

泥沙运动的动理学理论

Kinetic Theory for Sediment Transport

钟德钰 王光谦 吴保生 著



科学出版社

泥沙运动的动理学理论

Kinetic Theory for Sediment Transport

钟德钰 王光谦 吴保生 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了泥沙运动的动理学理论。书中基于统计力学建立了水沙两相流介观尺度上的动理学方程和宏观尺度上的双流体方程,并以此为基础构建了描述挟沙水流运动的两相浑水方程和关键本构关系。本书在严格的动理学理论框架下,分析了挟沙水流的流动特征,通过揭示颗粒微观运动特性与宏观泥沙输移统计规律间的本质联系,阐述了床面泥沙的冲刷与沉积、推移质泥沙的输移,以及悬移质泥沙悬浮的力学本质和内在规律。

本书可作为河流动力学、泥沙运动力学等有关专业领域教师、科研人员的参考书和研究生的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

泥沙运动的动理学理论 / 钟德钰, 王光谦, 吴保生著. —北京: 科学出版社, 2015.2

ISBN 978-7-03-043376-3

I. ①泥… II. ①钟… ②王… ③吴… III. ①泥沙运动-流体动力学-研究 IV. ①TV142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 031216 号

责任编辑: 刘宝莉 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 2 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 2 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 288 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

河流是地球水循环系统中的关键环节，它们不仅是水和泥沙及其他有机和无机物质的输送通道，同时也是能量传递与转化的通道；它们不仅是塑造地表景观的主要动力，同时也是地球生态和环境的主要承载体和系统演化的参与者。河流演变与人类的生存和发展息息相关。

世界文明古国都有着悠久的水资源开发和利用的历史。中国古代就先后建成了如都江堰(公元前 251 年)、郑国渠(公元前 236 年)、灵渠(公元前 214 年)、大运河(公元 1293 年)等许多伟大的水利工程^①，积累了大量沿用至今的水利工程建设、运行和管理的宝贵经验。在人类依河流生存和繁衍的同时，洪水泛滥和干旱灾害也给人类的生命财产安全带来严重威胁。在所有致灾因素中，泥沙淤积导致河床抬高甚至大规模堤防溃决、河流变迁，则是引起严重洪水灾害的首要原因。近现代以来，除传统上的水旱灾害外，社会经济的高速发展对生态与环境也产生了严重负面影响。河流健康问题已成为当前迫切需要解决的问题，而其中与生态环境变化密切相关的环境与泥沙的耦合作用越来越显示出其重要性。因此，泥沙研究不仅是水利科学与工程中的核心科学问题，也是重要的前沿科学问题之一。

在尼罗河流域、底格里斯河流域、幼发拉底河流域的早期文明发展过程中，人们已经意识到河流与泥沙的密切关系，而中国最早关于洪水与泥沙相互关系的文献记载则可追溯至上古时期的尧舜禹时代。至秦汉以后，关于泥沙淤积与治河防洪之间关系的论述更是不断出现在各类文献中。早期关于泥沙研究的记录多是关于治河、防洪和灌溉等直接关乎人类生存的原则、技术和方法的经验性总结；标志泥沙研究真正成为独立的、现代的科学理论体系的核心内容则是在 20 世纪 50 年代以后才逐步完成的。这一古老而年轻的学科是研究自然界水流所携带泥沙运动规律的基础性学科，虽然它是以流体力学和水力学为基础的力学学科，但它与地貌学、水文学、海洋学及生态与环境科学等存在多方面交叉。泥沙研究主要关注河流、湖泊和近海等水域中颗粒物冲刷、输移和沉积等过程中所涉及现象、机制和规律的解释。此外，解决水利工程规划、设计、建设和运行中遇到的泥沙问题的基本原则、方法和技术亦是泥沙研究的重要内容。近年来，伴随着社会对水环境和水生态问题关注度的不断增长，生态和环境问题中涉及的泥沙问题也逐渐成为泥沙研究的重要发展方向，而由这些问题所衍生的流域综合管理等复杂的

^① 姚汉源：《中国水利史纲要》，北京：水利电力出版社，1987 年版，第 44-50，578-579，590 页。

人文、社会和经济问题也属于传统泥沙研究以外的新领域。

泥沙运动力学作为河流动力学的一个重要分支,经国内外无数学者的长期研究,不断发展,才逐渐构建完成了理论框架。Rouse 扩散方程, Shields 曲线, Meyer-Peter 及 Einstein 等推移质输沙公式,张瑞瑾、唐存本、窦国仁起动流速公式,张瑞瑾等挟沙力公式,Engelund-White-王士强动床阻力公式,韩其为泥沙运动统计理论,以及王明甫、钱宁、费祥俊、王兆印及其合作者发展的高含沙水流运动理论等研究成果,都是这一框架中的重要内容。钱宁、万兆惠的专著《泥沙运动力学》的出版是完成该学科理论体系的重要标志之一。我国历来重视治河、防洪工程中泥沙问题的研究,这在历代典籍中随处可见。特别是伴随着我国 20 世纪 50 年代开始的大规模水利工程建设,在我国多数流域水土流失严重的地质、地貌背景下,对泥沙问题研究的需求日渐迫切。为此,流域机构、高等学校和科研单位相继成立了泥沙研究专门机构,不少从事水利科学与工程研究的著名学者在此阶段开展了更为深入、系统的泥沙研究工作,取得了大量具有代表性的成果。特别重要的是,张瑞瑾教授于 20 世纪 50 年代在武汉水利电力学院(现武汉大学水利水电学院)创建了河流力学及治河工程专业,此后其他一些高校也相继设立了相同或相近专业,逐步形成了包含本科至博士研究生教育的完整培养体系,奠定了我国泥沙研究人才基础。同时,黄河、长江、淮河、海河等大江大河的治理开发所遇到的泥沙问题的发现、解决和反思则促进了泥沙研究的发展,也奠定了我国在泥沙基础问题研究中的领先地位。由钱宁院士倡导和筹建的、隶属于联合国教育、科学及文化组织(UNESCO)和世界泥沙研究会(WASER)的国际泥沙研究培训中心(IRTCS)就常设我国,主办了具有广泛影响的国际期刊 *International Journal of Sediment Research* 及一系列的河流泥沙国际学术研讨会(ISRS),代表了国际泥沙研究的最高水平。

也要承认,泥沙研究虽已取得了巨大成就,但泥沙研究在室内实验和野外观测手段、理论研究路线和方法上仍然面临着严峻挑战。在实际工程问题中涉及的一般泥沙问题的同时,还应更加强调泥沙运动理论的系统性的创新研究,以免泥沙研究在整个学科发展的逻辑链条上形成认知的高峰与洼地。例如,由于床面泥沙的起动涉及泥沙运动的临界条件,是解决工程泥沙问题的关键临界变量,对此问题开展的研究不胜枚举,无论是理论探索还是应用研究,都达到了非常深入的阶段。相较而言,目前不少研究对挟沙水流的流动描述仍然借用了适用于单相流的 Reynolds 方程,而强调挟沙水流两相特性的研究并未得到充分重视。在河流含沙量不高、泥沙对流动特性的影响不显著时,采用单相流 Reynolds 方程分析水流流动是可行的。但当泥沙颗粒的存在对流体本身及其流动特征产生不可忽视的影响时,单相流 Reynolds 方程不再适用于分析挟沙水流的流动。尽管适用于单相流

的 Reynolds 方程用于挟沙水流研究时可能存在严重问题,但迄今还是通过各种经验方法对其进行修正以解决实际工程问题,而从理论上解决挟沙水流描述问题的研究尚很薄弱。由此可见,在泥沙输移现象及基本规律的研究中,认识深浅程度差异还是非常之大。更为重要的是,单纯以工程需求为驱动力的科学研究,在工程问题得到基本解决后,往往会缺乏进一步发展的动力,难以满足自然科学探求科学未知的需要,更无法满足社会生产发展提出的新的和更高的要求。未来泥沙研究在重点研究和解决工程泥沙问题的同时,还应放眼长远未来,更加重视理论创新,推动泥沙研究的长远持续发展。

泥沙研究的根本困难在于,既要考虑单个泥沙颗粒表现出来的在微观运动特征上的个性,又要考虑由大量单个颗粒构成的颗粒群体表现出来的在宏观输运特征上的共性。这一特点要求在理论上必须搭建一座桥梁,将个性与共性联系起来,这样才能系统描述泥沙运动的全貌。事实上,泥沙研究碰到的核心困难也正是缺乏这样一种理论方法,它能给出统一、自洽和完整的泥沙运动过程的力学及数学描述。在过去的近 30 年里,本书的作者及合作者不断尝试应用以统计力学(statistical mechanics)为基础的动理学理论(kinetic theory)对泥沙运动基本问题开展了系列研究,对典型泥沙输移现象的力学机制给出了详细阐释,同时也对泥沙运动的统一力学和数学描述作了探索性的工作,表明动理学理论在研究泥沙基本动力学特性时具有独特的优势。动理学理论的核心在于提供了一种描述颗粒微观状态与宏观运动过程的本质联系的研究方法。本书就是这些工作的一个阶段性总结,包含如下主要内容:

(1) 第一、二章对泥沙运动已有研究和基本认识作了简要回顾。对于泥沙运动动力学的详尽总结已有不少专著,但将泥沙运动放在统计力学这样一个更为细致的语境下的回顾对于认识泥沙运动是有益的。这一考虑的原因在于,不少泥沙运动力学专著沿袭了把泥沙运动看作是水文学或者水力学的一个分支的做法,这样在理论体系、研究方法上,或多或少存在不自洽的问题。随着学科发展,我们力图从随机、多态及多尺度等泥沙运动本质性特征这样的角度来探索泥沙运动的动力学机理和规律,因此以新的视角对经典泥沙研究进行回顾是十分必要的,它们也是本书重点介绍的动理学理论研究的出发点。

(2) 第三章对统计力学作了简单介绍。本书所介绍的理论是完全基于统计力学发展起来的,关于这门学科的基本常识是理解本书内容的基础。为此,对本书所涉及的统计力学的基本概念和理论作了简要回顾。为使读者快速获得了解泥沙运动的动理学理论所必需的统计力学基础知识,在泥沙运动动力学的语境中对统计力学予以简要介绍;力求避免过多注重数学细节而损害对物理现象及其实质的理解。当然,这样做也有风险,正如数学家对一些物理学家的批评一样,丢失了数

学严谨性的物理不是好的物理,我们力求在数学的严谨与物理的现实之间取得必要的和恰当的平衡。在建立挟沙水流的动理学方程中,保持数学的严谨性,避免过多引入实际问题中碰到的种种复杂事实;在讨论泥沙运动的各种表象和内在实质时,则力求基于泥沙输移的真实过程来探索与之相关现象背后的力学背景。

(3) 第四章对挟沙水流动理学方程进行了详尽推导。本书的根本目的之一是基于统计力学给出水沙两相流动所遵循的介观尺度上的统计力学描述。泥沙输移不同于分子运动或者颗粒流的根本特性在于泥沙运动是水流携带下的物质输移,虽然在泥沙研究中十分强调泥沙对水流的影响,但不得不承认离开水流谈论泥沙的运动是不全面的。这也提醒我们,在建立一个新的理论体系时,正如不少传统泥沙研究中忽略了泥沙对水流的影响一样,忽视水流自身的统计力学属性及其与泥沙颗粒运动的耦合也是不合适的。为此,辟出专门章节来讨论两相流条件下,包括载体与被输运物质在内的物质输移的统一统计力学描述。本章首先引入了两相流中实现统计系综的关键性参数:两相流动的示性函数。与以往多数引入统计力学的两相流研究不同,这个局部性的概率密度函数反映了两相流体系中颗粒和颗粒轨道上颗粒所见流体的状态分布。这一概念在多相流研究中是经典的,但在统计力学的微观层面予以新的定义,就作者所掌握的材料而言,却是首次。它的引入解决了统计力学应用于水沙两相流动时颗粒自由度与流体自由度存在差异的难题。虽然,这一方法从表面上看,对流体的识别仅仅限于与颗粒运动有关联的部分,即颗粒轨道上所见流体的变化,但事实上这并不会带来认识水沙两相流本质上的困难,原因是在各态遍历的假定下,通过统计系综还是能够给出与经典力学一致的结果。

(4) 第五、六章介绍了描述挟沙水流宏观运动规律的守恒方程的详细推导。在统计力学中由(介观)动理学方程在相空间上积分得到的(宏观)输运方程(或守恒方程),也往往被称为水动力学方程(hydrodynamic equations)。这一称谓有其历史原因。在统计力学蓬勃发展的年代,包括 Euler 在内的不少科学家已经基于连续介质力学的基本定律建立了 Euler 方程、Navier-Stokes 方程等用于研究水动力学问题。当统计力学家基于 Liouville 方程和 Boltzmann 方程得到宏观物质输运方程时,他们发现这些方程已经存在。事实上,两者间存在的必然联系是显而易见的:物质的宏观输移所体现出来的规律性在本质上是无序运动的大量粒子的统计表象而已。当然也不能过分夸大统计力学的能力,我们仅仅看重的是它能提供一种数学力学描述的途径和工具,为宏观输运方程的推导中解决本构关系问题提供一种可能的途径。

(5) 第七~十章基于泥沙运动的动理学理论对基本泥沙输移现象进行了分析。在这部分内容里,对传统泥沙研究中非常关心的床沙与运动泥沙的交换、颗粒的

推移、悬浮,以及挟沙水流的速度分布特征等基础性问题,应用两相流介观尺度的速度分布函数、宏观尺度的场方程作了较为深入的分析。这部分工作的价值在于帮助我们理解从颗粒的受力到颗粒体系的统计特性这样一个逻辑链条来理解挟沙水流表现出来的各种基本属性。显然,它们的定位在于从新的角度审视熟知的泥沙输移现象背后所隐藏的力学机制。需要说明的是,虽然未将注意力集中在近期泥沙研究中的新发展上,但这并不意味着我们发展的泥沙运动的动理学理论不适宜对更广泛的泥沙运动问题的研究。事实是,动理学理论具有解析微观力学特性与宏观统计规律的能力,我们有理由相信,在未来的研究中它能够对更广泛的泥沙输移现象的力学背景给出更深刻的解释。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金青年科学基金项目、面上项目、黄河研究联合基金项目、重点项目及创新研究群体项目(59525914、59879006、50209005、50339020、50979041、51039004、51379102)等的资助,使我们能够长期开展系统的基础研究工作。特别是国家自然科学基金重点项目(51039004)的资助,最终促成我们完成了本书的出版。同时要感谢学术界同仁们对我们自由探索的宽容,使我们有可能以全新的视角对泥沙运动问题提出新的诠释。

本书的研究成果是在一个较长时期内完成的,期间由于种种主客观原因不乏研究停滞不前、几近放弃的状态,深感基础研究工作的不易。我们要感谢清华大学水利水电工程系、水沙科学与水利水电工程国家重点实验室及河流研究所提供的宽松科研环境,使我们有可能长期开展基础性的研究工作。

借此机会还要特别感谢清华大学的王士强、王兴奎、王兆印、张红武、周建军、余锡平、邵学军、方红卫、李丹勋、傅旭东、孙其诚、李铁键等教授,北京大学的倪晋仁、李振山教授,武汉大学的詹义正、李义天、张小峰、曹志先、余明辉等教授,四川大学的刘兴年教授,河海大学的唐洪武教授,中国水利水电科学研究院的胡春宏院士、陈建国教授,黄河水利科学研究院的张俊华教授,长江科学院的卢金友教授,美国克拉克森大学的 W. M. Wu 教授,新加坡南洋理工大学的 N. S. Cheng 教授等对我们研究工作长期以来的关注和肯定,他们的有力支持对我们的研究不可或缺。

我们的研究生吴腾、胡德超、于涛、丁赟、申晓东、张艳艳、许仁义、姚中原、刘磊、范念念、张磊、费明龙、马良、李肖男、凌虹霞、李学明、黄海、马睿、贾望奇、贾宝真、陈雨晴、王彦君、韩铠御等,博士后秦杰、王永强、刘可晶等,以不同方式为本书的完成作出了大量贡献,对他们表示由衷的感谢。张磊同学完成了第七~十章所涉及的计算和分析工作,费明龙同学负责了书稿公式的校核工作,贾宝真同学承担了全书图表的制作和书稿公式及文字的编辑校核工作,在此对他们表示诚挚的感谢。

泥沙运动力学涵盖的内容极为深广，本书所谈及的问题不过是其十之一二，仅对泥沙运动的动理学理论框架及其核心应用作了最为基础的描述，而诸如水流的挟沙力、不平衡输沙、高含沙水流与泥石流、动床阻力、挟沙水流湍流理论与模型等应用问题则尚未触及，容待我们后续研究。此外，由于作者水平所限，书中难免存在粗疏与不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2014年9月8日于清华园

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 泥沙运动理论研究的范畴	1
1.2 泥沙运动理论研究的特点	4
1.3 泥沙运动理论研究存在的困难	5
1.4 泥沙研究的未来发展趋势	8
1.4.1 泥沙研究面临的新挑战	8
1.4.2 泥沙研究的未来发展趋势	10
参考文献	13
第二章 泥沙运动的经典理论研究概述	17
2.1 水流的流动	17
2.2 泥沙的沉降	19
2.3 床沙的起动	20
2.4 推移质泥沙的输移	23
2.5 悬移质泥沙的输移	24
参考文献	25
第三章 统计力学基础	29
3.1 描述物质运动的三个层次	29
3.2 微观状态与宏观过程的统计联系	31
3.2.1 概率的基本概念	31
3.2.2 系综的基本概念	32
3.3 统计分布函数的演化	34
3.3.1 颗粒的微观状态	34
3.3.2 Liouville 方程	36
参考文献	37
第四章 两相流的动理学方程	39
4.1 两相流微观动力学量的系综	39
4.1.1 两相流的示性函数	40

4.1.2 颗粒及颗粒所见流体物理属性的系综	44
4.2 两相流的动理学方程	48
4.3 颗粒间的相互作用	53
4.3.1 颗粒相互作用的统计力学描述	54
4.3.2 颗粒间的二体相互作用	56
4.4 颗粒速度分布函数的近似解	64
参考文献	69
第五章 挟沙水流的动力学方程	70
5.1 两相流动力学方程的一般形式	70
5.1.1 质量守恒方程	70
5.1.2 动量守恒方程	71
5.2 液相和固相上作用力的系综	72
5.2.1 一个重要积分	72
5.2.2 液相上作用力的系综	75
5.2.3 固相上作用力的系综	76
5.3 挟沙水流的守恒方程	80
5.3.1 挟沙水流相间作用力的一般形式	80
5.3.2 守恒方程的质量加权平均形式	82
参考文献	86
第六章 挟沙水流的两相浑水模型	88
6.1 挟沙水流的两相浑水方程	88
6.2 弥散速度的本构关系	92
6.3 弥散速度本构方程与其他理论比较	97
6.3.1 经典扩散理论	98
6.3.2 Hunt 的修正扩散模型	98
6.3.3 Wu 和 Wang 的两相扩散模型	99
6.3.4 Ishii 和 Hibiki 的漂移-通量模型	99
参考文献	100
第七章 明渠挟沙水流的速度分布	104
7.1 挟沙水流速度分布的两相浑水方程	104
7.2 明渠挟沙水流速度的垂线分布	107
7.2.1 两相浑水方程的紊流封闭	107
7.2.2 明渠挟沙水流速度垂线分布的规律	111
7.2.3 颗粒惯性对浑水速度分布的影响	127

7.3 明渠挟沙水流中泥沙速度的垂线分布	132
7.3.1 基于动理学理论的泥沙速度分布	132
7.3.2 基于两相浑水方程的泥沙速度分布	136
参考文献	140
第八章 床面泥沙通量与平衡浓度	144
8.1 床面泥沙通量的概念	144
8.2 床面泥沙通量	146
8.2.1 床面泥沙通量的动理学描述	146
8.2.2 床面附近运动泥沙的速度分布函数	147
8.2.3 床面泥沙通量函数	149
8.2.4 理论与实验的比较	152
8.3 床面泥沙平衡浓度	155
8.3.1 床面泥沙平衡浓度的动理学描述	155
8.3.2 理论与实验的比较	156
8.4 颗粒碰撞的影响	158
参考文献	160
第九章 推移质泥沙的输移	164
9.1 推移质泥沙的输移特征	164
9.2 推移质输沙函数	165
9.3 理论与实验及其他公式的比较	169
9.4 推移质层颗粒的浓度分布	173
9.5 颗粒碰撞的影响	174
参考文献	176
第十章 悬移质泥沙的输移	180
10.1 悬移质泥沙的弥散方程	180
10.2 悬移质泥沙浓度的垂线分布	182
10.2.1 悬移质浓度垂线分布公式	182
10.2.2 悬移质浓度垂线分布公式验证	184
10.3 泥沙的悬浮机理	188
10.3.1 影响颗粒悬浮的因素及作用机制	188
10.3.2 颗粒受力与宏观浓度分布规律之间的关系	194
10.4 颗粒惯性对泥沙悬浮的影响	198
10.4.1 惯性对扩散的影响	199
10.4.2 惯性对弥散的影响	200

10.4.3 惯性对通量的影响	202
10.5 扩散理论的适用条件	204
参考文献	207
附录 常用符号表	210
英文字母	210
希腊字母	212
上标	214
下标	214
特殊符号	214

第一章 绪 论

“迎之不见其首，随之不见其后。”语出《老子·第十四章》

泥沙运动涉及问题的时空尺度差异巨大，既可能是几何量级小至 10^{-6}m 泥沙颗粒的运动，也可能是几何量级大至 10^6m 的河流演变过程。同时，泥沙运动的载体——水流的紊流力学研究仍然存在大量尚未很好解决的难题，当水流中携带泥沙颗粒时，由于固液两相之间存在的相互作用更为复杂，使得水沙两相流动成为自然界最为复杂的物理过程之一。总体上看，泥沙运动的理论研究仍然不够完善。张瑞瑾教授曾感叹道，“与其称泥沙研究为科学，不如称其为艺术更贴切”，表达了他对泥沙运动的复杂性及其研究方法局限性的深刻认识。本章简要回顾了泥沙运动力学这门学科的理论体系特点，对学科存在的问题作了扼要评述，对学科发展前沿作了展望，可看作是对本书所述研究动机的一个详细介绍。

1.1 泥沙运动理论研究的范畴

首先简要介绍在泥沙运动力学这一学科中关于“泥沙”的定义。根据经典著作《泥沙运动力学》(钱宁和万兆惠, 1983), 泥沙定义为“在流体中运动或受水流、风力、波浪、冰川及重力作用移动后沉积下来的固体颗粒的碎屑。”泥沙的主要来源是岩石的风化作用，其形成机制主要分为机械分离作用和化学分解作用两个过程。在泥沙运动力学这个专业语境下所讨论的泥沙，其颗粒粒径大小涵盖小至微米的黏土颗粒，大至数米的漂石。由于本书仅仅关注泥沙进入河流、湖泊、海洋等水体后其运动的数学和力学描述，因此对于泥沙的来源、形成原因、泥沙物质组成的物理和化学性质不作详细讨论，对此有兴趣者可参见相关专著。

从定义看，泥沙颗粒就其运动状态而言，无非是运动(输移)和静止(沉积)两种状态。但由于水流流态的复杂性和水沙运动边界的多样性，泥沙颗粒的运动可以更为细致地划分为静止、起动、推移、悬浮四个典型状态。当然，由于水流流动的非恒定性及其边界的可动性，泥沙运动存在不同运动状态间的转换。大量的实验观察和理论研究表明，泥沙的运动具有如下特征：

(1) **多尺度性**。这里包含两个方面的含义。首先，自然界中泥沙颗粒粒径分

布范围非常宽的特征决定了泥沙运动的多尺度特征;其次,从颗粒的运动、河床上的沙波运动,河道的平面变化乃至整个河流的冲淤演变,完全是通过一个个泥沙颗粒的运动实现的,在物理机制上决定了泥沙输移在时间和空间上的多尺度特性。

(2) **多态性**。泥沙的运动表现为静止、起动、推移(包括滚动、滑动、跳跃或层移)、悬浮等运动形式,而不同运动形式的外力驱动机理、输移规律等根本不同。另外,不同的运动状态并非一成不变,而是随着驱动泥沙运动的外在因素的变化而相互转换。

(3) **随机性**。由于驱动泥沙运动的动力及其输移过程所依赖的边界特征在时间、空间上的随机性,导致泥沙运动过程的强烈随机特性。这一点早为泥沙研究者所注意到,而且泥沙研究所遇到的巨大障碍也与泥沙运动的随机性有密切关系。

泥沙运动的多尺度性、多态性、随机性这三大主要特征是泥沙在输移过程中表现出来的根本特性,也正是由于这三种性质的耦合,导致泥沙输移成为自然界中最为复杂的物理过程之一。

泥沙研究的内容也正是围绕着泥沙运动中表现出来的各种状态及现象背后的力学机理、输移规律展开的。就传统的泥沙运动力学而言,通常包含如下六个核心内容:

(1) **泥沙的物理属性**。主要关注泥沙的物质组成、来源、颗粒形态、粒径分布等。其中与泥沙输移动力学过程密切相关的是颗粒形态和粒径分布特征。前者影响了颗粒与水流作用时表现出来的时间弛豫特性(或沉降特性),后者是导致天然河流泥沙输移过程中泥沙分选的物质基础,如库区泥沙淤积导致的河床细化、水利水电枢纽下游的河床冲刷粗化、河床保护层的形成与破坏等。

(2) **泥沙的沉降特性**。主要关注泥沙在流体(在河流动力学中通常指水,而在风沙流中通常指空气)中在重力作用下的沉降速度,往往涉及颗粒形状、颗粒间相互影响、边壁影响等因素。近年来随着研究的细化,不少研究开始关注泥沙颗粒表面形成的生物膜等非物理因素造成的影响。泥沙沉降特性研究中的难点在于绕流边界层的阻力规律的复杂性,特别是颗粒 Reynolds 数较大、流动非层流,或绕流为层流至湍流过渡过程的阻力问题一直是泥沙研究的难题之一。

(3) **泥沙的起动**。静止于河床表面或陆地表面的泥沙颗粒在水流和风力等外力作用下,由静止转换为运动状态的过程称为泥沙的起动^①。其中至为重要的是颗粒处于将动未动的临界状态时的流体流动特征参数,如临界起动流速、临界 Shields 数等,是泥沙研究中的核心问题之一。其中最著名的是由 Shields 通过系

^① 这是个方便的说法。事实上泥沙颗粒的起动是典型的随机过程,并不存在一个特定的条件,使得泥沙颗粒由静止转入运动,而是平均来说大致存在一个临界条件,泥沙颗粒有较大概率起动。

列实验得到的 Shields 曲线(Shields, 1936)。

(4) 推移质泥沙的运动。粒径相对较大的泥沙颗粒,在流体达到其起动所要求的临界条件后,可能在床面附近区域以滚动、滑动、跳跃等方式运动,通常称为推移运动,而以这种方式运动的泥沙颗粒称为推移质(Einstein, 1950)。推移质泥沙运动研究的难点是如下两个原因造成的。首先,推移质也往往称为接触质,即在输移过程中会经历较长时间与床面接触的运动泥沙,而河床附近是明渠湍流紊动策源地,强烈的水流紊动和存在的拟序结构会对在河床附近运动的泥沙产生重要的影响,但目前对拟序结构与泥沙输移的相互作用机制的认识还不够深刻。其次,尽管推移质颗粒在床面附近受到强烈的湍流作用,但毕竟其粒径相对较大,其运动轨迹又具有一定的有序性,而这种有序性与湍流紊动带来的随机性的耦合机制和效应仍然是一个在探索中的难题。

(5) 悬移质泥沙的运动。对于那些颗粒相对较小,在流体作用下能够在水体范围内随水流悬浮运动的泥沙称为悬移质。传统上认为泥沙的悬浮是流体的紊动扩散与重力共同作用的结果(Rouse, 1937; Ni and Wang, 1991)。对于大多数冲积河流而言,所输移泥沙中悬移质往往占主导地位,因而也是造成河床冲淤及河流演变的主要物质基础和动力来源,因此在泥沙研究历史上占有重要的地位。悬移质泥沙输移的研究在诸多方面尚存在不少疑点(Chen et al., 2013),仍是目前泥沙研究的核心和热点之一,研究的关注点主要包括悬移质泥沙的悬浮机理问题、水流的挟沙力问题、非均匀悬移质泥沙的不平衡输沙问题、推移质-悬移质交换问题等。

(6) 挟沙水流的速度分布。挟沙水流是典型的边界层流动,质量、动量、能量的分布与传递受到边界的强烈影响,而其中流速的分布是研究边界层流动的核心问题(Cao et al., 1995)。与一般流体与固定边界构成的边界层流动不同的是,首先,挟沙水流边界层是在泥沙构成的可动河床边界上形成的,流体与边界间存在质量、动量及能量的交换;其次,构成挟沙水流的水和固体泥沙颗粒在自然状态下都是不可压缩的,但它们构成的浑水,由于泥沙浓度随上游来流含沙量及河床冲淤的变化而变化,其密度是变化的,从而在数学上表现为一种特殊的可压缩流体,导致了挟沙水流边界层流动的特殊性。

此外,泥沙运动力学还包括泥沙对紊流的调制作用(turbulence modulation, Best et al., 1997; Cao et al., 2003)、动床阻力、高含沙水流与泥石流、流域泥沙侵蚀及输移等诸多方面,但就泥沙运动力学的核心问题而言,主要研究范畴还是限于以上六个基本层面,其他问题可以看作是由它们派生而来。

1.2 泥沙运动理论研究的特点

20 世纪 50 年代, 武汉水利电力学院创建了河流力学及治河工程专业, 撰写了专业教材《河流动力学》(张瑞瑾等, 1961), 形成了完整和系统的人才培养体系, 与其他院校共同为我国培养了一批又一批的泥沙研究人才。20 世纪八九十年代, 钱宁和万兆惠的《泥沙运动力学》中文版和英文版专著的出版, 以及国内外学者一系列泥沙研究专著和教材的问世, 标志着泥沙运动力学研究形成了较为完整的学科体系, 为江河治理提供了较好的理论基础。代表性的著作还包括《泥沙运动学引论》(沙玉清, 1965)、*Sediment Transport in Alluvial Streams* (Bogárdi, 1974)、*Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems* (Garde and Ranga Raju, 1977)、《泥沙运动统计理论》(韩其为和何明民, 1984)、*Hydraulics of Sediment Transport* (Graf, 1984)、*Fluvial Processes in River Engineering* (Chang, 1988)、*River Mechanics* (Yalin, 1992)、*Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics* (Simons and Senturk, 1992)、*Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas* (van Rijn, 1993)、《浆体与粒状物料输送水力学》(费祥俊, 1994)、《黄河高含沙洪水模型的相似律》(张红武等, 1994)、《明渠挟沙水流运动的力学和统计规律》(胡春宏和惠遇甲, 1995)、*Erosion and Sedimentation* (Julien, 1995)、*Sediment Transport: Theory and Practice* (Yang, 1996)、*Loose Boundary Hydraulics* (Raudkivi, 1998)、《河流动力学概论》(邵学军和王兴奎, 2005)、《风沙两相流理论及其应用》(倪晋仁和李振山, 2006)、《流域泥沙动力学模型》(王光谦和李铁键, 2009)、《环境泥沙的表面特性与模型》(方红卫等, 2009)、《河流水沙生态综合管理》(王兆印等, 2014)、《黏性泥沙淤积固结特性》(谈广鸣等, 2014)等。另外, 泥沙研究一直受到测量理论与技术落后的困扰, 对关键过程的观测一直处于精度不高的状态。基于粒子图像识别理论与技术的挟沙水流观测设备的开发和应用, 不仅为室内实验观测提供了良好支持, 而且发现了许多泥沙输移中表现出来的细致结构与特征, 为进一步理解和认识泥沙输移的本质奠定了基础, 《粒子示踪测速技术原理与应用》是这方面研究的代表性工作(李丹勋等, 2012)。

泥沙运动力学的基础研究具有如下特点:

首先, 泥沙研究是从地貌学, 特别是河流地貌学中分离出来的一个专门学科, 其历史发展过程大致经历了地貌学中的沉积学、河流地貌学中的沉积与造床学这两个早期过程, 此后逐渐演变至水力学中的一个分支, 即冲积水力学(fluvial hydraulics), 最后随着国内外一系列经典专著、教材的发表而完全从水力学中分