

332655



泥沙運動學引論

沙玉清 著



序

解放后，黄河流域的水土保持以及农田水利建设事业，和全国各地一样，获得了飞跃的发展。西北农学院，为了结合生产部门的迫切需要，和提高教师科研水平，曾于1961年春，组织了一次短期泥沙问题讲座，讲述有关控制泥沙、利用泥沙的基本原理。本书就是在当时的讲稿基础上，编写而成的。参加这次讲座的，除西北农学院水利专业教师外，还有陕西工业大学水利系、西北水利科学研究所和武功水利学校等单位的同志。

泥沙运动学，是一门正在形成的学科。对于章节内容的安排，缺乏成熟的范例做参考。本书的章节主要是依据当时讲座的目的和要求，结合我们的教学经验而安排的；经过事后检查，觉得这样布置，尚可说明问题。

本书共分八章：第一、二、三章主要讲一般泥沙和浑水的性质；第四章，我们把流体力学中泥沙运动有联系的基本概念，简要地加以叙述，是为了能更好地理解以后各章而作准备的；第五、第六两章，讲控制泥沙运动和冲淤性能的各种重要判据，比如开动流速、止动流速、扬动流速和挟沙能力等的规律；第七章，讲生产上所提出的泥沙问题，以及处理这些问题的一般原则；最后一章，讲有关泥沙运动的模型试验问题。

本书采用的计量单位，以对水利工作最方便的米、吨、秒制为主。但有时为了符合生产设计部门的习惯，也适当地用了其它单位。关于注明单位的方法，为了简明协调，我们采用国际上的通用方式，直接注明我国规定的单位代号，并外加括弧，以便识

別。比如，长度单位：公里（ km ）、米（ m ）、厘米（ cm ）、毫米（ mm ）、微米（ μ ）；重量单位：吨（ t ）、公斤（ kg ）；時間单位：秒（ s ）等等。

我們深刻地体会到：对于自然規律的探索，除了善于总结前人的研究成果、进行科学試驗和全面地积累資料之外，还要针对問題关键，提出新的方法和新的工具；这样，才能夠在原有的認識基础上深入一步。比如：我們利用沉速判数和粒徑判数，得到了介流区球体的精密沉速規律；引入泥沙的徑厚比作为开动流速的新参数；以及在解决水流挟沙能力問題时，采用了全面相关分析和个别特征分析相結合的方法。这些显明的例証，对于从事科学研究工作的青年同志，是会有一定帮助的。

我們这一工作，对于一門新的学科來說，仅仅是个开端，只提出了一个粗略的輪廓；我們热切希望得到讀者的批評和指正。

最后，作者衷心感謝西北农学院领导上的亲切关怀和大力支持，以及陝西工业大学赵乃熊同志和南京水利科学研究所李昌华同志，先后提出的宝贵意見。还要感謝西北水利科学研究所張灝、朱嗣先、于大字等同志，供給試驗資料；西北农学院水工教研組朱文荣、迟耀瑜、唐文岐、王丽波、沙际德等同志，热情帮助編写。

作 者

1963年12月

目 录

序

緒 論	1
§ 0-1 泥沙在生产上的作用	1
§ 0-2 泥沙运动	3
§ 0-3 泥沙运动学	5
第 1 章 泥沙的特性	7
§ 1-1 泥沙的顆粒特性	7
§ 1-2 泥沙的組合特性	12
§ 1-3 水(流体)的几个基本特性	26
第 2 章 沉速規律	30
§ 2-1 泥沙运动的規律	30
§ 2-2 沉速規律的意义	30
§ 2-3 測定沉速的条件	31
§ 2-4 浮沉現象	32
§ 2-5 球体沉速規律的力学基础	34
§ 2-6 沉速阻力系数的相似判据	36
§ 2-7 沉速判数和粒径判数	40
§ 2-8 介流区球体沉速公式	43
§ 2-9 非球体沉速公式(物体沉速一般公式)	46
§ 2-10 自然泥沙和人工块石的沉速	50
§ 2-11 瞬时沉速	56
§ 2-12 水析法与篩析法的銜接	60
§ 2-13 泥沙分类命名	63
第 3 章 渾水特性	66
§ 3-1 細微顆粒的理化特性	66

§ 3-2 浑水的力学性质	71
§ 3-3 群体沉速	79
§ 3-4 均匀群体沉速的基本规律	86
§ 3-5 组合群体沉速公式	93
§ 3-6 含沙率对孔口和堰流流量系数的影响	96
第4章 水流运动	99
I. 水流的内部结构	99
§ 4-1 水流的紊动	99
§ 4-2 紊流的力学性质	101
§ 4-3 流速的脉动	106
§ 4-4 副流	110
§ 4-5 螺旋流的成因	112
§ 4-6 副流与冲淤的关系	120
II. 流速	121
§ 4-7 平均流速	121
§ 4-8 动床的糙率	124
§ 4-9 作用流速	129
§ 4-10 幺速	130
§ 4-11 水流流态和流型的相似性判据	132
III. 异重流	135
§ 4-12 异重流的位置	136
§ 4-13 异重流的运动规律	137
§ 4-14 产生异重流的条件	141
§ 4-15 异重流的稳定性	142
§ 4-16 异重流的挟沙能力问题	144
第5章 挟动流速	146
§ 5-1 开动流速	146
§ 5-2 雨水的冲刷	147
§ 5-3 明渠泥沙的开动	148
§ 5-4 泥沙开动的水力过程	152
§ 5-5 开动流速与开动幺速的关系	153
§ 5-6 开动作用力和阻力	154

§ 5-7 阻力系数	155
§ 5-8 分子阻力系数	158
§ 5-9 基本规律中常数和指数的决定	161
§ 5-10 淤泥的孔隙率与开动流速的关系	165
§ 5-11 泥沙开动流速实用公式	167
§ 5-12 倾斜河床上泥沙的开动流速	168
§ 5-13 扬动流速	170
§ 5-14 止动流速	172
§ 5-15 开动流速、扬动流速、止动流速的相互关系	177
第6章 挟沙能力	182
§ 6-1 挟沙水流	182
§ 6-2 挟动现象	182
§ 6-3 含沙量与挟沙能力的概念	186
§ 6-4 挟沙能力与水流流速的关系	188
§ 6-5 渠段挟沙能力的变化与局部冲淤的关系	191
§ 6-6 探索挟沙能力基本规律的途径	193
§ 6-7 含沙量的分布	194
§ 6-8 影响挟沙能力的因素	200
§ 6-9 变量的相关分析	204
§ 6-10 回归方程式	206
§ 6-11 挟沙能力的基本公式	207
§ 6-12 常数和指数的决定	208
§ 6-13 挟动流速	212
§ 6-14 指数 n 值	212
§ 6-15 挟沙能力公式中沉速指数的验证	214
§ 6-16 挟沙系数	218
§ 6-17 缺乏资料时挟动流速和挟沙系数的估计	223
§ 6-18 挟动流速与含沙量的关系	226
§ 6-19 挟沙能力的一般公式	227
§ 6-20 不淤挟沙能力与不冲挟沙能力的图解决定法	229
§ 6-21 黄土渠道的不冲挟沙能力与不淤挟沙能力	233
第7章 泥沙问题	235

〔Ⅶ〕 目 录

I. 平衡問題	236
§ 7-1 冲淤平衡(纵向平衡)問題	236
§ 7-2 冲淤調度計算	241
§ 7-3 稳定渠道的断面形状和側坡問題——断面平衡問題	243
§ 7-4 河流的摆动——平面稳定問題	246
§ 7-5 稳定河渠的設計方法	254
II. 引水分沙問題	259
§ 7-6 直河段引水的泥沙运动	259
§ 7-7 河弯引水的泥沙运动	261
§ 7-8 水面导流	262
§ 7-9 水底导流	264
§ 7-10 沉沙池	266
III. 冲刷問題	270
§ 7-11 冲刷和冲刷平衡	270
§ 7-12 全面冲刷	271
§ 7-13 局部冲刷	272
IV. 淤积問題	273
§ 7-14 淤积和淤积平衡	273
§ 7-15 全面淤积	275
§ 7-16 局部淤积	278
第8章 模型試驗	283
§ 8-1 模型試驗的意义	283
§ 8-2 模型的种类	283
§ 8-3 系列模型的设计原理	285
§ 8-4 系列模型比尺的限度	289
§ 8-5 淤积問題的試驗实例	290
§ 8-6 冲刷問題的試驗实例	294

緒 論

§ 0-1 泥沙在生产上的作用

自然界的河流，常常携带着泥沙。河流泥沙的来源，主要是流域内的土壤。

我国黄河的泥沙，大部来自流域中上游松散而深厚的黄土（参看图 0-1）。因此，要根治黄河水害，开发黄河水利，发展农业生产，就必须对这种活动性异常强烈的泥沙（黄土），有正确的认识，掌握它运动的规律，采取有效的控制措施。所以，俗话说：“黄河问题，就是泥沙问题”，在某种意义上说，不是没有道理的。

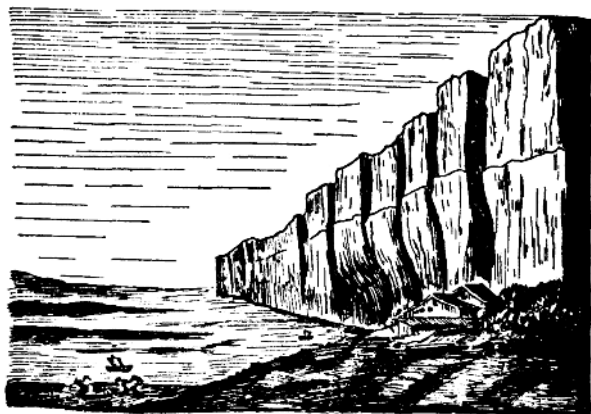


图 0-1 黄河的岸壁（孟津附近）

泥沙在生产上的作用, 可分积极性(建設性)的作用和消极性(破坏性)的作用二种。

1. 泥沙的积极作用

(1) 作为工程材料, 如建筑堤防、土坝、土石混合坝等。

(2) 作为建筑的基地, 比如有时城市建筑缺乏基地, 可濬挖河流, 把挖出的泥沙, 淤填在低洼的地方和两岸浅滩, 扩为基地。

(3) 作为工业原料, 如制造土坯、砖、瓦、水泥以及混凝土等, 都需要用泥沙作原料。

(4) 作为工业技术的工具(泥浆), 如开凿深井时, 常用泥浆浮带石屑, 以闭塞井壁漏洞等。

(5) 淤灌农田。黄河中游的黄土, 每吨土中, 含有氮肥0.8~1.5(kg), 磷肥1.5(kg), 钾肥20(kg), 共計約23(kg), 即約占总土重的2%^①。含着黄土的河水, 是一种“水”和“肥”的结合体。如果分引这种浑水, 淤灌农田, 改良土壤, 提高肥力, 就可以增加农作物的产量。

2. 泥沙的消极作用

(1) 淤塞河流, 抬高水位, 酿成水灾, 使人民生活和各项建設事业, 受到威胁。

(2) 淤塞水库、渠道、进水閘及其它水工建筑物, 使其不能正常工作, 并需耗费大量人力与物力, 进行清淤和建筑物的管理与养护。

(3) 阻塞航道、港口与碼頭。

(4) 在高速水流中, 只要含有少量沙粒, 对建筑物的磨損就会十分严重。图0-2是意大利的一个水工隧洞, 洞在岩石内, 用混凝土衬砌, 厚約0.25~0.40(m), 洞內最大流速达12

① 水利电力部黄河水利委员会編, 人民黄河。水利电力出版社(1959), 第202頁。

(m/s)。图中示出了放水以后,不到两年时间,由于泥沙磨损而破坏的情况,如在6号断面处,底部最大冲刷深度达 $3.20(m)$ 。此外,管道、水轮机的轮叶等也都会受到泥沙颗粒的磨损。

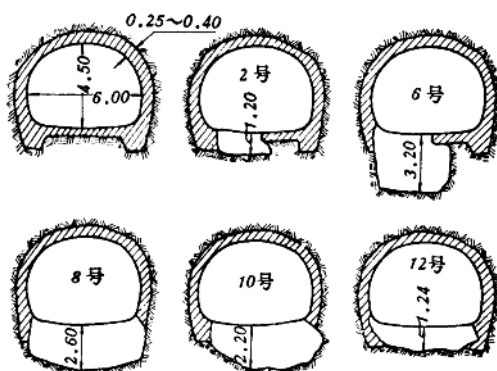


图 0-2 意大利莫拉乐坝的隧洞 (单位, 米)

(5) 在给水工程中,浑水的澄清处理需要增加一系列设备和带来很多困难。

如上所述,鉴于泥沙具有积极的和消极的两种作用,我们就必须对泥沙的性能和它的运动规律进行深入的研究,从而通过人为的措施,充分发挥泥沙的积极作用,减少和消除泥沙的消极作用,甚至将其消极作用转化为积极作用。

§0-2 泥 沙 运 动

首先,让我们了解一下泥沙和土壤的关系。

地壳岩石,经过风化以后,分解而成各种大小不同的颗粒,技术上统称“土壤”。土壤的孔隙内部,含有空气和水分,由于毛管力的作用,颗粒常常粘结一起,不易运动。但是,当孔隙已

为水分充滿，空气排尽以后，毛管力就完全消失，顆粒变得松散，稍受外力，就会引起运动。这种饱和水分，可以运动的土壤，就叫做“泥沙”^①。

同样，沙漠里的土壤，因为空气干燥，缺乏水分，沒有毛管力的約束，土粒也可以在空气中运动。为了区别于一般泥沙，叫做“风沙”。

地面上的泥沙，受到各种不同外力而引起运动。因为作用的外力不同，泥沙运动也具有不同的形式。引起泥沙运动的外力主要有：

（ 1 ）重力：泥沙的重力运动是由于泥沙本身的重量与支持这个重量的阻力失去了平衡而产生的运动。它的特点是数量小、距离近，比如崩塌、滑坡等。

（ 2 ）自然的流体机械力：

水力：自然界水力搬运泥沙的作用是非常强烈的。它的过程，首先由于暴雨的雨滴冲击坡面，散为泥流，其后逐渐汇集由沟入河。这种运动的特点，在大多数情况下，是数量很大，距离也远。这种水力对泥沙的搬运作用，无时无刻不引起地貌上的变化，对国民經济与人类生活有着深远的影响。

风力：在干燥沙漠地区，风力就成了泥沙运动的主要作用力，有所謂“飞沙走石”。比如我国西北新疆、甘肃、陕北等地，大面积风沙运动，使建筑物受到很大威胁。严重时，可使整个城鎮被风沙埋沒。

（ 3 ）人为的流体机械力：如水力冲填，水力选矿，农田淤灌等。这都是利用流水的挟沙能力，通过一定的工程措施，有目的有计划地輸送泥沙。

人类长时期和泥沙做斗争，已經积累了丰富的实践經驗，結

① 泥，水和土也；沙，水散石也（康熙字典）。

合近代的試驗研究和理論分析，对泥沙运动的規律性，逐漸有了比較正确的認識，并且开始形成了一門具有獨立性和系統性的学科——泥沙运动学。

§0-3 泥 沙 运 动 学

泥沙运动学是研究泥沙在靜水和动水內运动的規律性的科学。

泥沙运动学，依据水內含沙量 ρ (kg/m^3) 的多少，概括地可以分作“渾水”和“泥浆”两个部分。

比如，含黄土的水，当含沙量 ρ 小于 810 (kg/m^3) 时，即孔隙率 ε 大于 0.7 ，它的水力特征和清水基本上是相似的，仅数量上有一定差别，属于渾水；但当含沙量超过了 810 (kg/m^3) 以后，它的水力特征，与清水比較起来，就有了质的变化，而属于泥浆。如果含沙量再增高，到了 1080 (kg/m^3)，即孔隙率 $\varepsilon=0.6$ ，泥沙顆粒就失去了活动性，成为半流态的淤泥。

淤泥的顆粒，已互相接触，流动逐渐困难，它的力学特征，主要决定于含水率的大小，属于土力学研究范围。黄土的流限含水率，平均为 0.29 ，塑限为 0.18 ，縮限为 0.012 ，見表0-1。

表 0-1

含沙量 $\rho(kg/m^3)$	孔隙率 ε	含水率 $W(\%)$	流性限度	流 态	学 科 范 围
—	—	0	—	固 态	土 力 学
—	—	1.18	縮 限	半 固 态	
—	—	18.1	塑 限	塑 态	
1510	0.44	29.4	流 限	半 流 态	
1080	0.60	55.5	浆 限	泥 浆	泥沙运动学
810	0.70	86.5	渾 限	渾 水	
0	1.00	∞	清 水	渾 水	

我国河流的含沙量，一般不超过 $810 (kg/m^3)$ 。比如：黄河陕县的年平均含沙量约为 $34 (kg/m^3)$ ，最大含沙量为 $590 (kg/m^3)$ ，这是属于浑水范围。在极个别的情况下，比如：洛河湫头最大含沙量达 $1,340 (kg/m^3)$ ，这就超过了浑水限度。但由于最大含沙量出现机会很少，历时又短，因此，一般认为河流泥沙问题，主要是属于浑水范围。

由于近代工业技术（化学、采矿等）的需要，以及为了预报沙漠的风沙移动，水工模型试验采用轻质模型沙等，要求知道，任何固体细微颗粒，在任何流体中运动的规律。因此，我们对于泥沙运动基本规律的探讨，应该尽可能地做到具有普遍意义，以便提供其它有关部门应用或参考。

本书为了满足水利工作者的需要，将以讨论浑水的运动规律，以及有关控制泥沙运动的技术原理为主。

泥沙的特性

泥沙运动学是一门实用的、直接服务于生产的科学。因此，它必须为设计工程师提供实用的知识。同时，又由于这门科学尚在萌芽时期，为了有利于今后的发展和便于群众掌握，各个名词和术语，要求有清晰的概念和统一的认识，这也是非常重要的。同样，提出的各种公式，也必须力求概念明确，全面可靠，既要有原则上的概括性，又要有实用上足够的准确性。

研究泥沙运动的方法，也和其它各门科学一样：首先，必须从了解各个因素的本质入手，再进一步找出各因素间的内在联系。

我们先从泥沙的基本特性讲起。

泥沙的特性，可分为颗粒的和组合（群体）的两种。

§ 1-1 泥沙的颗粒特性

泥沙的颗粒特性，是指泥沙单个颗粒的特性，可分为几何特性、重力特性和水力特性三种。

一、泥沙颗粒的几何特性

几何特性是颗粒占有空间的特性，又可叫做“空间特性”。这是人类对泥沙最早具有的直观认识。我们用它作为区别泥沙种类的标准，是十分自然的。泥沙的几何特性包括：

1. 泥沙颗粒的大小

泥沙顆粒的大小，通常以顆粒直径来表示，簡称为粒径，其符号为 d ，单位为 (m) 或 (mm) 。

由于泥沙顆粒的形状极不规则，为了取得一致，就必须定出一种大家統一运用的表示方法，这就是“等容粒径”。

等容粒径是用来表征泥沙顆粒大小的标准，它的数值相当于和泥沙顆粒同一体积的球体的直径，即：

$$d = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-1)$$

式中 d ——泥沙的等容粒径；

V ——泥沙顆粒的体积。

泥沙顆粒的体积 $V = \frac{W}{\gamma_s}$ ，式中 W 为泥沙顆粒的重量， γ_s 为

泥沙的玄重。对大顆粒泥沙，一般可以先测定沙粒的重量 W ，算出体积 V 后，再推求粒径 d ；至于細微泥沙，直接测算粒径，技术上存在困难，常采用篩析或水析等法，間接测定。

2. 泥沙顆粒的形态

泥沙顆粒的形态，是非常复杂的。我們可以用“球度系数”，来描述它偏离球体的程度，如下式：

$$\psi = \frac{F'}{F} \leq 1 \quad (1-2)$$

式中 ψ ——球度系数；

F' ——与沙粒等体积的球体的表面积；

F ——沙粒的表面积。

实践证明，球度系数 ψ 和泥沙的水力特性有密切的关系，是一个相当重要的数据。

对于呈有規則几何形状的顆粒， ψ 值可用公式推算。比如，球体 $\psi = 1$ ；立方八面体 $\psi = 0.906$ ；正八面体 $\psi = 0.846$ ；立方体 $\psi = 0.806$ ；正四面体 $\psi = 0.670$ ，见图1-1。

对于不規則形状的顆粒，要直接測定它的表面积，就相当困难。因此，一般只有改用間接的办法或依据相似粒型，加以估計。

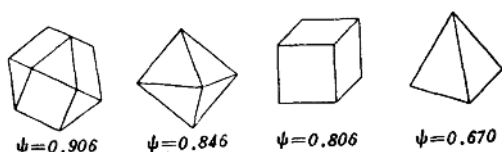


图 1-1

1934年，瑞士学者辛格^①提出可根据顆粒三个主軸的长度，估算不規則形状顆粒的球度系数 ψ ，如下式：

$$\psi = \sqrt[3]{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \left(\frac{c}{b}\right)} \quad (1-3)$$

式中， a 、 b 、 c 分别表示顆粒三个互相垂直的最長軸、中間軸和最短軸。

由式 (1-3) 可計算并繪出 ψ 与 $\frac{b}{a}$ 、 $\frac{c}{b}$ 的关系曲线，见图1-2。

图中划分为 I、II、III、IV 4 个区域，分别相当于一定的顆粒形状，I——球形，II——盘形，III——柱形，IV——棱形。

一般泥沙顆粒形状和粒径的大小之間有一定的关系。可以分作 3 个主要类型，见图1-3。

(1) 圓角形： $d > 2 (mm)$ ，由于机械摩擦作用(磨蝕)而形成的砾石。

(2) 尖角形： $d = 0.1 \sim 2 (mm)$ ，周围有分子水膜保护，机械摩擦微弱的細沙顆粒。

① Zingg, Th., Beitrage zur Schotteranalyse, Schweiz, Min.u.Pet. Mitt, vol.15(1935), pp.39, 140.

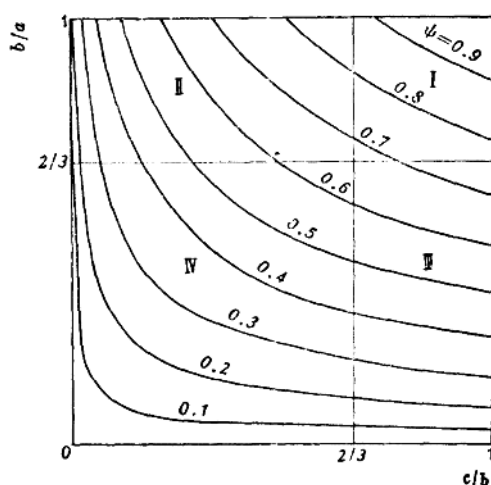


图 1-2



图 1-3

(3) 雜角形: $d < 0.1(mm)$, 由于化学分解作用而形成的細泥顆粒。比如黃土的顆粒, 一般都呈雜角形, 见图1-4。

應該指出: 这些顆粒的形状, 主要是由于水的作用而形成的。至于沙漠地带, 由于风蚀作用形成的顆粒, 它的形状就有所变化。戈壁滩上的石砾, 形状奇特, 表面多細致雜角; 而沙粒則反成圓形。