

夏建新 吉祖稳 著

水沙环境学

*Water-sediment
Environment Dynamics*



海洋出版社

水 沙 环 境 学

夏建新 吉祖稳 著

内容简介

地球表面是人类生存和发展的物质空间。随着人类社会的发展,地表环境越来越成为人们关注的问题之一,尤其是地球表面“土圈”环境的变化,已成为环境演变研究关注的热点,而水沙输移是地表环境变化的根本原动力之一。

全书共分七章。第一章为概论,阐述了水沙环境学的研究理论和方法、存在的问题以及基本内容。第二介绍水沙运动基本理论。第三章到第七章,从水沙运动基本理论出发,分别介绍了以下内容:河流湖泊的环境演变,河口海岸带的环境变迁,土壤侵蚀的基本规律,山地环境灾害——泥石流,以及水沙环境变化过程模拟等。

本书对从事水利、地理、生态以及环境科学专业的研究人员及大学相关专业的师生皆具有参考价值,也可作为本科生、研究生的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

水沙环境学 / 夏建新, 吉祖稳著. —北京: 海洋出版社, 2004.8

ISBN 7-5027-6183-7

I. 水… II. ①夏… ②吉… III. 河流-含沙水流-泥沙运动-影响-环境-研究
IV. TV143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 088307 号

责任编辑: 屠 强

责任印制: 严国晋

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 10.5

字数: 254 千字 印数: 1~1000 册

定价: 28.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换



本著作获得以下基金资助

中央民族大学“211 工程”学术著作出版基金

中央民族大学“211 工程”建设项目基金

国家自然科学基金(批准号:50309019)

特此致谢

前 言

地球表面是人类生存和发展的物质空间。水沙输移是地表环境变化的根本原动力之一,也是陆地与海洋物质交换的基本途径。近十年来,由于地表植被的破坏,泥沙在水流的作用下大量流失,造成了严重的土地退化;泥沙进入河流和湖泊,又致使河床抬高、湖泊萎缩,调洪能力显著降低,造成洪水泛滥;被带到河口的泥沙量的变化又将造成河口海洋环境的变迁,对沿海地区经济发展产生重大影响。因此,系统地研究水沙运动与环境变化之间的作用已成为非常迫切的任务。

目前,尽管有关泥沙运动规律的书籍已有很多,如钱宁和万兆惠两位先生所著的《泥沙运动力学》、张瑞瑾先生主编的《河流泥沙动力学》,以及赵今声先生主编的《海岸河口动力学》、倪晋仁先生著的《河流动力地貌学》等,但是还缺少一本专门论述由于水沙运动而产生的地表环境变化及其引发的有关环境问题的著作。本书力图从水沙运动的基本理论出发,重点阐述水土流失,河流、湖泊形态的演变,河口与海岸带环境的变迁以及山地环境灾害——泥石流的运动规律。本书十分注重近几年水沙两相流最新研究成果的应用,并与生态学和环境科学交叉渗透、有机结合。

本书作者均为年轻的科技工作者,一直从事水沙环境方面的研究工作,基础扎实,思想活跃。其中第一作者主要从事水沙环境和多相流体动力学方面的研究工作,先后承担了国家“八五”、“九五”专项重点项目——海洋矿产资源开发,主持或参加国家自然科学基金项目、重大项目以及国家杰出青年基金项目等多项工作,发表论文 20 余篇。尤其是在北京大学博士后工作期间,得到了倪晋仁教授的悉心指导,在水沙运动理论方面有了更进一步的认识。第二作者主要从事河流动力学及水土保持方面的研究工作。先后承担了国家“八五”、“九五”攻关项目、国家自然科学基金重点项目及重大项目、国家“973”重大基础研究项目等 20 余项工作,发表论文近 40 篇,并曾分别获得过国家科技进步二等奖、水利部科技进步一等奖等多项奖项,具有较丰富的科研工作经验。

在本书写作的过程中,得到了许多前辈、老师和同志们的帮助和鼓励。其中,刘量自始至终给予了不懈的支持,参与了书稿的打印、作图和校稿的大量工作;中国水利水电科学研究院胡春宏教授给予了热情的鼓励和帮助,并对书稿提出了宝贵的意见;本书在编撰的过程中,得到了中央民族大学科技处的支持。在此,作者对他们表示衷心的感谢。本书是作者将多年研究成果系统化的一个初步尝试,由于经验不足和水平有限,书中还有不少谬误之处,恳请前辈和同行批评指正。

作者

2004 年 7 月

目 次

第 1 章 概论	(1)
1.1 水沙环境与人类活动	(1)
1.2 水沙环境学研究的理论及方法	(2)
1.2.1 连续介质理论	(2)
1.2.2 动理论	(3)
1.2.3 Euler-Lagrange 模型	(4)
1.2.4 颗粒流模型	(5)
1.2.5 结构两相流模型	(5)
1.3 水沙流基础研究中存在的主要问题	(6)
1.3.1 泥沙在湍流中的悬浮	(6)
1.3.2 颗粒的脉动特性	(6)
1.3.3 高浓度水沙两相流	(7)
1.4 水沙环境学的基本内容	(8)
参考文献	(9)
第 2 章 水沙运动基本理论	(12)
2.1 水流运动基本理论	(12)
2.1.1 水流运动基本方程	(13)
2.1.2 水流运动基本特性	(17)
2.2 泥沙运动基本理论	(20)
2.2.1 泥沙圈的概念与泥沙物理化学特性	(20)
2.2.2 单颗粒泥沙的运动特性	(21)
2.2.3 泥沙群体运动的基本特性	(23)
参考文献	(41)
第 3 章 河流湖泊环境	(44)
3.1 冲积河流地貌环境	(44)
3.1.1 河流历史环境变迁	(44)
3.1.2 河相关系	(45)
3.1.3 河漫滩	(47)
3.2 典型河流地貌环境特征及其演变的驱动机制	(48)
3.2.1 顺直型河流	(48)
3.2.2 弯曲型河流	(49)
3.2.3 分汊型河流	(51)
3.2.4 游荡型河流	(52)
3.3 河流地貌环境成因假说	(53)

3.3.1	地貌界限假说	(53)
3.3.2	能耗率极值原理	(53)
3.3.3	稳定性理论	(54)
3.3.4	随机理论	(55)
3.3.5	统计分析	(55)
3.4	湖泊环境演变	(56)
3.4.1	洞庭湖环境历史变迁	(56)
3.4.2	洞庭湖水沙环境变化	(57)
3.5	河流、湖泊湿地	(58)
3.5.1	湿地的主要功能	(58)
3.5.2	河流湿地系统	(59)
3.5.3	湖泊湿地系统	(62)
3.5.4	人工湿地系统	(63)
3.6	生态环境需水量	(63)
3.6.1	生态环境需水量的概念	(63)
3.6.2	河流生态需水量	(64)
	参考文献	(64)
第4章	河口海岸环境	(67)
4.1	河口潮汐与盐、淡水混合	(68)
4.1.1	河口潮汐	(68)
4.1.2	河口混合	(69)
4.2	河口泥沙运动	(71)
4.2.1	河口区泥沙特性	(71)
4.2.2	河口区泥沙运动基本方程	(72)
4.3	河口区地貌环境特征	(73)
4.3.1	河口最大浑浊带	(73)
4.3.2	拦门沙	(74)
4.3.3	三角洲	(77)
4.4	我国河口的环境问题	(80)
	参考文献	(82)
第5章	土壤侵蚀与水土保持	(83)
5.1	水力侵蚀	(83)
5.1.1	坡面产流过程	(83)
5.1.2	坡面土壤侵蚀过程	(86)
5.1.3	流域水力侵蚀产沙模式	(91)
5.1.4	流域水力侵蚀预测模型	(92)
5.2	风力侵蚀	(94)
5.2.1	近地风流速度场分布	(95)

5.2.2	沙粒在风力作用下的起动	(95)
5.2.3	沙粒在风力作用下的运动特性	(96)
5.2.4	植被条件对风蚀的影响	(101)
5.2.5	沙尘暴及其成因	(103)
5.3	水土保持	(105)
5.3.1	土壤性质与土壤侵蚀	(105)
5.3.2	水力侵蚀区水土保持	(106)
5.3.3	风力侵蚀区水土保持	(110)
	参考文献	(111)
第 6 章	山地环境灾害——泥石流	(114)
6.1	泥石流的基本特征	(114)
6.1.1	泥石流的分类	(114)
6.1.2	泥石流的沉积特征	(116)
6.1.3	泥石流的特殊现象	(118)
6.2	泥石流的形成	(119)
6.2.1	泥石流的形成条件	(119)
6.2.2	泥石流的起动	(120)
6.3	泥石流的运动特性	(121)
6.3.1	泥石流的流变特性	(121)
6.3.2	泥石流的运动速度	(122)
6.3.3	泥石流的浓度分布	(123)
6.4	泥石流沉积层理结构	(124)
6.4.1	结构两相流模型	(124)
6.4.2	泥石流运动 Lagrange 模型	(126)
6.4.3	颗粒沉积层理结构形成过程模拟	(127)
6.4.4	泥石流堆积不同层理结构的成因分析	(129)
6.5	泥石流的防治	(130)
	参考文献	(130)
第 7 章	水沙运动过程模拟	(133)
7.1	物理模拟	(133)
7.1.1	水沙运动模拟相似准则	(133)
7.1.2	物理模拟试验中有关问题	(136)
7.1.3	物理模型应用实例	(137)
7.2	数值模拟	(141)
7.2.1	二维水沙运动数值模拟	(141)
7.2.2	含粗颗粒固液两相流动 Lagrange 数值模拟	(145)
7.2.3	污染物在水流中的散布数值模拟	(151)
	参考文献	(154)

第1章 概 论

地球表面环境与水沙输移密切相关,如冲积平原的形成,河流、湖泊形态的演变,河口与海岸带的变迁,水库、湖泊与河口湿地的形成和演化,以及泥石流的发生等都是由于水沙运动所造成的。可以说,水沙运动是地球表面地貌环境变化的根本原动力之一。近几十年来,由于不合理地开发和利用自然资源,导致地表植被的破坏,泥沙在水流的作用下大量流失,造成了严重的土地退化;泥沙进入河流和湖泊,又致使河床抬高、湖泊萎缩,调洪行洪能力显著降低,造成洪水泛滥;被带到河口的泥沙量的变化又将造成河口海洋环境变迁,对沿海地区经济发展产生重大影响。因此,系统研究水沙运动与环境变化之间的作用已成为水利和环境工作者所面临的一项紧迫的任务。正是由于生产实践的需要,促使了水沙运动学和环境科学的交叉和有机结合,形成一门新的边缘科学——水沙环境学。

1.1 水沙环境与人类活动

地球表面是人类生存和发展的物质空间,而水沙环境的主要载体之一——河流与人类文明息息相关。泥沙在水流的作用下广泛沉积在河流中下游,形成冲积平原,随着泥沙沉积下来的有机质为农作物的生长提供了丰富的养料,从而人类得以丰衣足食,创造辉煌的文明。在人类发展的历史长河中,四大文明发源地都处在大江大河之畔。如我们常说的“黄河是中华民族的摇篮”,正是一个生动的写照。此外,世界其他三大古文明的发源莫不与河流相关,埃及文明发源于尼罗河流域,印度文明发源于印度河和恒河流域,古巴比伦文明发源于底格里斯河和幼发拉底河流域。即使在人类文明高度发展的今天,世界上许多大中城市均建在河流的两岸,如上海位于黄浦江和苏州河之畔,重庆、武汉和南京依傍长江,西宁、兰州、郑州和济南沿黄河。再如尼罗河畔的开罗,密西西比河边的新奥尔良和圣路易斯,泰晤士河上的伦敦,莱茵河上的波恩等。其主要原因有两点:一是河流为人类生存提供了淡水,二是河流形成的冲积平原和阶地为工农业生产和城市发展提供了空间。

在人类利用水沙资源的同时,水沙环境系统的失衡也带来了灾害,尤其是我国,泥沙灾害非常严重。我国水沙灾害一般表现在以下几个方面。

(1)水土流失。我国东北的南部以及长城以南、秦岭以北、西迄青海东部、东至海滨的广大黄河流域,都广布黄土。黄土质地均匀,粉砂含量占60%~70%,缺乏团粒结构,粒间的固结主要依赖硫酸钙质。这种硫酸钙质遇雨水淋溶极易溶解流失,加上黄土孔隙率高达40%,上下节理十分发育,抗蚀能力很差,水土流失严重。世界上含沙量最高的河流就是流经黄土区的黄河,黄河支流某些河段的最大含沙量达 $1\ 600\text{ kg/m}^3$ 。

(2)河床抬高,洪水威胁增大。水土流失的直接后果就是河床、湖底的抬升,行洪能力下降,洪水水位居高不下。如黄河开封段,河床高出两岸近7m。一旦河堤溃决,将给人民生命财产带来巨大威胁。洞庭湖由于泥沙的淤积,调蓄能力显著降低,尽管近几年洪水流量不是很大,但洪水水位一再攀升,年年都是“五十年一遇”的洪水水位。

(3)水库淤积。在流域中上游修建的水库可以改善航道,调节洪水,蓄水灌溉,并利用落差发电等。然而,泥沙在水库的淤积导致库容减小,日久淤废。如三门峡水库兴建后不久就被迫放弃蓄水,安装的水轮机组被拆迁,兴利指标大为降低。

(4)河口港湾淤积、堵塞。河流进入海洋以后,泥沙迅速沉降,在河口形成拦门沙,给航运造成困难。泥沙在港口的淤积将导致港口废弃,造成巨大的损失。

随着社会的发展,人类对水沙环境系统的干扰越来越严重,在某些方面已造成不良后果。由于人口和经济发展压力,许多不适于耕种的坡地也被开垦出来,造成大量的泥沙流失;由于对湖泊的围垦,导致湖泊水体面积大幅减小,调洪能力下降;对水资源的不合理利用,导致河流下游干涸,对生态环境造成不可弥补的损失等。如何更好地处理社会发展与水沙环境保护正是水沙环境学研究的焦点。

1.2 水沙环境学研究的理论及方法

水沙环境学是水沙两相流体动力学与环境学的交叉学科。水沙两相流基本理论和方法可应用在水沙环境学研究中,如连续介质理论、动理论、颗粒流理论以及固液两相流数学模型等^[1,2]。根据泥沙浓度的不同,可将水沙流分为低浓度水沙两相流和高浓度水沙两相流。近年来,颗粒流作为高浓度水沙两相流的特例,也被单独看作一种流动^[3]。针对不同的水沙流动的特点,已经发展出了许多理论和方法。下面将对这些理论和方法进行简要介绍。

1.2.1 连续介质理论

连续介质理论把流体中携带的固相散粒群体视作连续介质,首先假设流体介质和颗粒相是连续的并充满整个流场,然后液相和固相分别用对应的质量、动量和能量守恒方程描述,两相之间的相互作用由相间作用力耦合。这种描述方法也称欧拉方法,其特点是推导简单和易于进行数值计算,主要应用于低浓度的两相流。宏观的连续介质模型又有分流模型、单流体模型和双流体模型等。

(1)分流模型。对于分层流和管道中环状流等有着较固定分界面的两相流,可与单相流一样把各相假设为连续介质。各相的控制方程完全独立,只是两组方程的边界条件需要互相耦合。

(2)单流体模型。此模型也称扩散模型,它假设相互作用着的两相或两种组分构成一种新的物质(也称混合物)且连续充满整个流场,只要用一组针对此混合物的守恒方程就可求解。对混合物用一组混合流动参数描述,而每相的参数与混合参数之间用扩散方程联系。扩散理论要求分散的颗粒对水流结构有较小的影响,这意味着该理论只适用于尺寸和比重较小的颗粒。扩散理论的运用一般基于质量守恒和均匀紊流。应用紊动扩散理论研究固相颗粒相在流体中运动的机理,着眼点是颗粒相的运动,而不是某些颗粒运动。紊动扩散理论假定水流紊动扩散作用和颗粒重力作用达到平衡,并由此得到了 Rouse 公式^[4]。有关泥沙垂线分布的大部分公式均由该理论导出,为解决泥沙输移问题提供了一种有效的途径。

(3)双流体模型。此模型把两相流中的各相都分别假设为连续介质,它们同时充满整个流场。这样,即使在时刻 t 流场 $\vec{x}$ 处 k 相不存在,但在 $\vec{x}$ 处 k 相的平均密度 $\rho_k(\vec{x}, t)$ 也不可能为零。各相流动参数在相交界面上发生间断,通过相界面各相产生质量、动量和能量传

递。由于两相流中各相满足对应的质量、动量和能量守恒方程,这些守恒方程加上由各相物质自身所决定的本构方程就可组成封闭的方程组。求解整个方程组还需要给定初始条件、边界条件和相间界面的跳跃条件。相间界面的跳跃条件就是各相交界面处的质量、动量和能量平衡条件,也是两相之间的耦合条件。上述方程组是两相流瞬时局部的基本方程。像单相流的连续介质理论中对瞬时局部的 Navier-Stokes 方程取雷诺平均得出紊流方程一样,为了建立其两相流宏观平均变量所满足的平均方程,也需要采用不同的平均方法对两相流瞬时方法取平均。平均法多种多样,以体积平均法最为简洁直观。采用这一模型建立两相流方程组的有 Soo^[5]、Drew 和 Segel^[6],以及 Ishii^[7]等,他们的出发点基本上是一致的,只是在取平均的方式上不同。

对于具体的固液两相流问题,采用什么类别的连续介质模型要看两相物质的混合程度。如果两种物质混合得相当均匀,就可以把两者的混合物等效为一种新的物质,然后运用单流体模型去分析计算。如果两相物质混合的均匀程度不大,而且混合特征随时间变化很大,就要采用双流体模型。如果两相物质界面很明显,那就采用分流模型。宏观连续介质理论的建立为解决江河泥沙输移、浆体管道输送等两相流工程应用问题奠定了基础。

1.2.2 动理论

尽管在固液两相流研究中连续介质理论仍是多数研究的基本出发点,但实际上该理论在描述固相时往往会有不确切之处。例如,当在水流中泥沙颗粒浓度较小时,泥沙颗粒还没有多到可以维持“连续”;而当泥沙颗粒众多以至于形成“高浓度固液两相流”(一般按颗粒体积浓度大于 20% 计),并近似于“连续”时,颗粒间的相互作用已成为运动的主要机制,但这时基于连续介质假设的诸理论却不足以描述复杂的颗粒-颗粒作用了。

事实上,由于高浓度固液两相流问题十分复杂,过去大多数研究都是通过修正低浓度固液两相流理论或方法得出高浓度固液两相流的结论。尽管对各类实测结果确实可以通过修正低浓度固液两相流来达到基本相符,但是从原理上讲这类修正不可能触及本质,因而至多是表面看来合理而已。当颗粒浓度足够高时,问题已由液相紊动特性决定的运动转向了由固相粒间作用的方面,这已经在本质上产生了变化,已从流体力学描述的对象转向了颗粒流体力学描述的对象。因此,必须采用合适的理论进行描述,而适合于描述单个颗粒运动及颗粒间作用的微观动理论可能是较合适的方法之一。

动理论从微观的角度出发,考虑颗粒(气体分子或固体颗粒)的随机运动特征,在探求颗粒的浓度分布特征后,它们的宏观统计平均特征也因此而得出。一般来说,气体分子和固体颗粒之间的主要差别在于^[8,9]:①气体分子有热运动,它们的温度与其动能直接相关,而固体颗粒不能靠自身的温度而维持运动,温度与动能没有直接联系;②气体分子均是弹性球体,在碰撞过程中能量损失可忽略不计,而固体颗粒运动却不是这样;③固体颗粒一般比气体分子大数个数量级,因此它们自身的体积不能被忽略。在动理论中,将固体颗粒均视为相同的球体,重点探讨如何将动理论运用于描述固液两相流,尤其是在理论上较薄弱的高浓度固液两相流。

两相流的微观动理论研究始于 20 世纪 60 年代。研究的对象包括单个固体颗粒和气体分子。动理论首先应用在气固两相流中,把颗粒作为考察对象,以 Boltzmann 方程描述颗粒

的运动特性,即求解颗粒分布函数。颗粒分布函数 $f=f(x_i, v_i, t)$ 是颗粒空间位置 x_i 、颗粒随机速度 v_i 和时间 t 的函数,其意义为:空间位置 x_i 处体积元 dx_i 内,落在速度 $v_i \sim v_i + dv_i$ 变化范围内的固相颗粒数为 $dn = f(x_i, v_i, t) dx_i dv_i$, 式中 $dx_i = dx_1 dx_2 dx_3$, $dv_i = dv_1 dv_2 dv_3$, dn 为体积元内总的颗粒数。颗粒分布函数由 Boltzmann 方程^[10]决定。

由于两相流的复杂性,以及这种“分子”描述在数学上的难度,单用动理论解决实际问题几乎是不可能的。因此,在特定的条件下,将连续介质理论和动理论二者结合或许能够解决一些难题。这就是将固相颗粒类比“气体分子”采用“分子”描述,而对液相或气相仍采用连续介质理论描述,二相之间用液相对固相的作用力来耦合。进行这方面尝试的学者有 Marble^[11]、Culick^[12] 和 Pai^[13,14]。Ishii^[7] 将动理论作为一个统计平均方法运用于连续介质理论中,实际上在两相流的研究中,动理论绝非简单的统计平均方法。作为一个从微观特征入手的方法,它可对两相的流动作出细致的描述。20 世纪 80 年代以来,两相流的动理论得到了进一步的发展。Savage 和 Jeffrey^[15] 首先明确用分子运动论的方法来研究颗粒流的碰撞应力张量,他们假定颗粒为大小均匀、表面光滑的圆球,单颗粒的速度分布函数用 Maxwell 分布函数近似,然后对碰撞传递量进行积分求得颗粒的运动特征量,如碰撞应力张量、碰撞能力传递机耗散率等。进入 90 年代,王光谦和倪晋仁^[16~18] 把动理论引入固液两相流研究中,获得了颗粒浓度分布和颗粒脉动的一系列特征。

1.2.3 Euler-Lagrange 模型

随着对固液两相流研究的深入,人们意识到固相颗粒离散性和颗粒碰撞的重要性。为了更好地研究颗粒的运动特征,人们把固相颗粒从混合物中分离出来作为单独的一相。一般来说,液相的流动用 Euler 法求解,固相颗粒采用 Lagrange 法来研究,跟踪一定的流场中所有颗粒在各个时间段的轨迹并记录它们的位置和速度。固液两相用相间作用力来耦合。因此,该方法实际上是 Euler-Lagrange(E-L)的混合方法。这是一种独特的模型,它的特点是着眼于单个粒子,每个计算颗粒具有各不相同的几何尺寸和运动特性,然后通过抽样技术获得颗粒群体的宏观特征。

Lagrange 方法是确定性的方法,由于需要跟踪每个颗粒的运动轨迹,必须考虑每个颗粒的受力以及颗粒间相互作用,计算量巨大。因此,这一模型处理高浓度的两相流问题非常困难,而处理粗颗粒稀疏悬浮流非常适合。随着计算机性能的提高,Euler-Lagrange 方法得到了广泛的应用。Asakura^[19] 利用该方法研究了垂直上升流中颗粒的运动特性,成功地模拟了颗粒在上升流中形成的分层现象。Sommerfeld^[20] 和 Oesterle^[21] 分别分析了气固流中颗粒与管壁以及颗粒之间的相互作用,对输送过程中的压力损失和颗粒浓度分布进行了详尽的研究,获得了相当满意的成果。

由于 Lagrange 方法要求对所有的颗粒进行操作,一般计算机很难满足要求,许多学者引入了 Monte Carlo 方法考察颗粒之间的相互作用^[22,23]。该方法克服了拉格朗日方法采用确定论判断数目巨大的颗粒间的碰撞所引起的计算量大的缺点,利用概率论判断颗粒间碰撞,其基本思想是:将流体混合物按空间划分单元,并假定只有在同一个单元内的颗粒才可能发生相互作用,发生碰撞的颗粒由碰撞概率确定,颗粒碰撞仅在两颗粒之间进行,碰撞后的颗粒速度和位置由碰撞动力方程计算,没有碰撞的颗粒的速度和位置由受力条件决定。

Monte Carlo 方法利用概率论处理颗粒之间的相互作用从而大大提高了计算效率,但该方法的颗粒碰撞基于硬球模型,与气体分子运动论类似,须采用混沌假设,即颗粒互不相关和二体碰撞。但这种处理方式对高浓度的颗粒流可能不合适^[23]。

1.2.4 颗粒流模型

颗粒流是大量散体颗粒的剪切流动,是一种颗粒碰撞占优势的固液两相流。颗粒流理论首先从微观角度考虑颗粒的随机运动和颗粒间的碰撞作用,然后通过各种统计平均方法进一步求得颗粒流动的诸宏观特征量^[22]。颗粒流模型在河床推移质运动、泥石流运动等浓度较高的水沙运动研究中应用较多。

近 20 年来,颗粒流的实验研究、理论研究和数值模拟都获得很大的发展。Savage 和 Jeffrey^[15]首先明确地在颗粒流动研究中引入分子运动学理论,然后在实验和理论分析的基础上,研究了快速颗粒流^[24,25]和慢速高浓度颗粒流^[26]的颗粒流动机理。后来,Savage^[27]又研究了两组分的混合颗粒流,对明槽流中颗粒分选过程给出了理论上的解释。Compbell 和 Brennen^[28~30]最早直接用计算模拟颗粒流中的颗粒随机运动和碰撞传递过程,当颗粒经历过多次碰撞后,对颗粒的诸运动特征量进行统计平均,可得颗粒流的速度分布函数、平均速度和浓度分布等参量。

为了解决实际工程问题,Savage^[31,32]将颗粒流中的颗粒流动机理引入到数值计算中,运用 Particle-In-Cell(标记格子法)和 Finite Difference(有限差分法)耦合的数值模型来模拟冰区边缘的冰-水相互作用,模型中冰块的运动用颗粒流理论来描述。

1.2.5 结构两相流模型

结构两相流模型是倪晋仁等^[33,34]在泥石流研究中提出的,其主要思想类似于 Wasp 提出的“两相载体”的概念,即将固液两相流系统中的液体和黏性细颗粒组成的浆体作为液相载体,非黏性粗颗粒为固相。固液两相流系统中的作用可归结为固液相间的作用力和颗粒间的相互作用力。固液两相分别由各自一组控制方程描述,固液两相之间用相间作用力来耦合。固相的临界颗粒粒径界限可以根据固液两相流的运动机理和液相组成特征给出。

结构两相流模型的提出为解决泥石流这一具体问题提供了有效的途径。根据泥石流的特点可分为泥流、水石流和泥石流。针对不同的泥石流类型,相应地选择液相本构方程(如牛顿流体、宾汉流体或黏塑性流体等),固相可使用颗粒流动的本构模型处理,得到颗粒相的宏观特征参数,也可采用 Lagrange 模型或动理论处理颗粒相,从而获得更为详尽的微观信息。倪晋仁等^[33,34]把结构两相流模型应用在简化条件下的泥石流,对泥石流的某些特殊现象(如速度分布“反 S”形、浓度分布“上大下小”的反常现象)给出了理论解释。曲铁众^[35]也把结构两相流模型应用在颗粒碰撞比较强烈的水石流中,然后在此基础上考虑颗粒垂向分选,获得了水石流中各级配颗粒的分选特征。

严格地说,该模型不能单独算作一种新的理论和方法,它是连续介质理论、Euler-Lagrange 模型和动理论的有机结合的产物。结构两相流模型是针对复杂问题而提出的高度概化模型,为以后解决类似的问题提供了可供参考的范例,具有十分广阔的应用前景。

1.3 水沙流基础研究中存在的主要问题

尽管已发展出了多种解决水沙两相流问题的理论和方法,但是在一些基本问题方面还有必要进一步开展工作。例如,泥沙在湍流中的悬浮力学机制,颗粒与流体脉动的响应,紊流猝发对泥沙启动的机理,以及高浓度颗粒流动的本构关系等。深入了解这些问题对水沙两相流研究具有重要意义。

1.3.1 泥沙在湍流中的悬浮

在天然河流中,由于重力和流体紊动的作用,泥沙在湍流中维持悬浮状态,沿垂线呈上小下大的非均匀分布,但泥沙与流体相互作用的机理一直是争论的焦点^[36~38]。目前已有多种理论阐述这一问题,主要有扩散理论^[4]、两相流理论^[39,40]、随机理论^[41]和湍流猝发理论^[42,43]。

倪晋仁等^[44,45]通过修正颗粒扩散系数 ϵ_s ,引入颗粒垂向运动的特征长度 L (通常指所谓的颗粒平均自由程),或者相应的特征时间的表达式,统一了所有以扩散理论为基础的泥沙垂线分布公式。尽管扩散理论的应用获得了成功,但由于该理论没有给出悬浮颗粒运动的动力学解释,为了能更深入地探讨悬浮颗粒的机理,许多学者致力于寻找更为普遍的理论^[46]。其中,湍流猝发理论是近几年发展较快的理论之一。

湍流猝发理论把湍流猝发作为泥沙悬浮的直接原因^[42,43]。大量实验证实,在湍流近壁区存在低速流体的喷射和高速流体的清扫所构成的准周期性的猝发现象。在光滑床面上,颗粒有向相干结构低速流带聚集的趋势,之后随着低速条带的抬升,颗粒从床面上被抬起并被低动量的流体携带喷射而离开床面。由流体边界产生的猝发使得泥沙在垂向获取向上的动量增加,利用湍流猝发持续时间和猝发强度可构造悬沙湍流扩散模式。较细的颗粒随马蹄形涡的发展迅速上升,较粗、较重的泥沙颗粒的悬浮则需要持续时间更长、能量更大的湍流猝发作用与之相适应。钟德钰^[43]利用湍流猝发理论分析了冲泻质的悬浮机制,在分析了喷射期和清扫期流体对颗粒的拖曳力后得到湍流猝发对颗粒的平均升力效应为

$$F_b = \frac{27}{16} \sqrt{2} \pi \rho_f \nu d^2 (1 - \epsilon) \psi \frac{\sigma_f}{y} \quad (1-1)$$

上式中: ρ_f 为流体的密度; d 为颗粒直径; ν 为流体运动黏滞系数; σ_f 为垂向瞬时流速分布的方差; ϵ 为猝发过程中颗粒垂向瞬时速度和流体垂向瞬时速度的比值; y 为颗粒距床面的

距离; $\psi = 1 + \frac{\sqrt{2}}{18} \Gamma\left(\frac{1}{3}\right) \frac{1-\epsilon}{\nu} d \sigma_f^{2/3}$, $\Gamma\left(\frac{1}{3}\right) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{-2/3} dt$ 。

上述理论从不同的角度对紊流中的颗粒悬浮给出了不同的理解。每种理论都有利有弊,并都得到一个相应的颗粒垂线分布公式。然而从这些存在的理论可以发现,尽管采用不同的理论和数学处理,最后都得到或接近按扩散方程所得到的结构形式,主要的差别是扩散系数的表达有所不同。

1.3.2 颗粒的脉动特性

颗粒的脉动特性反映了颗粒与流体相互作用的机理,是固液两相流研究中的又一大难

点。近年来,随着测量技术的发展,这方面的实验资料越来越丰富,更利于揭示颗粒在流体中运动的机理。

刘青泉^[47]比较了颗粒和流体垂向脉动速度分布的实验结果后发现,在壁面附近,颗粒相的垂向脉动强度大于流体相;除壁面附近较小范围外,在大部分流动区域,颗粒相的垂向脉动强度均较流体相小;与纵向脉动速度相比,两相的垂向脉动强度都小于纵向的脉动强度,越靠近壁面,差别越大;但在管中心附近,二者基本接近一致。

李丹勋^[48]从简化的颗粒运动方程出发,分析了颗粒脉动强度和流体脉动强度之间的关系。结果表明,由于纵向时均速度的垂线分布梯度的作用,颗粒在两个方向上的脉动强度均可能超过相应的流体脉动强度。

刘大有^[49]研究了竖直接管流中玻璃珠的脉动特性以及浓度分布,并利用两相流理论得到了 $n_s \overline{v_s'^2} = \text{const}$ 的结果。

尽管获得的有关颗粒脉动速度的资料非常丰富,但是从理论上没有获得颗粒在流体中脉动速度的变化规律,一方面由于颗粒的脉动影响因素很多,另一方面也由于颗粒脉动属于颗粒微观运动特性,利用传统的连续介质理论难以入手。但是,动理论的发展为解决这一难题提供了可能。

1.3.3 高浓度水沙两相流

高浓度水沙两相流与一般的水沙两相流有着很大的区别。一方面,高浓度水沙两相流中的固相颗粒数量很大,除了考虑水沙两相的相互关系,还要关心颗粒群体之间不可忽略的相互作用;另一方面,固相颗粒对两相流系统的影响非常大,甚至超过液相流体的作用。当固相颗粒浓度很小时,液相流体的流动特征基本不受影响;当固相颗粒浓度继续增加后,液相流体的本身黏性、流动结构和速度分布将受到显著的影响;当固相颗粒浓度增加到一定程度时,固液两相之间的相互作用对两相流系统的影响就会减小,代之以固相颗粒之间的相互作用。

高浓度固液两相流研究的难点之一即是固相颗粒之间的相互作用。颗粒之间的相互作用有多种:静态的压力、Coulomb 摩擦力、碰撞作用力和弥散作用力。颗粒之间各种力的消长主要取决于颗粒群体运动状态、颗粒群体应变率和颗粒浓度。

当颗粒群体应变率为零时,即颗粒群体处于静止或准静止状态或者颗粒之间的相对速度基本上为零,颗粒只受到来自其他颗粒由于重力产生的持续性压力,颗粒重力通过颗粒之间的接触将作用力传递到边界;当两相混合物应变率慢慢增加时,颗粒运动较慢,颗粒浓度还很高,颗粒之间产生相对移动和转动,其主要作用是 Coulomb 摩擦力作用。该力是半持续性力,即对于一个颗粒有时受到摩擦力的作用,有时没有。颗粒之间的摩擦力作用与颗粒之间的相对速度无关,摩擦力系数主要由材料性质决定;当颗粒群体应变率增加到较大时,颗粒速度也较大,颗粒需要较大的获得空间,这时颗粒群体积膨胀,颗粒浓度降低,粒间的碰撞作用占主导地位,颗粒之间以及颗粒和边界之间产生动量和能量交换,由此产生的应力叫做离散应力或碰撞应力。值得指出的是,颗粒之间的离散力最终将传递到床面上。

目前,考察颗粒之间碰撞过程的所有理论模型都作了大量的假定,所得出结果的应用范围大受限制。目前,有关水沙两相流中颗粒流动的应力关系大部分来自对实验资料的总结。

Bagnold^[50]最早进行了同心圆筒间中性悬浮粗颗粒的剪切试验。试验中所选的粗颗粒为石蜡制成的小圆球。试验时将均匀圆球和与之比重相同的液体所组成的稳定悬浮体放入转筒式黏度仪中,量测不同的剪切率下所产生的剪力。转筒仪中内筒的一部分用薄膜代替,这样,如果悬浮体在作剪切运动中的确产生粒间离散应力,则内筒壁上的薄膜就会变形,变形的程度和离散力的大小成正比。Bagnold用此种方法测出了颗粒剪切力和粒间离散力。从Bagnold的试验结果可以看出,正如颗粒沉降时所承受的阻力一样,随着剪切率的增加,颗粒剪切力与粒间离散力也经历以黏性作用为主和以惯性作用为主的两个阶段。

Bagnold开创性的工作为高浓度颗粒流动应力研究奠定了基础,此后 Savage 和 Mckeown^[51]、Savage 和 Sayed^[25]以及 Hanes 和 Inmann^[52]在空气和液体介质中进行的类似实验都在一定程度上支持 Bagnold 的结论。所有这些实验共同揭示了在充分高的浓度和高剪切速率的流动条件下,颗粒间的动量传递是由于碰撞作用而不是持续的接触摩擦或其间流体的作用。但在低剪切速率和低浓度的流动条件下,摩擦应力、滑动应力和碰撞应力则都可能存在。

在了解了固液两相流中颗粒流动的应力关系后,便可利用现有理论方法解决有关高浓度两相流的许多问题,如泥石流的流速分布、颗粒流动的垂向分选等。

1.4 水沙环境学的基本内容

作为一门新兴学科,水沙环境学有许多问题有待进一步深入研究,所涉及的某些领域目前尚未开拓。在本书中,仅就一些基本内容进行探讨。本书中的章节安排如下:

(1)水沙运动基本理论。水沙运动基本理论是水沙环境学研究的基础。水沙运动理论包括水流运动理论和泥沙运动基本理论。在简要介绍基本理论的同时,对水沙运动基础研究中存在的主要问题进行了阐述。

(2)河流湖泊环境。河流湖泊环境的变迁是水沙运动的结果,也是水沙环境学研究中的主要内容。本章介绍了四种典型河流地貌环境及其演变驱动机制。同时,对湖泊的水沙运动以及演变规律进行了分析。此外,介绍了湿地环境以及生态需水量的最新研究进展。

(3)河口海岸环境。河口海岸是水沙环境变化较剧烈的区域,也是工农业比较发达的区域。在介绍了河口淡盐水混合机理的同时,还探讨了河口地貌环境的变迁。

(4)土壤侵蚀与水土流失。土壤侵蚀是地表水沙运动的直接结果,本章介绍了两种基本土壤侵蚀类型(即水力侵蚀和风力侵蚀)及其最新的研究成果。同时,还分析了水土保持措施。

(5)山地环境灾害——泥石流。泥石流是山地一种常见的自然现象,对山地环境有非常不利的影响。本章着重分析了泥石流的形成和基本特征,并介绍了泥石流防治的几种措施。

(6)水沙环境变化模拟。水沙环境变化模拟包括物理模拟和数值模拟,是研究、分析水沙运动的常用方法。在介绍数值模拟基本方程的同时,给出了数值模拟的应用实例,对水沙运动进行仿真模拟。

水沙环境学研究还在进一步发展中,未来可能的发展趋势有以下几个方面:①泥沙运动在污染物迁移和河流自净化中的作用。研究清楚泥沙在污染物迁移和归宿中的作用及所吸附的污染物与水的相互作用是控制污染、发展水环境科学的重要课题之一;②湿地的水文、

泥沙、生态学模拟。维持湿地的功能对生态环境具有重大意义,因此湿地水沙环境的研究将是一个重要方面;③荒漠化及风沙运动力学。荒漠化趋势的发展已使风沙运动力学的研究刻不容缓。风沙研究的宏观方面着眼于整体结构,包括风沙层内气流速度、颗粒浓度、输沙通量等物理量的分布,风沙地貌演变以及风沙对道路和建筑物的侵蚀。微观方面着眼于风沙流中单个颗粒的运动状态。与河流泥沙运动和河床演变相比,风沙和沙漠地貌演变的研究水平较低,亟待加强;④泥沙灾害与资源化。泥沙灾害学的进一步完善使水沙环境学研究上升到一个新的层次,同时,灾害学的另一面,即泥沙资源化也日益受到重视。

参考文献

- [1] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社,1983
- [2] 钱宁. 高含沙水流运动. 北京: 清华大学出版社,1989
- [3] 倪晋仁,王光谦,张红武,等. 固液两相流基本理论及其最新应用. 北京: 科学出版社,1991
- [4] Rouse H. Modern conceptions of the mechanics of turbulence. Trans. ASCE, 1937,102:436-507
- [5] Soo S L. Fluid dynamics of multiphase systems, Blaisdell Publishing Co. Waltham, 1967
- [6] Drew D A and Segel L A. Averaged equations for two-phase flows, Studies in Applied Math., 1971,50(3)
- [7] Ishii M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow, Eyrolles, Paris, 1975
- [8] 倪晋仁,王光谦. 高浓度恒定固液两相流运动机理探析: I. 理论. 水利学报, 2000(5):22~26
- [9] 倪晋仁,王光谦. 高浓度恒定固液两相流运动机理探析: II. 应用. 水利学报, 2000(5):27~32
- [10] Chapman S and Cowling T G. The Mathematical Theory of Non-uniform Gases, 3rd Ed. Cambridge University Press, Cambridge, England, 1970
- [11] Marble F E. Dynamics of a gas containing small solid particles. Proc., 5th AGARD Combustion and Propulsion Colloquium. 1963, 175-215
- [12] Culick F. Boltzmann equation to a problem of two-phase flow. Phys. Fluids, 1964,7, 1 898~1 904
- [13] Pai S I. Fundamental equations of a mixture of a gas and small spherical solid particles from kinetic theory. J. Math. Phys. Sci., 1971,8, 1-15
- [14] Pai S I. Two-phase flow, Viewed tracts in pure and applied physics. R. Oswatitsch, ed., 1977,3, Vieweg, Brunswick, Germany
- [15] Savage S B and Jeffery D J. The stress tensor in a granular flow at high shear rates. J. Fluid Mech., 1981,110, 255-272
- [16] Wang G Q and Ni J R. Kinetic theory for particle concentration distribution in two-phase flows. J. Engng. Mech., ASCE, 1990,116(12):2 738-2 748
- [17] Wang G Q and Ni J R. The kinetic theory for dilute solid-liquid two-phase flow. Int. J. Multiphase Flow, 1991,17(2):273-281
- [18] Ni J R, Wang G Q and Borthwick A G L. The kinetic theory for vertical profile of particle concentration in dilute and dense solid-liquid flows. J. Hydr. Engng., ASCE, 2000,126(12):893-903
- [19] Asakura K, Asari T and Nakajima I. Simulation of upward solid-liquid flows in a vertical pipe. Shigen-to-Sozai, 1994, 110, 973-979
- [20] Sommerfeld M. Modeling of particle-wall collisions in confined gas-particle flows. J. Multiphase Flow, 1992, 18(6):905-926
- [21] Oeserle B and Petitjean A. Simulation of particle-to-particle interactions in gas-solid flows. Int. J. Multiphase Flow, 1993,19(1):199-211