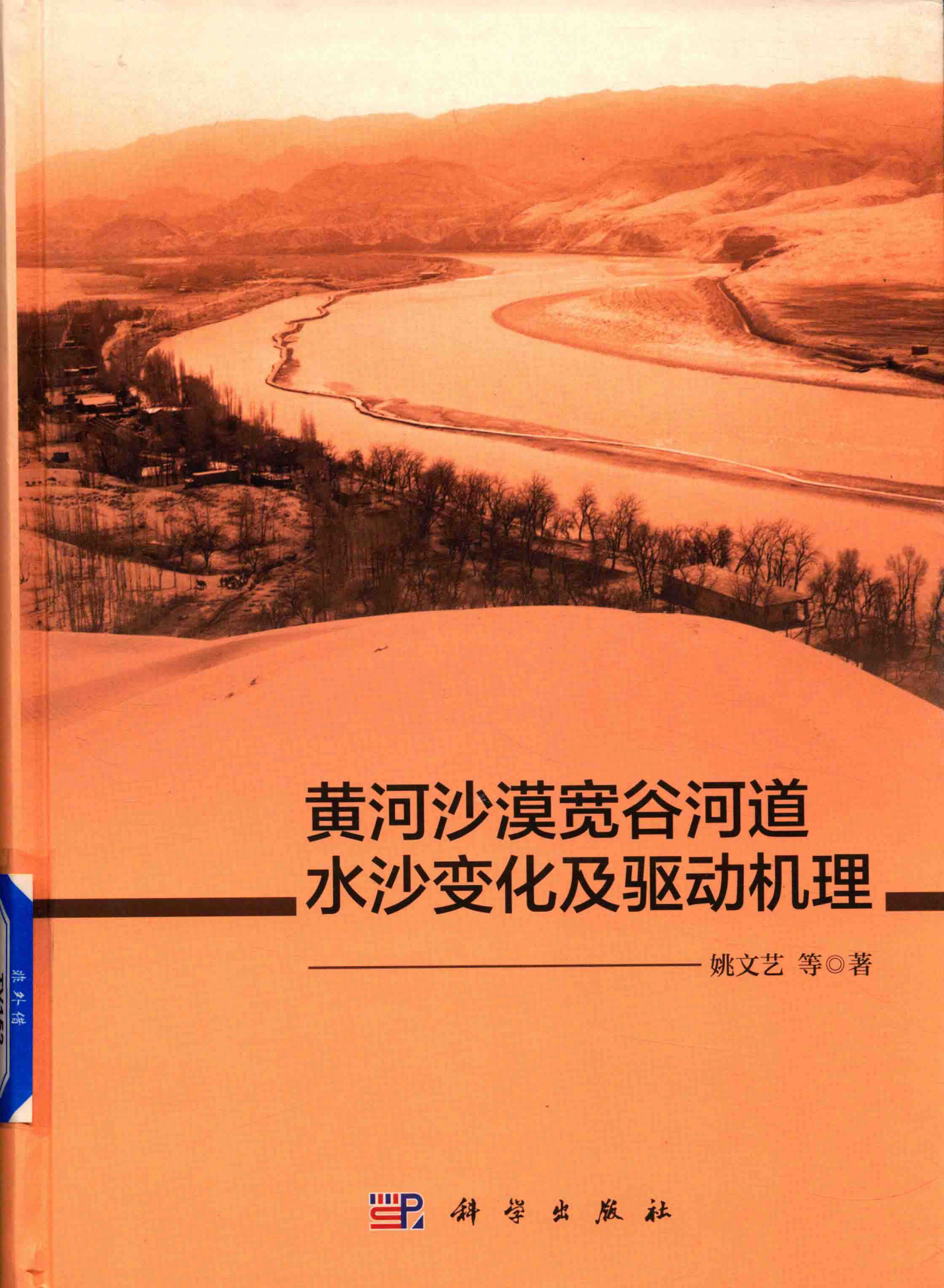




黄河沙漠宽谷河道 水沙变化及驱动机理

姚文艺 等◎著



科学出版社

黄河沙漠宽谷河道 水沙变化及驱动机理

姚文艺 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在国家重点基础研究发展计划(973计划)课题“沙漠宽谷河道水沙关系变化及驱动机理”(2011CB403303)等多项科技计划资助下,遵循“信息平台构建—变化过程辨识—驱动机理揭示—响应效果评价”的研究思路,通过数值模拟反演、实体模型控制试验、野外定位观测、理论推演和非线性分析等多种研究手段,研发水沙变化趋势评估技术,分析沙漠宽谷河流水沙关系变化时空特征,辨识水利工程对水沙过程调控机制,解析水沙关系对河床演变的响应关系,揭示多因子对水沙关系变异的驱动机理,定量评价气候变化、下垫面变迁、大型水利工程运行和河床调整等对水沙变化的贡献率,在沙漠宽谷段水沙变化驱动机理及多因子作用贡献率等方面取得了系统认识,为满足黄河上游防洪防凌安全、大型水利工程布局的重大需求提供了科技支撑。

本书可供水土保持、水文泥沙、河床演变、水资源、环境及流域治理等方面研究、规划和管理的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河沙漠宽谷河道水沙变化及驱动机理 / 姚文艺等著. —北京: 科学出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-03-057372-8

I. ①黄… II. ①姚… III. ①黄河—含沙水流—研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 094562 号

责任编辑: 刘 超 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 肖 兴 / 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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 623 000

定价: 318.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

水沙条件是河流治理开发与管理的基礎依据,尤其是对于水少沙多、水沙关系不协调的黄河而言,水沙条件的变化对河流治理重大决策起着更为重要的影响作用。

黄河水沙异源是其主要基本特征。黄河径流主要来自于上游,上游径流量占全河径流量的60%以上,而泥沙则主要来自于中游,上游泥沙不足全河的10%。近年来,随着气候变化和人类活动的不断加剧,黄河上游水沙条件发生明显变化,如径流量减少,径流年内过程改变,水沙关系更加不协调等,并引起了宁蒙河段(指黄河上游宁夏、内蒙古河段)河床过程响应,造成主槽淤积萎缩,过流能力降低,支流来沙淤堵黄河的机会增加,封冻河段下延等。由此,使得中常洪水常常发生重大防洪隐患,凌汛决口成灾,对该区域经济社会发展造成重大影响。同时,黄河上游水沙条件的变化不仅直接对宁蒙河段的河床过程影响很大,而且还直接影响到中下游的水沙条件,可以说黄河上游水沙关系变化牵涉到治黄全局。

黄河宁蒙河段河道长为1203.8km,其中宁夏青铜峡—石嘴山(194km)、内蒙古三盛公—头道拐(502km)为冲积性河道,堤防保护区面积达1万多 km^2 ,人口近360万。由于特殊的地理位置和气候条件(低纬度流向高纬度),宁蒙河段为黄河凌汛最严重的河段,在封、开河特别是开河流凌期极易形成冰塞、冰坝,出现水位迅速壅高,威胁堤防安全甚至造成堤防溃口的凌汛灾害。尤其是自20世纪80年代以来,宁蒙河道的致灾能力有增大趋势,主要表现为:槽蓄增量不断增大、河道水位由于淤积不断抬高、堤内河槽河底与堤外地面高程悬差不断增大、河道过流能力减弱易于卡冰结坝,形成凌灾。1986年以来由于水沙条件发生变化,河床抬高,排凌行洪能力降低,内蒙古河段已发生多次凌汛决口。尤其是2007~2008年度凌汛期间,凌汛导致内蒙古杭锦旗奎素段堤防两次发生溃堤,造成巨大的经济损失和社会影响,受灾人口达1.02万人,受灾耕地达8.10万亩,冲毁堤防200 m、公路272 km、渠道36 km、输电线路831 km,总经济损失达9.35亿元。黄河上游水沙变化对黄河上游防洪防凌安全已经造成严重威胁,成为严重制约区域经济社会持续发展的因素之一。因此,认识黄河上游水沙变化成因,防治黄河上游洪凌灾害,是保障黄河安澜、实现上游地区经济社会持续发展的迫切需求。

关于大型水利工程运用等在黄河上游沙漠宽谷河段水沙变异中的作用问题,已影响到黄河上游黑山峡峡谷的水力资源开发利用的重大决策。长期以来,围绕拟建水库对宁蒙沙漠宽谷河段的水沙关系调控作用及其功能定位等问题,出现严重的认识分歧,一直存在着两种观点,一是认为上游大型水库的调控造成水沙关系变异是宁蒙河段河道淤积的根源;二是认为黄河上游腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠及毛乌素沙漠等四大沙漠风沙入黄才是宁蒙河段泥沙淤积的主因,并由此形成黄河上游水力资源开发利用和大型水利工程布局的不同方案。其争论的根源就在于对黄河上游沙漠宽谷河段水沙变化机理缺乏深入

认识。因此,科学评价黄河上游水沙变化成因,是国家对治黄方略确定、重大水利工程布局的战略决策需求。

然而,黄河上游沙漠宽谷段水沙变化评价是一项非常复杂的科学问题。黄河上游石嘴山-乌海河段沿岸的冲积性平原上覆盖有半固定、半流动的灌丛沙堆,并在山地丘陵北坡堆积流动沙丘;乌海-磴口段北岸分布乌兰布和沙漠,多流动沙丘,沙丘高一般为5~6m,部分风沙会直接进入黄河,南岸冲积性平原上分布半固定灌丛沙堆及流动沙片,冲沟两岸覆盖流沙。磴口-河口镇段南岸,分布库布齐沙漠,呈带状分布,长约为370km,向东延伸到黄河喇叭湾一带,沙漠南北宽约为30km。同时,在河段上游建有龙羊峡、刘家峡等大型水利工程,以及较大规模的水土保持工程等。显然,影响黄河沙漠宽谷段水沙变化的因子非常多,包括气候等自然因素在内的多因素的作用都会驱动、激发水沙变化,使上游水沙变化过程成为一个极为复杂的非线性、非恒定的水文现象的状态转变。也正由此,该河段的水沙变化原因及驱动机理揭示、大型水利工程等多因子作用贡献率评价等问题已引起人们的广泛重视,成为我国水科学、生态科学研究领域的重要课题之一。

因此,从水沙变化多动力耦合驱动的系统角度出发,聚焦辨识黄河上游水沙变化成因,揭示沙漠宽谷段水沙变化驱动机理等科学问题,开展黄河上游沙漠宽谷段水沙变化研究,为保障黄河上游洪凌安全、合理开发水力资源、优化水库群调度运行提供科技支撑,是十分迫切和必要的。为此,科学技术部将“沙漠宽谷河道水沙关系变化及驱动机理”(编号:2011CB403303)列为国家重点基础研究发展计划(973)课题,并得到国家自然科学基金项目“多沙河流高含沙洪水传播失稳机理研究”(编号:51109064)资助,在作者主持的“十一五”国家科技支撑计划项目“黄河流域水沙变化情势评价研究”的研究基础上,对黄河上游水沙变化问题开展系统研究。本书以“特征分析—过程判识—机理揭示—效应评价”的学术思路,运用水力学、水土保持学、河床演变学、风沙地貌学、泥沙运动学等多学科的理论与方法,采用野外人工降雨反演试验、室内实体模型模拟试验、河道—灌区水循环数学模型模拟、大区域水沙循环观测站点定位测验、实测资料统计及数量化理论分析、遥感解译等研究手段,深化认识沙漠宽谷河道水沙关系变化过程与规律,阐明多因子耦合作用下河道水沙关系变异内在机制。

本书正是作者在系统总结近10年承担的多个项目研究成果基础上所撰写的。全书共分9章,各章撰写人员如下:第1章绪论,由姚文艺、肖培青执笔;第2章黄河沙漠宽谷河流水沙关系变化时空特征,由张晓华、郑艳爽、田世民、尚红霞执笔;第3章黄河上游大型水库运用对水沙过程变异的影响,由侯素珍、郭彦、丁赞执笔;第4章黄河上游大型灌区引水对水沙过程变异影响,由张会敏、胡亚伟执笔;第5章沙漠宽谷河道水沙关系对河床演变的响应机制,由唐洪武、丁赞、王卫红执笔;第6章植被对产流机制的胁迫作用,由王金花、姚文艺执笔;第7章沙漠宽谷河段流域下垫面对产沙的影响,由李勉、肖培青、杨春霞执笔;第8章河道水沙变化对多因子驱动响应机理,由冉大川、王玲玲、姚文艺、焦鹏执笔;第9章主要认识与需进一步研究的问题,由姚文艺执笔。全书由姚文艺统稿。

本书的研究成果是研发团队数十名成员经历近10年共同完成的,参加研究的人员有:姚文艺、唐洪武、张晓华、肖培青、侯素珍、张会敏、丁赞、李勉、史学建、冉大川、王

金花、郑艳爽、郭彦、胡亚伟、王卫红、杨春霞、王玲玲、申震洲、焦鹏、张冠英、田世民、尚红霞、吴永红、王愿昌、苏晓慧、彭红、陈界仁、戴文洪、黄富贵、王平、林秀芝、于守兵、郭秀吉、杨二、杨吉山、董国涛、常布辉、罗玉丽、曹慧提等。在研究过程中，项目全体研究人员密切配合，相互支持，圆满完成了研究任务，在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢！

限于作者水平，加之黄河水沙问题复杂，还有不少问题需要深化研究，因而书中欠妥或偏颇之处敬请读者批评指教。

姚文艺

2018年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 黄河沙漠宽谷河道概况	1
1.2 黄河沙漠宽谷段水沙特点	8
1.3 研究目的、意义及任务来源	13
1.4 研究内容及技术路线	15
1.5 本书结构	19
参考文献	19
第 2 章 黄河沙漠宽谷河流水沙关系变化时空特征	20
2.1 水沙变化表征的指标体系	20
2.2 水沙变化趋势与变点辨识	22
2.3 水沙关系变化规律分析	45
2.4 水沙变化周期规律分析	55
2.5 水沙变化时空特征分析	65
2.6 泥沙级配变化特征及粗泥沙临界粒径	73
2.7 小结	83
参考文献	85
第 3 章 黄河上游大型水库运用对水沙过程变异的影响	87
3.1 黄河上游大型水库运用概况及水库调控参数分析	87
3.2 黄河上游大型水库进出库水沙参数分异特征	97
3.3 水库运用对出库还原径流泥沙序列周期的影响	117
3.4 水库运用对河道水沙过程的调控作用机制	123
3.5 水库运用对水沙关系的调控机制及其贡献率	131
3.6 小结	141
参考文献	141
第 4 章 黄河上游大型灌区引水对水沙过程变异影响	143
4.1 灌区基本概况	143
4.2 黄河上游大型灌区引水退水变化过程	152
4.3 宁蒙引黄灌区引退水关系	167
4.4 基于 GIS 的大型灌区引水循环模型	173
4.5 黄河干流水沙输移与灌区引水循环双过程耦合模型	205
4.6 大型灌区引水对干流水沙关系变化的影响及其贡献率	233
4.7 小结	241

参考文献	242
第5章 沙漠宽谷河道水沙关系对河床演变的响应机制	243
5.1 沙漠宽谷段河床演变基本特征	243
5.2 水沙关系对河床演变响应试验研究	253
5.3 水沙关系对河床演变响应的动力模型	268
5.4 河床演变元胞自动机模型及对水沙变化影响的模拟研究	276
5.5 多过程河床演变对水沙关系的调控机制	282
5.6 小结	287
参考文献	288
第6章 植被对产流机制的胁迫作用	290
6.1 研究方法与典型流域选择	290
6.2 西柳沟流域暴雨洪水泥沙变化特点	295
6.3 水沙变化对被覆的响应机理	305
6.4 被覆变化对产流机制的胁迫作用及其临界	316
6.5 小结	327
参考文献	328
第7章 沙漠宽谷河段流域下垫面对产沙的影响	329
7.1 研究方法	329
7.2 典型流域下垫面侵蚀产沙基本特征	332
7.3 典型流域泥沙来源	335
7.4 流域水沙变化对下垫面的响应机理	344
7.5 小结	354
参考文献	355
第8章 河道水沙变化对多因子驱动响应机理	356
8.1 沙漠宽谷段水沙变化驱动因子分析	356
8.2 多因子对水沙关系变化的调控机制	362
8.3 典型流域水沙变化归因分析	364
8.4 典型流域不同治理方案下水沙变化情景模拟	373
8.5 驱动因子对水沙变化的贡献率	394
8.6 小结	398
参考文献	399
第9章 主要认识与需进一步研究的问题	402
9.1 主要成果与认识	402
9.2 主要进展	409
9.3 需进一步研究的问题	411

第 1 章 绪 论

1.1 黄河沙漠宽谷河道概况

1.1.1 河道自然属性

黄河沙漠宽谷河道位于宁夏、内蒙古干流河段（简称宁蒙河段），一般是指从下河沿至头道拐（图 1-1），穿越广袤的腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠和毛乌素沙漠，长约为 900km，发育有典型的沙漠宽谷。在黄河上游近 3500 km 长的河段中，沙漠宽谷河道水沙变化最复杂、河床演变最剧烈，是黄河上游产水区与中下游河段水沙关系的调节河段，也是受上游大型水库联合调度影响显著的河段之一。该河段流经区域是我国重要能源基地，西北主要粮食产区，少数民族集聚区，在西部大开发中具有重要的战略地位。

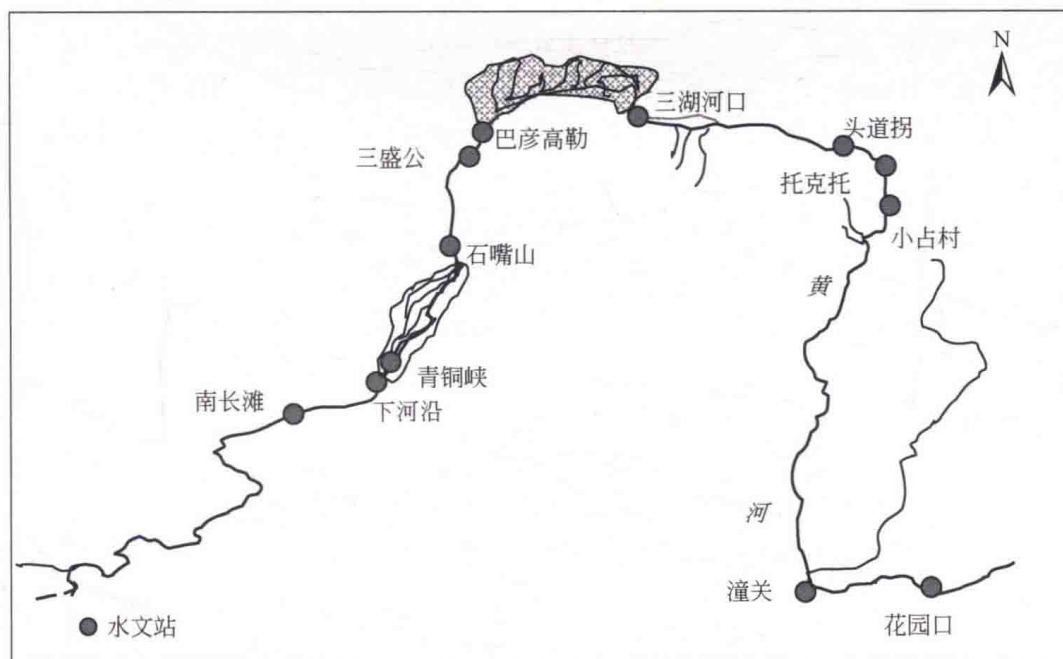


图 1-1 宁蒙河段示意图

黄河沙漠宽谷河道约占宁蒙河段长度的 82%，是宁蒙河段的关键区，基本上反映了宁蒙河段的河流属性。因此，为从总体上了解沙漠宽谷河流属性及其水沙变化规律，本节及其他章节将根据需要，从宁蒙河段全区段的范围进行介绍和分析研究。

宁蒙河段自宁夏回族自治区中卫市南长滩起，至内蒙古准格尔旗马栅乡的小占村止

(图 1-1), 全长为 1203.8km (水利部黄河水利委员会, 2013), 约占黄河总长的五分之一。宁蒙河段从南长滩至内蒙古三盛公的流向大致为由西南向东北, 三盛公至托克托大致为由西向东, 托克托至小占村大致为由北向南。宁蒙河段流经地区为大陆性季风气候, 冬季干燥寒冷, 常为蒙古高压所控制, 多年平均气温在 0℃ 以下的时间可持续 4~5 个月, 极端气温达 -39℃。在自然地理分区上属于暖温带半干旱草原带, 年均降水量为 150~400mm, 由东向西递减。区内降水量年际变率大于 30%, 年内分布极不均匀, 大约有 75% 以上的降水集中在 7~9 月, 年均风速为 2.7~4.8m/s, 风力侵蚀集中在 11 月至次年的 5 月, 尤其春季多沙尘暴, 年均大风日数为 10~32d, 沙尘暴日数为 19~22d。宁蒙河段区间水蚀、风蚀交错, 水土流失严重, 尤其是内蒙古河段的十大孔兑 (孔兑系蒙语, 指洪水沟) 是高含沙水流多发的黄河一级支流, 淤堵黄河干流现象曾多有发生。

关于宁夏河段与内蒙古河段的分界处, 多以省 (区) 界并参考黄河干流水文站综合确定, 一般界定为石嘴山水文站观测断面。但是, 有不少文献尽管基本也认定为石嘴山, 而提出的具体分界处地名又有所不同。例如, 有的说是石嘴山市头道墩, 有的说是石嘴山市上游都思兔河入黄口, 也有的说是巴音陶亥镇等。本书以石嘴山水文站观测断面作为分界处。

按照上述分界, 宁夏河段自中卫市南长滩起, 至石嘴山, 全长为 380.8km, 偏东转偏北流向, 跨北纬 37°17'~39°23', 东经 106°10'~112°50'。境内河势差异明显, 下河沿以上 62.7km 为峡谷段; 下河沿至青铜峡河段长 124.0km, 河道迂回曲折, 河心滩地多, 该河段河宽为 0.2~3.3km, 比降为 0.8‰~0.9‰, 为粗砂卵石河床; 青铜峡至石嘴山河段长 194.1km, 河宽为 0.2~5.0km, 比降为 0.1‰~0.2‰, 为粗砂河床。

内蒙古河段自石嘴山入境至鄂尔多斯市 (原伊克昭盟) 准格尔旗马栅乡出境, 全长为 823.0km, 穿行于乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、鄂尔多斯台地和内蒙古河套平原之间, 风沙是该河段泥沙来源之一。该河段修建有三盛公水利枢纽。内蒙古河段磴口以上河床比降大, 在 0.3‰ 左右, 河道两岸沙丘起伏, 到磴口以下比降变缓, 平均为 0.13‰, 河面宽、水流缓, 为弯曲型平原河道。从内蒙古河段起始断面石嘴山至三盛公水利枢纽为峡谷型河道, 长约为 145.5km, 河宽为 0.4~2.0km, 河道比降为 4.2‰, 弯曲系数为 0.9; 三盛公水利枢纽以下至三湖河口进入宽河段, 河势变化快, 主流摆动幅度大; 三湖河口到昭君坟河段比降为 0.12‰, 有十大孔兑汇入 (表 1-1), 暴雨洪水后, 往往会发生高含沙水流, 含沙量可达 1500kg/m³ 以上, 输沙模数达到数千吨每年每平方千米, 孔兑高含沙水流挟带的泥沙有时可淤堵黄河干流, 致使该河段的水沙搭配与河道形态相互作用更加复杂, 并对两岸造成很大的经济损失; 昭君坟以下属弯曲性河道, 平均弯曲系数为 1.45, 河势变化表现为主流上体下挫, 摆幅也可达千米以上, 尤其是孔兑入黄口处的摆幅比较大, 一般约为 2000m。

表 1-1 十大孔兑水文泥沙基本特性

孔兑名	流域面积 (km ²)	河长 (km)	历年最大		多年平均		输沙模数 (t/km ²)
			流量 (m ³ /s)	含沙量 (kg/m ³)	径流量 (万 m ³)	输沙量 (万 t)	
毛不拉孔兑	1 261	111	5 600	1 500	901	330	2 620
布日嘎色太沟	545	74	3 670		430	158	2 890

续表

孔兑名	流域面积 (km ²)	河长 (km)	历年最大		多年平均		输沙模数 (t/km ²)
			流量 (m ³ /s)	含沙量 (kg/m ³)	径流量 (万 m ³)	输沙量 (万 t)	
黑赖沟	944	89	4 040		998	367	3 890
西柳沟	1 194	106	6 940	1 550	3 220	481	4 030
罕台川	880	90	3 090	1 350	1 880	275	3 130
哈拉川	1 089	92	4 070		3 510	524	4 810
母哈尔河	407	77	1 610		708	177	4 350
东柳沟	451	75	1 500		669	167	3 700
壕庆河	213	29	435		335	84	3 940
呼斯太河	406	65	2 350		590	148	3 650
合计	7 390				13 241	2 711	

注：各孔兑流域面积不包括平原区面积；毛不拉孔兑、西柳沟、罕台川为水文站实测资料，其他孔兑均为调查洪水统计，系列为 1960 ~ 1989 年。

1.1.2 河段特性

宁蒙河段河流环境复杂，流经不同地貌区，其河道特性空间分异显著（表 1-2）（叶春江，2003）。

表 1-2 宁蒙河段河道基本特性

河段	河型	河长 (km)	平均河宽 (m)	平均主槽宽 (m)	比降 (‰)	弯曲系数
南长滩—下河沿	峡谷型	62.7	200	200	0.87	1.80
下河沿—仁存渡	非稳定	161.5	1 700	400	0.73	1.16
仁存渡—头道墩	过渡型	70.5	2 500	550	0.15	1.21
头道墩—石嘴山	游荡型	86.1	3 300	650	0.18	1.23
石嘴山—乌达公路桥	峡谷型	36.0	400	400	0.56	1.50
乌达公路桥—三盛公	过渡型	105.0	1 800	600	0.15	1.31
三盛公—三湖河口	游荡型	220.7	3 500	750	0.17	1.28
三湖河口—昭君坟	过渡型	126.4	4 000	710	0.12	1.45
昭君坟—蒲滩拐	弯曲型	193.8	上段 3 000 下段 2 000	600	0.10	1.42
蒲滩拐—马栅	峡谷型	141.1				
合计		1 203.8				

(1) 南长滩—下河沿

该河段为黄河黑山峡峡谷尾端, 长为 62.7km, 河槽束范于两岸高山之间, 河宽为 150 ~ 500m, 平均为 200m, 纵比降为 0.87‰, 受两岸高山约束, 主流常年相对稳定, 弯曲系数为 1.80。

(2) 下河沿—仁存渡

黄河上游自下河沿出峡谷进入沙漠宽谷段, 其中下河沿以下由枣园至青铜峡坝址之间的 44.1km 的河段为青铜峡水库库区段。由于黄河出峡谷后水面展宽, 卵石推移质沿程淤积, 洪水漫溢时, 悬移质泥沙落淤于滩面上, 河岸形成了典型的二元结构, 下部为砂卵石, 上部覆盖有砂土。该河段河心滩发育, 汊河较多, 水流分散, 河势多为 2 ~ 3 汊, 属非稳定分汊型河道, 其河床演变主要表现为主、支汊的兴衰及心滩的消长, 主流多顶冲滩岸, 造成崩塌侵蚀。清水沟在青铜峡水库库区以上右岸汇入黄河, 红柳沟在库区段右岸汇入黄河, 苦水河在库区以下右岸汇入黄河。

该河段长为 161.5km, 河道为砂卵石河床, 河宽为 500 ~ 3000m, 平均为 1700m; 主槽宽为 300 ~ 600m, 平均为 400m。河道纵比降青铜峡水库库区以上为 0.80‰, 库区以下为 0.61‰, 弯曲系数为 1.16。青铜峡水库库区段坝上 8km 为峡谷河道, 峡谷以上河床宽浅, 水流散乱, 其河床演变除受来水来沙条件及河床边界条件的影响外, 还与水库运用密切相关。

(3) 仁存渡—头道墩

该河段为冲积平原河道, 河床组成由下河沿至仁存渡的砂卵石过渡为砂质, 为分汊型河道向游荡型河道转变的过渡型河道, 也有专家将此段划为弯曲型河道。受鄂尔多斯台地控制, 右岸形成若干节点, 因此平面上出现多处大的河弯, 心滩少, 边滩发育, 主流摆动大。抗冲能力弱的一岸, 主流坐弯时, 常造成滩岸塌滩, 出现险情。永清沟于左岸汇入黄河, 水洞沟于右岸汇入黄河。该河段长为 70.5km, 河宽为 1000 ~ 4000m, 平均为 2500m。主槽宽为 400 ~ 900m, 平均约为 550m。河道纵比降为 0.15‰, 弯曲系数为 1.21, 主流多靠右岸, 左岸顶冲点变化不定, 平面变化大。

(4) 头道墩—石嘴山

由于受右岸鄂尔多斯台地和左岸堤防控制, 该段河道宽窄相间, 呈藕节状分布, 断面相对宽浅, 水流比较散乱, 沙洲密布, 河床河岸的抗冲性较差, 冲淤变化明显, 主流游荡摆动剧烈, 两岸主流顶冲点变化不定, 会经常出现险情, 属于游荡型河道。

该河段长为 86.1km, 河宽为 1800 ~ 6000m, 平均约为 3300m; 主槽宽为 500 ~ 1000m, 平均约为 650m。河道纵比降为 0.18‰, 弯曲系数为 1.23。

(5) 石嘴山—乌达公路桥

该河段长约 36.0km, 黄河从右岸桌子山及左岸乌兰布和沙漠之间穿行而过, 属于峡

谷型河道，河宽约400m，局部地段较宽，达1300m，纵比降为0.56‰，弯曲系数为1.50。

(6) 乌达公路桥—三盛公

受鄂尔多斯台地及乌兰布和沙漠前缘的控制，该河段平面上形成多处节点，河道宽窄相间，节点扩张段常出现较大河心滩，汊河较多。该河段长为105.0km，河宽为700~3000m，平均为1800m；主槽宽为400~900m，平均为600m。河道比降为0.15‰，弯曲系数为1.31。乌达公路桥—旧磴口河长为50.4km，其中乌达公路桥下游修建有海勃湾水库，库区长为33.0km，工程左岸为乌兰布和沙漠，右岸为内蒙古自治区的新兴工业城市乌海市；旧磴口—三盛公枢纽坝址河长为54.6km，是三盛公水利枢纽库区段，库区为平原型水库，平均河宽为2000m，主槽平均宽为1000m。三盛公枢纽右岸鄂尔多斯台地发育形成有众多的走向大体相互平行的山洪沟，库区段河道的河势变化受来水来沙条件及水库运用的共同影响，河床演变较为复杂。

(7) 三盛公—三湖河口

该河段穿行于河套平原南缘，河身较顺直，断面宽浅，水流散乱，河道内沙洲众多，属于游荡型河段，历史上摆幅可达50~60km，近二三十年来河势仍不稳定，最大摆幅达到3km左右。位于该河段的三盛公库区长为54.2km。

该河段长为220.7km，河宽为2000~4000m，平均约为3500m；主槽宽为500~900m，平均约为750m。

该段北岸有河套灌区总干渠二闸、三闸、四闸、六闸退水渠和总排干沟汇入黄河，还有刁人沟等山洪沟汇入黄河。

(8) 三湖河口—昭君坟

该河段北岸为乌拉山山前倾斜平原，南岸为鄂尔多斯台地，沿河南岸有毛不拉孔兑、布日嘎色太沟和黑赖沟3条孔兑汇入。由于上游游荡型河段的淤积调整，本河段滩岸已断续分布有黏性土，由游荡型河道向弯曲型河道过渡。由于河道宽广、河岸黏性土分布不连续，加之孔兑的汇入，该河段主流摆动幅度仍较大，其河床演变的特性介于上游游荡型河道和下游弯曲型河道之间。

该河段长为126.4km，河宽为2000~7000m，平均约为4000m；主槽宽为500~900m，平均约为710m。

(9) 昭君坟—蒲滩拐

在该河段内，黄河自包头折向东南，沿北岸土默特川平原南缘与南岸准格尔台地奔向蒲滩拐，河段总长度为193.8km。该河段由连续的弯道组成，平面上呈弯曲状，南岸有西柳沟、罕台川、哈什拉川、母哈尔沟和东柳沟五大孔兑汇入，北岸有数条阴山支流汇入，多于黄河弯道凸岸处进入黄河。该河段流经上游长距离的游荡段和过渡段后，水流含沙量有所降低。河道滩岸分布有断续的黏性土层，抗冲性较强，加之南岸准格尔台地及天然节点的控制，因此，该河段为典型的弯曲型河道，其河床演变的特点主要为凸岸边滩的淤长

和凹岸的淘刷，险情不断。另外，该河段河道较窄，河身弯曲，凌汛期易形成冰塞、冰坝等特殊凌情，造成大的险情。

该河段河宽为 1200 ~ 5000m，平均约为 2000m，上段河道较宽；主槽宽为 400 ~ 900m，平均宽为 600m。

(10) 蒲滩拐—马栅

该河段河长为 141.1km，河道从山区穿过，主槽宽为 400 ~ 1000m，左岸有浑河汇入黄河。

1.1.3 河道工程概况

1.1.3.1 水库工程

黄河上游修建了一系列大型水利工程，其中宁蒙河段建有青铜峡、刘家峡、龙羊峡等水利枢纽（表 1-3），其中沙漠宽谷段主要有青铜峡水利枢纽、三盛公水利枢纽、海勃湾水利枢纽。另外，内蒙古河段支流也修建有不少水库，例如，狼山、红领巾、石嘴子、石峡口、乌兰、巴图湾等。

表 1-3 黄河宁蒙河段主要水利枢纽

枢纽名称	死水位 (m)	正常蓄水位 (m)	总库容 (亿 m ³)	调节库容 (亿 m ³)	水库调节 性能	保证出力 (MW)	装机容量 (MW)
龙羊峡	2530	2600	247	193.5	多年	589.8	1280
李家峡	2178	2180	16.5		日周	581.1	2000
刘家峡	1696	1735	57.0	41.5	年	489.9	1160
盐锅峡	1618	1619	2.2		日	204	396
八盘峡	1576	1578	0.49		日	107	180
大峡		1480	0.9		日	143	300
青铜峡		1156	5.65		日周	90.9	302
三盛公			0.8				2
海勃湾	1069	1076	4.87				90

2014 年 2 月 12 日建成的位于黄河干流内蒙古自治区乌海市境内的海勃湾水利枢纽开始分凌下闸蓄水，同年 5 月 26 日首台机组正式发电。海勃湾水利枢纽控制的流域面积为 31.34 万 km²，工程运用后可配合上游龙羊峡、刘家峡水库的防凌调度，适时调控凌汛期流量，提高黄河内蒙古段的防洪标准，使内蒙古河段的设防标准由 50a 一遇提高到 100a 一遇，减轻宁蒙河段的凌灾损失，是一座防凌、发电等综合利用工程。其下游 87 km 处为内蒙古三盛公水利枢纽，工程左岸为阿拉善盟，右岸为乌海市，坝址以上河段长约为 2837km。海勃湾水库最大坝高为 18.2m，正常蓄水位为 1076m，死水位为 1069m，总库容为 4.87 亿 m³，年平均发电量为 3.8 亿度。设计洪水标准为 100a 一遇，校核洪水标准为 2000a 一遇。

1.1.3.2 河道整治工程

为防止河道凌洪决口灾害,宁蒙河段修建了不少河道整治工程。该河段有计划地开展河道整治始于 20 世纪 90 年代后半期,整治方案基本上同黄河下游河道,也是采用微弯整治方案,并逐步完善工程体系,目前少部分工程已初步起到了稳定河势的作用。

河道整治工程主要包括险工、控导工程。1988 年前宁蒙河段仅有河道整治工程 113 处,坝垛 1133 道,且多为险工。至 2012 年,共有河道整治工程 228 处,坝垛 3976 道,工程长度 339.0km。

1.1.3.3 灌区工程

黄河沙漠宽谷段建设有宁夏、内蒙古两大引黄灌区(简称宁蒙灌区)。

宁夏引黄灌区是我国四大古老灌区之一,位于黄河上游下河沿—石嘴山,沿黄河两岸川地呈“J”形带状分布。以青铜峡水利枢纽为界,其上游为沙坡头(卫宁)灌区,下游为青铜峡灌区。为解决宁夏中南部地区生产生活用水,还陆续建设了固海、盐环定、红寺堡和固海扩灌四大扬水工程,并在自流灌区周边兴建了南山台子等 8 个中型扬水灌区。

截至 2015 年,宁夏有引黄灌区 14 处,灌溉面积达 783 万亩^①,其中大型自流灌区 2 处,自流灌溉面积达 533 万亩,大中型扬水灌区 12 处,扬水灌溉面积达 250 万亩。

内蒙古引黄灌区西起乌兰布和沙漠东缘,东至呼和浩特市东郊,北界狼山、乌拉山、大青山,南倚鄂尔多斯台地。截至 2015 年,内蒙古引黄灌区由河套灌区、黄河南岸灌区、磴口扬水灌区、民族团结灌区、麻地壕扬水灌区、大黑河灌区及沿黄小灌区组成,东西长约为 480km,南北宽为 10~415km,土地总面积约 2700 万亩,其中耕地面积约 2000 万亩,总灌溉面积约 1100 万亩。

乌梁素海位于内蒙古灌区的后套灌区东端,水面面积为 290km²,库容为 3.3 亿 m³,承纳后套灌区的排退水及阴山南麓的山洪,通过泄水渠排入黄河。

1.1.3.4 水土保持工程

黄河沙漠宽谷段入黄支流主要有清水河、苦水河和十大孔兑等。根据第一次全国水利普查成果,清水河、苦水河和十大孔兑水土流失综合治理以林草(林地和草地)措施为主,其面积为 103.6 万 hm²,占总治理面积的 53.1%,淤地坝坝地面积仅占 0.7%(表 1-4)。

表 1-4 兰州一头道拐河段水土保持措施量

流域	梯田 (hm ²)	林地 (hm ²)	草地 (hm ²)	封禁 (hm ²)	淤地坝		总面积 (hm ²)
					座数	坝地面积 (hm ²)	
祖厉河	274 313	265 103	180 678	44 628	197	3 637	768 359
清水河	83 667	184 715	48 569	341 023	352	6 075	664 049

① 1 亩≈666.67m²。

续表

流域	梯田 (hm ²)	林地 (hm ²)	草地 (hm ²)	封禁 (hm ²)	淤地坝		总面积 (hm ²)
					座数	坝地面积 (hm ²)	
苦水河	3 035	62 908	19 859	69 629	3	162	155 593
十大孔兑	1 685	250 626	23 620	82 678	290	4 534	363 143
合计	359 665	700 444	252 867	468 330	842	14 408	1 951 144

1.2 黄河沙漠宽谷段水沙特点

除了部分冰雪融水外，黄河流域的河川径流主要由降水汇集而成。黄河流域降水量分布很不均匀，上游玛曲一带以南为多雨区，年降水量为 800 ~ 900mm，最少的是沙漠宽谷段的古磴口附近，年降水量仅为 145mm。上游地区降水多集中在 6 ~ 9 月，年际变化也较大。

观测黄河沙漠宽谷段干流水沙的水文站主要为下河沿、青铜峡、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、头道拐等，其中下河沿水文站断面集水面积为 25.4 万 km²，头道拐水文站断面集水面积约为 36.79 万 km²，分别约占全河的 31.0% 和 46.3%。

(1) 水沙异源

黄河上游的水量主要来自于河源区及兰州水文站以上的支流，其中包括湟水、大通河、洮河、庄浪河等支流；而泥沙则主要来自位于兰州水文站上游的循化水文站至头道拐水文站河段的支流及入黄风沙，其间支流除上述 4 条主要支流外，还包括祖厉河、清水河、苦水河、都思兔河，以及三湖河口—头道拐河段的十大孔兑。也就是说，兰州以上是黄河上游径流的主要来源区，但自兰州以下至头道拐，由于灌区引水等影响，径流量沿程不断减少。根据统计，兰州水文站不同时期的径流量占头道拐水文站径流量的 129.8% ~ 170.0%，而年输沙量仅占头道拐水文站的 45.6% ~ 81.9%；下河沿水文站年均输沙量占头道拐水文站输沙量的 97.6% ~ 146.5%。

根据分析（姚文艺等，2011），尽管唐乃亥以上的河源区面积仅占黄河流域面积的 16%，但是 1956 ~ 2006 年平均实测径流量约占黄河下游花园口断面的 42.0%，占下河沿径流量的 86.8%，而唐乃亥以上泥沙量仅占下河沿输沙量的 9.6%；河源区—兰州河段支流实测径流量占花园口断面的 23.4%，兰州实测径流量为 309.38 亿 m³，占到花园口的 65.4%。对泥沙而言，循化以下支流是黄河上游泥沙的主要来源区，特别是循化以下的洮河、大通河、湟水、祖厉河等支流输沙量占到下河沿来沙量的 61%。祖厉河和清水河年来水量分别为 1.28 亿 m³、1.10 亿 m³，合计来水量不到下河沿年水量的 3%，仅为头道拐年水量的 1%，而来沙量分别为 0.558 亿 t、0.236 亿 t，合计来沙量占下河沿年沙量的 60.6%、头道拐年沙量的 54%。两条支流的年平均含沙量分别为 436 kg/m³、215kg/m³，分别是下河沿的 99.8 倍、49.2 倍，为头道拐年平均含沙量的 87 倍、43 倍。

下河沿以下主要是沙量加入的河段，来自于清水河、苦水河和十大孔兑，合计年均沙量为 0.42 亿 t，占头道拐输沙量的 38.9%，而这些支流径流量合计为 2.60 亿 m³，只有头道拐的约 1%。

来自于腾格里沙漠、库布齐沙漠等几大沙漠的风沙也是黄河沙漠宽谷段泥沙的来源之一。关于该河段入黄风沙已有一些研究成果,但不同研究者在不同时段研究的入黄风沙量也有不少差别。例如,杨根生等(2003)分析,1954~2000年乌兰布和沙漠、库布齐沙漠年均入黄风沙约0.253亿t;方学敏(1993)分析认为,1952~1989年下河沿—头道拐河段入黄风沙约为0.219亿t;近期有人研究认为入黄风沙量也有明显降低,年均约为0.160亿t(薛娴,2015)。

(2) 水多沙少

宁蒙河段水多沙少是其显著特点之一。天然情况下1919~1967年沙漠宽谷段进口断面下河沿的平均径流量为314亿 m^3 、平均输沙量为1.853亿t,平均含沙量为 $5.90\text{kg}/\text{m}^3$,其中径流量占全河同期花园口断面的64%,而输沙量只占13%。

(3) 径流量沿程减少

黄河沙漠宽谷段仅有清水河、苦水河及十大孔兑等支流,产流量少,不足下河沿径流量的1%,但宁蒙灌区引水量远比区间产水量多,因此,径流量沿程减少成为沙漠宽谷段河道径流的主要特征。1954~1969年兰州—头道拐河段年径流沿程减少量为81.9亿 m^3 ;20世纪80年代以来,经济社会用水量不断增大致兰州—头道拐河段径流沿程减少量增加趋势明显。例如,2005年径流沿程减少量达到150多亿立方米。2010年以来径流沿程减少量有所降低,但仍在100亿 m^3 以上。2012年因宁蒙河段降水量大,径流沿程减少量回落,为94.2亿 m^3 。据统计,2000~2015年该河段径流沿程减少量为120多亿立方米,较基准期多减少了46.5%。

(4) 水沙年内分配不均匀且年际变化大

黄河上游段水沙不仅存在着地区来源的较大差异,而且年内、年际的分配也呈明显的不同。如不考虑宁蒙河段支流入汇水沙量,以下河沿作为宁蒙河段来水来沙的控制断面,则根据统计(表1-5),按刘家峡水库、龙羊峡水库先后投入运用时间划分的1961~1968年、1969~1986年和1987~2012年3个时段中,刘家峡水库运用前的1961~1967年相当于天然时期,汛期径流量占全年的比例在60%以上,自1968年刘家峡水库开始运用后的1969~1986年,汛期径流量占全年的比例明显下降,仅约53%,1986年龙羊峡水库建成并与刘家峡水库联调,之后汛期径流量占全年的比例与天然时期的相倒置,仅有4成多,而非汛期则差不多占到了6成。

表 1-5 宁蒙河段不同时段汛期、非汛期来水来沙量

时段	汛期		非汛期		全年		汛期占全年比例	
	径流量 (亿 m^3)	输沙量 (亿t)	径流量 (亿 m^3)	输沙量 (亿t)	径流量 (亿 m^3)	输沙量 (亿t)	径流量 (%)	输沙量 (%)
1961~1968年	235.0	1.634	144.6	0.289	379.6	1.923	61.91	84.97
1969~1986年	169.1	0.895	149.6	0.175	318.7	1.070	53.06	83.64
1987~2012年	108.1	0.505	145.1	0.143	253.2	0.648	42.69	77.93