



关于“床沙質”和“冲瀉質”的概念的說明

中国科学院水工研究室 錢 宁

提 要

本文根据河流实测資料及水槽試驗結果，指出河流中粗細不同的泥沙的运动尽管受制于同一規律，可是粗細不同的泥沙在外表的表现上，以及对实际工程問題所起的作用上，却有極大的不同，因此有分別定名的必要。

組成床沙主体，一般只占輸沙中的一小部分的粗粒泥沙，称为“床沙質”。床沙質的輸移率决定于水流的强弱，和上游來沙多寡無關。它和流量間的关系是建立在水力学上的关系，可以根据輸沙理論推算。河流輸送床沙質的能力，是决定河槽穩定性的两个因素之一。

在床沙中为量極微，但一般为輸沙主体的細粒泥沙，称为“冲瀉質”。冲瀉質的輸移率决定于上游來沙多寡。它和流量間的关系是建立在流域因素共同性上的关系，有賴于实测或經驗公式决定。來自流域的冲瀉質的多寡，决定了水庫淤積的速度。

引 言

在利用河流水利資源，规划治河方案的时候，需要同时知道通过河段輸移下行的水量及泥沙量。各水文站主要的工作之一，也就在測定水位—流量曲綫及流量—輸沙率曲綫；有了这两套曲綫以后，可以根据水位的变化，判断相应的流量和輸沙率的改变。在根据实测資料繪制曲綫的时候，我們时常發現只要測驗河段比較穩定，河槽沒有劇烈的改变，則水位—流量关系就比較明确。相反的，流量—輸沙率曲綫上的点子一般都比較分散；尽管輸沙率随着流量作一定的增加，可是在同一流量下，輸沙率却可以相差到好几倍。圖 1 是黄河包头水文站 1951 年的实测紀錄〔1〕，圖 2 是陝縣站 1933~1940 年的水位—流量曲綫〔2〕和汛期（七月至十月）流量—含沙量关系的变化范围，正說明了这一現象。

在包头站，流量和含沙量間的关系在低水位时比較明确，到了洪汛期，便变得完全缺乏相关关系。而在下游陝縣站，小流量时的点子也仍然相当分散。可是如果進一步把輸沙按照一定的粒徑大小分級，那末，就會發現泥沙中較粗的部分的輸移率事实上是和水流的变化息息相应的。我們分析了美國柯罗拉多河大峽谷站在 1943~1945 三年中的懸移質測量紀錄〔3〕，把各种不同大小的懸移質含沙量和流量間的关系繪出在圖 3 上。由此可以很清楚的看出來，含沙量与流量間的关系，随着粒徑的变粗而日

見明确。如果輸沙中以細粒泥沙占主体，如同黄河和柯罗拉多河那样，則总的含沙量和流量間的关系也就不会明确（見圖3a）。

流量和含沙量关系的不明确，指出通过河段輸移下行的細粒泥沙量，并不完全受制于流量的大小，而是在更大的程度上，决定于从上游進入河段的这一部分泥沙的量。要說明这一点，我們曾經在水槽中做过試驗〔4〕。試驗中流量和水流的情况始終保持不变，自上游進入試驗段的泥沙量則人为地加以控制，一开始不断增加，然后保持不变，最后又急剧减少。水流中所含各种不同粒徑的泥沙的濃度，在这三个阶段中的变化如圖4所示。在圖4a中，各种不同粒徑的泥沙的輸移率虽然不是一个不变的常数，但是它們都只是圍繞着各自的平均值有所起伏，与上游來沙量的变化并不相应。在圖4b中，粒徑大于0.1公厘的泥沙的性能也还是如此，不过到了粒徑小于0.06公厘以后的泥沙，情形就完全不同。它們的輸移率純粹因上游來沙量的改变而作相应的升降，尽管流量並沒有不同。

早在1937年，就已經有人認識到河流中所帶細粒泥沙的輸移率，和水流之間似乎并不存在着任何关系〔5〕。这二十年内，也有不少学者对这一个問題進行了研究，提供了一定的解釋〔6、7、8〕。不过，正由于粗細泥沙在表面表現上是如此地不同，給人一个十分强烈的印象，以致于我們很容易只看到并強調了它們之間不同的地方，而忽略了在本質上的一些相似之处。目前的一些解釋，認為細粒泥沙自上游的來量不及河槽挟帶这一部分泥沙的能力，因此它們根本不存在于河床之中，輸移量也自然因上游來沙的多寡而作相应的改变。这样的說法乍看起來确乎可以完美地解釋了許多現象，可是如果我們深入地要把這一問題再作進一步的研究，將會發現接受了这样一个解釋，就等于承認粗細不同的泥沙运动时所遵循的規律，在本質上有截然不同的地方。这样的結論顯然是比較难于接受的，因为控制泥沙运动的基本理論只能有一个。

本文的目的，就是要在作者在國外進行过的研究〔6〕的基础上，來嘗試对這一問題提出另一种看法。全文的結構將圍繞着对下面这几个問題的解答來進行：

1. 怎样來解釋粗細泥沙在表面表現上所顯示的不同？
2. 我們應該如何來理解所謂水流的“挟沙能力”？
3. 为了更好地决定細粒泥沙的輸移率，應該朝那个方向來進行研究？
4. 把河流中挟帶的泥沙，按粗細不同分別來看待，又有什么样的实际意义？

粗細泥沙在河流中所处相对位置的不同

河流的性能，从基本上來說，决定于流域中所產生的水量和泥沙量。除了少数犹在急剧改变中的河流以外，世界上大多数的河流，經過長期的堆積和侵蝕作用，大致已經取得了平衡；也就是說，它們能够放行來自上游的水量和泥沙量，在一个比較長的時間以內，河槽并無顯著的改变。在另一方面，除了在上游峡谷区中，有时基岩暴露以外，在極大多數的河流中，組成河床的泥沙，也就是河流挟帶下行的泥沙。这一类的河流，我們称之为冲積河流。冲積河流河床中的泥沙，事实上正是过去來自上

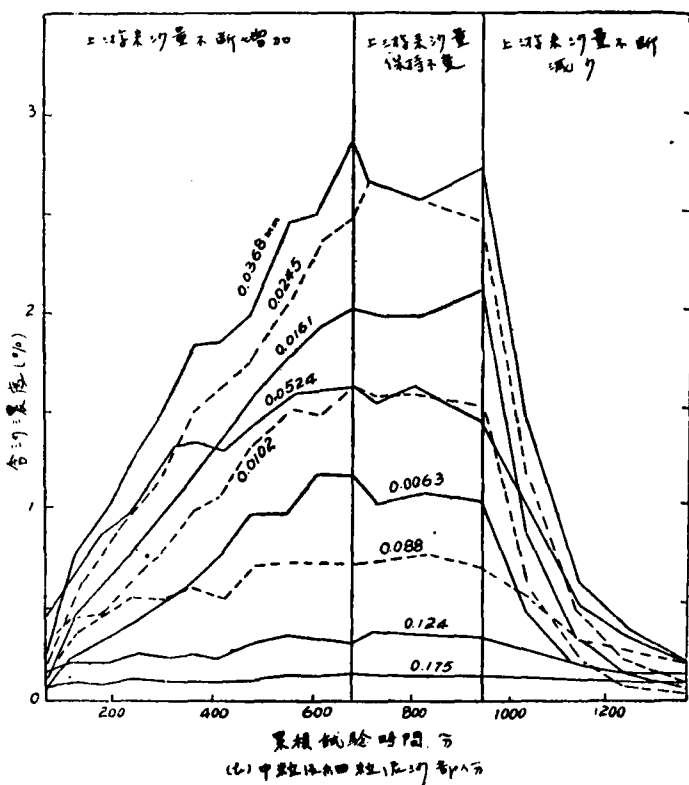
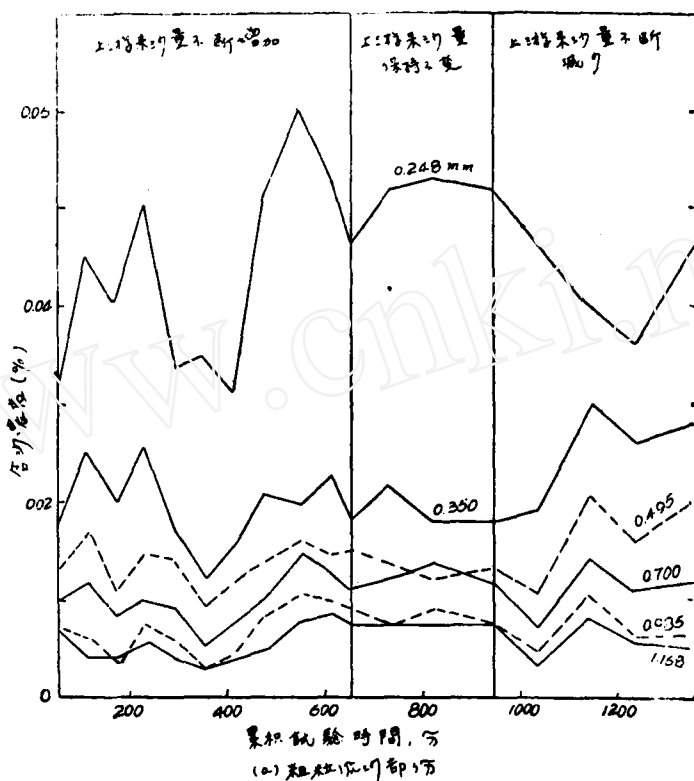


圖4. 在一定水流情況下, 隨着上游來沙量的改變, 粗細不同泥沙的輸移率的相內變化

游，不能为水流帶走，而在当地堆積下來的泥沙。

在河床淤積抬高的过程中，毫無疑問的，粗粒泥沙要率先沉淀下來，細粒泥沙則大部分都能輸移通过，为輸沙的主体。但是，这并不是說，河床中完全沒有細粒泥沙的存在。事实上除了粗粒泥沙的空隙間可能填塞一部分細粒泥沙以外，細粒泥沙更特別集中在河床表面附近，使床面的泥沙比床內的泥沙組成要細。圖 5 是前面所提到的那个試驗中，在上游來沙不断增加，河床淤積抬高的階段內，自床面以下各層床沙的粒配曲綫。由此可見組成河床主体的泥沙以粗粒為主，各層相差不多，而表層的泥沙則比床內其他各層泥沙要細得很多。同样的現象还在旁的很多类似的試驗中被發現〔9〕。

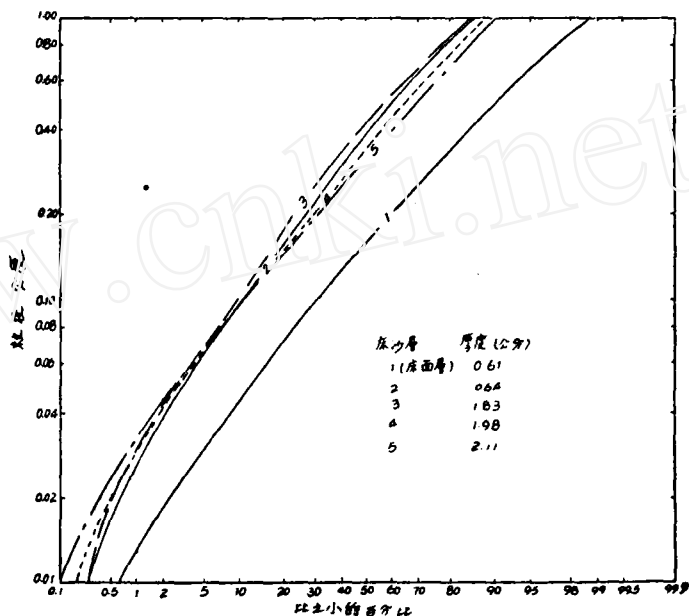


圖 5. 堆積河床床沙的粒配曲綫

在河床堆積的过程中，粗粒泥沙沉積床底，細粒泥沙停留床面，这一个現象的成因需要加以解釋。我們知道冲積河流的床面并不是平整的，而是有一定的起伏，形成典型的沙壟，如圖 6 所示。沙壟的剖面不是对称的，其迎水面(AC)坡度較平，背水面(CD)坡度較陡。水流在經過这样的河床时，并不完全与河底平行。近底的主流自 A 点循上坡以达壟峯 C，然后發生分离，至 E 点再和河床相遇。在 CE 間形成一个迴轉極緩的漩渦。



圖 6. 冲積河流河床上典型的沙壟

泥沙顆粒沿着迎水坡滾動上行，到了壟峯以后，落入背水面的渦流中，在那里沉積下來。这样，沙壟的迎水面上泥沙不断外移，背水面則因來沙的增加而前伸，結果整个沙壟就向前徐徐移动。在壟峯水流的分离面上，由于上下層水流流速的急剧改变，当地水流比較不穩定，產生了局部的紊動。由此而引起的向上紊速，足以使沿迎水坡面來到壟峯的細粒泥沙，在壟峯附近被举懸浮水中。这些細粒泥沙并不落入背水

面的渦流区中，就地堆積起來，而是被水流帶到下一个沙壟。其中有一部分細粒泥沙在下一个沙壟和緩的坡面上沉降下來，当地的水流較深，流速較緩，然后循着迎水坡慢慢向前移动。只有在接近床底处运动的粗粒泥沙，到达壟峯以后，水流的向上上紊速不足以使之举离渦流区，結果或則为漩渦所攫取，或則沿坡面 CD 滑落下來，都沉積在壟谷中。随着沙壟的前移，这一部分粗粒泥沙便被沙壟掩埋起來，一直要等到沙壟过去，后一个沙壟犹未到來以前，然后又暴露出來，和水流相接触。暴露面上的一部分粗粒泥沙再度發生运动，到了次一个沙壟的壟峯又被攔截停降下來。

按照这样一种机械作用，随着河床的淤積抬高，粗粒泥沙組成了河床的主体，細粒泥沙則僅为床面沙壟的一个組成部分，在主槽的河床整体中，所占成分極微。

然而事实上主槽中鑽探出來的沙样，指出在粗粒泥沙中时常挟雜有細粒泥沙層。这是因为河道中的水流是三元水流，除了主流区以外，还有不少迴流区或近于死水区，当地水流流速極緩，河水中挟帶的細粒泥沙就有机会在那里沉淀下來。同时主槽的位置又不是絕對不变的，而是有一定的移动；移动的速度一般非常慢，也有發生突变的时候。如果主流進入了原先的迴流区，在那里沉淀下來大量的粗粒泥沙，那末，在这样的粗粒堆積物下面，就会有細粒堆積物的存在。不过，一般說來，在主槽床面以下几公尺的河床中，床沙組成物基本上以粗粒泥沙为主。

还有一种例外的情形需要加以考慮。在淤積率特別高，上游來沙的粒配又分散相当廣的地方，即使水流情况沒有改变，粗細泥沙可能交互成層淤積。前面說过，細粒泥沙被紊流挟帶越过壟峯，一部分將沉降在前面的沙壟迎水坡面上，然后随水流沿壟坡徐徐下行。如果淤積率特別高，在沙壟迎水坡上沉降下來的細粒泥沙为量过多，不是完全能为水流所帶走，这时一部分細粒泥沙就要停積在那里，遮盖住了底下的粗粒泥沙層。这样，沙壟向前移动，在后面留下了兩層粗細不同的泥沙。如果上游的泥沙供应不断，則随着第二个沙壟的來到，又在前一个沙壟所遺留下來的細粒泥沙層上堆積了一層粗粒泥沙。同样地，又有一層新的細粒泥沙会掩盖在这層粗粒泥沙的上面。如果这样的程序不断重复進行，河床中将出現了一系列粗細交替的層次。

圖 7 是我們在水槽中的試驗結果〔9〕，代表沿着全

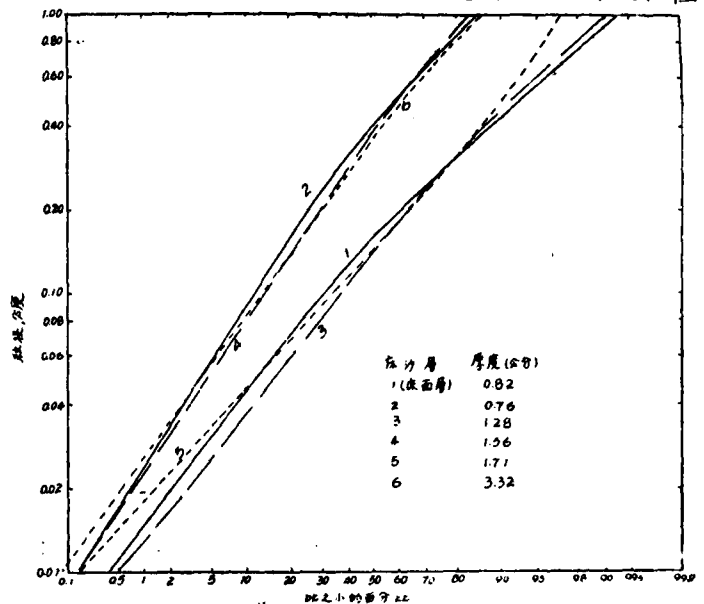


圖 7. 在水流不变而沉積率極高的情况下，河床堆積物中的層离現象

槽長沉淀下來的八層淤積物的粒配曲綫，粗細交替的情況是十分觸目的。這樣的現象在天然河流中的分布範圍不廣，一般只局限於兩河相匯處的迴水區，以及河流進入水庫或湖泊時所形成的三角洲地帶，在我們目前的討論中，可以暫時忽略不計。雖然，對於專門研究層離現象的地質學家，這一個試驗結果也許向他們提供了一些有用的綫索。

總的說起來，在沖積河流中，組成河床主體的是粗粒泥沙，細粒泥沙局限在河床的表面，它們的數量是十分有限的；雖然，以後將會提到，這一部分為量極微的細粒泥沙，有其不容忽視的意義。

在另一方面，在同一水流中，細粒泥沙顯然要比粗粒泥沙容易運動得多，因此它們組成了輸沙的主體。這樣，我們就得到了如下的極饒興趣的結果：

巨量的粗粒床沙只支持少數的粗粒泥沙運動下移。

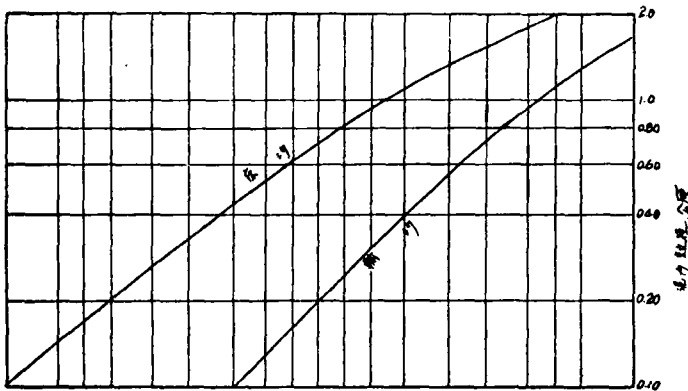
為量甚微的細粒床沙却反映着大量的細粒泥沙為水流挾帶下行。

因為粗細泥沙在河流中所處相對位置的不同，使得它們的表現也迥然不同。

上游來沙量改變時平衡河段的變化

河流的平衡，有賴於水流在經過河床時候的輸沙容量，恰好等於河段上游各種不同粒徑的泥沙來量。如果因為某種原因，上游來沙量忽然起了改變，則將引起河段一系列的變化。這些變化和上游來沙改變為時的久暫，以及來沙過剩（或不足）量與有效床沙量之比有關。下面我們將以實例，按來沙改變的久暫分別說明。

來沙量暫時發生變化時的情形 設有一河流其中某一河段長 10 公里，寬 500 公尺，床面內 1 公尺為有效床沙，其粒配如圖 8 所示。來自上游的泥沙量平均每年為 1,600,000 立方公尺，其粒配亦繪出於圖 8 中。假定該河段已經達到平衡，上游來沙量等於河槽輸沙容量；而在某一年中，上游來沙忽然超過正常來沙量的百分之二十，問題在研究通過河段下行的泥沙量會起什麼相應的變化。



小於第一說沙數量的面分比

圖 8. 假想沖積河流床沙和輸沙的粒配曲綫

表 1 是各級泥沙在一年中來沙改變量和有效床沙量的比值；

表 1

有效床沙量、河道輸沙容量及上游來沙改變量間的关系

粒徑 (公厘)	床沙 (百分比)	輸沙 (百分比)	有效床沙量 (立方公尺)	年輸沙容量 (立方公尺)	年輸沙容量 有效床沙量	來沙改變量 (立方公尺)	來沙改變量 有效床沙量
0.10~0.20	2.0	30.0	25,000	480,000	19.16	96,000	3.84
0.20~0.40	14.4	30.0	180,000	480,000	2.66	96,000	0.54
0.40~0.80	41.6	16.3	520,000	250,000	0.50	52,000	0.10
0.80~1.60	38.0	3.6	475,000	58,000	0.12	11,600	0.02

在下面的討論中，对象姑且限于 0.10~0.20 公厘的細沙，及 0.80~1.60 公厘的粗沙。为了闡釋方便起見，且假定河流的年輸沙容量与有效床沙量之比不受來沙量的影响^①，則在上游來沙發生改变的前后，通过河段下行的泥沙量如圖 9 所示。圖 9 (a) 为平衡河段的情形，自上游進入河段的泥沙量，等于通过河段下行的泥沙量；圖 9 (b) 是進入河段的泥沙量才發生改变时的情形，河段还没有感受到上游來沙的变化，下泄的泥沙量还保持和河段原有輸沙容量相等；圖 9 (c) 是上游來沙量增加 20% 后一年河段的情形。这时通过河段的泥沙量与來自上游的泥沙量之間的对比关系，因泥沙粗細的不同，而有很明顯的区别。

对于粗沙來說，95% 的过剩泥沙都沉積在河底，但是因为來沙改變量只及有效床沙量的極小一部分，由此而引起的有效床沙量的变化还不到 1.5 %。水流情况和有效床沙量既然基本上維持不变，因此河槽挟帶粗沙的能力，也就是通过河段下行的粗沙量，与平衡未受破坏以前的数字比較起來出入很小，只相差 2 % 左右。換句話說，河槽挟帶粗沙的能力，决定于水流的情况，与上游粗沙來量暫时的改变無关。

細沙的情形恰好相反。过剩的泥沙中，虽然只有 5 % 沉降下來，不过却使有效床沙量增加了 19%。在另一方面，由于細沙在整个河床組成中所占成分本來就很少，这样的增加并不足以使水流的情况有所改变，但是却通过河流的挟沙能力关系，使自河段下行的細沙量增加了 19%，基本上与上游細沙的來量完全相等。因此，通过对于細沙有效床沙量的改变，上游細沙的來量是在水流的情况以次，对河槽挟帶細沙的能力起决定作用的一个因素。

上面的例子中，我們虽然假定上游來沙过多，河段發生淤積，但是同样的結論也可以应用到上游來沙不足，河段發生冲刷的情形。总的說起來，如果在一定的水流情況下，从上游進入平衡河段的泥沙量起了暫时的变化，則如發生变化的泥沙屬於床沙組成中較粗的一部分，那末，通过河段下行的泥沙量基本上并没有什么改变，还是保持河槽在这样的水流下原有的輸沙量。如果發生变化的泥沙屬於床沙組成中極細的一

① 这样一个假定，嚴格說來是并不完全正确的，不过采用了它，就可以举出具体的数字，使問題更容易說明。事实上不作这样的假定，只根据上節中所指出的粗細泥沙相对位置的不同，还是可以得到同样的結論。

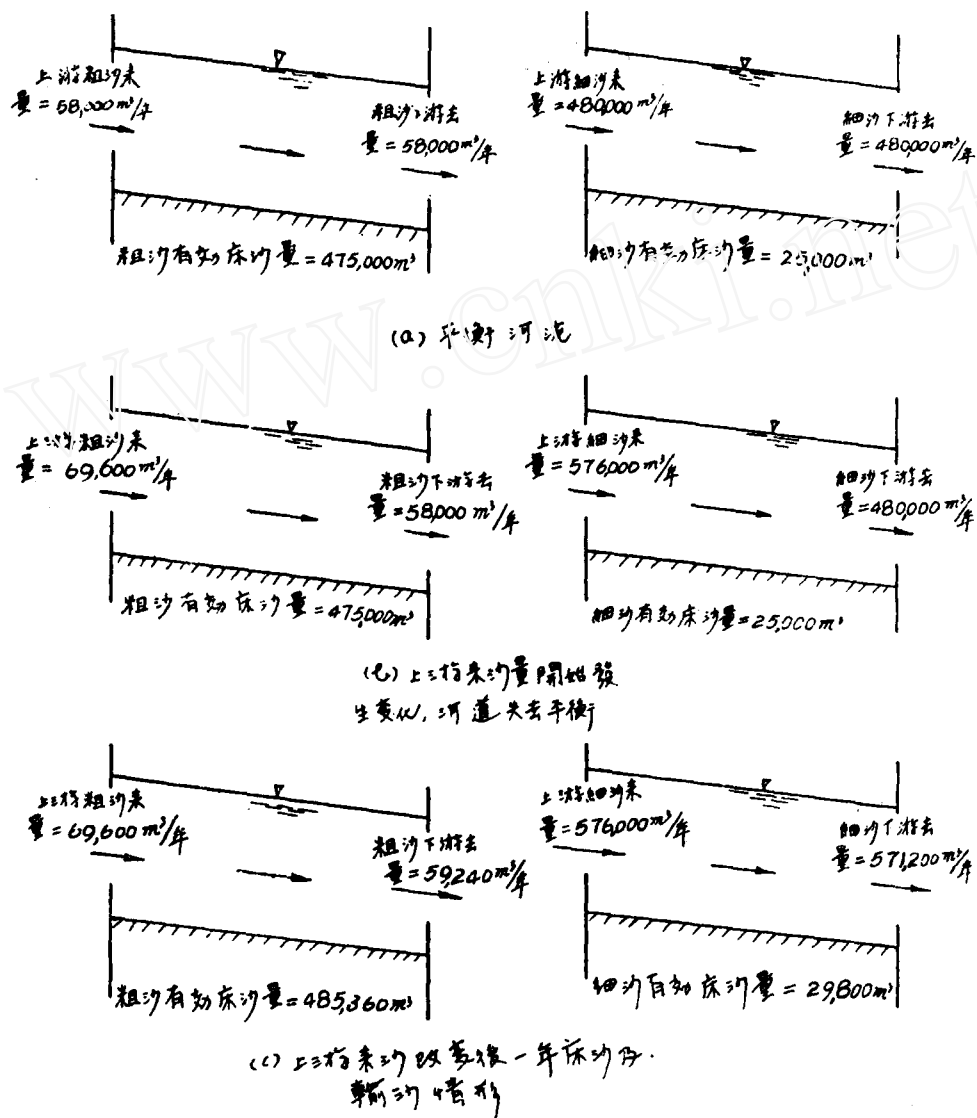


圖 9. 上游泥沙來量發生改变的, 平衡河段的相应变化

部分, 則輸移下行的泥沙量將起相应的变化, 基本上使來自上游的泥沙都能放行通过。

來沙量永久發生变化时的情形 現在我們要來進一步考慮如果上述進入河段的來沙量的改变是屬於永久性的, 譬如上游兴建了水庫, 攔蓄了一部分泥沙, 或者某一地带因为水土保持不周, 忽然溝壑叢生, 大量泥沙帶入河流, 这时河段將起什么样的变化。

在上游來沙量發生改变以后, 一开始河道輸沙容量并不和上游來沙量相等 (見圖 9)。但是日久以后, 河道輸沙容量必須等于上游來沙量, 不然河道不能保持平衡。

在同一流量下，河道的輸沙容量只有在下面兩種情形下才可能改變：

(1) 有效床沙量起了變化；和 (或)

(2) 河槽的深度、寬度及坡降起了變化，改變了水流情況，水流輸沙能力因之加強或減低。

對於粗粒泥沙來說，一方面泥沙改變量只是有效床沙量的一小部分，要靠有效床沙量的改變曠時日久。另一方面，如果來沙過剩，則床面因來沙停積而抬高，既然只有靠近床面這一部分的泥沙才是有效的床沙，因此並不是所有沉降的過剩來沙都成了有效床沙；同樣地，如果來沙不足，部分床沙被水流帶起而成輸移沙，則底層床沙暴露，過去深埋床內的床沙這時又變成了有效床沙。由於這兩方面的原因，河道挾帶粗粒泥沙的容量的改變，要想依賴有效床沙量的改變是極其滯緩無效的，主要還是有賴於河槽本身的改變，對於細粒泥沙來說，情形正好相反，床沙只要小作調整，已足以應付大量輸沙的改變，固無待於河槽本身的急劇變化。

這意思是說，如果在一定的流量下，從上游進入平衡河段的泥沙量起了永久的變化，則如發生變化的泥沙屬於床沙組成中較粗的一部分，那末，河槽的斷面和坡降將起一定的變化，使得河流挾帶粗粒泥沙的能力正好等於上游的粗粒泥沙來量。如果發生變化的泥沙屬於床沙組成中極細的一部分，則最終的結果只是床面細粒泥沙的有效床沙量有所改變，河槽本身並不受任何顯著的影响。

冲積河流的挾沙能力問題

在冲積河流中，組成水流周界的，不是固定的實心敷面，而是由泥沙顆粒堆積成的可以移動的疏松體，這些河床中的泥沙和水流所挾帶的泥沙是屬於同一類的物質。組成河床的泥沙不僅對於水流產生了一定的阻力，而且還是輸沙現象有機整體中不可分割的一部分。在水流中輸移下行的泥沙，並不是與河床中的泥沙，特別是河床床面的泥沙，絲毫沒有關係的；也就是說，並不是在水流中的泥沙永遠輸移下行，在河床中的泥沙永遠停積不動。即使在平衡的情形下，也有一部分推移質在河床上某些地方沉降下來；變成床沙的一部分，而水流又從河床上其他地方，帶起了另一部分床沙使之輸移下行。所謂平衡只是指這兩部分泥沙在較長的時間以內互相相等而已。同樣的交換關係，也存在於推移質與懸移質之間。從河床表面有效床沙區起，一直到水面止，整個泥沙的運動是連續的，有效床沙區中的泥沙可以看成是靜止下來猶未繼續運動的輸移沙。所謂冲積河流的挾沙能力，就是指在一定的床沙組成下，水流所能挾帶的泥沙量的問題。這里面包括了三個因素：(1) 各種粒徑的泥沙的有效床沙量；(2) 水流的大小；及 (3) 各種粒徑的泥沙的輸移率。

推移質沉降床面，變成床沙一部分的頻率，取決於水流在床面使這一部分泥沙冲刷外移的或然率。這樣一個或然率，可以看成是一個床面面積的分數，在這部分面積內，水流作用於泥沙顆粒上的外力，在任何時間內都足以使沙粒發生運動。使泥沙冲刷外移的或然率，一方面決定於水流的強弱，另一方面決定於沙粒的粗細。在同樣的

水流中，使細粒泥沙冲刷外移的或然率自然要比粗粒泥沙为巨。因此，和粗粒泥沙比較起来，細粒泥沙在輸移中不大容易沉降下来，沉降以后在床面停留的时间也比较短。但是，不管怎么样，細粒泥沙还是按照一定的或然率停降床面，組成床沙的一部分，而不是永远不沉降下来，根本就不存在在河床中。換句話說，粗細泥沙之間只有量的区别，而沒有質的差异。水流对它們的輸移能力都要根据它們在河床里所占的百分数而决定。

如果我們把有效床沙量、水流大小及泥沙輸移率三者結合起来來理解冲積水流的挟沙能力，那末，試驗証明，至少对于沙質河床說，通过其上的粗細泥沙之間并沒有任何不同，它們都遵循同一規律⁽⁶⁾。相应的試驗在卵石河床上似乎还没有人做过。

指出了粗細泥沙的运动在本質上并無区别以后，現在我們要來進一步說明目前对于水流挟沙能力的概念所存在着的一些誤解。

第一种錯誤的概念是从一个比較簡單的水槽輸沙試驗結果演化而來。当清水流过一個周界固定的水槽（例如鋼板水槽）时，如果我們在水流中加入泥沙，一开始泥沙都能为水流挟帶下行，并沒有在槽床上沉淀下来，或者，更正确一点說，它們之中極少数的一部分在進行之中有可能沉落在槽底，不过在槽底停留的时间是如此短促，槽床基本上还是保持其原來面目。一直等到水流中所含的泥沙量超过一定的極限，过多的泥沙便沉淀下来，完全遮盖了槽底，改变了水流的周界条件。这样的極限含沙量我們称之为（鋼板）水槽的饱和含沙量。知道了周界固定的水槽的饱和含沙量，就可以以之解决一部分实际工程問題。譬如从河流引水進入一条混凝土敷面的灌溉渠道时，如果要想避免泥沙在渠道中淤積，則內引的泥沙量就应该小于混凝土渠道在当时水流条件下的饱和含沙量。不过，如果我們把边界固定的水槽的饱和含沙量公式推廣以及冲積河流，作为冲積河流的挟沙能力公式，那末，由于兩者边界条件的不尽相同，不可避免的将会引起一些誤解和問題。譬如說，如果上游進入河段的泥沙量不及河流所能挟帶的泥沙量，按照饱和含沙量的定义，通过河段下行的泥沙量就应该等于上游的來沙量。然而，根据上一節中的例子，对于粗粒泥沙來說，由于河床中存在着大量这样的泥沙，水流在經過河段时，不足的泥沙可以自河床中取得補給，結果在短期間以內，通过河槽下行的泥沙量还是保持和河槽的輸沙容量一样。就是对于細粒泥沙說，表面上看來它們在水流中的濃度好像沒有达到饱和含沙量，進入河槽的細粒泥沙基本上都能通过，然而事实上必然有一定相应的細粒泥沙同时存在河床中，这一部分床沙为量尽管小，却自具一定的意义。因为前面說过，我們可以根据这一部分有效床沙量來判断在当时的水流条件下，通过河槽下行的細粒泥沙量。

第二种錯誤的概念，是把冲積河流的挟沙能力，看成是水流大小和輸沙率間的單一关系。与每一个水流条件相适应的，有一定的泥沙輸移率，如果上游來沙量大于泥沙輸移率，將引起泥沙在河段中的堆積，反之則將引起河段的冲刷。这样的理解等于把有效床沙量这一个因素假定为不变的常数，从前一節的例子中，我們知道对于粗粒泥沙說，这样的假定是近乎正确的，对于細粒泥沙說，就完全与事实相違了。

在前一節中，我們已經說明了由于粗粒泥沙的輸沙容量只占有效床沙量的極小一部分，后者基本上是一个常数，不因水流的强弱及上游來沙的多寡而异。这样的現象可以很容易地加以証实，我們只要在不同的水流及來沙条件下，从河流的主槽中取出床沙沙样，進行比較。可惜目前这方面的資料还很少，作者手头所掌握的資料，只有美國罗帕河的实測結果^①。1951年美國垦务总局在奈勃拉斯卡州福尔頓附近的罗帕河上，選擇了长达7公里的河段，在十个不同的断面上進行床沙取样分析。圖10是流量在50到230秒公方間床沙中数粒徑的改变。由于床沙組成在平面上的分布一般都極不均匀，因此从不同測点取出的床沙中徑可能有相当大的出入，但是，总的說起來，床沙組成并不因流量不同而有所改变。在挟沙能力的三个基本因素中，有一个因素——有效床沙量——既然是常数，

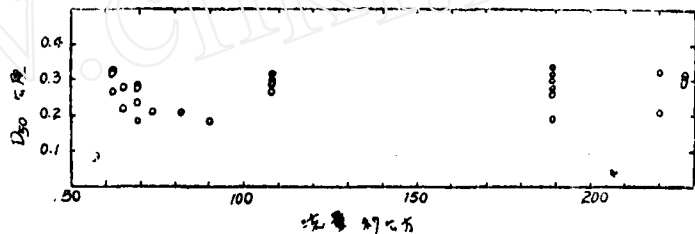


圖 10. 美國罗帕河在不同流量下的床沙中数粒徑

所剩下的两个因素——水流大小与泥沙輸移率之間，就自然存在着一定的函数关系。因此，对于粗粒泥沙說，一定的水流便只能輸移一定的泥沙量。

細粒泥沙的情形就完全不同。我們完全沒有理由把細粒泥沙的有效床沙量看成是常数。細粒泥沙的輸移率与水流大小間的單一关系，在水力学的意义上看是不成立的。上一節中的例子也完全証明了这一点。所以会把細粒泥沙的有效床沙量看成是常数，主要是因为这一部分泥沙在河床中占量極微，它們即便有所改变，对于床沙整体的組成說，几乎不發生任何影响。因此我們很容易从整体中所得到的印象，推廣以及組成整体中的每一个部門，把細粒床沙也看成是不变的常数了。目前通用的天然河道中取床沙沙样的方法和所用的仪器，也不容許我們能对这一部分床沙取出有代表性的沙样來。

不管是那一种情形，对于冲積河流挟沙能力的理解之所以有錯誤，都是因为沒有把有效床沙量这一个因素提高到其应用的地位的緣故，由此所得到的認識遂不够全面。

現在我們有条件來把粗細不同的泥沙分別另定專名，以資分辨。虽然溯本追源，粗粒泥沙也是來自流域的冲刷，但当進入河槽以后，在輸移的过程中，随时都和河床中的泥沙發生交換，因此，对于某一个河段來說，進入河段的粗粒泥沙可以看成直接來自上游河床，这一类組成極大部分床沙的粗粒泥沙，我們称之为“床沙質”^②。細粒泥沙自流域中冲刷帶入河槽以后，虽然也因各地河槽情况的不同，有一部分沉降变

① 美國垦务总局泥沙組主任W.M.Borland向作者提供了这一部分犹未發表的資料，作者在这里向他表示謝意。

② 如今留用的方法，把組成河床的泥沙称之为“河床質”，为了避免和“床沙質”这一名詞有所混淆起見，我們建議在沒有更好的定名方法以前，把“質”这个字用来指在水流中运动的泥沙。至于組成河床的泥沙，則不妨直称为“床沙”。

成床沙，水流又可能从河床中帶起極少量的細粒泥沙，使之輸移下行，但是这样的改变为量殊微，極大部分的細粒泥沙常能一瀉千里，基本上保持其本來面目，这一类占輸沙的大部分而在床沙組成中为量極微的細粒泥沙，特称为“冲瀉質”。

在这里，我們直接按來源的不同，把水流中运动的泥沙分为“床沙質”和“冲瀉質”。在文献中，时常可以看到把輸沙分成“推移質”和“懸移質”兩種，这样所用的分类別名的标准，是按泥沙在水流中运动的位置的不同，我們不要把它們混淆起來。床沙質和冲瀉質中同时包括有推移質和懸移質；自然，冲瀉質因为粒徑較細的关系，主要以懸移的狀態下行。

“冲瀉質”輸移率的決定

冲瀉質和床沙質一样，在知道了床沙組成和水流条件以后，就可以算出当时的輸移率。所不同的在床沙質的床沙組成是一个常数，我們只要到野外去進行一次全面的床沙取样，就可以分析決定，而对于冲瀉質來說，有效床沙量却是水流和上游來沙量的函数。現在我們的处境是这样：要想知道一定水流条件下的冲瀉質輸移率，必須知道当时冲瀉質在河床中的有效床沙量；而要知道冲瀉質的有效床沙量，又非知道这一部分泥沙从上游進入河段的來量不可。換句話說，尽管我們掌握了控制冲瀉質运动的規律，却仍然無以利用这样的水力学上的关系，來決定通过河槽的冲瀉質輸移率。

冲瀉質輸移率需要从不同的角度去決定。在圖4中，一定的流量下，我們可以任意改变冲瀉質的輸移率，只要我們相应地增减从上游進入試驗段的这一部分泥沙的量。这样的做法自然完全是人为的。在天然現象中，自上游進入河段的泥沙量与流量之間自有一定的关系，尽管这个关系可能極不明确。这是因为泥沙量及流量代表降雨以后，从流域中集流河槽的固体徑流和液体徑流，代表着一个現象的兩個方面。它們的量在不同程度上決定于同样的流域因素——降雨量、降雨强度、降雨分布、土壤、地形、土地使用情况等。換句話說，从水力学的意义上，冲瀉質的輸移率和流量之間固然不存在任何單一关系，但是从流域因素的共同性來看，兩者之間还是有一定的連系的。

冲瀉質的輸移率和流量間关系相关系数的大小，完全要看流域的情况而決定。如果流域比較小，降雨分布比較均匀，流域各部分地形、土壤、土地使用情况比較一致，那末，相关系数就比較大。如果流域比較大，各地泥沙冲刷的程度不一，同时降雨又常集中一个区域，不能遍及全流域，那时相关系数就比較小。以黃河流域來說，各地水土流失的情况極不一致。按照張瑞謹先生的估計〔2〕，陝縣以上，單位面積冲刷量以包头龍門間为最大，洛河流域次之，渭涇兩流域又次之，包头以上的区域最小，最大与最小相差十倍。在这样的情形下，如果降雨落在包头以上，水流就比較清，如果落在包头与龍門之間，同样的流量便会挾帶巨量的泥沙，無怪乎圖2中的流量~輸沙率曲綫，点子会分散如此之廣了。

通过流域因素的共同性，水流与輸沙之間存在着一定关系。在小流域里，这个关

系比較明确，我們可以应用統計或者其他的方法，找出关系的經驗公式。这样所得到的輸沙經驗公式，就可以用以估計其他性質相类似的河流的輸沙率。如果流域比較大，牽涉的因素比較多，这时应用經驗公式的精确度往往不能滿足要求，只能直接利用实測結果：而且最好按流域的情况以及降雨的分布，把全流域分成若干区域，在流量~輸沙率关系圖上的点子中，找出相应于在不同区域降雨的点子，这样就可以得到一族不同的曲綫，每一条曲綫代表在上游某一地区降雨或融雪后，帶到測站上來的水量和泥沙量間的关系。圖2中就按洪水來源的不同，把实測結果分成三个区域。第一区中，洪水主要來自包头以上地区，第二区中，洪水來自渭河華縣以上地区，第三区中，則为山峽間地区中局部降雨的結果。

應該指出來的，就是这样的关系，反映着目前的流域情况。如果流域因素有了改变，譬如說，水土保持工作的大規模开展，使得許多原先冲刷極烈的地区，不复为泥沙的主要來源，那时無論是輸沙的經驗公式，或是目前的实測結果，都不足說明新的改变了的情况。

从这一点可以看出來，水文站上的測流取沙工作，不應該僅僅以找到适用于該流域的流量~輸沙率关系为滿足，而應該和流域情况的調查測量相配合，从而找出流域因素和輸沙率的关系。進行这样的研究，需要首先找出和泥沙冲刷有关的各流域因素，决定足以代表各因素的指标，然后再从不同流域中的实測結果，利用統計的方法，分別找出各因素对于河流輸沙率的影响[10]。与流域出沙有关的因素一般包括三大类，第一类为流域內在的特性，例如流域的地質及地形；第二类为流域的情况，例如作物生長和土地使用的情形；第三类为降雨和水流的特性。因为因素牽涉極多，工作自然是十分繁重的，資料的累積也需要相当時間。但是这样的做法直接把產生的泥沙的因和果連系起來，因此就不受地域性的限制，在流域因素因水土保持或其他措施而有所改变以后，也可以很快地估計出輸沙率的相应变化。就我們目前所知看來，这是决定冲瀉質輸移率的一条正确道路。

划分“床沙質”与“冲瀉質”的实际意义

了解了床沙質与冲瀉質的不同以后，現在我們就有条件來說明引言中所提到的各种观察結果。圖1及2中流量~輸沙率关系之所以不明确，都是因為我們沒有把床沙質和冲瀉質分开，如果我們能够作出这样的区别，那末，正如圖3中所示的那样，大于0.1公厘以上的床沙質的輸移率，就会和流量的变化息息相应，而在0.1公厘以下的冲瀉質，和流量的关系就不复明确。同样地，圖1中在低水时期所得到的点子之所以比較集中，我們只要援引黃河规划委员会在分析黃河泥沙顆粒大小时所得出的結論[11]，就很容易明白了：

“各站懸移質泥沙顆粒粗細在年中各时期不同，隨流量与含沙量大小而异。根据華縣、陝縣、秦厂、濠口等站測驗結果，知道在汛期流量大含沙量大时，泥沙顆粒較細，非汛期流量小含沙量小时，泥沙顆粒較粗。这是因为流量大时含沙量的增高主要

是由于暴雨以后由黄土表面上冲刷携带下来的泥沙，故颗粒较细，而在低水时期，河水中泥沙的主要来源为河槽的冲刷，故泥沙颗粒较粗”。

用我们的术语来说，河流中运动的泥沙，在低水期以床沙质为主，至洪水期以冲泻质为主，所以低水期中泥沙输移率和流量间的关系比较明确，一入洪水期，关系反变得不明确了。至于图 5 中的试验结果，更是直接证明了我们的论点——床沙质的输移率决定于水流条件，与上游来沙的变化无关，冲泻质的输移率则因上游来沙的不同而有相应的变化。

把床沙质和冲泻质分开，其目的并不仅在于使我们能够从而理解河流中粗细泥沙在外观表现上之所以会有不同，而实具更深远的意义。

对于水利工程师来说，因泥沙而引起的工程问题虽然包括多端，但其中最主要的，则为河床变迁及水库淤积问题。

在开发河流水利资源中，要求我们对天然河流采取一系列的措 施——调节其流量，加大其水深，改正其曲度，造成天然落差以发电，筑渠引水以灌溉。天然河流在受到人为的干扰以后，或多或少的将失去了原有的平衡，引起一系列的变化。如果我们不能预见由此而形成的河床变迁，就无以权衡工程设计的合理性，保证完成预期达到的任务。甚至在完工以后，还会引起许多新的问题，带来了新的困难。

在天然河流中兴建了工程措施以后，上游来沙量及水量将有所改变。例如兴建水库以后，流量过程线因水库的调节而有根本的改变，泥沙则几乎全部拦蓄库中，下泄的水基本上成了清水；灌溉引水时，因为不希望泥沙入渠，引起渠道的淤积，在渠首一般布置有防沙措施，结果进入下游的水量和泥沙量的减少互不相称；筑堤束水以后，通过河段的水量和泥沙量虽然没有增减，但是单宽泥沙量及水量却有了不同。因此，所谓河床变迁问题，说得更具体一点，也就是上游来沙量及水量发生改变以后，河床断面、坡降及定向将如何发生相应的变化的问题。根据第二节中所讨论的结果，我们可以很清楚的看出来，与河床变迁问题有关的泥沙，事实上只包括床沙质一部分，冲泻质的来量如果有所改变，只要通过有效床沙量的改变，河段就足以建立起新的平衡，固无待断面或坡降的急剧调整。自然，我们不能就此肯定的说，冲泻质对于河床变迁问题完全没有作用，因为：

(1) 在河漫滩上，洪水降落时淤积下来相当数量的冲泻质，如果这样的沉积物属于粘土一类的物质，具有相当大的粘附力，则在主槽改道的时候，粘土层就不容易为水流所冲动；

(2) 在中国的河流上，常采用埝工结构，来改变水流方向，保护河岸。这一类透水性结构的收效，主要有赖于水流在通过以后，在它们的后面淤积下来大量的细粒泥沙，形成一个淤泥整体，从而具有一定的坚实性。如果上游冲泻质的来源中断，则透水河工结构物也将因此失效；

(3) 河流中挟带大量冲泻质以后，可能改变了水流的力学性质，从而影响到水流的挟沙能力。

不过，無論如何，和床沙質的作用比較起來，这些影响究竟是次要的。研究河床变迁問題时，主要的对象應該是床沙質。

在水庫淤積的問題中，情形恰好相反。这时候我們所关心的是庫容曲綫將如何因泥沙的沉積而起改变，以及水庫的可能寿命。床沙質及冲瀉質既然同时都被攔蓄在水庫中，就需要把它們都考慮在內。不过，一般情形下，冲瀉質占輸沙的主体，因此，在水庫淤積問題中起主要作用的，應該是冲瀉質，而不是床沙質。

分清了河床变迁及水庫淤積問題中起主要作用的泥沙对象以后，就可以使我們不致迷失了問題的本質。譬如說，研究某一河段的变迁的时候，如果上游沒有可靠的測量結果，我們就可以根据床沙質的輸移率在水力学的意义上之和水流强弱具有一定关系这一事实，在上游河段中应用輸沙理論，來估計進入研究河段的泥沙量。至于目前已有的輸沙理論之是否足够可靠，那完全是另外一个問題。同样的，如果在作水庫寿命的估計时，就不能根据建筑在力学基礎上的輸沙理論來計算入庫的泥沙总量，而必須依賴实测記錄，或从輸沙率与流域因素間的关系推算。

鑒別“床沙質”与“冲瀉質”的經驗規則

現在我們要來討論最后一个問題，就是怎么样來判別河流中的泥沙，那一部分屬於床沙質，那一部分屬於冲瀉質。

从床沙質和冲瀉質之所以会有不同出發，合理的划分方法應該是先找出各种不同粒徑的泥沙的輸沙量与有效床沙量之比，这个比值我們称之为 α ，即

$$\alpha = \frac{\text{輸沙量}}{\text{有效床沙量}}$$

然后我們可以在 α 中找到某一个常数值 α_1 ，超过这个常数的屬於冲瀉質，小于这个常数的屬於床沙質。也可能床沙質与冲瀉質之間存在着一定的过渡区，常数 α_1 不是一个單一值，而是有上下兩個極限。需要考慮的是輸沙量應該用那一个时期內的輸沙量，或者那一个流量下的輸移率。比較合理的办法，也許應該采用造床流量下的輸移率。对于这一点，目前我們完全沒有經驗。

在沒有更好的划分床沙質和冲瀉質的标准以前，我們不妨暫時采用一个比較簡便的經驗規則。首先求出床沙組成（由于目前的取样器無法取到表面的床沙沙樣，因此这里所謂床沙，是指有一定深度的河床泥沙），然后把最細的百分之十看成是冲瀉質，其余的百分之九十看成是床沙質。像这样，在上游山区礫石河流中，礫石是床沙質，沙子以下就是冲瀉質；到了中下游沙質河流中，沙子便成了床沙質，粉沙以下屬於冲瀉質；再到接近海口的地方，粉沙可能也变成了床沙質，冲瀉質便只剩粘土以下的物質了。不但在一条河流的不同河段間，床沙質与冲瀉質各有不同，就是在同一河段上，床沙質及冲瀉質的划分也可能因流量而异。譬如黃河陝縣附近，低水时河床上复盖有沙子，一到洪汛期，沙子便被洪水冲走，暴露了底層的卵石。像这样，沙子在低水期固然屬於床沙質，到了洪汛期，便屬於冲瀉質的范围以內了。

總 結

我們可以把前面所討論的各种細節，列成一個表格，作為本文的總結：

表 2 床沙質和冲瀉質的基本特性

特 性	床 沙 質	冲 瀉 質
根本來源	流域土壤冲刷	
直接來源	上游河槽	流域出沙
床沙組成	為床沙的主体，組成一般不变	聚集床面，因來沙多寡和水流強弱而随时不同
輸沙組成	一般只占輸沙中的一小部分	一般为輸沙的立体
輸沙形式	推移及懸移	推移及懸移，以后者为主
輸移率	決定于水流強弱，和上游來沙多寡無關	主要決定于上游來沙多寡
輸移率和水流間的关系	建立在水力学上的关系可以輸沙理論推算	建立在流域因素共同性上的关系，有賴于实测或經驗公式決定
控制泥沙运动的基本理論	兩者之間并無不同	
对实际泥沙問題的作用	床沙質輸移率決定河槽穩定性	冲瀉質輸移率決定水庫淤塞速度
鑒別方法	粒徑大于床沙組成中 D_{10} 的泥沙	粒徑小于床沙組成中 D_{10} 的泥沙

参 考 文 献

1. 黄河水利委员会 “黄河流域水文資料(河口鎮以上部分)，1934—53”，第一冊，1954，頁包1—包78。
2. 張瑞謹 “黄河泥沙冲積数量之分析”，水利，第十五卷，第一期，1947，頁93—107。
3. U. S. Bureau of Reclamation “Lake Mead Density Currents Investigations, 1940—1946”, Vol. 3, 1948, pp. 454—489.
4. Einstein, H. A. and Ning Chien “Can the Rate of Wash-Load be Predicted from the Bed-Load Function?”, Trans., Amer. Geophys. Union, Vol. 34, No. 6, 1953, pp. 876—882.
5. Vetter, C. P. “Why Desilting Works for the All-American Canal?”, Engineering News Record, Vol. 118, No. 8, 1937, pp. 321—326.
6. 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, Vol. 21, pt. 2, 1940, pp. 628—633.
7. Einstein, H. A. and J. W. Johnson “The Laws of Sediment Transportation”, Chapter 3 in Applied Sedimentation, P. D. Trask (ed.), John Wiley and Sons, 1950, pp. 62—71.
8. Гончаров, В. Н. Основы Динамики Русловых Потоків, Гидрометеорологическое Издательство, Ленинград, 1954, pp. 241—245.
9. Einstein, H. A. and Ning Chien “Transport of Sediment Mixtures with Large Ranges of Grain Sizes”, U. S. Corps of Engineers, Missouri River Division, Omaha, M. R. D.

Sediment Series No. 2, June, 1953, 50 pp.

10. Anderson, H. W. "Suspended Sediment Discharge as Related to Streamflow, Topography, Soil, and Land Use", Trans., Amer. Geophys. Union, Vol. 35, No. 2, pp. 268—281.
11. 黄河规划委员会 “黄河的泥沙問題”，油印本，1954年，10頁。

On the Concepts of "Bed-Material Load" and "Wash Load"

Institute of Hydraulic Research, Academia Sinica Ning Chien

Abstract

In this paper field measurements and laboratory Experiments are cited to illustrate the differences between the bed-material load and the wash-load. Such differences can be summarized in the following table.

	Bed-Material Load	Wash Load
Original source of the material	Watershed Erosion	
Direct source of the material	Upstream Channel	Upstream watershed
Composition of the bed material	Constituting the major part of the bed. Composition remaining generally unchanged.	Accumulated in significant amount only on the bed surface. Composition changing with the oncoming sediment load and the flow conditions.
Composition of the sediment discharge	Generally constituting only a small portion of the transport	Generally constituting the major portion of the transport
Mode of transport	Transported as bed-load and suspended-load	Transported as bed-load and suspended-load, mostly in suspension.
Laws which describe the mechanics of transport	No differences between the two	
Rate of transport	Determined by flow conditions, independent of oncoming sediment load	Essentially determined by oncoming sediment load
Relationship between transport rate and discharge	Well-defined relationship, established on the basis of mechanics. Theory is available for the calculation of the rate of transport.	Vaguely defined relationship, established on the fact that the same watershed factors control the production of water-and solid-flow. Rate of transport can be determined only from empirical formulas or field measurements.
Practical significance in differentiating these two types of sediment load	Transport rate of bed-material load determines the stability of the river channel	Transport rate of wash load controls the reservoir silting
Rule of thumb in identifying these two types of sediment load	Particles larger than D_{10} of the bed material	Particles smaller than D_{10} of the bed material