

S

$$\frac{U^3}{gR\omega}$$

武汉水利电力学院
河流泥沙工程学教研室编著

河流泥沙 工程学 上册

水利电力出版社

TV14
414

河流泥沙工程学

上册

武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室编著

水利电力出版社

7766 IA

7766 25B

内 容 提 要

《河流泥沙工程学》是以《河流动力学》及《河道整治》二书为基础，根据1978年高等学校水利电力类专业教学计划及教材编审规划座谈会的要求编写的。

全书由泥沙运动的基本规律、河道演变及整治、工程泥沙问题、河工模型试验等四篇组成，分上下册出版。本书是上册，共十一章，包括：泥沙特性、推移质运动、悬移质运动、异重流、河道演变及整治的一般问题、蜿蜒型河段的演变及整治、分汊型河段的演变及整治、游荡型河段的演变及整治、浅滩的演变及整治、潮汐河口的演变及整治及河道整治工程措施。

作者除系统阐述基本理论之外，着重介绍我国河流泥沙工程的经验和成果，也注意适当吸收国外的先进经验。

本书可供河流泥沙工程、水文、水利、地理、桥涵、航道等专业师生阅读，也可供有关部门的泥沙工作者参考。

河流泥沙工程学 上册

武汉水利电力学院

河流泥沙工程学教研室编著

(根据水利出版社纸型重印)

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 23.75印张 538千字

1981年9月第一版

1983年11月新一版 1983年11月北京第一次印刷

印数0001—6560册 定价2.45元

书号 15143·5256

前 言

解放以来，我国社会主义建设事业获得很大发展。有关河流泥沙工程及其研究工作也和其它战线一样，积累了不少新经验，创造了不少新成果，取得了较大成就，为发展国民经济建设事业作出了贡献。与此同时，我国还建立了河流泥沙工程专业，为国家输送了一批专业人材，他们在社会主义建设中正发挥着积极作用。

1973年以来，以本室1961、1965年先后出版的《河流动力学》及《河道整治》二书为基础，并根据1978年4月原水电部召开的全国高校水利电力类专业教学计划、教材编审规划座谈会的要求，编写了这本《河流泥沙工程学》教材，供本专业学员学习之用；也可供有关生产和科研单位技术人员参考。

《河流泥沙工程学》尝试将河流动力学和治河工程两方面的内容综合在一起。这样做主要是从改进教学工作考虑的，它有利于加强读者对生产实践问题的理论认识，使学习较为生动。为了避免由此可能产生的削弱理论基础及内容庞杂的弊端，在编写中采取了基本理论集中讲述，应用部分结合工程分开讲述的体系，并注意前后呼应，使其连成一体。另外，工程实践问题只着重讲述理论在实践中的应用，而不涉及工程细节。

教材内容力求做到少而精，不作旁征博引，但又尽可能交待清楚，使初学者能循序渐进。教材着重介绍我国河流泥沙工程的经验和成果，但也注意适当吸收国外的先进经验。

全书共四篇，分上下两册出版。第一篇为泥沙运动的基本规律，第二篇为河道演变及整治，第三篇为工程泥沙问题，第四篇为河工模型试验。河床变形计算主要在第三篇中结合工程泥沙问题讲述。

本书由谢鉴衡同志担任主编，张瑞瑾、谢鉴衡、丁君松、王明甫、陈文彪、王运辉、黄金堂、张兴荣、段文忠、谢葆玲等同志参加了编写。限于水平，教材中可能存在不少缺点错误，衷心希望读者提出批评意见，以便今后改进。

清华大学水利系、成都科学技术大学水利系、水利水电科学研究院泥沙所、长江水利水电科学研究院河流室、黄河水利委员会科学研究所、西北水利科学研究所等兄弟单位参加了教材审查工作，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。长江流域规划办公室水文处、黄河水利委员会水文处、长江航道局等生产单位提供了野外观测分析资料，一并在此致谢。

武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室

1980年12月

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 泥沙运动的基本规律

第一章 泥沙特性	4
第一节 河流泥沙来源	4
第二节 泥沙的几何特性	8
第三节 泥沙的重力特性	13
第四节 泥沙的沉降速度	18
第二章 推移质运动	37
第一节 泥沙的起动	37
第二节 沙波运动	63
第三节 动床阻力	76
第四节 推移质输沙率	87
第三章 悬移质运动	110
第一节 悬移质的运动状态	110
第二节 悬移质含沙量沿垂线的分布	111
第三节 悬移质中的冲泻质及床沙质	128
第四节 悬移质对水流结构的影响	131
第五节 水流挟沙力	138
第六节 悬移质运动的扩散方程及其求解	163
第七节 高含沙水流	174
第四章 异重流	188
第一节 异重流的一般特性	188
第二节 异重流的水力学基础	191
第三节 水库异重流	196
第四节 河渠异重流	203
第一篇主要参考文献	207

第二篇 河道演变及整治

第五章 河道演变及整治的一般问题	209
第一节 河流的形成及一般特性	209
第二节 河道演变的基本原理及分析方法	216
第三节 河相关系	225

第四节	河道整治的一般问题	235
第六章	蜿蜒型河段的演变及整治	239
第一节	蜿蜒型河段的水流泥沙特性	239
第二节	蜿蜒型河段的演变规律	245
第三节	蜿蜒型河段的形成条件	248
第四节	裁弯工程	250
第七章	分汊型河段的演变及整治	263
第一节	分汊型河段的类型和特征	263
第二节	分汊型河段演变的一般规律	266
第三节	分汊型河段的形成条件	268
第四节	分汊型河段的整治	269
第八章	游荡型河段的演变及整治	274
第一节	游荡型河段的一般特性和演变规律	274
第二节	游荡型河段的形成条件	281
第三节	游荡型河段的整治	283
第九章	浅滩的演变及整治	286
第一节	浅滩的类型及成因	286
第二节	浅滩演变的基本规律	291
第三节	浅滩演变分析方法	294
第四节	浅滩整治	302
第五节	浅滩疏浚	311
第十章	潮汐河口的演变及整治	320
第一节	河口地区的海洋水文因素简介	320
第二节	潮汐河口的水流运动	323
第三节	河口泥沙运动的特点	329
第四节	潮汐河口的河床演变	332
第五节	潮汐河口的整治	340
第十一章	河道整治工程措施	344
第一节	堤防工程	344
第二节	护岸工程	347
第三节	非透水整治建筑物	353
第四节	环流建筑物	363
第五节	疏浚	366
第二篇	主要参考文献	372

绪 论

河流两岸自古以来即为人类繁衍生息之所，河流的中下游又往往是经济与文化最发达的地区，因而河流对人类活动的影响历来就十分重要。但是，处于自然状态下的河流不但远远不能满足人类活动日益增长的要求，而且有时还会给人类活动带来一定的危害。山区河流河谷狭窄，坡降陡峻，具有兴建水利枢纽、开发水利资源的良好条件，但洪枯水期水流湍急，滩险众多，航运十分不便。平原河流水流平顺，常具有航运及工农业用水之利，但因泥沙冲淤不定，造成河道迁徙多变，洪水期有泛滥成灾的威胁，枯水期又有妨碍航运和工农业用水的可能。要充分利用河流有利的一面，并克服其有害的一面，必须对河流积极地进行治理，在某种程度上改变河流的自然状态，变水害为水利。

河流是水流与河床交互作用的产物。水流作用于河床，使河床发生变化；河床也回转头来作用于水流，影响水流的结构。二者构成一个矛盾的统一体，相互依存，相互影响，相互制约，永远处于变化和发展的过程中。而水流与河床的交互作用，是通过泥沙运动的纽带作用来达到和体现的。挟带泥沙的水流，在一种情况下，通过泥沙的淤积，使河床抬高；在另一种情况下，通过泥沙的冲刷，使河床降低。泥沙有时是水流的组成部分；有时又是河床的组成部分。在运动过程中，从矛盾的一个方面转化到矛盾的另一个方面，进一步影响整个矛盾统一体的变化和发展。

举例来说，冲积平原中的蜿蜒型河段，由于河身具有弯曲外形，迫使水流作曲线运动，表层流速较大的水体所承受的离心力较底层流速较小的水体要大一些。这种离心力的差异，将使表层水流流向凹岸，而底层水流为了维持水流的连续性，将流向凸岸。由于表层河水的含沙量较小，底层河水的含沙量较大，这样就使得凹岸发生冲刷，凸岸发生淤积，河道将进一步朝弯曲发展。水流和河床以泥沙运动为纽带的这种交互作用，将使河道的弯曲愈演愈烈，终至形成河环。在条件适合时，出现自然裁直，继而又转化成为弯曲河道，再重演上述过程，不过不是简单的重复，而是新的发展。

从上面的例子可以看出，要掌握河流运动发展的规律，必须首先掌握河流水流泥沙运动的规律，这两部分是紧密联系，相互渗透，不可分割的。阐述这两方面基本规律的学科是河流动力学。河流动力学的内容，除上述水流泥沙运动及河床演变的基本规律之外，还包括利用这些基本规律解决实际问题的理论分析计算及河工模型试验方法。

人类在长期的生产斗争实践中，积累了丰富的治理河流的经验，总结这方面工程实践知识的学科称为治河工程。作为水利工程的一个分支，治河工程在我国有很古老的历史。历史上所谓治河就是指治理黄河，在黄、淮合流期间，还包括治理淮河。治河的主要目的是为了防洪，在黄、淮合流期间，还为了防止黄水侵淮而危害南北漕运。由于黄河的为害主要是泥沙淤积以致河床高仰所造成，因此治水治沙必须同时并举。我国古代治河工程的内容也并不局限于防洪和保证航运，远在公元前246年修建的郑国渠和公元前256~251年

修建的都江堰，就是以发展灌溉为目的用水用沙和取水防沙的治河工程的光辉典范。

随着社会经济的日益发展，不但旧有治河工程内容日益丰富，还增添了许多新的内容。一方面，不但治河工程的主要目标，如防洪、航运、灌溉用水再加上工业及城市用水等的要求愈来愈高，工程技术措施愈来愈多样化，而且其它一些国民经济部门也不断对河道整治提出要求。例如铁道、公路部门跨河桥渡的河道整治问题愈来愈显得重要，石油化工部门石油和天然气的跨河建筑物问题也开始提到议事日程上来。另一方面，随着水利枢纽大量兴建，改变了河道的水沙条件，坝上游的库区会发生淤积，坝下游的河床会发生冲刷，从而引起一系列与此有关的问题；至于坝区泥沙的淤积和冲刷，更直接影响到枢纽工程各个组成部分的正常运用，这些生产实践中提出的新问题都必须得到妥善解决。上述发展趋势使得古老的治河工程的名称，已不能全面概括其所面临的新课题。

由于有关生产实践的核心问题是河流泥沙问题，而作为其理论基础的河流动力学的核心问题也是河流泥沙问题，本书将这两部分内容统一在一起，并定名为河流泥沙工程学，以讲述基本理论为主，对生产实践问题只着重阐述理论在实践中的运用。

河流泥沙工程学所面对的自然现象，是边界条件复杂多变的天然河流的水流泥沙运动问题，许多问题不易得出数学分析解，有些问题的解决甚至无一定的成规可循，因此，对具体情况作具体的分析，往往成为这一学科的特色。目前广泛采用的分析研究手段，包括野外观测资料的收集和整理，理论分析计算，河工模型试验等三个方面，其中野外观测资料的收集和整理是取得第一性资料的重要手段，后两方面的工作均以此为基础，尤须特别注意。

我国劳动人民在长期治理江河的实践中积累了丰富的经验。例如前述都江堰工程，使成都平原“水旱从人，不知饥馑，时无荒年，天下谓之天府”，在世界水利史上，也是一个瑰伟的奇迹。这个取水工程在保证引水和防止底部粗沙进入渠道的工程设施方面，与近代无坝取水工程的设计原则，如利用弯道环流的正面引水、侧面排沙原则是完全符合的。至于黄河的治理，早在公元69年东汉王景治河时期，就采取了“防遏冲要，疏决壅积”的“防”、“疏”兼施的办法；至十六世纪中叶，明代潘季驯治黄期间，黄河上的堤防系统，“有缕堤以束其流，有遥堤以宽其势，有滚水坝以泄其怒”，已达到了相当完备的地步。特别值得提出的是，潘季驯在长期治河实践中提出的“水分则势缓，势缓则沙停，沙停则河饱。”“水合则势猛，势猛则沙刷，沙刷则河深”等关于水沙关系的科学论断，与近代水流挟沙力的概念是完全一致的。他在此基础上提出的稳定河道，坚筑堤防，束水攻沙，借清刷黄的治河方针，在当时的历史条件下，也是有一定见地的。

中华人民共和国成立以后，在党中央和毛主席的领导下，广大劳动人民及科技工作者，在治理江河的生产斗争中，取得了前所未有的成就。从防止洪水灾害来说，全国16万多公里堤防，经过加高培厚，改线延伸，并采取消除隐患，防护险工等措施，提高了防洪标准；结合蓄洪、滞洪、分洪等一系列工程，使洪水威胁大大减轻，黄河在1958年发生特大洪水，创造了既未分洪又保住了堤防的奇迹。从航运来说，积极治理大、中、小河流的航道，全国通航水道的长度较解放初期增加了一倍以上；不但增加了通航里程，还提高了通航水深，改善了通航条件。从综合利用水利资源来说，为各种目的而兴建的水库达8万6千多

座，这些水库在国民经济建设中发挥了极其重要的作用。在上述治理江河的伟大斗争中，以整治河道和防治泥沙为主要目标的河流泥沙工程，占有十分重要的地位。除防洪、航运、灌溉取水等早期的治河工程外，枢纽工程的兴建，也处处离不开河道的整治和泥沙的防治。我国北方河流由于含沙量较大，这方面的问题特别严重，这些河流在控制水土流失，延长水库寿命，稳定下游河道，取水防沙，用洪用沙等各个方面，取得了巨大的成果。我国南方河流含沙量相对较小，但这方面的问题也同样存在，在这些河流上，治理航道，整治河口，解决枢纽工程的泥沙问题，也取得了不少成果。这些方面的工作，不仅解决了生产实际问题，满足了社会主义建设的需要，也在一定程度推进了科学的发展。还须指出的是，治河事业的发展，为有关河道水文泥沙的基本观测工作，打下了比较巩固的基础，积累了比较丰富的第一性资料。尤其可贵的是，一支新型的从事治河工程和泥沙研究的科学技术队伍已经形成并日益发展。随着社会主义建设新高潮的到来，河流泥沙工程这一学科，通过广大河流泥沙工作者的努力，必将为实现四个现代化的宏伟目标作出应有的贡献。

第一篇 泥沙运动的基本规律

第一章 泥 沙 特 性

第一节 河 流 泥 沙 来 源

河流中运动着的泥沙，就其来源而言，可以分为两大类，一类是从流域地表冲蚀而来的，另一类是从原河床上冲起的。在运动过程中，二者有着置换作用。从流域冲蚀下来的泥沙，小部分沉积在河床上，大部分汇流入海，特别是颗粒很细的泥沙，绝大部分都汇流到海里去了；而原来河床上的泥沙，也有一部分为新来的泥沙所置换而汇流入海。当然，就河流形成的整个历史过程来看，泥沙都是从流域地表冲蚀而来的。

从流域地表冲蚀下来的泥沙数量，通常是用每平方公里地面每年冲蚀若干吨来衡量的，称为侵蚀模数，也称输沙量模数。图1-1为我国输沙量模数分布情况^[1]。

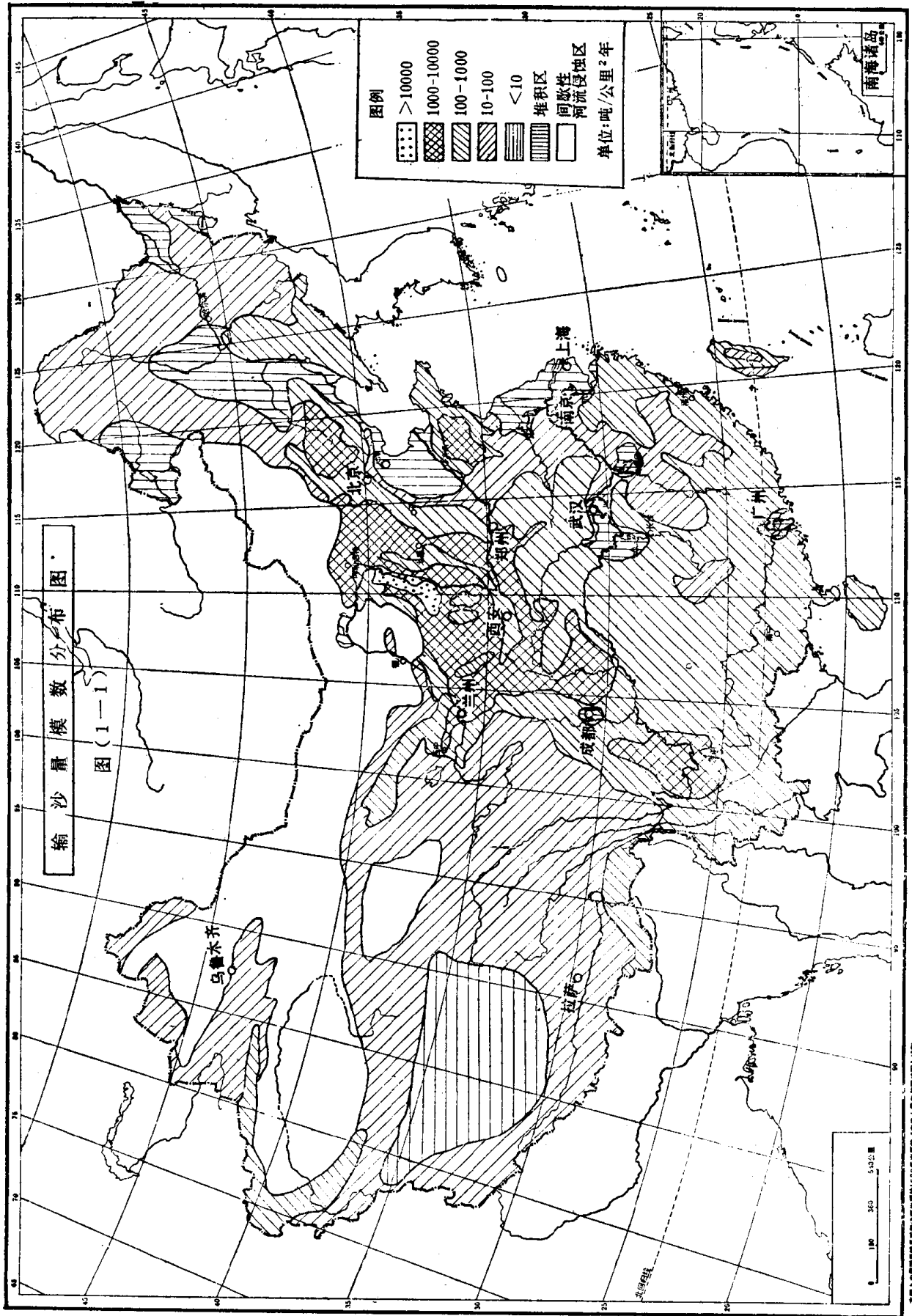
从图可以看出，我国土壤侵蚀最严重的地区是黄河中游的黄土高原、永定河和西辽河流域，其输沙量模数 $M > 1000$ 吨/公里²·年，这一数值相当于地面每年普遍冲掉0.6毫米的厚度。而这一地区中，尤以陕北的窟野河、无定河、延河流域为最大，其输沙量模数达 $M \approx 10000$ 吨/公里²·年，相当于地面每年普遍冲掉6毫米的厚度。

流域地表的侵蚀，是与气候、土壤、地貌有关的。我国流域的水量，大部分是由降雨汇集而来的，由冰雪融化来的较少，而暴雨又为侵蚀的主要因素。如果暴雨区域的土壤结构松散，植物覆被较差，水土流失就比较严重。例如黄河中游的黄土地区，7~8月份降雨最多，且多为暴雨，其它条件也较差，所以地表侵蚀最为严重；而在我国南部省份，虽然也有暴雨，但土壤结构密实，植物覆被较好，所以其输沙量模数多在1000吨/公里²·年以下。地形对流域的侵蚀，也起着重要的作用，在同样条件下，地形陡峻的自然比平坦的要流失更多的土壤。

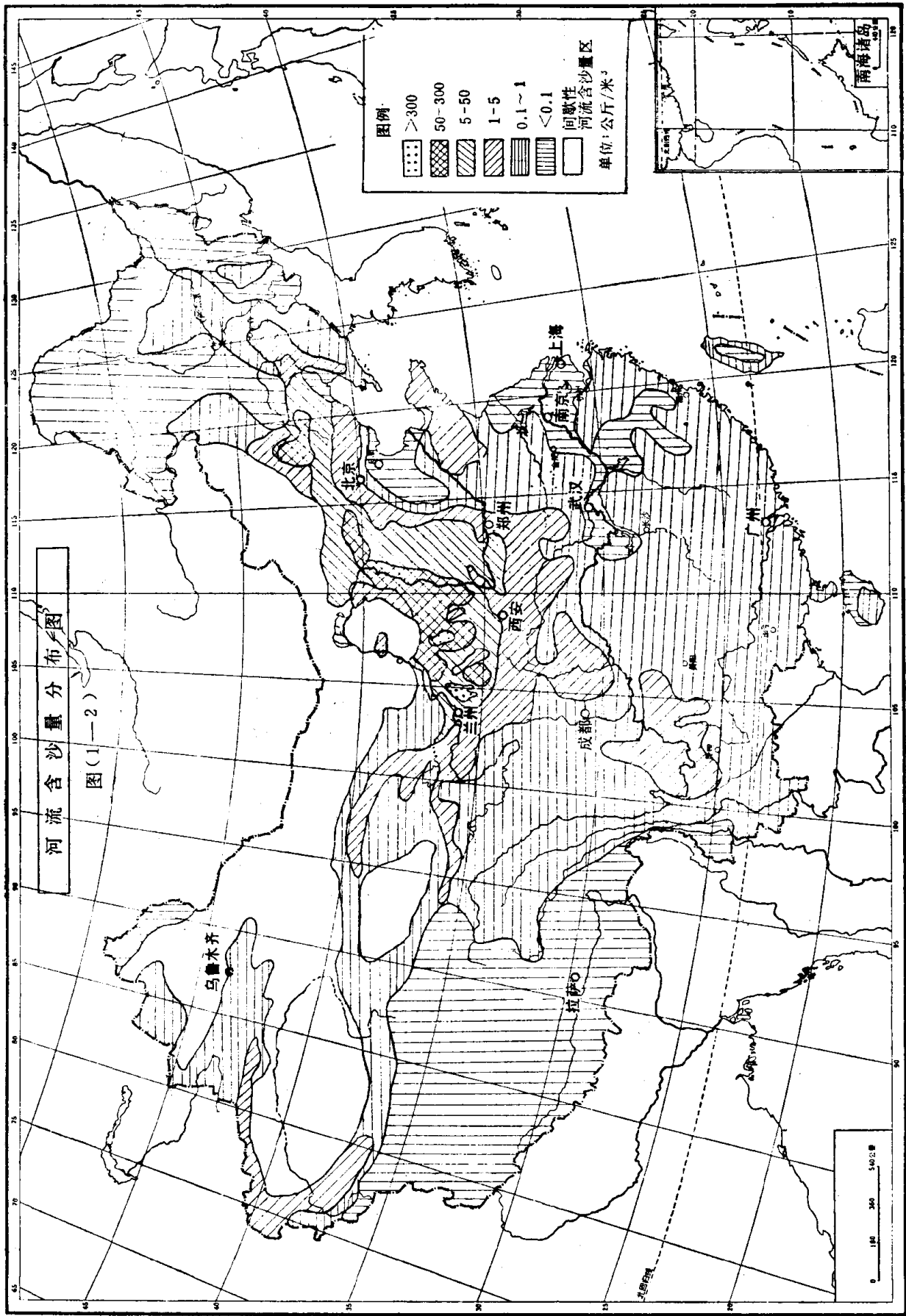
从流域地表侵蚀下来的泥沙，经过河流的搬运作用，大部分汇流入海；但也有不少沉积在低洼湖泊地带。我国几条大河的河口地区和洞庭湖、鄱阳湖等大湖泊，都属于这样的堆积区（图1-1）。

影响流域地表侵蚀的因素，除上述三项外，人类活动也起重要作用，例如坡面的盲目开垦会加速水土流失；而水土保持工程能减少水土流失。

泥沙随水流汇集到河流之中，使得河水中含有一定沙量。图1-2为我国河流含沙量（通常以每单位体积河水中的泥沙重量表示）的分布情况^[1]。从图可以看出，含沙量很高的河流，正是黄河中游的一些干支流，年平均含沙量有些高达300公斤/米³以上；而在南部一些省份，年平均含沙量不足1公斤/米³。这样的分布状况，是与各地区的水土流失程度



本图系中国科学院地理研究所1950年编制的《中华人民共和国地质图》的一部分



本图系中国科学院地理研究所1955年出版《中华人民共和国自然地理》一书

紧密相关的。

含沙量只表示河水含沙浓度，要计算河流的输沙量，还必须与流量联系起来。表1-1及表1-2是我国及国外一些主要河流的年平均流量、年平均含沙量、年输沙总量和输沙量模数的统计资料。

表 1-1 全国主要河流多年平均水沙特征值统计表

河 流	测 站	水 量		沙 量		
		流 量 (米 ³ /秒)	径 流 量 (亿米 ³)	含 沙 量 (公斤/米 ³)	输 沙 量 (万吨)	输沙量模数 (吨/公里 ² ·年)
松 花 江	哈 尔 滨	1210	381.8	0.156	751	19.2
辽 河	铁 岭	165	52.0	6.83	4070	336
永 定 河	官 厅	43.1	13.6	60.8	8070	1900
黄 河	陕 县	1350	425.9	36.9	157000	2290
	花 园 口	1530	482.7	27.1	131000	1790
	利 津	1480	466.7	24.7	115000	1530
无 定 河	川 口	47	14.8	139.0	21000	7020
渭 河	华 县	287	90.5	47.0	42500	3990
淮 河	蚌 埠	855	269.6	0.456	1410	116
长 江	宜 昌	14300	4512	1.180	52100	518
	汉 口	23500	7414	0.616	43400	292
	大 通	29200	9211	0.541	47800	280
金 沙 江	屏 山	4640	1464	1.660	24300	502
岷 江	高 场	2870	905.2	0.612	5440	409
嘉 陵 江	北 碚	2130	672.4	2.490	17000	1070
湘 江	湘 潭	2010	633.7	0.173	1070	133
赣 江	外 洲	2030	640.3	0.180	1110	137
闽 江	竹 岐	1740	547.1	0.135	751	138
西 江	梧 州	6970	2199.0	0.345	6920	210
北 江	石 角	1280	403.0	0.133	515	134
东 江	博 罗	710	224.0	0.152	341	135
红 水 河	迁 江	2130	672.4	0.628	4250	332
澜 沧 江	允 景 洪	1840	580.1	1.300	7730	561
雅 鲁 藏 布 江	奴 下	2010	634.6	0.318	1820	108
伊 犁 河	雅 马 渡	393	116.7	0.539	672	134
叶 尔 羌 河	卡 群	203	64.0	4.560	2910	604

注 本表资料引自原水利电力部水利司1975年5月刊布的《全国主要河流水文特征统计》。

河流泥沙的矿物成分，依流域地质条件而定，主要是氧化硅（ SiO_2 ），含量约占一半左右；其次为氧化铝（ Al_2O_3 ）及氧化铁（ Fe_2O_3 ），含量约占30%左右；其它如氧化钙（ CaO ）、氧化镁（ MgO ）、氧化磷（ P_2O_5 ）等，均含量甚微。

挟带泥沙的河水，还有一定肥效，用以灌田，能增长肥力。例如黄河中游的黄土，每吨含氮肥0.8~1.5公斤、磷肥1.5公斤、钾肥20公斤，共计约23公斤，约为总土重的2%。这些肥料随土壤一道被水流冲蚀挟带下来，只要采取有效措施，就能加以利用。

表 1-2

国外若干河流多年平均水沙特征值统计表

河 流	测 站	水 量		沙 量		
		流 量 (米 ³ /秒)	径 流 量 (亿米 ³)	含 沙 量 (公斤/米 ³)	输 沙 量 (亿吨)	输沙量模数 (吨/公里 ² ·年)
巴 西 亚 马 孙 河	河 口	181000	57200	0.07	4.0	69
美 国 密 西 西 比 河	河 口	17820	5640	0.6	3.44	107
密 苏 里 河	赫 尔 曼	1950	616	3.9	2.4	181
科 罗 拉 多 河	大 峡 谷	155	49	30.4	1.49	234
孟 加 拉 布 拉 马 普 特 拉 河	河 口	12190	3850	2.1	8.0	1200
恒 河	河 口	11750	3710	4.3	16.0	1680
印 度 科 西 河	楚 特 拉	1810	570	3.3	1.9	3060
巴 基 斯 坦 印 度 河	柯 特 里	5560	1740	2.8	4.8	495
緬 甸 伊 洛 瓦 底 江	普 朗 姆	13550	4280	0.8	3.3	768
埃 及 尼 罗 河	格 弗 拉	2830	895	1.4	1.22	41.6

第二节 泥沙的几何特性

泥沙的几何特性，系指泥沙颗粒的形状、大小等。

根据肉眼和显微镜的观察，泥沙的形状是各式各样的。常见的砾石、卵石，外形比较圆滑，有圆球状的，有椭球状的，也有片状的，均无尖角和棱线。沙类和粉土类泥沙外形不规则，尖角和棱线都比较明显。粘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，是与它们在水流中的运动状态密切相关的。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。

一、泥沙的粒径

泥沙颗粒的大小，通常用泥沙的直径来表示。为了克服泥沙颗粒形状不规则不易确定直径的困难，理论上采用等容粒径。所谓等容粒径，就是体积与泥沙颗粒相等的球体的直径。设某一颗沙的体积为 V ，则其等容粒径为

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

简称为粒径，常用单位为毫米，对较大的粒径也可用厘米作单位。

除等容粒径外，泥沙的粒径也可用其长轴 a 、中轴 b 及短轴 c 的算术平均值 $(a+b+c)/3$ 或几何平均值 $\sqrt[3]{abc}$ 来表示。假定把泥沙看成椭球体，因椭球体的体积为 $\pi abc/6$ ，而球体的体积为 $\pi d^3/6$ ，令两者相等，可以看到

$$d = \sqrt[3]{abc} \quad (1-2)$$

也就是椭球体的等容粒径即为其长、中、短轴长度的几何平均值。对较粗天然沙粒量测成果的统计分析表明，沙粒的中轴长度，和其长、中、短三轴的几何平均值（即等容粒径）接近相等而略大。这就为通过量测沙粒的中轴长度来代替等容粒径提供了依据。

实际上，仅对单颗的卵石、砾石，可以通过称重，再除以泥沙的重率，得到沙粒的体积，然后按式(1-1)算得等容粒径；或直接量得它的长、中、短三轴长度，再求其平均值。对于较细的颗粒，例如一般沙土，更不用说粉土和粘土，在通常情况下根本不可能采用这样的办法确定它们的粒径。

在实际工作中，对于不易直接量测其体积及长、中、短轴长度的泥沙，通常采用两种方法确定其粒径。

对于沙土，一般采用筛析法。我国采用公制标准筛，筛号和孔径的关系如表1-3。不难设想，用筛析法量得的粒径应相当于各粒径组界限沙粒的中轴长度。如前所述，沙粒的中轴长度是比较接近等容粒径的，因此可以近似地看成等容粒径，或者直接称为筛径。

表 1-3 公制标准筛筛号和孔径关系表

筛号	孔径 (毫米)	筛号	孔径 (毫米)
3	6.35	40	0.42
4	4.76	50	0.297
6	3.36	60	0.250
8	2.38	70	0.210
10	2.0	100	0.149
12	1.68	140	0.105
16	1.19	200	0.074
20	0.84	270	0.053
30	0.59	400	0.037

对于粉土和粘土，已不可能进一步筛分，只能采用水析法，如比重计法、粒径计法、移液管法等。这些方法的基本原理是，通过测量沙粒在静水中的沉降速度，按照本章第四节将要阐明的粒径与沉速的关系式换算成粒径。我国水利部门目前采用的水析法规定，试验用水为蒸馏水或去离子水，试验时加入防止产生成团下沉的所谓絮凝现象的反凝剂，粒径与沉速的关系式为适用于极细颗粒球体的沉速公式。因此所得粒径实际上为具有同样比重的球体直径，其沉速与沙粒在上述条件下单颗下沉时的实测沉速相当。这个粒径接近沙粒的等容粒径但并不全等，因其系由沉速换算得来，故也叫沉降粒径，或简称沉径。有关絮凝问题，在以后阐明水质对沉速的影响时，还要专门讨论。

沉径反映了沙粒静水沉速这一重要水力特性，具有十分重要的意义。但应该指出，按照上述方法求得的沉径换算成沉速之后，只能反映沙粒在蒸馏水或去离子水中不产生絮凝现象的沉速，与沙粒在实际河水中可能产生不同程度絮凝现象的沉速是有差异的。由于我们的研究对象是河水中的泥沙运动，为了使所求粒径换算出来的沉速刚好等于在河水中的静水沉速，有些人主张在作水析时，应该采用同条件的浑水，并不加反凝剂。这样求得的粒径虽然也是由沉速换算而来，但和上述沉径不同，不代表单颗沙粒的真实粒径，而是包含有絮凝影响的某种虚拟粒径，可以称为沉积粒径。沉积粒径虽然能如实反映泥沙的实际水力特性，但由于受水质及含沙浓度影响，同一种泥沙在不同河水中的沉积粒径彼此不同，不便于比较，目前未被广泛采用。

泥沙的水力学特性和物理化学特性均与粒径有关，这方面的问题以后将陆续讨论。正是因为这样的原因，通常将泥沙粒径按大小分类，如图1-3所示。

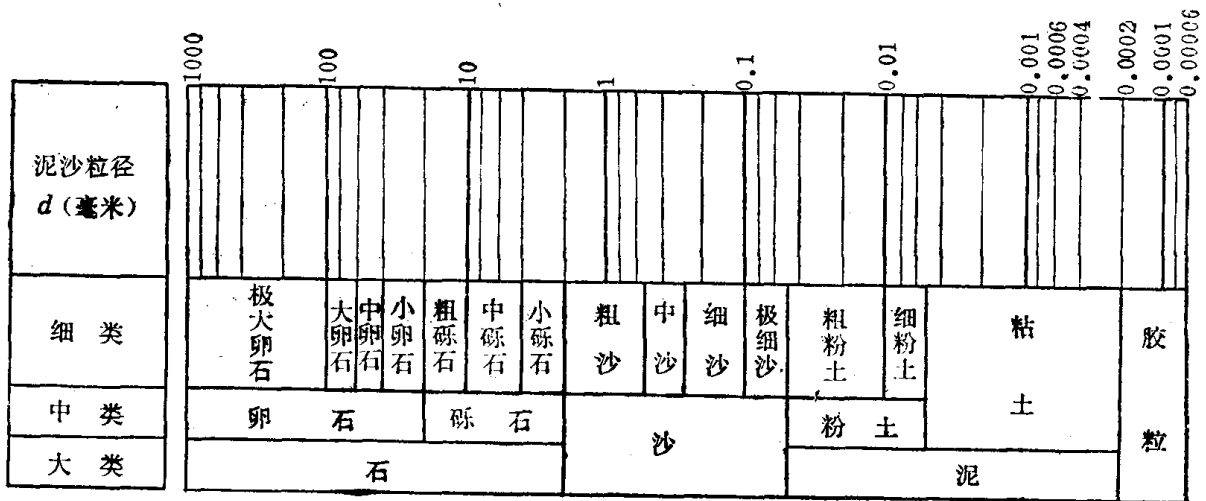


图 1-3 泥沙分类图

二、泥沙的粒配曲线及有关特征值

河流中的泥沙并不是均匀一致的，而是由大小不等的颗粒所组成。通常采用的办法是，通过颗粒分析（包括筛分和水析），求出沙样中各粒径级的重量，或小于不同粒径的

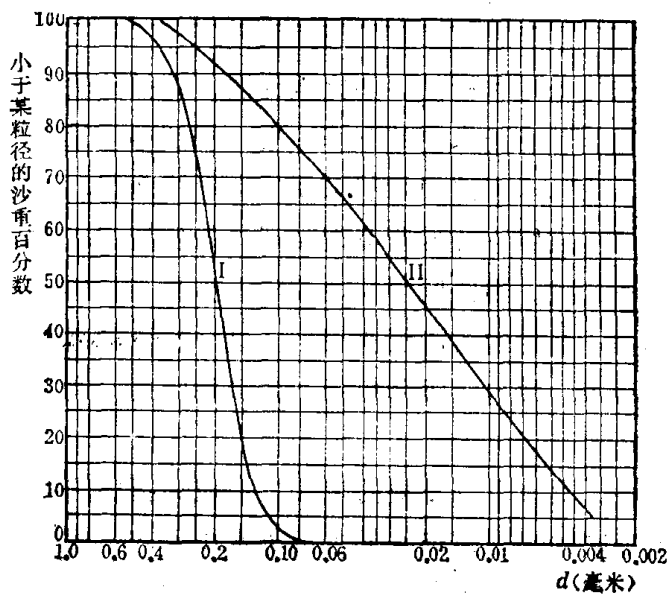


图 1-4 半对数坐标纸上的粒配曲线

总重量，据以绘制如图 1-4 所示的沙样粒配曲线。这种粒配曲线通常都画在半对数坐标纸上，横坐标表示泥沙粒径，纵坐标表示小于某粒径的泥沙在总沙样中所占的重量百分比。例如，在曲线 I 所表示的沙样中，粒径小于 0.25 毫米的泥沙在整个沙样中所占的分数为 75%。这里横坐标之所以采用对数坐标，主要是因为天然泥沙粒径变化范围甚广，这样作可避免图幅过大。

除了半对数坐标纸外，粒配曲线还往往画在对数概率坐标纸（亦称机率坐标纸）上（图 1-5）。这种对数概率坐标纸的横坐标仍为对数坐标，而纵坐标则是按正态分布的规律刻制的。刻制的原则是，凡符合正态分布的累积分布曲线，在对数概率坐标纸上均成为直线。泥沙的粒配曲线也是一种累积分布曲线。对天然泥沙所作的粒配分析表明，泥沙粒径的对数值往往是接近正态分布的，这样，画在对数概率坐标纸上的粒配曲线，就和画在一般半对数坐标纸上的粒配曲线不同，往往接近直线。利用这样的对数概率坐标纸绘制粒配曲线有三个优点。第一，可以利用粒配曲线是否接近直线来检查粒配是否

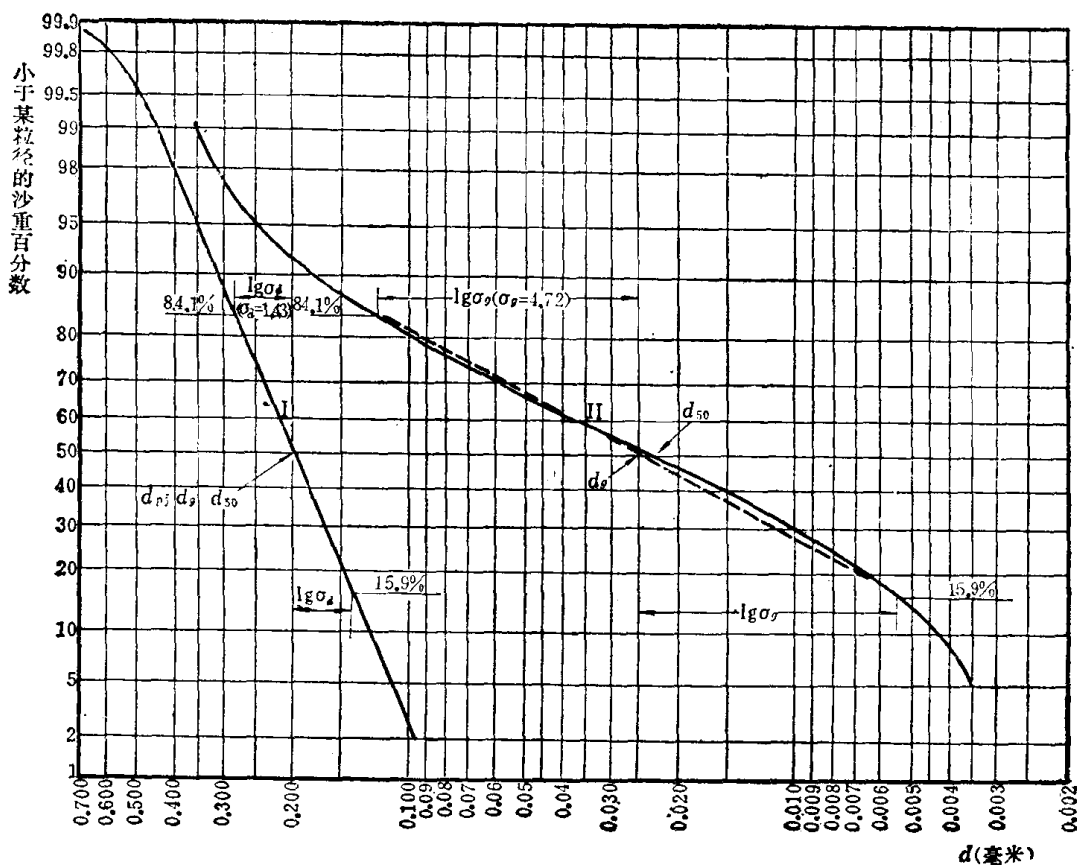


图 1-5 对数概率坐标纸上的粒配曲线

接近正态分布；第二，在粒配曲线接近正态分布的条件下，可据以直接确定有关统计特征值；第三，含量较少的粗颗粒和细颗粒在粒配曲线上分布较宽，因而可以绘制得比较准确。

在以上两种坐标纸上绘制的粒配曲线，都能很清楚地告诉我们两个情况：一个是沙样粒径的大小；另一个是沙样粒径的均匀程度。落在粒配曲线图右边的曲线（曲线II）显然代表粒径较小的沙样；坡度较陡的曲线（曲线I）显然代表粒径较均匀的沙样。

从粒配曲线上，对于某一特定粒径，可以查出小于这个粒径的泥沙在总沙样中所占的重量百分比，通常均以所查到的百分数作为足标附注在粒径 d 的下面，来表示这些粒径的特征，如 d_{65} 、 d_{50} 、 d_{35} 、……等。其中 d_{50} 是一个十分重要的特征粒径，称为中值粒径，它是在粒配曲线上与纵坐标 50% 相应的粒径，在全部沙样中，大于或小于这一粒径的泥沙在重量上刚好相等。

利用上述对数概率坐标纸上绘制的粒配曲线或根据正态分布律，还可很容易地求出沙样的平均粒径 d_{pj} 及均方差 σ_s ，或几何平均粒径 d_g 及几何均方差 σ_g 。在沙样粒径的对数值符合正态分布的条件下，如前所述，粒配曲线将是一条直线，这条直线与穿过纵坐标 50% 的水平线交点的横坐标值既是中值粒径 d_{50} ，也是平均粒径 d_{pj} 。而且根据正态分布律，应有

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{\bar{x}-\sigma}^{\bar{x}+\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx = 0.682 = 2 \times 0.341$$

式中 x —— 随机变量；

\bar{x} —— 随机变量平均值，在正态分布条件下即等于中值；