

国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2003CB415200)

河流泥沙颗粒 分析原理及方法



封光寅 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2003CB415200)

河流泥沙颗粒 分析原理及方法

封光寅 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要论述了泥沙颗粒分析的基础理论、常用分析方法及原理和分析方法的操作过程,并对有些分析方法的相关问题进行讨论,同时介绍了泥沙颗粒分析问题的研究方法和河流泥沙颗粒分析的发展方向。泥沙颗粒分析的基础理论,主要介绍了泥沙的分类、泥沙颗粒在介质中的受力分析、单颗和群体泥沙在介质中的沉降规律等;对于规范规定和具有发展方向的方法进行较详较细介绍(如尺量法、粒径计、筛分析、移液管、消光法、离心沉降法、激光法等);对于曾采用过或现在较少采用的分析方法(如重量法、排水体积法、倾撒法、水洗法等)只作简要地介绍,目的是让大家对颗粒分析方法的发展史有所了解。本书力图把颗粒分析的理论基础、每种分析方法的原理和操作过程阐述清楚,为此引用了大量试验资料,包括图和表,在每章之末并附有较详尽的参考文献。

本书可作为从事颗粒分析和研究人员的工具参考书,亦可作为水利、水文、水资源专业和地质专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

河流泥沙颗粒分析原理及方法/封光寅编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2008
ISBN 978-7-5084-5913-4
I. 河… II. 封… III. 河流—泥沙粒径—研究 IV. TV141
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 144876 号

书 名	河流泥沙颗粒分析原理及方法
作 者	封光寅 编著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 18.25印张 433千字
版 次	2008年9月第1版 2008年9月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

河流泥沙颗粒分析属于颗粒学范畴，但在水文行业中是作为水文测验学中的一部分。其实，河流泥沙颗粒分析的知识范围比较广泛，涉及多学科知识，由大量的基础科学和许多相关的应用技术组成，并具有独立性和系统性。然而，目前国内尚未有一部有关河流泥沙颗粒分析的专门著作。编著出版《河流泥沙颗粒分析原理及方法》一书，就是为了使大家对河流泥沙颗粒分析有一个系统和较全面的了解。

我国的河流泥沙颗粒分析工作，是在新中国成立后的 20 世纪 50 年代末白手起家逐步发展起来的，到 70 年代在全国全面开展。在这期间，长江水利委员会水文局和黄河水利委员会水文局及其他有关单位，进行了大量的研究和试验工作，研究开发了一些新的方法，并对一些老的方法进行了完善与改进，使我国的河流泥沙颗粒分析工作得到了较好和较快的发展。书中的许多试验资料就是来自于 70~80 年代的研究成果。在此，对为我国河流泥沙颗粒分析作出贡献的人们谨表谢意！

本书为“国家重点基础研究发展计划（973）项目，编号：2003CB415200”成果之一。本书的编写得到了吕金城、董青云、梁雪、熊向军、郭爱军等友好人士的帮助和支持，在此一并致谢！

作者

2008 年 6 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 泥沙颗粒分析的意义和用途	1
第二节 泥沙颗粒分析方法概述	4
第三节 编写的构思和布局	5
参考文献	6
第二章 泥沙颗粒几何特性表达	7
第一节 泥沙分类	7
第二节 单颗粒泥沙几何特性的表达	9
第三节 组合泥沙几何特性的表达	13
参考文献	24
第三章 泥沙颗粒在静水中的沉降规律	25
第一节 重力和阻力	25
第二节 自由沉降与干涉沉降	28
第三节 球体颗粒在水中的自由沉速公式简介	28
第四节 泥沙颗粒形状对沉速的影响	36
第五节 泥沙颗粒的干涉沉降	43
第六节 动水对泥沙颗粒沉速的影响	49
参考文献	53
第四章 泥沙颗粒分析方法的基本规定	54
第一节 颗粒分析方法的选用	54
第二节 沉速公式的选用与粒径级划分	57
第三节 泥沙分析室的布置与环境	61
参考文献	62
第五章 泥沙颗粒分析样品的采集和制备	63
第一节 泥沙颗粒分析样品的采集	63
第二节 泥沙样品制备	67
第三节 颗粒分析介质和介质纯度讨论	72
第四节 絮凝现象与反凝处理	76
参考文献	98

第六章 漂、卵、砾石颗粒分析	99
第一节 尺量法	99
第二节 重量法	101
第三节 排水体积量测法	103
第四节 手摇筛分析法	104
第五节 照相法测定床沙级配及粒径分析方法	104
参考文献	106
第七章 砂粒颗粒分析	107
第一节 粒径计分析法	107
第二节 粒径计分析法的有关问题研究	111
第三节 筛分析法	142
第四节 SFY—E 音波振动式全自动筛分粒度仪	153
第五节 筛析粒径与沉降粒径的关系	162
第六节 镜鉴法	167
第七节 累计沉降管法简介	170
第八节 电秤沙粒分析仪简介	171
第九节 库尔特计数器粒度分析仪简介	172
参考文献	173
第八章 粉沙、黏粒颗粒分析	174
第一节 移液管分析法	174
第二节 移液管法有关实验情况简述	185
第三节 移液管少沙量分析法	190
第四节 短管浑匀分析法	193
第五节 消光法分析	200
第六节 消光法有关问题讨论	213
第七节 离心沉降法	223
第八节 BT—1500 离心沉降粒度仪	226
第九节 激光法	232
第十节 倾撒法简介	242
第十一节 冲洗法简介	244
第十二节 比重计法	245
第十三节 悬移质泥沙颗粒分析结合法	247
参考文献	252
第九章 泥沙颗粒分析资料整理	253
第一节 资料整理内容和成果检查	253
第二节 断面颗粒分析成果资料计算	254
第三节 泥沙群体颗粒平均粒径及悬移质平均沉速计算方法讨论	258

参考文献	261
第十章 颗粒分析的质量检验与不确定度的估算	262
第一节 一般规定	262
第二节 颗粒分析的质量检验	263
第三节 泥沙颗粒标样体系	265
第四节 断面平均颗粒级配总不确定度估算	269
参考文献	270
第十一章 关于泥沙颗粒分析的实验方法和要求	271
第一节 试验的目的、意义和主要内容	271
第二节 关于几种常用的颗粒分析试验方法	272
第三节 颗粒分析方法的技术标准和误差统计方法	274
第四节 关于相关关系的分析	275
第五节 泥沙颗粒分析方法发展展望	277
参考文献	283

第一章 绪 论

第一节 泥沙颗粒分析的意义和用途

一、泥沙颗粒分析的意义

颗粒学是一门涉及多学科、跨学科的交叉性学科，由大量的基础科学和许多相关的应用技术组成，它可以辐射到水利、工、农、医、商等许多领域。在自然界，有很多物质，如地表的土壤，河流中的泥沙，沙漠中的砂、砾，空气中尘埃等，都呈颗粒态（即粉体）存在。在社会生活中，无论是尖端的航天材料，还是人们日常生活中的许多食品，很多都是以颗粒状态或在其加工过程中的某一阶段是以颗粒状态存在的，如煤粉、催化剂、水泥、肥料、颜料、药品和炸药等。和这些物质相关的基本现象的研究不但对环保、国防和人类健康非常重要，且对化工、冶金、能源和轻工业也同样提供科学技术基础。颗粒学涉及颗粒的测量和标定，颗粒的形成与团聚，颗粒与气、液的分离，固体颗粒的输送，流态化，破碎，团球，气溶胶等诸多科学与技术问题。

泥沙颗粒分析是通过特定的仪器和方法对泥沙粒度特性进行表征（如颗粒大小、形状和组成等）的一项实验工作，泥沙粒度分布是指泥沙颗粒在不同粒径范围所占的比例。

对颗粒态物质粒度特性进行表征，常常对了解其特性和研究其以后的发生、发展变化规律，具有重要作用。在生产建设上，往往有很多工业原料和产品（如水泥、沙石骨料等建筑材料、化工燃料、颗粒肥料、牙膏、药品等），需要根据颗粒特性做出选择、配方和评价；许多业务部门（地质、土壤、采矿、冶金、化工、水利、建筑、交通运输、环境保护等），都必须应用颗粒分析技术来进行生产和科学研究活动。因此，颗粒分析工作是一项应用范围相当广泛的科学技术，客观真实地反映粉体的粒度分布是一项非常重要的工作。在不同应用领域中，对颗粒特性的要求是各不相同的，在所有反映粉体特性的指标中，粒度分布是所有应用领域中最受关注的一项指标。

二、泥沙颗粒分析成果在水利工程建设上的应用

自然界的河流，常常挟带着泥沙。河流中的泥沙具有利害两重性，有利的一方面是泥沙可以造福人类，如粗颗粒泥沙可以用于工程建设中的建筑材料，细颗粒可以用于淤灌农田，提高肥力；另一方面是泥沙具有破坏性，如河流泥沙淤塞河道、水库，阻塞航道、港口，磨蚀水利机械和水工建筑物，较大的颗粒会毁坏农田，这些都给工农业生产带来了较大的危害。实践证明，只要河道中含有一定数量的泥沙，任何水利工程的修建和运用，都要涉及泥沙如何处理的问题。多沙河流是如此，少沙河流也不例外，所不同的只是程度上的差别而已。

在水利工程中，需要研究的泥沙问题，内容十分广泛，其中泥沙颗粒的粒度状况是重

要内容之一。对水利工程来说，主要的问题有两个方面：一是研究泥沙在水流中的运动规律，达到了解自然的问题；二是运用这些规律，预测河道在自然情况下或在兴建了水利工程后的发展趋势，合理处理水利工程建设和应用中所遇到的各种泥沙问题，达到兴利除害、与自然和谐相处的目的，例如在古代的都江堰工程、现代的三峡工程和南水北调中线工程中都把泥沙问题作为重点考虑。要研究解决上述泥沙问题，首先，必须了解泥沙数量和特性。而泥沙颗粒的大小，则是反映泥沙力学特性、决定泥沙运动状况的主要因素；泥沙颗粒级配是影响泥沙运动形式的重要因素。在水利工程的设计管理，水库淤积部位的预测，异重流产生条件与排沙能力，河道整治与防洪、灌溉渠道冲淤平衡与船闸航运设计和水力机械的抗磨研究工作中，都离不开泥沙级配资料。可以说，泥沙颗粒级配成果是研究和解决水利工程泥沙问题不可缺少的条件。

现将泥沙颗粒级配成果在水利工程建设中几个方面的具体应用，简要说明如下。

1. 泥沙颗粒分析成果在泥沙运动基本规律研究中的应用

泥沙的基本运动规律主要有泥沙的起动条件、推移量和挟沙能力等。反映这些基本规律的数学公式为：

$$\text{起动流速} \quad u_c = 1.47 \sqrt{gD} \left(\frac{h}{D} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (1-1)$$

$$\text{单宽推移质输沙率} \quad q_b = 0.96 \sqrt{D} \left(\frac{\mu}{\mu_c} \right)^3 \left(u - \frac{u_c}{1.2} \right) \left(\frac{D}{h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1-2)$$

$$\text{挟沙能力} \quad p = K \left(\frac{\gamma^3}{gH\omega} \right)^m \quad (1-3)$$

以上公式中可以看出，泥沙粒径 D 和沉速 ω 是构成泥沙运动规律基本公式的主要因素，而这些公式又是研究一切泥沙问题的基础。由此可知，离开了粒径资料，要深入地研究泥沙运动，是极其困难的，甚至是不可能的。

2. 泥沙颗粒分析资料在治河规划设计中的应用

一般说来，多沙河流存在的问题，主要是泥沙问题。例如黄河，它在世界上属于有名的多沙河流，在历史上，多次造成决口泛滥，危害很大。形成灾害的根本原因是泥沙所造成。根据资料分析表明，黄河泥沙来源于中游，危害在下游，而危害最大的是来沙中粒径较粗的那一部分。黄河下游河床淤积抬高，主要也是由这一部分泥沙所造成。因此，解决黄河泥沙问题的各种措施，不但要注意泥沙的数量，还要注意泥沙各种大小颗粒所占的比例。在水土保持中，应优先考虑粗沙来源区的治理。在放淤过程中，为了既有利于河道，又有利于农业生产，要求先粗后细，有计划的淤灌。总之，要根据泥沙的粒配组成，对粗、细沙区别对待，妥善处理，以达到兴利除害的目的。

3. 泥沙颗粒分析资料在渠道设计中的应用

农业上引水排灌，工业上发展航运交通，都需兴建各种渠道工程。在渠道工程的设计中，必须保持渠道不冲、不淤，或少冲、少淤，维持平衡。因此，在设计时，必须了解水流中所挟带泥沙的颗粒组成和渠道通过地带的土壤粒径大小，从而正确选定渠道流速和确定渠底坡降，使渠道水流的挟沙能力与来沙情况相适应。同时，为了使粗沙不沉积在渠

道, 细沙能带到农田, 在渠首必须兴建沉沙池, 而沉沙池的设计, 必须知道水流中所挟带的泥沙粒径以后, 才能正确确定其尺寸。此外, 为了使易于淤塞渠道、危害农田的粗颗粒泥沙较少进入渠系, 必须弄清引水河道上泥沙颗粒在垂线上的分布状况, 尽可能使进水闸底坝高程高于粗沙集中的部分。在引水期间, 还要经常施测引水河道泥沙的级配, 在粗沙较多的时期, 必须及时停灌, 以减少粗沙淤积的不利影响。

4. 泥沙颗粒分析资料在研究水库淤积和水库下游河床演变中的应用

水库是利用调蓄洪水, 使之发挥防洪、发电、灌溉、航运、养殖等方面的效益, 来有效为工、农业生产服务的重要工程设施。但在河流上修建水库以后, 改变了自然状况, 必然引起水库淤积和坝下游的河床变化。如果处理不好, 会使水利工程设施不能发挥应有的效益, 或者会产生新的危害。为此, 在进行水库规划设计时, 不仅要准确计算进入水库的沙量, 还要搞清进入水库泥沙粒配组成。因为泥沙的颗粒级配不同, 其淤积部位和淤积形态也不相同, 较细的泥沙, 在水库内的淤积是比较均匀的, 而较粗的泥沙, 则主要淤积在回水末端, 形成三角洲, 产生所谓“翘尾巴”现象, 使水库淤积上延, 回水上升, 抬高上游水位, 威胁上游河道两岸城镇和农田的安全。此外, 还会抬高该处地下水位, 发生农田盐碱危害的问题。因此, 在水库设计中, 要根据水库上游的来沙粒配情况和数量, 预估淤积的部位和厚度, 以合理安排泄流、排沙建筑物的规模及底坝高程, 制定水库的运用原则, 以防止或减轻淤积上延。还要根据细沙在来沙中所占的数量, 估计形成异重流时可能排出的沙量。水库建成后, 因为粗颗粒泥沙都沉积在库区以内, 下泄的清水(或水流中仅含细沙)具有一定的挟沙能力, 必然引起水库下游河床的冲刷, 并相应发生水位降低的现象。在水利枢纽设计中, 需要计算确定水位降低的数据, 以便确定航运码头、提水站等建筑物设计水位和水轮机尾水位的高程。同时, 枢纽下游也需要预测河床可能冲刷的情况, 以便预先采取措施, 加强堤防和桥墩建筑物的保护。所有以上各项分析计算, 主要取决于下游河床质的粒径以及水流携带这种粒径泥沙的能力。而这两个因素, 都取决于泥沙颗粒分析资料。

5. 泥沙颗粒资料在河道整治工程中的应用

在天然河流中, 由于携带泥沙的水流与可冲性的河床相互作用的结果, 往往使河道形势发生恶化, 对工农业生产带来不良影响。例如, 坍岸问题威胁重要城镇和堤防的安全; 浅滩问题阻碍航运畅通; 河道弯曲引起航程增大; 引水口和运河口的泥沙淤积影响工程效益等。引起这些问题的原因, 都与泥沙有关。为了改善河流的自然状态, 就需要对这些河流进行整治, 而泥沙颗粒级配则是河道整治工程规划设计中必不可少的资料。

(1) 关于整治河道时, 如何确定河道整治线问题。流量、比降与水流中挟带的泥沙, 对于河道断面形态有一定的关系存在。如何能达到最合理断面形态, 根据长江许多河段的资料分析来确定长江河相公式, 作为涉及长江河道整治线的计算式。公式的形式为:

$$B \times 10^{-5} = 2.02D \left[\frac{Q \times 10^{-11}}{D^2 \sqrt{gDi}} \right]^{0.34} \quad (1-4)$$

$$H \times 10^{-3} = 1.25D \left[\frac{Q \times 10^{-11}}{D^2 \sqrt{gDi}} \right]^{0.416} \quad (1-5)$$

式中 D ——河床质平均粒径。

由此可见，如果没有泥沙颗粒分析资料，将无法确定整治河段的整治线，整治工作也就无法进行。

(2) 关于整治建筑物的设计问题。例如，为了防止河岸崩坍，必须在河岸修建坝、埝，以稳定河势。而护岸建筑物的兴建，必然会引起河岸的局部冲刷。为了保证建筑物的安全，并预测工程兴建后的河床发展变化，必须对可能冲刷深度进行分析计算。而冲刷深度的大小与泥沙粒径有密切关系。因此，必须具有粒径资料，才能对建筑物做出合理的设计。

(3) 关于浅滩的疏浚和河道的裁弯取直工程的设计问题。要疏浚浅滩和对弯曲河道进行裁弯取直，均需开挖引河，使浅滩或新河道靠水流自然冲开，以改变主流流路。引河的坡降、河宽和水深如何选择，才能达到既能改变流路又能增加引河开挖量的目的？这就要求合理的选定通过引河的流速，使之大于土壤的冲刷流速。而冲刷流速的确定，则主要取决于引河通过地带的土壤的颗粒组成。

6. 泥沙颗粒资料在水轮机选定中的应用

随着更多水电站的兴建，水轮机的磨损问题，日益突出。为了合理的选定机型和制造水轮机的材料，需要了解过机泥沙的级配和泥沙的成分。同时，为了防止水轮机磨损，减少泥沙过机，尤其是防止粗沙过机，需要了解和研究不同平面布置和不同高程或水工建筑物的含沙量情况和泥沙的粗细，以及坝前的淤积形态，以便合理地布置水工建筑物，采用合理的水库运用，进行调水调沙，以解决水电站的取水、防沙问题。

以上所述可知，泥沙颗粒分析成果的用途是非常广泛的。可以这样说，只要河流中挟带有一定数量的泥沙，在水利工程建设中，就不同程度的存在着泥沙问题，而要研究泥沙问题，粒配成果是必不可少的资料。为此，要充分认识颗粒分析工作的重要性，深入了解工农业建设对颗粒分析资料的需要情况，以及水利工程建设对泥沙粒配成果的具体要求，更好地做好泥沙颗粒分析工作，为社会建设做出应有的贡献。

第二节 泥沙颗粒分析方法概述

一、颗粒分析工作的内容

(1) 颗粒分析工作的基本内容，主要有两个方面。

1) 测量颗粒的大小（用粒径表示）。

2) 测量样品中各种不同粒径颗粒的含量（用沙重表示）。

(2) 资料的整理与计算。泥沙颗粒分析，主要是通过确定泥沙样品中各粒径组泥沙量占样品总量的百分数，并以此绘制级配曲线、计算有关成果资料、统计出有关特征值的操作过程。资料的整理，虽不是关键环节，但是重要环节，是分析工作的目的所在。

二、分析样品

河流泥沙颗粒分析的样品主要有：悬移质、推移质和河床沙质。但其他地方的泥沙颗粒、矿物质颗粒等粒态物质都适用于河流泥沙颗粒分析方法。

三、颗粒分析方法概述

由于测量粒径的方法和各种粒径颗粒的含量有所不同，因而也就出现了各种各样的泥

沙颗粒分析方法。目前国内外粒度测试的方法很多,据统计有上百种。例如:在粒径测量方面,有表达颗粒几何粒径的尺量法、容积法、筛析法、镜鉴法等;有表达颗粒运动特性(即沉降粒径)的移液管、比重计、粒径计、底漏管、倾撒等分析法;此外,还有将颗粒的大小尺寸变换为电流强弱的颗粒计数法。在测定样品中某种颗粒的含量方面,比较常用的方法是称重法,如用天平称重(包括烘干称重、水中称重、置换称重等多种方式)。也有测量沙样体积,再将体积换算成为重量的(如累计沉降管)。此外,还有利用光线或某种辐射射线(如X-射线)通过不同浓度悬液后的能量衰减,间接测定样品中不同粒径的含量,如消光法颗粒分析仪和X-射线粒度测量仪及激光粒度仪等;显微图像法是一全新的分析方法,该法包括显微镜、CCD摄像头(或数码相机)、图形采集卡、计算机等部分组成。它的基本工作原理是将显微镜放大后的颗粒图像通过CCD摄像头和图形采集卡传输到计算机中,由计算机对这些图像进行边缘识别等处理,计算出每个颗粒的投影面积,根据等效投影面积原理得出每个颗粒的粒径,再统计出所设定的粒径区间的颗粒数量,就可以得到粒度分布。由于这种方法单次所测到的颗粒个数较少,对同一个样品可以通过更换视场的方法进行多次测量来提高测试结果的真实性,除了进行粒度测试之外,显微图像法还常用来观察和测试颗粒的形貌。

除了上述几种粒度测试方法以外,目前在生产和研究领域还常用刮板法、沉降瓶法、透气法、超声波法和动态光散射法等。

第三节 编写的构思和布局

本书主要是为从事颗粒分析和研究的人员编写的,虽然在分析工作中有《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—92)为指南,但该规程仅限于对分析方法的操作进行规范,而泥沙颗粒分析方法的原理及更深层面的知识却提及甚少。作为从事颗粒分析的工作者,不但要熟练掌握分析方法的操作过程,还应该了解分析方法的原理,这会有助于对工作中出现问题的解决和认识;对于从事颗粒分析方法研究的人员,不但要对所研究的分析方法原理进行全面、深入、细致的熟知,还应该对过去曾用方法以及对有些重要问题的研究过程有所了解。为此,本书以《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—92)为纲要,着重介绍了泥沙颗粒分析的基础理论、分析方法原理以及对某些重点问题的研究。

本书力图把颗粒分析的理论基础、每种分析方法的原理和操作过程阐述清楚,为此引用了大量试验资料,包括图表和照片,并在每章末附有较详尽的参考文献。

本书主要写了三个方面的内容。

第一方面的内容是泥沙颗粒分析的基础理论和方法原理。基础理论主要在第二章、第三章介绍,方法原理在每种分析方法中介绍。

第二方面的内容是介绍颗粒分析方法。颗粒分析方法分三个部分:①漂、卵、砾石颗粒分析;②砂粒颗粒分析;③粉沙、黏粒颗粒分析。对于规范规定和具有发展方向的方法进行较详细介绍(如尺量法、粒径计、筛分析、移液管、消光法、离心沉降法、激光法等),曾采用过或现在较少采用的分析方法(如重量法、排水体积法、倾撒法、水洗法等)只作简要地介绍,目的是让读者对颗粒分析方法的发展史有所了解。

第三个方面是对有些分析方法的相关问题进行讨论和介绍了颗粒分析问题的研究方法。对一些分析方法相关问题的讨论，尽量以详细的实验数据和简单明了的图表进行说明。

参 考 文 献

- [1] 邵学军，王兴奎编著. 河流动力学概论. 北京：清华大学出版社，2005.
- [2] 陈雄波，俞国青，唐洪武. 河道水流泥沙运动基本理论研究进展. 水利水电科技进展，2003，(02).
- [3] 水利部黄河水利委员会主编. 河流泥沙颗粒分析规程 SL 42—92. 北京：水利电力出版社，1993.
- [4] 水利部长江水利委员会水文局. 河流推移质泥沙及床沙测验规程 SL 43—92. 北京：水利电力出版社，1994.

第二章 泥沙颗粒几何特性表达

从泥沙运动力学观点和水利工程建设需要出发，泥沙颗粒几何特性数据属于一项必不可少的重要资料。所谓泥沙几何特性，就是指泥沙颗粒的大小及形态。泥沙颗粒分析工作者应根据需要和泥沙样品颗粒的大小，采用不同的方法对泥沙颗粒几何特性进行测定，并科学合理地将所测得的结果适当的表达出来，借以满足资料使用目的。

第一节 泥 沙 分 类

在自然界里，河流泥沙由各种不同的颗粒所组成，且颗粒大小悬殊，大者如巨石、漂石、卵石，小者如粉砂、黏粒，为了便于鉴别，需要对其进行分类。了解泥沙分类，是研究泥沙几何特性的基础。其常用的分类方法介绍如下。

一、按泥沙粒径大小分类

泥沙按粒径不同而分类定名已有悠久的历史，我国河工就一向把泥沙分为黄土、胶土及素土三类。泥沙因粒径的不同，其物理性质及产源均不一样；晚近的趋势，各组的间隔缩小，分类倾向于详尽委细。

泥沙按粒径大小的分类有多种，常用的分类标准见表 2-1、表 2-2、表 2-3、表 2-4。

表 2-1		中 国 分 类				单位: mm	
黏粒	粉砂	砂粒	砾石	卵石	漂石		
<0.004	0.004~0.062	0.062~2.0	2.0~16.0	16.0~250	>250		

表 2-2		温 特 沃 思 分 类								单位: mm	
黏粒	粉砂	极细砂	细砂	中砂	粗砂	最粗砂	粒砂	砾石	栗石	漂石	
<0.004	0.004~0.02	0.02~0.125	0.125~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1~2	2~4	4~64	64~256	>256	

表 2-3		美国地球物理学会分类						单位: mm	
黏 粒				粉 砂					
极细黏粒	细黏粒	中黏粒	粗黏粒	极细粉砂	细粉砂	中粉砂	粗粉砂		
<0.0005	0.0005~0.001	0.001~0.002	0.002~0.004	0.004~0.008	0.008~0.016	0.016~0.031	0.031~0.062		

续表

砂					卵石				
极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	极细卵石	细卵石	中卵石	粗卵石	极粗卵石
0.062~ 0.125	0.125~ 0.25	0.25~ 0.5	0.5~1	1~2	2~4	4~8	8~16	16~32	32~64

石					
小漂石	大漂石	小漂石	中漂石	大漂石	极大漂石
64~128	128~256	256~512	512~1024	1024~2056	>2056

表 2-4

阿特堡及国际土壤学会分类

单位: mm

黏粒	粉砂	细砂	粗砂	砾石	栗石	块石
<0.002	0.002~0.02	0.02~0.2	0.2~2.0	2.0~20	20~200	>200

表 2-1 是我国现行的《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—92) 的分类标准。阿特堡 (A. Atterberg) 分类法创定于 19 世纪初期, 1927 年为国际土壤学会所采纳, 作为分析土壤的标准, 在欧洲广泛应用。美国地质学家常用温特沃思 (C. K. Wentworth) 分类法 (见表 2-2)。1947 年美国地球物理学会制订了泥沙的新分类标准 (见表 2-3), 该标准和温特沃思分类法基本相同, 只不过在同一组中又分成若干小组, 使分类定名更趋完整。各国所常用的泥沙分类标准虽不一样, 但却具有一些共同的特点。在各种分类中, 各粒径组的间隔多不相等, 这是因为天然泥沙的粒径范围分散极广, 自大块石以至黏土颗粒, 粒径相差不下百万倍。如果采用代数尺度, 即等分的方法来作为分组的间隔, 则适用于粗颗粒泥沙, 不适于细颗粒泥沙, 反之亦然。例如对于细颗粒泥沙来说, 0.01mm 与 0.06mm 的泥沙的性质已有根本的不同, 在分类时至少需要采用 0.05mm 作为各粒径组的间距; 但对于粒径为 50mm 及 49.95mm 的泥沙来说, 不但在性质上没有丝毫不同, 而且采用一般的量测方法也不可能把它们区分开来。相反地, 为了适应粗颗粒泥沙, 如果采用 5mm 作为分组的间距, 则所有的砂、粉砂、黏土都属于同一小组; 也就是说, 对于细颗粒泥沙来说, 这样的分类标准完全失去了应有的作用。显然, 泥沙的分类必须采用几何尺度, 即各级粒径成为一定的比例。对于阿特堡和我国的分类标准来说, 这个比例为 10; 对于美国地球物理学会分类法来说, 这个比例为 2。针对这种情况, 筛分析的筛子各级筛孔也常作成一定的比例。

从以上的分类标准中, 还可以看到有一些粒径如 0.005mm (或 0.004mm)、0.05mm (或 0.06mm)、2mm 等被普遍地选用为分组的极限值, 这种情况绝不是偶然的, 而是因为处于这些极限值上下的泥沙, 在某些性质上常有显著的不同。

二、按泥沙颗粒形状分类

河流泥沙的分类仅根据粒径的大小来分, 还不够全面, 还应该考虑到颗粒的形状。泥沙颗粒从外形看, 极不规则, 但大体可分为: 扁圆体、圆球状、长扁圆体、椭球状、棱状、片状、棍状等。

河流泥沙颗粒形状各式各样,千奇百怪,但泥沙颗粒的形状与其大小之间存在着一定的联系,比如粒径较粗的砾石、卵石,外形比较圆滑,有圆球状的,有椭球状的,也有片状的,一般无尖角和棱线;粒径较细的沙和粉土类泥沙外形不规则,尖角和棱线都比较明显;粒径特细的黏土类泥沙一般都是棱角峥嵘,外形十分复杂。

泥沙的这些不同形状,与它们在水流中的运动状态密切相关。较粗的颗粒沿河底推移前进,碰撞的机会较多,碰撞时动量较大,容易磨损成较圆滑的外形。较细的颗粒随水流悬浮前进,碰撞的机会较少,碰撞时动量较小,不易磨损,往往保持棱角峥嵘的外形。

三、按泥沙运动状态分类

泥沙按运动状态不同可分为推移质和悬移质。在河流中,运动着的全体泥沙(即全沙)是由推移质和悬移质组成。所谓的推移质是指沿着河床或接近河床运动的泥沙。所谓的悬移质是指悬浮在水中,并在水流方向与水流以同样的速度前进的泥沙。推移质和悬移质在粒径的大小上存在明显的差异。此外,根据泥沙的来源不同可分为床沙质和冲泻质。在床沙质和冲泻质里,部分为推移质,部分为悬移质。

第二节 单颗粒泥沙几何特性的表达

一、单颗粒泥沙的大小

人们对几何形状规则的物体尺度表达时,其大小有一定明确的意义(诸如球体以其直径计,立方体以其一个边长计,正六面体以其三个边长的算术平均值或几何平均值计等)。天然泥沙颗粒属于不规则几何形状,对于大颗粒如卵石,习惯于测定其相互垂直的三个主轴长度,并以其算术平均值或几何平均值计,对于较细的颗粒往往要根据泥沙的沉速反求颗粒的直径。由于泥沙颗粒形状的不规则,即使测量出的直径值相同,也不具有可比性。因此,对于泥沙颗粒仅仅指出它们的大小犹嫌不足,还必须说明量测所用的方法以及所得大小的定义。为了解决这一问题,河流泥沙颗粒分析工作者,可把较小的颗粒当作球体看待,用与球体等值粒径来表示。等值粒径主要有下述几种。

1. 容积等值粒径 (D_r)

容积等值粒径又称等容粒径,亦即可谓名义粒径(Nominal diameter)。如果已知某不规则颗粒的体积为 V ,而球体的体积为 $\frac{\pi D^3}{6}$,则两者相等的条件下,得:

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = 1.24 \sqrt[3]{V} \quad (2-1)$$

假如式(2-1)以颗粒的重量(G)及其密度(ρ_s)表示,则得:

$$D_r = 1.24 \sqrt[3]{\frac{G}{\rho_s}} \quad (2-2)$$

通过大量实际测定结果证明,对于较粗颗粒的天然泥沙来说,其长、中、短三轴之间确实存在一定统计关系。如以 a 表示颗粒的长轴, b 表示中轴, c 表示短轴, D 表示与该颗粒同体积的球体直径,据冈察洛夫、窦国仁认为,可用式(2-3)表达三轴长度比例关系:

$$\frac{a}{D} : \frac{b}{D} : \frac{c}{D} = \frac{9}{6} : \frac{6}{6} : \frac{4}{6} \quad (2-3)$$

并且还认为：虽然式（2-3）是从较粗颗粒的实测数据测得来，但在应用方面也可以推广到较细的泥沙颗粒。

从统计观点出发，也有人认为可以近似地把中轴 b 作为粒径或者把长、短两轴的算术平均值，即 $\frac{a+c}{2}$ 作为粒径，式（2-3）三轴比值统计数据也很清楚地说明了这一问题。

2. 沉速等值粒径 (D_c)

沉速等值粒径又称沉降粒径 (Settling diameter)，它是指当某颗粒与某球体比重相同，且在相同液体介质中具有相同的沉速，该球体的直径即为该颗粒的沉速等值粒径。这是河流泥沙颗粒分析中常用的数据。

3. 表面等值粒径 (D_b) (Surface equivalent diameter)

如已知某不规则形状颗粒的表面积为 S ，而球体的表面积为 πD^2 ，则在表面积相等的条件下，得：

$$D_b = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (2-4)$$

4. 比表面等值粒径 (D_{bb}) (Surface area equivalent diameter)

如已知某不规则形状颗粒的比表面积为 S_p ，而球体的比表面积为 $\frac{\pi D_{bb}^2}{\frac{\pi D_{bb}^3}{6} \rho_s}$ ，则于比表面

积相等的条件下，得：

$$D_{bb} = \frac{6}{\rho_s S_p} \quad (2-5)$$

5. 筛析粒径 (D_{sai})

所谓筛析粒径，是指某颗粒恰好能通过的最小筛孔的孔径的毫米数。方孔筛的孔径是指孔的边长，因此，有的书中称筛析粒径是指颗粒恰好通过方孔的边长。筛子有方孔筛和圆孔筛，圆孔筛的孔径对颗粒的通过控制具有唯一性，而方孔筛的对角线和孔的边长都对颗粒的通过具有控制作用。从这一点讲，上述筛孔粒径定义就显得不够严密。然而，通常应用的则是筛析等级粒径，它是指筛析中相邻两级筛孔孔径的平均值，这也是最常用的。

二、泥沙颗粒的形态

天然泥沙形态非常复杂多样，不同的学者采用不同的表达方式。主要的表达方式有颗粒的球度、圆度、形状以及扁平系数等。

1. 颗粒的球度 (φ)

所谓球度，是指颗粒形状接近球体的程度，这对大颗粒讲具有较重要的研究意义。

(1) 沃德尔 (H·wadell, 1935 年) 球度公式：

$$\varphi_w = \frac{D_n}{D_s} \quad (2-6)$$