

## 第四节 床沙质与冲泻质

根据运动形式及性质的不同,可以把泥沙分为推移质及悬移质;而按照泥沙相对粗细及来源的不同,又可以分为床沙质及冲泻质。本节试图说明床沙质及冲泻质的性质,区划这两部分泥沙的判别标准,以及它们在理论上与生产实践中的意义。

### 一、问题的提出

早在 1940 年,爱因斯坦、安德森(A. G. Anderson)及约翰逊(J. W. Johnson)就分析了大量床沙及运动中的泥沙的级配曲线,发现这两部分泥沙中粗细颗粒所占的相对百分比一般很不一样,床沙中粗的颗粒多于细的颗粒,而在运动的泥沙中则反之<sup>[31]</sup>。而且,在运动的泥沙中较细的一部分颗粒在床沙中不是没有,便是含量很少。这些细颗粒在运动过程中似乎与床沙没有交换,它们的性质有点像前面所谈到的定床上的泥沙运动,不一定达到饱和,上面来得多时通过河段的亦多,反之亦真。这样,水流中粗颗粒泥沙的含量决定于水流挟沙力,与流量(代表水力条件)之间具有明确的关系;而细颗粒泥沙的含量则取决于上游的供应条件,与流量的关系并不明显。图 5-16 是某一条河流中不同粒径级泥沙输移率与流量间的关系正说明了这一情况。

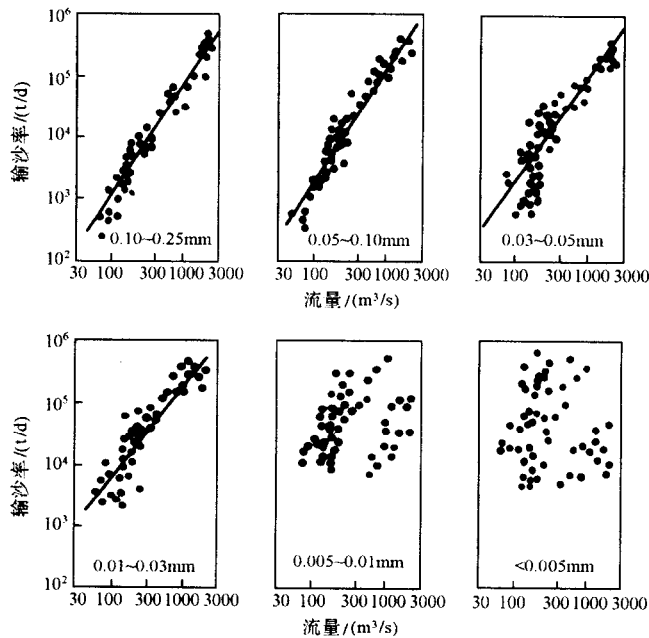


图 5-16 同一河流中不同粒径级的泥沙的输移率与流量间的关系

鉴于粗颗粒泥沙在搬运过程中随时都与河床中的泥沙发生交换,对某一河段来说,进入该河段的粗颗粒泥沙可以看成直接来自上游河床,是从床沙中带起进入运动的泥沙,因此称为“床沙质”。相反,细颗粒泥沙从流域面上冲刷外移以后,在来到本河段以前,沿程很少在河槽中停留,基本上都是一泻千里,保持本来面目,因此称为“冲泻质”。需要强调指出

的是,“床沙质”-“冲泻质”及“推移质”-“悬移质”是对运动中的泥沙的两套不同的命名,不可把它们混淆起来。床沙质和冲泻质中同时包含有推移质和悬移质;自然,冲泻质因为较细,主要以悬移的形式运动。把推移质及床沙质等同起来,或者把悬移质及冲泻质等同起来,都是不正确的。

## 二、床沙质及冲泻质运动规律的同源性

泥沙在运动过程中和床沙基本上不发生交换的情况的确是有的。图 5-14 中位于 COE 区内的泥沙就是一个例子。这样的泥沙很容易悬浮,但一旦沉落到床面上时,由于为近壁层流所隐蔽,或者颗粒间会产生黏结性,不是稍大一点的流速,往往不能把它们再带起来。山区河流是另一个例子。山区河流坡陡流急,组成床沙的往往是块石及大卵石,一般只在遇特大洪水时才有运动。而另一方面,根据流域的具体条件,山区河流又往往挟带一定数量的细砂或黄土颗粒。这些细颗粒泥沙虽也存在于河床中,但只是受块石或卵石的隐蔽作用,填塞在粗颗粒之间的空隙中,并不组成与运动的泥沙经常发生交换的有效床沙的一部分。山区河流中这些细颗粒的运动,实质上是与定床上的泥沙运动无异的。

但是,对于床沙中无论粗细颗粒都能为水流带动的一般冲积河流来说,问题就不是那样简单。细颗粒泥沙在长距离搬运途中究竟会不会与河床发生交换?在河床中的细颗粒泥沙虽然为量不多,但是它们与运动中的同等大小的泥沙究竟有没有内在的联系?换句话说,粗细颗粒的运动规律究竟有没有本质的不同?在这些问题没有得到回答以前,不能认为床沙质及冲泻质的概念已得到澄清。为此,我们曾进行了一系列的试验<sup>[32]</sup>。

在第一组试验中,采用了粒径变化范围为 0.005~4mm 的不均匀沙,水流条件基本保持不变,自上游进入试验段的含沙量则人为地加以控制。试验开始时不断加入泥沙,这时一部分泥沙沉积形成河床,另一部分泥沙,特别是较细的部分,则不断在水槽和回水管中循环,输沙率逐渐增加,含沙量以重量百分比计最高达 15%。到了这一阶段后遂停止加沙,使泥沙运动保持平衡;然后在上游把正在运动中的水和沙虹吸一部分出来,加入等量的清水,降低水流中的含沙量,使槽底发生冲刷。在试验中,上游来沙量是随时间而变的。在图 5-17 中,我们绘出了通过试验段下泻的不同粒径组的泥沙输移率过程线。由图可以看出,对于大于 0.1mm 的泥沙来说,它们的输沙率虽然不是一个常数,但都是围绕着各自的平均值而上下变动,与上游来沙量的变化并不相应,因此属于床沙质的范畴。对于小于 0.06mm 的泥沙来说,它们的输沙率完全因上游来沙量而异,属于冲泻质的范畴。介于 0.06~0.1mm 之间的泥沙,则为床沙质及冲泻质间的过渡。

值得注意的是:随着来沙量的改变,床沙组成也有相应的调整。图 5-18 为河床堆积抬高阶段上游来沙、床沙及通过试验段下泻的泥沙的级配曲线。由此可以看出,由于沙波运动过程中对泥沙的分选作用,河床表层的泥沙比底层细,就河床主体来说,小于 0.06mm 的颗粒约占 5%,而在表层床沙中,冲泻质的含量就要大一些,而且随着来沙量的增加而加多,在含沙量以重量比计达到 15%时,表层床沙中相当于冲泻质部分的泥沙的含量达到 17%。因为床沙组成在试验过程中的调整仅限于细的一端,虽然改变了各级泥沙的供应条件,却并未有效地改变河床的糙率,这样就使水流的性质在河床冲淤过程中能基本维持不变。

在第二组试验里,首先在水槽内铺好泥沙,再放入清水冲刷,这时水流中的泥沙均来

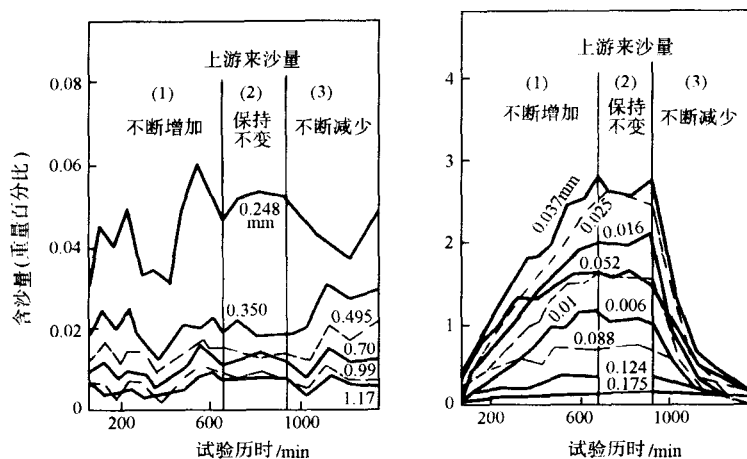


图 5-17 水槽试验中粗细泥沙输移率随着上游来沙量的改变而发生的相应变化,试验中水流条件保持不变

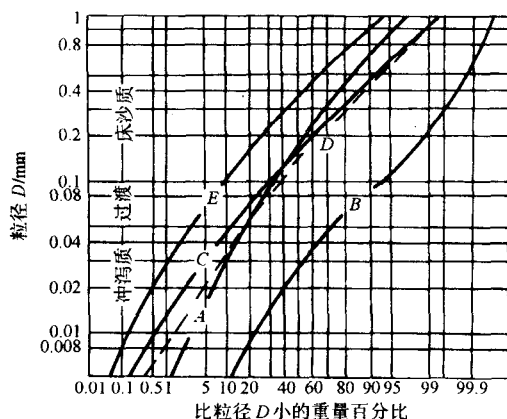


图 5-18 河床堆积抬高过程中上游来沙、床沙及通过河段下泄的泥沙的级配曲线

A 上游来沙 B 下泄泥沙 C 表层床沙(厚 6.1mm) D 上游来沙增多后的表层床沙  
E 堆积过程中形成的床沙主体(厚 65.5mm)

自河床,因此属于床沙质性质。待泥沙运动达到平衡后,再从上游加入比床沙更细的泥沙,这些泥沙代表来自流域的冲泻质。由试验结果发现,尽管极大部分冲泻质都通过试验段下泄,但仍有一小部分沉降下来变成床沙的一部分,使表层床沙组成变细,如图 5-19。

这两组试验结果都说明,随着上游来沙量的改变,冲泻质的下泄沙量固然有变化,而在床沙中(特别是表层床沙)相当于这一部分泥沙的含量也有相应的调整。在讨论泥沙运动的连续性时,业已指出组成河床的泥沙不仅对于水流产生一定的阻力,代表一定的边界条件,而且还反映了泥沙的供应条件,是泥沙运动有机整体中不可分割的一部分。对于我们所讨论的冲积河流来说,不存在水流中的泥沙永远不停地搬运,河床中的泥沙永远停驻不动的情况。即使在平衡的状况下,也有一部分运动的泥沙不断在河床上某些地方沉降下来变成床沙的一部分,而水流又从河床上其他地方带起了另一部分床沙使之运动下移。所谓平衡只是指这两部分泥沙在较长时间内保持相等而已。冲积河流的挟沙能力,是指在一定的河床组成下,水流所能挟带的泥沙量。这里面包括了三个因素:(1)各种粒径的泥沙的

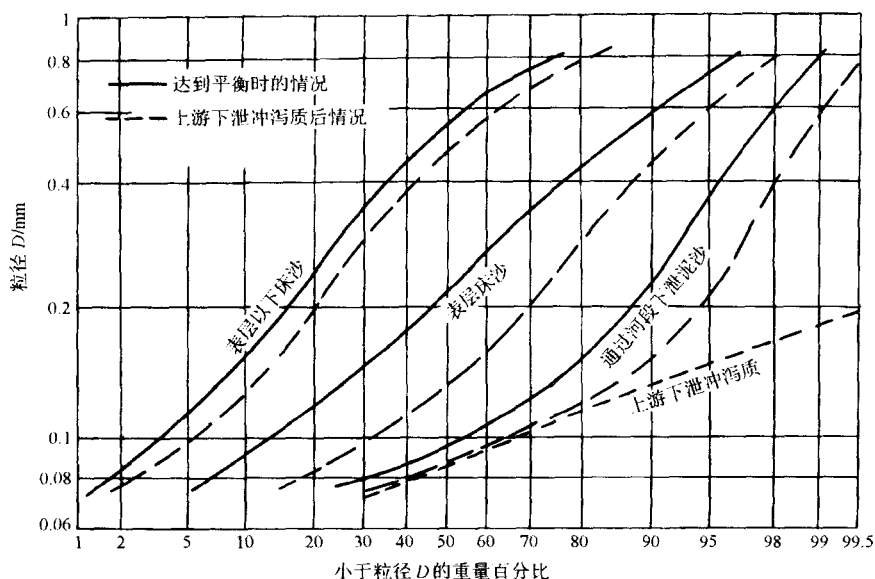


图 5-19 在平衡河段中增加一部分冲泻质来量后床沙组成的变化

有效床沙量；(2)水流的强弱；(3)各种粒径的泥沙的输移率。

如果把床沙组成的变化也考虑在内,对不同水流条件下的输沙率进行分析,我们发现,对于全部泥沙都能起动的冲积河流来说,所谓床沙质和冲泻质的运动规律是一致的,它们之间并没有质的差别。图 5-20 是上述试验资料按照爱因斯坦泥沙运动理论的分析结果,其中包括表层床沙中最细的 5% 的泥沙。由此可以看出,床沙质和冲泻质都遵循同一规律。

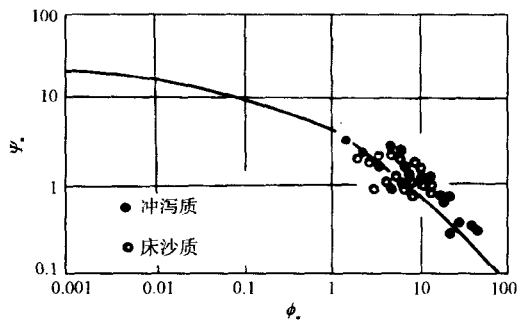


图 5-20 床沙质及冲泻质运动规律的同一性

### 三、流量-输沙率关系

既然床沙质和冲泻质的运动规律并无不同,为什么在输沙率和水流条件之间的关系上,这两种泥沙又有那样的不同呢?我们已经说过,所谓水流的挟沙力问题,实质上是研究下面这样一个函数关系:

$$f(\text{水流条件, 床沙组成, 输沙率}) = 0$$

其中包含了三个变数。现在从三个变数中提出两个来建立相关,而忽略了第三个参变数,则关系必然比较散乱,除非这个被忽略的变数的变化不是很大。所以问题的关键在于,当上游来水来沙条件改变时,床沙组成中不同粒径部分是怎样调整的。

我们可以举一个例子来说明这个问题<sup>[33]</sup>。设有一河段长 30km,宽 1km,有效床沙厚度为 0.25m。在下面的讨论中,只考虑 0.05~0.10mm 及 0.5~1.0mm 两组粗细不同的泥沙,其中前者在床沙及运动的泥沙中分别占 2%及 30%,后者在床沙及运动的泥沙中分别占 38%及 3.6%。设某一次洪峰的正常来沙量为  $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,由于各种流域因素在大小和程度上的配合方式是随机的,同一个洪峰的含沙量会有变差,并假定某一年在发生这样的洪峰时上游实际来沙量超出正常情况的 20%,然后研究在洪峰中通过河段下泄的沙量会有什么变化。计算中,我们假定某一粒径级的挟沙能力与该粒径级的有效床沙量之间的比值关系不因河床组成的小幅度调整而发生改变,这样就可以算出在增加的 20%的来沙中有多大一部分会淤在河段里,有多大一部分会通过河段下泄。计算结果如表 5-2 中的序列 I。从表 5-2 可以看出,通过河段下泄的沙量与上游来沙量之间的对比关系。因泥沙粗细的不同而有明显的区别。

表 5-2 来沙量发生变差时有效床沙量及下泄沙量的相应变化

序 列	粒径 范围 /mm	床沙中 含量 /%	运动的 泥沙中 含量 /%	有效床 沙量 / $\times 10^4$ $\text{m}^3$	某次洪 峰中正 常输沙 量 / $\times 10^4$ $\text{m}^3$	该次洪 峰中上 游实际 来沙量 / $\times 10^4$ $\text{m}^3$	来沙量 变差 / $\times 10^4$ $\text{m}^3$	由于上游来沙量发生变差而引起的变化					挟沙能 力与有 效床沙 量的比 值
								落淤 沙量 / $\times 10^4$ $\text{m}^3$	落淤沙 量占来 沙量变 差的百 分比 /%	落淤沙 量占有 效床沙 量的百 分比 /%	通过河 段下泄 沙量 / $\times 10^4$ $\text{m}^3$	下泄沙 量较正 常挟沙 能力增 加的百 分比/%	
I	0.05 ~0.10	2	30.0	15	480	576	96.0	2.9	3.0	19.3	573	19.4	32
	0.5 ~1.0	38	3.6	285	58	70	11.6	9.6	82.8	3.4	60	3.4	0.2
II	0.05 ~0.10	2	30.0	15	4800	5760	960	3.0	0.3	20.0	5757	20.0	320
	0.5 ~1.0	38	3.6	285	580	696	116	38.0	32.8	6.5	658	13.5	2

对于粗颗粒的床沙质来说,82.8%的过剩泥沙都将沉积下来,但是因为河床中这一部分泥沙原来就很多,多增加将近  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  的粗颗粒泥沙,对于有效床沙量所引起的改变不过 3.4%。如果河床的形态与坡降并未改变,则水流条件(如水深、流速等)也不会有什么变化。这样,河槽挟带床沙质的能力,亦即通过河段下泄的床沙质数量,与平衡未受破坏以前的数量比较起来出入不大,只相差 3.4%左右。

细颗粒冲泻质的情况则不然。过剩的泥沙虽然只有 3%沉降下来,但因这一部分泥沙在河床中含量原来就不多,一次增加了将近  $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,使有效床沙量增加了 19.3%。另一方面,整个床沙的组成不会因为增加了这样一点细颗粒泥沙而有什么重要的改变,因此水流条件也不会有什么改变。尽管如此,但通过河床中冲泻质供应条件的改变,却使自河段下泄的冲泻质沙量增加了 19.4%,基本上与上游冲泻质的来量接近相等。

从上面的例子中可以看到,当来沙量发生变差时,对于冲泻质来说,基本上是来多少带走多少,通过河段下泄的沙量取决于流域的泥沙供应条件;对于床沙质来说,则不论上

游来沙如何发生变化,通过河段下泄的沙量却能维持在较小的变化幅度以内,相当于在该水流条件下的河道正常来沙量。因此,床沙质的流量-输沙率关系就要比冲泻质明确得多。

但是,问题还不是那样简单。床沙质的流量-输沙率关系也仍然是有条件的。从表 5-2 的计算过程不难看出,当来沙量发生变异时,下泄沙量的相应变异程度主要取决于河流正常来沙量(一般也就是河流在这样的水流条件下的挟沙能力)与有效床沙量的比值大小。在表 5-2 的例子中,如果我们假定有效床沙量不变,洪峰中河流的正常来沙量不是  $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而是  $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,则当来沙量发生 20% 的变异时,下泄沙量的变化将如序列 II 的计算结果所示。这时,即是粗颗粒的床沙质,下泄沙量较正常挟沙能力的偏差也可以大到 13.5%。

这样,在一般的冲积河流上,正如图 5-16 所表明的,床沙质的流量-输沙率关系点子比较密集,但在多沙河流上,例如我国的黄河及渭河下游,则即使点绘床沙质的流量-输沙率关系,点群也会相当散乱,图 5-21 是黄河下游孙口站的关系曲线。由图可以看出,点群实际上是以上站床沙质来量为参数分别聚集在不同的直线附近的<sup>[34]</sup>。图 5-21 实际上反映了冲积河流在挟沙能力上的自动调整作用,我们曾在参考文献[35]中对这一调整的机理作了详细的说明。

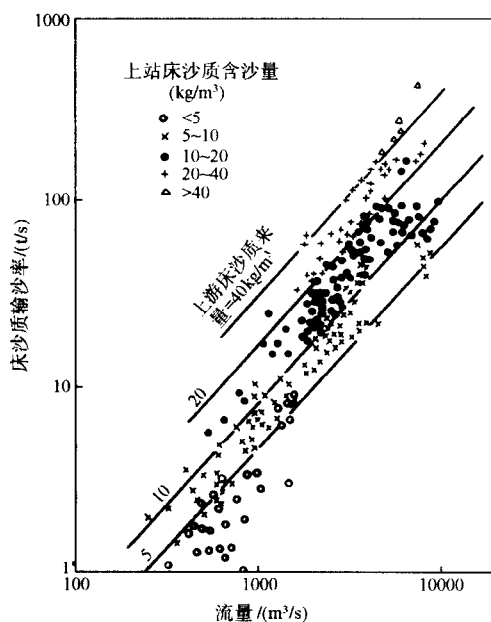


图 5-21 黄河下游孙口站床沙质输沙率与流量间的关系

最后,如果上述进入河段的来沙量的变化不是属于暂时的变异,而是永久性的改变,则在开始河道输沙量固然可能与上游来沙量相等,但日久以后,两者必须取得一致,不然河道不能保持平衡。对于床沙质来说,当它的来量发生永久性变化时,水流或者从河床中取得泥沙的补给,或者把过剩的泥沙沉积下来,旷时日久以后,水流对河床发生分选,河床逐渐粗化或细化,使河道的挟沙能力也随之减小或增大。有些河流(如卵石挟沙河流)通过河床组成的变化已足以完成河床的调整过程,断面形态及坡降可以有变化,也可以没有

变化。在更多的情况下,除了床沙组成有所改变以外,断面形态及坡降也会有相应的调整。对于冲泻质来说,一般只要床沙组成中的相应部分有小的改变,就可以和来沙的变化相适应,不需要河槽本身做出急剧的改变。正因为如此,所以也有把床沙质称为“造床质”,把冲泻质称为“非造床质”的。

#### 四、划分床沙质及冲泻质的标准

我们怎样来判别河流中的泥沙哪一部分属于床沙质,哪一部分属于冲泻质呢?

帕森拿德斯(E. Partheniades)正确地指出,床沙质和冲泻质的运动从力学的观点来看应该遵循同样的规律,但是他把冲泻质仅限于小于 0.06mm 的泥沙,认为对于这一部分泥沙来说,床面颗粒之间的黏结力是一个重要的因素,运动中的泥沙沉降床面和床面静止的泥沙开始启动的水力条件差别很大,在这一水流范围内,运动中的泥沙和床面的泥沙不存在交换,从流域中来多少这样的泥沙,基本上都能够通过河段下泄<sup>[36]</sup>。事实上,正如第二章所指出的,只有对粒径比 0.06mm 细得多的泥沙来说,黏结力才显得比较重要。把床沙质及冲泻质的临界粒径固定在一个范围或一个数值,也无助于深入了解划分冲泻质的重要意义。

从前面的讨论,特别是从表 5-2 的例子来看,合理的划分方法也许应该是先找出各种不同粒径的泥沙在造床流量下的输沙量和有效床沙量的比值,当这个比值超出某一极限值时属于冲泻质,小于这一极限值时属于床沙质。也有可能存在着上下两个极限,在这两个极限之间属于床沙质与冲泻质之间的过渡。在这一问题上,还需要做很多研究工作,才能明确下来。

目前常用的一个比较简便的经验准则,是把床沙组成中(由于现有的取样器无法取得表层的床沙沙样,因此这里所谓床沙,是指有一定深度的河床中的泥沙)最细的 5%(或 10%)看成是冲泻质,其余的 95%(或 90%)看成是床沙质。另一种做法是把床沙和悬移质级配曲线上下叠绘在一起,如图 5-22。通过这两条曲线的相邻部分大体上画一条公切线 AB,这条公切线与横坐标的交点为 O,与交点 O 相应的粒径即作为区分床沙质与冲泻质的临界粒径。

母论是采用这两种方法中的那一种方法,对于不同地区的河流来说,什么样的泥沙属

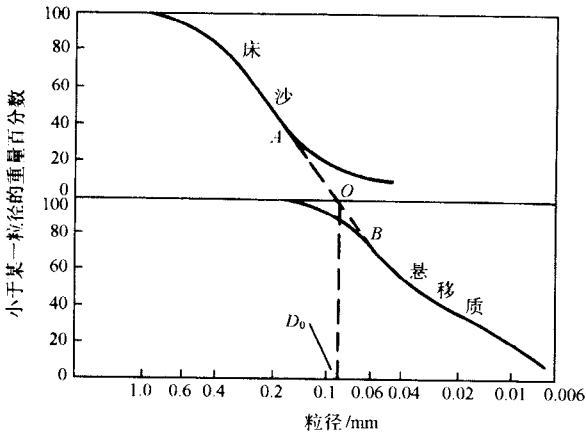


图 5-22 划分床沙质和冲泻质的临界粒径

于床沙质,什么样的泥沙属于冲泻质,是因地而异的。在山区卵石河流中,卵石是床沙质,砂以下就是冲泻质。到了中下游砂质河流中,砂便是床沙质,粉砂以下属于冲泻质。到近河口段,粉砂也可能变成床沙质,冲泻质便只剩黏土以下的物质了。不但在一条河流的不同河段间床沙质与冲泻质的范围各有不同,就是在同一河段上床沙质及冲泻质的划分也可能因流量而异。例如黄河在陕县附近,在三门峡水库修建以前,低水时河床上覆盖有砂,一到汛期,砂被洪水冲走,暴露了底层的卵石。对于这样的河段来说,砂在低水期固然属于床沙质,到了汛期便属于冲泻质。除此以外,当河床发生较强烈的调整,床沙组成有显著的改变时,床沙质和冲泻质也会相互转化。例如在枢纽下游的冲刷河段,随着河床的粗化,一部分在过去属于床沙质范围的泥沙会转化为冲泻质。又如在水库上游,淤积过程中的河床细化作用会使一部分本属于冲泻质的泥沙转化为床沙质。

也有的科研工作者提出,划分床沙质和冲泻质,不仅决定于泥沙的物质组成,还应该和水流条件联系起来。

冲泻质基本上以悬移的形式下泄。水流中存在悬移质以后,一方面增加了水流的势能,另一方面把泥沙从河底带起,使之悬浮在一定高度,又需要从紊动中取得一定的动能。

设有一挟沙水流以流速  $U$  沿着坡降为  $J$  的河床向前流动,在单位挟沙水体中含有  $S$  单位重(干重)的泥沙,泥沙的沉速为  $\omega$ 。如泥沙的浓度沿程不变,则从统计的观点,可以把泥沙看成沿着与河底平行的方向朝前运动。每经过一个单位时间,泥沙颗粒在垂直方向下降的距离等于  $UJ$ 。因此,在单位时间内单位水体从泥沙中所取得的势能为

$$E_1 = S \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} UJ \quad (5.18)$$

另一方面,泥沙以速度  $\omega$  向下沉降。如果要保持恒定的悬浮状态,则紊动必须与泥沙在水下的重量相抗衡,使泥沙颗粒相对于周围水体而言,以同样的速度  $\omega$  向上举起。因此,为了使泥沙悬浮,在含沙量不是很高的情况下,在单位时间内需要从单位水体的紊动动能中取出能量

$$E_2 = S \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \omega \quad (5.19)$$

如

$$E_1 \geq E_2$$

即

$$\omega \leq UJ \quad (5.20)$$

则由于泥沙的存在而消耗的紊动动能可以从泥沙所增加的势能中取得补偿而有余。这样的泥沙就是冲泻质,不论从流域中来多少,都可以为水流所带走。这一概念是王尚毅<sup>[1]</sup>和拜格诺<sup>[37]</sup>分别提出来的。

## 五、区别床沙质及冲泻质的意义

划分床沙质及冲泻质,具有下面三方面的重要意义:

(1) 在计算床沙质及冲泻质的输沙量时,需要采用不同的方法。从理论上来说,既然床沙质与冲泻质的运动规律是同一的,则在知道了床沙组成和水流条件以后,就可以算出

1) 王尚毅,“挟沙明流中的流移质运动”,天津市水运学会报告,1959年。



任何一种泥沙在当时的输沙率。但在实际处理时,这两种泥沙的情况尚有不同。

在河床中,与冲泻质相应的那一部分床沙组成是随上游来水来沙条件而改变的。由于我们对这一部分床沙组成的变化很难做出预报,因此,尽管我们掌握了控制冲泻质的运动规律,却很难利用这种建立在力学上的关系,来决定通过河段的冲泻质输沙率,而不能不借助于一些统计的或水文测验的方法,详如第十一章。

对于床沙质来说,则在一般冲积河流上与之相应的床沙组成可以看成是一个常数,只要进行全面取样,分析确定各级泥沙在河床中所占的百分比以后,就可以利用挟沙能力公式算出不同流量下的输沙率。但是,在多沙河流上,由于床沙组成也会因来水来沙条件的变化而改变,问题就要复杂得多。如果能多次反复进行床沙取样,认真掌握平均床沙组成,则可以算出平均情况下的输沙量。

一般通过水槽试验而推导得到的挟沙能力公式,由于试验本身的具体条件,得到的时常只是床沙质的挟沙能力公式。应用这样的公式来计算通过河段的全部沙量,显然是不可能得到圆满结果的。另一方面,某些从河流实测资料中推导取得的挟沙能力经验关系,由于包括冲泻质部分在内,同样也不能随使用来计算另一条流域因素迥然不同的河流的输沙量。即使对于同一条河流来说,如果上游修建了水库,改变了来水来沙及边界条件,则这些经验公式也必须重新订正以后始能继续应用。

(2) 在研究枢纽建成后下游来沙量的变化时,可以有更明确的线索。在这一课题上,一方面存在着水流带不带得了泥沙的问题,另一方面还存在着有多少泥沙能为水流所挟带的问题<sup>[38]</sup>。水流挟带冲泻质的能力固然是非常大的,但当水库拦截了来自上游流域的全部或极大部分泥沙以后,水库下游冲泻质的来源仅限于河漫滩的冲刷与支流带入的泥沙,在许多情况下,这两方面可能供给的泥沙都不是很大的。床沙质的情况则正好相反。下游河床虽然为水流提供了充分的泥沙补给,但水流挟带床沙质的能力却是一定的,而且随着河道的再造床过程,挟沙能力还会因时递减。因此,在多沙河流上修建大型枢纽以后,进入下游的沙量在一般情况下必然会有大幅度的减低。

(3) 在分析河床演变过程时,处理对象可以有所侧重。前面已经说过,影响造床作用的,主要是床沙质。冲泻质对于河床变迁的作用主要反映在两方面,即:

① 冲泻质在河槽中虽为量不多,但却是河漫滩沉积物的主要组成部分。如果这样的沉积物具有较大的黏结性,则两岸对主流会有约束作用,从而在一定程度上影响了河形的发展。

② 如水流中冲泻质含量较大,可以改变水流的物理性质,从而影响水流挟带床沙质的能力。

上述两方面的影响和床沙质的作用对比起来,究竟是次要的。研究河床演变,特别是受人影响,来水来沙条件改变后的河流再造床过程时,主要的对象应该是床沙质。

另一方面,考虑水库淤积,尤其是库容曲线的变化及水库的寿命时,既然床沙质及冲泻质同时都被拦蓄在水库内,因而就需要把它们都考虑在内。而且,一般情况下冲泻质既为运动泥沙的主体,在水库淤废速度上起主要作用的,往往不是床沙质,而是冲泻质。

最后,我们可以把床沙质及冲泻质的基本性质列在一个表内(见表 5-3),作为本节的结束。

表 5-3 床沙质与冲泻质的基本性质

性 质	床 沙 质	冲 泻 质
根本来源	流域土壤冲刷	
直接来源	上游河床	流域产沙
床沙组成	为床沙的主体,组成一般不变,多沙河流则不然	聚集床面,因来沙多寡及水流强弱而变化
运动泥沙的组成	一般只占运动泥沙中的一小部分	一般为运动泥沙的主体
搬运形式	推移及悬移	推移及悬移,以后者为主
输沙率	在粗沙河流上,主要决定于来水条件,与上游来沙多寡关系较小。在多沙河流上,则与来水来沙条件均有关系	主要决定于上游来沙的多寡
输沙率和水流间的关系	一般为建立在力学上的关系,可以用挟沙能力公式计算	建立在流域因素共同性上的关系,有赖于实测或经验关系确定
控制泥沙运动的基本规律	就床面泥沙均能为水流带动的冲积河流来说,两者并无不同	
对生产实践中的意义	床沙质输沙率决定河床稳定性	冲泻质输沙率决定水库淤废速度
鉴别标准	粒径大于床沙组成中 $D_s$ 的泥沙	粒径小于床沙组成中 $D_s$ 的泥沙

## 参 考 文 献

- [1] Jeffreys, H. "On the Transport of Sediment by Streams", Proc., Cambridge Philo. Soc., Vol. 25, Pt. 3, 1929, pp. 272~276
- [2] Дементьев, М. А., "Об интерференции двух твердых тел в потоках жидкости", ВНИИП, Т. 15, 1935, стр. 28~47
- [3] Егiazаров, И. В., "Обобщенное уравнение транспорта несвязных наносов, Коэффициент сопротивления размываемого русла и неразмывающая скорость", Труды II, Всесоюзного гидрологического съезда том V, Ленинград, 1960, стр. 117~132
- [4] Einstein, H. A. and E. A. El-Samni, "Hydrodynamic Forces on A Rough Wall", Rev. Modern Phys., Vol. 21, No. 3, 1949, pp. 520~524
- [5] Cheng, D. H. and C. G. Clyde, "Instantaneous Hydrodynamic Lift and Drag Forces on Large Roughness Elements in Turbulent Open Channel Flow", in Sedimentation, Symp. to Honour H. A. Einstein, 1972, pp. 3-1 to 20
- [6] Chepil, W. S. "The Use of Evenly Spaced Hemi-Spheres to Evaluate Aerodynamic Forces on A Soil Surface", Trans., Amer. Geophys. Union, Vol. 39, No. 3, 1958, pp. 397~404
- [7] Chepil, W. S., "The Use of Spheres to Measure Lift and Drag on Wind Eroded Soil Grains", Proc., Soil Sci. Soc. Amer., Vol. 25, No. 5, 1961, pp. 343~345
- [8] Coleman, N. L., "The Drag Coefficient of A Stationary Sphere on A Boundary of Similar Spheres", La Houille Blanche, No. 1, 1972, pp. 17~21
- [9] Coleman, N. L., "A Theoretical and Experimental Study of Drag and Lift Forces Acting on A Sphere Resting on Hypothetical Stream Bed", Proc., 12th. Cong. Intern. Assoc. Hyd. Res., Vol. 3, 1967
- [10] Garde, R. J. and S. Sethuraman, "Variation of the Drag Coefficient of A Sphere Rolling Down An Inclined Boundary of Closely Packed Spheres", La Houille Blanche, No. 7, 1969, pp. 727~732
- [11] Watters, G. Z. and M. V. P. Rao, "Hydrodynamic Effects of Seepage on Bed Particles", J. Hyd. Div., Proc., Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 97, No. HY3, March, 1971, pp. 421~439
- [12] 武汉水利电力学院泥沙河流研究组, "评爱因斯坦关于推移质运动的理论兼论推移质运动过程", 武汉水利电力

学院报,第4期,1965年,1~16页

- [13] Gessler, J., "The Beginning of Bed Load Movement of Mixtures Investigated As Natural Armoring in Channels", Mitteilung Nr. 69, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, Zurich, 1965
- [14] Christensen, B. A., Discussion of the Paper "Erosion and Deposition of Cohesive Soils", J. Hyd. Div., Proc., Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 91, No. HY5, 1965, pp. 301~308
- [15] Gessler, J., "Behavior of Sediment Mixtures in Rivers", Intern. Symp. of River Mech., Intern. Assoc. Hyd. Res., Vol. 1, 1973, pp. 35-1 to 10
- [16] 武汉水利电力学院, 河流动力学, 中国工业出版社, 1961年, 22~31页
- [17] 窦国仁, "论泥沙起动流速", 水利学报, 1960年4月, 44~60页
- [18] Derjaguin, B. V. and T. N. Voropayeva, "Surface Forces and the Stability of Colloids and Disperse Systems", J. Colloid Sci., Vol. 19, No. 2, 1964, pp. 113~135
- [19] 唐存本, "泥沙起动的规律", 水利学报, 1963年, 2月
- [20] Лоу, Го-жун (窦国仁) "К теории трогания частиц наносов", Scientia Sinica (中国科学), Vol. 11, No. 7, 1962, pp. 999~1032
- [21] Rowe, P. N. and G. A. Henwood, "Drag Forces in A Hydraulic Model of A Fluidised Bed, Part I", Trans., Inst. Chem. Engrs., Vol. 39, No. 1, 1961, pp. 41~54
- [22] Bagnold, R. A., "Experiments on A Gravity-Free Dispersion of Water Flow", Proc., Royal Soc. London, Ser. A, Vol. 225, 1954
- [23] Martin, C. S. and M. A. Mostafa, "Seepage Force on Interfacial Bed Particles", J. Hyd. Div., Proc., Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 97, No. HY7, July 1971, pp. 1081~1100
- [24] Danel, P., R. Durand and E. Condolier, "Introduction à l'étude de la Saltation", La Houille Blanche, No. 6, 1953, pp. 815~829
- [25] Kalinske, A. A., "Criteria for Determining Sand Transport by Surface Creep and Saltation", Trans., Amer. Geophys. Union, Vol. 23, Pt. 2, 1942, pp. 639~643
- [26] Gilbert, G. K., "The Transportation of Debris by Running Water", U. S. Geol. Survey, Prof. Paper No. 86, 1914, p. 259
- [27] Bagnold, R. A., "Some Flume Experiments on Large Grains but Little Denser than the Transporting Fluid, and Their Implications", Proc., Inst. Civil Engrs., 1955, pp. 174~205
- [28] Bagnold, R. A., "The Flow of Cohesionless Grains in Fluids", Philo. Trans., Royal Soc. London, Ser. A, Vol. 249, 1956, pp. 235~297
- [29] Kresser, W., "Gedanken zur Geschiebe und Schweb-stoffführung der Gewässer", Oesterreichische Wasserwirtschaft, Vol. 16, No. 1/2, 1964
- [30] Fredsøe, J., "The Distinction Between Bed-Load and Suspended Load and Its Implication in River Morphology and Sedimentation Problems", Rep. No. 128, the Danish Center for Applied Math. and Mech., Tech., Univ. Denmark, Nov. 1977, p. 18
- [31] Einstein, H. A., A. G. Anderson and J. W. Johnson, "A Distinction Between Bed Load and Suspended Load in Natural Streams", Trans. Amer. Geophys. Union, Pt. 2, 1940, pp. 628~633
- [32] Einstein, H. A. and Ning Chien (钱宁), "Can the Rate of Wash Load be Predicted from the Bed Load Function", Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 34, 1953, pp. 876~882
- [33] 钱宁, "关于床沙质和冲泻质的概念的说明", 水利学报, 1957年第3期, 29~45页
- [34] 麦乔威、赵业安、潘贤弟, "多沙河流拦洪水库下游河床演变计算方法", 黄河建设, 1965年3月号, 28~34页
- [35] 钱宁、张仁、李九发、胡维德, "黄河下游挟沙能力自动调整机理的初步探讨", 地理学报, 36卷, 2期, 1981年6月, 143~156页
- [36] Partheniades, E., "Unified View of Wash Load and Bed Material Load", J. Hyd. Div., Proc. Amer. Soc. Civil

Engrs. , Vol. 103, No. HY9, Sept. , 1977, pp. 1037~1058

[37] Bagnold, R. A. , "Auto-Suspension of Transported Sediment; Turbidity Currents", Proc. , Royal Soc. London, Ser A, Vol. 265, No. 1322, Jan. 1962, pp. 314~319

[38] 钱宁、麦乔威, "多沙河流上修建水库后下游来沙量的估计", 水利学报, 1962 年第 4 期, 9~20 页