

# 高含沙水流运动

清华大学水利系泥沙研究室

钱 宁 主编

816

清华大学出版社

国家自然科学基金资助课题

# 高含沙水流运动

清华大学水利系泥沙研究室

钱 宁 主编

清华大学出版社

## 内 容 提 要

本书主要汇集了清华大学水利系泥沙研究室在钱宁教授指导下取得的科研成果。内容包括高含沙水流形成的条件,高含沙水流的物理特性(颗粒组成、絮凝与沉降特性、流变特性等),高含沙水流的流动特性、运动模式,高含沙水流的运动机理(悬移质、层移质以及泥石流运动机理)等。书中还论述了高含沙水流对河床演变的影响和管道高浓度输送问题,在进行理论探讨的同时,也注意到密切联系实际应用。事实上,本书已涉及到水利部门以外的其他固液两相流应用领域,是一部具有交叉学科性质的专著。

本书可作为水利、环境、地理、冶金、矿业等有关专业科技人员的进修读物和研究生教材。

2050/28

## 高 含 沙 水 流 运 动

清华大学水利系泥沙研究室

钱 宁 主编

责任编辑 姚美瑞

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平振南排版厂排版

北京市人民文学印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 334千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数: 0001-1500

ISBN 7-302-00509-5/TV·7 (平) 定价: 7.00 元

ISBN 7-302-00508-7/TV·6 (精) 定价: 9.50 元

## 前 言

我国黄河上、中游绝大部分河流汛期的含沙量都非常高，有的支流年平均含沙量可以达到五百公斤每立方米以上，一场洪水的最大含沙量有达到一千五六百公斤每立方米的。这种大面积的高含沙水流在国外很难见到，因而它为我国开展高含沙水流运动的研究提供了独特的优越条件。

含沙量这样高的水流与一般挟沙水流在性质上有很大的不同，在生产上也带来一系列特殊问题。1977年黄河下游通过高含沙洪水所引起的水位异常涨落和河道剧烈冲刷现象，从防洪的角度突出了高含沙水流的重要性。出于治黄的考虑，有些同志提出利用高含沙水流挟沙能力大的特点，减少河道淤积，把泥沙输向远处进行两岸放淤的设想。鉴于高浓度固体输送在管路物料运输中已成为习用的手段，人们没有理由怀疑同样的方法不能在明渠中应用。事实上，在西北地区的引洛、引泾、引渭等大型灌区，由于灌溉引水的需要，早已突破了沿用已久的禁引重量比含沙量超过15%（折合167公斤每立方米）浑水的清规戒律。另一方面，由于山区面积很大，地质构造复杂，加上适宜的地形和气候条件，使我国成为世界上泥石流较为发育的国家之一，山区人民受泥石流的危害很大。为了更好地解决这些从生产中提出来的问题，必须首先对高含沙水流的运动特性和机理有所了解。

水流挟带了大量泥沙以后，其特性发生了根本性的变化，这就使高含沙水流的运动机理和普通挟沙水流有所不同。从这个角度进行研究，不仅可以大大丰富泥沙运动力学的内容，而且有助于我们深入了解某些内在规律。自然界中的高含沙水流现象是普遍存在的，除了这里所说的河流高含沙水流及泥石流以外，滨海地区的高浓度浑浊流、管路水力输送中的高浓度相运动，也都属于这一类型。揭示高含沙水流运动的物理本质，找出不同类型运动的特殊性和共性，将会促进邻近学科领域的共同发展。

早在六十年代，水利水电科学研究院河渠研究所与黄河水利委员会合作，先后在渭河南河川水文站及无定河丁家沟水文站进行了高含沙水流测验，这是迄今为止最完整的一套野外河道资料。七十年代以后，生产部门从高含沙水流灌溉及管道高浓度相运动两个不同的侧面对高含沙水流运动的研究提出了要求，对后者起到了有力的推动作用。一方面在引洛、引渭灌区开展了系统的渠道高含沙水流观测研究，另一方面，从黄河水利科学研究所和水利电力部十一工程局合作开始，不少单位陆续在室内对高含沙水流的运动及流变特性进行了试验。1985年9月在北京召开的国际高含沙水流运动学术讨论会上，我国学者提交了十八篇论文，集中反映了在这方面所取得的巨大成就。

清华大学是在七十年代后期开始从事高含沙水流运动研究的。1977年10月在兰州召开的黄河干流大型水库泥沙观测研究成果交流会上，我们提交了题为“西北地区高含沙水流运动机理的初步探讨”一文（钱宁，1980）。从现在看来，尽管限于当时所掌握的资料，论文中未考虑伪一相流的情况，观点不够全面，但仍不失为对高含沙水流运动机理探索的第一次有益的尝试。尔后，出于研究管路长距离输送煤浆的需要，我们对高含沙水流流变特性及泥沙沉降特性作了较细致的研究，取得了很多重要成果。与此同时，还着手对粗颗粒

高含沙两相流以及粘性颗粒对两相流的影响进行了较系统的试验,进一步揭示了运动的内在机理。从1980年开始,清华大学水利系泥沙研究室的师生(包括和外单位合作的课题在内)在学术刊物和国际学术交流会上,共发表了有关高含沙水流运动的论文20余篇,本书就是在这些论文的基础上编写的。

本书的结构是这样安排的:首先介绍了黄河干支流高含沙水流运动的一般概况,并提出了运动的几种基本模式,以期和后面的内容相呼应。第二章讨论了降雨以后,在流域坡面上是如何形成高含沙水流的,以及高含沙水流从各级沟道向河流汇流过程中所发生的一些变化及调整过程,说明高含沙水流所以能在较小的比降下流动的原因。鉴于粘性颗粒泥沙在形成高含沙水流中所起的决定性作用,在第三章扼要论述了粘性颗粒泥沙的絮凝现象,为更好地理解高含沙水流的物理特性提供理论基础。第四、五两章分别介绍了高含沙水流的粘性及泥沙沉降特性,第六、第七章分别探讨了高含沙水流的流动特性及运动机理,这四章是全书的主体。第八章对高含沙水流运动的研究在生产中的应用作了一些说明,限于我们的经验,这方面的材料是极不全面的。最后对全书的主要内容作了概括,对今后的工作提出了瞻望。

本书主要是根据清华大学水利系泥沙研究室的研究成果编写的,其中也包括我室教师在北京水利水电科学研究院指导研究生所完成的论文内容。凡有引用国内外其他单位研究成果的,都在行文中注明了出处。本书各章节的主要编写人如下:

前言、第一章:钱宁;第二章:钱宁、王兴奎;第三章:夏震寰;第四章:费祥俊(其中,紊动对流变特性的影响部分由杨美卿编写);第五章:夏震寰、宋根培;第六章:钱宁;第七章:钱宁;第八章:张仁、费祥俊;第九章:钱宁,由钱宁对全书作最后的协调和汇总\*。

从1982年开始,这一项目的部分研究得到科学院科学基金的资助。

钱 宁

1986年于清华园

---

\* 前言成文较早,钱宁教授因患癌症未能编完此书便不幸早逝,后续工作由费祥俊教授完成,详见本书后记。

# 目 录

## 前言

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第一章 黄河干支流的高含沙水流    | 1  |
| 第一节 概况             | 1  |
| 一、黄河干支流高含沙水流的地区分布  | 1  |
| 二、高含沙水流的物质组成       | 5  |
| 第二节 运动的基本模式        | 7  |
| 一、泥沙颗粒的运动形式        | 7  |
| 二、泥沙运动模式的发展        | 8  |
| 三、决定高含沙水流运动模式的主要因素 | 10 |
| 四、黄河流域高含沙水流的运动模式   | 11 |
| 小结                 | 11 |
| 第二章 高含沙水流的形成及汇流过程  | 13 |
| 第一节 高含沙水流的形成及汇流    | 13 |
| 一、黄土丘陵沟壑区的特点及资料来源  | 13 |
| 二、坡面产沙机理           | 14 |
| 三、沟道的产沙与汇流过程       | 17 |
| 第二节 高含沙水流的几个特点     | 18 |
| 一、高含沙水流的极限含沙量      | 18 |
| 二、流量-含沙量在时间上的对应关系  | 19 |
| 三、流量-输沙率关系         | 20 |
| 四、悬移质级配的调整         | 21 |
| 小结                 | 24 |
| 第三章 粘性颗粒泥沙的絮凝现象    | 25 |
| 第一节 絮凝的理论基础        | 25 |
| 一、范德华引力            | 25 |
| 二、双电层斥力            | 26 |
| 三、颗粒间的粘着力          | 27 |
| 第二节 絮凝的发育过程        | 29 |
| 第三节 影响絮凝的因素        | 32 |
| 一、粘性矿物的组成          | 32 |
| 二、水质和温度            | 34 |
| 三、水的流动             | 35 |
| 小结                 | 36 |
| 第四章 高含沙水流的粘性       | 38 |
| 第一节 固体悬浮液的流型曲线     | 38 |
| 一、与时间无关的流型曲线       | 38 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 二、与时间有关的流型曲线·····          | 40         |
| 第二节 悬浮液的粘滞系数·····          | 41         |
| 一、粘性颗粒悬浮液的粘性·····          | 41         |
| 二、高含沙水流的粘滞系数(刚度系数)·····    | 43         |
| 第三节 高浓度悬浮液的宾汉极限剪切力·····    | 49         |
| 一、悬浮液宾汉极限剪切力的产生原因·····     | 50         |
| 二、从牛顿体向宾汉体过渡时的临界浓度·····    | 50         |
| 三、悬浮液宾汉极限剪切力的表达式·····      | 51         |
| 四、紊动条件下宾汉极限剪切力的变化·····     | 53         |
| 第四节 高含沙水流粘性试验·····         | 57         |
| 一、毛细管粘度计的基本原理·····         | 57         |
| 二、毛细管粘度计的装置·····           | 60         |
| 三、毛细管粘度计的率定·····           | 62         |
| 四、转筒式粘度计的基本原理·····         | 65         |
| 五、两种粘度计的比较·····            | 68         |
| 第五节 泥石流的粘性及其测定·····        | 71         |
| 一、泥石流的粘滞系数·····            | 72         |
| 二、泥石流的宾汉极限剪切力·····         | 75         |
| 小结·····                    | 77         |
| <b>第五章 泥沙的沉速·····</b>      | <b>79</b>  |
| 第一节 非粘性粗颗粒泥沙的群体沉速·····     | 79         |
| 一、群体沉速公式·····              | 79         |
| 二、实验资料的检验·····             | 80         |
| 三、 $m$ 值的变化·····           | 81         |
| 四、颗粒相互影响的讨论·····           | 82         |
| 第二节 粘性颗粒泥沙的群体沉速·····       | 83         |
| 一、离散絮团的沉降·····             | 84         |
| 二、絮网结构体的沉降·····            | 85         |
| 第三节 非粘性粗颗粒在絮凝体中的沉降·····    | 88         |
| 一、粗颗粒和离散絮团的沉降·····         | 89         |
| 二、粗颗粒在絮网结构体中的沉降·····       | 91         |
| 第四节 混合沙的沉速·····            | 96         |
| 一、混合沙的沉降特性·····            | 96         |
| 二、混合沙的代表沉速·····            | 98         |
| 三、混合沙沉速随浓度的变化·····         | 100        |
| 四、悬浮液中各级粒径的粗颗粒的沉速·····     | 101        |
| 小结·····                    | 101        |
| <b>第六章 高含沙水流的流动特性·····</b> | <b>104</b> |
| 第一节 伪一相流的流动特性·····         | 104        |
| 一、流速分布·····                | 104        |
| 二、阻力损失·····                | 107        |
| 三、伪一相流从层流到紊流的过渡·····       | 114        |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 四、减阻问题               | 117 |
| 五、流动的不稳定现象           | 118 |
| 第二节 紊流型两相高含沙水流的流动特性  | 119 |
| 一、粗颗粒-清水两相高含沙水流的流动特性 | 119 |
| 二、粗颗粒-泥浆两相高含沙水流的流动特性 | 127 |
| 三、天然河道实测高含沙水流流动特性    | 130 |
| 小结                   | 131 |
| 第七章 高含沙水流的运动机理       | 134 |
| 第一节 悬移质的运动机理         | 134 |
| 一、悬移质的垂线分布           | 134 |
| 二、天然高含沙水流的悬移质运动规律    | 139 |
| 第二节 层移质的运动机理         | 140 |
| 一、层移质运动的试验           | 141 |
| 二、层移质运动的物理图形         | 142 |
| 三、层移质运动的速度及阻力        | 145 |
| 四、层移质挟沙力             | 149 |
| 第三节 泥石流的运动机理         | 150 |
| 一、泥石流的成因             | 150 |
| 二、泥石流的运动特征及物质组成      | 151 |
| 三、水石流及稀性泥石流的形成条件     | 154 |
| 四、粘性泥石流运动机理          | 156 |
| 五、泥石流运动的速度与阻力        | 160 |
| 小结                   | 163 |
| 第八章 高含沙水流运动研究的应用     | 166 |
| 第一节 天然河道和明渠中的高含沙水流运动 | 166 |
| 一、高含沙水流通过河道时的泥沙分选现象  | 166 |
| 二、高含沙水流的河床演变特性       | 169 |
| 三、高含沙水流长距离稳定输送的条件    | 173 |
| 第二节 管道固体高浓度输送        | 176 |
| 一、管道固体输送的基本形式        | 177 |
| 二、以清水为液相的管道的阻力       | 180 |
| 三、以浆液为液相的管道的阻力       | 181 |
| 四、浆体管道的固体颗粒组成及输送浓度   | 188 |
| 小结                   | 192 |
| 第九章 结束语              | 194 |
| 后记                   | 197 |
| 参考文献                 | 198 |
| 常用符号索引               | 205 |

# 第一章 黄河干支流的高含沙水流

## 第一节 概 况

### 一、黄河干支流高含沙水流的地区分布

黄河中游因地表物质组成的不同，可以区分为粗泥沙来源区及细泥沙来源区，这两个地区所形成的高含沙水流在性质上有所不同。

#### 1. 粗泥沙来源区

黄河泥沙主要来源于中游黄土地区。这里新黄土分布十分广泛，其粒径组成具有明显的分带性：从西北向东南中值粒径从大于 $0.045\text{mm}$ 逐步减小到小于 $0.015\text{mm}$ ，参见图1.1(刘东生等，1964)。在皇甫川、窟野河以及无定河、北洛河、马莲河的河源区，新黄土中值粒径为 $0.045\text{mm}$ ，而在渭河上游中径则减少到 $0.015\text{mm}$ 左右。

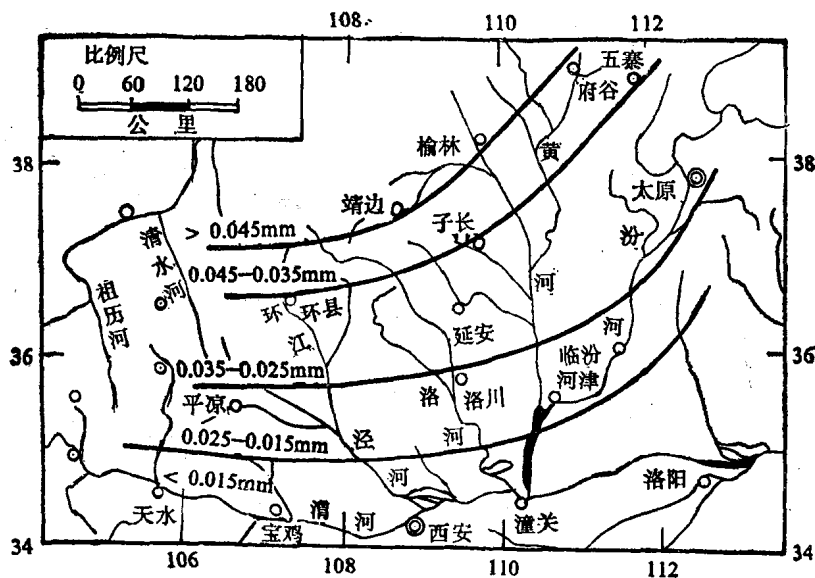


图 1.1 黄河中游新黄土中径变化图

根据1956~1963年各水文站的输沙量资料，参照野外实际情况，黄河水利委员会曾绘出黄河中游输沙模数图，如图1.2(钱宁、王可钦等，1980)。如以输沙模数大于 $10,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ (吨每平方公里年)的地区作为泥沙来量较多的区域，则这样的地区共有三片：

A区 河口镇至清涧河之间的晋陕间支流，

B区 无定河(主要指支流红柳河、芦河、大理河)、清涧河、延水、北洛河以及泾河的支流马莲河的河源地区，亦即广义的白于山河源区，

C区 渭河上游北岸支流，包括葫芦河的中下游、散渡河等，

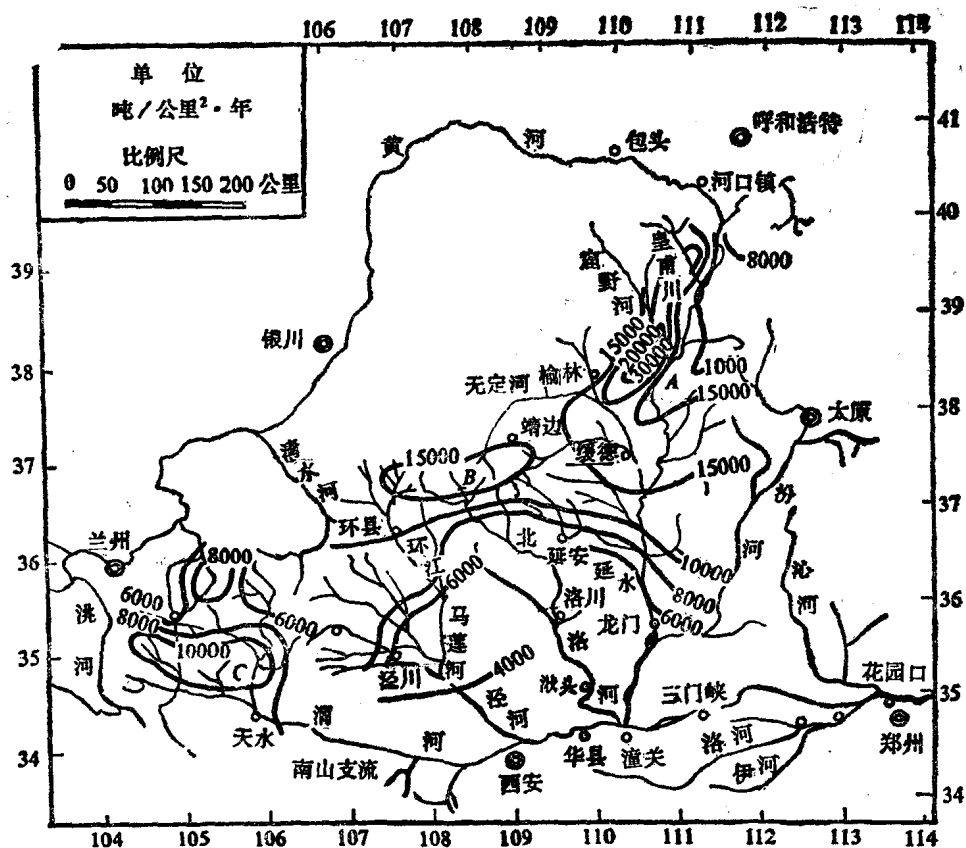


图 1.2 黄河中游1956~1963年输沙模数图

这三个地区的产沙强度依次递减,最大可达到 $30,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

根据输沙模数图及同一时期各水文站的悬移质级配资料,可以绘出粗泥沙(指大于 $0.05\text{mm}$ 的泥沙)输沙模数图,如图1.3。由图可知,大于 $0.05\text{mm}$ 的较粗泥沙,来源主要集中到两个地区:

**A区** 河口镇至无定河的右岸支流。其中,皇甫川至秃尾河的中下游地区的粗泥沙输沙模数达到 $10,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,无定河中下游的粗泥沙输沙模数在 $6,000\sim 8,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 之间;

**B区** 广义的白于山河源区。其中,红柳河、芦河、北洛河及马莲河的河源区超过 $6,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

这样,不包括马莲河在内的泾河干支流、渭河上游及汾河,就属于细泥沙来源区。

## 2. 不同泥沙来源区所形成的高含沙水流

表1.1为1962至1971年十年内黄河中游地区高含沙水流出现的次数及实测最大含沙量。在这里我们暂以日平均含沙量大于 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 的作为高含沙水流。表1.2为包括五十年代及七十年代资料在内的十六个水文站(其中分布在粗、细泥沙来源区的各占一半)的实测最大含沙量及多年平均悬移质级配(Long and Qian, 1985)。由表可知:

(1) 高含沙水流的出现次数十分频繁,平均每年都有几次至十次之多。其中,支流的

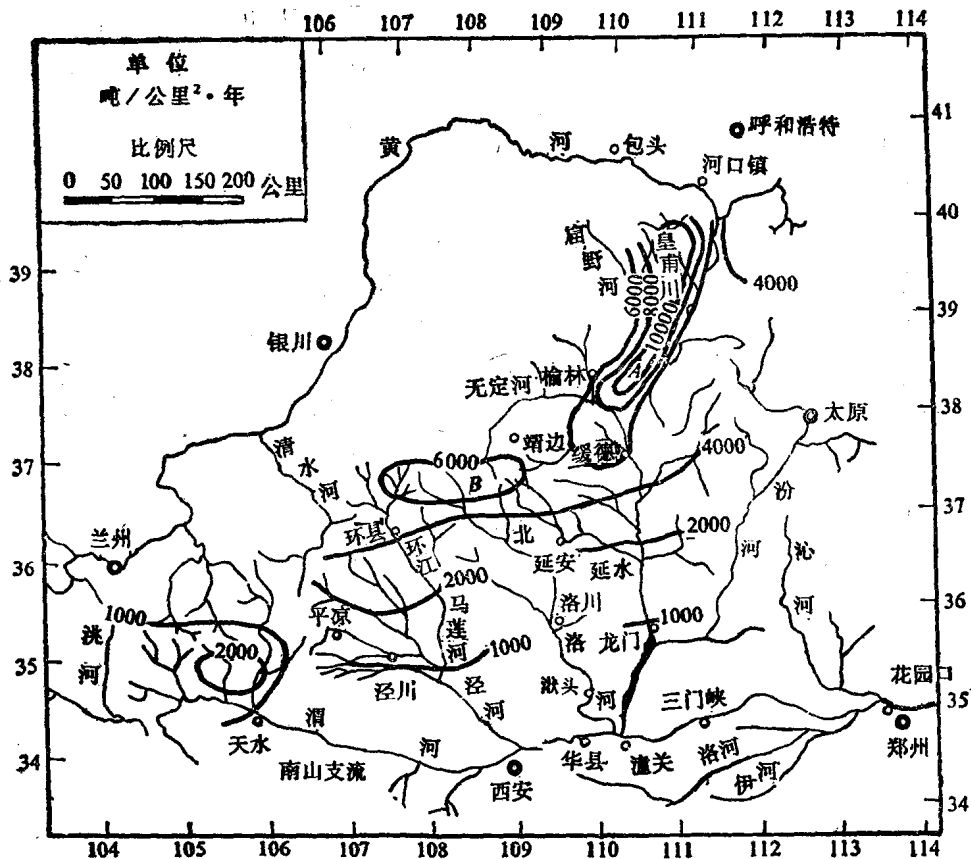


图 1.3 黄河中游1956~1963年粗泥沙输沙模数图

表 1.1 1962至1971年期间黄河中游地区高含沙水流出现  
次数及实测最大含沙量

| 地 区          | 河 流   | 测 站  | 日平均含沙量范围 (kg/m³) |    |         |    |         |    |           |    |        |       | 实测最大           |     |
|--------------|-------|------|------------------|----|---------|----|---------|----|-----------|----|--------|-------|----------------|-----|
|              |       |      | >400             |    | 400~600 |    | 600~800 |    | 800~1,000 |    | >1,000 |       | 单 位<br>(kg/m³) | 年 份 |
|              |       |      | 次数               | 次数 | %       | 次数 | %       | 次数 | %         | 次数 | %      |       |                |     |
| 河龙区间<br>西岸支流 | 皇甫川   | 皇 甫  | 56               | 22 | 39      | 18 | 32      | 12 | 21        | 4  | 7      | 1,480 | 1967           |     |
|              | 窟野河   | 温家川  | 35               | 19 | 54      | 11 | 32      | 4  | 12        | 1  | 2      | 1,500 | 1964           |     |
|              | 无定河   | 川 口  | 56               | 34 | 61      | 19 | 34      | 3  | 5         |    |        | 1,290 | 1966           |     |
|              | 清涧河   | 延 川  | 93               | 39 | 42      | 45 | 48      | 8  | 9         | 1  | 1      | 1,150 | 1964           |     |
|              | 延 水   | 甘谷驿  | 74               | 35 | 47      | 34 | 46      | 4  | 5         | 1  | 1      | 1,210 | 1963           |     |
|              | 乌兰木伦川 | 王道恒塔 | 10               | 3  | 30      | 3  | 30      | 3  | 30        | 1  | 10     | 1,510 | 1966           |     |
|              | 小理河   | 李家河  | 76               | 21 | 28      | 30 | 39      | 23 | 30        | 2  | 3      | 1,220 | 1963           |     |
| 河龙区间<br>东岸支流 | 朱家川   | 后谷村  | 89               | 39 | 44      | 46 | 52      | 4  | 4         |    |        | 1,260 | 1964           |     |
|              | 岚漪河   | 裴家川  | 24               | 20 | 83      | 4  | 17      |    |           |    |        | 923   | 1967           |     |
|              | 湫水河   | 林家坪  | 69               | 60 | 87      | 9  | 13      |    |           |    |        | 960   | 1965           |     |
|              | 三川河   | 后大成  | 22               | 21 | 95      | 1  | 5       |    |           |    |        | 819   | 1969           |     |
|              | 昕水河   | 大 宁  | 22               | 22 | 100     |    |         |    |           |    |        | 741   | 1966           |     |

续表

| 地 区  | 河 流 | 测 站 | 日平均含沙量范围 (kg/m <sup>3</sup> ) |         |         |           |        |    |    |    | 实测最大                 |       |
|------|-----|-----|-------------------------------|---------|---------|-----------|--------|----|----|----|----------------------|-------|
|      |     |     | >400                          | 400~600 | 600~800 | 800~1,000 | >1,000 |    |    |    | 单 位                  | 年份    |
|      |     |     | 次数                            | 次数      | %       | 次数        | %      | 次数 | %  | 次数 | (kg/m <sup>3</sup> ) |       |
| 渭河干流 | 渭 河 | 邱家峡 | 21                            | 17      | 81      | 4         | 19     |    |    |    | 939                  | 1966  |
|      | 渭 河 | 南河川 | 33                            | 29      | 88      | 4         | 12     |    |    |    | 811                  | 1963  |
|      | 渭 河 | 华 县 | 18                            | 16      | 89      | 2         | 11     |    |    |    | 753                  | 1968  |
| 渭河支流 | 散渡河 | 甘 谷 | 92                            | 61      | 66      | 31        | 34     |    |    |    | 980                  | 1969  |
|      | 葫芦河 | 秦 安 | 41                            | 37      | 90      | 4         | 10     |    |    |    | 905                  | 1968  |
| 泾河流域 | 泾 河 | 杨家坪 | 35                            | 34      | 97      | 1         | 3      |    |    |    | 875                  | 1970  |
|      | 泾 河 | 张家山 | 53                            | 36      | 68      | 17        | 32     |    |    |    | 1,040                | 1963  |
|      | 环 江 | 洪 德 | 214                           | 57      | 27      | 82        | 38     | 74 | 35 | 1  | 0.5                  | 1,130 |
|      | 蒲 河 | 毛家河 | 59                            | 49      | 83      | 10        | 17     |    |    |    | 992                  | 1965  |
| 洛河   | 洛 河 | 湫 头 | 110                           | 57      | 52      | 46        | 42     | 7  | 6  |    | 1,090                | 1967  |

注：河龙区间——河口镇~龙门区间

表 1.2 黄河中游粗、细泥沙来源区所形成的高含沙水流

| 泥沙来源区  | 河 流 | 测 站 | 流域面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 输沙模数<br>(t/(km <sup>2</sup> ·a)) | 悬移质级配                   |                 | 实测最大含沙量           |      |                                            |
|--------|-----|-----|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|------|--------------------------------------------|
|        |     |     |                            |                                  | D <sub>50</sub><br>(mm) | 大于0.05mm<br>的 % | kg/m <sup>3</sup> | 出现年份 | 产生最大含沙量<br>的洪水的最大流量<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 粗泥沙来源区 | 皇甫川 | 皇甫  | 3,199                      | 18,060                           | 0.079                   | 58              | 1,570             | 1974 | 1,230                                      |
|        | 孤山川 | 高石崖 | 1,263                      | 22,130                           | 0.046                   | 46              | 1,300             | 1976 | 2,330                                      |
|        | 窟野河 | 温家川 | 8,645                      | 15,270                           | 0.069                   | 56              | 1,500             | 1964 |                                            |
|        | 秃尾河 | 高家川 | 3,253                      | 9,880                            | 0.069                   | 61              | 1,410             |      |                                            |
|        | 葫芦河 | 申家湾 | 1,121                      | 24,980                           | 0.045                   | 44              | 1,480             | 1963 | 1,670                                      |
|        | 无定河 | 川 口 | 30,217                     | 5,270                            | 0.040                   | 37              | 1,290             | 1966 | 4,980                                      |
|        | 大理河 | 绥 德 | 3,893                      | 16,300                           |                         |                 | 1,420             | 1964 |                                            |
|        | 北洛河 | 湫 头 | 25,154                     | 3,810                            | 0.030                   | 22              | 1,190             | 1950 | 346                                        |
| 细泥沙来源区 | 泾 河 | 张家山 | 43,216                     | 5,920                            | 0.025                   | 20              | 1,040             | 1963 | 5,120                                      |
|        | 泾 河 | 杨家坪 | 14,214                     | 6,690                            |                         |                 | 900               | 1979 |                                            |
|        | 渭 河 | 咸 阳 | 46,827                     | 4,060                            | 0.015                   | 13              | 729               | 1968 |                                            |
|        | 渭 河 | 南河川 | 23,385                     | 6,160                            |                         |                 | 953               | 1959 | 4,130                                      |
|        | 蒲 河 | 毛家河 | 7,190                      | 6,580                            |                         |                 | 992               | 1965 |                                            |
|        | 汾 河 | 兰 村 | 7,705                      | 1,860                            |                         |                 | 544               | 1973 | 715                                        |
|        | 汾 河 | 义 棠 | 23,925                     | 597                              | 0.018                   | 17              | 731               | 1953 |                                            |
|        | 泾 河 | 泾 川 | 3,145                      | 6,010                            |                         |                 | 762               | 1973 |                                            |

出现次数及含沙量绝对值均较干流为大，如小理河与干流无定河的对比，葫芦河、散渡河与干流渭河的对比，及环江与干流泾河的对比等。这是因为流域面积增大以后，一部分地区

来沙较少,支流高含沙水流进入干流后受到稀释所致。

(2) 自沙漠地区来的洪水,含沙量都比较低,只有当黄土地区有暴雨时,才会形成高含沙水流。这样的高含沙水流以粘土及细粉砂为骨架,反而较沙漠地区来水能够挟带更多的粗颗粒泥沙。以无定河支流榆溪河为例,流域内大部分为沙漠,只有小部分地区有黄土覆盖,就很难形成高含沙水流。窟野河支流乌兰木伦川的情况也是如此。由于沙漠地区形成不了高含沙水流,这样就使乌兰木伦川出现的高含沙水流次数反不如正川窟野河为多。

(3) 越是泥沙粗的地方,含沙量越大,这和一般挟沙水流迥然不同。就日平均含沙量来看,粗泥沙来源区最高可以达到 $800\text{kg}/\text{m}^3$ 以上,有不少超过 $1,000\text{kg}/\text{m}^3$ 的,而细泥沙来源区则均在 $800\text{kg}/\text{m}^3$ 以下。

(4) 黄河流域高含沙水流的实测最大含沙量大致在 $1,500\sim 1,600\text{kg}/\text{m}^3$ 范围,相当于体积比含沙量 $56.6\sim 60.4\%$ ,重量比含沙量 $77.6\sim 80.1\%$ 。也有个别水文站曾测到较此更高的含沙量,但据现场调查,这些数据的可靠性尚存在一些问题。不同河流的实测最大含沙量与流域内泥沙的粗细也有关系,粗泥沙来源区一般均在 $1,000\text{kg}/\text{m}^3$ 以上,细泥沙来源区则多在 $1,000\text{kg}/\text{m}^3$ 以下。流域内泥沙越粗,水流所能挟带的极限含沙量也越大。

## 二、高含沙水流的物质组成

高含沙水流所挟带的悬移质的物质组成具有如下特点:

(1) 不同地区的高含沙水流悬移质级配差别很大。结合新黄土物质组成的地区分带性,不同地区所形成的高含沙水流的悬移质级配差别很大。图1.4为河(河口镇)龙(龙门)

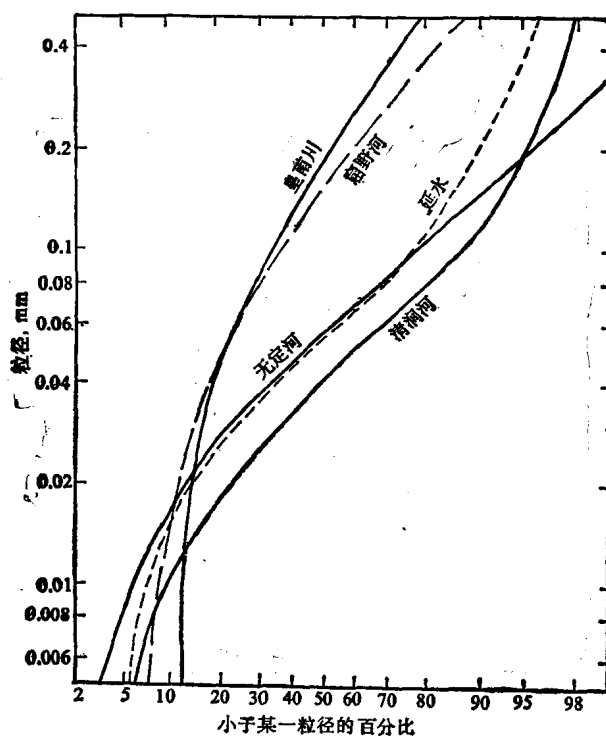


图 1.4 黄河中游河龙区间各支流在含沙量为 $1,000\sim 1,200\text{kg}/\text{m}^3$ 时悬移质级配的对比

区间右岸支流在含沙量为 $1,000\sim 1,200\text{kg/m}^3$ 范围时的悬移质级配。可以看出，悬移质组成由北向南逐渐变细，皇甫川及窟野河所挟带的泥沙的中值粒径分别达到 $0.185$ 及 $0.155\text{mm}$ ，而到无定河及延水，中径降低到 $0.055\text{mm}$ ，清涧河的悬移质中径进一步降低到 $0.042\text{mm}$ 。如果对比粗、细泥沙来源区的河流高含沙水流的悬移质粒径分布，则差别将会更大。应该指出，这里所引用的级配资料均为比重计法的分析成果，近年来改用粒径计法以后，所得级配更粗，这两部分成果未经校正，不能直接比较。

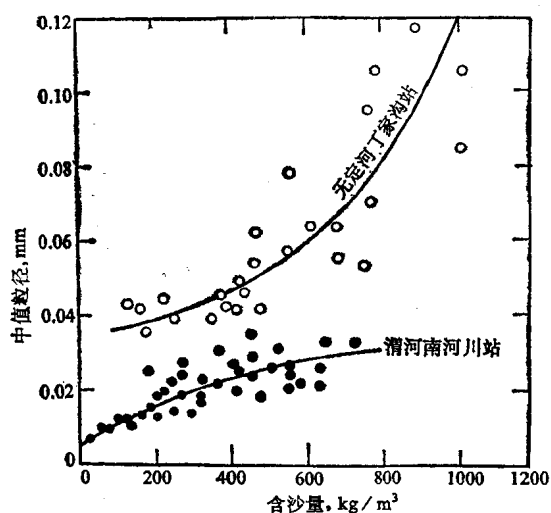


图 1.5 高含沙水流挟带泥沙的中值粒径与含沙量的关系

## (2) 物质组成随含沙量增大而变粗。

对于同一个地区或同一条河流来说，随着含沙量的增大，由于粗颗粒泥沙的沉速大幅度降低，水流中所挟带的粗颗粒泥沙的比例也随之增大，因而泥沙的中值粒径也相应上升，和一般挟沙水流全然两样。图1.5为无定河及渭河含沙量与泥沙中径的关系，充分说明了这一情况。上述趋势在粗泥沙来源区的河流（无定河）较细泥沙来源区的河流（渭河）更为明显。在同一图中，还可以看到粗泥沙来源区河流的悬移质中径要比细泥沙来源区河流的大得多。

## (3) 粘性颗粒\* ( $0.005\sim 0.01\text{mm}$ ) 泥沙的含量不因含沙量的增大而成比例增大。

含沙量增大的过程中，粗颗粒泥沙的含量相应加大，相反地，粘性颗粒泥沙的含量却逐渐趋近于一个定常值。图1.6为皇甫川在不同含沙量下各级泥沙含量的变化，不难看出，含沙量

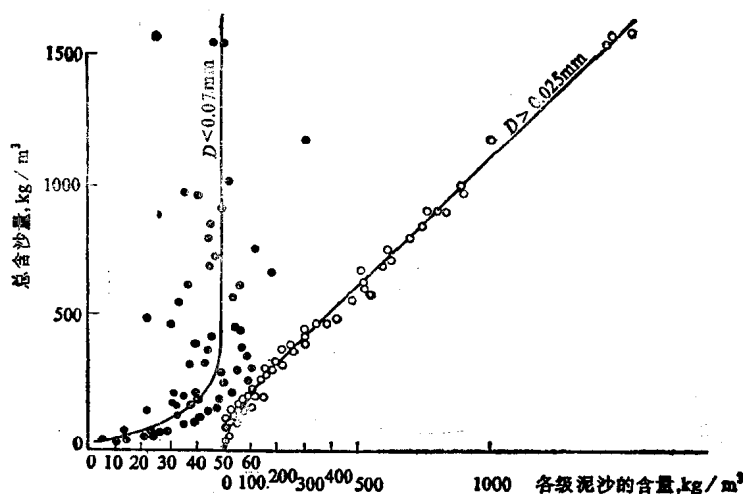


图 1.6 皇甫川在不同含沙量下各级泥沙含量的变化

\* 下文中的“粘性颗粒”均指粒径 $D$ 在 $0.01\text{mm}$ 以下的细颗粒。

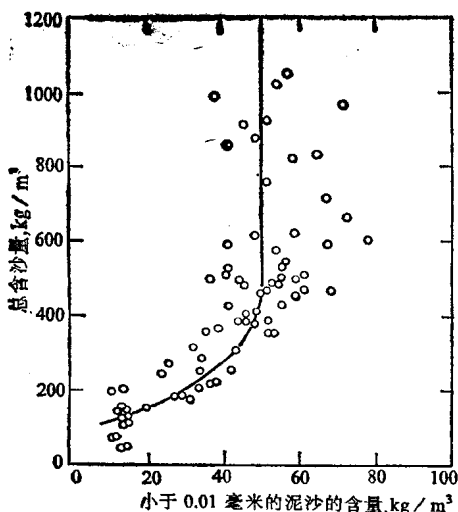


图 1.7 无定河丁家沟站小于0.01mm的泥沙的含量随含沙量的变化

增大以后,物质组成日益变粗,但小于0.007 mm的泥沙的含量在含沙量超过  $400\text{kg/m}^3$  以后,接近一个定常值  $48.5\text{kg/m}^3$  (变化范围为  $23\sim 82\text{kg/m}^3$ )。这种现象在其他河流上也可以见到。图1.7为无定河悬移质中小于0.01 mm的含量随含沙量的变化,当含沙量超过  $400\text{kg/m}^3$  以后,小于0.01mm的含量即大致维持在  $50\text{kg/m}^3$  左右 (变化范围为  $37\sim 78\text{kg/m}^3$ ),不因含沙量的加大而增多。黄河中游的高含沙水流即含有一定数量的细粉砂及粘土,而这部分泥沙的含量又不因含沙量的增大而成比例增多,这一点对维持高含沙水流的运动具有重要意义。

## 第二节 运动的基本模式

这一节将讨论高含沙水流运动的几种模式以及黄河中游地区运动的基本模式,为以后研究高含沙水流运动的机理奠定基础。

### 一、泥沙颗粒的运动形式 (钱宁、万兆惠, 1983)

泥沙比水重,要保持泥沙在水流中运动而不沉降,必须有一定的力支持泥沙的重量。根据此力来源的不同,可以把运动中的泥沙区分为推移质、悬移质和中性悬浮质,它们的运动形式也不一样。

#### (1) 推移质

凡是重量受颗粒因相互碰撞而产生的离散力所支持的泥沙统称为推移质。它们在水流方向和垂直方向都与周围的水体有一定的相对运动,因而为维持它们的运动,需要从水流中取出一部分势能。

当水流强度较小时,推移质以滚动、滑动和跳跃的形式在床面运动,在运动中经常和床面接触,因此又称为接触质。由于河床是由松散的泥沙颗粒组成的,不是一个密实体,因而水流拖曳力的作用不仅限于河床表面,也会深入到床面以下的各层泥沙。当拖曳力大于床面泥沙颗粒之间的摩擦力时,表层以下的泥沙亦会进入运动状态,随着水流的不断加强,运动不断向深层发展。这部分泥沙只能成层地移动或滚动,称为层移质。在一般挟沙水流中,层移运动不一定出现,即使出现,它的相对重要性也比较小,但在高含沙水流中,层移运动却有可能转化成为主要的运动形式之一。

#### (2) 悬移质

对于悬移质来说,使泥沙悬浮于水中的是漩涡的动量,这种动量在垂直方向的交换产生了一定的力,此力支持了悬浮泥沙的重量。悬移质在运动中和周围水体在垂直方向有相对

运动, 为了维持它们的运动, 需要消耗一部分紊动能。

凡是挟带推移质和悬移质的水流, 统称为两相流。

### (3) 中性悬浮质

当水流中粘性颗粒泥沙含量超过一定限度以后, 水流将不再为牛顿体, 而是具有宾汉体的性质, 存在宾汉极限剪切力 $\tau_B$ 。在这样的水体中, 粘性颗粒泥沙形成一定的结构, 具有结构应力。当水流的剪切力小于结构应力时, 不可能有相对运动。同理, 这样的结构应力还可能支持一定重量的泥沙颗粒悬浮在水体中而不沉降, 称为中性悬浮质。中性悬浮质的最大粒径 $D_{max}$ 为

$$D_{max} = k \frac{\tau_B}{(\gamma_s - \gamma_f)} \quad (1.1)$$

其中  $k$  为系数;  $\gamma_s$  为泥沙的容重;  $\gamma_f$  为水和大致小于  $D_{max}$  的五十分之一的颗粒所组成的混合体的容重 (钱宁、王兆印, 1984)。中性悬浮质和周围的水体不存在相对运动, 事实上已成为水体的一部分, 因此, 含有中性悬浮质的水流统称为伪一相流。在高含沙水流中, 伪一相体常组成两相流中的液相。

## 二、泥沙运动模式的发展 (王兆印、钱宁, 1985)

随着水流运动的加强, 泥沙自起动至发展到高含沙水流运动的极限模式, 大致经过六个阶段。各阶段的特点可以概括如下 (参阅图1.8) :

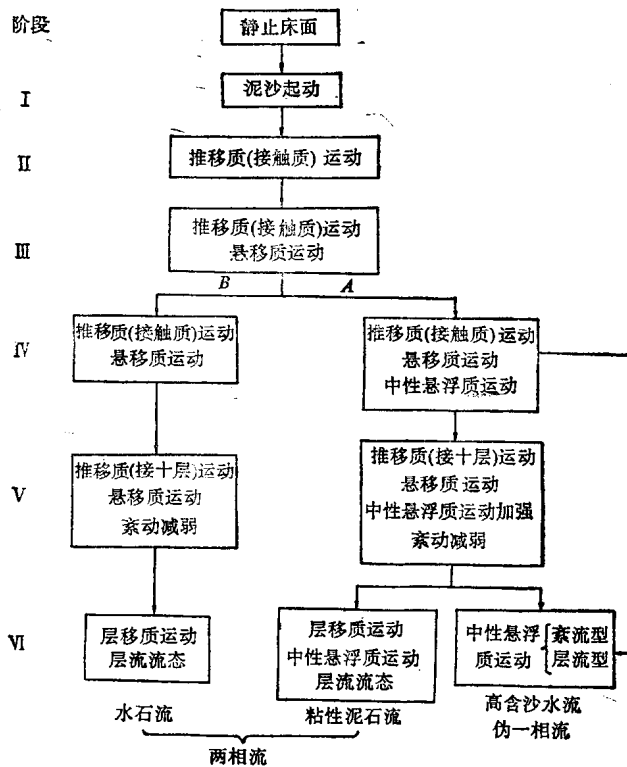


图 1.8 随着水流运动强度的增加泥沙运动模式的发展

阶段 I 泥沙开始起动。

阶段 II 出现推移质运动。泥沙颗粒以在床面上滑动、滚动并跳跃的形式运动,运动中不断和床面接触。

阶段 III 出现悬移质运动。

阶段 IV 自阶段 III 进入阶段 IV, 要根据流域中是否有小于 0.01mm 的细粉砂及粘土的补给, 区分为 A 及 B 两种不同的情况。下面先介绍当流域中有较多的粘性颗粒来量时的发展过程 (情况 A), 这时在阶段 IV 将出现中性悬浮质运动。

阶段 V 出现层移运动。

下面分析在什么情况下会出现层移质运动。作用在床面上的剪力为

$$\tau_0 = \gamma_m h J$$

其中,  $\gamma_m$ ——水和泥沙混合物的容重

$h$ ——平均水深

$J$ ——比降

据 R.A. Bagnold 的理论, 在明渠两相流中, 离散剪切阻力  $\tau$  与推移质的水下重量成正比, 比例系数为  $\tan\alpha$ 。从我们的研究来看,  $\tan\alpha$  与颗粒层的流速梯度及颗粒碰撞时的脉动速度有关。作为一种粗略的近似, 仍按 Bagnold 的做法, 取  $\tan\alpha$  为常数。这样

$$\tau = (\gamma_s - \gamma_f) \tan\alpha \int_0^h S_{v*} dy$$

其中,  $S_{v*}$  为高程  $y$  处的推移质体积比含沙量。如果接触质和层移质比较起来可以忽略不计, 而层移质的浓度分布在床面 ( $y=0$ ) 应等于床沙物质的浓度  $S_{v*}$ , 在层移区 ( $y \leq y_m$ ) 假定处于均匀分布和线性分布之间。这时

$$\tau = (\gamma_s - \gamma_f) \tan\alpha \left( \frac{3}{4} S_{v*} y_m \right)$$

在恒定条件下,  $\tau_0 = \tau$ , 解之得

$$y_m = \frac{4}{3} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_f} \frac{hJ}{\tan\alpha S_{v*}} \quad (1.2)$$

据式 (1.2), 可以大致判断在水深为 3 米的条件下, 比降为 2‰ 的黄河下游 (花园口站) 及渭河下游 (华县站), 层移运动一般可以忽略不计; 到了比降为 1‰ 左右的渭河中游 (咸阳站) 及无定河 (丁家沟站), 层移质运动的厚度可达到 1~2cm 以上; 而在比降达到 5‰ 的窟野河 (王道恒塔站) 及皇甫川 (皇甫二站), 层移运动的厚度可达 10cm 左右, 就比较可观了。

从阶段 III 到阶段 V, 悬移运动一直不断得到加强。由于悬移运动的能量来自水流紊动的动能, 因而在悬移质浓度超过一定限度以后, 悬移运动的进一步加强将使紊动减弱, 转而遏制了悬移运动的成长, 并促使它趋向衰微。在另一方面, 随着含沙量和  $\tau_b$  的加大, 越来越多的泥沙转化为中性悬浮质。

一般高含沙水流多属于这种紊流两相流, 水和中性悬浮质组成液相, 推移质和悬移质组成固相。

阶段 VI 阶段 VI 标志着悬移运动的消失, 这时可能有两种不同的情况。