

第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会

# 论文集

中国水利学会泥沙专业委员会编

中国建材工业出版社

# 第二届全国泥沙基本理论研究 学术讨论会论文集

中国水利学会泥沙专业委员会

中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

图书在版编目 (CIP) 数据

第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集/中国水利学会泥沙专业委员会编. -北京: 中国建材工业出版社, 1995. 10

ISBN 7-80090-425-3

I. 第… I. 中… II. 泥沙-学术会议: 讨论会-中国-文集 N. TV14-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 13801 号

第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集  
中国水利学会泥沙专业委员会编

\*

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 40.5 字数: 983 千字

1995 年 10 月第一版 1995 年 10 月第一次印刷

印数: 1—500 册 定价: 98 元

ISBN 7-80090-425-3/Z·73

## 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会 组织委员会

主 任：严 恺

委 员：(按姓氏笔划为序)

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 方 铎 | 王光谦 | 王桂银 | 叶青超 | 许红波 | 华国祥 | 李义天 | 李国英 |
| 匡尚富 | 朱尔明 | 严 恺 | 陈式慧 | 陈国祥 | 张 仁 | 张启舜 | 张红武 |
| 沈国衣 | 杜国翰 | 邢凤山 | 郑连弟 | 林秉南 | 赵业安 | 赵文林 | 赵楚年 |
| 胡春宏 | 徐明权 | 唐友一 | 梁瑞驹 | 曾庆华 | 惠遇甲 | 谢鉴衡 | 蒋如琴 |
| 窦国仁 | 潘庆荣 | 谭 颖 | 戴定忠 |     |     |     |     |

秘 书 长：胡春宏

## 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会 论文集编委会

主 编：曾庆华

副 主 编：胡春宏

编 委：曾庆华 胡春宏 侯力学 刘 峡 王景新 陈建国

责任编辑：侯力学 刘 峡

# 前 言

在中国水利学会泥沙专业委员会的倡导下，在各级领导、专家和全国广大泥沙工作者的大力支持下，第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会将于 1995 年 10 月底在北京召开。会议共收到来自全国各地科研、设计和高等院校等近 50 个单位的泥沙研究工作者所提交学术论文近 130 篇，为促进学术交流、推广科研成果，经有关专家对所收到的论文进行评审，共录用 89 篇论文，编辑成论文集，并由中国建材工业出版社出版。收入论文集的论文作者中既有老一辈的专家学者，更多的是近年来成长起来的中青年科技工作者，这是非常可喜和令人鼓舞的事情。

论文集的内容包括：1. 泥沙运动力学与河床演变等；2. 流域产沙、环境泥沙、泥沙数学模型和物理模型技术；3. 黄河、长江等流域泥沙问题。论文题材新颖、内容广泛，具有较高的学术水平和实用价值，有的已达到国内、国际先进水平，论文集从一个侧面反映了近年来我国泥沙研究的最新进展和研究方向。我们真诚地希望通过这一学术活动，能为推动和促进我国泥沙基本理论研究工作做一些有益的事情，团结全国的泥沙工作者，共同攀登科学高峰。

由于我们工作经验不足，水平有限，加之时间短，人力不足，论文集中的缺点和错误在所难免，欢迎批评指正。

在此，对关心和支持本次学术讨论会的领导、专家和广大泥沙研究工作者表示衷心的感谢！

中国水利学会泥沙专业委员会  
1995 年 8 月于北京

# 目 录

## 第一部分 泥沙运动力学与河床演变等

|                                    |     |     |        |
|------------------------------------|-----|-----|--------|
| 欧美泥沙运动研究述评 .....                   | 王兆印 | 宋振琪 | ( 3 )  |
| 床面层泥沙运动的力学分析 .....                 | 刘大有 |     | ( 28 ) |
| 泥沙影响水流能量损失的机理探讨 .....              | 刘青泉 | 刘大有 | ( 33 ) |
| 泥沙对水流紊动影响的初步分析 .....               | 陈 立 | 詹义正 | 李义天    |
| .....                              | 王明甫 |     | ( 39 ) |
| 紊动与悬移质泥沙的组成 .....                  | 詹义正 | 陈 立 | 李义天    |
| .....                              |     |     | ( 45 ) |
| 不均匀沙石颗粒运动速度的研究 .....               | 秦荣昱 | 王崇浩 | ( 51 ) |
| 非均匀沙起动及输移规律研究 .....                | 韩文亮 | 惠遇甲 | ( 57 ) |
| 模糊数学方法在泥沙起动流速研究中的应用 .....          | 唐造造 | 方 铎 | ( 63 ) |
| 挟沙水流几个运动特性的探讨 .....                | 陈德明 | 陈家扬 | ( 67 ) |
| 推移质和悬移质转换层的输沙规律研究 .....            | 陈德明 | 陈家扬 | ( 73 ) |
| 重正化群和逾渗理论分析散体泥沙床面起动条件的研究 .....     | 姚令侃 | 方 铎 | ( 79 ) |
| 论明渠水流边界剪切应力分布规律 .....              | 胡春宏 | 吉祖稳 | ( 85 ) |
| 粘性类土的起动模式研究 .....                  | 黄岁梁 | 陈稚聪 | 府仁寿    |
| .....                              |     |     | ( 94 ) |
| 从河流体系的能量分配、耗散原理分析河床形态的自动调整作用 ..... | 孙东坡 | 李国庆 | (101)  |
| 卵石河流水流阻力的分析与模拟 .....               | 杨美卿 | 王桂仙 | (107)  |
| 卵石河道宽级配推移质输移特性研究 .....             | 刘兴年 | 陈远信 | 方 铎    |
| .....                              | 樊崇良 | 黄 尔 | (113)  |
| 山区航道卵石运动规律探讨 .....                 | 王平义 | 方 铎 | (119)  |
| 不同水沙条件管流阻力损失特性 .....               | 陈 立 | 王明甫 | (127)  |
| 异重流运动基本方程 .....                    | 王光谦 | 方红卫 | (133)  |
| 库区干支流异重流入汇运动分析计算 .....             | 谈广鸣 | 张小峰 | (139)  |
| 利用水(气)帘防止三峡船闸上下游引航道异重流淤积实验研究 ..... | 张 威 |     | (147)  |
| 泥石流排导渠设计原理探讨 .....                 | 费祥俊 |     | (154)  |
| 自然界高浓度粘性泥石流流变模型的研究 .....           | 王裕宜 |     | (162)  |
| 絮凝泥沙若干特性研究 .....                   | 张志忠 | 阮文杰 | 蒋国俊    |
| .....                              |     |     | (172)  |
| 絮凝泥沙的动力学问题 .....                   | 阮文杰 |     | (178)  |

|                              |                         |       |
|------------------------------|-------------------------|-------|
| 不絮凝沙沉降规律研究 .....             | 吴华林 张小峰                 | (184) |
| 输沙不平衡对规则渠道断面形态的影响及治理研究 ..... | 刘彦君 刘 伟 方红卫             | (190) |
| 临界渠道水力几何形态新概念 .....          | 曹叔尤 D. W. Knight        | (195) |
| 质点运动力学在洪水计算中的推广 .....        | 邵颂东 王光谦 费祥俊             | (201) |
| 潮汐河道河湾下切机理及演变调控 .....        | 程禹平                     | (207) |
| 侧向进水枢纽漏斗形态分析 .....           | 陈建国 曾庆华 周文浩 赵华侠 陈建武 李宜斌 | (212) |
| 坝前冲刷漏斗形成过程研究 .....           | 应 强 马进荣                 | (218) |

## 第二部分 流域产沙 环境泥沙 泥沙数学模型和物理模型技术

|                                        |                 |       |
|----------------------------------------|-----------------|-------|
| 坡面流输沙能力的初步研究 .....                     | 曹文洪             | (227) |
| 小流域侵蚀产沙过程模型 .....                      | 蔡强国             | (233) |
| 物理成因基础的流域产沙模型 .....                    | 汤立群 陈国祥         | (239) |
| 偏关河流域产沙模型研究 .....                      | 徐建华 李雪梅 李世明     | (245) |
| 黄河中游河口至龙门区间流域干支流水土保持对入黄泥沙特性影响的研究 ..... | 韩 鹏 张 仁         | (251) |
| 黄河中游黄土区基岩及产沙估算 .....                   | 李世明 支俊峰 杨汉颖 邱宝冲 | (261) |
| 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究 .....        | 江忠善 王志强 刘 志     | (267) |
| 水环境中的泥沙问题和环境泥沙学 .....                  | 黄岁梁             | (276) |
| 拟合坐标系下平面二维水流泥沙数学模型及初步验证 .....          | 张华庆 乐培九         | (295) |
| 弯道泥沙输移中几个基本问题的研究 .....                 | 王平义             | (303) |
| 一维泥沙模型断面形态研究 .....                     | 吴卫民 杨国录 韩进能     | (309) |
| 水库下游河道冲刷一维数学模型的研究与应用 .....             | 胡海明 李义天         | (315) |
| 漫湾水库泥沙淤积过程数学模型 .....                   | 巨 江 钱善琪         | (322) |
| 河道平面二维泥沙数学模型研究及应用 .....                | 李义天 谢鉴衡 吴伟明     | (328) |
| 潮汐河口二维动床紊流模型计算 .....                   | 陆永军 袁美琦         | (333) |
| 水库下游河道冲刷的数值预报 .....                    | 陆永军             | (342) |
| 一维冲淤计算中横断面变形的修正 .....                  | 郭庆超             | (353) |
| 平面二维水流挟沙力初探 .....                      |                 |       |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| ..... 杨国录 胡春燕 吴卫民 陈振虹 杨培炎 王东辉 | (359) |
| 水文水动力学数学模型的沿革及新近发展            |       |
| ..... 曹文洪 张启舜 马喜祥             | (365) |
| 爱因斯坦输沙概念下的动床模型设计方法            |       |
| ..... 范宝山 巩宪春 吴柏春             | (371) |
| 北仑港电厂附近潮汐水域的岸滩演变及试验研究         |       |
| ..... 乾爱国 赵永明 李瑞生             | (379) |
| 用模型延伸法进行丹东电厂排水口冲刷形态的试验研究      |       |
| ..... 刘顺宽                     | (386) |

### 第三部分 黄河长江等流域泥沙问题

|                                    |                     |       |
|------------------------------------|---------------------|-------|
| 环境变化对黄河下游河道发展的影响 .....             | 尤联元                 | (395) |
| 黄河下游河型分异及游荡性河型形成原因的探讨 .....        | 杨积武                 | (401) |
| 高含沙水流的揭河底现象及机理研究 .....             | 匡尚富 徐永年 李文武         | (408) |
| 高含沙洪水中“揭河底”冲刷淤积物翻转倾覆过程力学分析 .....   | 缙元有 文喜扶 窦宪民         | (420) |
| 游荡型河段漫滩高含沙水流水位变化的分析 .....          | 陈 立 周宜林 王明甫         | (426) |
| 黄河下游粗细泥沙挟沙能力研究 .....               | 刘兴年 樊崇良 曹叔尤 黄 尔     | (432) |
| 充分利用黄河泥沙改良黄河三角洲生态环境为开发建设创造条件 ..... | 王锡栋 王梁山             | (438) |
| 高含沙水流作用下渭河下游河道冲淤 .....             | 刘继祥                 | (441) |
| 黄河小浪底水库修建后下游河道的断面河相关系 .....        | 惠遇甲                 | (449) |
| 黄河河道数学模型的研究 .....                  | 张红武 江恩惠 刘月兰 余 欣 陈新锋 | (459) |
| 黄河龙门至河口泥沙冲淤计算方法 .....              | 李松恒 张原锋 刘月兰         | (465) |
| 龙潼段近年来冲淤变化规律的研究 .....              | 杨丽丰 刘德福             | (472) |
| 黄河下游泥沙冲淤特性的分形研究 .....              | 刘兴年 杨兴俊             | (477) |
| 黄河下游各级洪峰不同粒径泥沙冲淤特性分析 .....         | 陈建国 周文浩 李宜斌 赵华侠 陈建武 | (483) |
| 黄河艾山以下河道河床演变特性的探讨 .....            | 梁志勇                 | (491) |
| 黄河艾山以下河道水沙的沿程变化 .....              | 梁志勇 张德茹             | (497) |
| 冰凌期黄河艾山以下河道水沙特性 .....              | 张德茹 梁志勇             | (503) |

|                                                |                 |       |
|------------------------------------------------|-----------------|-------|
| 引黄灌区支渠提水对干渠水流影响特性分析 .....                      | 戴 清 蒋如琴         | (511) |
| 小开河引黄灌区扩大治理工程输沙渠泥沙输移试验研究<br>.....              | 段志科 蒋如琴 戴 清     | (520) |
| 黄河下游引黄灌区泥沙远距离输送问题研究<br>.....                   | 黄永健 毛继新 张燕菁     | (528) |
| 引黄渠网干支渠分水分沙特性试验研究 .....                        | 谈广鸣 陈 立         | (535) |
| 簸箕李灌区水沙运动规律及泥沙淤积成因<br>.....                    | 王延贵 蒋如琴 李希霞 刘和祥 | (541) |
| 黄河口拦门沙形成及治理问题的研究 .....                         | 焦益龄 王宗波         | (548) |
| 长江黄河垂线流速和含沙量分布规律性的分析 .....                     | 惠遇甲             | (558) |
| 三峡水利枢纽坝区河段河相关系研究<br>.....                      | 梁中贤 郭 炜 魏国远 朱云辉 | (567) |
| 流域环境因素变化对长江中下游河流系统的影响<br>.....                 | 吴伟明 丘凤莲         | (574) |
| 三峡枢纽坝下船闸引航道口门外泥沙回淤二维数模计算<br>.....              | 李国斌 苏宝林 焦志斌     | (580) |
| 山区河流河床组成分布规律与特征 .....                          | 张美德             | (586) |
| 汉道悬移质分沙模型的研究 .....                             | 秦文凯 府仁寿 韩其为     | (595) |
| 环江上游黄土泥流特性的初步研究 .....                          | 冉大川             | (603) |
| 海河口淤泥基本特性试验分析<br>.....                         | 万兆惠 华景生 张相峰 魏玉琴 | (608) |
| 永定新河近期治理后泥沙冲淤的验证计算和预测 .....                    | 潘德嘉             | (614) |
| 西江下游底沙的运动形式与河床演变 .....                         | 陈耀泰             | (619) |
| 红山水库库区冲淤规律分析 .....                             | 李有为             | (625) |
| 杭州湾深水航道疏浚抛泥对挖槽回淤影响分析的一种方法——抛泥质点<br>轨迹线计算 ..... | 金忠贤 黄振兴 魏日征 金雪英 | (632) |

# 第一部分

## 泥沙运动力学与河床演变等



# 欧美泥沙运动研究述评\*

王兆印

宋振琪

(国际泥沙研究培训中心) (山东矿业学院)

## 提 要

本文对近年来欧美学者在泥沙运动方面的研究成果做了概述和评论,包括泥沙运动的基本理论,非恒定流输沙的研究,河道局部冲刷,莱因河人工喂沙,山区河流的阶梯—深潭系统,泥石流与高含沙水流,泥沙与其它学科的相互渗透,地理信息系统,专家系统和人工智能的应用,泥沙数学模型,环境保护中的泥沙问题,湿地的保护等。最后,文章对未来泥沙运动研究的方向做了分析。

## 一、绪 论

泥沙运动力学的基本构架是欧美学者建立起来的。但是近二十年来,欧美学者没有影响深远的重大发现。而在这同一时期,中国学者在高含沙水流和泥沙模型试验研究方面非常活跃,取得了令人瞩目的成就。这样就造成中国学者不够重视欧美泥沙科学的进展,对国外泥沙研究的介绍不足的状况。实际上,泥沙科学经历了几十年的积累,将要发生质的飞跃。欧美不少学者已经认识到这一点,并在积极地做着准备。此时,对欧美学者近年来的工作进行概述和评论,指出值得中国学者学习和借鉴的地方,并且对未来泥沙科学的发展方向 and 生长点进行预测分析,是非常必要的。下面我们分专题介绍欧美学者的成果,有些专题中国学者也在平行地做着工作,也有些专题,如人工喂沙, Step-Pool System, GIS 和人工智能在泥沙运动研究中的应用等,国内还没有相应成果的报道。

## 二、泥沙运动理论方面的工作

挟沙水流的垂向流速分布一直是泥沙学者们关心的问题。五十年代学者们发现挟沙水流仍服从对数公式,但卡门常数随某种与泥沙有关的参数而变化。1981年 Coleman 引入 Coles 的尾流函数,提出挟沙水流流速分布服从如下尾流定律<sup>[1]</sup>:

$$\frac{u_{max} - u}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{\delta}{y} + \frac{2W}{k} \cos^2 \left( \frac{\pi y}{2\delta} \right) \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金委资助项目, 编号59425005

式中  $u$  为流速,  $U_*$  为摩阻流速,  $\delta$  为边界层厚度,  $y$  为距床面距离,  $k$  为卡门常数,  $W$  为尾流系数。Coleman 认为挟沙水流中卡门常数与清水中相同, 仅尾流系数  $W$  随含沙量而变化。这个理论有如下几个缺点: (1) Coles 提出的尾流函数(方程(1)右边第二项)是在气流边界层实验基础上得到的<sup>[2]</sup>, 他解释这个函数代表了气流在发生边界层分离的地方的流速分布, 与当地边界摩擦无关, 系上游流动之尾流。他得到的尾流系数  $W = 0.55$ 。由于在对数流速分布中加上了尾流函数一项, 流速分布曲线在边界层外区流速值比对数流速分布偏大, 这符合气流边界层的情况。但在明渠流中, 整个流动都在边界层中, 外区的流动速度较对数分布偏小而不是偏大。为解决这一矛盾, Coleman 和一些欧美学者采用最大流速点距床面高程作为边界层厚度<sup>[3]</sup>, 这样做一方面不符合边界层的定义, 另一方面在工程上应用很不方便。(2) 把泥沙对流速分布的影响归结于尾流系数的变化不合理。因为挟沙水流中泥沙浓度和浓度梯度都是在底床附近最高, 泥沙的影响主要在底部, 而尾流系数的影响主要是在上部流区。(3) 即使没有泥沙, 尾流系数也有很大范围的变化。如 Nezu 和 Rodi 得到清水流尾流系数  $W = 0.2$ <sup>[3]</sup>, Coleman 得出  $W$  的平均值为  $0.19$ <sup>[4]</sup>, Steffler 等人得到  $W$  在  $0.08$  和  $0.15$  之间变化, Kirkgoz 则发现  $W = 0.1$ <sup>[4]</sup>, Cardoso 等人得出光滑边界明渠清水流的  $W$  值为  $-0.077$ <sup>[5]</sup>, Kironoto 和 Graf 则发现卵石床面上清水流的  $W$  在  $-0.08$  到  $0.04$  之间<sup>[6]</sup>。更有甚者, Graf 等人在非恒定均匀流试验里, 发现清水流速分布的  $W$  值在  $-1.4$  到  $0.7$  之间变化<sup>[7]</sup>。显然, 尾流系数的变化不是由泥沙来决定的。(4) Coleman 所用资料中, 泥沙含量较低, 大量含沙量较高的资料证明, 流速分布明显不同于清水流, 其卡门常数明显小于  $0.4$ , 流速分布的这种变化不可能用尾流系数的调整来拟合。

由以上评论可见, Coleman 的理论并不代表泥沙运动理论的成功的发展。

泥沙的存在对水流紊动强度的影响是人们关注的另一个问题。在这一问题上, 久已存在着泥沙增强紊动与减弱紊动的争论。对于粘土悬浮液紊动强度减弱这一点, 似乎没有什么异议。但对于无粘性颗粒对紊动强度的影响, 有两种完全不同的看法。Muller(1993)用激光流速仪测量挟带  $2\text{mm}$  泥沙的水流紊动强度, 发现紊动强度比清水流显著增强<sup>[8]</sup>。Tsuji 和 Morikawa (1982) 也用激光流速仪测量水平管道中的气固两相流紊动强度, 采用两种比重为  $1.0\text{ g/cm}^3$  的塑料沙, 粒径分别为  $0.2\text{mm}$  和  $3.4\text{mm}$ , 气流速度在  $6\text{--}20\text{m/s}$  之间。结果挟带  $3.4\text{mm}$  塑料沙的气流紊动强度显著较无颗粒的气流紊动强度大, 而挟带  $0.2\text{mm}$  塑料沙的气流紊动强度反而较无颗粒气流的为小<sup>[9]</sup>。王兴奎和钱宁采用压力式脉动流速仪测量了挟带  $0.15\text{mm}$  天然沙和  $0.26\text{--}1.4\text{mm}$  塑料沙的水流紊动强度, 沙的浓度从  $1\%$  到  $20\%$ , 结果发现挟沙水流的紊动强度显著减弱, 而且含沙量愈高, 紊动强度愈小<sup>[10]</sup>。Lyn(1992)也是采用激光流速仪研究了挟带  $0.15\text{mm}$ 、 $0.19\text{mm}$  和  $0.24\text{mm}$  的水流紊动强度。由于他所用的含沙量不到  $0.2\%$ , 所测紊动强度与清水的差别不大<sup>[11]</sup>。王兆印和拉尔森研究了挟带  $1.5\text{mm}$  石英沙的水流和粘土悬浮液的湍流结构, 这些颗粒在水流中都作推移质运动。结果发现挟带推移质的流动紊动强度显著增大, 而时均流速明显减小<sup>[12]</sup>。他们指出, 推移质从时均流动中吸收能量, 将其中一部分转化为紊动, 所以推移质输沙率愈高, 紊动强度愈大, 而时均流速愈小。作者曾与瑞士的 Muller 博士交换意见, 证实了他的试验中沙粒都作推移质运动, 所以紊动强度增大<sup>[8]</sup>。

由此可见, 无粘性沙对水流紊动强度的影响分为两种: (1) 如果颗粒较粗, 在水流中作

推移质运动, 则吸收时均运动能量, 并将能量转化为紊动, 使紊动强度增大; (2) 如果颗粒较细, 在水中悬移运动, 则吸收紊动能量, 使紊动强度减弱。

关于河床演变的理论上的工作, 应该提到的有 G.Park(1983), Richards(1976), 和杨志达的工作。1983 年 Parker 根据 Englund 的弯道水流的动平衡解和凹岸侵蚀方程, 求出了弯道外形在蠕动中保持不变的解<sup>[13]</sup>。

$$\varphi = \varphi_0 \sin \psi + \varphi_0 \left[ \frac{\sin \psi}{192} + \frac{\sqrt{2(A + F_r^2)}}{128} \cos 3\psi \right] \quad (2)$$

式中  $\varphi$  为方向角,  $\psi$  为相角,  $F_r$  为福氏数,  $A$  为反映环流对凹岸冲刷的常数。式(2)是一个向一侧偏转的正弦派生曲线, 似乎比正弦派生曲线更符合弯曲河道形状。

冲积河流常呈现浅滩与深槽相间的地形, 例如长江的川江河段就有明显的这种特征。Richards 从 Yalin 对大尺度漩涡水流脉动与床面形态的关系推理分析, 认为流速场的脉动对浅滩-深槽河床形态起着决定性作用。基本流速场的脉动周期为  $2\pi B$ , 其中  $B$  为河宽。因而, 浅滩之间的直线距离为  $2\pi B$ <sup>[14]</sup>。这个理论与河流实际情况比较吻合。

杨志达用变分极小化理论论证其最小能耗原理, 得出  $QJ = \text{Minimum}$  的河床演变规律<sup>[15]</sup>。但是对于他的理论, 一直存在一些不同意见。武汉水利水电学院的韦直林对此做过评论<sup>[16]</sup>。

### 三、非恒定输沙的研究

泥沙运动力学的主要理论和公式, 都是在恒定均匀流条件下建立起来的, 而在自然条件下, 泥沙都是在非恒定非均匀流中输送的。随着人们认识的深化和泥沙运动力学应用领域的拓宽, 这个矛盾愈来愈突出。近年来, 欧美学者认识到研究非恒定流输沙的重要性, 正在组织和加强这方面的工作。Plate (1994) 指出<sup>[17]</sup>, 现在泥沙运动公式计算结果与观测结果差别较大, 主要原因可能就是用恒定流得出的泥沙公式计算非恒定流的泥沙运动所致。例如流量, 流速大时床沙质就可能成为冲泻质, 反之亦然, 这使得泥沙运动规律在流量剧烈变化时有很大不同。因此, 必须研究非恒定流中泥沙运动的特殊规律。

从 1992 年开始, 欧洲的一些学者组织实施了一个称为 "Euroslope" 的项目, 研究山区洪水期泥沙的运动及山坡的稳定性, 德、法、瑞、意、荷五国的学者参加了这项研究。后来, 这个项目进一步扩大, 又建立了名为 "Eurochannel" 的平行项目。在这两个项目支持下, 一些非恒定流输沙的研究开展起来了。例如阿尔卑斯山北麓的 Lainbach 河, 德国学者投入了大量人力物力对这条山区小河的洪水期泥沙运动及相应的河床演变做了系统地研究。Lainbach 河推移质主要是冰渍物, 年均流量仅  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , 但 1990 的一次暴雨造成流量达  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  的洪水。德国学者的研究包括用装有 6 个压力传感器的人造大卵石研究洪水时大卵石受到的升力和推力<sup>[18]</sup>; 用垂帘式格栅测量和研究固定断面在洪水期的糙率变化<sup>[19]</sup>; 用不同形状不同尺寸的人造染色大卵石研究形状和大小对卵石在洪水中运行距离的影响; 利用装有无无线电发射器的大卵石研究卵石推移质的运动步长和间歇时间<sup>[20]</sup>, 他们发现, 随着水流强度的迅速增大, 升力与拖曳力之比从 0.7 增到 1.5, 卵石推移质运动

步长大致服从伽马分布。

关于非恒定流输沙的一项重要活动中德非恒定流输沙研究队伍的组织和合作。1994年6月在德大众汽车公司资助下,中德学者在北京举行了首次“中德非恒定输沙学术讨论会”。会后,德方学者11月聚会 Koblenz, 讨论通过了成立德中非恒定流输沙研究队伍,定名为“German-Sino Unsteady Sediment Transport”, 简称 GESINUS。1995年3月,中方学者组织了相应的非恒定流输沙研究队伍-SINGEUS。中德合作研究非恒定流输沙,已引起了欧洲其他国家学者的注意。意大利、荷兰、奥地利和法国的学者先后表示希望加入这项合作。今年11月, GESINUS 将在柏林举行第二次协调会,除了中方的协调员,还将有以上几个国家的观察员参加。

非恒定流输沙的试验室研究已经在欧美开展。Griffiths 和 Sutherland(1977)研究了行波对推移质输沙率的影响,他们发现,在平衡状态,非恒定流的输沙率与恒定流的相同<sup>[21]</sup>,但是 Susezka (1987)分析了他们的资料,指出他们试验中水流的非恒定性太小,所以推移质输沙率显示不出差别<sup>[22]</sup>。Graf 和 Suszka (1987)采用 12.2mm 和 23.5mm 的均匀卵石,研究了它们在恒定流和非恒定流条件下的推移质输沙率,发现它们之间有明显差别,这个差别依赖于如下定义的水流非恒定性参数<sup>[23]</sup>:

$$\Gamma = \frac{\Delta H}{\Delta t} \frac{1}{U} \quad (3)$$

其中  $\Delta H$  为水深差,  $\Delta t$  为时间差,  $U$  为平均流速条件下的摩阻流速。宋天成研究了加速流和减速流中明渠流速分布,紊动强度分布及雷诺应力分布<sup>[24]</sup>。这些成果为进一步研究非恒定流输沙奠定了基础。王兆印等人进一步研究了非恒定非均匀流中的泥沙运动和河床演变,发现河床变形对流量变化的响应有一定的迟滞,这种迟滞与床沙组成有关,据此提出了河床惯性的概念,定义为<sup>[25]</sup>:

$$I_b = \frac{g_b - g_{bin}}{dD/dt} \quad (4)$$

其中  $g_b$  为水流推移质挟沙力,  $g_{bin}$  为进入河段的推移质输沙率,  $dD/dt$  为河床冲刷率。床沙较粗的河床惯性大,粒径范围大的床沙组成,在冲刷过程中形成粗化保护层,其河床惯性比均匀床沙的为大。

#### 四、山区河流的阶梯—深潭系统

山区河床常常由一段陡坡与一段缓坡加深潭相间连接而成,如图1所示。这就是 Step-Pool System, 或译成阶梯-深潭系统。早在1957年, Lepold 和 Wolman 就注意到这种河流地貌特征。但这个名词却是80年代才出现的。Judd 于1964年称这种地貌为“Steps”, 1966年 Wertz 称其为“Series of small waterfalls and intervening plunge Pools”, 1978年 Newson 和 Harrison 称其为“Falls and Pools”, 1981年 Heede 称其为

"Gravel bars", 到 1982 年, Whittaker 和 Jaeggi, 1985 年 Petts 和 Foster 都称为 "Step-Pool System", 其后这个名词为人们广泛接受<sup>[26]</sup>.

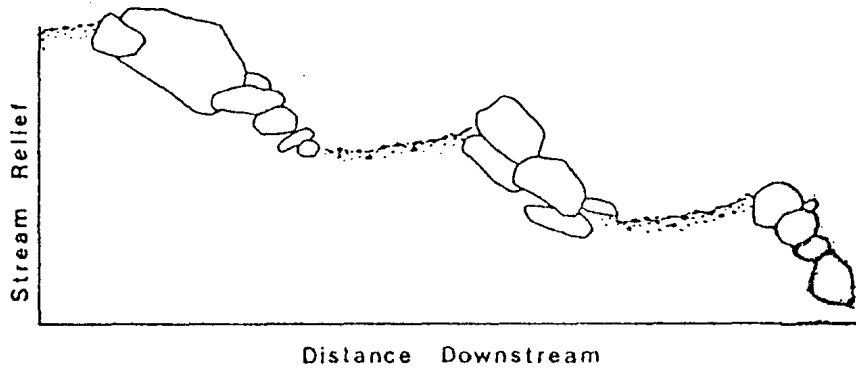


图 1 Step Pool System 示意图

美国加州的 Santa Monica 山的 Step-Pool 的平均长度为河宽的 1.9 倍, 而在新西兰平均长度为 2.7 倍的河宽. Grant 等(1990)想找出一个 Step-Pool 的平均长度与河宽的通用关系<sup>[27]</sup>, 但没有成功. 另一方面, Judd 得出了一个平均长度  $L$  与坡降  $J$  和床面糙率高度  $K_s$  的关系<sup>[28]</sup>:

$$L = \frac{K_s}{cJ^n} \quad (5)$$

其中  $c$  和  $n$  为常数. Whittaker(1987)利用实测资料确定了其中的常数, 得出<sup>[29]</sup>

$$L = \frac{0.3113K_s}{J^{1.188}} \quad (6)$$

此式回归系数可达 0.6783. Rosport(1994)利用 1-65mm 卵石和坡降可达 10% 的陡槽研究了 Step-Pool System, 发现 Step-Pool 的平均长度还与单宽流量有关. 随着单宽流量的增加, 平均长度逐渐增大, 但达到一极值后又迅速下降<sup>[30]</sup>.

许多研究者对 Step-Pool System 的形成机理进行了研究. 他们发现, Step-Pool 是在福氏数大于 1 时才出现. 因而 Step-Pool System 仅在山区河流发育. 急流形成的驻波下游受到强烈冲刷, 渐渐形成深潭, 而冲刷下来的石块又堆积在一起造成另一个驻波. 于是一串陡坡和深潭的河床地貌就形成了<sup>[27, 31]</sup>. 另一方面, Step-Pool 与河床卵石大小组成密切相关. 一般说来, 陡坡段的河床组成比深潭段粗大得多. 从支流来的大滚石进入河流后, 不能被水流带走, 拦挡上游下来的卵石形成阶梯. 这些卵石常排列有序形成肋状.

因此, Step-Pool System 在有粗大卵石的河流里才能发育, 一般要求最大卵石直径不小于水面宽的十分之一。

观测发现在低流量时陡槽段和深潭段的床面剪力是相等的。这是因为陡槽段水浅, 抵消了坡降增大的作用。但在洪水期, 陡槽段河床剪力大得多。一般说来, 深潭段的泥沙运动及推移质与床沙的交换较强烈, 而陡坡段较稳定<sup>[32]</sup>。Step-Pool System 的发育表明卵石来量小于水流的挟沙力, 是水流挟沙力不饱和的象征<sup>[33]</sup>。实际上, 在试验中观测到, 如供给充分的沙和卵石, Step-Pool System 就不能很好地发育。

Step-Pool System 的发育大大增强了床面的稳定性。Rosport 在试验中发现发育良好的 Step-Pool System 能抵抗较大的流量冲刷, 这是由于一系列的 Step-Pool 构成一串消能池, 减小了水流冲击床沙的能量<sup>[30]</sup>。

## 五、河道冲刷和局部冲刷

在欧美发达国家里, 大多数河流上都兴建了许多水库, 不少河流也被完全或部分渠化。河流不再能自由摆动。从水库排下的清水没有足够的泥沙挟带, 只能冲刷河床以满足其挟沙力。因此, 欧美的主要泥沙问题是水流冲刷河床造成的。由于这些问题直接与生产建设和安全有关, 所以受到广泛重视。这方面的研究成果很多, 例如在 1993 年美国 ASCE 的水利工程年会上, 就有 79 篇关于冲刷问题的论文报告。大会安排了 12 个分会场次讨论冲刷问题。又例如国际水利学会的 <<Hydraulic Research>> 期刊, 1992 年到 1994 年共发表了 121 篇论文, 泥沙方面的论文 25 篇, 其中有 6 篇是专门研究冲刷问题的。

美国加州格林县的石头河, 由于上游修建的防洪工程和人工取沙, 减少了泥沙来量, 下游河道发生冲刷。特别是桥墩冲刷威胁到桥梁的安全。32 号高速公路桥处, 河床冲深了 16 英尺, 使桥墩支撑桩暴露出床面<sup>[34]</sup>。另一个例子是依阿华州的托普森河。1992 年 9 月 14--15 日一场强烈的暴雨, 产生了  $1930 \text{ m}^3/\text{s}$  的大洪水, 超过百年一遇的洪水流量。国家 2 号公路桥的左桥台被冲走, 桥台支撑桩暴露出床面 3 米<sup>[35]</sup>。

在华盛顿洲, 联邦公路管理局调查了 1500 个河流公路桥, 其中 500 多处受到冲刷的严重威胁<sup>[36]</sup>。在整个美国, 到 1991 年共建了 50 万座河流公路交叉桥。其中 823 座倒塌了。Shirole 和 Holt 的一项调查说明这些倒塌的桥中, 60% 是由于水流冲刷造成的。特别是纽约洲 1987 年 4 月 5 日发生的 Schohaie Creek 桥和 1989 年 4 月 1 日田纳西洲的 Hatchie 河大桥的倒塌引起了全美国人民的注意<sup>[37]</sup>。另一项关于不同河床质的桥墩冲刷报告指出, 在所调查的总计 876 座桥中, 在淤泥河床质河流上建的桥只有 17.4% 的桥墩被冲刷暴露出根部, 沙质河床的则有 25.6% 桥墩根部被冲刷暴露, 卵石河床上 36.8%, 大卵石河床上 30.8% 被冲刷暴露<sup>[38]</sup>。从这个结果看似卵石河床上桥墩最容易冲刷暴露, 沙质河床虽然易被冲刷, 但沙质河床上的桥墩被冲刷暴露的比例反而较小。这是因为沙质河床的河流坡降较小, 而冲刷产生的孔洞常被上游下来的沙子重新充填的缘故。

关于河道冲刷的一个重要的例子是德法之间的莱茵河。由于河道完全渠化, 上游来沙被闸堰堤坝拦住, 水流挟沙力显著不饱和, 因而冲刷河床下切。两岸地下水位下降, 航运和两岸建筑的安全受到了威胁。人们只好采用人工喂沙的方法来维持平衡。在下一节中我