DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0022　　文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-09

黄河宁蒙河段平滩流量的空间分布及未来预测

郭巍[1],马子普[2,3],黄海[2,3],安晨歌[2,3],李普[4],邓安军[2,3],郭庆超[2,3]

(1. 宁夏回族自治区水利工程建设中心,银川,750004; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室,北京 100048; 3. 中国水利水电科学研究院 水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室,北京 100048; 4. 华北电力大学 水利与水电工程学院, 北京 102206)

摘要: 平滩流量是表征黄河宁蒙河段过流能力的关键指标,当前对其空间分布规律及未来变化趋势的探讨仍显不足。基于1965-2020年宁蒙河段平滩流量数据,系统揭示了其时空演变规律,并利用2000-202年汛期平均流量与含沙量数据建立了滞后响应模型,预测了未来多情景下的平滩流量。结果表明:近半个世纪以来,宁蒙河段过流能力持续衰退,平滩流量由1965-1986年间的"减-增-减"沿程分布模式,转变为1987年后的"先减后增"模式,制约过流能力的瓶颈河段从石嘴山向下游迁移至巴彦高勒-三湖河口段,其中三湖河口最为显著。这一演变是水沙条件与河道边界共同作用的结果,汛期来水量大幅减少打破了原有水沙平衡,叠加20世纪末以来大规模堤防工程建设对天然河道边界的改变,共同加剧了河道淤积,平滩流量减小。2000年后,在人类活动影响下,系统进入新的相对稳定状态,平滩流量沿程变化可用三次多项式高精度拟合($R^2>0.9$)。模型预测显示,未来平滩流量按多水少沙、平水平沙、少水多沙的顺序递减;各情形下,下河沿到石嘴山均为平滩流量衰减河段,三湖河口到头道拐均为平滩流量小幅回升段。各情景下三湖河口均为关键瓶颈断面,宁蒙河道治理重点应在石嘴山及以下尤其是三湖河口,以有效提升宁蒙河段整体过流能力。

关键词: 黄河;宁蒙河段;平滩流量;空间分布;滞后响应模型

中图分类号: TV147　**文献标志码:** A

Spatial distribution and future prediction of bankfull discharge in the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River

Guo Wei[1], Ma Zipu[2,3], Huang Hai[2,3], An Chenge[2,3], Li Pu[4], Deng Anjun[2,3], Guo Qingchao[2,3]

(1. Water Conservancy Project Construction Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, 750004;
2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
3. Key Laboratory of Sediment Science and Northern River Training, the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Bankfull discharge serves as a critical metric for characterizing the flow conveyance capacity of the Ningxia - Inner Mongolia reach of the Yellow River. Nevertheless, systematic investigations into its spatial

收稿日期: 2026-01-16

作者简介: 郭巍(1988-),男,宁夏平罗人,工程师,硕士,主要从事水利工程建设管理工作。E-mail:76642994@qq.com。

通信作者: 马子普(1988-),男,河南辉县人,工程师,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail:ma.zi.pu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金项目(U2443224);宁夏回族自治区水利科技项目(NXHDZL-KY-2024-002);国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金项目(U2243237,52309093,52379068)。

本文引用格式: 郭巍,马子普,黄海,等.黄河宁蒙河段平滩流量的空间分布及未来预测[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-9.

Citation: Guo Wei, Ma Zipu, Huang Hai, et al.Spatial distribution and future prediction of bankfull discharge in the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River[J].Engineering Journal of Wuhan University,XXXX,XX(XX):1-9.

distribution patterns and future trends remain limited. Utilizing bankfull discharge data spanning 1965 - 2020 for this reach, this study systematically elucidates its spatiotemporal evolution. Furthermore, a delayed response model was developed based on average flood-season flow discharge and sediment concentration data from 2000 - 2020 to project future bankfull discharge under multiple scenarios. The results reveal a persistent decline in the flow conveyance capacity of the Ningxia - Inner Mongolia reach over the past half-century. The streamwise distribution pattern of bankfull discharge transitioned from a "decrease - increase - decrease" profile during 1965 - 1986 to a "decrease-then-increase" profile after 1987. Correspondingly, the bottleneck reach limiting flow capacity has shifted downstream from Shizuishan to the Bayangaole - Sanhuhekou section, with Sanhuhekou being the most pronounced bottleneck. This shift is attributed to the combined influence of changing water - sediment regimes and channel boundary conditions. Marked reductions in flood-season inflow disrupted the pre-existing water - sediment equilibrium, while extensive levee construction since the late 20th century altered natural channel boundaries. These factors collectively aggravated channel sedimentation and led to reduced bankfull discharge. After 2000, under intensified anthropogenic influence, the channel system attained a new state of relative dynamic equilibrium. The steamwise variation in bankfull discharge during this period can be accurately represented by a cubic polynomial ($R^2>0.9$). Model projections indicate that future bankfull discharge will decrease in the following order: high-flow - low-sediment, medium-flow - medium-sediment, and low-flow - high-sediment scenarios. Across all scenarios, the reach from Xiaheyan to Shizuishan is projected to experience declining bankfull discharge, whereas the section from Sanhuhekou to Toudaoguai may see a moderate recovery. Sanhuhekou consistently emerges as the key bottleneck section under all projected scenarios. Consequently, river management and restoration efforts in the Ningxia - Inner Mongolia reach should prioritize the reach downstream of Shizuishan, particularly the Sanhuhekou section, to effectively enhance the overall flow conveyance capacity.

Key words: Yellow River; Ningxia-Inner Mongolia reach; bankfull discharge; Spatial distribution; delayed response model

自20世纪60年代以来,受沿黄工农业用水量增大以及降水减小等因素的影响,尤其是1986年龙羊峡、刘家峡等大型水利枢纽相继投入联合调度运行后,黄河上游宁蒙河段的水沙过程发生根本性变化[1-3]。原有的水沙平衡被打破,直接导致了主河槽的持续淤积与萎缩。作为衡量主槽过流能力的核心指标,平滩流量大幅减小,已成为加剧宁蒙河段防洪防凌风险、制约排洪输沙功能的突出瓶颈[4-5]。

围绕宁蒙河段的平滩流量变化特征,不同学者开展一系列研究。不同学者在分析宁蒙河段平滩流量的历年变化过程的基础上,探究了平滩流量对水沙条件的响应特征,王莉等[6]利用BP神经网络方法分析了宁蒙河段平滩流量与下河沿站水沙条件的关系,董占地[7]拟合得到了宁蒙河段平滩流量与年来水量以及汛期水量、最大日均流量的关系,平滩流量与汛期水量正相关;赵慧明等[8]比较了宁蒙河段各站平滩流量与凌峰流量,1990年代以来随着平滩流量的大幅度降低及凌峰流量的逐步增加,二者的差值越来越小;韩小军等[9]分别拟合得到了三湖河口平滩流量与下河沿5年滑动平均汛期水量以及5年滑动平均汛期来沙系数的函数关系,平滩流量与汛期水量正相关,与来沙系数反相关;姚庆锋等[10]分别建立了宁夏河段及内蒙古河段平滩流量和水沙条件的关系,平滩流量随汛期水量的增大而增大,随汛期来沙系数的增大而减小。这些研究视角多集中于时序上的历时变化分析,或侧重于建立平滩流量与过往水沙条件之间的统计关联,而在揭示其沿程空间分布格局的演变规律、探究其对未来不同水沙情景的响应机制等方面,尚有待进一步深化与拓展。

本研究将以1965-2020年黄河宁蒙河段六个水文站点汛期水沙和平滩流量数据为基础,分析不同时期宁蒙河段平滩流量的空间分布特点,建立各站平滩流量与汛期水沙过程的函数关系,并预测未来不同情形下的平滩流量,以期为提升宁蒙河段行洪能力、保障黄河安澜与流域高质量发展贡献科技支撑。

1 研究区域、数据来源及方法

1.1 研究区域概况

黄河上游宁蒙河段，全长990.3 km，位于宁夏回族自治区和内蒙古自治区境内，其中下河沿—石嘴山河段为宁夏河段，长318.1 km，偏东转偏北流向，沿程设下河沿、青铜峡、石嘴山三个水文站。石嘴山—头道拐河段为内蒙古河段，全长672.2km，沿程设有巴彦高勒、三湖河口、头道拐等水文站。海勃湾水利枢纽位于石嘴山与巴彦高勒之间，2013年建成运用，上距石嘴山水文站50km，下距1961年建成运用的三盛公水利枢纽87km，如图1所示。

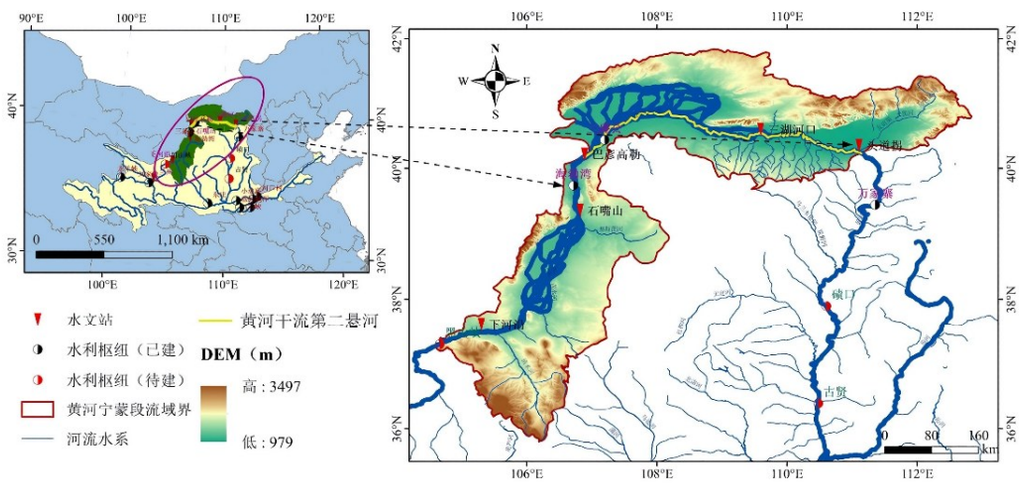


图1 黄河宁蒙河段示意图

Fig.1 Map of Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River

1.2 数据来源

黄河宁蒙河段各站点的汛期平均流量及年均含沙量的历年变化（1965-2020），见图2。图中，1986年为龙羊峡水库开始运用时间。1990-2010年，汛期平均流量处于500～1500m^3/s区间的相对稳定的低位时期。汛期平均含沙量除1996年青铜峡站有一个突然增大外，主要位于0～10kg/m^{3}区间。

黄河宁蒙河段各站点平滩流量的历年变化（1965-2020），见图3。其中，巴彦高勒站平滩流量为1991-2020年。平滩流量由1965-1990年处于较为稳定的高位波动状态，1991-2000年大幅减小，2000年后青铜峡及以下各站先是小幅减小，而后小幅增大，但总体变化不大。

1.3 研究方法

平滩流量的形成不仅与当年水沙条件有关，也受到前期水沙条件的累计影响，可采用河床演变滞后响应模型来模拟各站点来水来沙条件对平滩流量的影响[19]。基于滞后响应模型单步模式，将研究时段分为多个子时段，每年为一个子时段Δt，第i个时段末的平滩流量Q_{bi}可表示为：

$$Q_{bi}=\left(1-e^{-\beta t}\right)Q_{bei}+Q_{b,i-1}e^{-\beta t} \tag{1}$$

式中，β为的调整速率参数，β越大平滩流量调整越快，β越小平滩流量调整越慢；$Q_{b,i-1}$为上一时段末的平滩流量。$Q_{be,i}$为平滩流量在时段i的平衡值，参考文献[12]，可表示为：

$$Q_{be,i}=KQ_i^aS_i^b \tag{2}$$

式中，Q_i和S_i分别为第i年汛期平均流量（m^3/s）和汛期平均含沙量（kg/m^3），K为与来水来沙有关的系数，反映了来水来沙的综合作用。

将平衡值计算式（2）代入到平滩流量计算式（1）中，汛期平均流量、汛期平均含沙量及各站点的平滩流量为已知参数，K、a、b、β均为未知参数，通过1stopt平台编写程序进行迭代计算。当平滩流量计算值与实际值的整体误差最小时，此时的各参数值即为采纳值。

2 不同时期平滩流量的空间分布特征

点绘1965-1986年、1987-1999年、2000-2020年三个不同时期各站点的平滩流量，并对其沿程变化值进行拟合，见图4。图中，不同时期平滩流量的沿程变化均可采用三次多项式进行拟合，1965-1986年、1987-1999年决定系数$R^2>0.6$，2000-2020年决定系数$R^2>0.9$；1965-1986年、1987-1999年、2000-2020年平滩流量的数值总体上在逐渐减小；1965-

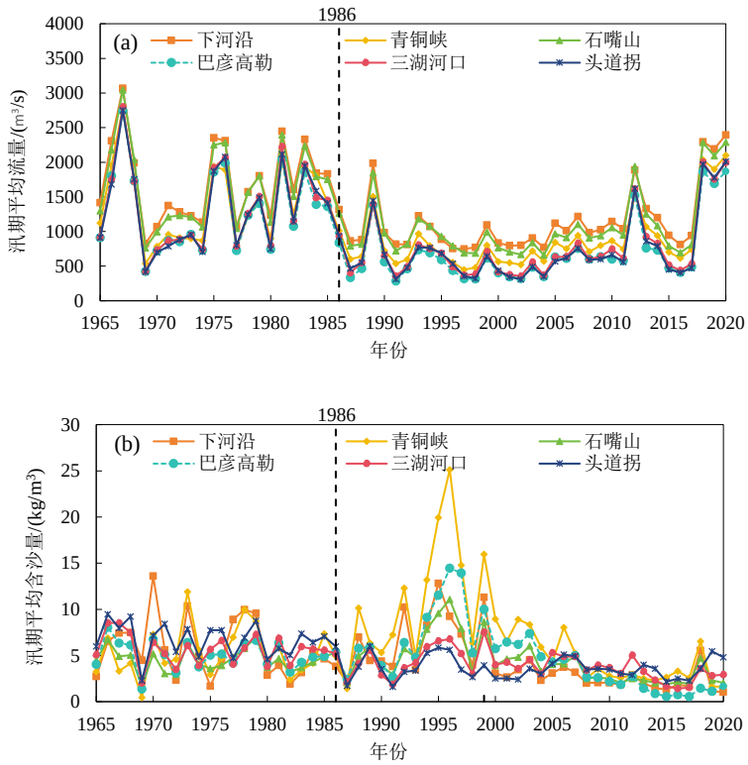


图2 各水文站汛期平均流量及平均含沙量的历年变化

Fig.2 Interannual variations in average discharge and average sediment concentration during the flood season

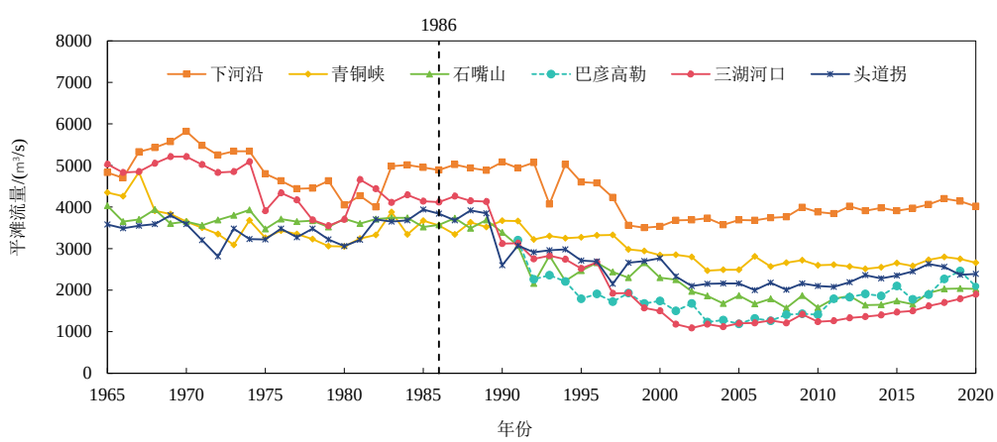


图3 各水文站平滩流量的历年变化

Fig.3 Interannual variation of bankfull discharge for each station

1986年,平滩流量具有沿程先减后增再减的趋势,平滩流量在石嘴山达到最小,而后沿程逐渐增大到三湖河口后又会逐渐减小,呈“减-增-减”沿程分布模式;1987-1999年、2000-2020年平滩流量沿程衰减后又沿程逐渐增大,呈“先减后增”沿程分布模式,最小平滩流量位于巴彦高勒到三湖河口之间,是影响过流能力的瓶颈河段。

宁蒙河段的过流能力在过去半个多世纪里持续衰退,且制约过流能力的空间瓶颈发生了从石嘴山到巴彦高勒-三湖河口河段的转移,其中三湖河口平滩流量的减小,最为突出。这些变化是来水来沙及河道边界共同影响的结果,一方面宁蒙河段进口下河沿站的来水来沙发生变化,汛期流量大幅减少,但含沙量变幅不大,使得河道更易淤积;二是宁蒙河段在20世纪末开始大量加高加宽及修改新堤防,河道缩窄改变了边界条件,加重了河道淤积。瓶颈河段的转移,意味着若要提升宁蒙河段的过流能力,治理重点应向下游内蒙古河段转移。

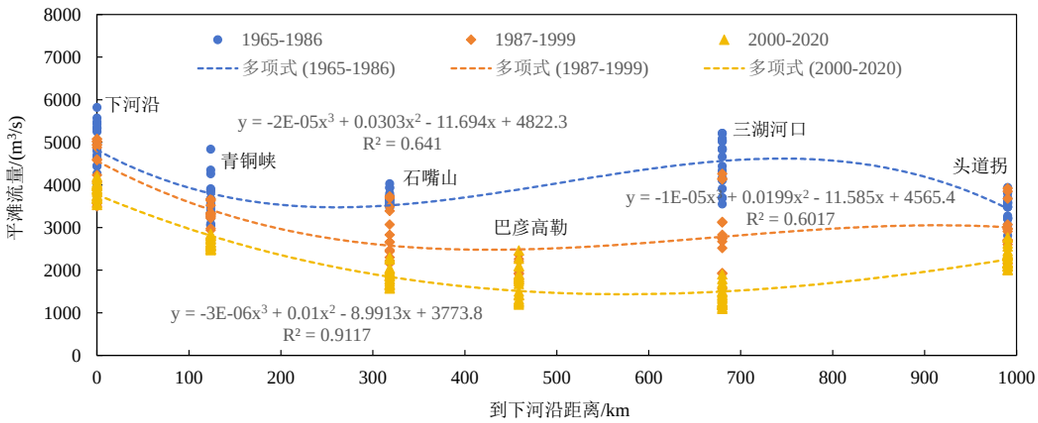


图4 不同时期平滩流量的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of bankfull discharge in different periods

2000年后,平滩流量沿程变化呈现出高度规律性的空间模式($R^2>0.9$),用三次多项式描述非常准确。这意味着受相对稳定的水沙条件及河道边界条件影响,河道形态与水动力系统在2000年后可能进入一个相对稳定的受控状态。

3 宁蒙河段平滩流量的未来预测

3.1 平滩流量的滞后响应模型

未来各站的平滩流量是在2000-2020年的平滩流量的基础上进行发展和变化的,因此以2000-2020年的平滩流量为基础对未来水沙条件下的平滩流量进行预测。

首先对2000-2020年的平滩流量进行滞后响应模拟,见图5。图中,R^2和MAPE(Mean Absolute Percent Error)分别为平滩流量计算值与实测值的决定系数和平均绝对百分比误差。

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(\widehat{Q_{bi}}-Q_{bi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{bi}-\overline{Q_{bi}})^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\widehat{Q_{bi}}-Q_{bi}}{Q_{bi}}\right|\times 100\% \tag{4}$$

式(3)、(4)中,Q_{bi}为实测值,$\widehat{Q_{bi}}$为计算值,$\overline{Q_{bi}}$为平均值,n为计算年份,n=21。

图5中,除青铜峡外,其他五个站点的平滩流量模拟结果的决定系数R^2范围(0.64~0.89)和误差率MAPE范围(1.87%~7.05%)表明,基于汛期平均水沙条件的滞后响应模型可较好地模拟宁蒙河段不同站点平滩流量的变化过程。青铜峡站平滩流量的决定系数R^2较小,是由2000年后青铜峡站平滩流量相对平稳,与水沙条件难以建立高决定系数R^2函数关系引起的,但平均相对误差率为5.29%,仍然具有相当精度。

各站点的拟合参数见表1。表1中,平均流量Q的指数a大于0,平均含沙量S的指数b大于0,说明流量与平滩流量正相关,平均含沙量与平滩流量反相关。

3.2 未来平滩滩流量的预测

筛选出2000-2020年的汛期平均流量与汛期平均含沙量的最大值、最小值,计算出各年份的平均值,见表2。以各站最大流量、最大含沙量为未来多水多沙情形下的计算条件,类似的,以最大流量、最小含沙量为多水少沙计算条件,以平均流量、平均含沙量为平水平沙计算条件,以最小流量、最大含沙量为少水多沙计算条件,以最小流量、最小含沙量为少水少沙计算条件。

针对未来各情形下的水沙条件,代入滞后响应模拟参数计算,可得到未来的平滩流量,见图6。图6中,平滩流量在多水少沙情形时最大,少水多沙情形时最小,平水平沙情形时居中。多水多沙与少水少沙情形下的平滩流量介于最大值与最小值之间。各情形下的下河沿站平滩流量整体大于下游其他站点,其大小主要介于3700~6100 m^3/s之间。三湖河口的平滩流量整体上小于其他站点,其大小主要介于900~2600m^3/s之间。

未来不同情形下平滩流量的沿程变化,见图7。图中,多水少沙时,平滩流量在下河沿处最高约6100 m^3/s,随后快速下降,在石嘴山附近趋于平稳,之后缓慢回升,至头道拐时回升至约3000 m^3/s。平水平沙时,平滩流量从下河沿的约4800 m^3/s持续下降,在巴彦高勒至三湖河口段降至最低约1000 m^3/s,之后在头道拐处略有回升到约2300 m^3/s。少水多沙时,平滩流量从下河沿的约4000 m^3/s持续

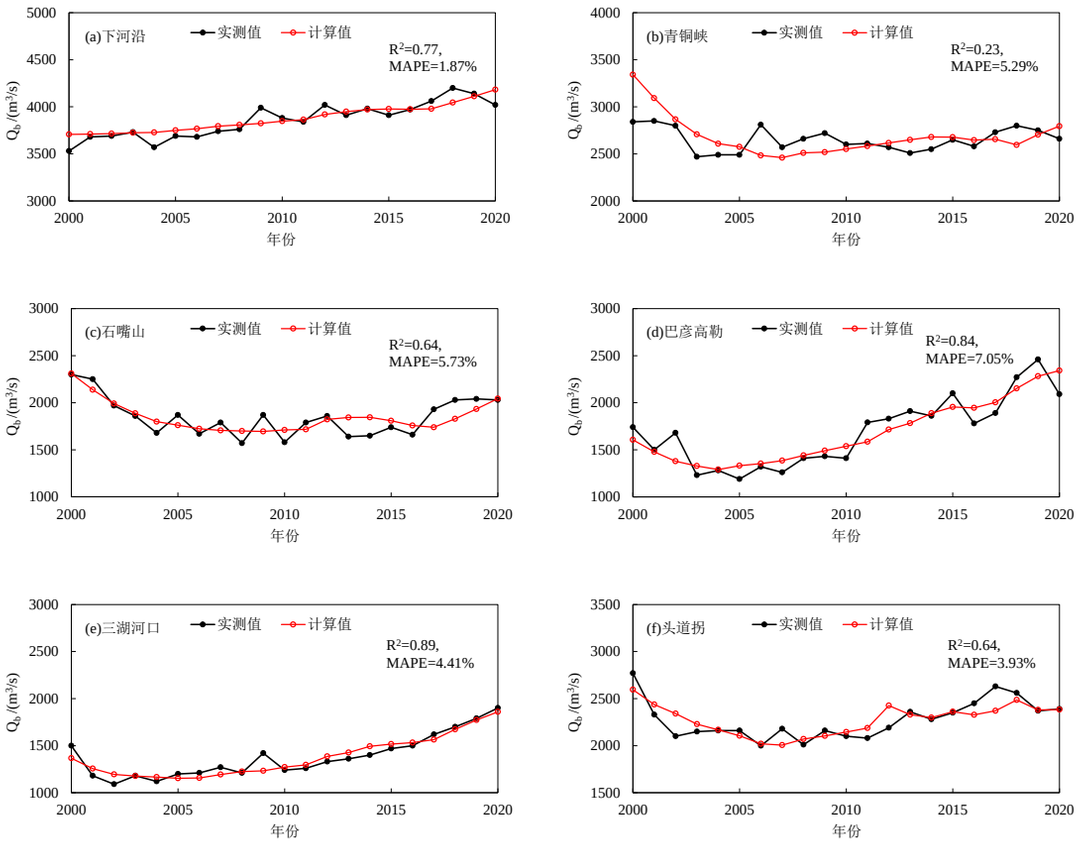


图5 各站点平滩流量的计算值与实测值的比较

Fig.5 Comparison between calculated and measured bankfull discharge values

表1 滞后响应模拟参数

Table1 Calculation parameters for the delayed responded model

站点	K	a	b	β
下河沿	248.11	0.412	−0.015	0.036
青铜峡	2227.01	0.056	−0.192	0.250
石嘴山	106.67	0.424	−0.153	0.199
巴彦高勒	295.69	0.300	−0.234	0.294
三湖河口	223.80	0.340	−0.347	0.381
头道拐	1099.48	0.178	−0.368	0.533

表2 2000-2020年的汛期平均流量与汛期平均含沙量特征值

Table2 Characteristic values of average flood-season discharge and sediment concentration from 2000 to 2020

站点	流量			含沙量		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
下河沿	2394	770	1241	5.56	1.04	2.50
青铜峡	2098	522	982	8.91	1.63	4.24
石嘴山	2289	659	1147	6.05	1.92	3.18
巴彦高勒	1869	322	787	7.39	0.56	2.97
三湖河口	2001	355	849	5.31	1.43	3.46
头道拐	2009	309	811	5.46	2.18	3.53

下降,在三湖河口处降至最低约800 m^3/s,之后在头道拐处小幅回升到约1600 m^3/s。

多水少沙时平滩流量的衰减主要在下河沿到石嘴山的宁夏河段,而平水平沙、少水多沙时平滩流量的衰减则持续至三湖河口。各情形下三湖河口到头道拐均为平滩流量的小幅回升段。多水少沙情形下,巴彦高勒站的平滩流量大于上游石嘴山与下游三湖河口站,这与平水平沙、少水多沙时完全不同,这与巴彦高勒站位于海勃湾水库下游(约87km),上游有水库拦截泥沙使其更易发生冲刷有关。

多水少沙时,平滩流量在石嘴山及三湖河口均较小,是制约宁蒙河段过流能力的瓶颈河段。平水平沙及少水多沙时期时,三湖河口的平滩流量最小,是过流能力的瓶颈河段。三湖河口在各情景下均为瓶颈,是黄河下游行洪能力的关键约束段;而石嘴山仅在多水少沙时成为瓶颈,反映出不同水沙条件下瓶颈河段的空间差异性。多水多沙及少水少沙情景下的平滩流量大小介于多水少沙与少水多沙之间。

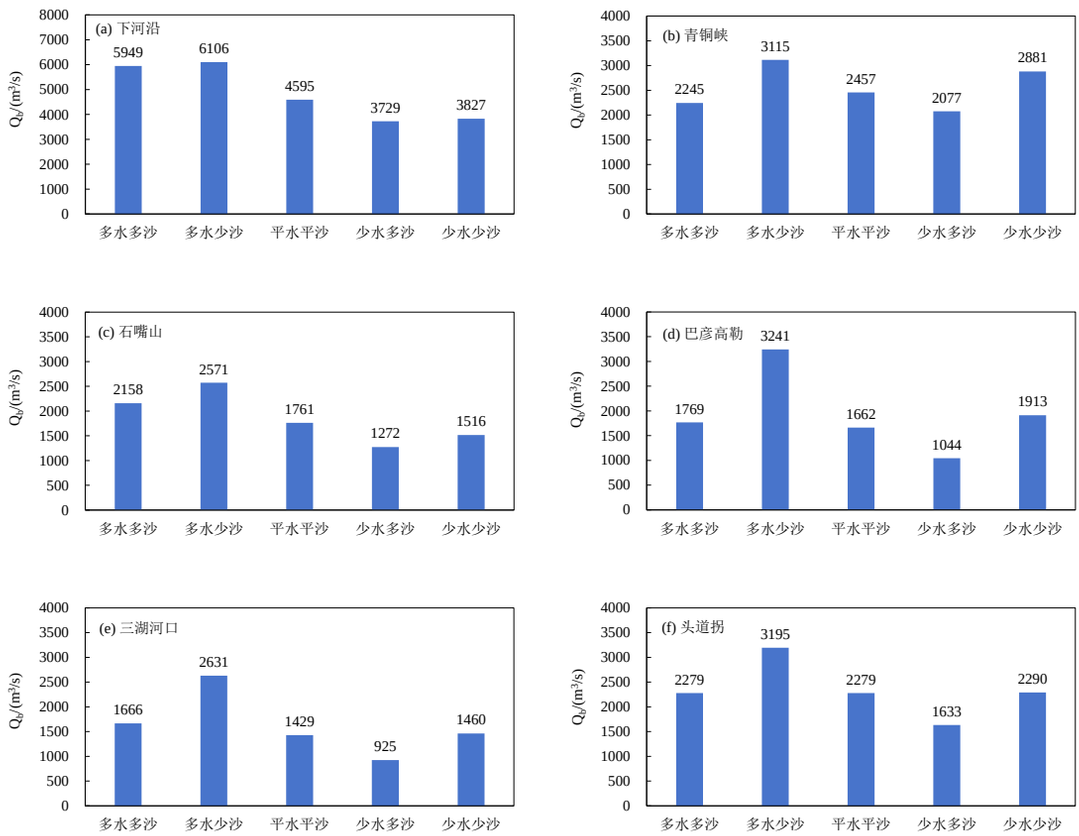


图 6　未来不同情形下各站点的平滩流量计算值

Fig.6　Calculated values of bankfull discharge at each station under different future scenarios

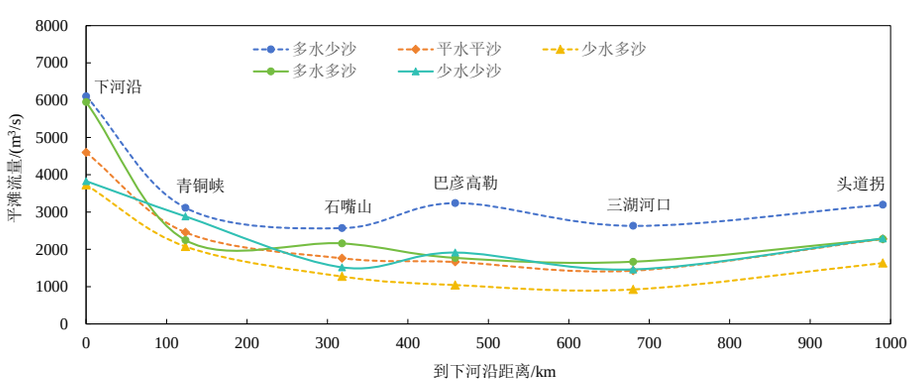


图 7　未来不同情形下平滩流量的沿程变化

Fig.7　Streamwise variation of bankfull discharge under different future scenarios

针对瓶颈河段主槽萎缩、过流能力偏低的问题,工程上宜实施局部主槽疏浚与切滩导流,疏通行洪通道,并结合生态护岸与控导工程稳定边界,减少滩岸坍塌与泥沙落淤;非工程上须利用上游龙羊峡及刘家峡水库联合调度,塑造较大流量提升水流挟沙能力增大平滩流量。

4　结论

以 1965-2020 年黄河宁蒙河段各水文站点的平滩流量为基础,分析了不同时期平滩流量的沿程变化规律,并以汛期平均流量、汛期平均含沙量作为水沙条件,建立了 2000-2020 年各站点平滩流量的滞后响应模型,预测了未来不同情形下平滩流量的大小,揭示了未来平滩流量的沿程变化规律。得出主要结论如下:

(1)近半个多世纪以来,研究河段过流能力持续衰退,平滩流量整体呈减小趋势。其沿程空间分布模式发生显著转变,由早期(1965-1986年)的"减-增-减"模式演变为1987-2020年的"先减后增"模式,导致制约过流能力的瓶颈河段从石嘴山下移至巴彦高勒-三湖河口之间,其中三湖河口断面萎缩最为突出。

(2)平滩流量的变化是水沙条件与河道边界共同作用的结果。一方面,汛期来水量大幅减少而含沙量变化不大,破坏了原有的水沙平衡,使河道更易淤积;另一方面,20世纪末开始的大规模堤防工程改变了天然河道边界,进一步加剧了淤积。2000年后,平滩流量沿程变化可用三次多项式高精度拟合($R^2>0.9$),表明系统在人类活动干预下进入了一个新的相对稳定受控状态。

(3)基于滞后响应模型的预测表明,未来平滩流量大小排序为多水少沙、平水平沙、少水多沙。各情形下,下河沿到石嘴山均为平滩流量衰减河段,三湖河口到头道拐均为平滩流量小幅回升段。各情景下三湖河口均为关键瓶颈断面,若要提升全河段过流能力,应重点关注石嘴山及以下尤其是三湖河口,以有效提升宁蒙河段整体过流能力。

参考文献:

[1] 胡春宏. 黄河流域水沙变化机理与趋势预测[M]. 北京:科学出版社, 2023.
HU Chunhong. Variation Mechanism and Trend Prediction of Water and Sediment in the Yellow River Basin [M]. Beijing: Science Press, 2023.

[2] 安催花, 鲁俊, 钱裕, 等. 黄河宁蒙河段冲淤时空分布特征与淤积原因[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 195-206.
AN Cuihua, LU Jun, QIAN Yu, et al. Spatial-temporal distribution characteristic and course of sedimentation in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 195-206.

[3] 马睿, 马良, 张罗号, 等. 黄河流域典型沙质河段冲淤量预估方法及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1277-1286.
MA Rui, MA Liang, ZHANG Luohao, et al. Prediction method for erosion and deposition on typical sandy bed sections of the Yellow River and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1277-1286.

[4] 卢书慧, 姚庆锋, 杨明, 等. 黄河宁蒙河段横断面演变特征及其与水沙过程的响应关系[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(4): 365-372.
LU Shuhui, YAO Qingfeng, YANG Ming, et al. Study on the response of the channel cross section evolution to the streamflow and sediment variations of Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(4): 365-372.

[5] 鲁俊, 程迎莹, 张华兴, 等. 黄河宁蒙河段不同粒径组泥沙洪水冲淤特性[J]. 泥沙研究, 2025, 50(6): 38-45.
LU Jun, CHENG Yingying, ZHANG Huaxing, et al. Erosion and sedimentation characteristics of grouped sediment during flood process in the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2025, 50(6): 38-45.

[6] 王莉, 陈雄波, 程冀. 宁蒙河段冲淤量和平滩流量影响因素的BP分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 38-39.
WANG Li, CHEN Xiongbo, CHENG Ji. BP analysis of influencing factors of scouring and silting amount and flat beach discharge in Ningmeng reach[J]. Yellow River, 2009, 31(11): 38-39.

[7] 董占地. 黄河上游宁蒙河段水沙变化及河道的响应[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.
DONG Zhandi. Changes of Water and Sediment and River Response in Ningmeng Reach of the Upper Yellow River[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.

[8] 赵慧明, 王崇浩, 郭庆超, 等. 基于凌情特征分析的黄河宁蒙河段中水河槽规模研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(6): 7-13.
ZHAO Huiming, WANG Chonghao, GUO Qingchao, et al. Study on the middle flood channel scale in Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River based on ice regime[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(6): 7-13.

[9] 韩小军, 卢书慧, 史红玲, 等. 黄河上游宁蒙河段平滩流量变化与水沙过程的响应关系[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(4): 361-367.
HAN Xiaojun, LU Shuhui, SHI Hongling, et al. Variation of bank-full discharge and its response relationship with flow and sediment processes of Ningmeng reach in Upper Yellow River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(4): 361-367.

[10] 姚庆锋, 卢书慧, 史红玲, 等. 宁蒙河段平滩流量变化过程及其与水沙条件的关系[J]. 泥沙研究, 2025, 50(1): 55-60.
YAO Qingfeng, LU Shuhui, SHI Hongling, et al. Variation of bank-full discharge and its relationship with flow and sediment conditions in Ningxia-Inner Mongo-

lia Reach[J]. Journal of Sediment Research, 2025, 50(1): 55-60.

[11] WU B S, WANG G Q, XIA J Q, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2008, 100(3/4): 366-376.

[12] 吴保生, 郑珊. 河床演变的滞后响应理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
WU Baosheng, ZHENG Shan. Delayed Response Theory and Applications for Fluvial Processes[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.