

张红武,方红卫,钟德钰,等.宁蒙黄河治理对策[J].水利水电技术,2020,51(2):1-25.

ZHANG Hongwu, FANG Hongwei, ZHONG Deyu, et al. Control measurements in Ningmeng Reach of the Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2): 1-25.

## 宁蒙黄河治理对策

张红武<sup>1</sup>, 方红卫<sup>1</sup>, 钟德钰<sup>1</sup>, 王新军<sup>2</sup>, 李振山<sup>3</sup>, 黄河清<sup>4</sup>, 张俊华<sup>5</sup>,  
安催花<sup>6</sup>, 刘青泉<sup>7</sup>, 李颖曼<sup>2</sup>

- (1. 清华大学黄河研究中心, 北京 100084; 2. 宁夏大柳树水利枢纽工程前期工作办公室, 宁夏 银川 750001; 3. 北京大学环境科学与工程学院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 6. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 7. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 资料分析表明, 宁蒙黄河冰凌灾害频繁的被动局面是由于主槽萎缩、卡冰结坝所致; 而洪灾与用水安全问题则是河势变化无常和多沙支流突发性洪水淤堵干流形成“沙坝”引起的。为有效恢复宁蒙河段的行洪排沙功能, 实现河道减淤、恢复和维持河道中水河槽、保障防洪(凌)安全的宁蒙黄河治理目标, 从产沙、输沙、调控机理三个角度出发, 分析了各因素对宁蒙黄河河床演变特征的影响。就产沙而言, 通过产沙地貌分区、遥感影像分析和流域水系分区相结合的方法确定黄河上游不同沙源区的分布。基于提出的风蚀输沙通量计算方法及风沙入河估算方法, 并结合区域风速与植被覆盖率实测数据, 发现近 30 a 风速下降、区域植被覆盖率上升是风沙侵蚀量与入黄风沙量逐渐减少的原因。分析宁蒙河段日均风速、日降雨量和已有侵蚀观测资料, 发现宁蒙地区的风水两相侵蚀主要表现为风蚀与水蚀交错存在及其交互促进, 风力侵蚀主要发生在 3—5 月, 水力侵蚀则集中在 7—9 月。现场观测与黄土降雨侵蚀模型试验则表明, 重力侵蚀在黄土高原的整个侵蚀过程中占有重要的份额, 暴雨形成的径流是黄土遭到侵蚀的主要外营力, 也是激发和加剧重力侵蚀发展的重要影响因子。总体来看, 宁蒙黄河的流域产沙具有典型的风-水-重力多营力交互特点, 在比尺模型与野外观测揭示的流域径流汇集过程、沟道水流与河床自适应以及非平衡输沙机理基础上, 构建了复杂地貌形态的小流域产流产沙动力学模型, 成功模拟了不同植被特征和分布状况对流域产流产沙的影响, 并得出了植被的减水减沙效果与延滞径流洪峰的作用同郁闭度呈正相关关系, 陡坡区域植被对径流洪峰的延滞作用大于缓坡区域的结论。就输沙而言, 以泥沙起动、推移质输沙与河床均衡调整等基础理论为基础, 提出了水沙两相流数值模拟方法与冲积河流全沙运动模型相似条件。数值计算与模型试验表明, 龙羊峡、刘家峡水库联合运用改变径流分配是导致宁蒙河道淤积萎缩的主因, 协调水沙关系是修复黄河行洪排沙功能的有效途径。并分析确定了宁蒙黄河河道水沙调控阈值和多沙支流入汇口干流防淤堵的流量阈值, 即宁蒙黄河临界调控流量为 2 000~2 500 m<sup>3</sup>/s, 临界含沙量 5.4~10.5 kg/m<sup>3</sup>, 调控时间为 15~

收稿日期: 2019-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目“黄河下游河道与滩区治理研究”(2016YFC0402500); 宁夏与内蒙古自治区水利厅联合资助攻关项目(20110510)

作者简介: 张红武(1958—), 男, 教授, 国务院参事, 博士研究生导师, 博士, 主要从事治河防洪研究。E-mail: zhhw@tsinghua.edu.cn

20 d, 证实了通过协调水沙关系可修复和维持宁蒙黄河行洪排沙功能; 防止多沙支流入汇堵河的黄河流量阈值为  $2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ , 治理淤堵沙坝配合“挖引疏浚”有效冲刷的干流阈值流量为  $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。从各河段模型试验给出的来沙系数阈值沿程减小的变化趋势看, 在内蒙古河段现状河床边界条件下, 全线冲刷要求的流量至少为  $2\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ , 表明黑山峡工程必须预留充足的水沙调控库容。就宏观调控而言, 针对流域下垫面条件多样、入黄泥沙源众多、河道输沙受水库调度影响显著等特点, 以干流水库群为调节器, 以径流泥沙为调节对象, 采用模块化开发方法集成了风-水-重力侵蚀模型、河道输沙模型、冰情预报模型于水库联调模型上, 构建了可进行大范围、高精度的水沙过程模拟预报的宁蒙黄河区域数字流域模型平台, 并成功在下河沿—石嘴山河段进行了调试和应用。此外, 针对宁蒙黄河河型复杂、凌汛期易卡冰结坝、夏季多沙支流突发性洪水易堵干流形成“沙坝”等河情状况, 提出了“水沙调控、支流拦沙、堤外放淤”的处治模式。在稳定性分汊河段、大型支流入汇段、受沙卵石河床组成限制的河段, 则指出不宜强行套用微弯型治理方案, 而可采用“工程导送(简称为‘导’)、塞支强干(简称为‘塞’)、挖引疏浚(简称为‘挖’)”方针, 亦即“导、塞、挖并举”的对策。建设黑山峡水库、南水北调西线工程是宁蒙河段长远治理的根本对策, 通过增加河道内汛期水量和调水调沙, 恢复并维持中水河槽, 提供防凌库容, 才能彻底解决宁蒙河段凌汛灾害, 并得出建立黄河上游沙源固定、支流泥沙拦截、干流泥沙输导与堤外淤沙处置的“固-阻-输-置”综合防治体系, 是目前可行的治理对策的结论。

关键词: 黄河; 宁蒙河段; 水沙调控; 治理对策; 多沙支流; 侵蚀产沙; 河道输沙

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.02.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV882.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2019)02-0001-25



### Control measurements in Ningmeng Reach of the Yellow River

ZHANG Hongwu<sup>1</sup>, FANG Hongwei<sup>1</sup>, ZHONG Deyu<sup>1</sup>, WANG Xinjun<sup>2</sup>, LI Zhenshan<sup>3</sup>, HUANG Heqing<sup>4</sup>,  
ZHANG Junhua<sup>5</sup>, AN Cuihua<sup>6</sup>, LIU Qingquan<sup>7</sup>, LI Yingman<sup>2</sup>

- (1. Yellow River Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Preparatory Work Office of Daliushu Water Conservancy Project of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China; 3. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, Henan, China; 6. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China; 7. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The analysis shows the passive situation of frequent ice disasters in Ningmeng Yellow River is caused by main channel shrinkage and glaciation dam formation. Meanwhile, the flood damage and water security problem are generally triggered by capricious river regime and sand dam induced by sudden flood of sandy tributaries entering main stream. Therefore, in order to effectively restore the flood and sediment releasing capacity of the Ningmeng main channel, realizing the goal of sedimentation reduction, restoration and maintenance of river channel for medium flood, and flood control safety, herein the influence of various factors on the evolution characteristics of Ningmeng Yellow River was analyzed from the perspectives of sediment production, sediment transport and control mechanism. In term of sediment production, the distribution of different sediment source areas in the upper reaches of Yellow River was determined through the combination of sediment-producing geomorphology division, remote sensing image analysis and watershed water system division. Based on the proposed calculation method of wind-erosion sediment flux and inflow amount of wind sediment, combined with the measured data of regional wind speed and vegetation coverage, it was found that the decrease of wind speed and the increase of regional vegetation coverage in recent 30 years were the main reasons for the gradual decrease of wind-sediment erosion and blown into channel. In addition, the analysis results of observed average daily wind speed, daily rainfall and erosion in Ningmeng reach show that the geomantic two-phase erosion in Ningmeng area is mainly reflected in the alternating existence and mutual promotion of wind erosion and water erosion. Wind erosion mainly occurred from March to May, while water erosion usually relatively concentrated from July to September. Field observation and model test of lo-

ess rainfall erosion show that gravity erosion occupies a crucial part in the whole erosion process of loess plateau, and runoff formed by rainstorm is the main external force of loess erosion, as well as an essential influencing factor to stimulate and intensify the development of gravity erosion. In general, sediment production in the Yellow River basin of Ningmeng reach presents the typical characteristics of wind-water-gravity multi-battalion interaction. On basis of the revealed runoff gathering process, channel flow and riverbed adaptation, and non-equilibrium sediment transport mechanism through physical model and field observation, the dynamic model of sediment yield and runoff in small watershed with complex landform was constructed, and the effects of different vegetation characteristics and distribution were successfully simulated. The simulation results indicate that the effect of vegetation on water and sediment reduction and the effect of delayed runoff and flood peak are positively correlated with the canopy density, and the effect of vegetation on delayed runoff and flood peak in steep slope area is greater than that in gentle slope area. In term of sediment transport, based on the basic theories of incipient sediment motion, bed load transport and riverbed equalization adjustment, both the numerical simulation method of water and sediment two-phase flow and the similarity law of physical model for alluvial river are proposed. Numerical calculation and physical test results show that, the altered runoff distribution induced by joint operation of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia reservoir, is the main reason causes the severe shrinkage in main channel of Ningmeng reach. Coordinating the relationship between water and sediment is an effective way to repair the function of flood and sediment transport capacity in the Ningmeng Yellow River. Meanwhile, the threshold of water and sediment regulation in Ningmeng Yellow River and the flow threshold of the main stream with sandy tributaries flowing into the inlet are given and determined through analysis. That is, the critical regulation discharge of Ningmeng Yellow River should be between 2 000 and 2 500  $\text{m}^3/\text{s}$ , the critical sediment concentration should be between 5.4 and 10.5  $\text{kg}/\text{m}^3$ , and the regulation time should be between 15 and 20 days. It is proved that the function of flood and sediment transport in Ningmeng Yellow River can be repaired and maintained by coordinating the relationship between water and sediment regimes. The flow threshold of the Yellow River preventing heavy sedimentation in junction of main stream and sandy tributary is 2 500  $\text{m}^3/\text{s}$ , with the dredger measures, the effective erosion threshold flow of sand dam is 3 000  $\text{m}^3/\text{s}$ . According to decreasing trend of the threshold of sediment inflow coefficient along the channel given by model tests, under the current riverbed boundary conditions of the Ningmeng reach, the required flow discharge is at least 2 600  $\text{m}^3/\text{s}$ . It shows that the Heishanxia Reservoir must reserve sufficient water and sediment control capacity. In term of macroeconomic regulation, accounting for the characteristics of diverse underlying surface conditions, numerous sediment sources, and significant influence of reservoir operation in river sediment transport, the main reservoir group is used as regulator and runoff and sediment are used as regulating objects in this research. Through the method of modular development, the wind-water-gravity erosion model, sediment transport model, ice forecast model all were integrated on the reservoir alignment model, and a digital basin model platform for the Ningmeng Yellow River is built, which can accurately simulate and forecast the water and sediment processes in large range and has been successfully debugged and applied in Xiaheyan-Shizuishan reach. In addition, in view of the river situation of Ningmeng Yellow River, such as the complicated river type, the ice knot dam during flood season, and the "sand dam" formed by the sudden flood of sandy tributaries in summer, the treatment mode of "water and sediment regulation, tributaries sediment intercept and dredging outside the dike" was put forward. In stable branching reach, large tributary inflow reach, and reach restricted by sand and pebble bed composition, it is pointed out that the micro-curved management scheme is not suitable, but the policy of "engineering guide (referred to as "guide"), jamming tributaries and strengthening main rivers (referred to as "jam"), dig and lead dredging (referred to as "dig")" can be adopted, which means the countermeasures of "guide, jam and dig simultaneously". The constructions of Heishanxia Reservoir and western route of the South-to-North Water Transfers Project are the fundamental countermeasure of long term management of Ningmeng Yellow River. Only by increasing the runoff during flood seasons and carrying out water-sediment regulation to restore and maintain the channel section and provide enough transgression containment, the ice flood disaster in Ningmeng reach can be solved completely. It is concluded that the establishment of the "immobilization-resistance-transport-location" comprehensive control system of the upper Yellow River with fixed sediment source, sediment interception in tributaries, sediment transport the main stream and sediment disposal outside the embankment is a feasible control strategy at present.

**Keywords:** Yellow River; Ningmeng reach; flow and sediment regulation; control measurement; sandy tributary; soil erosion and sediment yield; channel sediment transport

## 0 引言

近30多年来,全球气候变化导致天然径流减少,尤其是龙羊峡水库1986年投入运用并同刘家峡水库联调之后,宁蒙黄河在自然与人类活动的双重影响下,水沙关系逐步恶化,水沙过程失衡凸显,河流功能退化,使得宁蒙河段在近20a来成为黄河河道淤积最为严重、洪凌灾害最为频繁的河段,问题主要表现为:

(1) 宁蒙河段防洪、防凌问题突出。随着沿岸经济的快速发展,强烈的人类活动使河流水沙变异并引发一系列灾害问题。近年来洪凌灾害造成的经济损失显著增加,严重危及沿岸人民生命财产安全。宁蒙河段两岸为西部经济发达地区,其附近的宁夏东部基地及内蒙古河套基地,为国家规划的重要煤化工基地,区域防灾减灾呼声很高。

(2) 水沙关系恶化、泥沙淤积严重。由于上游引黄水量增加,干流河道水量大幅减少。同时,龙羊峡水库和刘家峡水库的联合运用,使得非汛期水量所占比例增加,洪峰流量大幅减小,流量过程调平,加剧了宁蒙河段水沙关系的不协调。来水量减少及汛期大流量历时的缩短,导致宁蒙河段的泥沙淤积严重,尤其是内蒙古河道,大量泥沙淤积在主河道内,河槽淤积萎缩,导致主槽过流能力大幅降低,平滩流量急剧减小。

(3) 黄河水沙异源,调节能力弱,治理难度极大。黄河上游水沙调控是全流域水沙调控与配置的关键环节,水沙过程调整直接影响黄河中下游水资源管理及泥沙治理。现实中没构建出调控体系,缺失水沙调节条件。研究黄河上游粗泥沙来源,塑造上下游协调的水沙关系,实现全河水沙科学调控,是黄河治理开发面临的迫切任务,也是黄河流域治理开发的迫切要求和保障黄河长治久安的国家战略需求。

为从根本上解决宁蒙河段的河槽萎缩及由此引发的洪凌问题,本文拟着重关注风-水-重力侵蚀产沙的耦合过程、宁蒙河段河床冲淤过程及河床演变机理及水库群联动调控水沙的理论与方法等三个方面,分别从微观的力学机理、宏观的系统运动规律及综合的应用方法等三个层面入手,对宁蒙黄河的治理对策加以探讨。

关于流域的侵蚀产沙问题,以往学者开展了大量研究。张红武等<sup>[1]</sup>基于河流动力学原理进行了力学分析,鉴于黄土高原进入黄河下游粒径大于或等于0.075mm的泥沙多难以被水流直接输送入海,故而将黄河粗细沙的临界粒径取为0.075mm。中科院寒

旱所对宁蒙河段钻孔资料进行了分析,将黄河宁蒙河道的粗泥沙界限定为0.08mm<sup>[2]</sup>。对于黄河中上游粗泥沙的来源,毕慈芬<sup>[3]</sup>研究发现黄河中上游区域的黄土高原基岩产沙区是黄河粗沙集中来源的核心。杨根生等<sup>[2,4]</sup>研究发现,风成沙以风沙流和坍塌两种方式进入黄河,是黄河粗沙的重要组成部分,内蒙古河段淤积主要来源于乌兰布和沙漠及十大孔兑(沟谷)的库布齐沙漠和丘陵沟壑梁地。刘晓燕等<sup>[5]</sup>对黄河内蒙古河段1960—2006年典型断面输沙量资料分析后则认为,巴彦高勒—头道拐河段淤积主要源自十大孔兑洪水。支俊峰等<sup>[6]</sup>认为黄河流域的粗沙主要来源于河口镇—龙门区间以及泾、洛、渭四河中上游。韩鹏等<sup>[7]</sup>认为黄河中游地区仍是黄河主要的粗泥沙来源区,其中又以窟野河、皇甫川和无定河流域粗泥沙产量最大,占黄河中上游流域粗泥沙产量的85%以上。总体而言,目前就黄河上游粗泥沙的来源问题尚未形成统一论。

对于黄河流域侵蚀产沙机理,目前普遍认为,黄河流域土壤侵蚀为风蚀、水蚀和重力侵蚀以及交织在一起的复合侵蚀。对此,众多学者给与了关注。例如,唐政洪等<sup>[8]</sup>对内蒙古砒砂岩地区的水蚀、风蚀及重力侵蚀的研究指出,该地区的侵蚀产沙呈现水、风和重力侵蚀交互作用的特点,并在时空分布上具有其规律性。巫锡勇等<sup>[9]</sup>对喇嘛溪沟流域的侵蚀现象进行了研究,认为重力侵蚀与水力侵蚀相互影响,同沟道不断的下切和加宽形成了该沟的溯源侵蚀。许炯心<sup>[10]</sup>研究证实高含沙水流搬运与重力侵蚀之间存在着很强的耦合关系。王随继<sup>[11]</sup>对大面积出露砒砂岩的黄土丘陵沟壑区第一副区作为研究区,发现其冻融侵蚀主要发生在沟道中,在有重力作用参与的情况下,冻融侵蚀产沙量至少可达到沟道产沙的1/3左右,最多可以达到这些特殊流域侵蚀产沙量的1/2左右。师长兴<sup>[12]</sup>以无定河为研究区,发现整个无定河流域风力作用产生的输沙量包括入河风沙、降尘以及风力与水力耦合侵蚀搬运作用可能增加的泥沙,接近流域总输沙量的1/6。黄河流域侵蚀产沙量受侵蚀营力强度,植被覆盖,土壤类型,沟谷密度,泥沙中径等自然因素制约<sup>[13]</sup>。尽管自然要素奠定了黄河流域侵蚀产沙过程的基本空间格局,但是人文要素进一步加大了流域侵蚀产沙过程的复杂性。陈劲锋等<sup>[14]</sup>认为黄河流域多沙粗沙区,自然因素对产沙的贡献约占80.5%,而人文要素对产沙的贡献约为19.5%。就目前研究现状看,对复合侵蚀还停留在对点的研究上,尚未形成系统,尤其机理性和定量研究仍然缺乏,对

多重营力复合作用下的侵蚀机理研究更为有限。复合侵蚀面积分布广,对合理分析上游泥沙来源至关重要,需专门对复合侵蚀规律进行系统研究。

近些年来,以往学者针对宁蒙河段水利枢纽下游河床演变与调控研究开展了大量研究。水库下游河床的再造床过程一直是河流研究的重点,大型水库调节下河床演变与调控受到广泛重视<sup>[15-18]</sup>。已有研究认为,大型水库调控水沙关系是减缓下游淤积的重要措施<sup>[19]</sup>,特别是通过水库群的联合调度,塑造适当的水沙过程,可遏制黄河下游河道形态恶化的趋势<sup>[20-21]</sup>。但也注意到,不合理的调度方式恶化了水沙搭配关系,导致下游水沙过程不协调,从而下游短暂冲刷后随之出现河槽淤积、河道萎缩的现象<sup>[22-24]</sup>。随着刘家峡,特别是1986年龙羊峡建成并实施龙刘联调以来,由于水库调节的影响,河道输沙能力降低,引起宁蒙河段河槽淤积加速,河道断面形态显著改变,河槽萎缩明显,河段排洪能力下降。张红武等<sup>[18]</sup>建议修建黄河大柳树水利枢纽工程,通过它的反调节作用缓解宁蒙河段淤积问题。不过,有些学者对利用人造洪水冲刷宁蒙河段可行性进行了质疑,认为宁蒙河段淤积主要来源于乌兰布和沙漠及十大孔兑的库布齐沙漠和丘陵沟壑梁地<sup>[2]</sup>,因泥沙较粗而认为人造洪水冲刷效果还有待检验<sup>[25]</sup>。笔者研究认为,宁蒙黄河部分河段是在沙漠上通过水流造床作用形成的,在床沙中发现与河谷堆积物类似的物质组成,并不足以证明河床淤积物中的粗沙就一定来源于河谷(沙漠),根据钻孔资料直接确定粗泥沙来源,也在一定程度上混淆了床沙与床沙质两者的概念。另外,按此观点,宁蒙河段因粗沙累计淤积,床沙应呈粗化趋势,而实际河床组成几十年来并未有所粗化。至于有关学者所分析的坍塌入黄资料,因大部分为 mainstream 刷滩坐湾所致,更不能说明是沙漠入黄的贡献。由此可见,对于宁蒙河段粗沙淤积问题尚有待深入研究。黄河上游水沙调控缺乏系统的理论基础与先进的研究平台,制约着黄河上游的治理开发。随着学科间交叉与融合,逐渐形成了以流域整体为研究对象的流域水沙动力学理论体系,通过基于该理论体系的数字流域平台,将理论研究、数值模拟、模型试验、野外观测等集成起来,并进行流域信息的深度发掘,以便揭示枢纽下游河床响应于调控的系统动力学行为。王光谦等<sup>[26]</sup>做出的尝试表明,流域水沙动力学理论及其研究平台是在该研究方向取得重大突破的基础。

与其他地区相比,黄河上游区域地貌变化剧烈,气候条件特殊,其河道水沙输移是大尺度降雨、径

流、风-水-重力侵蚀产沙、河道泥沙输移和沉积、人类活动干扰等多因子共同作用下的复杂动力过程,具有鲜明的地域特点。综合已有研究发现:(1)在沙源来源方面,提出了多种沙源的估算和分析方法,开展了不少实例研究,但缺乏综合解析方法可信度分析和实测资料的直接验证,造成不同研究结果相差较大;(2)在侵蚀产沙机理方面,单一下垫面或单一动力条件的恒定产沙动力机理研究较多,复杂下垫面条件、复杂动力条件下动态的流域产沙过程研究不足;对产沙数量和空间分布研究较多,对泥沙汇入河流的动态过程研究较少;(3)在水库调节与河床演变方面,对一般水流条件下河床演变研究较多,对多河型河床演变的研究不足;对干流水沙变异作用下的河床演变研究较多,对季节性多沙支流突发性高含沙水流对干流河道的影响研究不足;对黄河水库下游水沙调控研究多,对上游水库群水沙调控研究较少。流域非平衡水沙运动机理、水沙关键过程调控理论与方法等方面还存在诸多科学问题亟待解决。

本文紧密结合学科发展趋势,综合运用原型观测、室内试验、数值模拟、理论分析等方法,从多层次、多营力、多模式、多驱动力、多目标和全流域的角度开展系统研究,有望在黄河沙源解析、侵蚀产沙、河床演变、水沙变异和调控机理等科学问题上取得突破。

## 1 研究区域概况

黄河宁夏至内蒙古河段(简称“宁蒙黄河”)位于黄河上游的下段与黄河中游的上段,流经宁夏回族自治区(下河沿—石嘴山河段)与内蒙古自治区(石嘴山—头道拐河段)。干流自宁夏中卫县南长滩翠柳沟入境,至内蒙古伊克昭盟准格尔旗马栅乡出境,全长约1203 km,河道平面形状呈∩型大弯曲(见图1),根据河床演变特性可划分为若干河段,主要参数如表1所列。

据统计,黄河上游流域面积约38.6万km<sup>2</sup>,占全流域面积的51.3%,多年平均天然径流量330亿m<sup>3</sup>,占黄河天然径流总量的57.2%,是全河主要的来水区。进入内蒙古境内后,由于河道流经黄土区及沙漠边缘,河水含沙量增加较多。水沙异源致使泥沙不断堆积,河身逐渐由窄深变为宽浅,河道中浅滩出露,湾道叠出。考虑到青铜峡以下的仁存渡至石嘴山长约152 km的河段及内蒙古三盛公至蒲滩拐长约540 km的河段为沙质河床组成,河床比降与整个黄河下游比降相当,昭君坟至头道拐河段河床比降甚至



图1 宁蒙黄河下河沿—头道拐河段示意

表1 黄河宁夏—内蒙古河段河道特性

地区	河段	河长/km	比降/‰	平均河宽/m	主槽宽/m	平均弯曲率
宁夏	翠柳沟—下河沿	61.5	0.87	200	200	1.80
	下河沿—枣园	75.1	0.80	554	554	1.16
	枣园—青铜峡	45.0	-	400~4 000	-	1.10
	青铜峡—石嘴山	196.4	0.32	1 130~3 294	597~1 325	1.20
内蒙古	石嘴山—巴彦高勒	142.3	0.56	400	400	1.50
	巴彦高勒—三湖河口	221.1	0.17	3 500	750	1.28
	三湖河口—昭君坟	126.4	0.12	4 000	710	1.45
	昭君坟—头道拐	184.1	0.10	上段 3 000 下段 2000	600	1.42
	头道拐—马栅乡	150.9	-	-	-	-
合计		1 203	-	-	-	-

小于山东黄河窄河段而同河口段接近, 河床难免淤积抬升。尤其龙羊峡水库 1986 年投入运用并同刘家峡水库联调之后, 水沙过程失衡凸显, 河流功能退化, 宁蒙河段泥沙淤积占全黄河干流除水库以外河道淤积总量的 45% 以上, 年均淤积量约 0.8 亿 t/a, 主槽淤积量占全断面淤积量的百分比达 45% 左右, 河床上升与河槽萎缩造成过流能力降低, 河道漫滩决口几率大幅度增加, 洪凌灾害危及沿岸人民生活、生产、生态用水安全。

为分析宁蒙河段的水沙变化趋势, 图 2 给出了 1952—2010 年黄河干流三湖河口和头道拐水文站年径流量与年输沙量的变化过程。由图可以看出, 三湖河口和头道拐断面的年径流量和年输沙量总体均表现为明显的减少趋势, 尤其 20 世纪 80 年代后期以来, 年径流和输沙率均大幅减小。此外, 年径流量和输沙

量年间也存在明显差异, 20 世纪 70 年代年以前, 年间变幅较大, 70 年代—80 年代, 变幅稍小, 80 年代后期至今, 年间变幅进一步变小。

选取沙量平衡法计算黄河宁蒙河段河道冲淤量, 计算时以运用年为时段, 其中非汛期为 11 月—6 月, 汛期 7 月—10 月。图 3 和图 4 分别给出了下河沿—石嘴山河段(宁夏段)及巴彦高勒—头道拐河段(内蒙古段)的历年冲淤量过程。结果表明: 1951 年 11 月—1960 年 10 月的宁夏河段淤积较多, 年平均淤积量达 0.536 亿 t, 期间累计淤积 4.83 亿 t。1960 年后盐锅峡、青铜峡、刘家峡、八盘峡、龙羊峡等水利枢纽陆续投入运用, 受水库拦沙和天然来水丰枯的影响, 1960 年 11 月—1968 年 10 月总体表现为冲刷, 年平均冲刷量 0.173 亿 t, 期间累计冲刷 1.39 亿 t。1968 年 11 月—1986 年 10 月有冲有淤, 总体表现

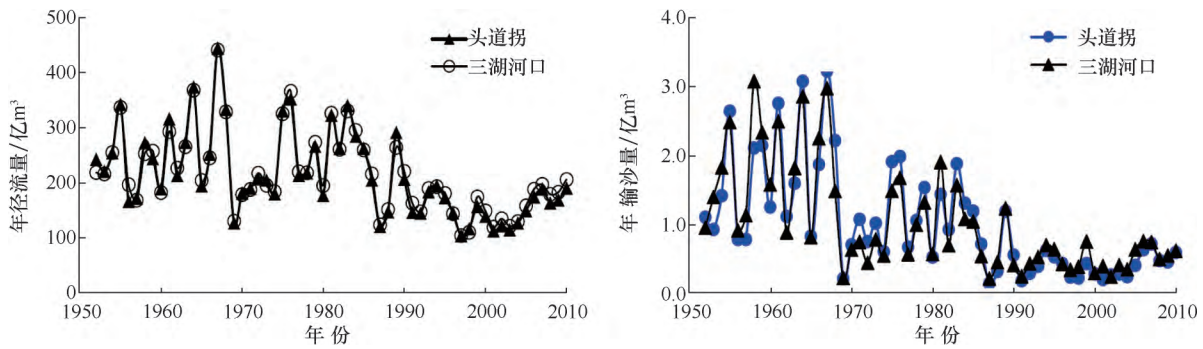


图2 三湖河口和头道拐断面年径流量和输沙量变化(1952—2010年)

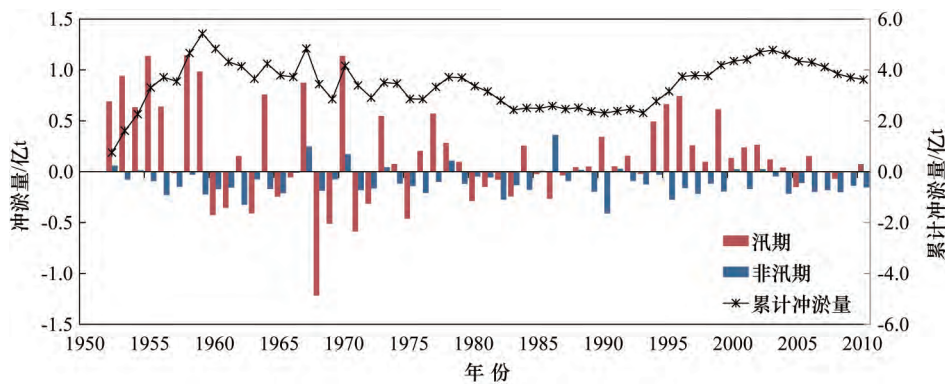


图3 下河沿—石嘴山河段(宁夏段)冲淤量过程

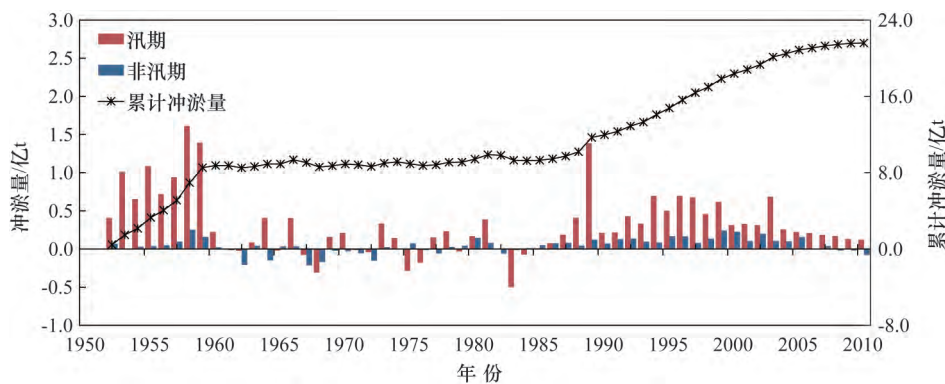


图4 巴彦高勒—头道拐(内蒙古段)河段历年淤积量过程

现为淤积,年平均淤积量0.049亿t,累计淤积0.88亿t;1986年龙羊峡水库运用以来,进入内蒙古河道的水沙量均减少,致使河道淤积量增加,年平均淤积量达0.506亿t,累计淤积量12.14亿t。巴彦高勒—头道拐河段1951年11月—2010年10月累计淤积量21.60亿t,主要发生在1960年以前和1986年以后。可见,刘家峡、龙羊峡投入运行对河道泥沙影响。在1952年至1960年宁蒙河段处于汛期水量、沙量较大,宁蒙河段总体淤积比较严重,但下河沿—青铜峡河段略有冲刷;1961—1986年随着上游水库的不断运行,其拦截部分沙量,使得非汛期水量增加、沙量减少,但是水沙量所占全年比例明显增加,其中宁夏河段总体略有冲刷,内蒙古河段轻微淤

积,青铜峡—石嘴山和巴彦高勒—三湖河口河段表现为冲刷;1986年以后随着龙羊峡水库的运用,较前一时段宁蒙河段的淤积形势加剧。

为微冲,年均冲刷量为0.047亿t;1986年龙羊峡水库运用以来,进入宁夏河段河道的水沙量均减少,河道略有冲刷,1986年11月—2010年10月总体表现为微淤,年均淤积量为0.043亿t。1951年11月—2010年10月累计淤积量3.62亿t,主要发生在1960年以前和1986年以后;1951年11月—1960年10月内蒙古河段淤积较多,年平均淤积量达0.973亿t,累计淤积8.76亿t,1960年以后各水利枢纽陆续投入运用,1960年11月—1968年10月巴彦高勒—头道拐河段冲淤调整幅度小,总体表现为冲刷,年平均冲刷量0.022亿t,累计冲刷0.18亿t;1968年11月—1986年10月冲淤调整幅度小,有冲有淤,总体表

积,青铜峡—石嘴山和巴彦高勒—三湖河口河段表现为冲刷;1986年以后随着龙羊峡水库的运用,较前一时段宁蒙河段的淤积形势加剧。

## 2 研究概况

### 2.1 研究内容

宁蒙河段干流长、多沙支流影响大,使其河床演变极为复杂,作用机理探索与河道治理难度不亚于黄河下游。冰凌灾害频繁的被动局面,是由于主槽萎缩、卡冰结坝所致;而防洪与用水安全问题,则是河势变化无常和多沙支流突发性洪水淤堵干流形成“沙坝”引起。“水沙异源、水沙失衡”造成的持续性泥沙

淤积是宁蒙河段河道治理的重点与难点。为解决此问题,就必须对产沙机理、输沙机理、调控机理三个方面进行研究。

根据黄河长远治理开发的需求和目标,围绕上述关键科学问题,开展如下四个层面的研究(见图5)。第一,在机理方面,以泥沙的移动路径为主线,研究多沙源分布规律、多营力侵蚀产沙机理、多模式与河道泥沙输移机理、多动因河床演变机理、多驱动力水沙变异机理;第二,在方法层面,建立沙源解析方法,多河型、多驱动力条件下河床演变的模型方法,多目标水库群调度自适应水沙调控理论与方法;第三,在应用层面,建立宁蒙黄河流域泥沙综合防治体系、河道淤积临界调控和最佳水沙搭配模式和不恶化下游水沙的上游调控阈值;第四,在平台方面,完善宁蒙河段模型试验平台,流域数值模拟平台,并充分利用原型水沙调控观测平台。

### 2.2 技术路线

以泥沙的“源-产-输-淤-调”为研究主线,以河道综合治理为目的,以河道萎缩为核心问题,以黄河上游宁蒙河段数字流域模型和沙漠宽谷河道防洪防凌实体模型为平台,重点研究:(1)多类型沙源分布规律;(2)多营力侵蚀产沙机理;(3)多河型、多约束河道洪水演进与河床演变相互影响机制;(4)多驱动力河道水沙关系变异规律等科学问题。通过现场调研与监测、理论分析、模型试验、数值模拟、系统集成等综合手段,建立流域非平衡水沙动力学理论体系及黄河上游水沙调控方法,奠定黄河上游流域科学管理的基础。

众所周知,物理动床模型试验是目前本学科研究复杂的水流运动、输沙过程、河床演变及检验河道治理方案的最有效方法;野外观测资料分析是探索黄河泥

沙淤积及河势变化规律的基础;河流泥沙数学模型是进行长系列水沙过程预测模拟和开展多种方案比选的有力工具,资料分析、数值模拟是配合物理动床模型试验的辅助手段。此外,野外观测、室内降雨侵蚀及风沙模拟试验与逻辑推理等特殊研究手段(以下简称特殊试验),不仅能够从定量上完善流域模型计算的可靠性,而且又是揭示土壤侵蚀、风沙及支流入黄影响程度的必要手段。因此,本文采用物理模型试验与数学模型计算、实测资料收集分析、特殊试验、野外观测、理论探索有机结合的研究途径(见图6),多手段相互补充、相互印证。例如,通过对调查和实测资料以及试验结果的分析,研究黄河上游沙源分布、流域侵蚀、河道淤积、洪水及凌汛灾害,为后续的多沙源解析、多营力产沙、多模式输沙、多动因河床演变、多驱动力水沙变异等研究提供基础。再如,为开

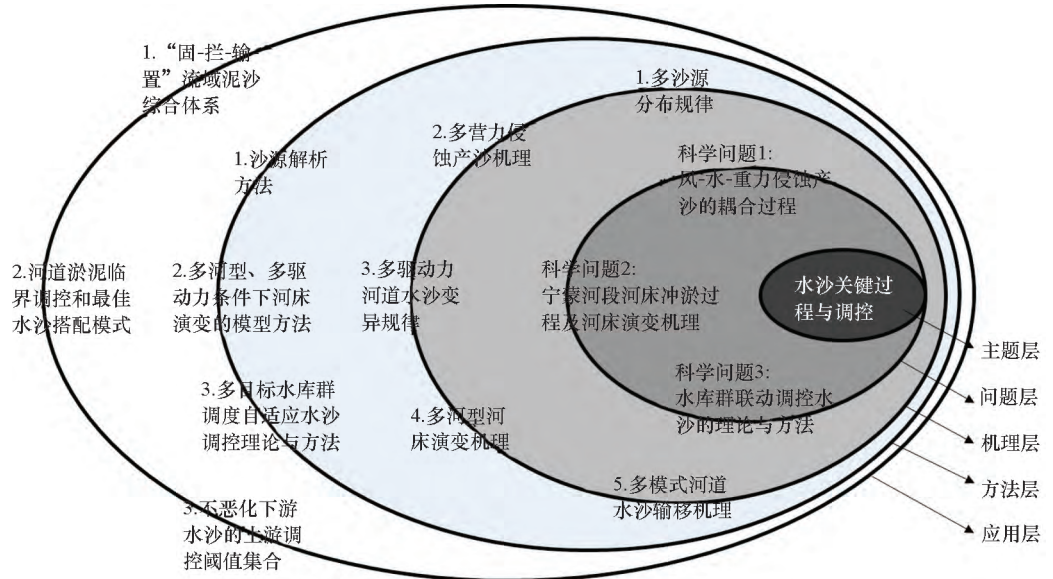


图5 研究内容之间的有机联系

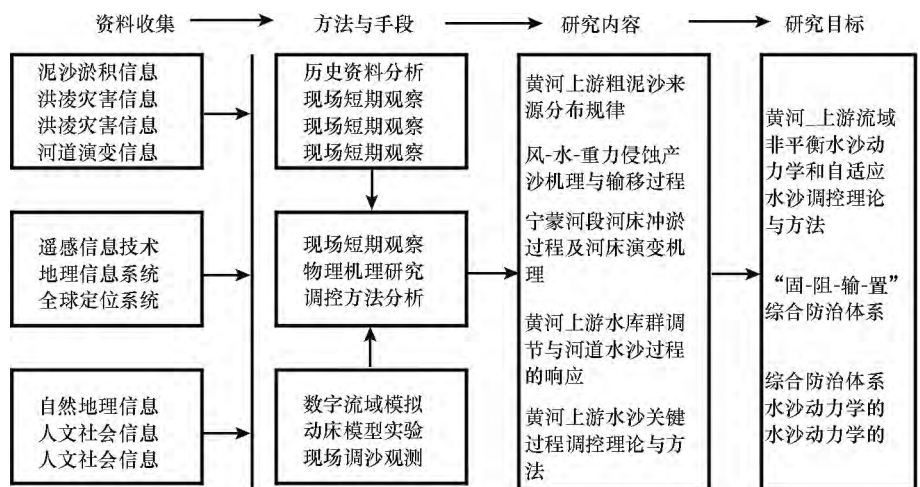


图6 总体技术路线



展机理研究,主要采用试验研究和基础力学分析相结合的手段进行,基于调查成果和物理试验(包括模型试验、原型观测、现场短期观测和长期自动监测),剖析变化过程、揭示物理机制,研究黄河上游粗泥沙来源与分布规律、多营力作用下流域侵蚀产沙与输移机理、宁蒙河段演变机理。

### 3 宁蒙黄河产沙机理

#### 3.1 沙源解析及入黄机制

##### 3.1.1 沙源空间分布特征与变化趋势

黄河宁蒙区域沙源类型可分为七大类:耕地及居民区、沙漠沙、沙地沙、裸地、砒砂岩、黄沙土和山地(基岩),基本体现多沙源空间分布特征。以流域多年水沙观测资料和重点地区入河风沙实测资料为基础,通过产沙地貌分区、遥感影像分析和流域水系分区相结合的方法可确定黄河上游多沙源分布特征(见图7)。结果表明,研究区域内山体覆盖面积最大,面积约为4.94万 $\text{km}^2$ ,占25.96%,包括贺兰山、桌子山和阴山山脉等。其次为耕地及居民地,面积约为4.03万 $\text{km}^2$ ,占21.18%,主要沿干流分布于中宁平原、银川平原和内蒙古河套平原。第三为裸地(干旱草原),面积约为3.41万 $\text{km}^2$ ,占17.92%,主要分布于桌子山东西两侧。第四为沙地,面积约为1.99万 $\text{km}^2$ ,占10.46%,以毛乌素沙地和河东沙地为主;第五为黄沙土,面积约1.81万 $\text{km}^2$ ,占9.51%,主要分布研究区域西南的宁夏地区;第六为砒砂岩,面积约1.39万 $\text{km}^2$ ,占7.30%,主要集中在鄂尔多斯高原;面积分布最小的沙源是沙漠沙,约为1.27万 $\text{km}^2$ ,占总面积的6.67%。可知,传统风成沙中的沙漠沙和沙地沙分别占6.67%和10.46%,介于风成沙和非风成沙之间的黄沙土所占比例为9.51%。

区域沙源分布是风沙入河计算的基础,接近河岸的沙源类型与风沙入河关系最为密切。统计干支流不同沙源的岸线长度,可以发现,耕地是最主要的沙源类型,耕地及居民地河岸长1389 km,占黄河干流左右两岸总长的67%;其次为山地,总长

234 km,占11%,主要集中在石嘴山和头道拐至内蒙古出口的峡谷型河道;此后分别为裸地、黄沙土、沙漠沙、砒砂岩和沙地沙,分别占河岸总长度的7%、7%、6%、1%、1%,其中传统风成沙和沙漠沙主要分布在石嘴山—巴彦高勒河段左岸、巴彦高勒—三湖河口河段右岸、黑山峡—下河沿河段左岸、青铜峡—石嘴山河段右岸,分别为59 km、35 km、10 km和9 km(剩余7 km零星分布在其余河段两侧),分别对应乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、腾格里沙漠和河东沙地。

风速实测资料统计结果表明,黄河宁蒙地区1973—2014年风速总体呈减小趋势,年均风速平均每年减小0.0157 m/s,与全国年均风速0.013 m/s的下降趋势<sup>[27]</sup>和整个黄河流域0.009 m/s的下降趋势相比<sup>[28]</sup>,下降速率相对更大,主要是因为内蒙古高原地势相对平坦,20世纪中期风速相对较大,下降的空间更大所致。相对于年平均风速,风沙入河更关注极端风况下的风速变化趋势,包括年最大风速、大风日数和起沙风日数。根据统计结果,总体上,年最大风速、大风日数和起沙风日数均呈现明显下降趋势,其中年瞬时最大风速每十年下降3.854 m/s,大风日数平均每十年下降6.08 d,起动沙风日数平均每年下降18.17 d,分别占42 a平均值的14.4%、45.4%和8.4%,下降幅度非常大,以至于近年很多

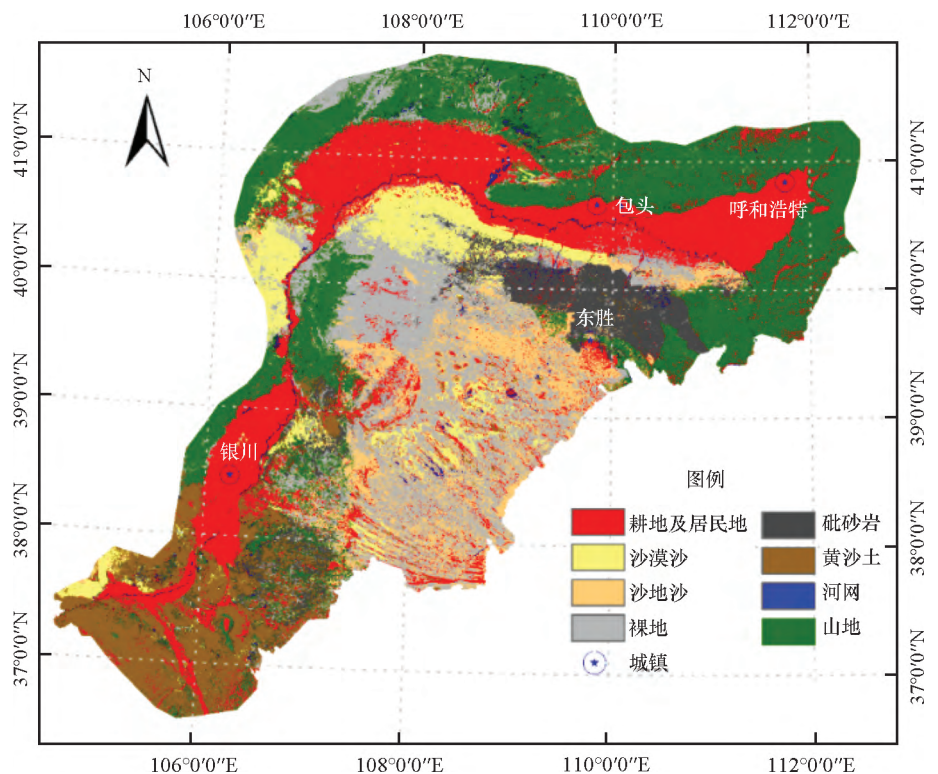


图7 黄河宁蒙区域沙源分布示意

风速测站甚至无法监测大风日数。一般而言, 输沙率和风速的三次方成正比, 风力大幅度下降会导致输沙率的大幅下降, 研究区域风沙活动强度的减弱将导致宁蒙地区风沙入河量的大幅减小。

根据 Modis NDVI 及 GIMMS 数据统计宁蒙河段植被覆盖率, 发现该区域在 1981—2014 年间植被覆盖率总体呈上升趋势, 第一阶段为缓慢增长阶段, 从 1981—1999 年, 年平均植被覆盖率缓慢增长, 平均每年约增长 0.097%; 第二阶段为快速增长阶段, 从 1999—2014 年, 年平均植被覆盖率年均增长率达到 0.713%。其中第一阶段植被覆盖率缓慢增长主要是受自然因素影响, 包括种子传播等, 而第二阶段主要受“退耕还林”和“退牧还草”等政策的影响。

### 3.1.2 沙源解析与产沙量估算

传统上常采用间接方法进行沙源解析, 如杨根生等<sup>[4]</sup>早在 2000 年左右, 就通过输沙平衡法得到河段泥沙淤积量, 通过粒径分析得到沙源分布进而对风沙来源进行解析。对理想状态下输沙通量的计算公式较多, 复杂的风沙计算模型都是在其基础上得到。公式形式虽不尽相同, 但与实测资料相比, 计算值一般都大于实测值。SHERMAN 等<sup>[29]</sup>比较了输沙模型, 并以 BELLY<sup>[30]</sup>的试验数据进行检验, 发现  $C_L = 6.7$ ,  $u_{*c} = 0.25 \text{ m/s}$  的时候, 符合最好, 其形式如下

$$q = C_L \left( \frac{d}{D} \right)^{1/2} \left( \frac{\rho}{g} \right) u_*^2 (u_* - u_{*c}) \quad (1)$$

式中,  $q$  为单宽输沙率 [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ];  $d$  为风沙粒径 ( $\text{m}$ );  $D$  为特征粒径 ( $\text{m}$ );  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $u_*$  为摩阻风速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $u_{*c}$  为临界起动摩阻风速 ( $\text{m}/\text{s}$ ); 系数  $C_L = 6.7$ 。

计算结果表明, 多年平均月单宽风蚀输沙通量最大值出现在 4 月份, 高达  $0.410 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{月})$ , 介于中度侵蚀和强烈侵蚀之间, 总体而言春季 (3—5 月) 风蚀输沙通量均大于  $0.300 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{月})$ , 处于较高的水平, 远超过均值  $0.188 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{月})$ ; 最低值出现在 8 月和 9 月, 仅为  $0.047 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{月})$ , 属于微度侵蚀范畴, 总体而言, 夏秋两季 (6—8 月, 9—11 月) 风蚀均较低, 在均值线以下。冬季 (12—2 月) 处于一年中风蚀低谷和高峰的过渡阶段, 在均值线两侧波动。风蚀输沙通量出现上述年内分布主要与研究区域内平均风速的年内分布和平均植被覆盖率年内分布有关, 春季风速最大, 植被覆盖率较低, 因此风蚀输沙通量较大, 而夏季风速最小, 植被覆盖率最大<sup>[31-32]</sup>, 因此风蚀输沙通量最小。

将各类沙物质按所占面积加权平均, 得到研究区域

多年平均年累计单宽风蚀输沙通量为  $2.26 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$ , 但不同沙物质类型之间差异较大。其中沙漠沙区域多年平均累计单宽风蚀输沙通量最高, 高达  $11.36 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$ , 属于极强程度的风蚀等级; 接着分别为黄沙土和沙地沙, 风蚀输沙通量分别为  $7.58 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$  和  $5.80 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$ , 属于强度风蚀范畴; 其次为裸地和砒砂岩, 风蚀输沙通量分别  $1.99 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$  和  $1.30 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$ , 在全区域加权均值线以下, 属于轻度风蚀; 风蚀输沙通量最小的为耕地及居民地, 年累计单宽风蚀输沙通量仅为  $0.44 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$ , 属于微度侵蚀 (见图 8)。

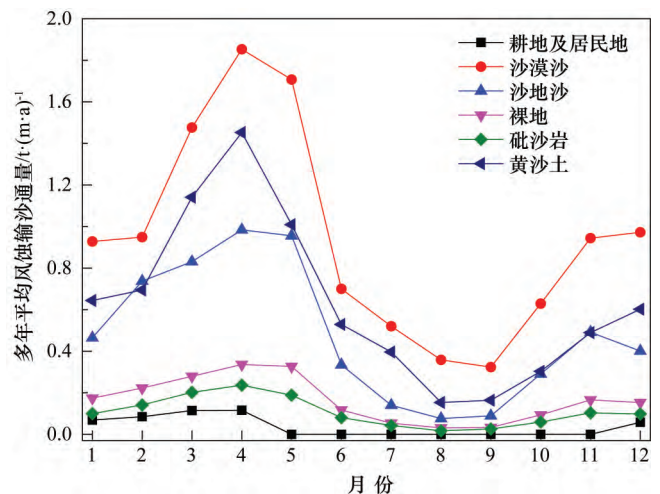


图 8 不同沙物质 1981—2014 年多年平均月单宽风蚀输沙通量

值得注意的是, 风速减弱是近几十年来风速变化的直接体现, 人们关心未来趋势如何<sup>[31]</sup>。我国是世界风力发电能力第一的国家, 占全球总额的 1/3 以上。近 40 a 资料表明, 近 80% 站点损失了超过 30% 的风能资源, 在我国东北和西北地区, 风能损失更为明显。部分学者以此认为“大气减速”是大势所趋, 未来亦呈现风速减弱的趋势, 风沙入河量会相应减少; 另有部分学者以 1993 年宁蒙区域全年出现多场大风, 使得全年风速高于 20 世纪 80 年代水平, 而认为未来个别年份也可能会出现风速反弹升高的情况。这里可运用大气涡团理论 (或动量传递)<sup>[33]</sup> 阐释人类活动对“风速减弱”的影响。人类活动使地面附近粗糙度增加, 对气流的摩阻作用变大, 使风速变弱; 同时由于人类活动使气流中的固体微粒含量增加, 涡团参数变小, 引起流速梯度变大, 同样高空风速下, 地面附近的风通过涡团掺混获得的上层传递下来的动量就会变少, 风速就会减弱。因此认为, 只要人类活动不断, “大气减速”是必然的, 风沙入河量减少在所难免。

### 3.1.3 入黄机制与入河沙量计算

通过实地考察,发现风沙流与沙丘前移是风沙入黄的主要途径,其中沙丘前移是输沙的主要形式,干流平均每年沙丘前移量占总风沙入河量的60%以上,支流占50%以上。根据建立的风沙流与沙丘前移输沙推算模型,计算1995年、2000年、2005年和2010年四年的全年风沙入河量(见表2、表3)。结果表明,近年来风沙入河量急剧下降,干支流之和减小了约2/3。主要是:(1)风沙入河段缩短,受人为因素影响,大量护河工程和防风固沙措施的建立,使得原有的流动性沙丘转换为固定或半固定沙丘,而非流动性沙丘的风沙活动能力也大大减弱;(2)受全球气候变化影响,宁蒙地区风力减弱,据初步估计,仅仅因为风力减弱,2010年风沙入河量相对于1995年减小了一半左右;(3)宁蒙区域植被覆盖率增加,从1985年到2010年,年平均植被覆盖率大约从8%增长到22%。如果以1995年、2000年、2005年和2010年四年平均值代表正常年份的风沙入黄量,那么计算得到的年平均风沙入黄量为1 142万t,其中干流风沙入黄量为726万t,支流(主要指十大孔兑)风沙入河量为416万t。

表2 1995—2010年黄河宁蒙河段干流风沙入黄量

万t

年份	风沙流			沙丘前移	总入河量
	流动沙丘段	非流动沙丘段	合计		
1995	356.04	84.82	440.87	904.34	1 345.21
2000	230.72	72.32	303.03	438.37	741.40
2005	96.12	53.97	150.09	279.71	429.80
2010	59.36	124.29	183.66	205.39	389.05
均值	185.56	83.85	269.41	456.96	726.37

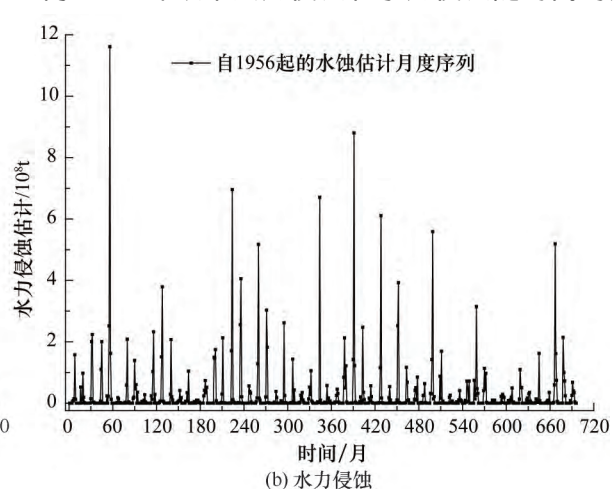
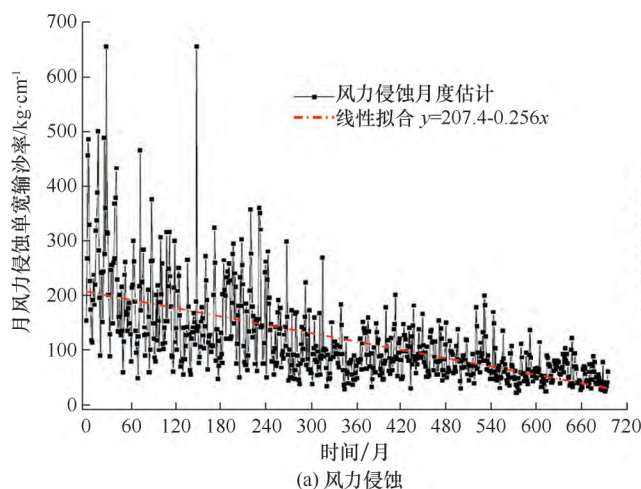


图9 风力侵蚀和水力侵蚀输沙率估计值的月度序列

表3 1995—2010年黄河宁蒙河段支流风沙入黄量

万t

年份	风沙流			沙丘前移	总入河量
	流动沙丘段	非流动沙丘段	合计		
1995	110.14	145.40	255.54	279.76	535.30
2000	96.44	133.09	229.53	183.24	412.77
2005	65.98	96.48	162.46	192.00	354.46
2010	62.55	83.05	145.60	216.42	362.02
均值	83.78	114.51	198.28	217.86	416.14

实际上,宁蒙河段大部分河道两岸均修筑了堤防,且已建大量河道工程,呈现具有人工显著约束的河道形态。在堤防阻碍下,以风流沙吹入和坍塌入河两种方式直接进入黄河的沙量十分有限。从野外坍塌入黄资料看,大部分为主流刷滩坐弯所致,不能说明是沙漠入黄的贡献。几十年来宁夏河段断面法测量结果表明河床淤积量较小,说明石嘴山以上风沙入黄影响很小。石嘴山—巴彦高勒河段左岸存在乌兰布和沙漠,沙粒最有可能在西北风作用下进入黄河,但利用水文站输沙及地形测验资料分析发现,乌海河段及三盛公库区几十年来并没有出现明显淤积,且由于巴彦高勒输沙量往往小于石嘴山,表明“大量的以风流沙和坍塌两种方式进入黄河的粗沙”也没被输送到三盛公枢纽以下。而在三盛公以下河段,库布齐沙漠位于黄河右岸,在强劲的西北风作用下又很难直接吹入黄河。

### 3.2 风-水-重力侵蚀产沙机制

#### 3.2.1 风、水侵蚀特征及交互作用

基于宁蒙河段日均风速、日降雨量和已有侵蚀观测资料,可以刻画宁蒙区域的基本侵蚀特征,分析不同时间风力侵蚀和水力侵蚀的作用特点和交互机制,以估算该区域的风力、水力侵蚀量分布规律。图9给出了1958年以来风力侵蚀和水力侵蚀随时间的演化

规律, 总体上, 风力侵蚀随时间呈现明显减小趋势, 显然同近几十年来“大气减速”或“风速减弱”有直接关系, 而水力侵蚀则变化相对不大, 略有减小。

统计风力侵蚀和水力侵蚀的年内分布规律(见图 10), 以及不同量级风力侵蚀和水力侵蚀所占比例, 可以发现: 日重现概率 15% 以上的大风贡献了风力侵蚀的主要部分, 重现概率 5 a 一遇以上的暴雨贡献了水力侵蚀的主要部分; 黄河上游的风水两相侵蚀, 主要体现为风蚀与水蚀交错存在和交互促进, 风力侵蚀主要发生在 3—5 月, 水力侵蚀则集中在 7—9 月暴雨季节。

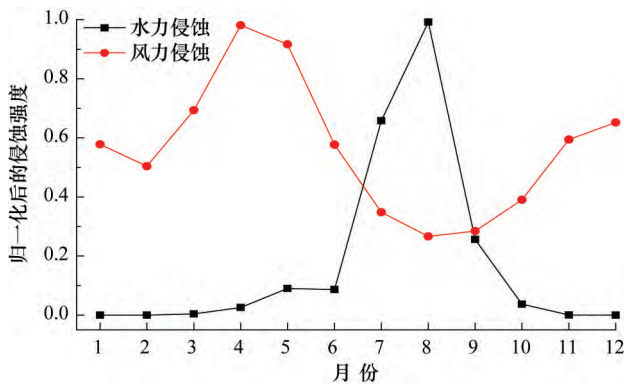


图 10 风力侵蚀和水力侵蚀的年内分布比较

### 3.2.2 风水共同作用下的重力侵蚀机理

通过现场观测和室内试验研究侵蚀沟道的形成过程, 发现(见图 11、图 12): 滑坡侵蚀量最多, 崩塌次之, 流侵蚀量最少; 在陡峭的沟坡上, 重力侵蚀是土壤流失的重要因素, 次重力侵蚀占总侵蚀量的 50% 以上。由于重力侵蚀在黄土高原的整个侵蚀过程中占有重要的份额, 是形成高含沙水流的重要原因。同时重力侵蚀不同于一般的坡面流侵蚀, 其主要原因是陡峭的沟坡, 在重力作用和暴雨作用下的崩塌、滑坡, 以及由此形成的泥流, 即重力侵蚀强度主要取决于地形地貌及土壤特性。在一定降雨强度等条件下, 土体的结构和临空面高度, 对发生重力侵蚀的可能性与突发性有直接影响, 高强度降雨形成的径流, 是激发和加剧重力侵蚀发生发展的重要影响因子。黄土高原长期侵蚀冲刷形成的陡峭沟坡, 以及黄土的直立特性是导致典型重力侵蚀的根本原因。

### 3.2.3 暴雨作用下小流域黄土侵蚀变化模型试验

黄土高原侵蚀现场观测难度较大, 野外资料十分有限。因侵蚀机理尚不清晰, 采用数学方程进行描述十分困难, 且缺乏足够实测资料对模拟参数进行率定, 因此数学模型模拟暴雨作用下的侵蚀发展过程可靠性不大<sup>[31]</sup>。为研究暴雨形成的地面径流对黄土的

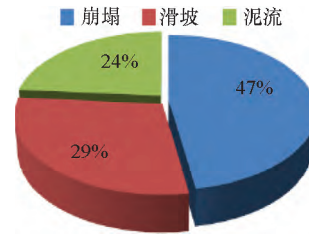


图 11 重力侵蚀类型发生百分比

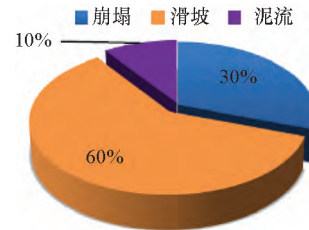


图 12 重力侵蚀类型体积百分比

冲蚀变形, 本文以黄土高原某复杂地貌形态的沟道小流域为原型, 按沟道地形图与几何比尺制作模型, 并以堆填模型沙形成坡面多变的初始下垫面, 通过降雨侵蚀模拟, 分析在暴雨作用下侵蚀变化, 研究不同黄土侵蚀破坏而导致地形破碎及下游沟道淤积等规律。考虑到水流在流动过程中主要受重力作用, 因此主要考虑重力相似条件<sup>[32]</sup>; 黄土颗粒细, 又具有一定的固结性, 所以作用于颗粒间的粘着力也不可忽视<sup>[32]</sup>, 故为保证侵蚀形态的相似性, 下垫面需要采用模型沙制作裸地模型, 其初始含水量同原型相近, 且模型降雨强度必须大于模型沙相应的临界雨强  $I_m$ <sup>[32]</sup>。在冲淤变形过程中重点研究颗粒运动的集积效果, 主要考虑颗粒级配相似; 坡面侵蚀试验区下游沟道中的泥流按照高含沙洪水模型相似律<sup>[33]</sup>进行设计, 以满足水流运动相似和泥沙运动相似。选取电厂粉煤灰为模型黄土材料, 按黄土降雨侵蚀模型相似律开展模型设计并制作模型, 布设降雨管路、水沙系统及观测设备等开展试验<sup>[34]</sup>。

结果表明, 暴雨形成的径流是黄土遭到侵蚀的主要外营力, 也是激发和加剧重力侵蚀发展的重要影响因子, 土体结构和临空面高度, 对发生重力侵蚀的可能性与突发性有直接影响; 从空间上看, 泄流沟上段以下切和溯源侵蚀为主, 中段以侧蚀与重力侵蚀为主, 下段以堆积或冲淤交替为主; 降雨侵蚀大量产沙使中下段沟道内形成高浓度泥流并奔腾而下, 洪水流量明显大于小流域降雨形成的径流量; 高强度降雨形成的洪水沿沟道将大量泥沙带入下游河流, 表明在黄土高原局部地区高强度降雨难免出现的条件下, 局部还会出现大量泥沙进入黄河的情况; 按降雨阶段看,

降雨初期径流量小,陡坡处冲沟形成后才产生溯源侵蚀,高强度降雨汇流量大,各坡面均出现侵蚀变形,陡坡泄流沟在下切、侧蚀的同时,土体在自重力作用下沿坡面下移,出现了突发性强的重力侵蚀;降雨后期侵蚀减慢,主要通过溯源侵蚀形式发展,中段冲沟仍有所冲深与展宽,下游沟道由于比降减缓而继续淤积,体现了水流与边界的自适应调整作用;降雨不同时期在各坡面几乎都发生了溯源侵蚀,而重力侵蚀多是高强度降雨期发生在陡坡地段。

图 13(a)、(b) 给出了洪峰流量  $1226 \text{ m}^3/\text{s}$ , 径流量  $1111 \text{ 万 m}^3$  下的模型试验结果,由溯源侵蚀长度与冲沟宽度随降雨历时的变化关系,可知侵蚀冲刷发展过程呈“S”型分布,侵蚀冲刷发展最快的时段与高强度降雨期相对应,降雨后期还能够体现出侵蚀冲刷趋于稳定的特点。此外,图 13(c) 统计了各试验条件下径流量与侵蚀冲刷量可得侵蚀冲刷量与径流量成正比关系,尤其径流量大于  $15 \text{ 万 m}^3$  后,侵蚀量增加速率明显增加。由于退耕还林还草能够在暴雨条件下明显减少流域的径流量,因此能够通过减少黄土高原土壤侵蚀量,明显减少进入黄河的泥沙量。

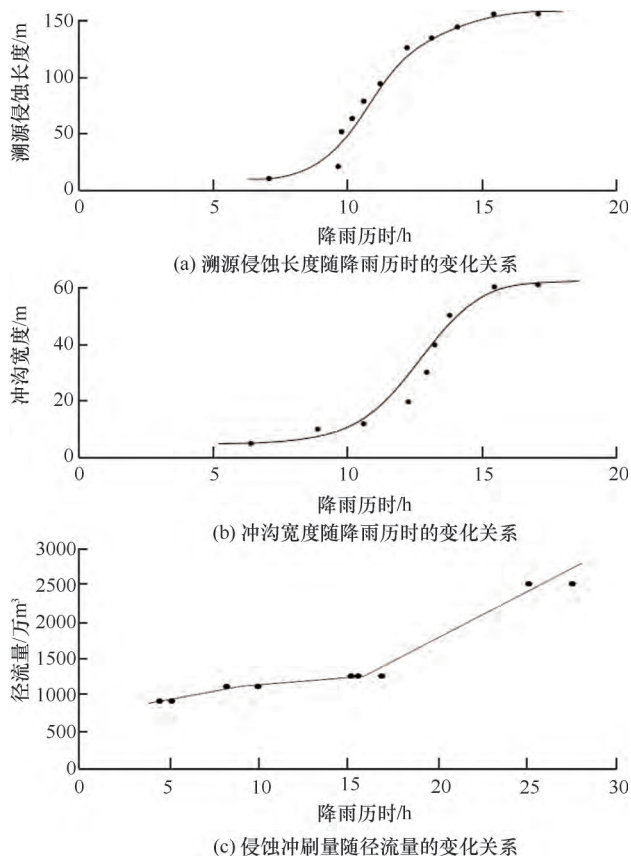


图 13 降雨模型试验结果

### 3.2.4 产流侵蚀模型建立

以小流域降雨侵蚀模型试验结果建立的物理图形,将其概化为坡面基本单元和沟道网络的有机联合体,坡面上采用准二维运动波产汇流模型和二维侵蚀模型,沟道采用扩散波模型描述水沙运输过程,在分析物理模型与野外观测资料揭示的流域径流汇集过程、沟道水流与河床自适应机理和非平衡输沙机理基础上,构建了适合于复杂地貌形态的小流域产流产沙动力学模型。模拟不同植被特征和分布状况对流域产流产沙的影响(见图 14),表明植被减水减沙效果与延滞径流洪峰的作用同郁闭度之间呈正相关的关系,陡坡区域植被对径流洪峰的延滞作用大于缓坡区域。对于十大孔兑来讲,生物水保措施应主要集中在上游产沙区,然而丘陵沟壑区和沙漠区的植被恢复十分困难,且因缺少水分,植被很难长期生长;而下游区域的植被已经相对较好,进一步提高覆盖率的空间已很有限。因此,在十大孔兑区域,通过生物措施减少粗沙来源,存在很大的困难,在短期内效果十分有限,还需采取其他的工程措施。

## 4 宁蒙黄河输沙机理

### 4.1 水沙过程对宁蒙河段排洪输沙功能修复的作用

#### 4.1.1 入黄泥沙输移特征

惠遇甲等<sup>[35]</sup>利用不同容重、粒径的颗粒在不同水流条件下运动轨迹的水槽试验资料,给出不同颗粒以悬移质形式运动所占百分数相对水流强度  $\Theta$  (希尔兹数) 的计算公式形式如下

$$P_{ss} = \begin{cases} 100, & \Theta > 3 \\ 37.5 + 36.7 \times \log(\Theta), & \Theta < 2 \\ 0.1079\Theta^3 - 0.4848\Theta^2 + 0.8093\Theta - 0.0468, & 2 < \Theta < 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中,希尔兹数  $\Theta$  的表达式为  $\Theta = R \times J / (1.65 \times D)$ , 其中  $R$  为沙粒阻力半径 (m),  $J$  为比降,  $D$  为代表粒径 (mm)。

鉴于上述研究主要基于水槽试验结果,其试验条件同天然河流差距很大,按照模型相似律<sup>[33]</sup>确定的悬沙粒径比尺  $\lambda_d = 0.6$  进行修正。根据 2012 年汛期黄河宁蒙河段水文站资料,可计算出各站悬移质形式比例。结果发现,黄河宁蒙河段河床大部分沙质组成在水流强度较大时都有可能以悬移形式运移,并且随着粒径的减小,呈悬移运动形式的比例增加,整体随水流运移的泥沙量有所增加。 $0.048 \text{ mm}$  粒径的泥沙在流量大于  $2200 \text{ m}^3/\text{s}$  后,呈悬移质运动百分比较大;而粒径大于  $0.075 \text{ mm}$  的泥沙呈悬移质运动百分

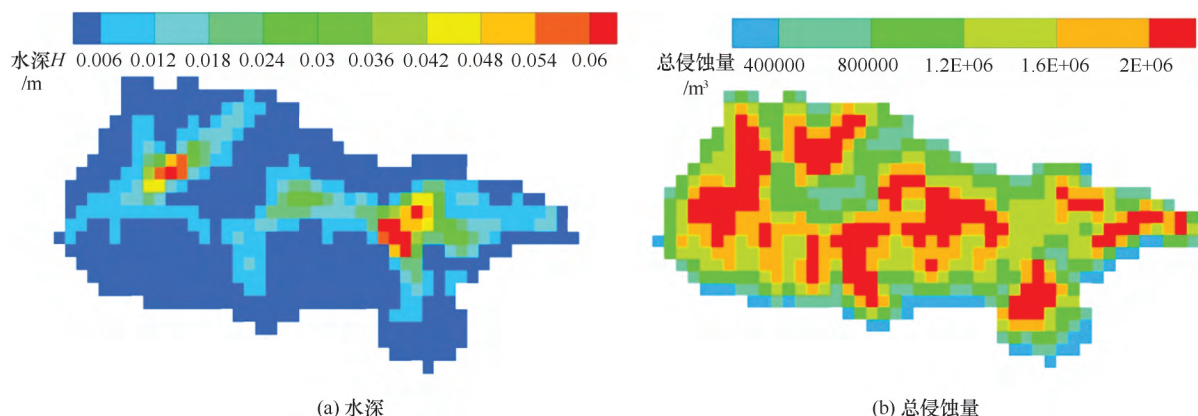


图 14 1985 年 9 月 15 日降雨某时刻(  $t=350$  min) 小流域内径流及侵蚀分布模拟结果

比不大; 尤其是大于 0.15 mm 的泥沙难以全部以悬移形式向下游输移(0.15 mm 以上的泥沙主要以推移形式向下游运动)。因此, 在实施水沙调控时必须持续出现相当大的流量<sup>[36]</sup>, 才能以足够的水流强度, 使大于 0.1 mm 的泥沙多呈悬移形式向下游输移, 保证宁蒙黄河实现长河段冲刷。

#### 4.1.2 粗沙输移对水沙调控的响应机制及调控临界条件分析

选取下河沿、石嘴山、巴彦高勒和头道拐水文站从输沙率与流量、汛期和非汛期输沙量与水量的关系分析黄河宁蒙河段泥沙输移规律。结果发现: (1) 黄河宁蒙河道的冲淤与来沙系数的关系密切, 其中, 以下河沿站表示的汛期、非汛期冲淤平衡来沙系数分别为 0.002 6 和 0.005 6  $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ; 以下河沿站加区间水沙条件表示的汛期、非汛期冲淤平衡来沙系数分别为 0.003 3 和 0.005 3  $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ; (2) 以巴彦高勒站水沙条件表示的汛期、非汛期冲淤平衡来沙系数分别为 0.003 3 和 0.003 4  $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ; 以巴彦高勒站加区间水沙条件表示的汛期、非汛期冲淤平衡来沙系数分别为 0.004 5 和 0.003 3  $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 。利用黄河上游宁蒙河段水文站资料, 分析了水流挟沙力因子、阻力因子随流量的变化规律。表明为保持河道具有较高的输沙效率, 下泄流量应按 2 500~3 000  $\text{m}^3/\text{s}$  进行输沙调控, 以维持头道拐断面流量大于 2 000~2 500  $\text{m}^3/\text{s}$ , 便于全河段的分配与调控。

#### 4.1.3 基于数值计算的水沙临界条件及调控目标

李肖男等<sup>[37]</sup>通过三维水沙数学模型对青石段和三头段分别开展了 1981 年洪水和 2012 年洪水的模拟计算。结果发现: 在现状地形条件下, 通过场次洪水可使河道实现淤滩刷槽的效果。受来水来沙条件和河型的影响, 青石段两场洪水的冲淤过程均可以分为初始冲淤平衡、涨水刷槽淤滩、退水冲刷效率降低直至

末时刻冲淤基本不变等四个阶段; 而三头段则表现为涨水刷槽淤滩、退水冲刷效率降低、末时刻冲淤基本不变等三个阶段; 洪水演进过程中各河段滩槽的水沙交换过程有所不同, 青石段上段为微弯型河道, 河道相对窄深, 河势稳定, 主槽在水沙输移中所占比重较大, 故而流路更多的集中在主槽; 而青石段下段和三头段上段为游荡性河道, 河槽平滩面积小, 洪水条件下滩槽水沙交换频繁, 滩槽在水沙输移中的差异相对较小; 三头段的下段有一定数目的河弯, 裁弯取直和滩槽更替在本段较为集中。

#### 4.2 多沙支流突发性产输沙对黄河干流的影响

##### 4.2.1 多沙支流的来沙量、组成和分布特征分析

通过对进入宁蒙黄河干流的泥沙的进行定量化分析, 可以确定多沙支流入黄沙量、泥沙组成及时空变化规律。此外, 分析收集的 206 场洪水资料, 发现在年尺度上产沙量与降水量的相关性不高, 但与径流深、降雨强度指标均具有良好的数量关系, 即降雨强度大, 降雨溅蚀能力强, 分离地表物质的能力强, 地表径流流速和地表径流量也相应很大, 洪峰流量大, 沟道侵蚀量大, 侵蚀搬运地表物质多。野外调查资料表明, 十大孔兑上游区河床泥沙级配主要为砂粒(0.05~2 mm), 其含量平均值高达 75% 以上。位于孔兑中间的风沙区, 河床中粒径 >0.5 mm 和 <0.02 mm 的泥沙几乎没有, 河床泥沙颗粒的粒径比较均匀地在分布在均值为 0.17 mm 的两边。在孔兑下游至入黄口处, 河床沉积物中粒径 0.05~0.25 mm 的泥沙占到了 75% 以上。

##### 4.2.2 多沙支流突发性产输沙过程发生机制

实测资料分析表明, 西柳沟流域年内来水来沙主要集中于汛期 7—9 月, 场次洪水的  $C-Q$ (含沙量-流量) 关系呈现顺指针滞后环, 逆时针滞后环、“8”字型滞后环等滞后环现象(见图 15)。从河道形态来看,

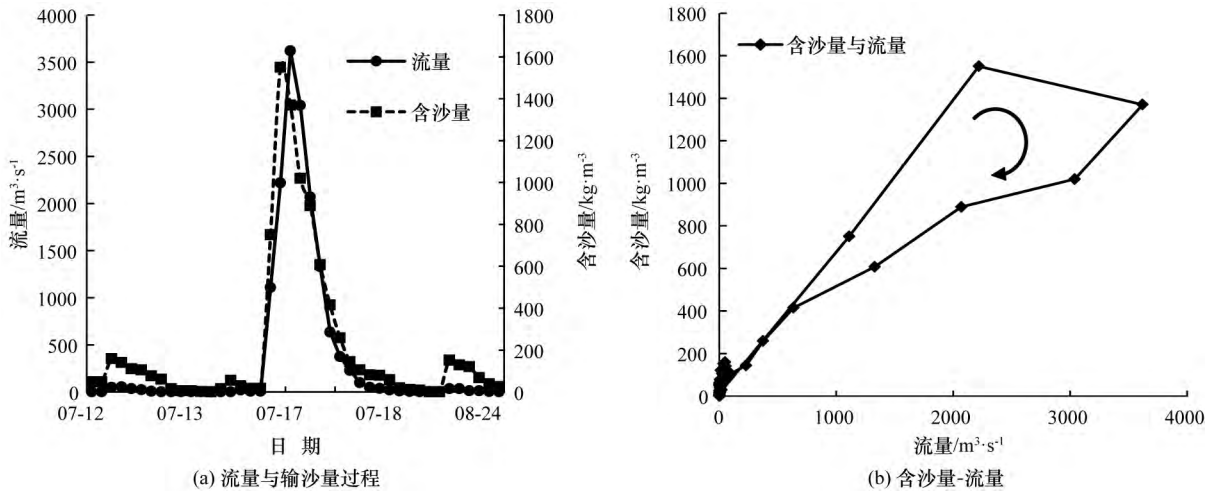


图15 1973年7月12日洪水过程及相应的流量-含沙量

大洪水情况下形成的顺时针滞后，主要是由于河道内沉积有足够的可蚀物质，在大洪水情况下很快就达到了沙峰。这些高含沙洪水具有极大的挟沙力和输送能力<sup>[36]</sup>，能够将上游粗颗粒泥沙一直输送到入河口，以冲积和洪积的形式进入与黄河干流的交汇处。十大孔兑产生的入黄洪水发生时间快、持续时间短、含沙量高、出现频率低，尽管水土保持和生态恢复措施对一些孔兑的减水减沙效应明显，但对黄河干流河道造成淤堵的威胁依然存在，应进一步强化对这些高含沙洪水形成过程的监测、预警和源头治理并采取有效措施降低黄河干流河床、提高河堤防洪标准，以减轻其可能造成的灾害。

#### 4.2.3 干支流汇流特征与河床演变冲淤响应机制

以毛不拉孔兑为典型多沙入黄支流，以黄河干流出现枯水、中水和洪水三种情景为条件，考虑了支流汇入的各类代表性情景开展试验。模型试验结果表明：(1) 黄河干流流量很小时，多沙支流突发性较大高含沙洪水入汇，会导致干流河槽和支流沟口被严重淤堵，形成的沙坝使得干流洪水倒流，沙坝上游不断壅水后大量漫滩，直接逼近左岸防洪大堤。(2) 由于大量颗粒较粗的风沙在沟口上游已发生淤积，实际被带入黄河干流的风沙量，只占支流入黄总输沙量的百分比为50%~75%。(3) 黄河干流中水流量时，多沙支流突发性较大高含沙洪水入汇，会形成高出主河槽两侧滩地的巨大沙坝，上游不断壅水后将使洪水倒流、大量漫滩，会造成多处漫溢、乃至决口的险情。在交汇口形成的沙坝，在黄河主河槽纵向上的长度可达4700 m，横向宽度约1600 m。沙坝产生的严重壅水将导致绝大部分水流漫过左岸防洪大堤从堤外向下游分流。淤积范围和淤积厚度较大、在主河槽纵向淤

积较长的极端情况下的沙坝，需要干流加大流量至3000 m<sup>3</sup>/s后才有可能冲开。(4) 多沙支流突发性产输沙使干流河道产生的淤积程度同干流来水流量有关，在黄河干流流量增大至3000 m<sup>3</sup>/s后，干流河槽就难以出现淤堵情况。若干流已形成沙坝堵河现象时，在干流流量为1500~2000 m<sup>3</sup>/s时，可配合“挖引疏浚”措施将淤积在主河槽的泥沙冲刷带走。

### 4.3 宁蒙河段物理模型试验研究

#### 4.3.1 现状工程条件下的中小水试验

(1) 通过河道模型中实测的水位流量关系可直接查出研究河段的平滩流量，发现个别河段平滩流量仅1000 m<sup>3</sup>/s左右，三盛公至三湖河口河段的平滩流量约为1500 m<sup>3</sup>/s。(2) 由于上游水库的调节运用，汛期流量较小时，流路可能在两岸工程间穿堂过，部分工程脱河，畸形河湾时有发生(尤其昭君坟至头道拐河段)。小水条件下宁蒙河段冲刷作用不大，甚至出现主槽淤高、断面变得宽浅的趋势。流量大于2000 m<sup>3</sup>/s后主槽河床冲刷才逐渐明显，流量大于2500 m<sup>3</sup>/s后漫滩范围增大，河道出现槽冲滩淤现象，断面形态向有利方向转化。2012年型洪水对内蒙古河段冲刷后，巴彦高勒、三湖河口水文站造床流量约为2250 m<sup>3</sup>/s，头道拐水文站约为2750 m<sup>3</sup>/s，治导线设计时可取2250 m<sup>3</sup>/s作为整治流量。

#### 4.3.2 整治工程适应性与其作用的河势调整规律

##### 4.3.2.1 整治工程适应性影响

目前河床边界条件下，水沙过程持续减小后，内蒙古游荡型河段可以通过水流强度的变化转变成过渡性甚至弯曲河型。但即使是三湖河口以下的过渡性和弯曲型河段，在沙质河床条件下河槽仍横向摆动多变，刷滩坐弯，对两岸影响较大，尚需通过必要的河

道整治过程控导河势。尽管在河道工程较为配套的河段, 整治工程对中水河势适应性较强, 控导中水流路的效果较好, 且在大洪水时减轻主流对堤防的直接威胁, 但不少河段的河道工程还不能适应, 新修工程仅是对限制河槽展宽, 防止滩地坍塌会起到一定的作用。新修工程较多的河段流路还需要经过较长时段的调整, 只有在大中洪水期才能逐渐发挥控导河势的作用, 使河势不断向有利方向发展。河道工程按照“就岸防护”原则布局的河段, 上下游因缺乏有效配套工程, 河势变化又有不确定性, 工程对各种水沙条件均难以稳定适应。尤其存在畸形河湾的部位, 可能会出现工程脱溜现象。

#### 4.3.2.2 整治工程作用下河势调整规律

宁蒙游荡性河段自然演变遵循着由量变到质变, 即缓变到突变的规律, 大水趋直、小水坐弯, 在遇高含沙洪水时, 河道发生强烈淤积, 汊河消亡, 水流多由几股集成一股, 往往切割阻水洲滩, 主流摆动, 引起河势大变, 增加了出现“横河、斜河”的机遇; 整治工程较配套的河段, 河势变化的特殊性具体表现为: (1) 在工程附近“大水取直, 小水坐弯”的规律表现为“小水上提, 大水下挫”; (2) 限制性弯曲河道上下河弯河势变化的关联性增强, 主流入上弯工程的靠溜部位即使有些变化, 下一弯着流点基本上变化不大; (3) 河道工程控制了河势变化的范围和规模, 主流线基本在工程外包线之内; (4) 河势变化受工程平面布局状态影响较大, 不同的工程布局形式对工程的调整规律不同。

基于物理模型试验结果, 发现: 按照“就岸防护”修建的工程, 同规划的治导线难以适应, 不能达到预期效果, 会出现不利的河势发展, 甚至导致某些部位出现威胁堤防的不利局面; 河势控制较好的河段往往是上游送溜工程直接挑流至下游工程的河段, 甚至说只有在这种完全配套的工程约束下, 上下游工程存在紧密呼应关系, 河势才会得到稳定的控制。宁蒙河段尚需修建更多的河道整治工程来控导河势流

路; 若进口入流条件稳定, 在 2~4 组河弯工程逐渐配套后的河段, 河势可得到有效控制, 但随着流量的减少, 水流动力作用相应减弱, 河势随即出现靠溜部位偏离, 使下游工程对河势的控导能力发生变化, 流路总会出现偏离人们设想的治导线而呈散乱之势, 从而遵循“流性习散”的自然规律。为此, 除在两岸交错修建工程采用弯曲性整治来控导水流外, 还应该通过上游水库加大流量工程来对河槽流路进行必要的“塑造”; 尽管游荡性河流在没有“束流”作用的条件下从整体上河势散乱, 但无论从天然河流还是从模型小河的具体流路上看, 河槽又呈弯曲形态, 从而游荡性河流也遵循“河性习弯”的自然规律。

#### 4.3.3 河道治导线制定

在游荡特性难以改变的条件下, 宜采取因势利导的弹性治理方案。河道整治工程布局, 须从理论上寻求最稳定的流路形态, 建立所选弯道主流线特征参数同河流影响因子间的定量关系式。马良等<sup>[38-39]</sup>根据黄河、长江等天然河流及大量模型试验资料, 在引入张红武<sup>[40]</sup>弯道环流沿水深分布公式, 并假设当弯道某点环流强度为弧顶 0.1 倍时弯道特征消失,  $R_1 \geq 3R_0$  时可以概化为直河段的基础上, 最终得出

$$R = (0.25L - 0.054L\sigma\cos\omega) / (\sin\omega) \quad (3)$$

$$T = 2L(0.20\omega^2 - 0.09\omega + 0.06) \quad (4)$$

式中,  $L$  为河宽跨度 (m);  $R$  为河湾曲率半径 (m);  $\sigma$  为正弦派生曲线的弯曲系数;  $\omega$  为最大值即流路与平均河谷方向所成最大夹角 (这里取弧度);  $T$  为振幅 (m)。使用上述治导线流路方程和制衡机制设计方法, 我们对宁蒙黄河河道整治进行了布局, 如图 16 所示。

#### 4.3.4 河道输沙特性与临界条件

通过对物理模型试验结果观测和分析发现, 当宁蒙黄河干流施放流量大于  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  的清水时, 内蒙古河段床面上粒径  $0.1 \text{ mm}$  以上的沙质推移质运动有较大规模, 悬移泥沙取样中有一定含量的粒径大于  $0.1 \text{ mm}$  的泥沙, 表明床沙被冲刷的粗颗粒除一部分呈推移质运动形式外, 还有一部分在近河底处呈悬移

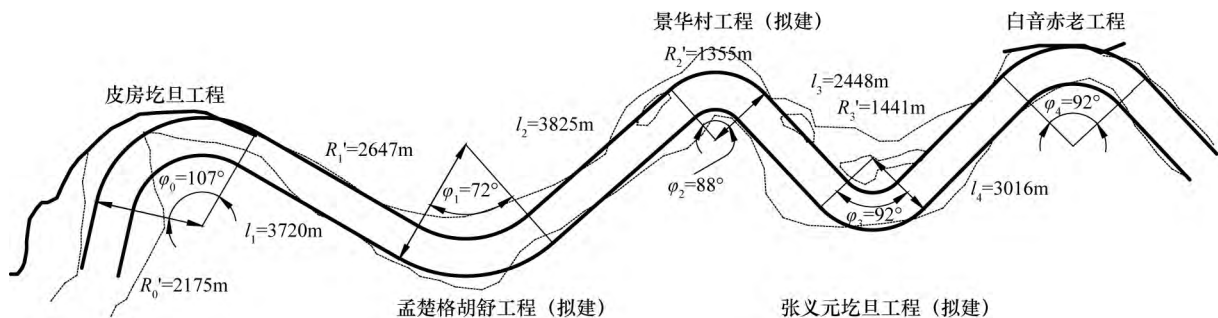


图 16 黄河皮房圪旦—白音赤老河段设计治导线



质运动状态,易与床面泥沙发生交换。内蒙古三盛公至三湖河口河段能够形成冲刷的临界条件为含沙量在  $6 \text{ kg/m}^3$  以下的洪水流量达  $2\,400 \text{ m}^3/\text{s}$  以上且要维持  $10 \text{ d}$  以上,其来沙系数阈值为  $0.002\,5 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ; 三湖河口至昭君坟河段形成冲刷的临界条件为含沙量在  $5.2 \text{ kg/m}^3$  以下的洪水流量大于  $2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$  且要维持  $10 \text{ d}$  以上,其来沙系数阈值为  $0.002\,1 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ; 昭君坟至头道拐河段形成冲刷的临界条件为含沙量在  $5 \text{ kg/m}^3$  以下的洪水流量大于  $2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$  且要维持  $10 \text{ d}$  以上,其来沙系数阈值为  $0.001\,9 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 。从上述各河段来沙系数阈值沿程减小的变化趋势看,在内蒙古河段目前河床边界条件下,全线冲刷要求的流量至少为  $2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。说明黑山峡工程必须预留充足的水沙调控库容。

## 5 宁蒙黄河调控机理

### 5.1 上游水库群调节对宁蒙河道水沙过程的影响

#### 5.1.1 水库群调控作用与河床形态调整之间的响应机制

黄河上游龙羊峡与刘家峡水库陆续修建并投入运用后,改变了宁蒙冲积性河段长期冲淤调整状态。实测资料分析显示,时间上,宁蒙下河沿一头道拐河段长期(1952—2012年)汛期大量淤积,年均淤积量达  $0.418 \text{ 亿 t}$ ,且主要集中在1952—1960年、1987—1999年和2000—2012年三个时段(见图17),相应汛期年均淤积量分别为  $1.111 \text{ 亿 t}$ 、 $0.867 \text{ 亿 t}$  和  $0.224 \text{ 亿 t}$ ;而非汛期分河段看,宁夏河段为冲刷,内蒙古河段为淤积,全河段非汛期呈微冲状态,年均冲刷  $0.006 \text{ 亿 t}$ ;长时期综合来看,全年表现为淤积,年均淤积  $0.412 \text{ 亿 t}$ ,99%的泥沙淤积在三湖河口以下;而冲刷主要集中在非汛期,冲刷部位主要是在宁夏河段,冲刷集中时期为1961—1968年和1969—1986年。空间上,下河沿—青铜峡河段比降大,长时期河道基本能维持平衡;石嘴山—巴彦高勒河段峡谷段居多,冲淤调整量不大;青铜峡—石嘴山和巴彦高勒—三湖河口河段在年内一定时期能够冲刷;三湖河口—头道拐河段随着进口(下河沿+清水河)流量的增加冲淤效率呈现淤积少—淤积多—淤积少—冲刷的变化特点。

#### 5.1.2 均衡输沙条件及河床动力平衡临界阈值

据统计,宁蒙河段当进口站(下河沿+清水河+苦水河+十大孔兑)含沙量小于  $7 \text{ kg/m}^3$  时,河道发生冲刷,并且随着洪水期平均流量的增加,冲刷量明显增大;当含沙量大于  $7 \text{ kg/m}^3$  时,河段淤积,并且随着

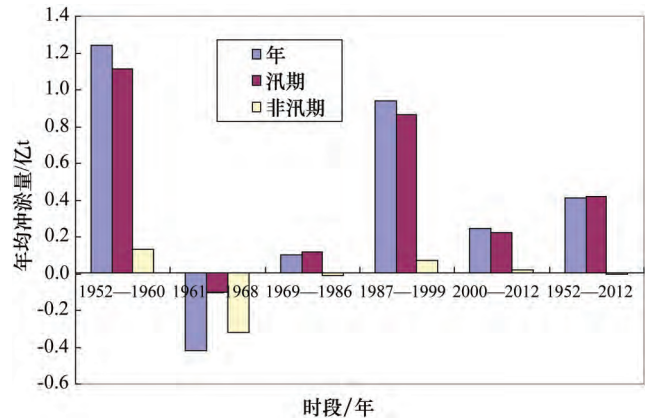


图17 宁蒙河道不同时期冲淤量年内分布

含沙量的增大,河道淤积量明显增大;在相同含沙量条件下,随着平均流量的增加,淤积量有所减小;随着流量增大到  $2\,000 \sim 2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,河道淤积量有所减少,场次洪水平均冲刷  $0.026 \text{ 亿 t}$ ;当流量大于  $2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,场次洪水平均淤积量仅为  $0.067 \text{ 亿 t}$ 。根据长时段1952—2012年实测资料,考虑主要支流和引水引沙以及风沙等因子,以及风沙量的影响,分河段点绘来沙系数与河道冲淤量之间的关系如图18、图19所示。

#### 5.1.3 潜在性极端条件下泥沙空间传递过程

关于青铜峡水库,统计1991—2010年青铜峡水库15场汛末拉沙资料,发现入库含沙量平均为  $1.8 \text{ kg/m}^3$ ,出库含沙量平均为  $42.4 \text{ kg/m}^3$ ,出库含沙量平均为入库的20倍以上。同时,青铜峡—石嘴山段淤积  $1.40 \text{ 亿 t}$ ,平均单次拉沙引起青铜峡—石嘴山段淤积  $0.093 \text{ 亿 t}$ ,表明汛期排沙对青铜峡—石嘴山河段淤积影响显著,而对石嘴山以下河道影响很小。对三盛公水库而言,在“错峰排沙”的运行方式下,即当石嘴山水文站含沙量达到  $23 \text{ kg/m}^3$  或  $25 \text{ kg/m}^3$  时,敞泄或降低闸前水位进行排沙,在灌溉期停灌和非灌期进行敞泄冲刷,灌溉期停灌冲刷的排沙比可达到130%以上,非灌期敞泄冲刷的排沙比可达250%。三盛公水库排沙后,淤积主要发生在坡度较缓的巴彦高勒至喇嘛湾区间,尤以巴彦高勒—昭君坟河段最为严重;其它河段虽然也有一定淤积,但由于比降较大,相对来说洪水时容易发生冲刷,可及时恢复过流能力。

## 5.2 黄河上游水沙关键过程调控

### 5.2.1 数字流域构建基础

降雨是水沙过程预报的重要输入条件,降雨数据的时空分布率显著影响水沙过程模拟预报结果。本文采用时空降尺度方法对实际观测的降雨数据进行加

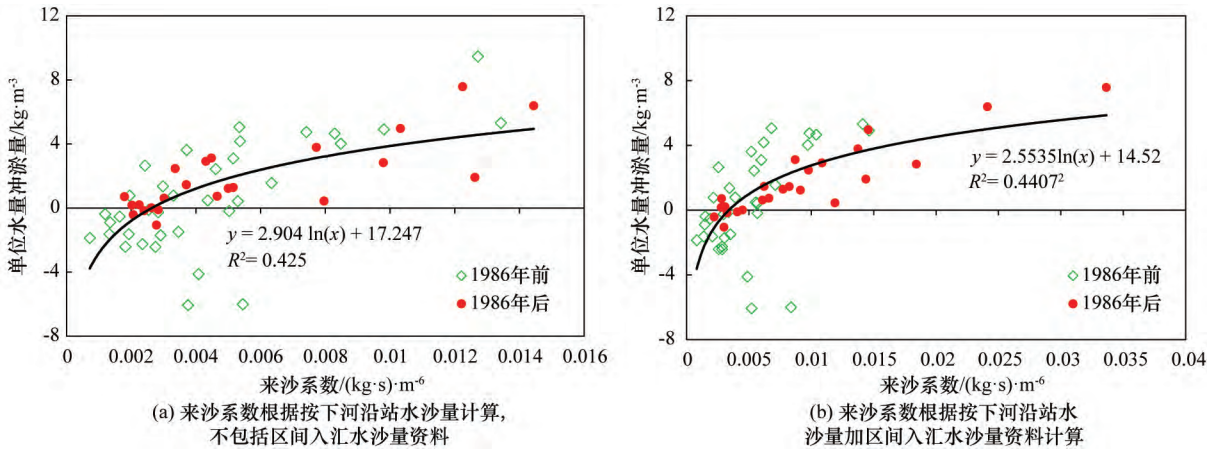


图 18 下河沿-石嘴山河段汛期冲淤量与来沙系数关系

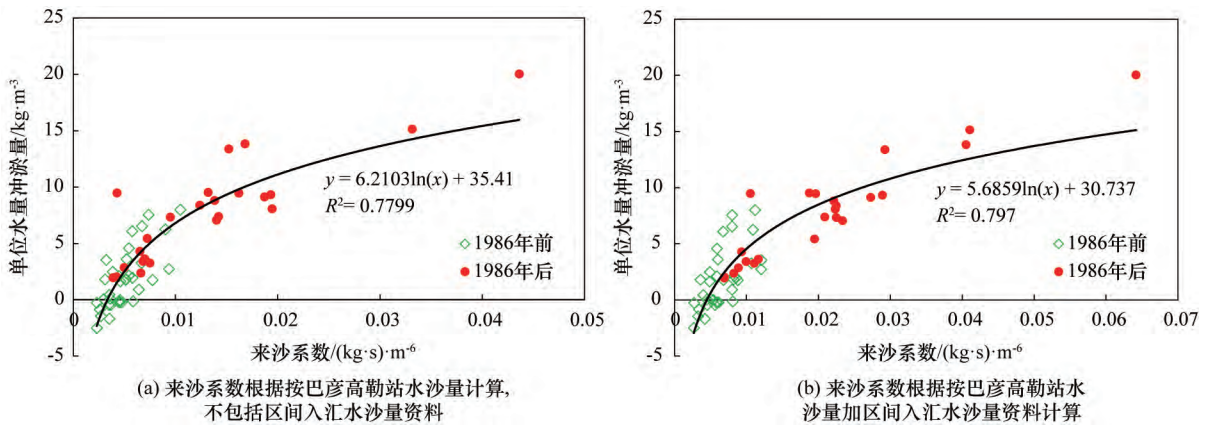


图 19 巴彦高勒-头道拐河段汛期冲淤量与来沙系数的关系

密处理, 以满足精细水沙预报的要求。其中, 空间降尺度采用了屏蔽参数加权法, 时间降尺度采用了基于雨强-历时统计关系的随机模型法。同时与 TRMM 卫星降雨数据进行融合, 增强降雨数据的时空分辨率。从计算结果来看, 该方法基本满足场次暴雨洪水水沙过程模拟分析的要求。

模型计算单元顺序表的存在和计算模式的限制使得其计算效率和适用范围具有一定的局限性, 特别是河网很密集、复杂时系统的鲁棒性降低, 其单线程的计算方式也无法适应大数据时代多核计算机甚至云计算的运用。因此需改进模型平台的计算方法和存储规则以提高计算效率, 增加其对大范围、具有复杂河网结构的流域水沙规律研究的适用性。

### 5.2.2 数字流域模型平台搭建

基于自适应动态多目标控制理论与水沙调控方法, 采用模块化开发方法集成黄河宁蒙河段数字水沙调控模型的各个功能模块, 在分布式水文模型 DWSM 及河道输沙和水库调度模型 CREST1D 的基础上建立对大规模河网流域的管理体系, 实现计算机集群上的

流域并行计算, 最终将这些功能和模型集成在清华大学开发的数字流域平台上, 构建了宁蒙黄河流域数字流域模型平台, 并通过实例验证平台的有效性和适用性。

以坡面产流产沙过程和河道水沙演进过程为例, 描述系统平台的搭建过程。这两个过程合成的核心子系统采用模块化开发方法, 主要包括数据库模块、河网提取模块、计算顺序提取模块、DWSM 模型模块以及水文成果对比与显示模块。DWSM 模型模块是数字流域平台的核心, 主要功能是从 DWSM 伺服模块接收计算需要的坡面、河道信息和下垫面泥沙、植被信息, 以及边界条件的流量、输沙率信息, 从降雨开始计算坡面的超渗和入渗, 并计算形成径流和壤中流。同时计算坡面雨滴溅蚀效应的土壤剥离率, 演算坡面泥沙的输出量, 然后结合给定的边界条件计算水流和泥沙在河道中的演进, 迭代计算直至流域的出口。从结构上看, 数字流域模型包括数据层、模型层和应用层, 其中模型层是核心, 提供适当的理论和模拟方法对流域内的径流、泥沙、污染物等过程进行

模拟计算(见图 20)。

在黄河上游产沙、输沙、河道演变、冰洪致灾条件及水库群调度方法等成果的基础上,集成风-水-重力侵蚀模型、河道输沙模型、冰情预报与水库联调模型,构建黄河上游区域数字流域模型平台。优化黄河上游水库及宁蒙河段防凌减灾的调控指标,并利用创建的数字流域平台研究多因素、多参数、多工况条件下黄河上游宁蒙河段的产输沙规律,以及水库调度后河道水沙条件的响应,进而依据水沙输移目标和河道水沙响应反馈,实施水库调度的实时过程,以确保黄河上游水沙过程目标的实现。对于冰情预报与水库联调模型,通过以往单独运用的冰情预报模型、水库防凌调度模型无缝耦合,实现宁蒙河段水库防凌调度在冰情信息预报的支持下的动态模型。

### 5.2.3 宁蒙黄河场次降雨产流产沙预报

基于 DEM 数据和遥感影像获取的地形与下垫面参数,本文建立了完整的宁蒙黄河产输沙、河道冲淤、河流演变、流域模拟的预测分析平台,解决了复杂水沙、边界、人类活动影响下河流模拟的难题,除通过实例验证了平台的有效性和适用性外,还将数字流域模型在下河沿到石嘴山段进行了调试和应用。应用结果表明(见图 21),石嘴山的流量过程和输沙率过程与下河沿的图形基本类似,即可推测宁夏段的水沙受到上游的来水来沙影响很大。此外,汛期(7—10月)流量相对集中,输沙率较大,其他月份水量较少,部分月份的输沙率甚至接近于零。由此可见,黄河宁蒙河段水沙年内分配比不协调,输沙主要集中在汛期。纵向比较发现,水沙年际变化也很明显,输沙率年际波动较大。由于黄河水沙的多变性和不重复性,在年与年、季与季以及地区之间来水都不同,且变化很大。然而大多数用水部门(例如灌溉、供水、航运、发电等)均要求相对固定的用水量和时间,生产生活要求难以与天然来水情况完全相适应;并且黄河水沙在年内分配的不协调性,可能会导致河道的冲刷和淤积,输沙问题更不容忽视。为了解决水沙在时间上和空间上的重新分配问题,充分利用水资源,使

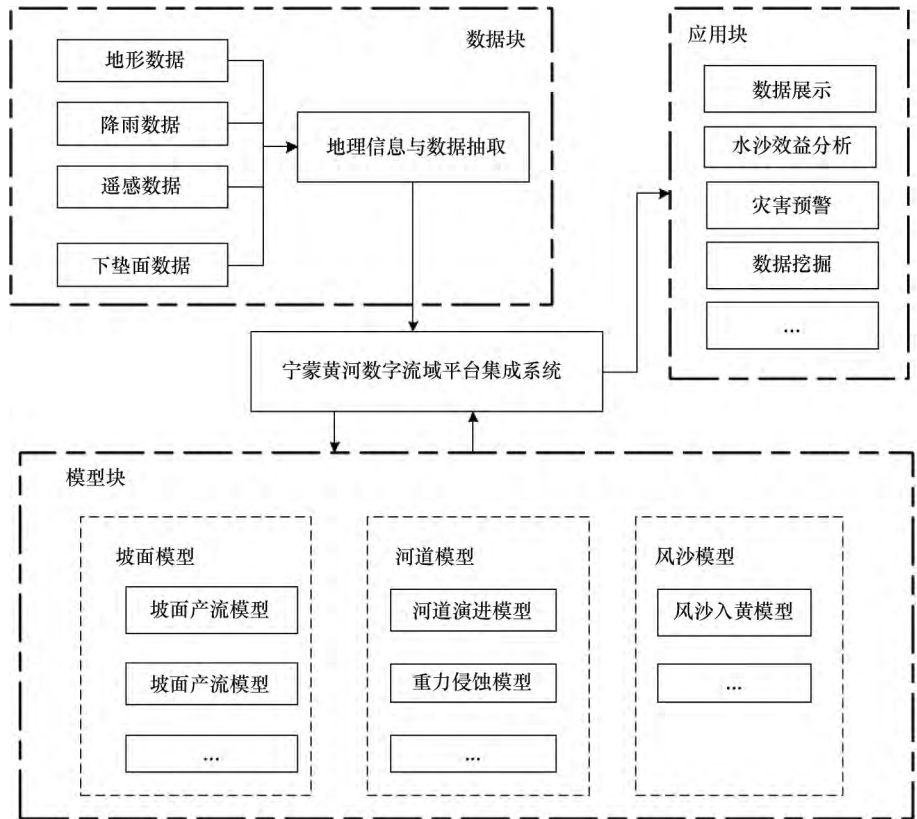


图 20 数字流域模型的框架结构

之适应水部门的要求,以及更好的协调黄河泥沙输移问题,可在黄河上游宁蒙河段适当位置兴建一些能调蓄洪水的综合利用水库,蓄洪补枯,蓄在水库的一部分洪水可在枯水期有计划地用于兴利需要,使天然来水能在时间上和空间上较好地满足用水部门以及河道输沙的要求。

利用所构建的宁蒙黄河数字流域模型平台,结合宁蒙河段的冲淤演变分析结果,对黄河上游控制性水利枢纽进行水沙调度,调节水沙关系,进而恢复下游河道冲淤平衡。发现,在当前来水来沙条件下,宁蒙黄河段处于淤积态势。假设建立控制性水利枢纽对汛期上游来水来沙过程进行适当调节后,在不改变现有排沙量的基础上,当下泄水量增加 15% 到 30% 时,下河沿—石嘴山河段由淤积状态转变成冲刷状态;在不改变现有排洪量的基础上,当下泄沙量减少 30% 到 50% 时,下河沿—石嘴山河段由淤积状态转变成冲刷状态。

## 6 宁蒙黄河河道综合治理措施

### 6.1 调整龙刘水库运用方式的作用

设置龙刘水库汛期基本不蓄水(极端情况,用于分析龙刘水库基本不影响水沙条件或影响很小的情况

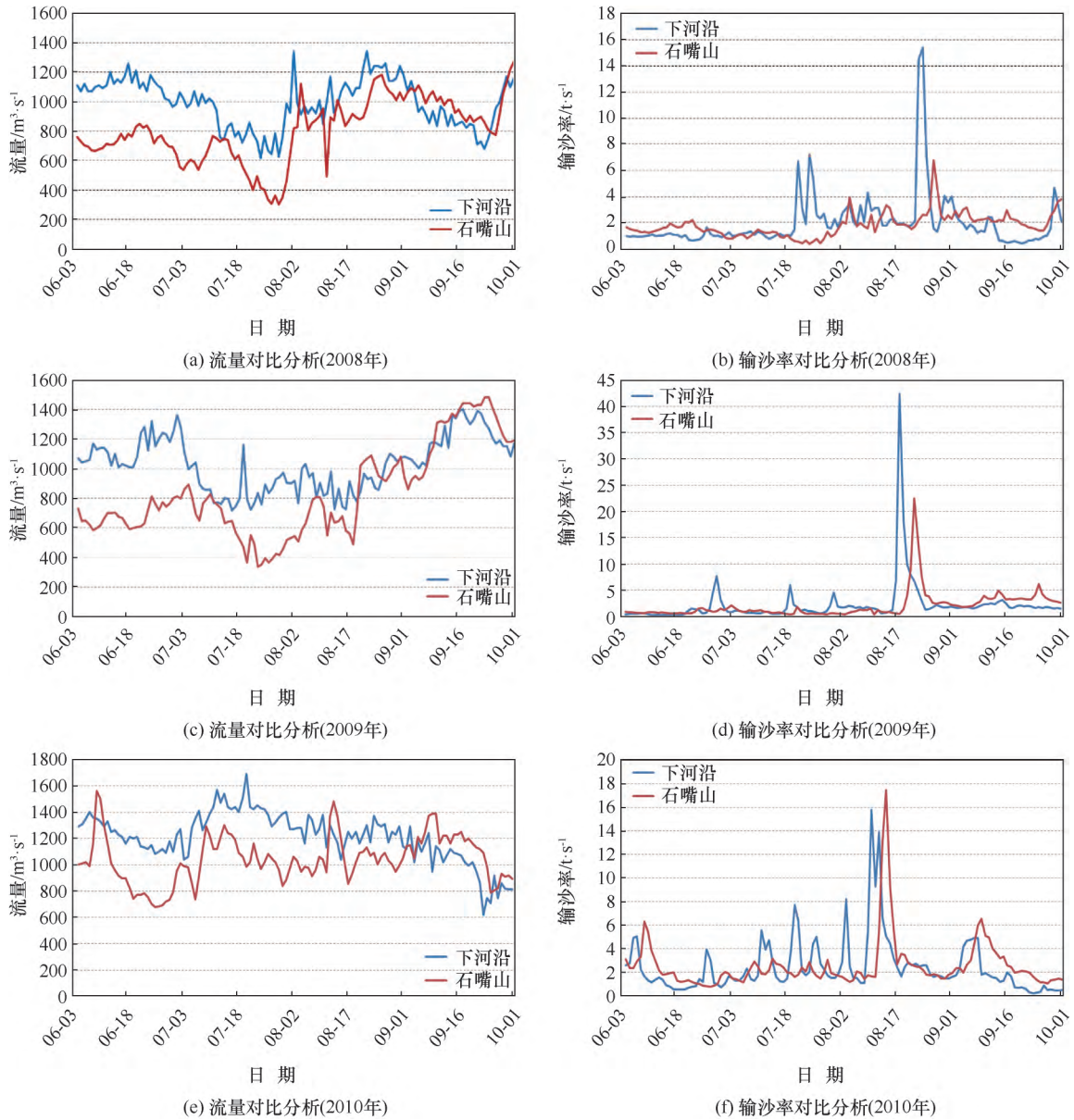


图 21 出入口断面水沙对比分析

下宁蒙河段的冲淤特性)和增泄(少蓄)不同水量方案, 拟定龙刘水库汛期下泄水量较现状运行方式分别增加 10 亿  $m^3$ 、15 亿  $m^3$ 、20 亿  $m^3$ 、25 亿  $m^3$ 、30 亿  $m^3$ 、35 亿  $m^3$  方案, 各方案下水库汛期日入库流量分级控制原则见图 22。数学模型计算结果表明, 调整龙刘水库运用方式能在一定程度上减少宁蒙河段淤积抬升的速度, 龙刘水库汛期少蓄水 40 亿  $m^3$  年平均淤积量由现状的 0.70 亿 t 减少到 0.42 亿 t, 中水河槽过流能力增加约 400  $m^3/s$ ; 但是由于龙刘水库运用方式调整, 给流域的供水、发电带来严重影响, 龙刘水库汛期少蓄水 40 亿  $m^3$  多年平均供水量减少 9.90 亿  $m^3$ , 特枯水年供水量减少 23.70 亿  $m^3$ , 保证出力减少 2245 MW, 发电量减少 18.68 亿 kWh。

## 6.2 黑山峡水库不同开发方案的作用

能为上中下游水沙调控提供强大水流动力的黑山峡工程, 地处甘肃、宁夏两省区交界处, 其中水利部推荐的方案为大柳树枢纽工程, 位于黑山峡出口以上 2 km 处, 是水多沙少的黄河上游最后一个可建高坝大库的坝址。在此建造高坝后可形成大型水库, 并能长期保持巨大的有效库容; 在全河调水、调沙、调电中发挥承上启下功能, 战略地位重要<sup>[41]</sup>。研究表明: 黑山峡水利工程通过水库调蓄并提高下泄水温, 使宁夏河段不再封河, 基本解决内蒙古河段上段的冰塞问题, 并消除洪水危害; 通过对上游梯级电站反调节多发电, 增加巨大效益, 且使上游龙羊峡、刘家峡水库可大胆参与水沙调控, 有效增加河道内汛期的输

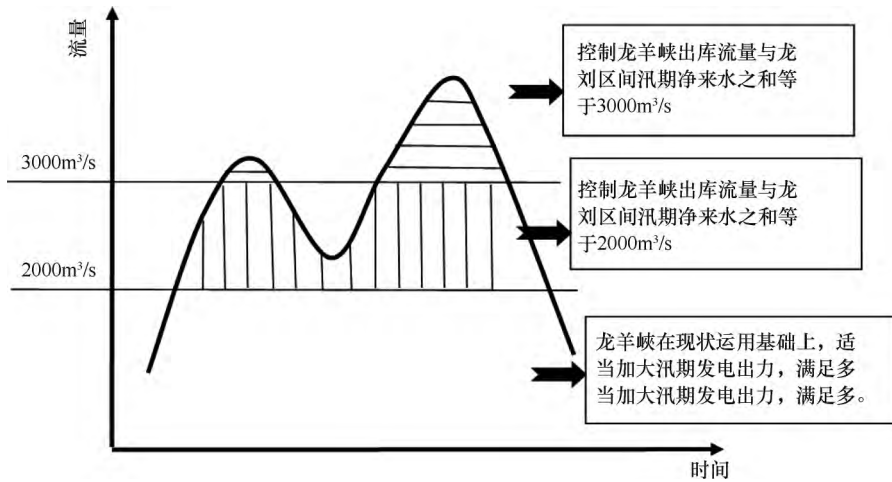


图 22 龙羊峡水库汛期日入库流量分级控制示意

沙水量，对宁蒙河段及中下游河道保持久远的调水调沙功能，有效恢复宁蒙河段行洪输沙能力，即可扭转黄河宁蒙河段水沙失衡及河情恶化趋势。

从数学模型计算结果看，一级开发方案能够明显减轻宁蒙河段淤积，使年均淤积量由现状 0.696 亿 t 减少至 0.170 亿 t，年均减淤量 0.526 亿 t，同时，由于黑山峡河段水库的反调节和拦沙作用，一级开发方案的水库在 2030 年建成以后，中水河槽过流能力由  $1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  恢复到  $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  以上，对改善和维持宁蒙河段恶化的河道形态最为有利。

实际上，上游黑山峡、龙羊峡、刘家峡这三座大型骨干水库与中游古贤等骨干工程联合运行，在黄河主要来沙期泄放高效造床输沙流量，促使三门峡库尾的潼关高程降低与渭河下游溯源冲刷，减轻渭河下游严峻的防洪压力，进一步再发挥三门峡水库水沙调控作用，即可提高小浪底水库的调水调沙效果，为黄河下游冲沙减淤提供动力条件。表明上马古贤与黑山峡工程后，能够“激活”三门峡工程，共同发挥调控作用。远期黑山峡水库作为国家“四横三纵”水利布局中重要的控制性骨干工程，能够调节南水北调西线工程入黄水量，实现黄河流域水资源合理配置，提高调水调沙效果的可持续性，确保黄河长治久安。

黑山峡水利工程高位优势显著，是能够从时空上优化配置黄河水资源、保障陕甘宁蒙相关地区生态建设和经济社会发展的天赋宝贵资源。其中生态建设覆盖区域涉及黄河中上游相关地区，关系到我国中东部地区的环境质量。加快黄河黑山峡河段开发利用，是有效破解本区域生态建设和经济社会发展水资源瓶颈制约的关键所在。她除能支撑原有的绿洲建设外，还能提高土地承载能力，接纳大量生态移民；以小面积土地的开垦换取大面积土地植被恢复，实现“建设

小绿洲、保护大生态”的战略构想；通过向甘肃民勤补水，能够实现“民勤绿洲”救护；通过人口分布调整，促进生态系统休养生息，有效遏制沙漠扩张；提高林草覆盖率和植被覆盖度，构建以沿黄灌区为主、以灌区外围生态修复区为辅的我国西北生态屏障，减少区域及京津地区沙尘天气。

依托枢纽向甘肃中东部、宁夏中北部、陕西北部、内蒙古鄂尔多斯等我国十分重要的能源资源战略高地供水，即可在国务院目前对于上述省区用水指标范围内，解决区

域生态建设和经济社会发展用水的合理调配问题，为陕甘宁蒙“能源金三角”建设提供水源保证，推动资源优势向经济优势转化，实现黄河流域经济高质量发展。随着黄河流域成为我国新的经济增长极的集聚效应不断强化，能够有效驱动“一带”沿线的全面发展。同时，结合河段水能的开发利用，实现区域水、风、火电“打捆”外送，保障国家能源安全<sup>[41]</sup>。

惟及早上马黑山峡工程，黄河水沙调控体系的主要构架才能形成，调水调沙功能才会久远，才不至于出现中游水库死库容淤满后，上游可提供强大水流动力的骨干水库刚刚建成而难以对中下游发挥冲沙减淤功能的尴尬局面，因为如果多年后再形成的整个黄河的水沙调控体系，将会因缺乏中游水库的配合而使调控作用明显变小。何况水沙调控体系只有持续保持高效输沙能力，才能提供更多的生态建设和经济社会发展用水。

### 6.3 南水北调西线工程生效后对宁蒙河段的作用

南水北调西线一期工程调入水量配置主要遵循以下原则：(1) 统筹考虑黄河水资源和调入水量进行统一配置。(2) 统筹考虑河道外生活、生产、生态用水和河道内生态环境用水。(3) 统筹考虑不同河段、不同省(区)、不同部门的用水要求。(4) 统筹配置干流和支流水资源，体现高水高用、低水低用的原则。根据西线第一期工程开发任务及受水区缺水情况，调水 80 亿  $\text{m}^3$ ，综合考虑各方面因素，将河道内配置 25 亿  $\text{m}^3$ 、河道外配置 55 亿  $\text{m}^3$  方案作为推荐方案。采用宁蒙河段泥沙冲淤数学模型计算得到一级开发方案西线调水宁蒙河段年平均冲淤量，西线调水宁蒙河段河道内配置水量 25 亿  $\text{m}^3$  时，宁蒙河段为冲刷状态，年平均冲刷泥沙约为 -0.101 亿 t。

南水北调西线一期工程生效后, 通过上游龙羊峡、刘家峡、黑山峡等骨干水库联合调节, 增加汛期大流量过程, 可使宁蒙河段由淤积转为冲刷, 中水河槽过流能力将维持在  $2700 \text{ m}^3/\text{s}$  左右。向黄河增水方案中, 较为可行的只有水利部从长江上游或相关区域引水进入黄河上游的南水北调西线调水方案。为减少这种大规模跨流域调水工程对四川相关地区的影响, 可利用西藏之水置换或补充南水北调西线工程调水区四川省所需水量, 同原来南水北调西线调水方案结合起来讲, 即是“川水济黄、藏水补川”方案。初期可先在昌都(澜沧江在当地年径流  $230 \text{ 亿 m}^3$ ) 至江达一带沟通澜沧江水系和金沙江水系, 即不难将金沙江与雅砻江联通, 再由南水北调西线调水方案的线路, 进入黄河上游支流贾曲自流入黄。

#### 6.4 综合治理对策

为实现减轻泥沙淤积、恢复和维持河道中水河槽、保障防洪(凌)安全的宁蒙黄河治理目标, 目前可行的治理对策, 是建立黄河上游沙源固定、支流泥沙阻截、干流泥沙输导与堤外淤沙处置的“固-阻-输-置”综合防治体系。从宁蒙河段治理的近期和长远需求看, 还需要在黑山峡河段开发工程和南水北调西线工程实施之前, 继续开展堤防和河道整治工程建设, 加强水土保持建设以及局部挖河疏浚等, 同时应加强多沙支流、风沙区综合治理, 减少入黄泥沙。在稳定性分叉河段、大型支流入汇段、受沙卵石河床组成限制的河段, 不宜强行套用微弯型治理方案, 而可采用“工程导送(简称为‘导’)、塞支强干(简称为‘塞’)、挖引疏浚(简称为‘挖’)”方针, 亦即“导、塞、挖并举”的对策。“工程导送”即通过修建控导工程、险工迎溜送溜, 控制主流的工程措施; “挖引疏浚”即沿整治线在过渡段浅滩开挖引槽, 疏浚通道, 而挖出的沙卵石尽量用来堵塞支流、串沟, 加高边滩, 以利于引导水流归入引槽。“塞支强干”即通过工程截住支叉入口或恶化支叉的入流条件, 还可采用锁坝将支叉堵塞, 尽可能将堵塞支叉的锁坝同治导线联系起来, 使该坝同时具有一定的导送主流的功能。以上三者相互结合, 相互依托, 也可称这一整治措施为“工程送导为主、挖引疏浚与塞支强干为辅”的方针。尤其是对于边界复杂且必须重点整治的重要河段(如黄羊湾至泉眼山河段), 更需要采取“工程送导为主、塞支强干与挖引疏浚为辅”, 可通过布局河道整治送导工程达到主要流路按治导线的目的, 以保证重要位置(如泉眼山取水部位)靠溜; 通过“塞支强干”与“挖引疏浚”这些辅助手段, 作

为“工程送导”的保证条件, 以保证主流的分流比例, 并消减多沙支流突发性洪水对沟口的影响或解决影响的补救措施。

## 7 结论与建议

### 7.1 结论

(1) 从多营力侵蚀产沙的问题出发, 采用宏、微观相结合的动力学过程的研究途径, 分析风蚀严重的沙漠边缘区、风成沙丘区、沟坡区在水流切割、风力掏蚀及重力作用下, 发生崩坍、水流挟带、风力再掏蚀等多变化形式, 显现风、水、重力多营力作用侵蚀的循环过程和交互、衔接作用, 确定黄河上游多沙源分布规律, 对计算、观测和试验数据进行综合分析, 解决了宁蒙黄河沙源解析的难题, 揭示黄河上游流域多营力作用下的侵蚀产沙机理和主、次因素, 提炼风、水、重力侵蚀的基本规律, 研究出流域风-水-重力侵蚀及泥沙输移模拟方法, 提出了一套基于不同沙源类型的风蚀输沙通量计算方法及黄河宁蒙河段风沙入河的估算方法, 建立了普适性较强的风沙动力学输移模型, 并发现近 30 年风速下降、区域植被覆盖率上升是风沙侵蚀量与入黄风沙量呈逐渐减少趋势的原因。

(2) 黄土降雨侵蚀模型试验表明, 暴雨形成的径流是黄土遭到侵蚀的主要外营力, 也是激发和加剧重力侵蚀发展的重要影响因子, 土体结构和临空面高度, 对发生重力侵蚀的可能性与突发性有直接影响; 从空间上看, 泄流沟上段以下切和溯源侵蚀为主, 中段以侧蚀与重力侵蚀为主, 下段以堆积或冲淤交替为主; 降雨侵蚀大量产沙使中下段沟道内形成高浓度泥流并奔腾而下, 体现了多模式输沙与沟道的非平衡输沙特性, 洪水流量明显大于小流域降雨形成的径流量, 其原因是侵蚀黄土与水流共同构成了沟道的洪水流量, 导致每场暴雨洪水沿沟道将大量泥沙带入下游河流; 按降雨阶段看, 降雨初期径流量小, 陡坡处冲沟形成后才产生溯源侵蚀, 高强度降雨汇流量大, 各坡面均出现侵蚀变形, 陡坡泄流沟受到下切、侧蚀的同时, 土体在自重力作用下顺坡下移, 易突发重力侵蚀; 降雨后期主要通过溯源侵蚀形式发展, 中段冲沟仍有所冲深与展宽, 下游沟道由于比降减缓而继续淤积, 体现了水流与边界的自适应调整作用; 降雨不同时期在各坡面几乎都发生了溯源侵蚀, 而重力侵蚀多是高强度降雨期发生在陡坡地段。以上述物理模型与野外观测资料揭示的流域径流汇集过程、沟道水流与河床自适应和非平衡输沙机理基础上, 构建了复杂地

貌形态的小流域产流产沙动力学模型,由此模拟分析了不同植被特征和分布状况对流域产流产沙的影响,表明植被的减水减沙效果与延滞径流洪峰的作用同郁闭度呈正相关关系,陡坡区域植被对径流洪峰的延滞作用大于缓坡区域。

(3) 从流域有机构成要素间的不同物理机制、不同尺度过程间的复杂耦合及影响结果这个复杂系统角度,来研究流域内非平衡水沙运动机理;通过泥沙起动、扬动、推移质输沙率、泥沙级配分布、非平衡输沙与河床均衡调整等研究进展,以黄河上游各种河型的河段泥沙运动的不同状态为主线,分析这些状态转换的机理及状态转换对河流冲淤的影响,形成了能够研究宁蒙黄河及其多沙支流非平衡水沙运动机理的动力学理论,为研究宁蒙黄河问题提供了理论与方法。例如,由此在工程上量化了推移质泥沙在宁蒙河段的年输移量,确定了宁蒙沙质河段最大冲刷时床沙中径,发现宁蒙河道通过床沙与悬沙交换可产生河床冲刷,漫滩洪水淤滩刷槽作用明显等,且还同时丰富了河流动力学学科体系。

(4) 提出了水沙两相流数值模拟方法与冲积河流全沙运动模型相似条件,突破了传统数学模型适用条件苛刻的限制,克服了黄河悬移质泥沙模型不考虑推移质泥沙运动相似条件的缺陷,建立了宁蒙黄河干流床模型、多沙支流入黄河影响河工模型与三维水沙动力学数学模型,形成了黄河宁蒙河段模拟分析平台,为研究宁蒙黄河治理对策提供了综合分析工具。可由此通过模拟研究,揭示出龙、刘水库联合运用改变径流分配是导致宁蒙河道淤积萎缩的主因;确定了水沙调控阈值和支流入汇口防干流淤堵的流量阈值,发现协调水沙关系是修复黄河行洪排沙功能的有效途径,且还系统论证并优化了宁蒙河道整治布局与防洪(凌)治理对策的工程方案,发现上下游具有呼应关系的工程控导河势后,能形成流路顺畅的平面轮廓,同时在洪水中起到护堤、护滩作用,宁蒙游荡型河段整治工程有效靠溜度大于80%时,河势即可基本得到控制。

(5) 针对流域下垫面条件多样、入黄泥沙沙源众多、产沙模式复杂、河道输沙及冲淤过程受水库调度影响显著、洪凌灾害威胁大的特点,以干流水库群为调节器,以径流泥沙为调节对象,采用时空降尺度方法对实际观测的降雨数据进行加密处理,以满足精细水沙过程预报对重要输入条件的要求;空间降尺度采用了屏蔽参数加权法,时间降尺度采用了基于雨强-历时统计关系的随机模型法,同时与 TRMM 卫星降

雨数据进行融合,增强降雨数据的时空分辨率,以满足场次暴雨洪水水沙模拟分析的要求;基于自适应动态多目标控制理论与水沙调控方法,采用模块化开发方法集成黄河宁蒙河段数字水沙调控模型的各个功能模块,在分布式水文模型 DWSM 及河道输沙和水库调度模型 CRESTID 的基础上,建立对大规模河网流域的管理体系,实现计算机集群上的流域并行计算,最终集成风-水-重力侵蚀模型、河道输沙模型、冰情预报模型于水库联调模型上,构建了可进行大范围、高精度的水沙过程模拟预报的宁蒙黄河区域数字流域模型平台,在通过 DEM 数据和遥感影像获取地形与下垫面参数的基础上,形成了完整的宁蒙黄河产输沙、河道冲淤、河流演变、流域模拟的预测分析平台,解决了复杂水沙、边界、人类活动影响下河流模拟的难题,通过实例验证了平台的有效性和适用性,并将数字流域模型在下河沿—石嘴山河段进行了调试和应用。

(6) 阐明了 1986 年以来进入宁蒙河段水沙量减少,径流年内分配比例明显改变,有利于输沙的大流量显著减少,同期区间支流来沙量总体变化不大;揭示了风沙入黄、水沙变化、水沙搭配、多沙支流风-水-重力侵蚀、水流输沙能力等多因子共同作用下宁蒙河段淤积抬高、河道萎缩的内在机理,明确了上游龙、刘水库联合运用对径流年内分配过程改变是河道淤积萎缩的主要因素;明确了青铜峡水库汛期排沙及汛末拉沙影响集中在石嘴山以上河段,三盛公水库排沙时影响不超过三湖河口站;分析确定了宁蒙黄河河道水沙调控阈值和多沙支流入汇口干流防淤堵的流量阈值,即宁蒙黄河临界调控流量宜在 2 000~2 500  $\text{m}^3/\text{s}$ ,临界含沙量 5.4~10.5  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,调控时间宜在 15~20 d,证实了通过协调水沙关系可修复和维持宁蒙黄河行洪排沙功能;防止多沙支流入汇堵河的黄河流量阈值为 2 500  $\text{m}^3/\text{s}$ ,治理淤堵沙坝配合“挖引疏浚”有效冲刷的阈值流量为 3 000  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

(7) 建立了宁蒙黄河不同河段造床流量与河道整治参数的关系,发现弯曲型整治线符合水流和河床调整规律,建立了典型弯曲系数与最大夹角的表达式等辅助方程,使基于正弦派生曲线的治导线流路方程具有通用性,据此从理论上比选了宁蒙黄河河道整治工程布局方案。

(8) 针对宁蒙黄河河型复杂、凌汛期易卡冰结坝、夏季多沙支流突发性洪水易堵干流形成“沙坝”等河情状况,明确了减轻宁蒙河段泥沙淤积、恢复和维持河道中水河槽、保障防洪(凌)安全是宁蒙黄河

治理目标。提出多沙支流突发性洪水淤堵干流形成“沙坝”灾害的处治模式为“水沙调控、支流拦沙、堤外放淤”；建设黑山峡水库、南水北调西线工程等是宁蒙河段长远治理的根本对策，通过增加河道内汛期水量和调水调沙，恢复并维持中水河槽，提供防凌库容，彻底解决宁蒙河段凌汛灾害。且加强流域拦减泥沙、以干流河道整治工程稳定中水流路和支流综合治理等也是解决有关问题的有效措施，以此归纳出目前可行的治理对策是建立黄河上游沙源固定、支流泥沙阻截、干流泥沙输导与堤外淤沙处置的“固-阻-输-置”综合防治体系。

(9) 在稳定性分汊河段、大型支流入汇段、受沙卵石河床组成限制的河段，不宜强行套用微弯型治理方案，而可采用“工程导送( 简称为‘导’)、塞支强干( 简称为‘塞’)、挖引疏浚( 简称为‘挖’)”方针，亦即“导、塞、挖并举”的对策。“工程导送”即通过修建控导工程、险工迎溜送溜，控制主流的工程措施。“挖引疏浚”即沿整治线在过渡段浅滩开挖引槽，疏浚通道。“塞支强干”即通过工程截住支汊入口或恶化支汊的入流条件，还可采用锁坝将支汊堵塞。也可称这一整治措施为“工程送导为主、挖引疏浚与塞支强干为辅”的方针。

(10) 利用黑山峡所建高坝大库，可通过水库调蓄并提高下泄水温，使宁夏河段不再封河，基本解决内蒙古河段上段的冰塞问题，并消除洪水危害；通过对上游梯级电站反调节多发电，增加巨大效益，且使上游龙羊峡、刘家峡水库可大胆参与水沙调控，有效增加河道内汛期的输沙水量，有效恢复宁蒙河段行洪输沙能力，即可扭转黄河宁蒙河段水沙失衡及河情恶化趋势；上游这三座大型骨干工程与中游古贤等骨干工程联合运行，在黄河主要来沙期泄放高效造床输沙流量，促使三门峡库尾的潼关高程降低与渭河下游溯源冲刷，减轻渭河下游严峻的防洪压力，再进一步发挥三门峡水库泥沙调控作用，即不难提高小浪底水库的调水调沙效果，为黄河下游冲沙减淤提供动力条件。

## 7.2 建议

(1) 宁蒙黄河治理对策的许多研究内容已在河道整治工程布局与防洪工程建设中应用，而且近几年宁蒙河段洪水输沙与河床冲刷等方面的表现颇为一致。不过，由于宁蒙河段水沙条件复杂，影响宁蒙河段河道淤积的原因众多，必须要通过大量的数据积累、整理、分析，才能摸透、掌握河道冲淤演变规律，建议加强河道断面、支流水沙、入黄风沙等基础资料监测

工作，为深入研究河道冲淤演变规律，支撑防凌、防洪工程规划、设计提供基础支撑。

(2) 宁蒙河段治理基础薄弱、欠账多，应继续加强堤防工程和河道整治工程建设。从长远考虑，建议加快推进大柳树水库与南水北调西线工程建设，并实施“川水济黄、藏水补川”方案，利用西藏之水置换或补充其调水区所需水量，对黄河宁蒙河段及中下游河道保持久远的调水调沙功能，保证黄河长治久安的同时实现战略性水资源科学配置，解决黄河与华北地区水资源短缺问题。

## 参考文献:

- [1] 张红武,张俊华,吴腾. 基于河流动力学的黄河“粗泥沙”的界定[J]. 人民黄河,2008,30(3): 24-27.
- [2] 杨根生,拓万全,戴丰年,等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J]. 中国沙漠,2003,23(2): 152-159.
- [3] 毕慈芬. 黄土高原基岩产沙区治理对策探讨[J]. 泥沙研究,2001(4): 1-6.
- [4] 杨根生,刘阳宣,史培军. 黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J]. 科学通报,1988,33(13): 1017-1021.
- [5] 刘晓燕,侯素珍,常温花. 黄河内蒙河段主槽萎缩原因和对策[J]. 水利学报,2009,40(9): 1048-1054.
- [6] 支俊峰,李世明,邱宝冲. 黄河流域粗泥沙来源及分布研究[J]. 水土保持学报,1992,6(2): 7-12.
- [7] 韩鹏,倪晋仁. 黄河中游粗泥沙来源探析[J]. 泥沙研究,1997(3): 48-56.
- [8] 唐政洪,蔡强国,李忠武,等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2): 25-29.
- [9] 巫锡勇,朱宝龙. 重力侵蚀作用下昔格达地层滑坡特征分析[J]. 工程地质学报,2008,16(4): 450-458.
- [10] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. 中国沙漠,2014(6): 1641-1649.
- [11] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J]. 水土保持通报,2004,24(6): 1-5.
- [12] 师长兴. 近五百多年来黄河宁蒙河段泥沙沉积量的变化分析[J]. 泥沙研究,2010(5): 19-25.
- [13] 陈浩,陆中臣,李忠艳,等. 流域产沙中的地理要素临界[J]. 中国科学,2003,33(17): 1005-1012.
- [14] 陈劲锋,刘全友,陆中臣,等. 黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙的多维临界[J]. 生态学报,2007,27(8): 3277-3286.
- [15] 钱宁,张仁,赵业安,等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J]. 地理学报,1978,3(1): 13-26.
- [16] 赵业安,周文浩,费祥俊. 黄河下游河道演变基本规律[M]. 郑州: 黄河水利出版社,1998.
- [17] 韩其为. 小浪底水库淤积与下游河道冲刷的关系[J]. 人民黄河,2009(4): 1-3.
- [18] 张红武,赵业安,钟德钰,等. 黄河宁夏河段河道冲淤变化规律研究[R]. 北京: 清华大学,2000.
- [19] 廖义伟. 黄河水库群水资源化联合调度管理的若干思考[J].



- 中国水科院学报, 2004, 2(1): 1-7.
- [20] 李国英. 基于水库群联合调度和人工扰动的黄河调水调沙[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1439-1446.
- [21] 申冠卿, 张原锋, 侯素珍, 等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响[J]. 泥沙研究, 2007(1): 67-85.
- [22] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [23] 赵业安, 侯素珍, 李勇. 80年代黄河上游宁蒙河道的冲淤简况[J]. 人民黄河, 1992(4): 20-23.
- [24] 邵学军, 王光谦. 黄河上游水能开发对下游水量及河道演变影响初析[J]. 水利发电学报, 2002(1): 128-138.
- [25] 胡兴林, 畅俊杰, 赵昌瑞, 等. 利用人造洪水冲刷黄河内蒙古淤积河道的可能性分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1085-1089.
- [26] 王光谦, 李铁键. 黄河数字流域模型[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(7): 492-499.
- [27] FU G, YU J, ZHANG Y, et al. Temporal variation of wind speed in China for 1961 - 2007 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 104(4): 313-324.
- [28] LIU Q, YANG Z, CUI B, et al. The temporal trends of reference evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Yellow River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2010, 24(15): 2171-2181.
- [29] SHERMAN D J, LI B, ELLIS J T, et al. Recalibrating aeolian sand transport models [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2013, 38(2): 169 - 178.
- [30] BELLY P Y. Sand movement by wind [D]. Berkeley: Monograph University of California, 1962.
- [31] 张红武, 张欧阳, 徐向舟, 等. 黄土高原沟道侵蚀及坝系相对稳定原理与工程规划研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [32] 张红武, 徐向舟, 张欧阳, 等. 黄土高原沟道坝系模型设计方法[J]. 人民黄河, 2005, 27(12): 1-2.
- [33] 张红武, 江恩惠, 白咏梅, 等. 黄河高含沙洪水模型的相似律[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.
- [34] 张红武, 赵晨苏, 刘广全, 等. 暴雨作用下黄土侵蚀变化模型试验报告[R]. 北京: 清华大学黄河研究中心, 2015.
- [35] 惠遇甲, 胡春宏. 水流中颗粒跃移的运动学特征[J]. 水利学报, 1991, 22(12): 59-64.
- [36] 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河, 1992, 14(11): 7-9.
- [37] 李肖男, 钟德钰, 黄海, 等. 基于两相浑水模型的三维水沙数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1060-1072.
- [38] 马良, 张红武, 钟德钰. 基于制衡机制的治导线设计[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1315-1321.
- [39] 马良, 张红武, 马睿, 等. 多沙河流治导线流路方程研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 279-290.
- [40] 张红武. 弯道水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [41] 张红武. 黄河治理及区域发展需及早构建全流域水沙调控体系[J]. 黄河黄土黄种人·水与中国, 2013(2): 1-5.

(责任编辑 郭利娜)