

# 黄河宁蒙河段典型断面河相关系研究

张 琴 宋天华

宁夏回族自治区大柳树水利枢纽工程前期工作中心 宁夏 银川 750001

**摘 要:**采用黄河宁夏-内蒙古河段内的水沙资料及区间内大断面实测资料,对下河沿、青铜峡、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、头道拐六个典型断面的平滩河槽断面面积、河相系数进行了统计分析,并依据典型断面的断面水力特性计算结果,分析了各断面挟沙力因子和阻力因子随流量的变化关系,进而给出了宁蒙河段各站不同年份的最大输沙流量和最小阻力流量,从而为黄河上游调水调沙及河道治理提供依据。

**关键词:**宁蒙河段;河相系数;断面水力特性;临界调控流量

黄河宁夏至内蒙古河段(黄河宁蒙河段)位于黄河上游的下段,其先后流经宁夏(下河沿至石嘴山河段)和内蒙古(石嘴山至头道拐河段)。干流自宁夏中卫县长滩翠柳沟入境,至内蒙古伊克昭盟准格尔旗马栅乡出境,全长大约1203 km。其河道平面形状呈∩型大弯曲,宁夏境内有清水河、苦水河及红柳沟等支流汇入;内蒙古境内穿越库布齐沙漠,内有毛不拉、布色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉、木哈河、东柳沟、呼斯太沟“十大孔兑(支流)”汇入。

黄河宁蒙河段位于黄河上游的下段,其径流主要来自上游兰州以上的吉迈—唐乃亥和循化—兰州区间,沙量主要来源于沿岸各支流的入汇,水沙异源<sup>[1]</sup>。近几十年来,随着黄河上游龙羊峡、刘家峡、青铜峡等大型水利枢纽相继建成运用和沿岸生产生活用水的急剧增加,河道原有的水沙平衡被打破,水沙输移已成为人类活动深度干预下的非常复杂的非平衡动力过程<sup>[2]</sup>。由于该河段流经沙漠边缘,支流入汇导致含沙量剧增,加上汛期来水量减少,使得河床淤积抬高,河身逐渐由窄深变得宽浅,河道内洲滩叠出,比降变缓<sup>[3-5]</sup>,排洪输沙功能逐渐减弱。各方面问题随之显露,主要表现在以下几个方面:宁蒙河段水沙条件发生了较大变化,水沙关系恶化;河道严重淤积,平滩流量减小;宁蒙河段防洪、防凌问题突出;宁蒙支流泥沙淤堵黄河严重;河道治理现状难以满足防灾要求等。在此情形下,许多学者对于该河段排洪输沙功能的修复做了大量研究<sup>[6-10]</sup>,主要内容涉及临界水沙关系的搭配、河槽塑造有效水量的确定等方面,试图从调水调沙和流域水资源开发的角度恢复宁蒙黄河的排洪输沙功能。基于此背景,利用黄河宁蒙水沙实测资料和大断面实测资料,分析河道断面演变特点及变化规律,给出有利于刷槽淤滩的水沙调控临界条件,对实现宁蒙黄河整治目标具有重要意义。

## 1 宁蒙河段自然概况

黄河宁蒙河段西部有腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和贺兰山,来源于沙漠的粗颗粒风沙是河道沉积物的重要来源,其中内蒙古河段河道沉积物中风积沙约占60%<sup>[11]</sup>。宁蒙河段(头道拐测站1952-2007)多年平均年径流量为

214.97 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,多年平均年输沙量为1.05 × 10<sup>8</sup> t<sup>[12]</sup>。天然情况下,宁蒙河段表现为微淤。近30年来,在全球气候变化和上游水库调蓄的双重影响下,宁蒙河段河道排洪能力下降、河槽萎缩,部分河段呈现“地上悬河”的态势,使得黄河宁蒙河段成为黄河上游河道中水沙变化及河床演变最为复杂,河道淤积最为严重、洪凌灾害最为频繁河段。本文研究的重点为黄河上游下河沿~头道拐河段。区域河段平面形态如图1所示。



图1 黄河宁蒙河段示意图

由图1可知,区间沿程自上而下有7个水文站,根据不同河道的河床演变特性,将宁蒙河段划分为若干子河段,各子河段的主要特征参数见表1。

表1 黄河宁夏~内蒙古河段河道特性参数表

序号	地区	河段	河长 (km)	比降 (%)	平均河宽 (m)	主槽宽 (m)	平均弯曲率
1	宁夏	翠柳沟~下河沿	61.5	0.87	200	200	1.8
2		下河沿~枣园	75.1	0.80	554	554	1.16
3		枣园~青铜峡	45.2	-	400~4000	-	1.1
4		青铜峡~石嘴山	196.4	0.32	1130~3294	597~1325	1.2
5	内蒙古	石嘴山~巴彦高勒	142.3	0.56	400	400	1.50
6		巴彦高勒~三湖河口	221.1	0.17	3500	750	1.28

续表:

序号	地区	河段	河长 (km)	比降 (%)	平均河宽 (m)	主槽宽 (m)	平均弯曲率
7		三湖河口~昭君坟	126.4	0.12	4000	710	1.45
8	内蒙古	昭君坟~头道拐	184.1	0.10	上段3000 下段2000	600	1.42
9		头道拐~马栅乡	150.9	-	-	-	-
合计			1203	-	-	-	-

## 2 宁蒙河道平滩河槽特征变化

平滩流量是指水流恰好充满主槽横断面, 开始向上方空间发展时的流量, 标志着洪水的发生, 对于河流横断面的形状和大小的发展具有重要意义<sup>[13]</sup>。平滩流量是反映冲积河流河道形态的重要参数, 由于平滩水位相应的水流流速大, 输沙能力高, 造床作用强, 它也是反映水流造床能力和河道排洪输沙能力的重要指标<sup>[14]</sup>。同时, 平滩流量的变化规律是河床演变规律的一个重要体现<sup>[15]</sup>。平滩流量对应的河槽即为平滩河槽。平滩河槽亦或称为主槽是河流排洪排凌的主要通道, 也是河道主槽塑造到滩地塑造的转折点, 对于河床演变具有重要意义。

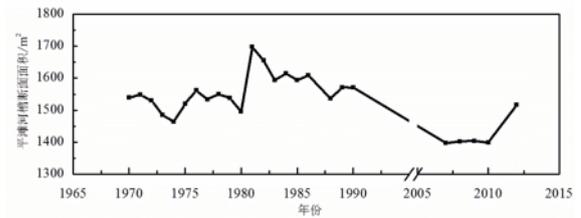
近年随着黄河上游的降雨量减少、水利工程的投入使用、工农业的用水量增加和水土保持的减水减沙作用等, 使得进入宁蒙河段的水沙条件发生了较大变化。由于上游来水流量 $Q$ 、沙量 $G_s$ 不断变化, 进而引起河宽 $B$ 、水深 $H$ 、平均流速 $v$ 、能坡 $J$ 和河床糙率 $n$ 的相应调整。整体来看, 该河段断面调整可分为三个时期: 1968年以前, 1969~1986年(刘家峡单库运用时期), 1987~至今(龙、刘水库联合运用时期)。

### 2.1 平滩河槽断面面积变化规律

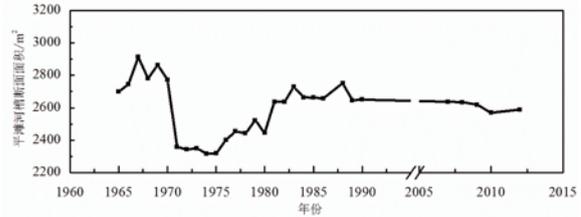
图2为黄河宁蒙河段六个典型断面1965~2012年平滩河槽断面面积历史变化规律图。由图2可知: 下河沿、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口具有大致相同的变化规律, 有资料以来至1982年平滩河槽断面面积均变化不大, 呈现小幅波动的总体态势; 其中1967年洪水使石嘴山、三湖河口(下河沿、巴彦高勒缺失1966及1967年断面形态数据)平滩河槽断面面积增加, 但增幅均较小; 1981年大洪水使各断面平滩河槽断面面积突增, 并在1982年回淤减小。各断面1982年回淤后平滩断面面积均与1981年前持平。2000年后各断面均发生强烈的萎缩, 平滩河槽断面面积降至历史最低。2012年大洪水后, 河槽经过冲刷, 平滩河槽断面面积均增大, 接近历史均值。

青铜峡断面1970~1971年发生重大变化, 导致平滩河槽断面面积减小。青铜峡测验断面位于青铜峡坝下, 地质条件佳。1971年后, 平滩河槽断面面积基本保持不变。头道拐断面平滩河槽的断面面积变化规律与其他断面不同, 断面面积

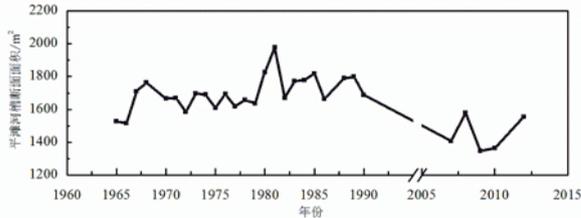
变化较剧烈, 可能是由于其上游十大孔兑入汇的影响。2012年洪水期间头道拐断面平滩河槽断面面积有所增大。



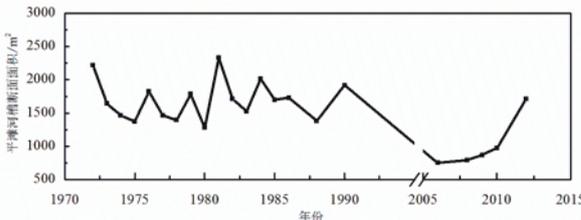
(a) 黄河宁夏下河沿断面平滩河槽断面面积变化



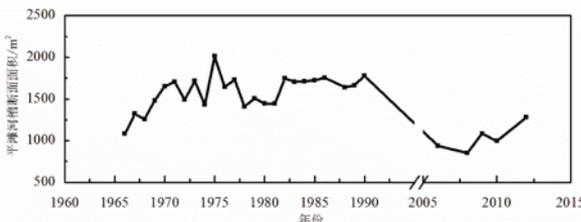
(b) 黄河宁夏青铜峡断面平滩河槽断面面积变化



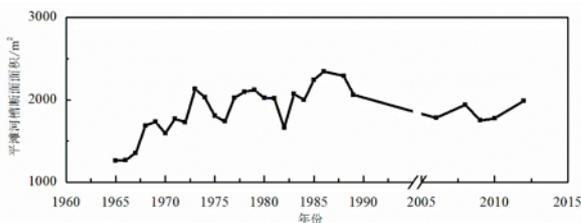
(c) 黄河宁夏石嘴山断面平滩河槽断面面积变化



(d) 黄河内蒙古巴彦高勒断面平滩河槽断面面积变化



(e) 黄河内蒙古三湖河口断面平滩河槽断面面积变化



(f) 黄河内蒙古头道拐断面平滩河槽断面面积变化

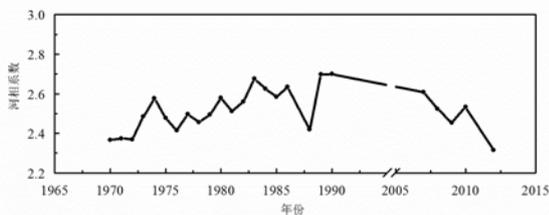
图2 黄河宁蒙河段典型断面平滩河槽断面面积变化过程

## 2.2 平滩河槽河相关系变化规律

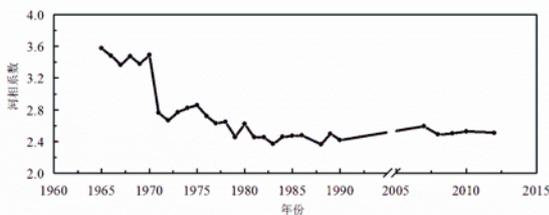
能够自由发展的冲积平原河流,在挟沙水流的长期作用下,经过河流的自动调整作用,河床形态有可能处于相对平衡状态。在这种相对平衡状态下,河道的水力要素、水沙条件以及河床周界因素间存在着某种函数关系,这种函数关系称为河相关系。河相关系一般应包括横断面河相关系、纵剖面河相关系及平面河相关系<sup>[16]</sup>,本次只重点讨论第一类河相关系问题。我国常用的断面河相关系式一般是前苏联格鲁什科夫提出的宽深比经验关系式<sup>[17]</sup>: $\xi = \sqrt{B/h}$ 。式中, $\xi$ 为河相系数;B为对应于平滩流量的平均河宽,m;h为对应于平滩流量的水深,m。

图3反映了黄河宁夏河段1965~2012年六个断面的断面河相参数的历史变化规律。从图中可以看出,各断面河相系数变化均不大。总体而言,下河沿、青铜峡断面河相系数较小,约为2.3~3.5,断面最为窄深;巴彦高勒、三湖河口断面河相系数较大,约为4.6~12.7,断面趋向宽浅;石嘴山、头道拐断面河相系数居中,约为3.7~8.4。

下河沿、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口断面河相系数变化规律基本一致,即先增大后减小,至2012年几乎达到历史最低值,断面形态呈现出相对窄深—相对宽浅—相对窄深的变化规律。青铜峡断面河相系数总体变化趋势为逐年减小,断面发展趋向窄深,头道拐断面与前者相反,河道断面形态发展趋向宽浅。1967年洪水以及1981年洪水,各断面的河相系数变化不大。2012年洪水后,除头道拐断面外,各断面均形成相对窄深河槽,河相系数为历史最小。



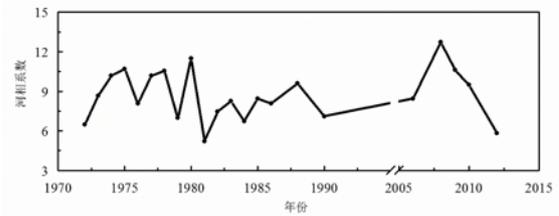
(a) 黄河宁夏下河沿断面河相系数变化



(b) 黄河宁夏青铜峡断面河相系数变化



(c) 黄河宁夏石嘴山断面河相系数变化



(d) 黄河内蒙古巴彦高勒断面河相参数变化



(e) 黄河内蒙古三湖河口断面河相系数变化



(f) 黄河内蒙古头道拐断面河相系数变化

图3 黄河宁夏河段典型断面平滩河槽河相关系变化过程

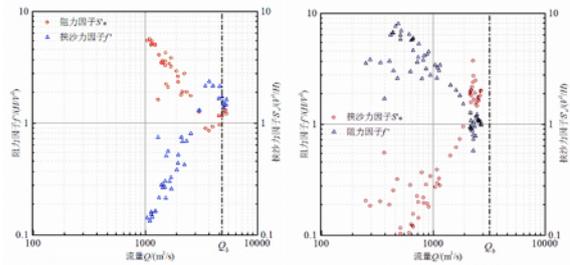
## 3 宁蒙河段的断面水力特征

影响河道输沙能力及冲淤造床特性的水沙条件三大要素中,流量是最主要要素。故研究清楚各断面水流阻力、挟沙力因子随流量的变化规律,是水库运用和河段治理研究的重要基础。这些水力因子的变化规律受到边界条件的影响,表现在不同断面及年代,这些关系程度不同地差异。边界条件主要包括河段纵比降、局部阻力、床沙组成及横断面形态,前二者比较稳定,横断面形态主要反映槽宽沿高程之变化。

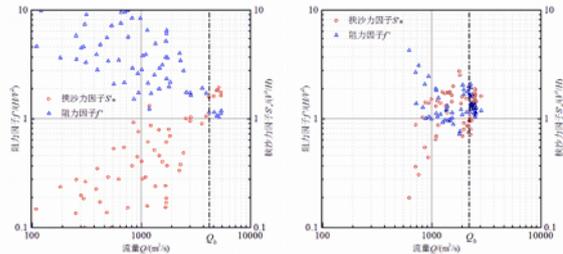
以往常将均衡河流不同河段纵横剖面四要素(J、B、H、V)随造床流量之变化规律称为沿程河相关系,将某一断面水力因子随流量之变化规律称为断面河相关系或水力几何形态。从Leopold等开始,多将沿程及断面河相关系以下式表达<sup>[18]</sup>: $I(B,H,V) = \alpha_1 Q^{\beta_1}$ 。式中, $Q = VBH$ 决定, $\alpha_B \cdot \alpha_H \cdot \alpha_V = 1$ , $\beta_B + \beta_H + \beta_V = 1$ 。以往在断面水力因子关系研究中,一般皆得出(2)式中 $\beta_1$ 不随流量变化而为常数,仅随断面而变。即 $\lg I \sim \lg Q$ 双对数坐标中为一根直线,这样主要用于分析宽深比变化,不能很好反映水流动床阻力在各阶段不同的阻力变化规律。英国剑桥大学理查兹(Richards)于1973年分析了英美等国多条河流典型断面的水力几何形态<sup>[19]</sup>,发现 $\beta_1$ 随流量皆呈非线性变化,同时理查兹将断面水力因子变化与床面形态、水流动床阻力变化及泥沙输移相联系。王士强等<sup>[20]</sup>采用该方法分析了黄河下游典型断面的水力因子随流量的变化规律。

借鉴前人的研究方法, 本文根据黄河宁蒙河段6个主要水文站的断面水力因子(流速 $V$ 、水深 $H$ 及水面宽 $B$ )随流量 $Q$ 变化规律得出了水流阻力系数 $f' (= H/V^2)$ 及挟沙力因子 $S'_* (= V^3/H)$ 随流量之变化规律, 进而得出了各断面最小阻力系数 $f'_{min}$  (或 $n_{min}$ )与最大挟沙力因子 $S'_{*max}$ 及相应流量 $Q_{fmin}$  (或 $Q_{nmin}$ )与 $Q_{smax}$ 之变化规律。

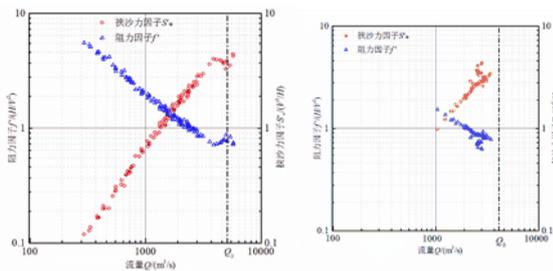
图4为六个典型断面1981年、2012年断面的水流阻力因子 $f'$ 、挟沙力因子 $S'_*$ 随流量的变化规律(左图为1981年, 右图为2012年)。由图可知, 除头道拐2012断面外, 其余各断面均基本呈现出挟沙力因子随流量的增大而增大, 水流阻力因子 $f'$ 随流量的增大而减小的总体趋势, 这与我们的基本认知是一致的。众所周知, 在天然河流中, 随着流量的增大, 水流强度也随之增大, 水流挟沙力与水流强度正相关, 故水流挟沙力 $S'_*$ 因子随流量增大而增大。根据地貌特征, 黄河宁蒙河段属于典型的冲积性河流<sup>[21]</sup>, 在平原冲积性河流中, 河道宽浅, 水流阻力主要受床面沙波形态影响(床面阻力为主, 即床面糙率大于边壁糙率), 随着流量的增大, 边壁所占比例增加, 水流阻力减小, 而水流阻力因子是表征水流阻力的一个参数, 故水流阻力因子 $f'$ 减小。



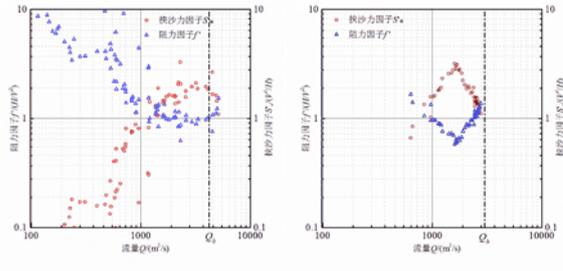
(d) 黄河内蒙古巴彦高勒断面 $f' \sim Q$ 、 $f' \sim Q$ 变化规律(其中 $Q_b$ 为平滩流量)



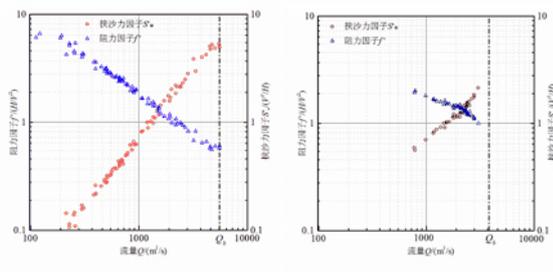
(e) 黄河内蒙古三湖河口断面 $f' \sim Q$ 、 $f' \sim Q$ 变化规律(其中 $Q_b$ 为平滩流量)



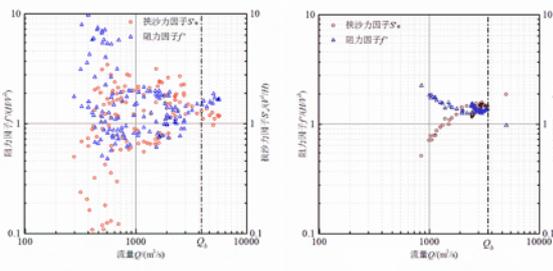
(a) 黄河宁夏青铜峡断面 $f' \sim Q$ 、 $f' \sim Q$ 变化规律(其中 $Q_b$ 为平滩流量)



(f) 黄河内蒙古头道拐断面 $f' \sim Q$ 、 $f' \sim Q$ 变化规律(其中 $Q_b$ 为平滩流量)



(b) 黄河宁夏青铜峡断面 $f' \sim Q$ 、 $f' \sim Q$ 变化规律(其中 $Q_b$ 为平滩流量)



(c) 黄河宁夏石嘴山断面 $f' \sim Q$ 、 $f' \sim Q$ 变化规律(其中 $Q_b$ 为平滩流量)

图4 黄河宁蒙河段典型断面水力几何关系变化过程

另外, 从图中还可以发现, 在12组数据中, 一般情况下最大输沙因子对应流量 $Q_{smax}$ 和最小阻力因子对应的流量 $Q_{fmin}$ 均接近于水槽的平滩流量 $Q_b$ 。其中2012年头道拐断面 $Q_{smax}$ 与 $Q_b$ 的偏差则是因为在老滩和嫩滩之间出现了明显的新一级滩地, 当水流漫上这一级滩地时, 水流阻力迅速增加, 挟沙能力迅速下降。

根据对水文站断面资料和实测洪水水文要素资料的分析, 可以得出黄河宁蒙河段各站不同年份的最大输沙流量、最小阻力流量和平滩流量, 具体情况如表2所示, 其中最大输沙流量和最小阻力流量基本一致, 平滩流量基本略大于最大输沙流量和最小阻力流量。根据表2, 从全河段来看, 建议流量应以维持头道拐断面 $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行全河段的分配与调控。

表2 黄河宁蒙河段典型断面特征流量统计值( $\text{m}^3/\text{s}$ )

年份		下河沿	青铜峡	石嘴山	巴彦高勒	三湖河口	头道拐
1981	最大输沙流量	5020	4530	2000	3730	5170	3210
	最小阻力流量	4980	4500	2000	3700	5100	3200

续表:

年份		下河沿	青铜峡	石嘴山	巴彦高勒	三湖河口	头道拐
1981	平滩流量	5080	5550	3900	4840	4200	4200
2012	最大输沙流量	3400	3050	2200	2200	1800	1800
	最小阻力流量	3400	3000	2000	2200	1700	1600
	平滩流量	4120	3820	3420	3200	2200	3000

#### 4 结论

(1) 黄河宁蒙河段在上世界70~90年代这20年间, 各断面平滩河槽断面面积变化不大。1990年后, 由于来水减小、水沙条件恶化, 为了适应水沙条件的变化, 河段断面发生调整, 各断面河槽均发生严重萎缩, 平滩河槽断面面积明显减小。断面河相系数较断面面积变化更加剧烈, 但在90年代之前各断面(除三湖河口断面)同样没有明显增大或减小的趋势。1990年后, 除头道拐断面以外, 其他断面的河相系数均表现为波动减小的趋势, 河道断面形态向窄深方向发展。特别是2012年洪水后, 各个断面的平滩河槽断面面积均表现为显著增加, 断面河相系数明显减小, 说明大洪水对于平滩河槽的重新塑造、主河槽过流能力的恢复具有明显的积极意义。(2) 通过分析黄河宁蒙河段各断面水流阻力因子和挟沙力因子随流量的变化规律, 可以发现宁蒙河段各断面基本遵循水流挟沙能力随流量的增大而增大, 水流阻力随流量的增大而减小, 并在平滩流量时分别达到极值的规律。这一现象说明黄河下游宁蒙河段受人为干预较小, 河槽处于自由调整状态。而头道拐断面在近期出现了 $Q_{smax}$ 与 $Q_b$ 偏差的现象, 则是因为在老滩和嫩滩之间出现了明显的新一级滩地, 当水流漫上这一级滩地时, 水流阻力迅速增加, 挟沙能力迅速下降。根据断面水沙因子的计算结果, 黄河宁蒙河段调控流量应控制在1800~2000m<sup>3</sup>/s(对应于最小阻力流量及最大输沙流量)之间, 此时河道阻力较小, 水流输沙能力强, 有利于河道主槽的塑造及河道的健康发展。

#### 参考文献:

[1]凌虹霞,王新军,王永强,等.黄河宁夏段水沙变化特点及临界来沙系数研究[J].人民黄河,2015,37(2):19-23.  
[2]王新军,张红武,钟德钰,等.黄河上游水沙调控的关键科学问题与研究重点[J].人民黄河,2015,37(3):8-11.  
[3]张立,孙东坡,杨真真,等.黄河内蒙古河段河床横断面调整分析[J].人民黄河,2010, 32(10):34-35.  
[4]李秋艳,蔡强国,方海燕.黄河宁蒙河段河道演变过程及影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):68-73.  
[5]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,2014,34(6):1641-1649.

[6]刘晓燕,侯素珍,常温花.黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策[J].水利学报,2009,40(9).  
[7]张红武,钟德钰,卜海磊,等.黄河内蒙古河段河道整治与防洪模型试验及数模计算[R].清华大学,2009.  
[8]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):67-75.  
[9]钟德钰,王永强,李肖男,等.水沙过程对宁蒙河段排洪输沙功能修复的作用研究[R].清华大学,2016.  
[10]WANG, Yanjun, Baosheng, et al. Calculation method for sediment load in flood and non-flood seasons in the Inner Mongolia reach of the Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(6):707-721.  
[11]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.  
[12]Fan X, Shi C, Zhou Y, et al. Sediment rating curves in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River and their implications[J]. Quaternary International, 2012, 282(282):152-162.  
[13]Williams G P. The Bank-Full Discharge of Rivers[J]. Water Resources Research, 1978, 14(6):1141-1154.  
[14]KNIGHTON D.Fluvial forms and processes[M].New York: John Wiley & Sons, 1996: 97-150.  
[15]Wu B, Wang G, Xia J, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River[J]. Geomorphology,2008,100(3):366-376.  
[16]明宗富.冲积河流的河相关系[J].泥沙研究,1983,(4):77-86.  
[17]武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室,河流泥沙工程学,上册[M].水利出版社,1981,(9).  
[18]Leopold L B, Maddock T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. US Government Printing Office, 1953.  
[19]Richards, K.S., Hydraulic Geometry and Channel Roughness-A Non-Li near System, Amer. J.Sci., Vol. 273, No. 10, 1973.  
[20]王士强,钟德钰,刘金梅.小浪底水库减淤运用方式及有关问题研讨[R].北京:清华大学,2016.  
[21]赵业安,张红武,温善章.论黄河大柳树水利枢纽工程的战略地位与作用[J].人民黄河,2002,24(2):1-4.