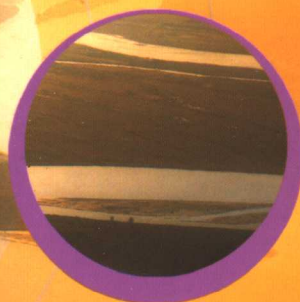


水 科 学 前 沿 学 术 丛 书

游荡型 河流演变及其数值模拟

◎ 夏军强 王光谦 吴保生 著



47
7



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水 科 学 前 沿 学 术 丛 书

游荡型

河流演变及其数值模拟

◎ 夏军强 王光谦 吴保生 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

游荡型河流演变及其数值模拟/夏军强, 王光谦, 吴保生著. —北京: 中国水利水电出版社, 2005

(水科学前沿学术丛书)

ISBN 7-5084-2625-8

I. 游.. II. ①夏 ②王 ③吴 .. III. ①游荡型河段—演变—研究②游荡型河段—演变—数值模拟—研究 IV. TV147

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 140281 号

书 名	水科学前沿学术丛书 游荡型河流演变及其数值模拟
作 者	夏军强 王光谦 吴保生 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 12.75 印张 302 千字
版 次	2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

游荡河型是天然河流中常见的河型之一，在国内外分布较广，如南亚的布拉马普特拉河，北美的红狄尔河，南美的塞贡多河和欧洲的塔纳河、皮亚韦河，以及我国黄河中游的小北干流河段及下游的孟津至高村河段、汉江中游的丹江口至皇庄河段、滹沱河黄壁庄水库下游河段、塔里木河干流上游河段等，均为典型的游荡型河道。游荡型河流不仅具有独特的地貌特征，如河道内断面宽浅、滩槽高差较小，洲滩密布、汉道交织，还具有复杂的水沙输移与河床演变特点，如洪水暴涨暴落，年内流量变幅大，同流量下的含沙量变化大；水流散乱，主流摆动不定，河势变化急剧；河床易冲易淤，且冲淤幅度较大。游荡型河流的另一特点是其河岸组成物质较粗，抗冲性差，极易发生坍塌。游荡型河流的这些特征常常对两岸的防洪、工农业生产等带来不利影响。

采用多种手段研究游荡型河流的演变规律，在理论与实践上都有重要意义。为此我们在国家自然科学基金等资助下，开展了游荡型河流演变及其数值模拟技术的研究。本书为研究成果的总结，包括三部分内容。

一是游荡型河流演变的基本规律及宏观分析研究。这包括：①提出了床阻力的计算方法，适用于由小变大的低能态区、由大变小的过渡区及再由小变大的高能态区。②给出了计算输沙能力的两个公式，包括张瑞瑾输沙能力的修正公式，该公式考虑了含沙量对泥沙沉速的影响与非均匀沙的代表沉速，以及建立在统计力学及紊动扩散分析基础上的全沙输沙能力公式，该公式考虑了床沙、推移质与悬移质的互相交换机理。③提出了利用已有实测资料计算滩岸侵蚀速率的方法，给出了不同水沙条件下黄河下游滩岸侵蚀速率的计算公式。④提出了河槽横断面形态特征参数，揭示了多沙游荡型河流横断面调整与水位增高的关系。⑤指出了黄河下游河相系数与流量、含沙量的关系最为密切，而且控导护岸工程的修建对其有重要影响。⑥分析了不同来源区洪水对黄河下游游荡河段河床地貌调整过程的影响、水沙与边界条件变化对其河势演变的影响等。

二是游荡型河流演变的数值模拟技术研究，开发了平面二维河床纵向与横向变形数学模型。河宽调整，尤其是河岸的坍塌，是河床变形过程中的一

个重要方面，但是由于横向变形的力学机理和变化过程十分复杂，目前国内还缺少模拟河岸坍塌与淤长过程的成熟理论与方法。国内现有的泥沙数学模型一般不考虑河岸的坍塌过程；国外虽有个别泥沙数学模型考虑了河宽的调整变化，但仅仅停留在概念性模型的阶段。本研究提出的基于河宽调整力学模拟技术的平面二维模型，不仅具备常见模型计算河床纵向冲淤过程的功能，而且还能模拟三类土质河岸（粘性土河岸、非粘性土河岸、混合土河岸）的坍塌与淤长过程，可以真实地反演天然游荡型河段在复杂地形条件下河床演变的整个过程。

三是游荡型河流演变数值模拟技术的具体应用。这包括：①以黄河下游花园口至来童寨游荡型河段为研究对象，模拟了该河段 1961 年非汛期的河床变形过程，计算的主槽淤积、滩岸坍塌结果与实际观测数据较为符合。②以黄河下游花园口至夹河滩游荡型河段为研究对象，模拟了该河段在三门峡建库后的最大洪水——1982 年 8 月份洪水时的河床演变过程，计算出的主槽冲刷、滩地淤积、主流摆动的结果符合游荡型河段汛期的演变规律。

本研究成果得到了国家自然科学基金委员会和水利部联合资助重大项目“江河泥沙灾害机理与防治措施研究”（59890200）第六课题、国家自然科学基金委员会创新研究群体基金项目“流域水沙过程与临界调控机理”（50221903）、教育部科学技术重点项目“小浪底水库运用后黄河下游游荡型河道发展趋势及其治理措施研究”（0304），以及清华大学骨干人才支持计划二期等资助，在此一并表示感谢。参加本项研究的主要人员除本书作者外，还有张仁、费祥俊、王士强、张欧阳、傅旭东等。

本书主要内容获得了 2004 年度教育部提名国家科学技术奖科技进步一等奖。

由于作者经验不足，水平有限，难免出现疏漏或错误，敬请读者批评指正。

作 者

2004 年 8 月

于清华大学

目 录

前 言

第一章 游荡型河流概述	1
第一节 河段特性	1
第二节 河床演变特性	4
参考文献	6
第二章 游荡型河流演变的基本规律	7
第一节 动床阻力	7
第二节 输沙能力	9
第三节 横断面形态调整规律	17
第四节 河相关系变化规律	22
参考文献	29
第三章 典型游荡型河段演变的宏观分析	31
第一节 黄河下游滩岸侵蚀机理与速率的时空变化特点	31
第二节 黄河下游河床形态调整对洪水过程的响应	41
第三节 不同来源区洪水对黄河下游游荡段河床地貌调整过程的影响	47
第四节 水库建设与河道整治对游荡段河床演变的影响	54
第五节 丹江口水库修建后汉江中游的河床演变过程	71
第六节 水沙条件变化对塔里木河干流游荡段河床演变的影响	81
参考文献	90
第四章 河岸冲刷机理及其模拟技术	93
第一节 河岸冲刷问题的研究现状	93
第二节 不同类型土质河岸的冲刷机理	103
第三节 河岸冲刷过程的数值模拟技术	121
参考文献	132
第五章 游荡型河流演变的数值模拟技术	137
第一节 泥沙数学模型中的基本理论问题	137
第二节 河床纵向变形数学模型的研究状况	143
第三节 河床纵向与横向变形数学模型的研究状况	148
第四节 平面二维河床纵向与横向变形数学模型的建立	149

第五节 河岸冲刷模型中相关参数的敏感性分析	163
第六节 不同类型土质河岸冲刷过程的二维概化模拟	169
参考文献	177
第六章 黄河下游游荡段演变过程的数值模拟	181
第一节 黄河下游河床变形数学模型的研究状况	181
第二节 花园口至来童寨河段非汛期演变过程的数值模拟	182
第三节 花园口至夹河滩河段汛期演变过程的数值模拟	188
参考文献	194

游荡型河流概述

根据河床演变特点不同，冲积河流可以区分为多种河型。在我国普遍采用谢鉴衡（1981）与钱宁等（1987）提出的河型划分方法，即将河流划分为顺直、弯曲、分汉与游荡四大类。

游荡型河流是一种有着独特地貌特征的河流。与弯曲型河流相比，在平面形态上，游荡型河流一般比较顺直，水流分汉，通常有两股或两股以上的汉道。在纵向上，游荡型河流的比降较陡，挟带的泥沙数量大；在横向上，游荡型河流的宽深比要比弯曲型河流大得多。与分汉型河流相比，游荡型河流虽然同样具有分汉的平面形态，但是河道中沙洲的数量多、面积小，沙洲上的沉积物颗粒粗、植被稀少，在流量变化时，沙洲形态容易随之改变，使整个外形显得十分散乱。游荡型河流中汉道经常迁徙变化，远不如分汉型河流稳定，汉道的弯曲率一般也要比分汉型河流小。由于产生游荡型河流的条件普遍存在，因此游荡型河流在国内外分布较广。国外如南亚的布拉马普特拉河，北美的红狄尔河、鲁普河和普拉特河，南美的塞贡多河和欧洲的塔纳河、皮亚韦河等，均属于这类河流（钱宁等，1987）。在我国如黄河上游的宁夏头道墩至石嘴山河段、中游的小北干流河段及下游的孟津至高村河段，渭河下游的咸阳铁路桥至耿镇桥（泾河口）河段，汉江中游的丹江口至皇庄河段，永定河下游的卢沟桥至梁各庄河段，滹沱河黄壁庄水库下游河段，塔里木河干流上游河段等，均为典型的游荡型河道。这些河段突出的特点是河床宽浅散乱，主流摆动不定，河势变化急剧，演变规律十分复杂。

第一节 河段特性

一、形态特征

游荡型河段的河身比较顺直，曲折系数一般小于1.3，平面形态具有“宽、浅、散乱”的特点，如图1-1所示。在较长距离内，往往宽窄相间，呈藕节状。窄河段水流归顺，起着控制河势的作用；宽河段河床宽浅，洲滩密布，汉道交织，水流散乱，主流摆动不定（钱宁等，1965）。

游荡型河段的河床纵比降一般比弯曲型河段的大。黄河中游小北干流河段的纵比降上段陡、下段缓，一般在 $3.0\text{‰} \sim 6.0\text{‰}$ 之间，下游孟津至高村游荡段的纵比降在 $1.5\text{‰} \sim 4.0\text{‰}$ 之间。永定河下游游荡段的纵比降约为 5.8‰ 。因此较陡的河床纵比降是游荡型河流纵剖面的一个明显特征。

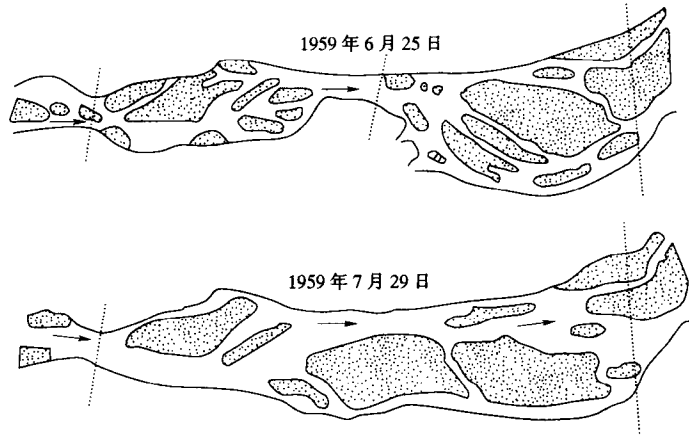


图 1-1 游荡型河段平面形态及河床演变 (黄河花园口河段)

游荡型河段的横剖面一般相当宽浅，河相系数 $\xi (= \sqrt{B/h})$ 较大。例如黄河中游小北干流河段，平均滩槽高差在 1.0~2.0m 之间，河相系数高达 40~52；下游孟津至高村游荡型河段，平均滩槽高差为 1.0~1.75m，一般不超过 2m， ξ 在 19~32 之间，个别河段可超过 60。汉江中游襄阳至宜城河段， ξ 在 5~28 之间。相比之下，长江中游荆江弯曲河段的 ξ 仅为 2.23~4.45，因此游荡型河段的河相系数远比弯曲型河段的大。图 1-2 为黄河下游游荡段典型的宽浅断面形态，该断面主河槽宽达 3.6km，两岸二滩总宽度达 7km。

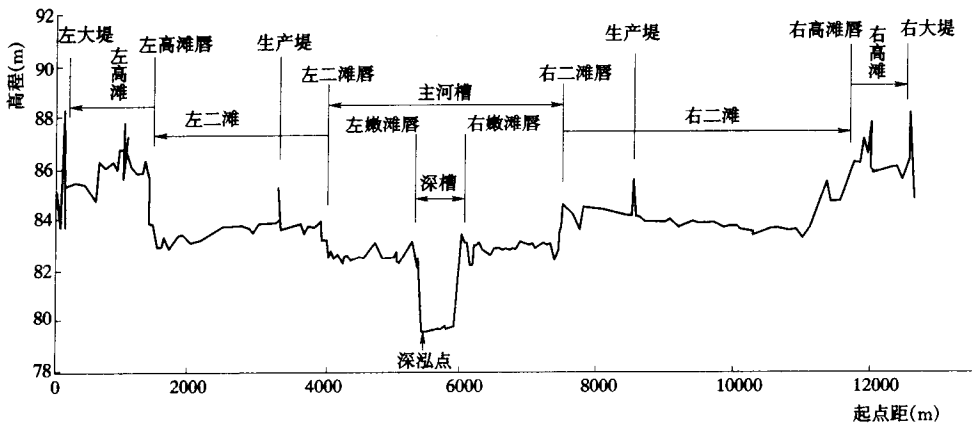


图 1-2 黄河下游游荡段宽浅的断面形态

二、水沙输移特性

游荡型河流由于河床宽浅，平均水深一般很小。例如黄河花园口河段平均水深在 1.0~3.0m 之间，汉江襄阳至碾盘山河段枯水期的平均水深不到 1.0m。然而由于这些河段的河床纵比降较大，导致汛期流速大，水流的 Froude 数大。例如黄河下游游荡段的 Froude

数远大于一般冲积河流，花园口断面实测到的最大 Froude 数可达 0.88。游荡型河道的水量、沙量主要集中在汛期输送，洪水一般具有暴涨暴落的特性。图 1-3 给出了黄河下游花园口站 1958 年汛期流量与水位的变化过程。由图可知，在最大洪峰流量为 $22300\text{m}^3/\text{s}$ 的一次洪水过程中，超过 $15000\text{m}^3/\text{s}$ 以上的流量持续时间不到 20 小时。

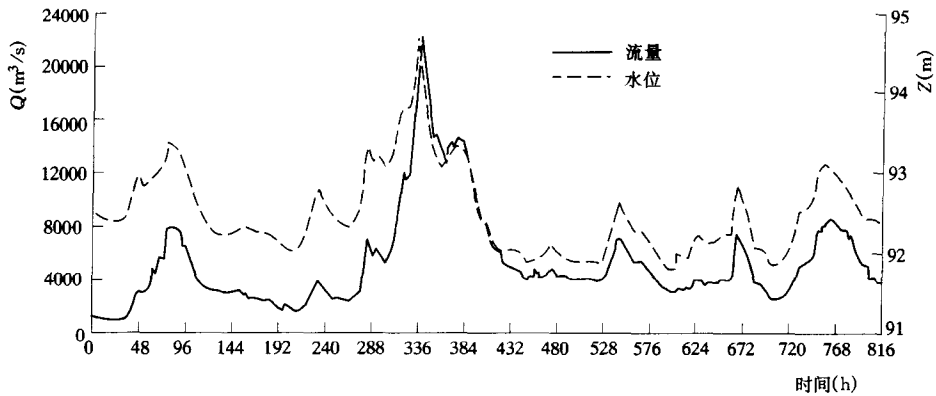


图 1-3 花园口站汛期流量与水位的变化过程 (1958 年 7 月 4 日至 8 月 6 日)

游荡型河流的来沙量一般偏多，并且同流量下的含沙量变化很大，流量与含沙量的关系极不明显。造成这一现象的主要原因是：①洪水来自流域的不同地区，来水中携带的泥沙量大小不同；②同一流量下，随着上站含沙量的不同，其输沙率相差很大，出现“多来多排、少来少排”的现象。产生“多来多排、少来少排”现象的原因是河床冲淤发展迅速，调整幅度较大，由此造成决定河道输沙能力的一些重要因素，如断面形态、局部比降、床沙组成等调整较快，因而使得同流量下可以输送不同数量的泥沙。由图 1-4 可知，花园口断面月均流量与含沙量的关系相当散乱，尤其在汛期更是如此。此外，在黄河下游，来沙中细颗粒泥沙的含量对于水流的输沙能力影响很大，在相同的水流条件下，细颗粒浓度的增加可以大大提高水流的输沙能力，结果也使得在同流量下可以输送不同数量的泥沙。

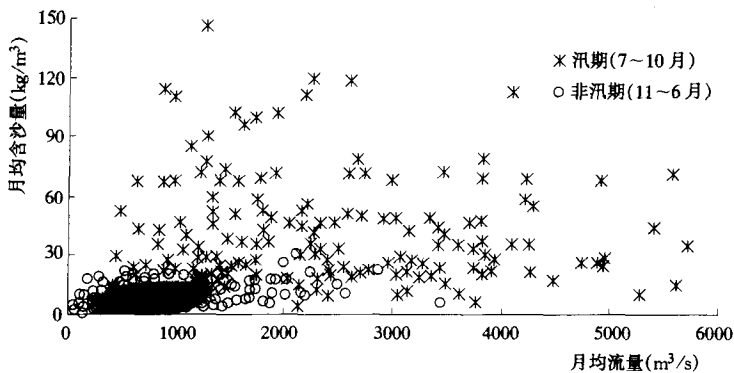


图 1-4 花园口站月均流量与含沙量关系 (1950~2000 年)

第二节 河床演变特性

一、年内及年际冲淤变化

游荡型河段在年内具有滩槽冲淤交替的变化规律。汛期由于洪水流速较高，水流集中的主槽往往被冲刷，而大水漫滩后，滩地因糙率大、水缓滞沙多为淤积。非汛期水流归槽走弯，一般出现主槽淤积、滩岸坍塌的现象。从多年平均看，由于受上游来水少、来沙多的水文特征和宽浅的河床边界条件的影响和制约，游荡型河段的河床一般是逐年淤高，呈单向抬升的变形趋势。图 1-5 为黄河下游花园口至高村河段的累积冲淤过程以及花园口断面汛后 3000m³/s 下水位的历年变化过程。该河段除了在 1960~1964 年因三门峡水库蓄水拦沙下泄清水以及 1980~1985 年因水量充沛冲刷较多外，其余年份一般以淤积为主。花园口断面汛后 3000m³/s 下的水位除 20 世纪 60 年代初期有较大降低外，1985 年后基本上呈逐年抬升趋势，20 世纪 90 年代平均每年上升幅度可达 0.116m。

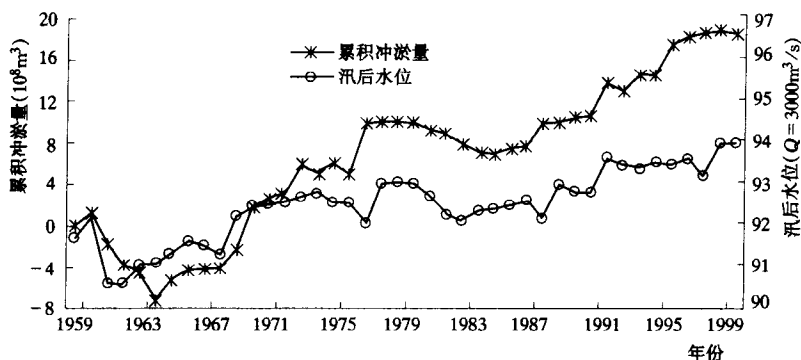


图 1-5 黄河下游游荡段的冲淤及花园口断面汛后 3000m³/s 下水位的变化过程

二、平面演变

游荡型河流平面演变的一个重要特点是主流摆动不定、河势变化剧烈。尤其在汛期河床大淤大冲，变形幅度较大。在一个水文年内，游荡型河流的河势摆动一般具有季节性的变化规律。汛期的摆动强度要远大于非汛期，因为在汛期中，水流的造床作用要比非汛期强得多（钱宁等，1987）。

游荡型河段内洲滩很多，河床边界多由易冲刷的细沙组成。汛期在较强的水流作用下，河势变化的速度相当快。往往一次洪水涨落过程就可能引起主流位置发生很大的变化。黄河下游的一些河段在汛期昼夜之间主流就能摆动数公里。在 1958 年 8 月的一次洪水中，在下游柳园口附近，主流原来靠近北岸，洪峰到达后，主流开始南移，北岸则淤出大片滩地，但是不久主流又由南岸北移，重新回到原来的位置。在一昼夜内，主流来回摆动达 6km 之多（钱宁等，1965）。黄河中游小北干流河段为典型的堆积性游荡型河道，在天然情况下，河道主流线的摆动幅度可达 3~4km，上段禹门口至庙前河段最大摆幅可达

10km, 下段夹马口至潼关河段最大摆幅可达 14.8km。图 1-6 给出了小北干流河段主流线的变化过程。由于主流经常摆动, 冲滩塌岸, 该河段素有“三十年河东、三十年河西”之说(黄河小北干流志, 1999; 2002)。

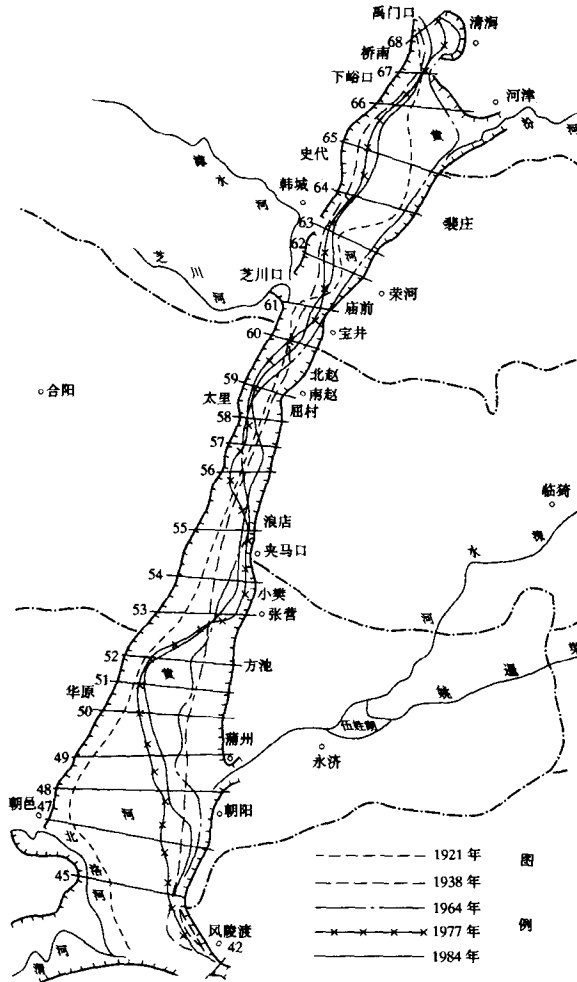


图 1-6 黄河小北干流主流线的变化

谢鉴衡等(1990)总结了游荡型河流主流在平面上摆动剧烈的原因, 可以概括为:

(1) 河床堆积抬高, 主流夺汊。在串沟、汉道交错的河槽中, 主流所经过的汉道处河床本来较低, 但是由于泥沙淤积, 河床和水位逐渐抬高, 水流便转向较低和较顺直的汉道分流, 经过一场大水后, 主流便完全改走汉道, 原主汊河道则逐渐淤塞。

(2) 洪水拉滩, 主流摆动。由于游荡型河段河滩多为易冲的细沙组成, 在水流作用下, 极易被冲刷移动, 特别是新形成的嫩滩, 更易被冲蚀切割, 因而主流也可能易位摆动。

(3) 沙滩移动, 主流变化。游荡型河段沙洲密布, 在水流作用下, 极易被冲刷移动, 因而引起主流相应变化。

(4) 上游主流方向改变。由于各种原因，上游河势变化，其下游主流的流路也相应改变，引起主槽摆动。

游荡型河流平面演变另一个重要特点是窄深河段具有控制河势的作用。游荡型河道在较长距离内，往往由若干个宽浅河段与窄深河段组成，类似藕节状。窄深河段一般包含有天然或人工节点，如突出的山嘴、抗冲的胶泥嘴或人工建筑物等。这些节点的存在限制了河流的平面摆动，使得窄深河段具有控制下游宽浅河段河势的作用。钱宁等（1965）曾指出，增加黄河下游沿程节点的数量是控制主流摆动的一条重要途径。

游荡型河道由于易冲易淤、善变善徙，河床演变异常剧烈，使得河床变形的控制和预测十分困难，这正是游荡型河流数值模拟与治理非常困难的原因。

参考文献

- 1 钱宁，周文浩．黄河下游河床演变．北京：科学出版社，1965
- 2 钱宁，张仁，周志德．河床演变学．北京：科学出版社，1987
- 3 谢鉴衡主编．河流泥沙工程学（上册）．北京：水利出版社，1981
- 4 谢鉴衡，丁君松，王运辉．河床演变及整治．北京：水利电力出版社，1990
- 5 陕西黄河小北干流志编纂委员会．陕西黄河小北干流志．郑州：黄河水利出版社，1999
- 6 黄河小北干流山西河务局．山西黄河小北干流志．郑州：黄河水利出版社，2002

游荡型河流演变的基本规律

动床阻力在洪水演进、河床冲淤计算中起着十分重要的作用，而床面形态是影响动床阻力的主要因素之一。在游荡型河流中，不同水沙条件作用下的床面形态变化较大，因此动床阻力的计算相当复杂。游荡型河道通常具有多来多排的输沙特点，在计算中必须选择合适的输沙能力公式才能较好地模拟河床的冲淤过程。正确地掌握游荡型河道横断面的调整规律，才能确定断面变形与水位抬升的关系。河相关系研究是河道整治工作的一个重要基础，因此建立和选用河相关系公式必须考虑治河工程的进展情况。本章将从上述几个方面分析游荡型河流演变的基本规律。

第一节 动床阻力

动床阻力通常包括沙粒阻力和沙波阻力，是冲积河流阻力的一个重要组成部分。动床阻力的大小与水流条件、床面形态和床沙组成等关系极为密切。在水深相同的条件下，随着水流强度的增加，床面形态从静平床开始，将依次进入沙纹、沙垄、动平床及逆行沙波等几种状态。一般把沙纹、沙垄状态称为水流低能态；沙垄消亡趋于动平整状态称为过渡态；动平床以后的状态称为高能态（王士强，1990）。床面形态的变化直接影响动床阻力的大小。因此阻力计算是水沙数学模型中的一个重要环节。

已有的数学模型大多需要输入实测阻力计算洪水位。美国对其6个主要数学模型评价时认为，它们共同存在的一个重大缺点，就是不能从输入数据（指河流进口水沙条件）来准确预报阻力（Simon, 1982；钱宁等，1989）。有些模型根据流量与河床冲淤状况预报糙率，但不能反映河宽、比降及床沙变化对阻力的重大影响。很多阻力公式仅适用于某一特定的范围（王士强，1993）。如Engelund（1966）的阻力公式缺乏过渡区规律，也不适用于床沙粒径大于1mm或小于0.15mm的情况；钱宁及爱因斯坦等阻力关系，都不适用于低能态和高能态情况（钱宁等，1983；1987）。本节将重点介绍王士强等（1990，1993）提出的阻力研究成果。

王士强首先划分出冲积床面阻力系数随着水流增强，具有由小变大的低能态、由大变小的过渡态及再由小变大的高能态三个规律不同的能态区域，随后建立阻力公式，即 θ_* 随 θ'_* 的变化关系，如图2-1所示。 θ_* 、 θ'_* 都是反映水流强度的参数，可用下式表示：

$$\theta_* = \gamma h J / [(\gamma_s - \gamma) D_{50}] \quad (2-1)$$

$$\theta'_* = \gamma h' J / [(\gamma_s - \gamma) D_{50}] \quad (2-2)$$

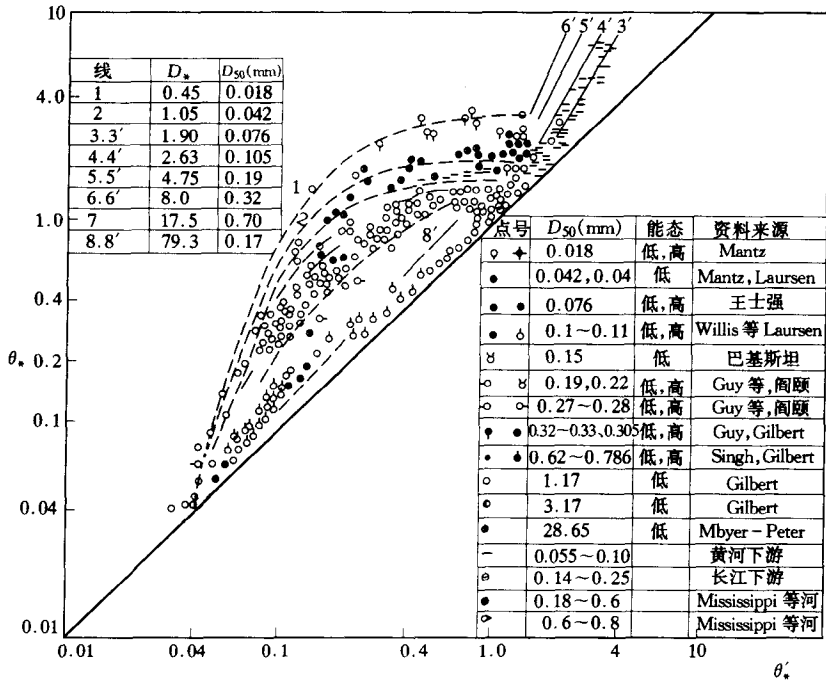


图 2-1 冲积河流 θ_* 与 θ_*' 关系

式中： h 、 h' 分别为全部及与沙粒阻力有关的水深； J 为能坡； D_{50} 为床沙中径； γ 、 γ_s 分别为水及泥沙的容重。

对于低能态及天然河流中的过渡态，可采用式 (2-3)，即：

$$\lg \frac{\theta_*}{\theta_*'} = k_1 x - k_2 x^2 + k_3 x^3 \quad (2-3)$$

式中： $x = \lg (\theta_*' / 0.04)$ ；

$$\lg k_1 = 0.513 - 0.123 \lg D_* - 0.141 \lg^2 D_* ;$$

$$\lg k_2 = 0.56 - 0.0647 \lg D_* - 0.2183 \lg^2 D_* ;$$

$$\lg k_3 = 0.017 - 0.0347 \lg D_* - 0.2728 \lg^2 D_* .$$

$D_* = [g (\gamma_s / \gamma - 1) / \nu^2]^{1/3} D_{50}$ ， ν 为水的运动粘滞系数， g 为重力加速度。

对于高能态区，采用如下阻力公式：

$$\theta_* = 0.04 (\theta_*' / 0.04)^{m_1} \quad (\theta_* \leq 1) \quad (2-4)$$

$$\lg \theta_* = m_1 \left[\lg \frac{\theta_*'}{\theta_*'} + \left(\lg \frac{\theta_*'}{\theta_*'} \right)^2 \right] \quad (\theta_* \geq 1)$$

式中： $m_1 = 1.4 / \lg (\theta_*' / 0.04)$ ； $m_2 = 1 + 4.87 \exp(-0.79 D_*)$ ； $\theta_*' = 0.68 + 0.32 \exp(-0.1 D_*)$ 。

对于黄河下游，当流速 u 大于临界流速 $u_k = 55 \sqrt{g D_{50}}$ 时，水流阻力进入高能态区。实际计算中对天然河流不必判别能态，按式 (2-3) 和式 (2-4) 分别计算水深，两者中

较大者即为真实预报值。与沙粒阻力有关的水深 h' ，可用沙粒阻力公式试算确定。沙粒阻力公式为：

$$\frac{u}{\sqrt{gh'J}} = \frac{1}{\kappa} \ln(11h'/K'_s) \quad (2-5)$$

式中： K'_s 一般为 D_{65} ，当 $D_{50} < 0.11\text{mm}$ 时取 $K'_s = 0.5D_{65}$ ； D_{65} 为床沙中以重量计，65% 较之为细的粒径； κ 为卡门常数，一般取 0.4，高含沙量时减小。对上述公式进行了大量验证计算，结果与实际符合良好 (Wang 和 White, 1993)。图 2-2 点绘了当 $R_b/D_{50} > 10000$ 时冲积河流阻力系数 f 与 θ_*' 的关系。由图可知，在相同的 θ_*' 时，在低能态， f 随 D_* 的增大而减小，对高能态则反之。对于 $D_{50} > 0.15\text{mm}$ 的沙质河床， f 随 D_* 减小而变化不大。黄才安等 (2004) 最近利用近 10000 组水槽与天然河道的实测资料，全面客观地比较了 21 个具有代表性的冲积河流床面阻力公式在已知单宽流量、能坡与泥沙粒径时，计算水深的精度。研究结果表明王士强公式在计算水槽的动床阻力时精度较高。

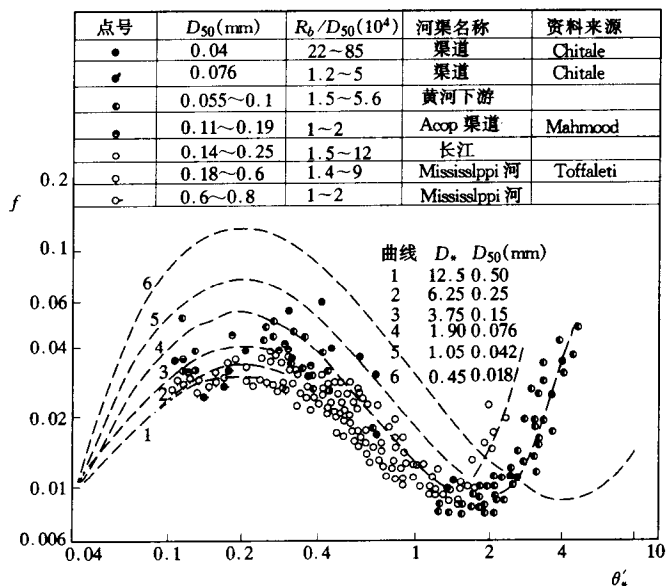


图 2-2 阻力系数 f 与 θ_*' 关系

第二节 输沙能力

黄河由于含沙量高，来水来沙变化大，河床冲淤调整迅速，尤其在游荡型河段，使得水流的实际输沙（挟沙）能力变幅很大。目前已有不少输沙能力公式，但是各家公式的计算结果相差几倍甚至几十倍。本节将重点介绍吴保生等 (1993) 与王士强等 (1998) 提出的输沙（挟沙）能力公式。

(1) 吴保生等 (1993) 从实用角度出发，根据黄河含沙量高的特点，考虑含沙量对泥沙沉速的影响及非均匀沙的代表沉速，对黄河上常用的一些输沙能力公式进行了修正。并

根据实测资料, 采用经验回归方法给出适合于黄河的输沙能力公式。

(2) 王士强等(1998)从床沙、推移质及悬移质互相交换、衔接的物理图形出发, 在统计力学及紊动扩散分析的基础上, 提出了颗粒跃移及推移质、悬移质和全沙统一的新的非均匀沙挟沙力公式。利用清华大学水槽试验取得的非均匀沙挟沙力试验资料分析, 提出了反映混合沙中粗细颗粒互相影响系数的关系以及悬移层与推移层界面高度和浓度预报的初步关系。应用大量天然河流及水槽实测的分组和总挟沙力资料验证了提出的挟沙力公式。

一、黄河输沙能力公式的修正

(一) 现有输沙能力公式概述

在黄河上常用的公式包括: 黄河河渠公式、张瑞瑾公式、张红武公式、札马林公式、杨志达公式等。上述公式有的适用于悬移质全沙, 有的适用于悬移质中的床沙质。此处根据实用的需要, 以悬移质全沙作为研究对象, 因而上述床沙质公式也将应用于悬移质全沙。下面对这些公式作一些简介。

1. 黄河河渠公式

麦乔威等(1958)根据黄河及引水渠系实测资料, 用相关分析得到:

$$S_* = 31.62 \left(\frac{u^2}{gR} \right)^{0.7} \frac{u}{\omega} \left(\frac{d_{cp}}{R} \right)^{0.5} \left(\frac{h}{B} \right)^{0.3} \quad (2-6)$$

式中: S_* 为悬移质全沙挟沙能力; u 为断面平均流速; h 为水深; R 为水力半径; B 为水面宽; d_{cp} 为悬沙平均粒径; ω 为悬沙加权平均沉速。

2. 张瑞瑾公式

张瑞瑾等(武汉水利电力学院挟沙力研究组, 1959)从分析长江、黄河实测资料入手, 以“制紊假说”理论为前提, 运用量纲分析法, 通过推导和整理得到:

$$S_* = K \left(\frac{u^3}{gR\omega} \right)^m \quad (2-7)$$

式中: S_* 为悬移质中床沙质的挟沙能力; K 为系数, m 为指数, 在黄河上分别取 0.22 和 0.76; ω 为悬沙中床沙质泥沙加权平均沉速。张红武等(1992)以张瑞瑾公式为基础, 从二维水流的能耗图形出发, 考虑不同含沙量大小对浑水卡门系数与泥沙沉速的影响, 经分析整理得出了包括全部悬移质泥沙在内的挟沙力公式, 该公式不仅适用于一般挟沙水流, 而且更适用于高含沙紊流, 充分考虑了含沙量对挟沙能力的影响。

3. 札马林公式

札马林的渠道水流挟沙能力公式为(泥沙手册, 1989):

$$S_* = 0.022 \left(\frac{u}{\omega} \right)^{3/2} \sqrt{RJ} \quad (0.002 \leq \omega < 0.008 \text{ m/s}) \quad (2-8a)$$

$$S_* = 11u \sqrt{\frac{uRJ}{\omega}} \quad (0.0004 < \omega < 0.002 \text{ m/s}) \quad (2-8b)$$

式中: S_* 为悬移质全沙挟沙能力。

4. 杨志达公式

杨志达(1973)根据单位水流功率理论及因次分析法得到: