



# 江河泥沙灾害

形成机理及其防治

倪晋仁 王兆印 王光谦 等著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 江河泥沙灾害形成 机理及其防治

倪晋仁 王兆印 王光谦 等著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

泥沙运动已成为近年来加剧江河洪灾的根本原因之一。本书以泥沙运动过程为主线,探讨了江河泥沙灾害的特征及其形成规律,提出了江河泥沙灾害的评估、预测及相应的防治理论和方法。全书共分为八章:第一章为流域产沙过程与泥沙灾害致灾因子;第二章为河流水沙运动与泥沙灾害特征;第三章为河口海岸水沙运动与泥沙灾害过程特征;第四章为流域泥沙灾害特征及成因分析;第五章为江河泥沙灾害的评估;第六章为泥沙灾害预测;第七章为泥沙灾害的生态环境效应;第八章为泥沙灾害的防治与综合管理。

本书可供从事水利学、水土保持学、灾害学、环境学和地理学的科研人员及大专院校有关专业的教师和研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

江河泥沙灾害形成机理及其防治/倪晋仁等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020633-6

I. 江… II. 倪… III. 河流泥沙-自然灾害-研究 IV. TV14

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第072928号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 刘卓澄/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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

\*

2008年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2008年6月第一次印刷 印张:43 1/4

印数:1—2 000 字数:1 009 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

# 前 言

从五千年前大禹治水起，我国人民就一直在与江河洪水灾害进行着不懈的斗争，并逐渐掌握了洪水灾害发生的规律及相应的防治措施。然而，随着人类社会的不断发展，尤其是 20 世纪末以来，江河洪水灾害的特征发生了显著的变化。与以往较大的洪灾主要由大洪水引发不同，现在即使是流量较小的洪水也可能引发较大的洪灾。导致这一现象的直接原因是泥沙在河道中的加速淤积，情节严重时甚至可能造成河流堵塞，并由此加重洪水灾害发生的潜在风险。例如，2008 年 5 月 12 日在我国发生的汶川大地震导致了山体滑坡等突发性泥沙灾害并形成了系列堰塞湖，直接威胁下游数百万人的生命安全。“小水大灾”现象，表面上是以洪水灾害这一次生灾害的形式出现，而实际上原生灾害却是泥沙灾害。如果不能很好地了解泥沙灾害形成的机理和特征，也就无法深刻理解新时期洪水灾害的特殊表现，从而难以提出有效的灾害防治措施。

江河泥沙灾害因泥沙运动引起，而有效地进行泥沙灾害防治的基础是把握泥沙在流域系统中的运动规律。为此，国家自然科学基金委员会与水利部联合资助了重大基金项目“江河泥沙灾害形成机理及其防治研究”。项目以泥沙在流域系统中的运动为线索，以江河泥沙灾害为研究对象，以流域中各类典型泥沙灾害成因及其内在规律的研究为基础，揭示泥沙运动对江河洪水灾害特性和江河洪水调节能力的影响机理，探索江河泥沙灾害及洪水灾害的防治方法与措施。整个项目分为六个课题：①流域系统中泥沙产生与致灾机理研究；②流域泥沙灾害过程规律研究；③泥沙运动对江河洪水灾害特性的影响机理；④泥沙运动对江河洪水调节能力的影响机理；⑤江河泥沙灾害防治理论与方法；⑥泥沙灾害预测数学模型及可视化理论研究。

在基金委和水利部以及众多专家的支持下，通过 5 年的努力，顺利完成了项目预期的研究目标，在基础理论和工程应用等方面都取得了一定的进展。在理论上，初步构建了泥沙灾害学的理论体系，深入揭示了非恒定水流输沙过程；在方法上，建立了河网神经网络水沙数学模型，提出了分洪区洪水风险预测方法和泥沙灾害的快速评估方法；在应用上，提出了利用水库调节减缓库区及其下游河道泥沙淤积的措施，对黄河下游挖河固堤效果有了初步认识。

本书是基金项目研究成果的集成，全书共包括 8 章。在绪言中概要介绍了我国江河泥沙灾害的特点及国内外的研究现状，主要由倪晋仁完成；第一章介绍了泥沙在流域的产生过程及相应的致灾因子，主要由金德生、卢金发、陈浩、师长兴完成；第二章介绍了洪水与泥沙运动之间的关系以及河流泥沙灾害的特征，主要由王兆印、刘成、李义天完成；第三章介绍了河口海岸带的泥沙运动及其导致的灾害特征，主要由王兆印、刘成、白玉川完成；第四章介绍了流域泥沙灾害的分布、特征及其成因，主要由金德生、曹叔尤、许炯心、刘兴年、张欧阳、何文社、彭清娥、袁宝印完成；第五章介绍了江河泥沙灾害的风险评估、经济损失评估及生态评估的方法，主要由倪晋仁、薛安、韩鹏完

成；第六章介绍了泥沙灾害预测的数学及物理模型，主要由王光谦、夏军强完成；第七章介绍了泥沙灾害与生态环境间的相应关系，主要由李义天、邓金运完成；第八章介绍了流域、河道及河口泥沙灾害的防治措施，主要由张红武、张俊华、姚文艺完成。全书由倪晋仁、韩鹏统稿中国科学院生态研究中心陆中臣研究员审阅了各个章节的内容，并提出了宝贵的意见，在此特致谢忱！

江河泥沙灾害研究涉及灾害学、水利学、环境学、地理学等多学科的内容。作者的研究尚属初步探索，谬误之处在所难免，敬请读者不吝赐教。



# 目 录

前言	
绪论	1
参考文献	8
第一章 流域产沙过程与泥沙灾害致灾因子	9
第一节 流域产沙与地貌特征	9
第二节 坡沟侵蚀与流域的产沙机理	27
第三节 流域泥沙灾害孕灾环境分析	52
参考文献	76
第二章 河流水沙运动与泥沙灾害特征	80
第一节 洪水与泥沙运动的相互影响	80
第二节 高含沙洪水的河床演变与输沙	112
第三节 泥沙冲淤对调蓄能力的影响	159
参考文献	183
第三章 河口海岸水沙运动与泥沙灾害过程特征	188
第一节 中国河口三角洲的演变规律	188
第二节 河口萎缩及对洪水风险的影响	199
第三节 河口泥沙数学模型	221
参考文献	234
第四章 流域泥沙灾害特征及成因分析	237
第一节 流域泥沙灾害的类型与特征	237
第二节 流域泥沙灾害的空间分布	251
第三节 流域系统中侵蚀、输移、沉积子系统间耦合关系	261
第四节 流域泥沙灾害成因及系统动力学模拟	287
参考文献	357
第五章 江河泥沙灾害的评估	370
第一节 泥沙灾害评估系统分析	371
第二节 泥沙灾害的风险	394
第三节 泥沙灾害风险评估	407
第四节 泥沙灾害的经济损失评估	432
第五节 泥沙灾害的生态评估	454
参考文献	482
第六章 泥沙灾害预测	486
第一节 泥沙灾害预测数学模型	486

第二节	泥沙灾害预测物理模型 .....	498
第三节	泥沙灾害预测结果的可视化系统设计 .....	512
第四节	泥沙灾害预测模型的验证及其应用 .....	514
	参考文献 .....	531
<b>第七章</b>	<b>泥沙灾害的生态环境效应 .....</b>	<b>533</b>
第一节	泥沙运动对自然灾害过程的影响 .....	533
第二节	人类活动对泥沙灾害过程的影响 .....	562
第三节	泥沙灾害与生态环境变化的响应 .....	594
	参考文献 .....	616
<b>第八章</b>	<b>泥沙灾害的防治与综合管理 .....</b>	<b>620</b>
第一节	水土流失灾害防治方法及其治理效应 .....	620
第二节	河口治理方略 .....	646
第三节	山东黄河窄河段挖河固堤减淤研究 .....	660
	参考文献 .....	680

## 绪 论

我国是世界上洪水灾害最频繁的国家之一，有 10% 国土面积、5 亿人口、3000 多万公顷耕地、100 多座大中城市，全国 70% 的工农业总产值受到洪水灾害的威胁，灾害造成的损失令人触目惊心：1991 年长江、淮河和松花江大水，直接经济损失 800 亿元！1994 年珠江、湘江和辽河大水，直接经济损失 1600 亿元！1995 年洞庭湖、鄱阳湖、第二松花江大水直接经济损失 1700 亿元！1996 年全国 30 个省（区、市）洪涝灾害直接经济损失 2200 多亿元！1998 年松花江、长江洪水直接经济损失 2551 亿元！进入 21 世纪以来，我国降雨明显偏少，汛期大江大河干流水情比较平稳，没有发生流域性洪水，即使在这样的情况下，因洪灾造成的直接损失每年仍接近或超过 1000 亿元，受灾人口超过 1 亿人。据统计，我国平均不到两年就发生一次较大洪灾，每年由于洪灾造成的直接经济损失已超过国民生产总值的 1%<sup>①</sup>！

江河灾害频繁发生，灾害范围越来越广，灾害损失越来越大（赵春明等，1996）。以往大洪水引发大灾（骆承政等，1996）而今大小洪水都可造成大灾（石伟等，2003；江恩惠等，2006）。小水大灾、灾害频率加剧，这说明“水”并不是造成灾害的唯一因素，必然还有其他因素隐含在洪灾中，加剧了洪灾。越来越多的证据表明，除人类活动影响及防洪意识、防洪管理和防洪工程建设方面存在欠缺外，自然因素中加剧江河洪水灾害的直接原因是泥沙淤积：①流域水土流失导致大量泥沙进入河道。以黄河流域为例，由于水土流失未能得到有效的治理和控制，平均每年有  $4 \times 10^8$  t 泥沙淤积在河道内，使河床每年淤高 0.1m。②河道淤积使得同流量下水位越来越高。以黄河为例，黄河花园口 1996 年洪峰流量  $7860 \text{ m}^3/\text{s}$ ，而水位却比 1958 年洪峰流量为  $22300 \text{ m}^3/\text{s}$  时对应的洪水水位高出 0.91m。③泥沙淤积使得洪水推进速度明显减慢。仍以黄河为例，20 世纪五六十年代黄河洪水从花园口到入海只需 7 天，1996 年却长达 18 天。④围垦和泥沙淤积使得河湖蓄滞洪水的能力减弱。以洞庭湖为例，由于围垦和泥沙淤积，使得湖面由 20 世纪 50 年代的  $6270 \text{ km}^2$  减少到目前的  $2691 \text{ km}^2$ ，调蓄能力减少了 40% 以上。

类似的情况在其他江河都不同程度存在（李景保等，2005；秦毅等，2006）。所有这些都表明，近年来的“小水大灾”与江河泥沙冲淤有着密切的关系，江河泥沙灾害因泥沙运动引起，而有效地进行泥沙灾害防治的基础是把握泥沙在流域系统中的运动规律。泥沙灾害在流域的不同区域往往有不同的表现：河流上游的泥沙运动常常引起水土流失、土壤退化、农业减产；河流中下游的泥沙运动往往引起河岸冲刷、河床淤高、河堤决口；河口地区的泥沙运动又会引起泥沙沉积、主流摆动、航道淤塞。此外，水库淤废、湖泊淤没、洪水调节功能丧失等也是江河泥沙灾害的一种表现形式。

由此可见，近年来的“小水大灾”现象，表面上是以洪水灾害这一次生灾害的形式

① 矫勇. 2003. 中国水问题、对策及发展战略. 日本: 第三届世界水论坛



出现，而实际上原生灾害却是泥沙灾害。

## 一、我国江河泥沙灾害的特点

广义地讲，泥沙灾害应该包括因泥沙运动和变异造成的一切灾害，水土流失、滑坡、泥石流、碎屑流、河道冲刷和水库淤积、高含沙水流、蓄滞洪区泥沙淤积、河口淤积、沙尘暴和土地沙漠化、砂土液化等。其中，流域泥沙灾害对我国社会、经济发展影响深远，而江河泥沙灾害则在流域泥沙灾害中表现最为剧烈。流域泥沙灾害可以属于一种发生在地表的地貌灾害，也可以属于一种水文灾害。这些泥沙灾害可以是突发的或渐变的，持续的或间歇的，区域性的或微域性的，永久性的或暂时性的，季节性的或非季节性的，周期性的或非周期性的，原生的或次生的，自然造成的或人为造成的。江河泥沙灾害一旦形成，便有可能造成复合灾害，从而在流域系统中形成泥沙灾害链。泥沙灾害链相对于泥沙灾害而言更为复杂、更难预报、更难防治，规模和危害也更大。可以说，通过链式反应和强次生灾害表现出来的隐含性灾害特征是目前我国江河泥沙灾害最主要的特点。

灾害链是灾害学中的一个重要概念，是一种灾害启动另一种灾害的现象，在自然界和人类社会中普遍存在。灾害链是由两种或多种灾害依因果关系或同源关系而形成接续发生或同步发生的序列。泥沙灾害链则可定义为：由泥沙灾害启动或作为主要启动因子的两种或多种灾害依因果关系或同源关系而形成接续发生的序列。

河流泥沙灾害形成的灾害链中，泥沙淤积和洪水灾害之间常常构成灾害链，且洪水灾害常为链尾，如图 0.1 所示。

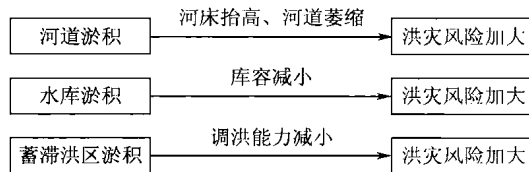


图 0.1 典型的泥沙淤积和洪水灾害链

泥沙灾害链具有不同的层次，根据泥沙灾害的不同层次可将泥沙灾害链区分为基于同一灾害系统中不同灾种相互引发的灾种灾害链和基于不同灾害子系统相互关系的系统灾害链。例如，泥沙灾害与洪水、地震等灾害构成高一级的系统灾害链，而不同的泥沙灾害的各灾种之间构成灾种灾害链（图 0.2）。

泥沙灾害链中，沿链灾害的传递常有损失放大作用，这一点尤其表现在流域泥沙灾害链中。流域泥沙淤积造成的直接损失可能并不很大，但是它所加剧的洪水灾害常造成更大的经济损失。

泥沙灾害链具有异地交叉传递的特点，尤其是江河泥沙灾害链。上游水土流失，通过泥沙的运动会引起中下游河道的淤积。因此，泥沙灾害链具有表现上的隐含性，常常以次生灾环的现象表现出来。

泥沙灾害链的分布具有明显的区域性特征，尤其是流域泥沙灾害，具有明确的沿流

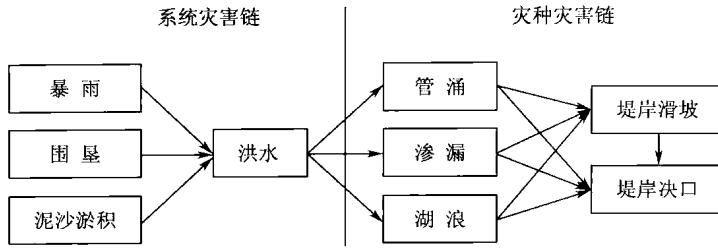


图 0.2 1998 年长江中游地区洪灾的洪水泥沙灾害链

域分布的特点。不同的泥沙灾害所在流域的位置不同：水土流失一般发生在中上游地区；泥石流、滑坡一般发生于上游山区；泥沙淤积灾害主要发生在流域中下游地区。

泥沙灾害链可能具有突发性或渐发性特征。例如，泥石流链、滑坡坍塌链可以在很短的时间内完成，破坏力爆发性很强；而沙漠化链、江河湖库淤积链则是渐次积累，但是破坏力一旦表现出来往往在短时间内难以恢复，甚至可能带来不可逆转的生态危机。

泥沙灾害链尤其是渐发性灾链，往往有灾害迟滞性。例如，上游水土流失导致下游河道淤积、洪水位抬高、洪灾损失增大的灾害链，从水土流失泥沙灾环开始，要经过相当长时间才能到达洪水灾害放大的灾环，以至于在初期人们甚至难以发现它们之间的因果关系。

除了这些共性的特征外，不同流域的泥沙灾害链也有其自身所独具的特点。

黄河流域的泥沙灾害主要表现在中游和下游。中游的泥沙灾害主要是黄土高原区的水土流失。黄河下游的泥沙灾害主要包括：河道淤积萎缩，河床抬升，水库湖泊淤积，淤积对城市或建筑物的影响，河岸侵蚀，工程设施冲刷破坏，土地沙化及土壤盐渍化等。显然，下游的许多泥沙灾害是相互关联或与中游的泥沙灾害相关联的，即泥沙灾害之间构成了泥沙灾害链。例如，中游的泥沙侵蚀造成下游泥沙淤积，而下游泥沙淤积又造成河床抬升、河道萎缩等一系列灾害。20 世纪 70 年代后，下游的泥沙淤积的变化趋势跟中游的来沙量趋势几乎一致，二者有强烈的因果响应关系；60~70 年代，受三门峡水库不同运用方式的影响，水库下游的泥沙淤积与中游的输沙量变化不一致，这是因为泥沙在库区大量淤积下来，使得进入库区下游的泥沙减少并造成下游河道的冲刷。因此，总体而言，黄河中游的泥沙侵蚀与下游的泥沙淤积有着密切的因果关系。

图 0.3 为黄河流域的典型泥沙灾害链，其中包含了泥沙灾害的异地传输性、时间积累效应以及强次生效应。异地传输性是指泥沙灾害由中游传输到下游，发生了空间上的改变；时间积累效应是指侵蚀型泥沙灾害和淤积型泥沙灾害都是渐发性泥沙灾害，在短时间内体现不出灾害效应，但经过长时间地积累后就会由量变到质变，以突发性洪水灾

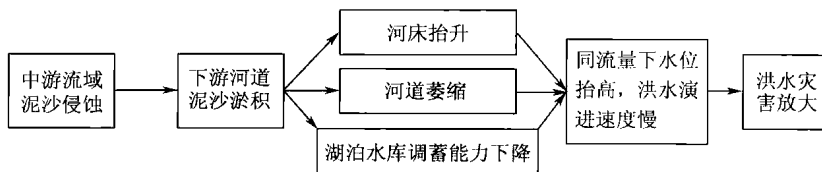


图 0.3 黄河流域典型泥沙灾害链

害的形式表现出来，发生了时间上的改变；强次生效应是针对灾害的载体而言的，链中原生的灾害载体是泥沙，泥沙灾害是原生灾害，但在链尾却以次生灾害表现出来，灾害的载体变为洪水。

侵蚀型泥沙灾害主要发生在黄河中游，表现形式以渐变的沟道坡面剥蚀后退等为主，由于渐变过程真正表现为灾害需要一定的时间积累过程，并且常常以时间上滞后的次生灾害的形式表现出来，因此有人认为只有当水土流失的侵蚀厚度大于2mm [相当于侵蚀模数 $4000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]时才构成泥沙灾害，而渐变过程不是泥沙灾害。但实际上，渐变过程引发的泥沙灾害，不管是原生灾害或次生灾害，在时间长期积累条件下，往往带来更为严重的灾害损失，甚至造成难以逆转的生态危机。易于以次生灾害表现出来意味着易于引发灾害链，导致更多的灾害。因此，从防重于治的角度来说，对于渐发性泥沙灾害应给予更多的关注。

黄河中游多沙粗沙区的侵蚀型泥沙灾害通过该区域高含沙水流特殊的水沙条件输往下游。高含沙水流对泥沙的携带作用成为新的泥沙灾害的孕灾环境，而多沙粗沙区的大量泥沙侵蚀就成为新的泥沙灾害的致灾因子。高含沙水流携带中游的泥沙向下游输移的过程改变了泥沙的空间位置，将这部分可能导致灾害的泥沙带向下游，这属于输运型泥沙灾害。输运型泥沙灾害涉及范围较小，出现的频率较低，幅度较小。主要出现在坡面、河道及河口海岸泥沙灾害中。例如，泥石流的运移、土体蠕动形成的泥沙灾害，河道中的高浓度输沙、浆河洪峰输移形成的泥沙灾害等。河道输运型泥沙灾害本身构成的损失较小，但是却可能对环境带来不良影响。来自黄河中游的泥沙在下游河道严重落淤，这样就会导致下游淤积型泥沙灾害的发生。

输运型泥沙灾害通过黄河下游宽浅游荡性河道使泥沙大量落淤的特点，与淤积型泥沙灾害建立因果关系，而下游淤积型泥沙灾害通过输运型泥沙灾害与中游侵蚀型泥沙灾害建立因果响应关系，来自中游的泥沙在下游河段淤积下来，使得水库湖泊淤积，河床抬高，河道萎缩，加上1986年以来黄河下游径流量明显减少，河道频繁断流，使河道萎缩加剧，排洪能力降低。这样的情况又为下游洪灾发展提供了孕灾环境，而泥沙的长期淤积就成为洪灾的致灾因子之一，确切地说，淤积型泥沙灾害放大了洪水的灾害后果。

下游淤积型泥沙灾害使洪水灾害作用放大，主要体现在同流量下洪水位升高，洪水演进速度慢，从而造成额外的洪灾损失，黄河下游“96.8”洪水就是一个典型的例子。“96.8”洪水的明显特点是流量不大，属中常洪水，但水位高，达到1985年以来黄河下游最高洪峰；洪水演进速度慢，传播时间长，破坏力极大。洪峰流量远小于历史最大流量，而洪水位竟与历史最高水位相持平，有的站甚至还超过了历史最高水位，这种小流量高水位的搭配就是导致小水大灾现象的真正原因。

淤积型泥沙灾害终以洪水灾害的形式表现出致灾作用。对于灾害本身来说，淤积型泥沙灾害本身构成的灾害并不很严重，但其真正的灾害本质却并不是通过自身来体现的，这也是链式反应的特点，虽然每一环都表现为灾害，而有的灾环主要起连接作用，引出下一个灾环，但其隐含的灾害作用最终会由某个（多个）灾环体现出来。

泥沙灾害链的形成是多因强化的结果，从多沙粗沙区的高强度侵蚀产沙条件，携带泥沙的高含沙水流，到黄河特殊的河型、河性，都为泥沙灾害链节点之间因果关系的发

展提供了适当条件。黄河泥沙灾害由中游迁移到下游，中游原生的侵蚀型泥沙灾害通过链式反应最终表现为次生的洪水灾害，中游的渐发性灾害最终导致下游突发性灾害，这是泥沙灾害链长期作用的结果，泥沙灾害通过“链”的作用跨越时间和空间，形成跨区域、放大的、隐含性、突发性灾害，完成了从量变到质变的过程。

长江流域的泥沙灾害主要包括水土流失、坍塌、滑坡、泥石流、河道淤积和萎缩、湖泊水库淤积、河岸侵蚀、水利工程冲刷破坏等。长江流域的水土流失（侵蚀型泥沙灾害）主要发生在上游的金沙江和嘉陵江流域，这两个区域也是泥石流滑坡多发区，来自这两个区域的泥沙分别占宜昌站（长江及洞庭湖的泥沙主要来源）多年平均输沙量的45.3%和27.4%。而淤积型泥沙灾害主要发生在中游平原地区，该地区由于地面高程较低也是洪灾最为严重和泛滥的地区。长江中下游近年来也频繁出现流量小、水位高的小水大灾现象，1996年监利—螺山河段超过历史（1954年）最高水位，1998年又重写了最高水位记录。

人们自然会将上述现象与上游不断加剧的水土流失、频繁的山地灾害、大量泥沙下泄联系起来。事实上，宜昌站多年平均含沙量 $1.18\text{kg}/\text{m}^3$ 基本没变，而且还有下降的趋势。洞庭湖区1949年以来累积围垦面积 $1695\text{km}^2$ ，由此造成的湖容损失约为 $10\times 10^9\text{m}^3$ ，这种围垦只能造成调蓄作用减小，长江干流流量增大，而不会造成1998年在螺山河段安全泄量 $60\ 000\sim 65\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 范围内水位超过1954年流量为 $78\ 800\text{m}^3/\text{s}$ 最高洪水位 $1.78\text{m}$ 的严重后果。因此，造成中游水位抬升的原因并不是上游来沙在下游的淤积，也不是洞庭湖区调蓄能力的减低。据调查，上游侵蚀来的泥沙大都来自斜坡上风化残积层和重力堆积物，粒径较粗，一般不能作长距离搬运，只有小部分能够被带到宜昌以下。大部分泥沙淤积在上游各支流或局部主干河道，造成支流河道泥沙的不断加积。造成中游水位抬升的原因主要是荆江三口分流分沙量逐年减少，进而导致洞庭湖区淤积量大幅度减少，城陵矶以下河段的淤积量大幅度地增加。这种淤积分布的变化不仅使监利—螺山河段的水位大幅度抬高，而且使洞庭湖区的调节湖容大量减少。泥沙在城陵矶以下河段的淤积所造成的危害远比在洞庭湖区淤积所造成的危害大。由此可见，引起长江流域小水大灾现象的泥沙灾害链不同于黄河流域，黄河流域侵蚀最严重的区域也正是导致下游泥沙淤积的主要沙源区，而长江流域上游泥沙侵蚀的加剧却并不是下游淤积加剧的原因。

治灾要治本。既然泥沙运动已成为近年来加剧江河洪灾的根本原因之一，因而，从深层次揭示江河泥沙灾害形成规律并寻找相应的防治理论和方法并化灾为利已成为当前摆在我们面前最迫切的基础性研究课题。

## 二、国内外研究现状

关于流域泥沙微观运动的研究近20年来国内外已取得了突破性的进展。其中，国外的显著进展（Schumm, 1990; Al-Gharbi, *et al.*, 2005; Kanematsu, *et al.*, 2006; Moody, *et al.*, 2006; Sansalone, Cristina, 2004; Tseng, Hsu, Shieh, 2006）主要反映在小流域产沙、泥沙运动力学、河口泥沙、泥沙数学模型、固液两相流理论、泥沙污染、颗粒流和流变学研究等方面。国内取得的显著进展（钱宁等, 1986, 1987; 李孟

国, 2006; 倪浩清等, 2006; 石伟等, 2003; 张红武等, 2003; 赵明登等, 2002) 主要反映在高含沙理论研究和工程泥沙 (包括水库泥沙、泥沙物理模型等) 研究方面。

关于流域泥沙运动在较长时间和空间尺度内的宏观效应研究多由地学家们完成, 但围绕流域产沙和大江大河治理展开的研究却增加了水利学者与地理学者之间的相互了解。水利学者多关注流域产流产沙量及其过程的预测、河道冲淤的力学机理、河道形态变化的定量与半定量描述, 而地学家们则更关注众多影响因素与流域产沙的因果关系以及河型和河道剖面在内、外营力共同作用下, 在更长的时间尺度内的变化, 并更侧重河流地貌方面的研究。

关于河口运动, 水利学者和地理学者也基本上从两个不同的角度展开研究。水利学者主要探索了在径流与潮流共同作用下的河口附近泥沙运动和冲淤规律 (窦国仁, 1995), 而地理学者则主要从地貌学的角度进行宏观的研究。

无论是从泥沙微观运动还是从泥沙运动的宏观效应来看, 流域泥沙运动在过去相当长的时间里都只被看成是一种独立的自然过程。真正使人们从全新的角度看待流域泥沙运动及其结果是在 20 世纪 80 年代以后。80 年代后期, 全球性“国际减灾十年”活动的开展, 水土流失问题、荒漠化问题、泥石流和滑坡问题、河口海平面变化和泥沙沉积相互关系问题都在泥沙研究中得到了体现。进入 90 年代后, 全球关注的环境问题和可持续发展的战略对泥沙研究提出了新的要求, 泥沙运动从纯自然过程不可避免地变成了与社会、经济和环境密切联系的综合问题, 成为区域可持续发展中的一个活跃因子, 并已成为国内外学者从诸多视角关注的目标。

归结国内外以往进行的泥沙研究工作, 大致具有下列特点:

(1) 关于局部地域泥沙微观运动机理和流域地貌系统的研究较多, 而将泥沙运动纳入流域系统考察“微观运动”与“宏观效应”响应关系的则较少。

(2) 关于流域系统局部区域泥沙灾害的研究较多, 而关于流域泥沙灾害过程或将流域系统中各类泥沙灾害关联考虑的研究则较少。

(3) 关于泥沙自身运动规律的研究较多, 而关于泥沙沉积这一重要过程引起的江河洪水灾害过程的研究则较少。

流域泥沙灾害从根本上来说是泥沙在其侵蚀、搬运和堆积过程中给人类社会带来灾祸的自然现象和过程。在流域泥沙灾害中, 因江河泥沙淤积加剧的洪水灾害尤为突出。近年来, 连年的江河灾害已为世人瞩目, 有效地进行江河的泥沙灾害防治已迫在眉睫。江河泥沙灾害系由泥沙的冲刷与淤积造成。为了有效地防治灾害, 将水动力学、泥沙运动学和地貌学结合来研究泥沙运动及其江河泥沙洪水灾害过程的关系无疑是最佳途径。只有这样, 才能以泥沙在流域系统中的运动为线索, 以江河泥沙灾害为研究对象, 以流域中各类典型泥沙灾害成因及其内在规律的研究为基础, 以泥沙淤积造成的江河洪水灾害为重点, 在泥沙运动中的“过程”中寻找泥沙微观运动与地貌宏观表现的关系、泥沙运动与江河洪水灾害的关系以及江河泥沙灾害及其加剧的江河洪水灾害防治的方法。

### 三、学科发展展望

中国是世界上自然灾害最严重的国家之一。20世纪90年代以来,我国与“国际减灾十年”活动相配合,从基本国情出发,针对中国自然灾害的基本特点与保障社会、经济可持续发展的需要,注意到水利在农业发展中的核心作用和洪灾对国民经济的巨大破坏作用,把洪水等灾害列为对中国社会、经济发展影响最大的自然灾害(中国科学技术协会学会工作部,1992;国家科委全国重大自然灾害综合研究组,1993),并制订了“加强灾害科学的研究,提高对各种自然灾害的孕育、发生、发展、演变及时空分布规律的认识”的目标。根据近年来频繁出现的洪水“小水大灾”的特点,泥沙淤积与洪水灾害的矛盾已跃居为洪灾的主要矛盾,因此,适时抓住这一主要矛盾开展深层次研究已是我国防灾减灾研究的当务之急。

我国的泥沙科学研究在许多方面具有领先地位,特别是在高含沙水流和工程泥沙研究方面。20世纪50年代以来在全国的主要江河获得了全国系统的水文泥沙实测资料;60年代以来开展的水库泥沙研究积累了丰富的经验;70年代以来开始的流域水土保持工作取得了明显的效益;80年代以来为兴建长江三峡水利枢纽和黄河小浪底水库等重大工程而进行的大量泥沙模型试验极大地促进了泥沙科学的发展;而进入90年代以后将泥沙科学与地貌学、灾害学、环境学结合进行的研究则为进一步开展高层次的、学科交叉的综合研究奠定了基础。

我国的泥沙科学队伍实力雄厚。40多年泥沙研究工作的开展使得许多研究单位具备了一流的研究人才和研究设施,如中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、长江水利科学研究院、黄河水利科学研究院、原中国科学院自然资源综合考察委员会、原中国科学院地理研究所、中国科学院生态环境研究中心、中国科学院成都山地灾害与环境研究所、中国科学院西北水土保持研究所、清华大学、北京大学、天津大学、原武汉水利水电大学、河海大学等科研机构都有各具特色的实验室和高素质的科研人员。近年来,各研究单位共同协作,实现了理论与实践的结合、水利与地学的结合、基础与工程的结合。一批学有所成的中青年学者的出现更使泥沙科学的发展后继有人。在这种背景条件下开展江河泥沙灾害的研究,必将会有力地促进泥沙科学的发展。

由于社会发展的需要,泥沙研究已经开始从更多方面展开:1986年,“长江三峡工程对生态环境的影响研究”被列为国家“七五”科技攻关项目,泥沙运动与生态环境的关系被合理的考虑;1992年,“黄河治理与水资源开发利用研究”被列为国家“八五”科技攻关项目,泥沙运动被尝试纳入流域系统中考虑;1994年,“三峡水利枢纽几个关键问题的应用基础研究”被列为国家自然科学“八五”重大项目,泥沙运动与工程建设的关系被系统考虑;1995年,“黄河三角洲可持续发展”被UNDP(联合国开发计划署)列为研究课题,泥沙运动被纳入区域可持续发展中加以考虑。这些研究项目的开展,使泥沙科学的研究内容得到了合理的外延。伴随着泥沙科学的不断发展和社会的需要,在不同的历史时期泥沙研究有不同的侧重点。在当前,“江河泥沙灾害形成机理及其防治研究”无疑是新时期把握学科前沿的需要,更是国民经济持续发展的迫切需要。

国家自然科学基金委员会与水利部在“九五”期间联合设立了国家重大基金项目

目“江河泥沙灾害形成机理及其防治研究”。项目集合了来自北京大学、清华大学、中国水利水电科学研究院、中国科学院地理科学与资源研究所、武汉大学、四川大学以及黄河水利科学研究院等多方面的专家，就江河泥沙灾害形成机理及泥沙运动过程与江河洪水灾害的关系等进行了深入的研究。本书作为项目研究成果的一个总汇，以泥沙运动为线索，阐述了从流域产沙到河道运移、河口沉积过程中的江河泥沙灾害特征，并介绍了江河泥沙灾害的评估方法和预测模型，最后提出了对我国大江大河防治泥沙灾害的建议。为叙述方便，本书中的泥沙灾害如非特指，则均指江河泥沙灾害。

## 参 考 文 献

- 窦国仁. 1995. 河口海岸泥沙数学模型的研究. 中国科学, 25 (9): 995~1001
- 国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 1993. 中国重大自然灾害及减灾对策. 北京: 科学出版社
- 江恩惠, 董其华, 张清, 郭西方. 2006. 黄河下游洪水期沙峰滞后特性研究. 人民黄河, 28 (3): 19~20
- 李景保, 肖洪, 王克林, 梁成军, 袁华斌. 2005. 基于流域系统的暴雨径流型灾害链——以湖南省为例. 自然灾害学报, 14 (4): 30~38
- 李孟国. 2006. 海岸河口泥沙数学模型研究进展. 海洋工程, 24 (1): 139~154
- 骆承政, 乐嘉祥. 1996. 中国大洪水——灾害性洪水述要. 北京: 中国书店
- 倪浩清, 李福田. 2006. 悬沙冲淤问题的湍流两相模型. 水利学报, 37, (4): 411~417
- 钱宁, 万兆惠. 1986. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社
- 钱宁, 张仁, 周志德. 1987. 河床演变学. 北京: 科学出版社
- 秦毅, 郑学萍, 李怀恩, 王焯, 庞雷. 2006. 渭河下游洪水变化特点及成因. 干旱区资源与环境, 20 (3): 70~74
- 石伟, 王光谦, 邵学军. 2003. 流量变化对黄河下游河道演变影响. 水利学报, 34 (5): 74~77
- 张红武, 赵连军, 王光谦等. 2003. 黄河下游河道准二维泥沙数学模型研究. 水利学报, 34, (4): 1~7
- 赵春明, 张志彤, 周一敏. 1996. 1996年洪水的反思. 中国水利, 10: 4~5
- 赵明登, 李义天. 2002. 二维泥沙数学模型及工程应用问题探讨. 泥沙研究, 2002, (1): 66~70
- 中国科学技术协会学会工作部. 1992. 中国减轻自然灾害研究. 北京: 科学出版社
- Al-Gharbi M S, Blunt M J. 2005. Dynamic network modeling of two-phase drainage in porous media. *Physical Review E*, 71 (1): Art. No. 016308 Part 2
- Kanematsu M, Shimizu Y, Sato K, et al. 2006. Distribution of dioxins in surface soils and river-mouth sediments and their relevance to watershed properties. *Water Science and Technology*. 53 (2): 11~21
- Moody J A, Kinner D A. 2006. Spatial structures of stream and hillslope drainage networks following gully erosion after wildfire. *Earth Surface Process and Landforms*, 31 (3): 319~337
- Sansalone J J, Cristina C M. 2004. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 130 (11): 1301~1314
- Schumm S A, Winkley B R. 1990. *The variability of Large Alluvial Rivers*. ASCE, New York
- Tseng C M, Hsu S M, Shieh C L. 2006. Formation processes and configuration of channel-flow dominated alluvial deltas by numerical simulation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132 (8): 825~838



# 第一章 流域产沙过程与泥沙灾害致灾因子

流域产沙是重要的泥沙灾害表现形式。坡面泥沙侵蚀可以使土层变薄、土壤肥力降低，造成土地“砂石化”，使之失去农业价值。同时，产生的泥沙大量进入河道后，造成河床淤积、加剧洪涝灾害发生的危害，形成各种次生灾害，严重威胁着人类社会的生存与发展。流域产沙是江河泥沙的源头，为揭示泥沙灾害的形成原因，首先需要对流域产沙过程进行系统研究。

## 第一节 流域产沙与地貌特征

流域产沙过程是由其气候、植被、地面组成物质、地貌形态等环境特性所决定的。流域产沙与环境特性之间的定量关系是国内外地貌学家、水文学家、水利学家和土壤侵蚀工作者普遍关注的重要科学问题，它对于水土流失的监测和预报、水土保持规划，流域系统的洪水和泥沙灾害防治具有重要意义。

关于流域产沙与流域环境的研究已经取得了一系列重要进展，然而有关两者之间关系的基础性研究尚不深入。流域产沙过程与植被、地面物质、地貌形态、降雨等环境因子密切相关。对于一些土壤侵蚀剧烈的流域系统，产沙过程与流域环境特性之间关系的研究往往因复杂的环境条件而变得困难。

不同的流域环境条件下对应的产沙过程有很大的差异，这里仅以黄河流域为例进行讨论。

### 一、流域产沙对地貌和环境的响应

#### (一) 气候条件对流域产沙的影响

降雨是影响黄河中游地区流域产沙的主要动力条件，因此过去围绕不同下垫面条件下降雨强度对流域侵蚀产沙影响的研究成果颇丰（王万忠，1983；蔡强国等，1998；景可等，1997；王孟楼、张仁，1990）。

黄河流域南北纵跨干旱荒漠草原、半干旱草原、半湿润森林草原地带，同时受地貌格局的控制，地理地带性和地域性分异都十分明显。从鄂尔多斯高原到黄土丘陵沟壑，从基岩山地到土石山地到黄土丘陵，位于不同地带和地域的流域，其流域环境特性复杂多样，降雨特征及其地带性或地域性分异都十分明显，流域侵蚀产沙强度的区域分异很大。关于不同自然地带流域产沙量与降雨特征之间的关系目前知之甚少。有关降雨年际变化对流域产沙量影响的研究（周明衍，1985）也仅限于局部地区。图 1.1 是黄河中游黄龙区间流域产沙量与复合降水指标  $K$  的关系。

可以看出，随着  $K$  值的增大，流域产沙量明显增加。但是，受不同类型流域下垫面环境特性的制约，流域产沙量与复合降水指标  $K$  的关系不是单一的。不同类型流域在图 1.1 中对应的曲线位置各不相同。沙黄土、砒砂岩流域位于最上部，基岩山地流域位置最靠下，其余的由上而下，依次为黄土流域，黄土+基岩流域，薄层黄土流域和基岩山地+黄土流域，从而清楚地说明，随着复合降水指标  $K$  的变化，不同自然地理类型流域产沙量遵循不同的规律。

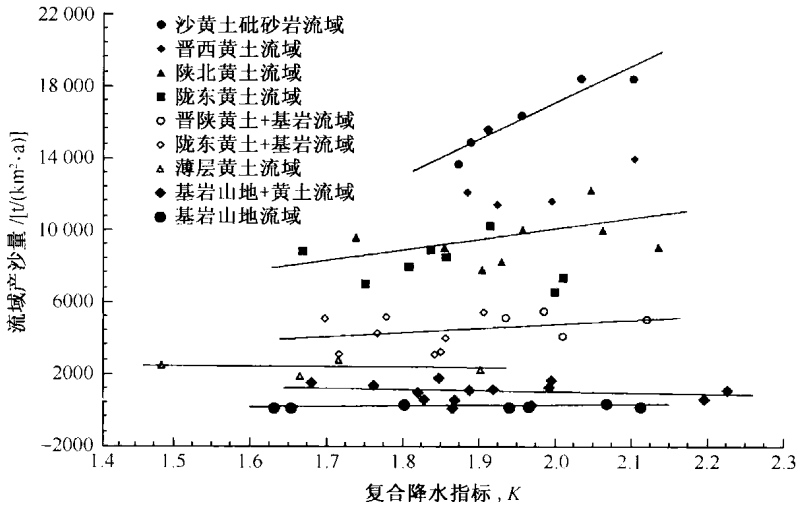


图 1.1 黄河中游地区流域产沙量与复合降水指标  $K$  的关系

流域的侵蚀产沙强度不仅取决于降水总量，而且在很大程度上与降水的不均一性密切相关。黄河中游地区位于干旱荒漠草原、半干旱草原和半湿润森林草原过渡地带，降水的季节性变化较大，而且由南而北越趋明显，因而对流域产沙量及其区域分异势必起着重要的影响作用。

Fournier 曾利用降水季节性变化指标  $p^2/P$  研究全球不同自然地带流域产沙量的变化。其中， $p$  是最湿月降水量， $P$  是多年平均降水量。 $p^2/P$  既随降水季节性变化的增加而增加，同时又随年降水总量的增加而增加。它不仅反映汛期强暴雨的侵蚀作用，还反映季节性干旱地区植被的减少。

Fournier 认为， $p^2/P$  越大，流域产沙量越大。干旱地区由于年降雨总量少、径流小，因而产沙量低；终年湿润地区，降雨季节性变率小，植被覆盖较好，产沙量也较低。最大产沙量往往出现在具有明显旱季的湿润热带气候地区和地中海气候区。季风盛行地区，由于旱季明显，产沙量也较高 (Fournier, 1960)。

图 1.2 是黄河中游地区流域产沙量与  $p^2/P$  关系。将流域划分为不同的自然地理类型，进而以不同类型流域为参数建立流域产沙量与  $p^2/P$  关系，则可由图 1.2 看出对于同一自然地理类型流域，产沙量与  $p^2/P$  之间呈现明显的正相关关系。

对于不同自然地理类型的流域，其产沙量与  $p^2/P$  的关系曲线在图 1.2 中所处的位置也不相同。即使对同一类型流域，不同地区流域的点据所占据的位置也各不相同，晋西、陕北地区的流域多位于曲线的右方和上方，而陇东地区的流域多位于曲线的左方和