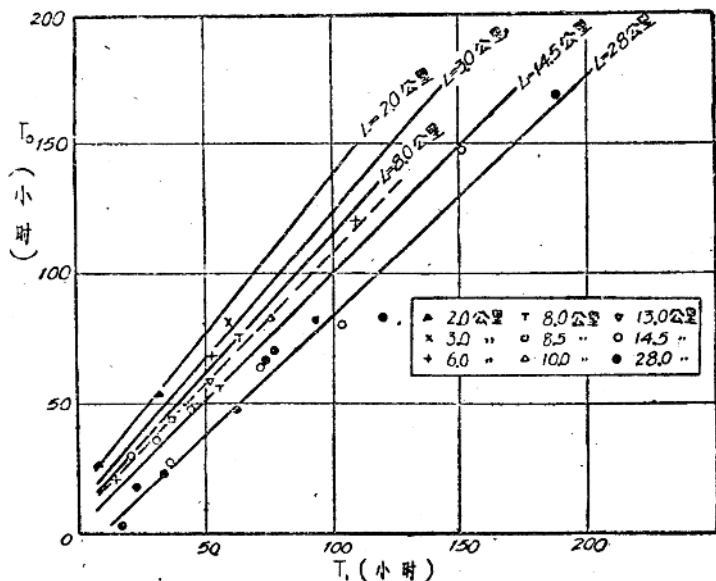


图 1-4

1-5)。

图 1-4 关系只用作定性说明，问题是 T_1 无法严格确定和准确计算出来，但即便如此，也可由此看出，由于进库洪水总量有其一定的进库洪峰持续时间（在产生异重流的角度来说，官厅洪峰是几何相似的，虽然每次洪峰外型大不相同），而一定的进库洪峰应该决定异重流出库持续时间，因此，一次进库洪峰总量应该决定出库持续时间。

顺便说一下为什么洪峰上涨时产生异重流所需的进库流量比在洪峰降落时维持异重流运动所需的流量为大的问题，我们的解释是异重流开始产生需要起动，而在产生后则由于异重流

慣性的作用，使得在較小流量時仍可維持運動。

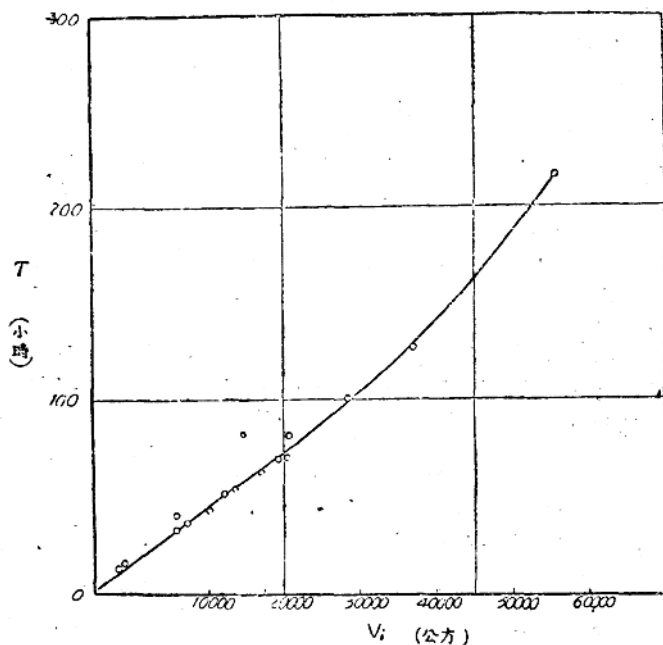


图 1-5

不管是图 1-3 或图 1-4 都表明：异重流出庫持續時間对同样的进庫水文条件但不同的回水長度是不同的；回水愈長，出庫持續時間愈短。这就是說回水長度將影响到异重流水量的滯留、扩散損失值的变化(詳下)。

在上面我們提出异重流产生条件的四个方面时，还只是推断而事先沒有充分的根据，而現在官厅的实测資料分析图 1-3、1-4 完全証明这四方面的不可缺一，尤其关于产生条件的(1)、

(2)方面,这就实际批駁了那些認為异重流运动的动力仅仅是由于本身“异重”和水庫底坡的存在的不正确观点。

关于图 1-3 和图 1-4 的其他性質將在另节叙述。

二、水庫異重流运动的一般規律

在分析水庫为什么会发生异重流的时候,事实上已涉及到某些异重流运动規律,但在本节中我們拟再詳細的談一下。

在上节我們已經談过,水庫异重流的发生需要具备四方面的条件:一是洪峯总量;二是进庫流量必須大于某值;三是顆粒足够細;四是一定数值的进庫含沙量。四个条件可以归納为兩方面:一方面是进庫等于和大于某流量的持續時間必須大于某時間值;另方面是必須要有一定的比重差(悬移在其中的細顆粒所造成的)。这两方面对維持异重流的运动是二者不可缺一的。清水洪峯不会产生异重流,这是常識;同样持續時間不長的洪峯也不会产生异重流,后者則是水庫实测資料所証实的。为了进一步探討后述条件,我們仍回来分析图 1-3。利用此图資料,以出庫持續時間 T_0 为參变数,我們可画出在不同 T_0 值时需要洪水总量 V_0 值随水庫回水長度 L 的变化曲綫(图 1-3 下部),曲綫斜率

$$\frac{dV_0}{dL}$$

就代表由于回水長度伸長或縮短所需增減的进庫水量,此值随着 T_0 增大而增加。

从图上曲綫趋势可看出:不同回水長度的曲綫并不是通过原点,而是随回水長度而改变地与横座标交于不同点。这就是說和 $T_0 > 0$ 一样,当 $T_0 \rightarrow 0$ 时的曲綫斜率也是大于 0 的。即:

$$\left(\frac{dV_i}{dL}\right)_{T_0 \geq 0} > 0 \quad (2-1)$$

由于在 T_0 很小时观测结果很少，曲线族与 V_i 轴相交的比較准确的位置不能决定，所以沒有將 $T_0 \rightarrow 0$ 时的 $V_i \sim L$ 綫画在上面。

$T_0 \rightarrow 0$ 的意义是异重流刚好抵达坝前即已停止运动，亦即相当于水庫产生异重流的极限状况。

式 (2-1) 說明在任何情况都有一部分异重流要滯留庫內，这事实本身就說明异重流的运动的动力問題：异重流运动除了依靠由于本身密度差(由悬移在其中的細顆粒泥沙所造成的)和一定的水庫坡度以外，即依靠重力的分力以獲得运动动力以外，还依靠超过某值的进庫洪峯总量(在一定的回水長度情况下)，而超过一定值的洪水总量在实質上是要求在垂直于异重流过水断面方向上有一定的压力差才有异重流的运动。因此，归根到底异重流的运动是重力和压力同时存在并克服阻力的結果。实测成果的分析所表現出的异重流运动所依靠的动力規律，推翻了一般認為只有重力才是运动主要动力的見解。

而且，对我們的水庫异重流的具体情况來說，比重差在汛期是經常具备的，因而产生异重流的运动动力就主要地决定于异重流的压力差，即进庫洪峯总量。当某压力差值作用時間短于异重流沿水庫底运动到坝前的時間时，异重流在坝前或下游即不能发现；如長于后者時間时，即可发现。不管是長于或短于后者時間，当上游供应停止以后，即当压力差取消以后，异重流的运动便很快停止。

根据这种見解，还可解釋为什么在图 1-3 中出庫持續時間愈大时曲线的斜率 $\frac{dV_i}{dL}$ 愈大。 T_0 愈大只不过是反映出在 T_0 时

間內通过异重流流量愈大(因为 T_0 愈大反映出 T_1 愈大; 而 T_1 愈大則相当于 V_1 愈大, 即进庫平均流量亦愈大, 而进庫平均流量則决定异重流流量)。因而在水庫上游停止供应以后的异重流單位長度滯留量亦愈大。

尽管水庫异重流在形势上并在許多方面的性質上和明流有許多共通的地方〔8〕, 但在运动动力方面和明流(主要受重力作用的)是有所区别的。

根据图1-3可以計算出官厅水庫各庫段的对不同 T_0 的 $\frac{dV_1}{dL}$ 的平均值。从图可見, 当回水在8公里以上变化时, $\frac{dV_1}{dL}$ 为常数, 这反映这一段河段比較平直, 异重流过水断面变化不大, 而事实上这一庫段也的确是比較平直(官厅地形图, 見〔2〕)。根据計算从图1-3所得的 $\frac{dV_1}{dL}$ 值和根据实测异重流和水下地形資料計算所得單位長度中异重流留蓄量很接近〔4〕。

在水庫回水長度为2~8公里之間时, $\frac{dV_1}{dL}$ 不是常数, 随回水長度的变化差別很大。在这里可能的原因有兩方面: 一方面是在这一庫段(2~8公里)是水庫从縮狹段到扩大段, 因而不同回水長度所引起的滯留量的差別应比平直段的差別要大, 同时回水中末端在扩大段的即异重流潛入处的扩散損失也要比在縮狹段的損失要大。另方面可能的原因是: 在回水長度为 $L < 8$ 公里时异重流还没有完全稳定, 一部分不能为稳定异重流所挟帶或应在水庫三角洲和沿程沉淀的部分粗粒泥沙將随泄水出庫。而在 L 为8公里左右时則异重流已稳定, 因而 $L < 8$ 公里的出庫持續時間將比异重流在出庫前已达稳定的出庫時間要大为延長, 要提前和拖后。以下要証明原因是前者而不是后者,

亦即要証明官厅水庫异重流稳定長度大于8公里。

关于异重流的稳定長度大于8公里的問題，可以从异重流沿程泥沙因子变化資料分析判断〔3〕，但也可以从进出庫持續時間的关系来判断。

从图1-4可見，实测点及其联綫基本上可以分为兩类：一类是 $T_0 < T_1$ ；另一类是 $T_0 > T_1$ 。对在抵达坝前以前已达稳定的异重流〔3〕，应有 $T_0 < T_1$ ，这两者時間的相差，即 $\Delta t = T_1 - T_0$ ，应为滯留异重流所需要的时间，即异重流从庫首潛入直到坝前所需的时间。对在抵达坝前以前还没有稳定的异重流，应有 $T_0 > T_1$ ，这两者的界限，即 $T_1 = T_0$ ，在图上相当于回水長度 $L = 14.5$ 公里，也就是說，在这長度异重流还没有完全稳定，因此 $L = 8$ 公里的回水長度在官厅水庫条件下异重流应还没有稳定。当然由于产生异重流的上下限进庫流量不能精确决定，即 T_1 是不能很精确决定的，但图1-4直綫族的趋势是不容怀疑的。

因此，在 L 在8公里附近庫段 $\frac{dV}{dL}$ 增大，（1）是因为过水断面变化很大，使渾流进庫扩散损失增大；（2）同时也使异重流沿程滯留损失水量值增大。总的說是受水庫地形的影响，但是这两者之中主要的原因又是前者，因为渾流进庫损失是发生在洪峯漲落过程中发生异重流的整个过程，而滯留损失水量则为异重流停止供应以后一次损失水量，但詳細数字还有待于計算。

从以上的分析可以看出，水庫进庫地点的地形对异重流的形成影响很大，如果回水曲綫末端是在狹谷，則异重流进庫水量损失值較小，如在寬广平坦河槽，則损失值較大。

水庫异重流区别于明流的另一个重要标志是：在稳定情况