

苏联專家<sup>К、И、</sup>罗辛斯基  
<sup>А、Д、</sup>哈尔杜林

# 关于黄河下游河床演变及河道 整治問題的發言匯編

( 内部資料 注意保存 )

水利水电科学研究院河渠研究所 黄河下游研究組整理  
黄河水利委员会水利科学研究所

一九五九年

# 前 言

## 李 賦 都

黄河下游河床演变和河道整治的研究是中苏122项技术合作项目中有关水利科学技术研究的項目之一。根据中苏協議：苏联專家K.И.罗辛斯基和A.П.哈尔杜林同志于1958年10月来华帮助我們研究这个問題。兩位專家从北京乘飞机到西安一路从飞机上看了黄河中游黄土地区的情况，參觀了武功水利科学研究所，又去三門峽參觀了正在施工中的三門峽水利樞紐工程，然后以21天的時間查勘了黄河下游河道。專家最后在郑州黄河水利委员会以39天的時間了解了我們对黄河下游河道已有的觀測和科学研究資料，具体地指导我們进行了黄河下游河床演变和河道整治的研究及规划設計工作，并对黄河下游演变和整治作了綜合性的發言，同时还作了有关河道水流及泥沙运动，河床演变……等問題的学术講演。在这个時間里專家还亲自主持进行了黄河下游河床“自然模型”的試驗研究工作。現在我們將專家的学术講演，有关黄河下游問題的發言以及主要工作的內容編成这本文集。

黄河下游从桃花峪到海口長約700余公里。由于黄河流經中游的黄土高原区，土壤侵蝕很严重携帶着大量的泥沙，淤积在下游兩堤之間的河床上，所以河床逐年抬高成为“悬河”。黄河下游从桃花峪到高村兩岸堤防距离較远，河床寬淺，沙灘很多，水流分歧，形成了“游蕩性”河段。高村以下堤距較近，河槽比較深窄，灣曲特多，形成了“灣曲性”河段。因为黄河善淤，善变洪水力猛，加以历代反动統治階級不重視黄河的治理，堤防失修所以在历史上黄河便成为我国的一条“害河”，下游决口泛濫極為頻繁，給沿河人民帶來了严重的災难。

自从解放以来，治黄事業掌握在人民的手里以后，在各級党政的英明领导下，黄河的面貌完全改变了。在下游我們战胜了各年的洪水，安渡了12年的伏秋大汛。1958年發現了比1933年潰决泛濫50余处的特大洪水还大的洪水，也为人民所征服，沒有發生决口。經過了仅仅四年的積極勘测与研究，我們在1954年就拟就了根治黄河水患和开发黄河水利的规划。偉大的三門峽水利樞紐工程將于1960年提前建成，發揮它在防洪，灌溉發電等方面綜

合利用的巨大效果。为了貫徹建設社会主义的总路綫，加速社会主义的建設，黄委会又于1958年根据周总理的指示，在原黄河流域规划的基础上，依据了新的發展和要求，在各省区的密切协作和帮助下，編制了以根除黄河水害，充分利用黄河水利为主要任务的水土保持，三門峽以上干支流水庫和黄河下游綜合利用的三大规划。

当前，在党的建設社会主义总路綫的鼓舞和工农业生产大躍进的形势下，黄河流域的人民掀起了声势浩大的水土保持运动，开展了雄偉壯闊的引水上山，兴修水庫等水利和治黄工程。在黄河下游：仅仅在1958年的一年中河南山东兩省就修建了引黄灌溉閘10处，連同以前修好的共有14处，使历史上只給人民帶來灾难的黄河反而为人民所利用。不久以后桃花峪水庫和引汉济黄工程都將要逐次实现；这样黄河下游的洪水和凌汛災害就会彻底消除，广大华北平原的灌溉、發電、航运以及工业給水等事業將获得大規模的發展。

我們都知道：三門峽水庫建成后从水庫下泄的水是比較清的水。黄河下游河水的含泥量將会大大的減少。这就会造成下游河道在較長河段里冲深下切的現象。現在下游沿河已經修建的許多灌溉引水閘在將來黄河水位降落的情况下，將会引水不足或者引不上来水。为了在各引水閘口保持适当的水位以保証各閘的灌溉引水，在設計各閘的时候就已考虑到要在各閘口下游附近的黄河河床里修建攔河壩閘。目前我們已經初步确定修建崗里，东壩头，彭楼、位山，灤口，王旺庄等六个水利樞紐工程，除防止各引水閘口处河床下切，保証灌溉引水外，还可得到發電的利益。

随着黄河下游各水利樞紐工程的修建，黄河下游河道將要發生相应的变化。在两个水利樞紐之間的上部有一段自由河段。在这一段里，河槽將發生橫向摆动和縱向下切，而在樞紐工程的壅水段將發生河床淤积的現象。这两种現象都会严重地影响着兩岸堤防和灘地农田的安全和黄河下游的航运。根据以上的情况研究黄河下游各水利樞紐工程建成后自由河段的演变和樞紐工程壅水段淤积的情况，樞紐排洪閘对于冲刷淤积所發生的效果，固槽护灘，維持航深等所需要的整治措施以及下游各項水利工程，如水利樞紐、运河穿黄等的布置，防淤和与河道整治如何相互配合等問題便成为当前迫切需要解决的問題。以上这些問題在我們水利建設事業中还是一个比較复杂的，新的問題。为了实现黄河下游綜合利用的宏偉规划并把这一规划作好，中央人民政府將黄河下游河床演变和河道整治的研究列为中苏122項科学技术协作項目之一是非常需要的。

苏联專家罗辛斯基和哈尔杜林在黄河下游河床演变和河道整治問題上提出了很多新的意見：他們把河流按着他們的类型分成游蕩性、周期展寬性和灣曲性的河流，并对各种类

型的成因作了很詳密的分析。从前我們在观测和研究河床演变工作中对于河床地質重視的很不夠。在这一方面專家指出了河床質对河床演变的影响和明悉河床地質对河流研究的重要性。在河流試驗研究方面專家建議采用模型試驗与計算相結合和“自然模型”試驗的方法和方向，并且具体地指导了黄河下游河道縱向演变預报的計算。对黄河下游的整治，專家認為首先应当利用各种护灘工程縮小游蕩寬度然后随着河槽的下切逐步实施，各項固槽工事，在樞紐工程的布置和运河穿黃等問題方面專家都提出了很寶貴的意見。

黄河下游河床演变和河道整治的研究与河道整治的规划工作，虽然經過專家的指导与帮助，使得我們获得了进一步的認識，但对这个問題还没有得到最后的解决。根据我們原来的計劃和專家提出的有关試驗与研究的意見，我們現在正在花园口和郑州进行黄河下游河床演变和各种整治措施的大模型和室內模型的試驗。根据今年的協議苏联專家于今年第四季度还要来华繼續协助研究这一問題。鑒于黄河下游河床演变与河道整治問題对于其他类似河流的研究也具有重大的意义，同时为了讓我国專家和水利工作者也能够帮助和指导我們作好这一研究和规划工作，并且达到交流經驗提高我国科学技术水平的目的，我們認為編輯刊印这本文集是很需要的。

本文集共有三大內容：（一）專家学术講演：包括 5 个講題；（二）專家对黄河問題的零星發言及綜合發言；（三）專家指导工作的主要内容介紹。第（一）和第（二）个內容是根据当时的記錄整理編写的。第（三）个內容是根据專家指导工作的內容，分別由有关同志根据工作中的体会比較系統地編写而成的。由于我們的水平很低，在記錄的整理及指导工作內容編写方面都有体会不夠的地方，希望各方面在閱讀或討論以后提出意見。

黄河下游河道的整治是开发黄河水利的一个重要組成部分。黄河下游河床演变及河道整治的研究是治黄工作中的一个重要任务。中苏技术合作研究这一問題已为这个問題的解决創造了極为有利的条件。我們相信在党和政府的英明领导下，在苏联專家和国内專家的具体帮助下，黄河下游河道將迅速改变过去的面貌，成为一条整齐的美丽的为广大人民造福的河道。

# 目 录

## 前 言

第一章 学术講演 .....	( 1 )
第一节 河道水流运动的特点和泥沙运动 .....	( 1 )
第二节 河床演变 .....	( 16 )
第三节 水工建筑物对 河床的影响及在引水建筑物 附近的泥沙和河床調整 .....	( 32 )
第四节 一般河床变形計算及其模 型試驗 .....	( 43 )
第五节 水工試驗工作的 实践 .....	( 52 )
第二章 对黄河下游整治問題的綜合發言 .....	( 58 )
第三章 在查勘途中 和在郑州工作期間的零星發言 .....	( 64 )
第四章 指导工作 .....	( 73 )
第一节 河床縱向变形略估方 法 .....	( 73 )
第二节 河床变形計算方 法 .....	( 81 )
第三节 河工模型試驗的自然模型 法 .....	( 98 )
第四节 对河床整治的意見 .....	( 102 )

# 第一章 学术講演

## 第一节 河道水流运动的特点和泥沙运动

### 一、河道水流运动的特点：

河床内水流的运动，可分为两种：(1)一般运动，亦即平均运动；(2)水流的内部运动，一般运动即平均运动，是水力学中研究的问题，水力因素是经过平均后的，个别质点的运动，可能与平均运动有显著的偏离，这就需要单独提出来进行研究。天然河流的平均运动，一般都是不均匀流，很多情况下也不是稳定流，这在水力学中已讲的很多，这里不多谈。现在只讲水流内部的运动，因为它对河床演变有影响。

水流内部运动，可分为三种形式：1.紊流，2.环流，3.漩涡流或回流，现分述如下：

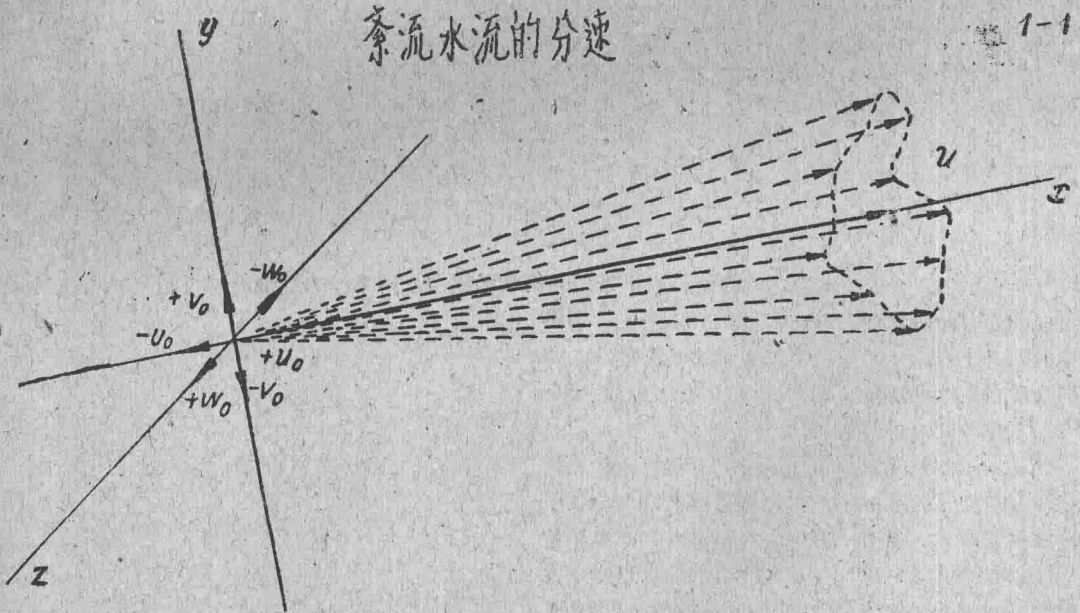
#### 1.紊流

测量空间一点的瞬时流速如图一，瞬时流速的向量，可连接成一不规则的锥形，把所有的流速向量平均，可得平均流速向量  $\bar{u}$ ；然后转移坐标，使x轴与  $\bar{u}$  平行，则得一组新坐标 (x, y, z)，将流速向量投影在坐标轴上，即得：

在x轴： $\bar{u}_x + u'_1, \bar{u}_x + u'_2, \dots$ ，

在y轴： $v'_1, v'_2, v'_3, \dots$ ，

在z轴： $w'_1, w'_2, w'_3, \dots$ ，



$u_x$ ——在x轴上各流速向量的平均向量， $u'_1, u'_2$ ——附加的脉动向量；在y轴及z轴因无平均流速向量，故仅有附加的脉动向量。这些附加的脉动向量，围绕水的质点，左右上下，有正有负，但总的流向是沿着平均向量流动。

在x方向的平均流速  $\bar{u}_x$ ，是某一质点的平均流速，与水力学中的断面平均流速不同。

在x方向正负脉动流速的平均值为： $+\bar{u}'$ ， $-\bar{u}'$ ，

在y方向正负脉动流速的平均值为： $\overline{+v'}$ ， $\overline{-v'}$ ，  
 在z方向正负脉动流速的平均值为： $\overline{+w'}$ ， $\overline{-w'}$ ，  
 正负脉动流速的时间平均值应相等亦即：

$$\begin{aligned} \overline{+u'} &= \overline{-u'}, \\ \overline{+v'} &= \overline{-v'}, \\ \overline{+w'} &= \overline{-w'}. \end{aligned}$$

一般形式为：

$$\overline{u'} = \frac{1}{T} \int_0^T S_0^t u' dt = 0,$$

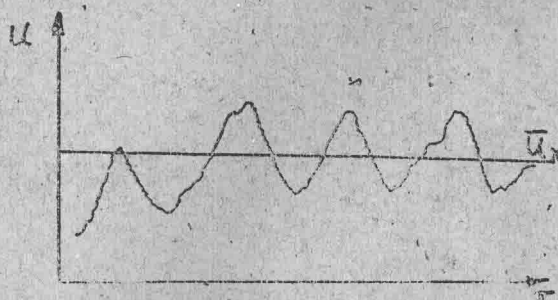
$$\overline{v'} = \frac{1}{T} \int_0^T S_0^t v' dt = 0,$$

$$\overline{w'} = \frac{1}{T} \int_0^T S_0^t w' dt = 0.$$

从上式可知，流速脉动的平均值等于零。因而脉动值对水流的平均方向没有影响，但对于某一瞬时的流速值有影响，因为在某一瞬间，它偏离了平均流速。如果没有脉动流速，便没有泥沙的悬浮和河床的变形；另外它还影响到水流的阻力，因此也影响水流的性质。所以对水流的紊动现象应该进行深入的研究。

上述这种水流现象，一般称为紊动。紊动交换流速代表某一瞬时的流速偏离平均流速的程度，这个现象也可用图 1-2 中瞬时流速随时间的变化来表示；但这个图仅能表示流速脉动的量的变化，没有表示出方向上的变化。根据雷诺的试验，水流的外在形象有两种：一为层流，水流质点为直线运动；一为紊流，水流质点运动非常紊乱，很难找出质点运动的规律。

1-2



表示紊流的性质（脉动的强度）一般是用均方差的方法：

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{u'^2}},$$

$$\sigma_v = \sqrt{\overline{v'^2}},$$

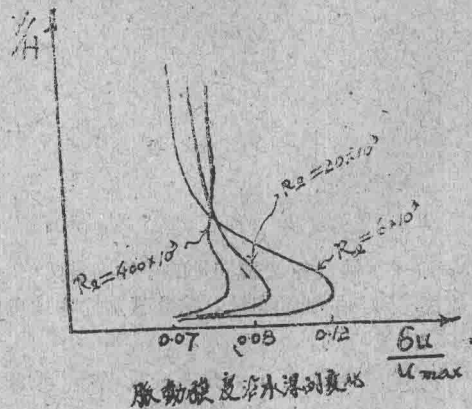
$$\sigma_w = \sqrt{\overline{w'^2}}.$$

近几年来，由于航空方面的发展，对于紊动的研究已较多，但紊流的理论仍是很不完整的，仅有较多的试验资料；所以直到现在，对使水流产生脉动的基本原因还不清楚，一般都以水流的不稳定性，利用偶然的扰动来解释；事实上产生紊动的基本原因，还是可以找得出来的。

1-3

从试验资料得出，脉动的强度与流速成正比，而与雷诺数的关系不大，它与雷诺数的关系，仅反映在其流速上。图 1-3 为明斯基得出的资料，雷诺数的变化由  $6 \times 10^3$  至  $400 \times 10^3$ ，而曲线的基本形式是相类似的；在空气中进行试验，也得到类似的结果。

萨凡宁在维里堪诺夫的领导下，曾作过如下试验：在水槽中置一小管，放入有色液体（图 1-4），在断面上测量液体质点偏离中值的情况，得出垂直方向流速脉动的均方差与流速及水深的关系式



为：

$$\delta_v = \frac{0.68ucP}{H^{0.22}}$$

式中长度单位以公分计（系数可能有误）。由此说明，水流脉动不但与流速有关，而且也与水深有关；这在研究壩下游的消能，局部冲刷，及海漫设计时有很大关系。由于水深不同，脉动亦不同，因此进行壩下游的局部冲刷试验等就会有一定的困难。

根据明斯基的试验资料（图 1-5），垂向脉动强度

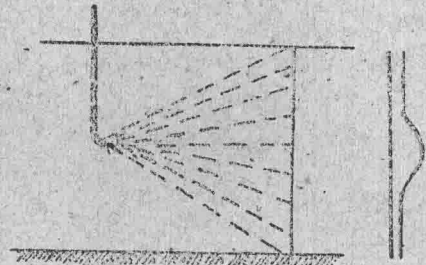
$\frac{\delta_v}{u_{max}}$  沿水深变化不大，只在近壁处略有改变；但纵向紊

动强度  $\frac{\delta_u}{u_{max}}$ ，愈向下愈增大，只在近壁处才有所减小，脉动强度沿水深变化由 0.04 至 0.08；因此在进行流速试验时，靠近墙壁处的测验历时应适当的加长，不然当地的紊动强度较大，所得的结果便无代表性。

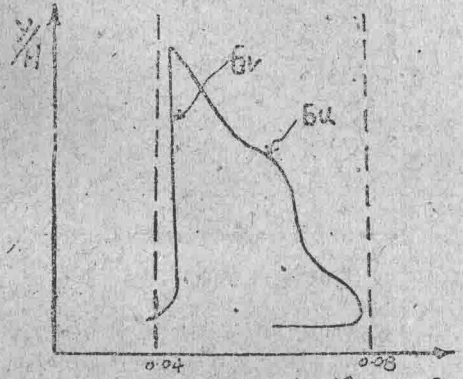
费尔顿及达乌斯曾会在管流中进行试验（图 1-6），用显微镜观测了接近光滑边壁处的水流质点运动轨迹；可以看出在靠近边壁的地方，运动轨迹与管壁平行（貌似层流），愈离边壁愈远，运动的轨迹愈无规律。从正面去观察，当  $y/h=0.006$  时（管子直径为 3 公分），水流质点轨迹仍是弯曲的；由此可见，即在十分靠近管壁的地方，水流仍保持相当的紊动。

古沙绍克在研究土壤侵蚀问题时，曾用显微镜观察边壁处的水流运动，发现在近壁处土壤粒子的周围，仍有紊动的漩涡。

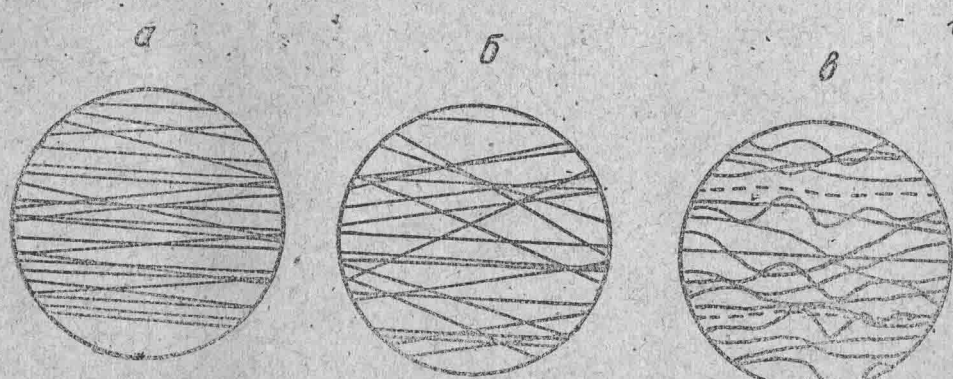
水流的脉动情况，在扩散与收缩处也有所不同。当壩建筑在可冲刷的土壤上时，壩下游会形成深坑（水流扩散），这时需要研究水流的脉动特征。费德曼曾在台阶形的水槽中，作过试验（图 1-7），由



流线的扩散



垂向纵向脉动  
强度沿水深的变化



在紊流压力水流中最细固体颗粒的轨迹

- a. 一直径接近管径的水层附近轨迹；
- b. 一平行于墙壁的截面，距离墙壁为断面一半的 0.05；
- c. 一平行于墙壁的截面距离管为断面高度一半的 0.006



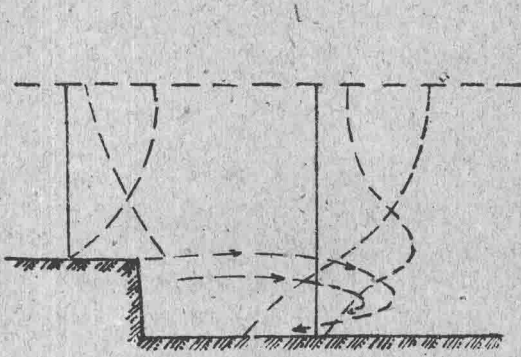
于水流的扩散，流速减小，但脉动强度增加2—3倍；也会在斜坡上及冲刷坑中进行过试验，都证明在扩散段内紊动强度大大增加。在收缩情况下，美国和英国曾作过试验，证明紊动是减弱的。

## 2. 环流:

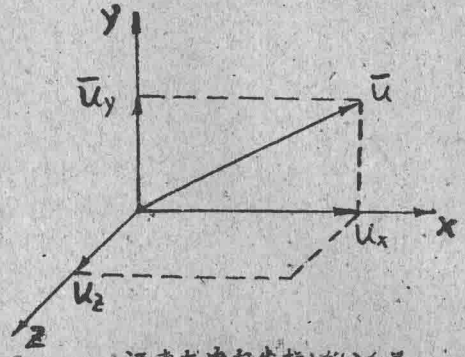
设X轴与水流的一般方向重合(图1-8),平均了的流速向量 $\bar{u}$ 可在这一坐标系中分成三个向量, $\bar{u}_x$ ——沿水流的一般方向, $\bar{u}_y$ 、 $\bar{u}_z$ ——垂直于水流的一般方向; $\bar{u}_y$ 和 $\bar{u}_z$ 既然垂直于水流的一般方向,所以只能在横断面内沿封闭曲线流动。

1-7

1-8



非恒定涡旋



流速在空间坐标上的分量

$\bar{u}_y$ 及 $\bar{u}_z$ 就是环流的流速分量,它作用在 $\bar{u}_x$ 上,就使水流成螺旋形向前运动(图1-9)。

环流与脉动的区别是:脉动流速是瞬时的,其时间平均值等于零,环流流速本身已经是平均流速,其断面平均值为零;环流流速可用一般流速仪测出,而紊流则不能;环流流速在较长时间以内能保持不变,紊流在每一瞬间都不相同。

产生环流的力是离心力,及由于地球转动而产生的科里奥利斯加速度所引起的力。作用在弯道上单位水体的离心力为 $\frac{r}{g} \frac{u^2}{R}$  (R为弯道的曲率半径),在离心力的作用下,使横断面水面倾斜而产生重力的水平分力——向心力。向心力与离心力,在某一点上保持相互平衡;但由于垂线上的流速分布不均匀,离心力便也不均匀,而水面倾斜所产生的向心力,沿垂线是不变的,所以由于两力沿垂线作用的不平衡便产生环流。

环流现象在自然界是存在的,如观测弯道水流,表面水流趋向凹岸,河底水流趋向凸岸。在伏尔加河直河段观测结果,表面水流趋向右岸,河底水流趋向左岸,这是科里奥利斯力作用的结果。在北半球表面水流趋向右岸,河底水流趋向左岸,南半球反之。纬度愈大,这种力量作用愈大,在赤道处等于零。

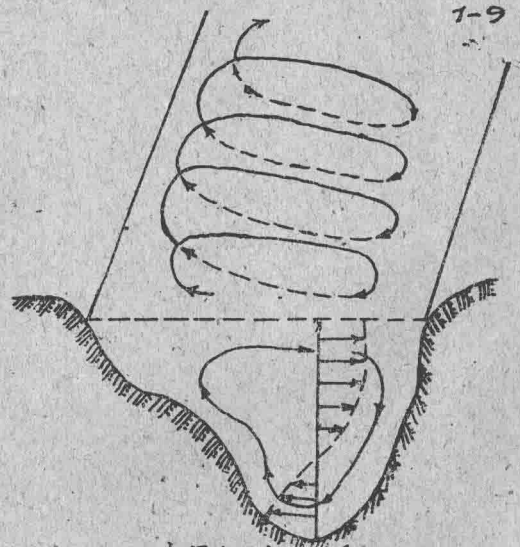
$$\text{离心力: } \frac{r}{g} \frac{u^2}{R},$$

$$\text{向心力: } ri,$$

$$\text{剪力: } A \frac{d^2 u_R}{dy^2}.$$

式中A为紊动系数,  $u_R$ 为横向流速。

$$i = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{r}{g} \frac{u^2}{R} dy$$



水流的螺旋形运动

在平衡状态下:

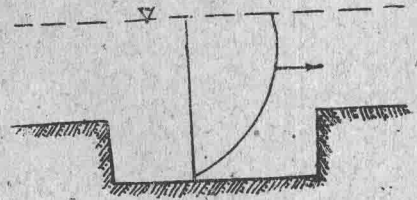
$$\frac{r}{g} \frac{u^2}{R} - \frac{r^2}{H} \int_0^R \frac{Hu^2}{gR} dy - A \frac{d^2 u_R}{dy^2} = 0$$

要解这个方程式, 需要知道垂线流速分布公式, 应用公式的不同, 得到的紊动系数A值也不同, 建議采用罗佐夫斯基的对数流速分布公式。

要發生环流, 一定要有較高的河岸, 这样才能形成封閉系統, 产生橫比降。若在自然河流中沒有較高的河岸, 則水流漫灘, 不可能产生較大的橫比降, 因而环流比較弱(圖1-10)。在寬淺河道中, 环流可以自由形成, 不产生使环流本身減弱的力量; 但在窄深的河道中, 环流的垂向流速加大了水流在垂直方向的动量傳播, 使垂线的流速分布趋于均匀, 因而环流減弱。

圖 1-10

1-10



水流漫滩后环流减弱

### 3. 漩渦流:

漩渦流的理論目前研究的很少, 在沙浪后面及河岸边都能产生漩渦流(圖1-11), 河岸旁边的漩渦流, 对河床演变影响不大; 但沙浪后的螺旋流則不同, 它可把泥沙帶向对岸。

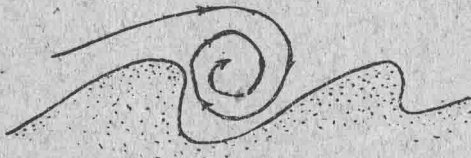


圖 1-11 (a)

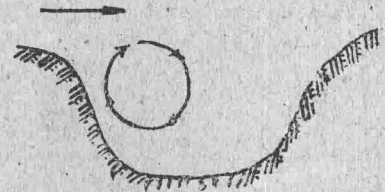
## 二、泥沙运动:

### 1. 底沙与悬沙的界限:

从試驗室水槽試驗知道, 当流速增加超过泥沙起流动流速时, 个别泥沙顆粒开始滚动; 流速繼續增加时, 滚动的泥沙顆粒数量增加, 个别的泥沙顆粒由滚动而跳躍前进; 無論是均質的或非均質的泥沙, 滚动的只是表面的一層。当流速进一步增加时, 跳躍状态的泥沙顆粒数量增加, 其运动方式是跳躍后, 經過一段滚动再跳躍, 在此情况下, 有些跳躍的泥沙有可能悬浮到水中去。

沙脊及河岸边的漩渦

圖 1-11



在1935年, 我曾由沙浪的运动来研究推移質的輸沙量, 这是在伏尔加河, 由潜水員在河底測量的, 因而对底沙的运动情况看得較清楚, 并得出水深与單寬輸沙率的关系如圖1-12。測驗时比降假定不变, 故水深的大小即代表推移力的大小。

为了說明物理現象的本質, 曾采用岡查洛夫对泥沙运动的观点(1920—1930年), 用下列方程式来闡明所得的結果:

阻止泥沙运动的磨阻力所作的功为:

$$\bar{n} (r_H - r) \frac{\pi d^3}{6} v_H \text{ 或 } t (r_H - r) \bar{n} d v_H$$

水流推移力所作的功为:

$$\bar{n} [r_H l - (r_H l)_0] V_0$$

式中:  $(r_H - r) \frac{\pi d^3}{6}$  —— 泥沙顆粒在水中的重量

$r_H, r$  —— 分别为泥沙及水的單位容重。

$\bar{n}$  —— 單位面积上泥沙顆粒的数量,

$V_H$ ——泥沙运动速度，

$f$ ——阻力系数，

$rHl$ ——水流推移力，

$(rHl)_0$ ——临界推移力，

$V_0$ ——河底流速，

$\beta$ ——泥沙密实系数，

$\alpha$ ——考虑水流作用力未全部作用在泥沙颗粒上的系数。

令阻止泥沙运动的磨阻力所作的功，与水流推移力所作的功相等，则可得泥沙运动的速度，把这一速度乘以泥沙在河床表面的密实系数，及运动层的厚度（ $\approx d$ ），即得单宽推移质输沙率。

上面是采用阿奎洛夫的论点，我们可以作如下的修改：因为水流作用于泥沙颗粒的力，不是平行于河底（圖 1-13），而是与河底成某一角度。洛西耶夫斯基曾作过研究，这个力可分为两个分力：一为牵引泥沙的力，一为

使泥沙悬浮的悬浮力，后者减轻了泥沙的重量。既然悬浮力和牵引力，都是作用在泥沙颗粒上的分量，因而两者之间成一定的比例关系；我们可以用同样的公式来表示这两种力，所不同的只是公式中的系数。兹分别以  $fHl$  及  $\eta Hl$  表示水流的牵引力及悬浮力；根据圖 1-13 中的力的平衡得出：

$$(P_1 - P_0) V_0 = f(\bar{W} - P_2) V_H,$$

$$\text{则： } V_H = \frac{(P_1 - P_0) V_0}{f(\bar{W} - P_2)}$$

式中：

$P_1$ ——水流推移力，

$P_0$ ——临界推移力，

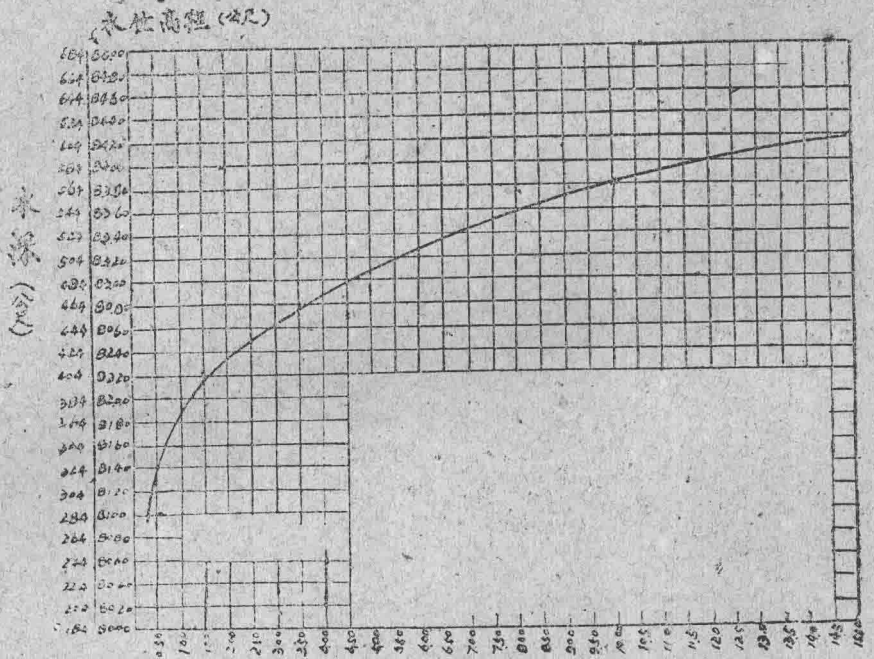
$\bar{W}$ ——泥沙在水中的重量，

$P_2$ ——悬浮力。

由此，得出单宽推移质输沙率为：

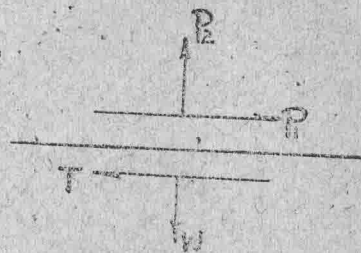
$$g = \frac{\beta d (P_1 - P_0) V_0}{f(\bar{W} - P_2)}$$

1-12



沙脊上单宽输沙量 (立方公分/秒)

1-13



泥沙颗粒的受力

根据实测资料，大量泥沙处在推移状态时的输沙率为：

$$g = \frac{(1185HI - 21000)\sqrt{HI}}{1 - 23.20HI}$$

应该说明，这个公式只适合于当地的情况，它是在伏尔加河得到的，泥沙粒径  $d = 0.35$  公厘。

从上式可知，在推移力很小的条件下，式中分母可能等于零 ( $23.20HI = 1$ )，这时推移质输沙率趋于无穷大，这一点并不是反常的现象，它正说明了物理现象的本质。因为这时悬浮力  $P_2$  等于泥沙的重量  $W$ ，泥沙运动的状态有了改变，不再沿河底推移，所以运动的规律也自然有所不同。

这个公式需要进一步检验，因公式推演时，把许多实际情况简化了。在伏尔加河上，因流速较大，要测出大量的推移质输沙量资料是有困难的，因而曾用一部份试验室资料。水槽宽度为 25 公分，水深 2—3 公分，试验时用伏尔加河的泥沙，试验结果如图 1—14。伏尔加河的点与水槽的点完全混合在一起，从而说明可用水槽试验，来研究天然河流的推移质输沙率；而且也说明了潜水员所获得的资料的可靠性。但因试验时用水槽较小，不可能给出大的推移力与输沙率，所以又在大的水槽中进行试验，试验结果如图 1—15。由图可知，当推移力大时，输沙率的规律有所改变，令  $1 - 23.20HI = 0$ ，则  $HI = 0.045$ ，而在图中曲线突然变化处，也就是  $HI = 0.045$ ，这就说明了泥沙运动规律的变化。

### 在伏尔加河观测与水槽试验的资料比较图

河流的计算资料

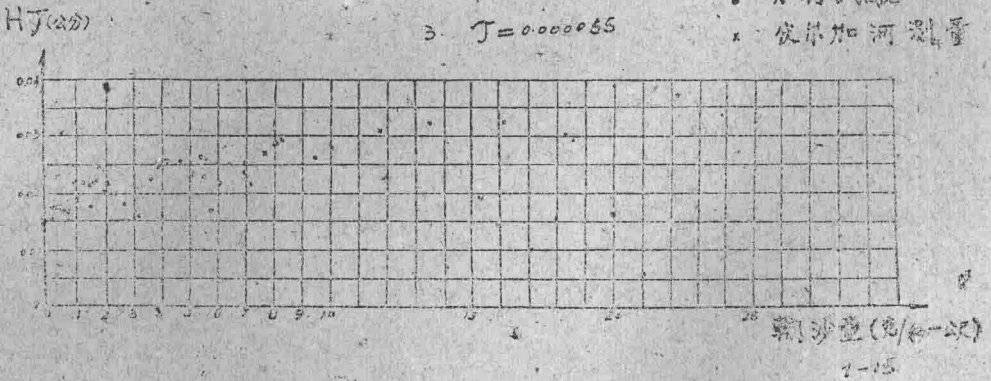
1. 沙的浓度  $\gamma = 175 \text{ 克/公分}^3$

2.  $g_m / g_m^{max} = \frac{2}{3}$

3.  $J = 0.000065$

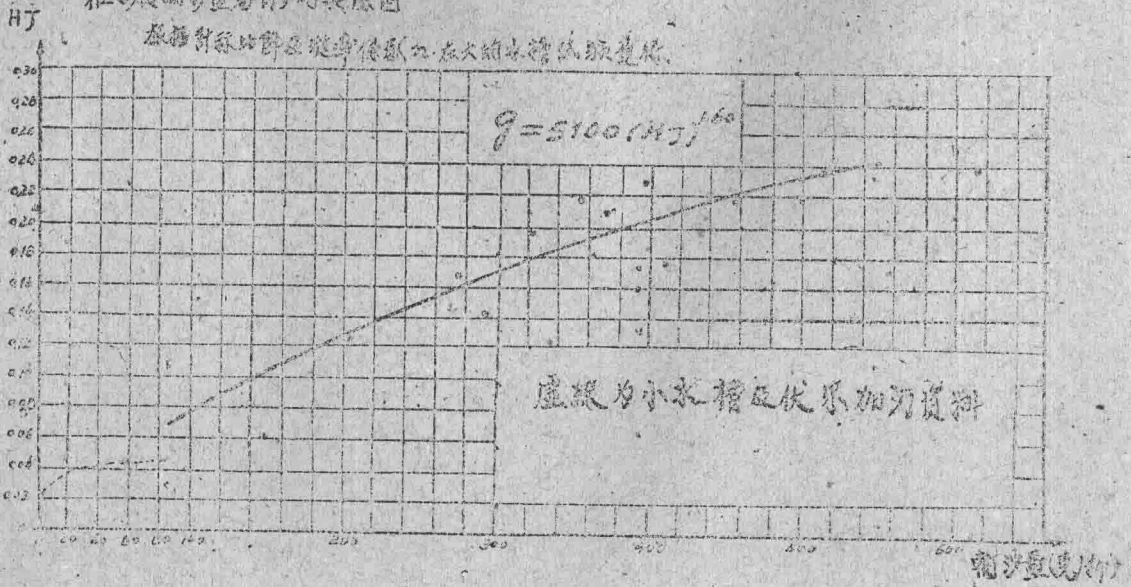
• 水槽试验

• 伏尔加河测量



### 推移质输沙量与HJ的关系图

本图曲线比群区曲线陡感，在大水槽试验变化。



(1) 个别泥沙颗粒在河底滚动；(2) 水流推移力增加，悬浮力也相应增加，推移质输沙率急剧增加；(3) 水流推移力再继续增加，泥沙大量跳躍，并进入悬浮状态，此时泥沙运动已由量变的累积，而发生质的突变。

在推移质输沙率公式中，把泥沙粒径 $d$ 分出，可以得到如下的一般形式：

$$g = \frac{A(HI - B)\sqrt{HI}}{1 - C\frac{HI}{d}}$$

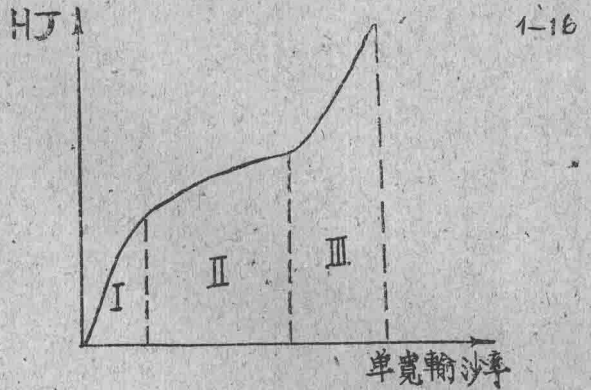
由式可知泥沙粒径愈大，则分母愈大，输沙率愈小；这与有些经验公式不同，有些经验公式是泥沙粒径愈大，输沙率亦愈大。

按照上述规律，泥沙运动处在第一二阶段时，沿着河底推移的泥沙，称之为推移质；在第三阶段成跳躍或悬浮状态的泥沙，就是悬移质。有些学者在两者之间再区分一种，作为推移质与悬移质之间的过渡，这是不必要的。推移质沿河底滚动，凡是跳躍前进的都可以称为悬移质，当然，跳躍的形式不同，跳躍的距离有长有短，有的不到河底又重新跳躍，这与泥沙在水流中的遭遇情况有关。泥沙颗粒上升后，总是要下降的，因其有本身的重量和向下的涡流；如果遇到上升的涡流，它会上升的很高，如果遇不到则会下降至河底。经常有沙粒自河床上升，也经常有沙粒降到河底；所谓不冲不淤的状态，只是代表在较长时间以内，自河床带起的，与落在河床上的泥沙颗粒数目相等而已。我们可以把河床看成储蓄所，经常有钱被提提出去，或储存进来，钱在储蓄所中只是临时性的，对于泥沙来说也是如此。泥沙的上升或下降，与流速的大小有关，流速愈小，则从河床上泥沙上升的可能性愈小。

悬移质含沙量的垂线分布如图 1-17。取样时，水深为 2.5 公尺，每隔 20 公分取样一点，每点连续取 5 次，每次取 5 公升，平均后绘制含沙量垂线分布。

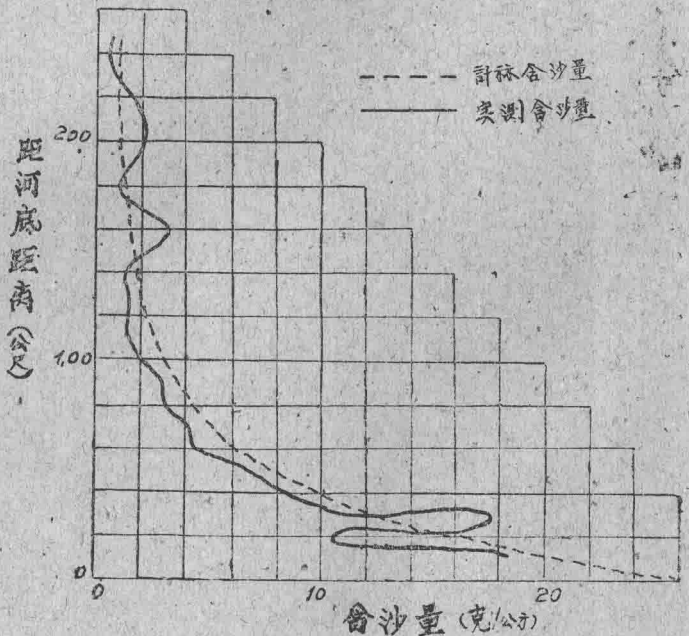
图 1-17 中的分布还是很均匀的，说明天然河流含沙量有脉动；所以不宜于用瞬时取样器，而应用较长时间的取样器采取沙样。从图可知，含沙量垂线分布，上面小，下面大；而且流速愈大，泥沙粒径愈细，则分布愈均匀。流速愈小，泥沙起跳躍的可能性小，被涡流悬浮起来的可能性亦小。

必须指出，悬移质与推移质的分界，并不是那么明显的，它有一个过渡



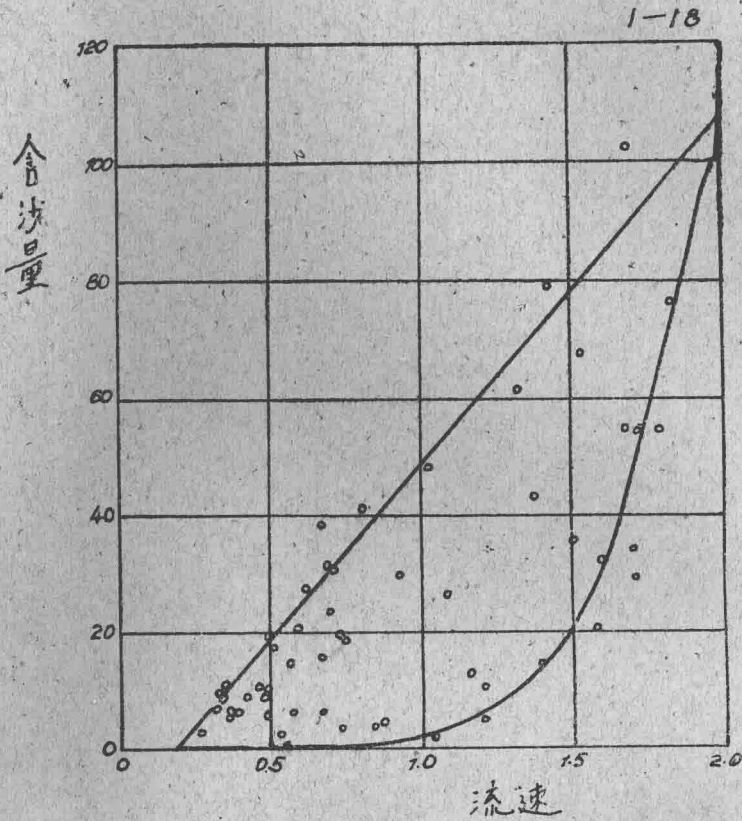
泥沙运动的三个阶段

沿水深含沙量分布图



区，在这区域内泥沙的运动状态是不稳定的，有些颗粒已经跃进，有些颗粒还在推移。

2. 水流挟沙能力与水流因素的关系。

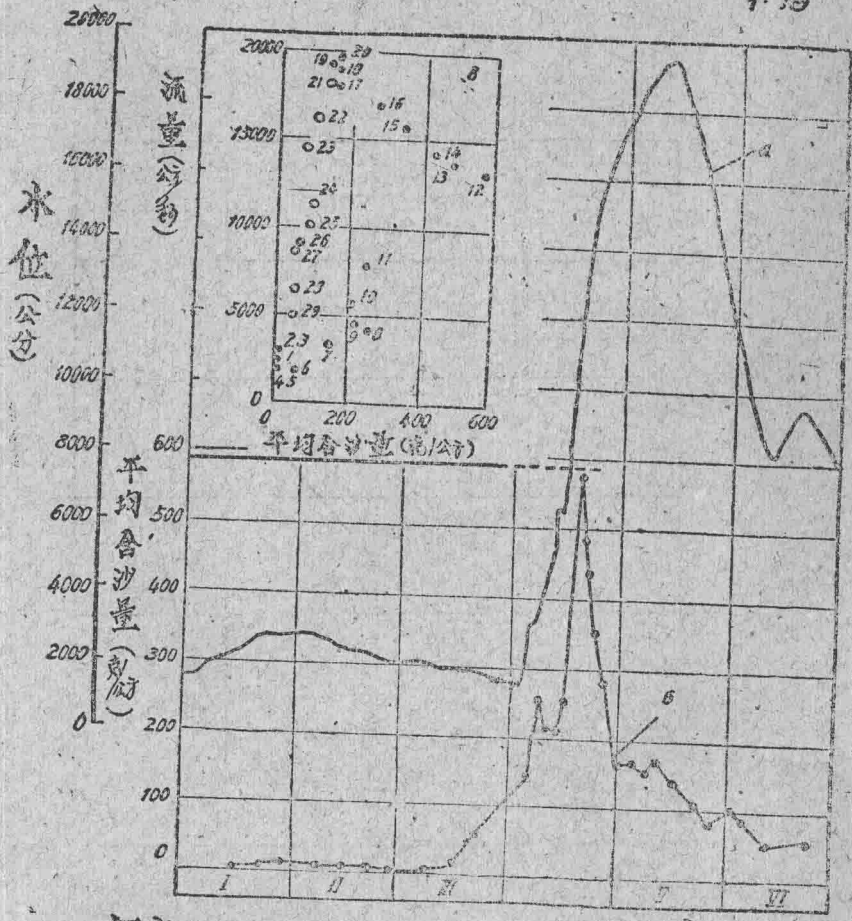


含沙量与流速关系图

前面提到的输沙率与推移力关系图中(图1-15)，水力因素与含沙量似存在着单值关系，这是由于在试验室内，泥沙供应的条件没有改变(均自槽底冲刷起来的)，但在天然河流中就不如此。图1-18为伏尔加河实测资料，造床质含沙量与平均流速间的关系成一点群，这些点群有其一定范围，这个关系在阿姆达利亚河及黄河上都是存在的。这一类点群是在线性坐标上得到的，如采用对数坐标，情况就会不同，表面上点子的散乱程度减小，实质上常常不能反映天然的真实情况，反而使研究工作者迷失途径。

由图可知，水流挟沙能力与流速间是双值关系。也许有人怀疑这是水文测验的精度不高，所以出现了点群散乱；但是从伏尔加河的水位含沙量过程线来看(图1-19)，含沙量最大值不是在水位最高时出现，而是出现在  $\frac{dH}{dt}$  最大处；图上的含沙量包括造床质与非造床质，若只绘出造床质的含沙量过程线，则出现两个沙峰，一个相应于  $\frac{dH}{dt}$  最大处，一个相应于最高水位时，这说明了含沙量与水流因素是存在着双值关系的。这种关系在许多水文站都如此，因此不能说这是由于测验的精度不高。

河流的含沙量是与泥沙的供应条件有关。河流中的水流是由流域表面或支流而来， $\frac{dH}{dt}$  最大是表明来水的强度最大，而水位最高则大致为流速最大；当  $\frac{dH}{dt}$  最大时，水流是从流域而来，这时从上游已把泥沙准备好了，所以水流挟带的泥沙较多；而当水位最高时，泥沙是从河道冲刷而来，所以水流挟带的泥



年变化 a—水位和 b—平均含沙量 1957 在伏尔加河高尔茨佳拉

圖1-19

沙要少些。因而可得出結論：河床冲刷时水流挟带的泥沙少于河床淤积时挟带的泥沙，因为在淤积时，正说明上游有充分的泥沙供应。

这个现象的物理本质，可以从天然河流的泥沙不是均质的，及河床有冲有淤来得到说明。在河床冲刷时，泥沙颗粒上升占主导作用，河床会发生粗化现象；在淤积时，泥沙颗粒下降占主导作用，河床泥沙变细。水流把泥沙举起的过程，可以认为是两个或然率乘积的结果，一个是在当地条件下，能把某一种泥沙举起的或然率；另一个是河床上存在这种泥沙颗粒的或然率。

$$S_{y=0} = r [ P_{v_1} ( P_{d_1} + P_{d_2} + \dots ) + P_{v_2} ( P_{d_2} + P_{d_3} + \dots ) + \dots ]$$

式中： $S_{y=0}$ ——河底含沙量，

$r$ ——组成河床泥沙粒子的容重，

$P_{v_1}$ 、 $P_{v_2}$ ——河底分别出现流速  $V_1$ 、 $V_2$  的或然率，在这样的流速下，能分别把小于  $d_1$  及  $d_2$  的泥沙颗粒举起； $P_{v_1} > P_{v_2}$ 。

$P_{d_1}$ 、 $P_{d_2}$ 、 $P_{d_3}$ ——河床上分别存在粒径为  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  的泥沙颗粒的或然率； $d_1 > d_2 > d_3$ 。

河床冲刷时发生粗化，有些粗的泥沙不能为水流所带起， $P_d$  的系列减短，因而河底含沙量  $S_{y=0}$  变小；相反地，在河床淤积时， $P_d$  的系列加长，总的或然率增大，因而河底含沙量  $S_{y=0}$  变大。因此，水流挟沙能力与水力因素不是单值关系，是与泥沙组成不均质及河床的冲淤有关。

### 3. 沙浪的形成及其运动。

1-20

沙浪是影响和决定河床演变过程的因素之一，是把泥沙运动和河床变形联系起来的一个环节。只要水流是紊动的，河床有足够的尺寸，而且是由可冲刷的泥沙所组成，则在水流作用下，河床上可以发现一个接一个的沙浪，而且沿着水流的方向运动。沙浪的形状如图 1-20，可分作四个组成部分，即上坡、沙峰、下坡和沙谷。图 1-21 是在伏尔加河由潜水员测量得到的沙浪，沙浪长 15 公尺，高 40 公分，沙浪的大小虽不一样，但其外形是类似的。沙浪上的纵向流速分布，在沙谷处，底流速很小，甚至有为负速的（由于沙谷中有漩涡），沿沙浪的上坡，流速逐渐增加，到沙峰处流速最大。沙浪上的垂线流速分布，是在沙谷处底流速很小，到沙峰处则逐渐恢复到正常的流速分布。

沙浪的运动是经过一段时间后，成正体向前移动。如从某一瞬来看，则仅有沙浪表面的泥沙运动，沙坡上的沙粒运动到沙谷里就停止下来。有时在沙浪上还出现小的沙浪，小沙浪的运动过程完全与大沙浪类似。悬浮的沙粒也会参与沙浪运动，它们与沙浪表层的泥沙相互交换。

根据潜水员的观测，沙浪上的输沙率沿程变化如图 1-22。沙谷处的输沙率较小，沿着沙浪上坡增加到沙峰处为最大，这可以从流速的逐渐增加来解释。

图 1-23 为沙浪的纵剖面图。在水槽中的沙浪长 40 公分，高 4—5 公分；在伏尔加河卡吐斯基浅滩的沙浪长 500 公尺，高 2 公尺；在第聂伯尔河柯金斯浅滩的沙浪长 1,500 公尺，高 4 公尺。在大的沙浪上有小的二级沙浪，二级沙浪上还有更小的三级四级沙浪。在实验室中，小的沙浪已经基本上决定了河床地形，而在天然河流中，这样的小沙浪通常都是三级或四级沙浪。

在实验室经过人为的努力，可以造成不出现沙浪的河床；但对实际水流来说，因为水流是紊动的，泥沙不是均一的，所以沙浪的存在，是河床的稳定形式。

沙浪形成的原因可作如下的解释：

设在一平整的河床上，通过均匀的水流，由于流速的脉动，作用在床面上的推移力也有脉动。对一颗泥沙来说，推移力大，则泥沙运动推移力小，则停止其运动；对一段河床来说，切应力大则冲刷，切应力小则淤积。因而在流速的脉动作用下，河床便发生冲淤，河底失去平整（图 1-24）；一旦河底出现不平整的现象，水流经过凹坑时，便形成漩涡，水流在漩涡里脉动加强，凹坑逐渐扩大，冲刷起来的泥沙，带到脉动较小的地方，便堆积起来，逐渐形成沙浪。流速小时也会形成沙浪，只是需要的时间较长。

在沙浪未形成以前，河底水流的脉动，随空间和时间的变化，形成规则的沙浪以后，河底水流的结构及脉动都比较有规律；水流由均匀流变为在沙浪上坡的加速区（脉动减弱区），在沙浪下坡为减速区（脉动加强区），加速区与减速区相互交替出现。这说明了水流与河床相互作用的过程，水流的脉动使河

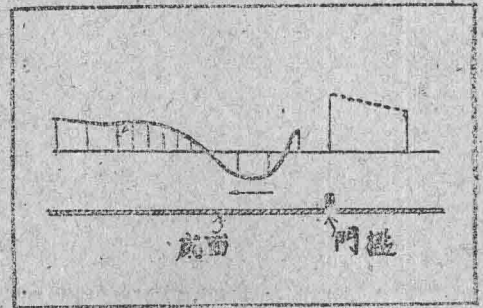
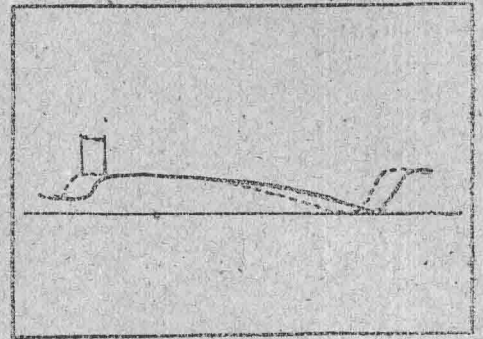
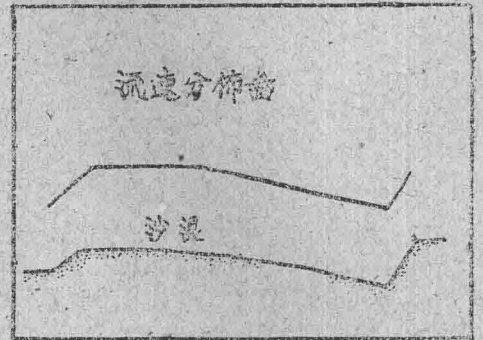


图 1-20



1935年6月9日到6月13日在諾爾斯克水文測站，伏加爾斯河特羅雅 6 号断面区内潜水层进行的沙脊测量。

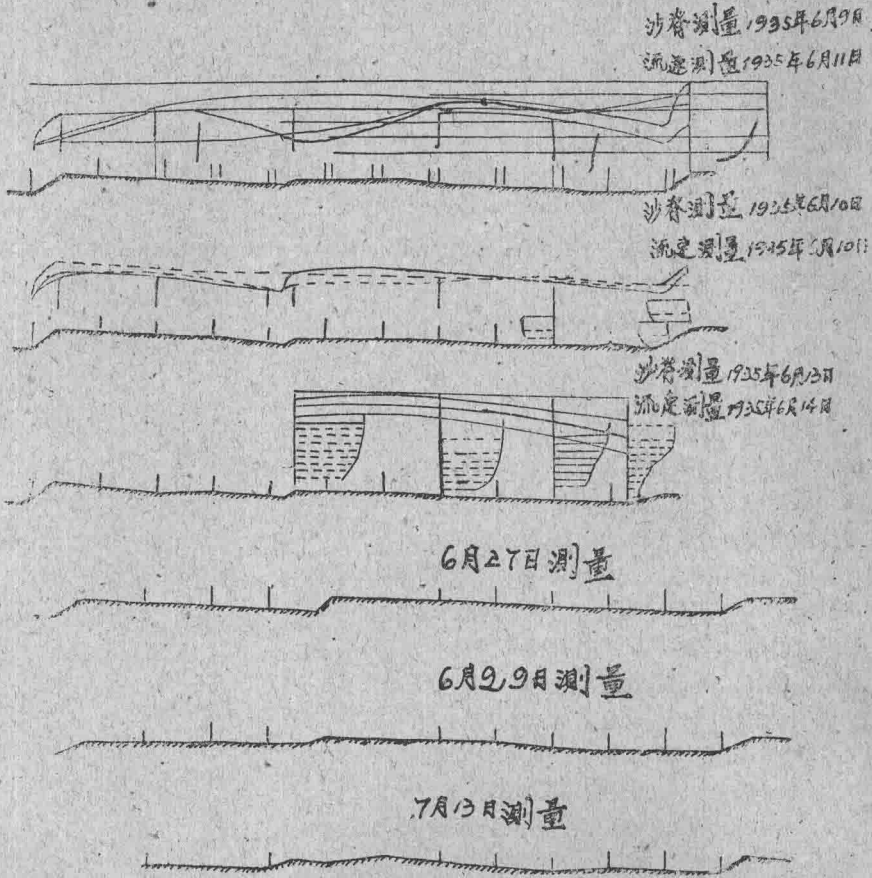


圖1-21

床起伏不平，而形成沙浪，沙浪又影响水流变为非均匀流。

河床上形成的沙浪是稳定的，沙浪整体向下运动时并不改变其形状，这只有在输沙率沿程变化时，才有可能。由于  $g = hV$  ( $h$ —沙浪高度， $V$ —沙浪的运行速度)，所以  $h$  愈小则  $g$  愈小， $h$  愈大则  $g$  愈大，因而沙浪保持了整体运动的形式。河底由不稳定的平坦河床形式，变为稳定的沙浪形式。

沙浪的形成没有任何偶然的原因，它是紊动水流及可冲刷河床相互作用的内在原因而必然产生的。它产生的条件是：河床冲积土有足够的厚度，水流是紊动的，和河床是非均质土壤组成（但这不是必要的条件）。如果河床土壤是非均质的，则在层流时也会产生沙浪，这时紊动水流就不是必要条件。

前面谈的是二元水流的沙浪情况。现在研究一下沙浪在平面上的形状。设想河床为无限宽，或为有限宽，但水深与河宽的比值很小，这时沙浪在平面上的形状都成链刀形（图 1-25）；沙漠在气流作用下，亦会形成这样的形式，说明气流与水流运动情况是相似的。沙漠中的气流不受边界的影响，形成链刀形的沙浪，而河流的水流，由于受到边壁的影响，链刀形的沙浪连结在一起，沙浪的长度及宽度增加，在平面上显示一个连一个的平行沙浪。

在无限宽的河道中，出现链刀形的沙浪；在较窄的河道中，出现带状沙浪（图 1-26）；在不太宽的