

黄河

内蒙古河段 河床演变研究

吴保生 王平 张原锋/著



科学出版社

黄河

内蒙古河段 河床演变研究

吴保生 王平 张原锋/著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以黄河内蒙古冲积河段为研究对象,采用实测资料分析、实体模型试验及数值模拟等方法,在系统分析内蒙古河段水沙变化及泥沙输移特点的基础上,探讨了内蒙古河段冲淤和主槽过流能力对水沙变化的复杂响应关系,建立了内蒙古河段输沙量和平滩流量的计算方法,揭示了高含沙洪水交汇区的水沙运动特征和沙坝形成机理,提出了交汇区河床形态的分区模式及沙坝形成的判别方法。本书研究成果可为促进黄河上游重大水利工程的合理开发利用,减缓内蒙古河段的洪凌灾害等提供科学依据。

本书可供从事河流动力学、河床演变学、河流地貌学及河道整治与规划、防洪减灾、河流生态修复等方面研究和管理的科技人员及高等院校有关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

黄河内蒙古河段河床演变研究 / 吴保生, 王平, 张原锋著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048712-4

I. ①黄… II. ①吴…②王…③张… III. ①黄河流域—河道演变—研究—内蒙古 IV. ①TV147

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 129249 号

责任编辑: 王 倩 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

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

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 18 1/2 插页: 2

字数: 400 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

黄河内蒙古河段位于黄河上游的下段，系典型的冲积型河段，其南岸分布有库布齐沙漠和十大孔兑（蒙语，山洪沟）。由于十大孔兑发源于水土流失极为严重的砒砂岩丘陵沟壑区，又流经库布齐沙漠，极易形成高含沙洪水，对黄河干流的泥沙输移和河床演变具有重要的影响。因此，内蒙古河段是沙漠与河流交互影响的典型区域，也是黄河上游水沙变化及河床演变最为复杂的河段。自 20 世纪 60 年代开始，随着社会经济的不断发展，黄河上游的沿程灌溉引水不断增加，导致进入内蒙古河段的水量不断减少，特别是龙羊峡水库 1986 年投入运用以来，水沙过程显著改变，使得内蒙古河段出现了严重淤积，河道主槽萎缩，平滩流量减小，水位不断抬升，给防洪和防凌带来一系列问题，引起了各方面的高度重视。

黄河内蒙古河段径流主要来自兰州以上干流，而泥沙主要来自支流祖厉河、清水河及十大孔兑，具有水沙异源的特点。黄河上游龙羊峡水库等虽然对水流条件具有较大的调节作用，但对大量区间入汇泥沙缺乏控制，加剧了内蒙古河段水沙搭配关系的不协调，使得区间入汇泥沙的淤积作用更为明显。这种情况与黄河下游河道在三门峡水库和小浪底水库分别于 1960 年和 1999 年投入运用后出现的持续冲刷现象形成鲜明对比。因此，研究内蒙古河段在上游修建水库后发生的持续淤积问题，需要注意到内蒙古河段的水沙特性及地理位置与黄河下游河道的差异。

来自十大孔兑的高含沙洪水在交汇区形成的沙坝淤堵是黄河内蒙古河段特有的河床演变现象。由于孔兑的高含沙洪水具有陡涨陡落、峰高量大、含沙量高的特点，当支流高含沙洪水与干流交汇后，泥沙往往会在交汇区大量淤积，形成沙坝淤堵，导致干流水位急剧抬升，造成严重的洪水灾害。由于孔兑高含沙洪水具有较强的突发性，历时短，河床冲淤变形剧烈，对高含沙交汇区的现场观测十分困难，关于高含沙交汇区水沙运动和河床形态的实测资料有限，目前还缺乏系统的理论分析和试验研究。此外，由于高含沙水流的含沙量介于一般含沙水流和泥石流流之间，高含沙水流交汇区的水沙运动和河床形态与一般含沙水流和泥石流交汇区相比，既有相同之处又有其个性特点，了解不同类型水流交汇区的共性与个性有助于对高含沙水流交汇区沙坝淤堵规律的分析 and 认识。

本书针对黄河内蒙古河段不同时空尺度下的河道冲淤调整和沙坝淤堵等关键科学问题,采用实测资料分析、实体模型试验及数值模拟等方法,在系统分析内蒙古河段水沙变化特点及河道泥沙输移规律的基础上,一是探讨了内蒙古河段冲淤和主槽过流能力对水沙变化的复杂响应关系,建立了内蒙古河段输沙量和平滩流量的计算方法,定量分析了上游水库运用对内蒙古河段冲淤及平滩流量的影响作用。二是分析了支流高含沙洪水运动特性和交汇区沙坝淤堵特征,揭示了高含沙水流交汇区的水沙运动特性与沙坝形成机理,提出了交汇区河床形态的分区模式及沙坝淤堵的判别方法,得到了高含沙水流交汇区相对较优的沙坝冲刷流量。以上成果丰富了河流地貌学和河床演变学的研究内容,可为黄河上游重大水利工程的合理开发利用,减缓内蒙古河段的洪凌灾害等提供科学依据。

本书研究中具有显著创新性的成果主要有平滩流量的滞后响应模型、高含沙水流交汇区的异重流运动现象和淤积形态分区模式。基于河床演变自动调整原理和变率模型建立的内蒙古河段平滩流量的滞后响应模型,给出了河流非平衡调整过程的模拟方法,实现了河床演变过程由定性描述向定量计算的发展,能够较好地描述平滩流量随水沙条件变化的调整规律,揭示了河床滞后响应(前期影响)的物理本质,发展了河床演变学的理论和方法。通过实体模型试验发现的高含沙水流交汇区的异重流运动现象,拓展了对高含沙水流交汇区水沙运动规律的认识。提出的高含沙水流交汇区的淤积形态分区模式,包括壅水区淤积体、回流区带状淤积体、输水输沙主槽及回流区下游的淤积沙洲,是对一般含沙水流交汇区、泥石流交汇区演变模式的补充,完善了交汇区的河床演变理论体系。

本书相关研究和出版得到了国家重点基础研究发展计划(973计划)课题“塌岸淤床过程与河道冲淤演变规律”(2011CB403304)、国家科技支撑计划课题“黄河中下游高含沙洪水调控关键技术研究”(2012BAB02B02)和专项课题“黄河内蒙古河段二期防洪工程可行性研究”的资助,在此表示感谢。参加课题研究的主要人员有:吴保生、张原锋、王平、申红彬、许仁义、侯素珍、贾望奇、王彦君、申冠卿、胡恬、郭秀吉、楚卫斌、郭彦、林秀芝、李婷、常温花、王普庆、郑珊、王永强、刘可晶等。

限于作者的水平,书中难免出现疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 内蒙古河段概况	1
1.2 内蒙古河段存在的主要问题	12
1.3 研究内容和安排	13
第 2 章 内蒙古河段来水来沙变化特点	15
2.1 内蒙古河段水文测站及资料情况	15
2.2 干流主要水文站水沙变化特点	17
2.3 区间支流入汇水沙与沿程入黄风沙特点	27
2.4 区间入汇水沙对干流水沙的影响	50
2.5 内蒙古河段流量频率变化及成因	55
2.6 内蒙古河段有效输沙流量变化分析	63
第 3 章 内蒙古河段泥沙输移规律	68
3.1 汛期输沙率与流量关系	68
3.2 汛期输沙量与径流量关系	70
3.3 非汛期输沙量与径流量关系	74
3.4 不同河段输沙量计算方法	78
第 4 章 内蒙古河段冲淤调整规律	89
4.1 内蒙古河段的冲淤概况	89
4.2 内蒙古河段冲淤的主要影响因素	102
4.3 不同河段冲淤计算方法	125

4.4	黄河上游水库运行对内蒙古河段冲淤量的影响	132
4.5	累计淤积量与同流量水位及比降的关系	137
第5章	主槽过流能力与水沙条件响应关系	142
5.1	内蒙古河段不同时期断面形态调整变化	142
5.2	内蒙古河段不同时期主槽过流能力变化	146
5.3	内蒙古河段平滩流量对水沙条件的滞后响应	152
5.4	内蒙古河段平滩流量滞后响应模型	156
5.5	内蒙古河段年内水沙分配对平滩流量的影响	164
第6章	交汇区河床演变过程的模型试验	167
6.1	交汇区模型设计与验证	167
6.2	交汇区水沙运动与河床形态	179
6.3	沙坝冲刷过程	211
第7章	交汇区河床演变过程的数值模拟	219
7.1	模型介绍	219
7.2	地形处理	232
7.3	流速验证	238
7.4	沙坝形成机理模拟	241
7.5	交汇区流场和含沙量分析	249
7.6	典型洪水交汇区演变过程的模拟分析	272
第8章	交汇区沙坝淤堵条件及防治措施	277
8.1	支流淤堵干流的影响因素	277
8.2	沙坝淤堵判别方法	279
8.3	沙坝淤堵条件	281
8.4	沙坝防治措施	284
参考文献		287

|第 1 章| 绪 论

1.1 内蒙古河段概况

1.1.1 内蒙古河段基本概况

黄河内蒙古河段位于黄河上游下段，地处黄河流域最北端，在 $106^{\circ}10'E \sim 112^{\circ}50'E$ ， $37^{\circ}35'N \sim 41^{\circ}50'N$ 。干流从宁夏的石嘴山入境，至鄂尔多斯准格尔旗马栅乡出境，全长约 823.0km。如图 1.1 所示，该河段南岸分布有库布齐沙漠和

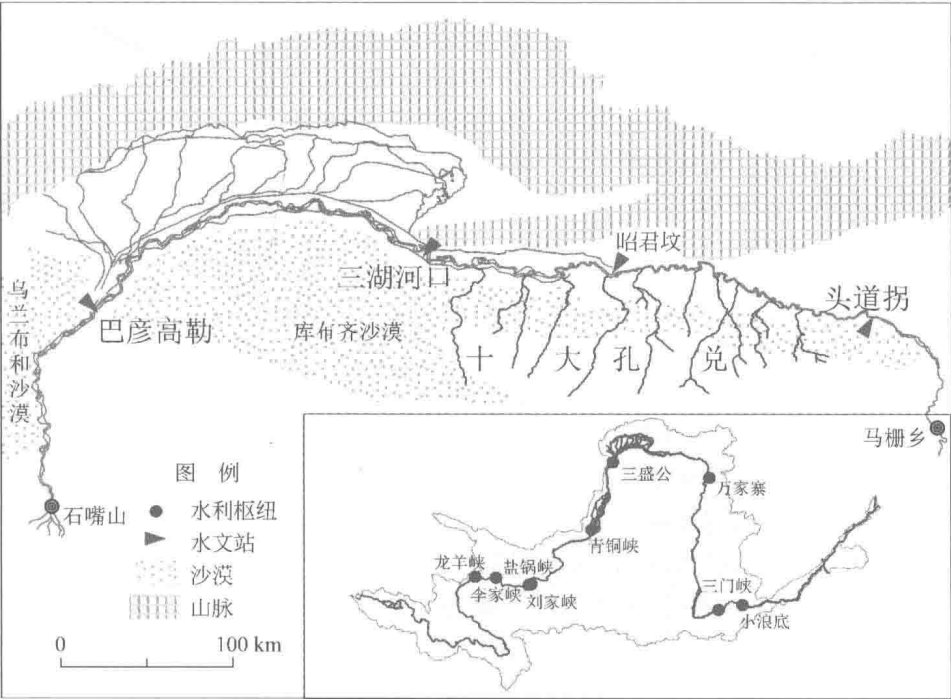


图 1.1 黄河内蒙古河段示意图

十大孔兑（蒙语，山洪沟），包括毛不拉沟、卜尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母花沟、东柳沟和呼斯太河。由于十大孔兑极易形成高含沙洪水，在短时间内携带大量泥沙涌入黄河干流，对干流的泥沙输移和河床演变具有十分重要的影响，使内蒙古河段成为黄河水沙变化及河床演变最为复杂的河段之一。

本书研究的重点是位于内蒙古的巴彦高勒～头道拐河段，沿程有巴彦高勒、三湖河口、昭君坟和头道拐4个水文站。研究河段分为3个具有不同河道特性的河段，各河段主要参数见表1.1。为便于参考，表1.1中还列出了内蒙古其他河段的相关参数。

表 1.1 黄河内蒙古河段河道特性表

序号	河段	河型	河长 /km	比降 /‰	平均河宽 /m	主槽宽 /m	平均 弯曲率
1	石嘴山～旧磴口	峡谷型	86.4	0.56	400	400	1.50
2	三盛公库区	过渡型	54.2	0.15	2000	1000	1.31
3	巴彦高勒～三湖河口	游荡型	221.1	0.17	3500	750	1.28
4	三湖河口～昭君坟	过渡型	126.4	0.12	4000	710	1.45
5	昭君坟～头道拐	弯曲型	184.1	0.10	上段 3000 下段 2000	600	1.42
6	头道拐～马栅乡	峡谷型	150.8				
合计			823.0				

资料来源：黄河勘测规划设计有限公司，2011

1) 巴彦高勒～三湖河口河段。巴彦高勒～三湖河口河段属游荡型河道，河长221.1km。该河段河身顺直，断面宽浅，水流散乱。河道内洲滩密布，主流摆动剧烈。本河段河宽2500～5000m，平均河宽3500m，主槽宽500～900m，平均宽约750m；河道纵比降0.17‰，弯曲系数1.28。

2) 三湖河口～昭君坟河段。三湖河口～昭君坟河段属过渡型河道，河长126.4km。该河段黄河横跨乌拉山山前倾斜平原，北岸为乌拉山，南岸为鄂尔多斯台地。由于河道宽阔，河岸黏性土分布不连续，加上南岸有三大孔兑泥沙的汇入，该河段主流摆动幅度仍然较大，其河床演变特性介于游荡型与弯曲型河段之间。本河段河宽2000～7000m，平均河宽约4000m，主槽宽500～900m，平均宽

约 710m；河道纵比降 0.12‰，弯曲系数 1.45。

3) 昭君坟 ~ 头道拐河段。昭君坟 ~ 头道拐河段属弯曲型河道，河长 184.1km。该河段黄河自包头折向东南，沿北岸土默川平原南边缘与南岸准格尔台地奔向喇嘛湾。河道平面上呈弯曲状，由连续的弯道组成，南岸有七大孔兑汇入，北岸由数条阴山支流汇入。本河段河宽 1200 ~ 5000m，上段较宽，平均宽约 3000m，下段较窄，平均宽约 2000m。主槽宽 400 ~ 900m，平均宽约 600m；河道纵比降 0.10‰，弯曲系数 1.42。

1.1.2 内蒙古河段的上下游控制节点

黄河内蒙古河段是典型的冲积型河段之一，头道拐断面是该河段的下游侵蚀基点。如图 1.2 所示，黑山峡至河曲河段所处地区的地质构造以断陷盆地、褶皱山地及鄂尔多斯台地为主，构成其基本的地貌构架，加之黄河长期流水的侵蚀、堆积，形成了一束一放的葫芦状地貌（杨根生等，1991）。内蒙古河道平面形状呈倒 U 形大弯曲，上有石嘴山峡谷控制，下有晋陕峡谷控制，内蒙古盆地则位于上、下游两个峡谷之间。头道拐断面作为内蒙古河段的下游控制断面，位于内蒙古冲积河段与黄河北干流峡谷河段的交界处，所处位置属基岩河道（图 1.3），断面比较稳定，对内蒙古河段起到侵蚀基准面的作用（黄河水利委员会黄河水利科学研究院，2012）。因此，头道拐断面可以视为内蒙古冲积河段的局部侵蚀基准面。

图 1.4 为头道拐附近河段的河道 DEM 图。可以看到，头道拐站至断面 WD68 之间有长约 29.5km 的较宽河段，断面 WD68 之下急剧变窄，进入峡谷河段。图 1.5 为根据 2012 年汛后实测大断面资料得到的内蒙古河段实测河道深泓剖面图。可以看到，内蒙古河道为一下凹形曲线，可以用二次方程来表示。根据比降方程可得，巴彦高勒附近河段的比降为 1.65‰，至三湖河口附近河段减小为 1.25‰，到头道拐附近进一步减小为 0.685‰。由头道拐附近河道的放大图可以看到，位于头道拐水文站以下约 29.5km 处的断面 WD68 之后，河道比降快速变陡，进入晋陕峡谷。图 1.4 的 DEM 图和图 1.5 的河床比降均说明，断面 WD68 可以看作是内蒙古河道进入晋陕峡谷的转折点，是内蒙古河段下游的实际侵蚀基准点。考虑到头道拐站具有较为系统的实测断面和水沙资料，且距断面 WD68 较近，在实际应用中往往视头道拐站为内蒙古河段下游的局部侵蚀基准点。

至于内蒙古河段的上游入口控制站，考虑到石嘴山断面以下峡谷的河床冲淤变化相对较小，且磴口至巴彦高勒之间建有三盛公水利枢纽，干流水沙关系受到水库调节作用和内蒙古灌区引水引沙的影响，一般把巴彦高勒作为分析内蒙古冲积河段河道冲淤变化的入口控制站。

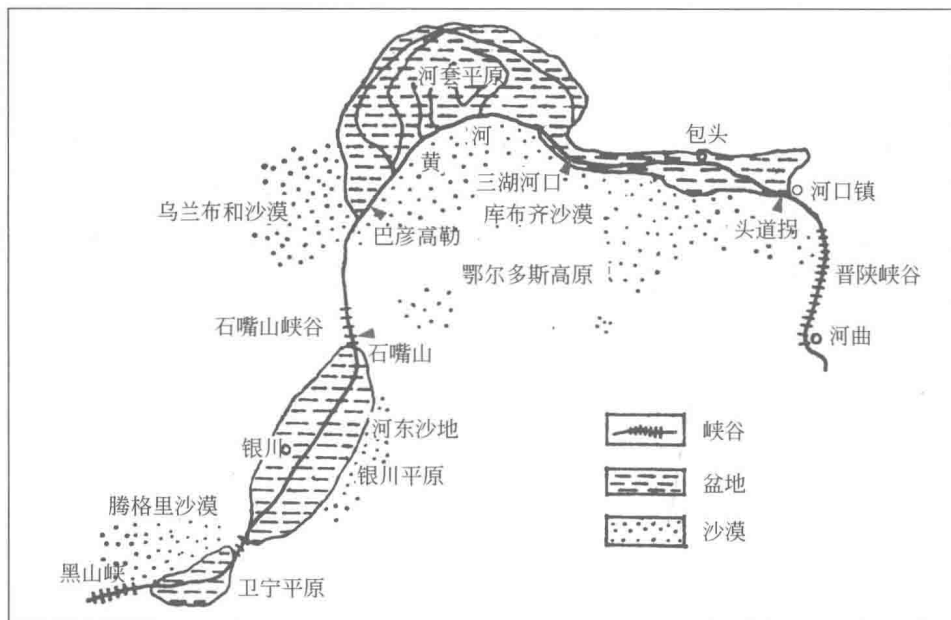


图 1.2 黄河黑山峡至河曲河段自然地貌分布示意图 (引自杨根生等, 1991)

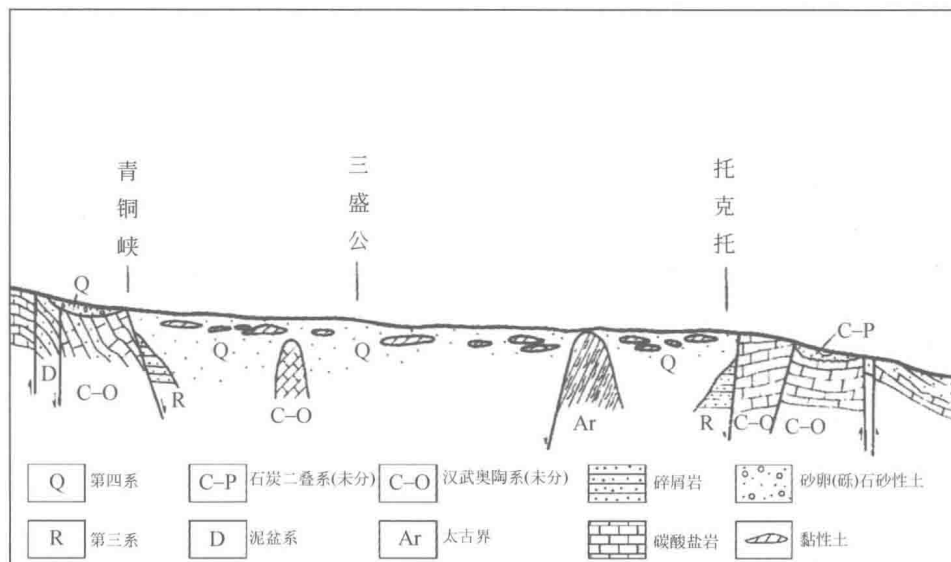


图 1.3 黄河内蒙古河段河谷地质纵剖面略图 (根据黄河水利委员会勘测规划设计院, 1993)

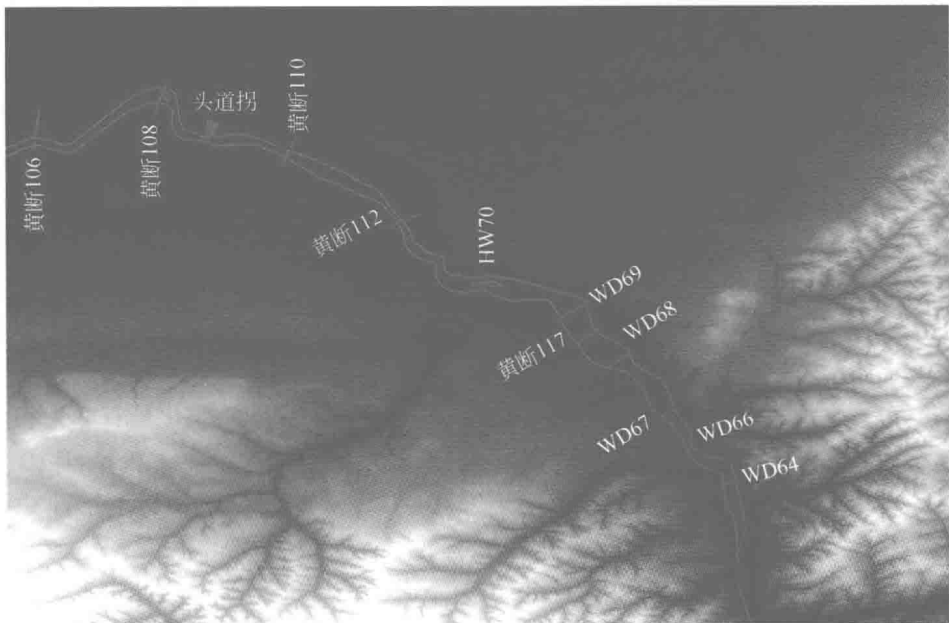


图 1.4 头道拐附近河道 DEM 图

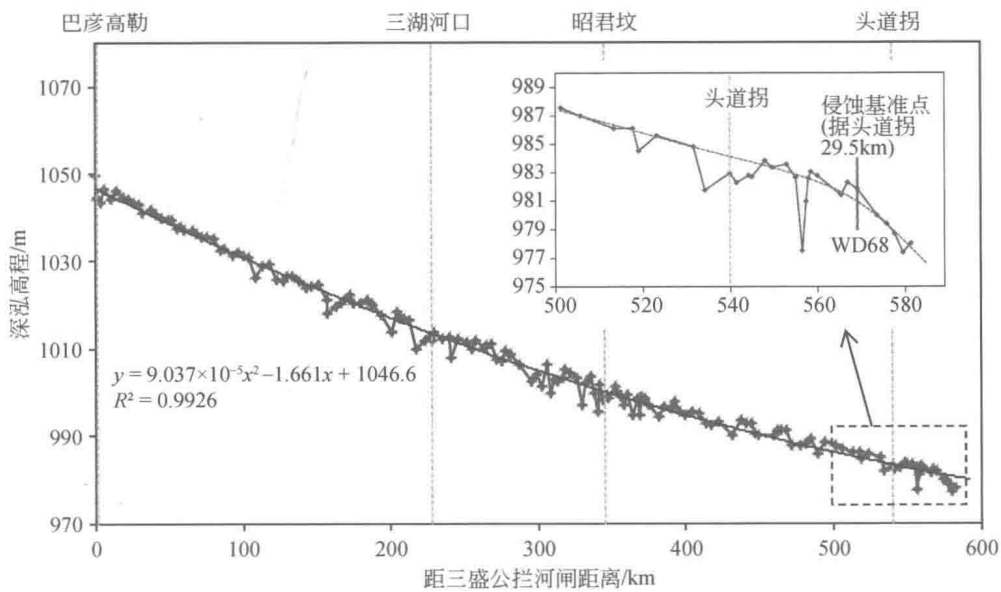


图 1.5 内蒙古河段 2012 年汛后实测河道深泓剖面图

1.1.3 内蒙古河段地理位置的特殊性

黄河干流上分布着三个不同的冲积性河段，分别为上游的宁蒙河段、中游的龙门至潼关河段（小北干流）和黄河下游河道（Long and Chien, 1986；张晓华等, 2002；郑艳爽等, 2012）。由于所处的地理位置不同，各冲积河段的水沙条件、河道输沙特性及冲淤演变规律具有一定的差异，但总的来说，由于水少沙多，各河段均以淤积抬升为主要特征。

自 20 世纪 80 年代以来，由于气候变化和人类活动的影响，特别是一系列干支流水库的修建，改变了进入干流河道的来水来沙条件，主要表现在洪水流量减小，水流含沙量降低。虽然不同水库的调节导致的水沙条件变化具有非常相似的特点，但却给不同河段的冲淤演变带来了迥异的影响。例如，自 1999 年 10 月小浪底水库投入运用后，黄河下游河道发生持续冲刷，截至 2010 年累计冲刷达 20.8 亿 t，同时主槽平滩流量不断增大，防洪能力有所提高。而黄河上游龙羊峡水库自 1986 年 10 月投入运用后，位于其下游的宁蒙河段河道却发生了持续性淤积，特别是内蒙古巴彦高勒～头道拐河段的淤积严重，1986～2010 年累计淤积达 13.2 亿 t，河道主槽萎缩，平滩流量减小，水位抬升，给防洪和防凌带来一系列问题。

黄河内蒙古河段在上游修建水库后发生的持续淤积现象，与内蒙古河段所处地区的地理位置的特殊性有关（吴保生等, 2015a），主要表现在：

1) 黄河上游径流的 98% 来自兰州以上的干流，泥沙主要来自支流和孔兑（占总来沙的比例 1952～1968 年为 50.9%、1986～2005 年增大到 70.1%），具有水沙异源的特点。

2) 龙羊峡水库的投入运用改变了进入内蒙古河段的水沙条件，主要表现在汛期水量减少，洪水流量调平，对汛期输沙产生不利影响。特别是由于水沙异源，水库对大量的区间入汇泥沙缺乏调节和控制，相对于减弱的水流动力条件，突出了区间入汇泥沙的淤积作用。

3) 随着社会经济的不断发展，沿程灌溉引水不断增加，进入内蒙古干流河段的水量不断减少。

4) 内蒙古河段的比降小、流速低、泥沙粒径粗，导致河道的输沙能力很小（黄河干流水库调水调沙关键技术与龙羊峡、刘家峡水库运用方式调整研究课题组, 2008），洪水期的冲淤平衡来沙系数只有 $0.0038 \text{ kg} \cdot \text{s/m}^6$ ，仅为黄河下游河道洪水期冲淤平衡来沙系数 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{s/m}^6$ 的约 1/3（申冠卿和张晓华, 2006；张晓华等, 2008a），使得内蒙古河段的河道冲淤对水沙变化比较敏感。

5) 头道拐断面位于内蒙古冲积河段与晋陕峡谷的交界处附近, 是内蒙古河段的下游侵蚀基准面, 内蒙古河段的冲淤发展受到了该侵蚀基准面的约束。

由于黄河内蒙古河段所处地理位置的特殊性, 关于内蒙古河段输沙特性及河床演变的研究必须注意到这些特点。

1.1.4 十大孔兑交汇区概况

1.1.4.1 交汇区地理地貌特点

内蒙古河段南岸支流十大孔兑为季节性河流, 发源于鄂尔多斯台地, 经库布齐沙漠, 汇入黄河干流, 如图 1.6 所示。十大孔兑自西向东依次为毛不拉沟、卜尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母花沟、东柳沟和呼斯太河。各孔兑河长在 65 ~ 110 km, 河道平均比降在 $2.67‰ \sim 5.25‰$, 总流域面积约 1.1 万 km^2 。孔兑流域地势南高北低, 上游为砒砂岩丘陵沟壑区, 地表支离破碎, 沟壑纵横, 植被稀疏, 水土流失严重。该区地表覆盖风沙残积土, 颗粒较粗, 大于 0.05 mm 以上粗泥沙占 60% 左右 (支俊峰和时明立, 2002)。中部为库布齐沙漠, 横贯东西, 孔兑穿越沙漠而过, 季风期大量风沙堆积在河道中, 成为洪水的重要沙源。孔兑下游为冲积扇区, 地势相对平坦。

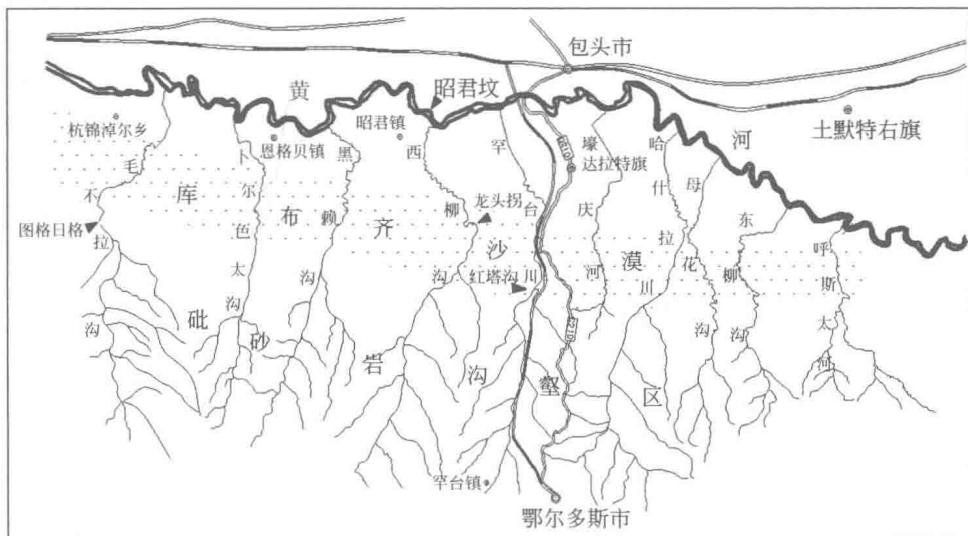


图 1.6 内蒙古十大孔兑流域简图

鄂尔多斯台地丘陵沟壑区面积为 4760.50 km^2 , 植被稀少, 地形破碎, 沟壑纵横, 侵蚀模数达 $6500 \sim 8800 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。沙漠风沙区面积为 4042.60 km^2 , 多

为流动半流动沙丘，既是沙尘风暴中心，也是暴雨中心。暴雨期间，这些支流极易形成高含沙洪水，在短时间内携带大量泥沙涌入黄河干流，形成典型的高含沙洪水交汇区，并在交汇区产生严重淤积，甚至形成沙坝淤堵干流，引起水患。

十大孔兑 1953 ~ 2010 年的年均来沙量为 0.256 亿 t，为三湖河口 ~ 头道拐段总来沙量的 25%（吴保生，2014）。孔兑中以西柳沟洪水阻塞黄河次数最多，危害最甚。自 1960 年以来有明确记载的孔兑洪水淤堵黄河事件共有 8 次。例如，1989 年 7 月 21 日孔兑暴发洪水，西柳沟最大洪峰流量为 $6940\text{m}^3/\text{s}$ ，最大含沙量达 $1380\text{kg}/\text{m}^3$ ，黄河干流流量为 $1230\text{m}^3/\text{s}$ ，洪水携带大量泥沙进入干流后，在西柳沟与干流交汇区形成了“高 2 ~ 4m、长达 600 ~ 1000m、上下游宽 7km”的沙坝（支俊峰和时明立，2002）。孔兑高含沙洪水淤堵干流过程中往往造成上游水位长时间壅高，增大了洪水风险，严重情况下则会造成大堤决口。例如，2003 年 7 月 29 日毛不拉沟洪水在干流形成沙坝后水位壅高，造成大堤溃决，淹没杭锦淖尔乡堤外耕地数万亩。在西柳沟入黄口上游附近的干流河道中有包头钢铁（集团）有限责任公司的取水口，西柳沟洪水形成的沙坝多次长时间堵塞该取水口，导致该公司因无法取水而停产，造成巨大经济损失。例如，1998 年 7 月 5 日和 12 日，西柳沟接连发生两场洪水，洪峰流量分别为 $1600\text{m}^3/\text{s}$ 和 $1800\text{m}^3/\text{s}$ ，含沙量分别达 $1150\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1350\text{kg}/\text{m}^3$ 。洪水在干流“形成一座长 10km、宽 1.5km、厚 6.27m、淤积量近 1 亿 m^3 的巨型沙坝，将黄河拦腰截断，黄河主槽淤满，包头钢铁（集团）有限责任公司的 3 个取水口深埋河下 0.3m。该公司再次停产，影响产值 1 亿元，同时山洪淹没农田 800hm^2 ”（赵昕等，2001）。

十大孔兑中的西柳沟最具代表性，高含沙洪水较多，洪峰流量大、水沙量多，多次淤堵黄河，危害较大。西柳沟河长 106.5km，河道形态呈上陡下缓（图 1.7）、上窄下宽的态势。距河口约 43km 以上为砒砂岩沟壑区，河道比降超过

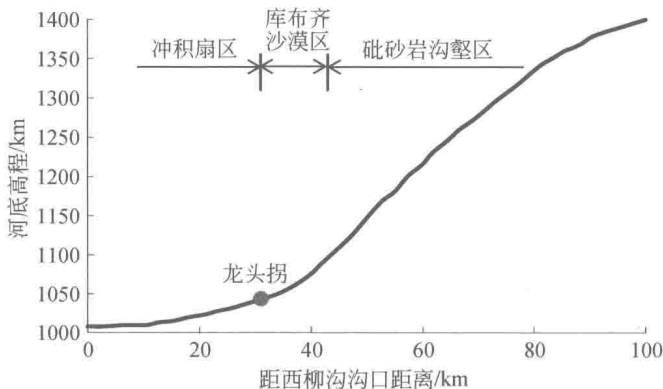


图 1.7 西柳沟河道纵剖面图

5‰; 龙头拐 (距河口约 31km) 至距河口 43km 处, 为库布齐沙漠, 风沙堆积区, 河道比降约为 2‰, 相应河道断面窄深; 龙头拐以下逐步进入冲积扇区, 地势逐渐平坦, 比降逐步降低至 1‰左右, 相应河道断面也逐渐变宽。

1.1.4.2 交汇区研究现状

流域系统中, 两条水流相遇, 相互顶托、掺混, 形成了水流交汇区。水流交汇区是河流系统的节点和基本特征, 水流动力复杂, 河床地形独特, 对其下游的水流、泥沙及污染物的运动及河床演变具有重要的调节作用 (Biron and Lane, 2008)。交汇区的特性取决于交汇水流的水沙特性及交汇区的河床边界条件。当交汇水流为清水时, 交汇区水位上升、水深增加; 当交汇水流为含沙水流时, 交汇区还将发生明显的冲淤变化。冲积河流系统中存在大量的含沙水流交汇区, 根据入汇支流的泥沙输移特性, 可分为低含沙水流交汇区、高含沙水流交汇区及泥石流交汇区。高含沙水流和泥石流交汇区, 往往发生大量泥沙淤积, 造成河道水位的突然上升, 形成洪水灾害。交汇区的水流结构复杂, 河床演变剧烈, 地貌过程复杂, 对交汇区及其下游河床演变及稳定产生重要影响, 是河流地貌及河床演变学研究面临的难点问题之一。

低含沙水流交汇区, 特别是以推移质运动为主的交汇区, 已有大量关于水流结构、河床形态及泥沙输移等方面的研究。Best (1987) 系统总结了交汇区水流结构的特点, 并在已有研究基础上提出了水流结构模型 (图 1.8)。模型基本上描述了交汇区的水流运动特点, 将交汇区分为邻近下游交汇角的分离区 (flow separation zone)、紧邻上游交汇角的停滞区 (stagnation zone)、水流偏转区 (flow deflection zone)、最大流速区 (maximum velocity)、干支流交汇形成的剪切层 (shear layer) 以及交汇后的水流恢复区 (flow recovery) 等, 影响这些水流结构区的主要因子为汇流比 (支流流量与干流之比) 及交汇角。Weber 等 (2001) 和王协康等 (2006) 研究了各水力结构区的三维流场和紊动特性, 并在分离区观测到了回流、分离区下游观测到了次生环流。由于分离区的回流特性, 因此该区也被叫作回流区。Best 和 Reid (1984) 针对分离区水流结构的特性, 提出了分离区的宽度和长度随着交汇角及支流流量的增加而增大的认识。Shakibainia 等 (2010) 利用三维数学模型计算发现, 随着交汇角、弗劳德数的增加及汇流比、河宽比的减少, 分离区尺度增大、高流速区速度增加, 螺旋流结构更明显。Sukhodolov 和 Rhoads (2001) 对三条野外河流的观测表明, 交汇区上游端的剪切层, 其紊动能是周围水体的 2~3 倍。近年来, Liu 等 (2012) 的实验研究, 证实了上述汇流比对分离区发展的影响, 并提出当支流为清水时, 最大冲刷坑位于剪切层下游。除上述研究外, 还有大量关于交汇区水深变化、干支流河床高差对水

流结构等方面的研究 (Biron et al. , 1996; Ribeiro et al. , 2012)。

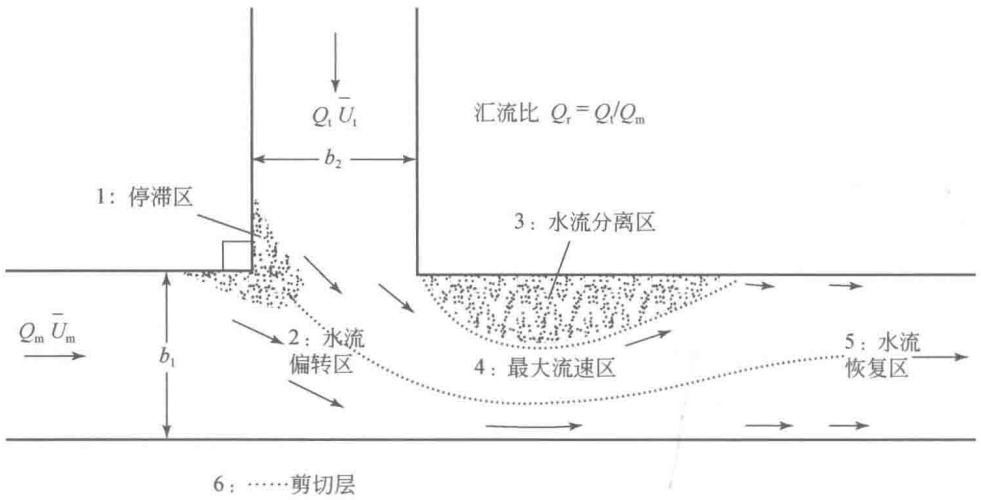


图 1.8 交汇区水流结构模型

水流结构分区往往反映了交汇区的河床形态特征 (Best, 1987, 1988; Szupiany et al. , 2009)。Best (1988)、Best 和 Rhoads (2008) 提出了交汇区河床形态及泥沙输移的概念模型，即交汇区河床形态包括干支流交汇口坡面 (avalanche face)、冲刷坑 (scour hole) 及分离区沙洲 (separation zone bar)、停滞区淤积及河槽中的沙洲，如图 1.9 所示。固定河宽条件下，河床形态的控制因素主要为交汇角和汇流比 (Best, 1988; Best and Rhoads, 2008)，冲刷坑方向沿汇流角对角线，冲刷坑深度随交汇角的增大而增加，随泥沙量的增加而减少，随汇流比的增大而增加，且沿冲刷坑两侧泥沙输移率最大 (Mosley, 1976)。紧贴河岸的分离区沙洲的大小与分离区密切相关，随交汇角和汇流比的增加而增加，

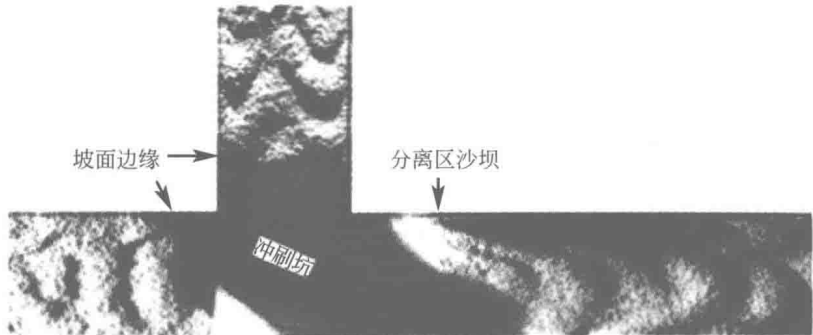


图 1.9 一般含沙水流交汇区床面形态 (Best, 1988)