

文章编号: 2097-096X(2025)-04-0365-08

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

卢书慧¹, 姚庆锋², 杨 明³, 史红玲⁴, 王惠敏², 张治昊⁴

(1. 山东黄河河务局黄河河口管理局, 山东 东营 257091; 2. 滨州市引黄灌溉服务中心, 山东 滨州 256600;

3. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 河道横断面形态是河道排洪输沙能力的主要影响因素, 开展宁蒙河段横断面演变机理研究对于黄河治理意义重大。本文采用实测资料分析的方法, 建立了黄河宁蒙河段横断面演变特征与水沙过程的响应关系。研究结果表明: 1986 年黄河上游龙羊峡和刘家峡水库联合调控运用后, 宁蒙河段水量有所减小, 沙量大幅度减小, 洪峰流量削减严重; 同时期, 宁蒙河段平滩河宽缩窄, 平滩水深变浅, 平滩面积减小, 平滩宽深比增大。建立的宁蒙河段横断面演变和水沙过程的响应关系表明, 宁蒙河段平滩面积随汛期水量的增大而增大, 随汛期来沙系数的增大而减小, 平滩宽深比随汛期水量的增大而减小, 随汛期来沙系数的增大而增大; 由河床演变原理可知, 汛期水量大、来沙系数小, 则水沙过程有利泥沙输移, 河道平滩面积增大, 河道平滩宽深比减小, 横断面形态朝着窄深方向调整; 汛期水量小、来沙系数大, 则水沙过程不利于泥沙输移, 河道平滩面积减小, 河道平滩宽深比增大, 横断面形态朝着宽浅方向调整。

关键词: 黄河上游; 宁蒙河段; 水沙过程; 横断面形态; 河道演变; 响应关系

中图分类号: TV141

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240082

1 研究背景

1960 年代以来, 随着黄河干流水库建设运用和人类活动的加剧, 特别是受 1986 年刘家峡和龙羊峡水库的联合调控运行、宁蒙地区沿黄工农业用水量增大以及天然降雨量减小等因素的综合影响, 进入黄河上游宁蒙河段的水沙过程发生了显著变化, 历年水沙量大幅度减少, 水沙关系也不尽合理, 汛期洪峰流量与洪水频率明显降低, 宁蒙河段淤积萎缩严重, 平滩流量减小, 排洪输沙能力降低, 防洪防凌受到极大威胁^[1]。宁蒙河段防洪防凌形势的日益严峻, 引起了学者们的高度关注。苏晓慧等^[2]分析了宁蒙河段水沙变化特征, 安催花等^[3]探讨了宁蒙河段冲淤时空分布机理, 韩小军等^[4]研究了宁蒙河段平滩流量变化及其与水沙过程的响应关系, 纵观众多研究成果, 宁蒙河段横断面演变的研究较为鲜见, 横断面形态是河道排洪输沙能力的主要影响因素, 其演变过程是对水沙条件变化的自适应过程, 可以从侧面反映出河道冲淤演变过程, 所以, 研究宁蒙河段横断面形态演变过程, 探求宁蒙河段横断面形态演变与水沙条件的响应关系, 有助于制定黄河上游水利枢纽工程联合调控运行的具体方案, 有利于提出适宜的宁蒙河段治理措施, 对于维护黄河宁蒙河段健康生命至关重要。本文首先厘清了黄河宁蒙河段水沙变化过程, 分析了黄河宁蒙河段横断面形态演变特征, 在此基础上, 揭示了黄河宁蒙河段横断面形态演变与水沙过程的内在联系, 建立了黄河宁蒙河段横断面形态演变与汛期水沙过程的定量关系, 试图为黄河流域高质量发展提供有力的科技支撑。

2 研究区域概况

黄河上游是指从河源至内蒙古托克托县河口镇(头道拐)河段, 跨越了青藏高原和内蒙古高原, 河道

收稿日期: 2024-05-20; 网络首发时间: 2024-09-27

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20240926.0941.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20237); 黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2024-14)

作者简介: 卢书慧(1983-), 高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 844581702@qq.com

通信作者: 姚庆锋(1980-), 高级工程师, 主要从事水保泥沙研究。E-mail: 2857406629@qq.com

长 3472 km, 约占全河长 5468 km 的 63.5%; 水面落差 3496 m, 约占全河水面落差 4482 m 的 78.0%; 控制流域面积 38.6 万 km², 约占全河流域面积 75.2 万 km² 的 51.3%, 河道平均比降 1‰。宁夏回族自治区境内的下河沿以上为黄河上游的上段; 下河沿至头道拐为黄河上游的下段, 又称宁蒙河段, 全长 990.3 km, 其中, 位于宁夏回族自治区境内的为宁夏河段, 位于内蒙古自治区境内为内蒙河段, 如图 1 所示。宁夏河段自下河沿入境, 至石嘴山全长 318.1 km, 偏东转偏北流向, 跨北纬 37°17′至 39°23′。该河段较大的支流有清水河、红柳沟等 4 条河流, 较大的引水渠有七星渠、汉渠等 4 条渠道, 排水沟有清水沟、第一排水沟等 6 条排水沟^[5]。该河段下河沿—青铜峡河长 123.5 km, 河道迂回曲折, 河床由粗沙

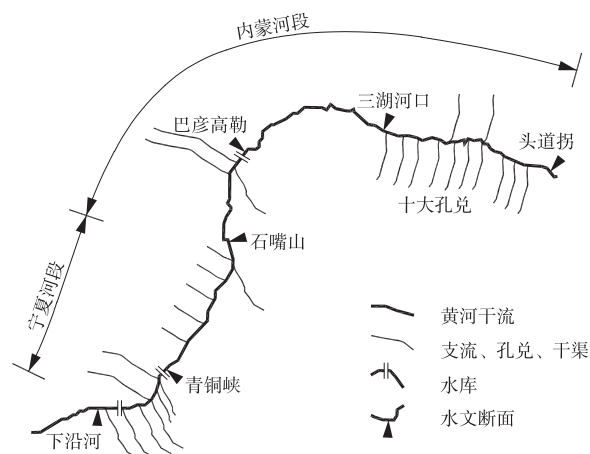


图 1 黄河上游宁蒙河段示意图

Fig.1 Schematic drawing of Ning-meng Reach in the Upper Yellow River

卵石组成, 并以卵石为主, 河心滩较多, 河宽 0.2~3.3 km, 比降 0.8‰~0.9‰; 青铜峡—石嘴山河长 194.6 km, 河宽 1.0~6.0 km, 比降 0.1‰~0.2‰, 砂质河床, 河道支汊横生, 河心滩星罗棋布, 主流摆动较大。内蒙河段地处黄河流域最北端, 介于东经 106°10′—112°50′、北纬 37°35′—41°50′之间。从石嘴山入境至磴口河道流向大致是西南流向东北, 磴口至包头基本自西向东, 包头至清水河县喇嘛湾由西北流向东南, 以下至出境基本自北向南。由于上游流经黄土高原及沙漠边缘, 河水含沙量剧增, 致使河床落淤抬升, 河身逐渐由窄深变为宽浅, 河道中浅滩湾道叠出, 坡度变缓。该河段自解放以来陆续地增设引黄渠道, 并修建水利枢纽, 逐渐合并形成三大主引黄干渠; 该河段支流主要有十大孔兑和昆都仑河、五当沟两条支流。十大孔兑位于黄河河套内, 发源于鄂尔多斯台地, 它们流向都是由南向北, 流经库布齐沙带, 横穿下游冲积平原后泄入黄河^[6]。该河段石嘴山—三盛公河长 140.6 km, 上段为峡谷, 下段为三盛公水利枢纽, 已形成相对稳定的砂质河床, 河道冲淤基本平衡; 三盛公—头道拐河段为冲积性河道, 长约 531.6 km, 河床宽阔, 河势游荡摆动。

3 宁蒙河段水沙变化过程

1986 年黄河上游龙羊峡水库建成后, 与刘家峡水库联合调控运用, 对进入黄河上游宁蒙河段的水沙过程影响较大, 以 1986 年为分界点, 将 1965—2020 年宁蒙河段来水来沙过程分为 I、II 两个时段, 其中, 1965—1985 年为 I 时段, 1986—2020 年为 II 时段, 以 I 时段水沙数据为基准, 用 II 时段水沙数据进行对比, 分析黄河上游宁蒙河段水沙过程变化特征^[7]。下河沿断面为宁蒙河段进口控制断面, 表 1 统计了黄河上游宁蒙河段下河沿来水来沙特征值, 由表可见: ①1986 年后, 宁蒙河段年水量和汛期水量均有所减小。1965—1985 年, 宁蒙河段年均水量为 332.62 亿 m³; 1986—2020 年, 宁蒙河段年均水量为 256.34 亿 m³, 占 I 时段年均水量的 77%; 1965—1985 年, 宁蒙河段汛期平均水量为 182.78 亿 m³; 1986—2020 年, 宁蒙河段汛期平均水量为 109.85 亿 m³, 占 I 时段汛期平均水量的 60%; 对比 77% 和 60% 两个数据可知, II 时段年水量减小的幅度小于汛期水量减小的幅度。②1986 年后, 宁蒙河段年沙量和汛期沙量均大幅度减小。1965—1985 年, 宁蒙河段年均沙量为 1.21 亿 t; 1986—2020 年, 宁蒙河段年均沙量为 0.74 亿 t, 占 I 时段年均沙量的 61%; 1965—1985 年, 宁蒙河段汛期平均沙量为 1.03 亿 t; 1986—2020 年, 宁蒙河段汛期平均沙量为 0.58 亿 t, 占 I 时段汛期平均沙量的 56%; 对比 61% 和 56% 两个数据可知, II 时段年沙量减小的幅度小于汛期沙量减小的幅度。③1986 年后, 宁蒙河段水量减小的幅度小于沙量减小的幅度。与 1965—1985 年相比, 1986—2020 年, 宁蒙河段年均水量减少了 23%, 年均沙量减少了 39%; 汛期平均水量减少了 40%, 汛期平均沙量减少了 44%; 由此可见, II 时段宁蒙河段年和汛期水量减小的幅度均小于年和汛期沙量减小的幅度。④1986 年后, 宁蒙河段洪峰流量大幅

削减，发生洪水的几率明显降低。1965—1985 年，宁蒙河段下河沿站日均流量大于 2000 m³/s 的洪水平均天数为 32.47 天，1986—2020 年，宁蒙河段下河沿站日均流量大于 2000 m³/s 的洪水平均天数仅为 2.56 天，降低幅度高达 92%，表明Ⅱ时段龙羊峡和刘家峡水库的联合调控运用，洪峰流量削减作用明显，洪水发生的几率必然有所降低^[8]。

表 1 黄河上游宁蒙河段下河沿来水来沙特征值
Table 1 Flow and sediment of Xiaheyang of Ning-meng Reach in the Upper Yellow River

时段	水量/亿m ³			日均流量大于 2000 m ³ /s 的洪水年平均天数	沙量/亿t		
	年平均	汛期平均	非汛期平均		年平均	汛期平均	非汛期平均
I 时段：1965~1985 年	332.62	182.78	149.84	32.47	1.20	1.03	0.17
Ⅱ时段：1986~2020 年	256.34	109.85	146.49	2.56	0.74	0.58	0.16

4 宁蒙河段横断面形态演变特征

4.1 宁蒙河段横断面平滩特征值的确定方法 本文研究选取的宁蒙河段沿程六个代表性水文断面分别是下河沿、青铜峡、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、头道拐，如图 1 所示，其中，宁夏河段的进口控制断面是下河沿断面，出口控制断面是石嘴山断面，内蒙河段进口控制断面是石嘴山断面，出口控制断面是头道拐断面。宁蒙河段平滩特征值是指宁蒙河段某一水文断面的水位与该水文断面滩唇相平时该水文断面的形态特征值，包括平滩河宽 B ，平滩水深 H ，平滩面积 A 以及平滩宽深比 ζ 。

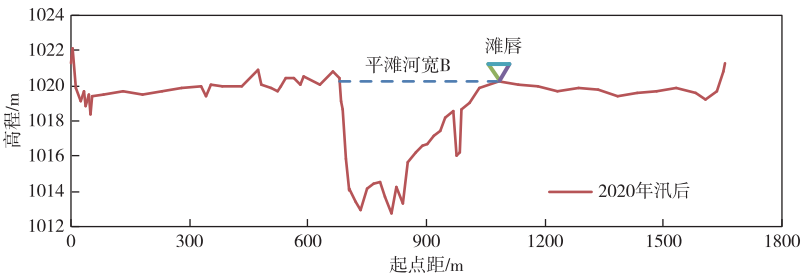


图 2 黄河上游宁蒙河段典型横断面示意图
Fig.2 Schematic drawing of typical cross section of Ning-meng Reach in the Upper Yellow River

图 2 为黄河上游宁蒙河段典型横断面示意图，结合图 2 阐述宁蒙河段平滩特征值确定方法如下：
①根据实测河道地形资料绘制宁蒙河段沿程六个代表性水文断面历年汛后断面图，如图 2 所示，图中绘制了三湖河口 2020 年汛后断面图；②根据步骤①绘制的六个水文断面图找到滩唇位置，如图 2 所示，图中三角形标注位置即为三湖河口 2020 年汛后断面滩唇位置，根据滩唇位置确定相应水文断面历年汛后滩唇高程；③在六个水文断面图上顺延步骤②确定的历年汛后滩唇高程线至对岸河床，如图 2 所示，图中虚线即为三湖河口 2020 年汛后断面平滩河宽 B ，量测相应水文断面历年汛后平滩河宽 B 值；④依据步骤②确定的六个水文断面图历年汛后滩唇高程以及原始断面实测地形资料计算相应断面滩唇高程以下河床平均水深求得平滩水深 H 值；⑤将步骤③得到的六个水文断面历年汛后平滩河宽 B ，步骤④得到的六个水文断面历年汛后平滩水深 H ，代入公式 $A=BH$ 计算求得相应水文断面历年汛后平滩面积 A ；⑥将步骤③得到的六个水文断面历年汛后平滩河宽 B ，步骤④得到的六个水文断面历年汛后平滩水深 H ，代入公式 $\zeta=\sqrt{B/H}$ 计算求得相应水文断面历年汛后平滩宽深比 ζ 。

4.2 宁蒙河段横断面形态演变特征 表 2 为依据上述方法确定的黄河上游宁蒙河段横断面平滩特征值统计，由表可见，1965—2020 年黄河上游宁蒙河段横断面形态演变特征如下：

(1)1986 年后，宁蒙河段平滩河宽缩窄。1965—1985 年，宁夏河段下河沿、青铜峡、石嘴山三断面平滩河宽 239~366 m，1986—2020 年，三断面平滩河宽 235~289 m，与 I 时段相比，平滩河宽缩窄，缩窄幅度为 2%~31%；1965—1985 年，内蒙河段巴彦高勒、三湖河口、头道拐三断面平滩河宽

446~515 m, 1986—2020 年, 三断面平滩河宽 292~507 m, 与 I 时段相比, 平滩河宽缩窄, 缩窄幅度为 2%~35%。

(2)1986 年后, 宁蒙河段平滩水深变浅。1965—1985 年, 宁夏河段下河沿、青铜峡、石嘴山三断面平滩水深 4.5~6.4 m, 1986—2020 年, 三断面平滩水深 3.4~6.1 m, 与 I 时段相比, 平滩水深变浅, 变浅幅度为 5%~24%; 1965—1985 年, 内蒙河段巴彦高勒、三湖河口、头道拐三断面平滩水深 2.6~3.5 m, 1986—2020 年, 三断面平滩水深 2.3~2.8 m, 与 I 时段相比, 平滩河宽减小, 减小幅度为 12%~30%。

(3)1986 年后, 宁蒙河段平滩面积减小。1965—1985 年, 宁夏河段下河沿、青铜峡、石嘴山三断面平滩面积 1442~1649 m², 1986—2020 年, 三断面平滩面积 851~1427 m², 与 I 时段相比, 平滩面积减小, 减小幅度为 6%~48%; 1965—1985 年, 内蒙河段巴彦高勒、三湖河口、头道拐三断面平滩面积 1329~1792 m², 1986—2020 年, 三断面平滩面积 817~1168 m², 与 I 时段相比, 平滩面积减小, 减小幅度为 27%~48%; II 时段宁蒙河段平滩面积减小, 表明 1986 年后, 相同水流流速下宁蒙河段主槽过流能力必然降低^[7]。

(4)1986 年后, 宁蒙河段平滩宽深比增大。1965—1985 年, 宁夏河段下河沿、青铜峡、石嘴山三断面平滩宽深比 2.4~3.9, 1986—2020 年, 三断面平滩宽深比 2.5~4.7, 与 I 时段相比, 平滩宽深比增大, 增大幅度为 4%~17%; 1965—1985 年, 内蒙河段巴彦高勒、三湖河口、头道拐三断面平滩宽深比 6~8.7, 1986—2020 年, 三断面平滩宽深比 6.1~9.8, 与 I 时段相比, 平滩宽深比增大, 增大幅度为 2%~30%; II 时段宁蒙河段平滩宽深比增大, 表明 1986 年后宁蒙河段横断面形态朝着宽浅方向调整^[9]。

表 2 黄河上游宁蒙河段横断面平滩特征值统计
Table 2 Bank-full eigenvalue of cross section of Ning-meng Reach in the Upper Yellow River

平滩值	下河沿		青铜峡		石嘴山		巴彦高勒		三湖河口		头道拐	
	I 时段	II 时段	I 时段	II 时段	I 时段	II 时段	I 时段	II 时段	I 时段	II 时段	I 时段	II 时段
B/m	239	235	295	289	366	253	507	419	446	292	515	507
H/m	6.4	6.1	4.9	4.4	4.5	3.4	2.6	2.3	3.5	2.8	3.3	2.3
A/m ²	1525	1427	1442	1269	1649	851	1329	964	1583	817	1792	1168
ζ	2.4	2.5	3.5	3.9	3.9	4.7	8.7	8.9	6	6.1	6.9	9.8

5 宁蒙河段横断面形态演变与水沙过程的响应关系

5.1 因变量与自变量的选择 分析宁蒙河段沿程河床演变特征可知, 宁夏河段各水文断面形态窄深, 历年变化幅度小, 河势稳定; 内蒙河段各水文断面宽浅, 历年变化幅度大, 河势不稳定; 由于宁夏河段与内蒙河段演变存在明显差异, 所以, 需要建立宁夏河段平滩特征值与水沙过程以及内蒙河段平滩特征值与水沙过程两组响应关系式才能全面表征宁蒙河段平滩特征值与水沙过程的响应关系^[10]。

为了建立上述两组响应关系式, 需要遴选因变量与自变量, 首先讨论因变量的选择, 宁夏河段进口是下河沿断面, 受宁夏河段上游演变的影响, 出口是石嘴山断面, 受下游内蒙河段演变的影响, 为了消除上下游对宁夏河段的影响, 本文选择宁夏河段中间青铜峡断面平滩特征值来表征宁夏河段平滩特征值^[11]; 内蒙河段进口是石嘴山断面, 受宁夏河段下游演变的影响, 出口是头道拐断面, 受内蒙河段下游演变的影响, 为了消除上下游对内蒙河段的影响, 本文选择内蒙河段中间断面平滩特征值来表征内蒙河段平滩特征值^[12], 对比内蒙河段巴彦高勒和三湖河口两个中间断面可知, 三湖河口断面河床演变变幅较大, 其河床演变强度制约着整个内蒙河段, 故本文选择三湖河口断面平滩特征值来表征内蒙河段平滩特征值, 所以, 本文选择的因变量为宁夏河段青铜峡断面平滩特征值和内蒙河段三湖河口断面平滩特征值。下面讨论自变量的选择。文献[1]研究结果表明, 宁蒙河段河床演变与汛期水沙过程的相关关系要好于宁蒙河段河床演变与年水沙过程的相关关系, 由此反映出, 与年水沙过程相比, 汛期水沙过程对于宁蒙河段河床演变的影响更直接更密切, 所以, 本文选择的自变量为宁夏河段青铜

峡断面汛期水沙过程和内蒙河段三湖河口断面汛期水沙过程^[13]。

5.2 平滩面积与水沙过程的响应关系

5.2.1 平滩面积与汛期水量的响应关系 图3为黄河上游宁蒙河段平滩面积和汛期水量的关系，利用回归分析的方法，分别建立了1965—2020年宁夏河段和内蒙河段平滩面积和汛期水量的关系式：

$$\text{宁夏河段: } A_{\text{青平}} = 501.5 W_{\text{青汛}}^{0.19} \quad (1)$$

$$\text{内蒙河段: } A_{\text{三平}} = 216.6 W_{\text{三汛}}^{0.37} \quad (2)$$

式(1)—式(2)中： $A_{\text{青平}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛后平滩面积， m^2 ； $W_{\text{青汛}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛期水量， 亿m^3 ； $A_{\text{三平}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩面积， m^2 ； $W_{\text{三汛}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛期水量， 亿m^3 。

式(1)和式(2)的相关系数 R 值分别为0.79和0.78，反映出宁蒙河段平滩面积与汛期水量相关关系较好，相比之下，宁夏河段平滩面积与汛期水量相关关系要好于内蒙河段平滩面积与汛期水量相关关系。图3中的关系线的变化趋势表明，宁蒙河段平滩面积随着汛期水量的增大而增大，随着汛期水量的减小而减小。由河床演变机理可知，汛期水量越大，汛期水流动力越大，造床能力越强，河道平滩面积必然增大；汛期水量越小，汛期水流动力越小，造床能力越弱，河道平滩面积必然减小。对比图3中宁夏河段和内蒙河段两条关系线的变化幅度还可以看出，内蒙河段平滩面积随汛期水量变化的幅度明显大于宁夏河段平滩面积随汛期水量变化的幅度，分析其原因，宁夏河段形态窄深，河势相对稳定，内蒙河段形态宽浅，河势较不稳定，所以，相同的汛期水流动力条件下，内蒙河段的演变强度要大于宁夏河段的演变强度^[14]。

5.2.2 平滩面积与汛期来沙系数的响应关系 图4为黄河上游宁夏河段平滩面积和汛期来沙系数的关系，利用回归分析的方法，分别建立了1965—2020年宁夏河段和内蒙河段平滩面积和汛期来沙系数的关系式：

$$\text{宁夏河段: } A_{\text{青平}} = 797.5 \rho_{\text{青汛}}^{-0.11} \quad (3)$$

$$\text{内蒙河段: } A_{\text{三平}} = 416.3 \rho_{\text{三汛}}^{-0.24} \quad (4)$$

式(3)—式(4)中： $A_{\text{青平}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛后平滩面积， m^2 ； $\rho_{\text{青汛}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛期来沙系数； $A_{\text{三平}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩面积， m^2 ； $\rho_{\text{三汛}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛期来沙系数。

式(3)和式(4)的相关系数 R 值分别为0.86和0.83，反映出宁蒙河段平滩面积与汛期来沙系数相关关系良好，对比式(3)和式(4)的两个相关系数 R 值可知，宁夏河段平滩面积与汛期来沙系数相关关系要好于内蒙河段平滩面积与汛期来沙系数相关关系，对比式(1)、式(2)和式(3)、式(4)两组相关系数 R 值可知，宁蒙河段平滩面积与汛期来沙系数相关关系要好于平滩面积与汛期水量相关关系。图4中关系线的变化趋势表明，宁蒙河段平滩面积随着汛期来沙系数的增大而减小，随着汛期来沙系数的减小而增大。由河床演变机理可知，汛期来沙系数越大，汛期水沙搭配关系越差，河床冲刷减弱，淤积增强，河道平滩面积必然减小；汛期来沙系数越小，汛期水沙搭配关系越好，河床冲刷增强，淤积减弱，河道平滩面积必然增大。对比图4中宁夏河段和内蒙河段两条关系线的变化幅度还可以看出，内

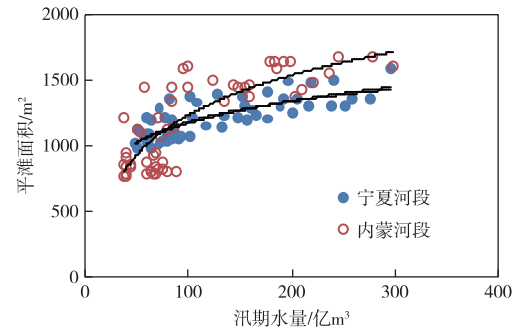


图3 宁蒙河段平滩面积与汛期水量的关系

Fig.3 Relationship between bank-full area of Ning-meng Reach and water quantity of flood season

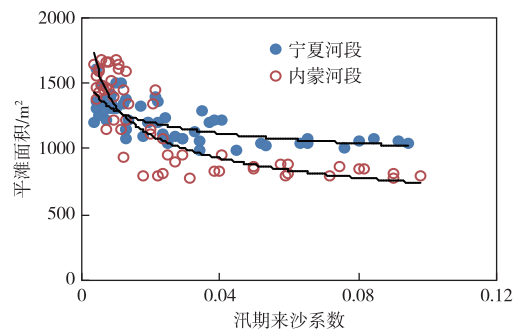


图4 宁蒙河段平滩面积与汛期来沙系数的关系

Fig.4 Relationship between bank-full area of Ning-meng Reach and the coming sediment coefficient of flood season

蒙河段平滩面积随汛期来沙系数变化的幅度明显大于宁夏河段平滩面积随汛期来沙系数变化的幅度，这与前文所述宁夏河段稳定，内蒙河段相对不太稳定的演变特征相吻合^[15]。

5.3 平滩宽深比与水沙过程的响应关系 以代表断面汛期水量、汛期来沙系数为自变量，相应断面平滩宽深比为因变量，运用多元回归方法，分别建立了 1965—2020 年宁夏河段和内蒙河段平滩宽深比与汛期水沙过程的综合关系式如下：

$$\text{宁夏河段: } \zeta_{\text{青平}} = 6.49 W_{\text{青汛}}^{-0.07} \rho_{\text{青汛}}^{0.04} \quad (5)$$

$$\text{内蒙河段: } \zeta_{\text{三平}} = 25.8 W_{\text{三汛}}^{-0.19} \rho_{\text{三汛}}^{0.12} \quad (6)$$

式(5)一式(6)中： $\zeta_{\text{青平}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛后平滩宽深比； $W_{\text{青汛}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛期水量，亿 m^3 ； $\rho_{\text{青汛}}$ 为黄河上游宁夏河段青铜峡断面历年汛期来沙系数； $\zeta_{\text{三平}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩宽深比； $W_{\text{三汛}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛期水量，亿 m^3 ； $\rho_{\text{三汛}}$ 为黄河上游内蒙河段三湖河口断面历年汛期来沙系数。

式(5)、式(6)的复相关系数分别为 0.89、0.85，计算值与实测值的比较如图 5 所示，图中依据式(5)、式(6)计算得到的宁蒙河段平滩宽深比与实测资料确定的宁蒙河段平滩宽深比的关系点群比较均匀的分布在 45°线左右，表明式(5)、式(6)回归效果良好，未来可根据宁夏河段青铜峡断面和内蒙河段三湖河口断面水沙过程，运用式(5)、式(6)对宁夏河段青铜峡断面和内蒙河段三湖河口断面平滩宽深比进行估算。分析式(5)、式(6)自变量的指数可知，宁蒙河段平滩宽深比随宁蒙河段汛期水量的增大而减小，随宁蒙河段汛期来沙系数的增大而增大。宁蒙河段汛期水量大，汛期来沙系数小，表明宁蒙河段汛期水沙过程有利，河道主槽淤积厚度减弱，冲刷深度趋于增强，横断面形态必然朝着窄深的方向调整；宁蒙河段汛期水量小，汛期来沙系数大，表明宁蒙河段汛期水沙过程不利，河道主槽淤积厚度增加，河道萎缩趋于严重，横断面形态必然朝着宽浅的方向调整。综合上述研究可知，宁蒙河段横断面形态演变与汛期水沙过程有着良好的响应关系，未来，随着实测资料的逐渐完善，进一步建立宁蒙河段横断面形态演变与洪水水沙过程的响应关系将是深入本项研究的有益探索。

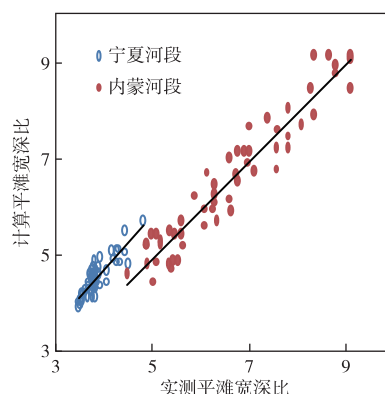


图 5 宁蒙河段平滩宽深比计算值与实测值比较图
Fig.5 Comparison of calculated and measured values of bank-full width-depth ratio of Ning-meng Reach

6 结论

(1)以 1986 年为分界点，将 1965—2020 年宁蒙河段来水来沙过程分为 I、II 两个时段对比分析可知，II 时段黄河上游龙羊峡水库与刘家峡水库联合调控运用，进入黄河上游宁蒙河段的水沙过程发生明显的变化；年水量和汛期水量均有所减小，且年水量减小的幅度小于汛期水量减小的幅度；年沙量和汛期沙量均大幅度减小，年沙量减小的幅度小于汛期沙量减小的幅度；洪峰流量大幅削减。

(2)与 I 时段相比，II 时段黄河上游宁蒙河段平滩河宽缩窄，缩窄幅度为 2%~35%；平滩水深变浅，变浅幅度为 5%~30%；由于平滩河宽、平滩水深均减小，II 时段黄河上游宁蒙河段平滩面积必然减小，减小幅度为 6%~48%，表明 II 时段相同水流流速下宁蒙河段主槽过流能力必然降低；与 I 时段相比，II 时段黄河上游宁蒙河段平滩宽深比增大，增大幅度为 2%~30%，表明 II 时段黄河上游宁蒙河段宁蒙河段横断面形态朝着宽浅方向调整。

(3)建立的宁蒙河段平滩面积和水沙过程的响应关系表明，宁蒙河段平滩面积随汛期水量的增大(减小)而增大(减小)，随汛期来沙系数的增大(减小)而减小(增大)，由河床演变的原理可知，宁蒙河段汛期水量越大，汛期来沙系数越小，汛期水沙过程越有利，汛期水流排洪输沙能力越强，河道平滩面积必然增大；宁蒙河段汛期水量越小，汛期来沙系数越大，汛期水沙过程越不利，汛期水流排洪

输沙能力越弱,河道平滩面积必然减小。

(4)建立的宁蒙河段平滩宽深比和水沙过程的响应关系表明,宁蒙河段平滩宽深比随汛期水量的增大(减小)而减小(增大),随汛期来沙系数的增大(减小)而增大(减小)。宁蒙河段汛期水量越大,汛期来沙系数越小,则宁蒙河段汛期水沙过程越有利,河道主槽淤积厚度减弱,冲刷深度趋于增强,横断面形态朝着窄深的方向调整;宁蒙河段汛期水量越小,汛期来沙系数越大,则宁蒙河段汛期水沙过程越不利,河道主槽淤积厚度增加,河道萎缩趋于严重,横断面形态朝着宽浅的方向调整。

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. Mechanism and Trend Prediction of Runoff and Sediment Changes in the Yellow River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2023. (in Chinese))
- [2] 苏晓慧, 张晓华, 田世民. 黄河上游宁蒙河段水沙变化特征分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(2): 13-15. (SU Xiaohui, ZHANG Xiaohua, TIAN Shimin. Characteristics of runoff-sediment variation in Ningxia- Inner Mongolia Reaches of the Upper Yellow River[J]. Yellow River, 2013, 35 (2): 13-15. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] 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 Ning-meng reach in Upper Yellow River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22 (4): 361-367. (in Chinese))
- [5] 胡春宏, 张治昊, 安催花, 等. 黄河水沙平衡与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2022. (HU Chunhong, ZHANG Zhihao, AN Cuihua, et al. Runoff and Sediment Balance and Regulation of the Yellow River[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese))
- [6] 姚文艺, 侯素珍, 丁赞. 龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J]. 水科学进展, 2017, 18(1): 1-13. (YAO Wenyi, HOU Suzhen, DING Yun. Effects on flow and sediment in the upper Yellow River by operation of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2017, 18 (1): 1-13. (in Chinese))
- [7] 胡春宏, 张治昊. 黄河下游漫滩洪水造床机理与水沙调控指标研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1043-1051. (HU Chunhong, ZHANG Zhihao. The research of mechanism of constructing riverbed and index of flow and sediment of floodwater in the Lower Yellow River[J]. China Science: Technical Science, 2015, 45 (10): 1043-1051. (in Chinese))
- [8] 于海云, 覃湘栋, 庞治国, 等. 2021 年十大孔兑区域土壤侵蚀空间分布特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(6): 546-556. (YU Haiyun, QIN Xiangdong, PANG Zhiguo, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion in the Ten Kongduis in 2021[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(6): 546-556. (in Chinese))
- [9] 张治昊, 赵连军, 杨明, 等. 黄河口水下地形等深线的提取及其演变分析[J]. 泥沙研究, 2011(6): 17-21. (ZHANG Zhihao, ZHAO Lianjun, YANG Ming, et al. Underwater landforms contour extraction and evolution of Yellow River Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2011(6): 17-21. (in Chinese))
- [10] 胡春宏, 张治昊. 论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1015-1025. (HU C H, ZHANG Z H. On the critical threshold of balanced sediment transport in the Yellow River channel and the degree of soil and water loss control in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1015-1025. (in Chinese))
- [11] 鲍淑君, 周翔南, 尚文绣, 等. 多年调节水库调蓄的影响因素判别与影响时长分析[J]. 中国水利水电科

- 学研究院学报(中英文), 2022, 20(6): 532-539. (BAO Shujun, ZHOU Xiangnan, SHANG Wenxiu, et al. Influence factors identification and influence duration analysis for multi-year regulating reservoir operation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(6): 532-539. (in Chinese))
- [12] 胡春宏, 张治昊. 黄河口尾间河道横断面形态调整及其与水沙过程的响应关系[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(4): 543-553. (HU Chunhong, ZHANG Zhihao. Relationship between adjustment of section configuration and flow-sediment of tail channels in the Yellow River estuary[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(4): 543-553. (in Chinese))
- [13] 张治昊, 戴清, 李敬义, 等. 黄河口尾间河道断面形态的萎缩调整规律研究[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 340-346. (ZHANG Zhihao, DAI Qing, LI Jingyi, et al. Research on atrophy adjustment rules of cross section of tail channels in the Yellow River Estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(5): 340-346. (in Chinese))
- [14] 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. (SHI Changxing. Changes in sediment accumulation in Ning-Meng reach of Yellow River in past over 500 years[J]. Journal of Sediment Research, 2010(5): 19-25. (in Chinese))
- [15] 胡春宏, 张治昊. 黄河下游河道萎缩过程中洪水水位变化研究[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 883-890. (HU Chunhong, ZHANG Zhihao. Research on variation of floodwater stage during the atrophy process of the Lower Yellow River channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 883-890. (in Chinese))

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

LU Shuhui¹, YAO Qingfeng², YANG Ming³, SHI Hongling⁴, WANG Huimin², ZHANG Zhihao⁴

(1. Yellow River Estuary Administration of Shandong Yellow River Bureau, Dongying 257091, China;

2. Service Centre of Irrigation by Yellow River Diversion of Binzhou city, Binzhou 256600, China;

3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Channel cross-section configuration indicates its capacities of flood discharge and sediment transport. It is of great significance to probe the mechanism of the cross section evolution in the Ningxia-Inner Mongolia (in short, Ning-meng) reaches in the upper Yellow River. Based on analyses of the measured data, the characteristics of the cross section evolution and its response to the streamflow and sediment load into the reaches were clarified. The results show that, after the Longyangxia reservoir was constructed and jointly regulated with the upper Liujiaxia reservoir in 1986, the volume of streamflow into the Ning-meng reaches decreased, the sediment load reduced sharply, and the flood peak cut down significantly. Meanwhile, the channel form of the Ning-meng reaches changed with the bank-full width narrowing, the bank-full depth shallowing, the bank-full area decreasing, and the bank-full width-depth ratio increasing. On the basis of above-mentioned knowledge, the response relationships between cross section evolution and streamflow and sediment load variation in the Ning-meng reaches was established. The relationships show that, in the flood season, the bank-full area increases as the volume of streamflow into the reaches increases, and decreases as the coefficient of the sediment into the reaches increases, while the bank-full width-depth ratio decreases as the volume of streamflow into the reaches increases, and increases as the coefficient of the sediment into the reaches increases. The response relationship also implicit the principles of river dynamics. In the flood season, the larger the inflow, the lower the sediment coefficient, which tends to shape the narrower and deeper cross-sections by increasing the bank-full area and reducing the bank-full width-depth ratio, and thus conducive to sediment transport in the channel. Conversely, the smaller the inflow, the higher the sediment coefficient, which tends to shape the wider and shallower cross-sections by reducing the bank-full area and increasing the bank-full width-depth ratio, and thus not conducive to sediment transport in the channel.

Keywords: the upper Yellow River; Ningxia-Inner Mongolia reaches; runoff and sediment load variations; cross section configuration; channel evolution; response relationship

(责任编辑: 祁 伟)