

文章编号: 2097-096X(2024)-04-0361-07

黄河上游宁蒙河段平滩流量变化与水沙过程的响应关系

韩小军¹, 卢书慧², 史红玲³, 刘裕¹, 张海霞¹, 张治昊³

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

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 平滩流量是表征河道排洪输沙能力的重要指标, 开展宁蒙河段平滩流量变化机理的研究对于治理黄河意义重大, 本文采用实测资料分析的方法, 研究了黄河上游宁蒙河段平滩流量变化特征及其与汛期水沙过程的定量关系。研究表明: 黄河上游宁蒙河段沿程六站平滩流量由1960年代中期的3600~5800 m³/s减小到目前的1900~4000 m³/s。2000年前宁蒙河段三湖河口平滩流量与汛期水沙过程关系点群与2000年后两者关系点群存在明显分区, 说明2000年后宁蒙河段河床演变机理发生了变化, 遵循不同规律。建立的宁蒙河段三湖河口平滩流量与汛期水沙过程的定量关系式表明, 宁蒙河段平滩流量随着汛期平均水量的减小(增大)而减小(增大), 随着汛期平均来沙系数的减小(增大)而增大(减小), 随着汛期水沙过程参数的增大(减小)而增大(减小)。

关键词: 黄河上游; 宁蒙河段; 平滩流量; 水沙过程; 河床演变; 响应关系

中图分类号: TV141

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240027

1 研究背景

人民治黄以来, 通过在黄河干流修建龙羊峡、刘家峡、海勃湾、万家寨、三门峡、小浪底水库, 支流修建陆浑、故县、河口村水库, 初步形成了黄河水沙调控工程体系^[1]。不同时期黄河水沙调控工程体系的不同运行方式, 直接改变了进入黄河河道的水沙条件, 间接影响了黄河河道演变过程^[2]。1986年后, 龙羊峡、刘家峡水库的联合运用, 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, 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, 防洪防凌形势严峻^[3]。宁蒙河段平滩流量是表征宁蒙河段主河槽排洪输沙能力的关键指标, 研究黄河上游宁蒙河段平滩流量变化特征及其与水沙条件的响应关系, 能够厘清黄河上游宁蒙河段平滩流量的主要影响因素与变化机理, 有助于制定黄河上游水沙调控工程体系运行方案, 有利于提出合理的黄河上游宁蒙河段治理措施, 对于维护黄河上游宁蒙河段健康生命至关重要^[4]。本文在分析黄河上游宁蒙河段平滩流量50余年变化特征的基础上, 建立了黄河上游宁蒙河段平滩流量与水沙过程的定量关系式, 为黄河流域高质量发展提供科技支撑。

2 宁蒙河段平滩流量变化

平滩流量是指某一断面的水位与该断面滩唇相平时该断面所通过的流量, 本文研究采用的平滩流量确定方法如下: ①点绘宁蒙河段沿程六站历年断面图; ②根据断面图确定历年汛后滩唇高程; ③绘制六站历年水位—流量关系; ④利用水位—流量关系, 查找六站历年汛后滩唇高程对应的流量值。

图1为黄河上游宁蒙河段位置示意图; 图2为依据上述方法确定的黄河上游宁蒙河段1965—2020年沿程六站平滩流量变化过程图。由图可见, 黄河上游宁蒙河段沿程六个水文站平滩流量由二十世纪

收稿日期: 2024-02-26; 网络首发时间: 2024-05-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20240513.0956.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20237)

作者简介: 韩小军(1976-), 高级工程师, 主要从事水土保持和河流泥沙研究。E-mail: 2857406629@qq.com

通信作者: 张治昊(1974-), 博士, 正高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 13520490316@163.com

六十年代中期的 $3600 \sim 5800 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小到目前的 $1900 \sim 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。具体来说，受水沙变化与人类活动的影响，黄河上游宁蒙河段平滩流量变化过程表现出明显的阶段性：

(1) 1965—1968 年，该时期黄河上游宁蒙河段径流量过程属于丰水系列，下河沿站年来水量为 417 亿 m^3 ，石嘴山站年来水量为 397 亿 m^3 ；宁夏河段各水文站平滩流量在 $4000 \sim 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，内蒙河段各水文站平滩流量在 $3600 \sim 5200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2) 1969—1980 年，刘家峡水库投入运用，宁蒙河段年均径流量较前期明显减少，下河沿站年均径流量为 297 亿 m^3 ，石嘴山站年均径流量为 275 亿 m^3 ；径流量大幅度减少，导致河道输沙能力显著降低，平滩流量必然减小，宁夏河段各水文站平滩流量减小到 $3000 \sim 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，内蒙河段各水文站平滩流量减小到 $2400 \sim 3600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 1981—1985 年，该时期黄河上游连续出现了几个丰水年，下河沿站年均径流量达到 362 亿 m^3 ，石嘴山站年均径流量达到 338 亿 m^3 ；由于连续几年的水沙过程十分有利，河道排洪输沙能力增大，平滩流量有所恢复，宁夏河段各水文站平滩流量恢复至 $3600 \sim 4900 \text{ m}^3/\text{s}$ ，内蒙河段各水文站恢复至 $3200 \sim 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(4) 1986—2020 年，龙羊峡水库投入运用，宁蒙河段年均径流量持续减少，下河沿站年均径流量减少为 246 亿 m^3 ，石嘴山站年均径流量减少为 215 亿 m^3 ；水库对洪峰流量的削减，导致河道输沙能力下降，河槽淤积萎缩，平滩流量进一步减小，到 2020 年，宁夏河段各水文站平滩流量减小至 $2000 \sim 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，内蒙河段各水文站平滩流量减小至 $1900 \sim 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

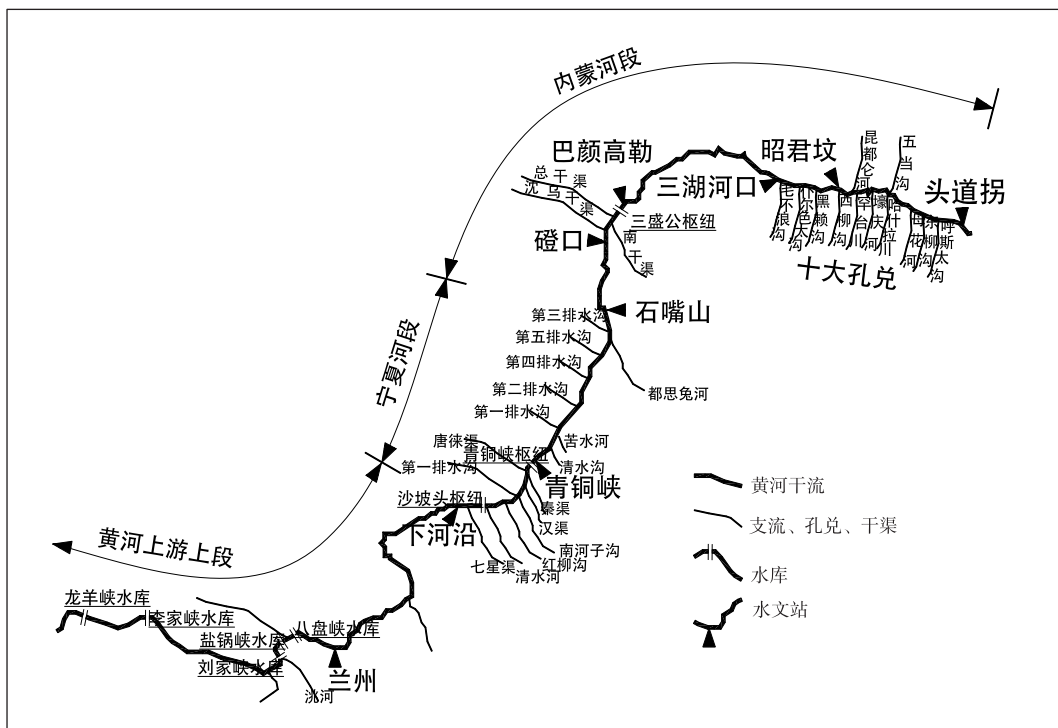


图 1 黄河上游宁蒙河段位置示意图

Fig.1 Location schematic diagram of Ningmeng reach of Upper Yellow River

3 宁蒙河段平滩流量变化与水沙过程的响应关系

3.1 因变量与自变量的选择 要想建立宁蒙河段平滩流量与水沙过程的响应关系，首先要选择所建关系式左侧的因变量，分析宁蒙河段演变过程可知，宁夏河段各水文断面形态窄深，历年变化幅度较小，河势稳定，内蒙河段历年变幅较大，三湖河口断面附近河段变幅最大，由此可见，三湖河口断面附近河段较不稳定，其河床演变强度制约着整个宁蒙河段^[5]，因此，本文选择的因变量是宁蒙河段三

湖河口断面平滩流量。

其次要选择所建关系式右侧的自变量，出于对黄河上游宁蒙河段水沙过程调控的考虑，下文所选的自变量均为宁蒙河段进口下河沿站水沙特征值。表 1 为三湖河口平滩流量与下河沿不同水沙过程关系 R 值统计，由表可见，三湖河口断面平滩流量与下河沿站汛期水沙过程的关系 R 值明显大于三湖河口断面平滩流量与下河沿站年水沙过程的关系 R 值，表明三湖河口断面平滩流量与下河沿站汛期水沙过程的关系要优于三湖河口断面平滩流量与下河沿站年水沙过程的关系；由此可见，与年际水沙过程相比，汛期水沙过程对黄河上游宁蒙河段演变更重要，所以，本文选择宁蒙河段下河沿站汛期水沙过程作为所建关系式右侧的自变量^[6]。

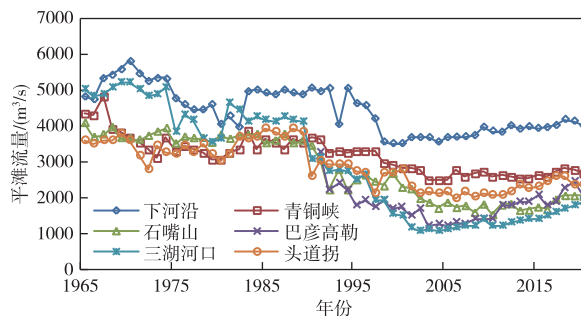


图 2 黄河上游宁蒙河段沿程六站平滩流量变化过程
Fig.2 Variation processes of bank-full discharge of six stations along Ningmeng reach of Upper Yellow River

宁蒙河段下河沿站汛期水量 $W_{汛}$ 代表着宁蒙河段汛期水流动力，对宁蒙河段河床演变影响很大，所以将其选为表征宁蒙河段汛期水沙过程的第一个水沙参数^[7]。宁蒙河段是多泥沙河段，水沙搭配关系对河床演变的影响十分明显，故本文选择宁蒙河段下河沿站汛期来沙系数 $\rho_{汛}$ 作为表征宁蒙河段汛期水沙过程第二个水沙参数。

下河沿站汛期水量 $W_{汛}$ 的大小表征宁蒙河段汛期水沙过程水流动力的大小，下河沿站汛期来沙系数 $\rho_{汛}$ 表征宁蒙河段汛期水沙过程水沙关系的优劣，上述两个参数主要反映宁蒙河段汛期水沙量值，而河床演变与水沙量值有关，与水沙过程关系也十分密切^[8]。1986 年后，龙羊峡、刘家峡水库联合运用，汛期削峰蓄水，导致汛期进入宁蒙河段大流量天数剧烈减少，流量过程趋于均匀，相应时段宁蒙河段主槽淤积增大，平滩流量减小。作为对宁蒙河段汛期水沙过程定量描述的探索，引入下河沿站汛期水流过程参数 $\theta_{汛}$ 作为表征宁蒙河段汛期水沙过程第三个水沙参数，其数学表达式为：

$$\theta_{汛} = \frac{W_{汛Q>1300}}{W_{汛}} \quad (1)$$

式中： $W_{汛Q>1300}$ 为下河沿站汛期日均流量大于 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水量。 $W_{汛}$ 为下河沿站汛期总水量，由式可知，宁蒙河段汛期水流过程参数 $\theta_{汛}$ 物理意义十分明确，即宁蒙河段下河沿站汛期日均流量大于 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水量占下河沿站汛期总水量的百分比，胡春宏等^[1]的研究表明，1986 年后，日均流量大于 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 洪水将成为宁蒙河段洪水的主体，所以本文选择日均流量大于 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水量表征宁蒙河段洪水水量。宁蒙河段汛期水流过程参数 $\theta_{汛}$ 值的大小，能直接反映出宁蒙河段汛期水量的分配情况，能间接反映出宁蒙河段汛期水流过程的变化幅度。相同汛期水量下，宁蒙河段汛期水流过程参数 $\theta_{汛}$ 值大，说明宁蒙河段汛期日均流量大于 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水量占比大，汛期洪水多，汛期水流过程变化幅度相对较大，流量分布较不均匀；宁蒙河段汛期水流过程参数 $\theta_{汛}$ 值小，说明宁蒙河段汛期日均流量大于 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水量占比小，汛期洪水少，汛期水流过程变化幅度相对较小，流量分布趋于均匀。

表 1 三湖河口平滩流量与下河沿不同水沙过程关系 R 值统计

Table 1 Relationship R between bank-full discharge of Sanhuhekou and different flow and sediment processes of Xiaheyang

时段	三湖河口 $Q_{平}$ 与下河沿年水沙过程 R 值		三湖河口 $Q_{平}$ 与下河沿汛期水沙过程 R 值	
	年水量	年来沙系数	汛期水量	汛期来沙系数
1965—1999 年	0.78	0.76	0.81	0.79
2000—2020 年	0.76	0.73	0.82	0.77

3.2 三湖河口平滩流量与下河沿汛期水量的关系 为了对比宁蒙河段三湖河口平滩流量与下河沿多年滑动平均汛期水沙过程的关系，图 3 中统计了三湖河口断面平滩流量与下河沿站当年汛期水量及 2~9

年滑动平均汛期水量的相关系数 R 值, 由图可见, 三湖河口平滩流量与下河沿 2 年滑动平均汛期水量的相关系数 R 值大于三湖河口平滩流量与下河沿当年汛期水量相关系数 R 值, 之后, 三湖河口断面平滩流量与下河沿站多年滑动平均汛期水量相关系数 R 值随着滑动平均年数增大而增大, 而后随着滑动平均年数增大而减小, 其峰值出现在 5 年, 表明三湖河口断面平滩流量与下河沿站 5 年滑动平均汛期水量的关系最密切^[9]。

图 4 点绘了宁蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均汛期水量的关系, 由图中点群分布特征可见, 1965—1999 年三湖河口断面平滩流量和下河沿站汛期水量的关系点群与 2000—2020 年两者之间的关系点群存在明显分区, 表明两个时段, 三湖河口断面平滩流量和下河沿站汛期水量的关系遵循不同的规律, 利用回归分析的方法, 建立了 1965—1999 年、2000—2020 年宁蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均汛期水量的关系式:

1965—1999 年:

$$Q_{\text{平}} = 3031 \ln W_{\text{汛}5} - 11433 \quad (2)$$

2000—2020 年:

$$Q_{\text{平}} = 1170 \ln W_{\text{汛}5} - 4185 \quad (3)$$

式(2)—式(3)中: $Q_{\text{平}}$ 为三湖河口断面历年汛后平滩流量, m^3/s ; $W_{\text{汛}5}$ 为下河沿站 5 年滑动平均汛期水量, 亿 m^3 。式(2)、式(3)的相关系数 R 值分别为 0.86、0.87, 反映出三湖河口断面历年汛后平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均汛期水量相关关系十分密切^[10]。图 4 中两条关系线的变化趋势表明, 三湖河口断面平滩流量随着下河沿站 5 年滑动平均汛期水量的增大(减小)而增大(减小), 由河床演变原理可知, 对于某一河段而言, 5 年滑动平均汛期水量大, 表明河床经历了连续 5 年较强水流动力的塑造, 河道平滩流量有所增大; 5 年滑动平均汛期水量小, 表明河床经历了连续 5 年较弱水流动力的塑造, 河道平滩流量有所减小^[10]。

3.3 三湖河口平滩流量与下河沿汛期来沙系数的关系 图 5 点绘了宁蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均来沙系数的关系, 由图中点群分布特征可见, 1965—1999 年三湖河口断面平滩流量和下河沿站汛期来沙系数的关系点群与 2000—2020 年两者之间的关系点群存在明显分区, 表明两个时段, 三湖河口平滩流量和下河沿汛期来沙系数的关系遵循不同的规律^[11], 利用回归分析的方法, 建立了 1965—1999 年、2000—2020 年宁蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均来沙系数的关系式:

1965—1999 年:

$$Q_{\text{平}} = 432.5 \rho_{\text{汛}5}^{-0.49} \quad (4)$$

2000—2020 年:

$$Q_{\text{平}} = 252.9 \rho_{\text{汛}5}^{-0.41} \quad (5)$$

式(4)—式(5)中: $Q_{\text{平}}$ 为三湖河口断面历年汛后平滩流量, m^3/s ; $\rho_{\text{汛}5}$ 为下河沿站 5 年滑动平均汛期来

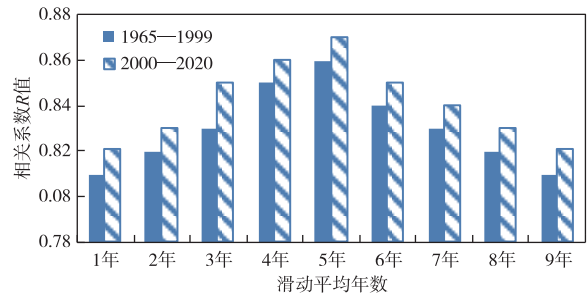


图 3 三湖河口平滩流量与不同年份滑动平均汛期水量关系 R 值统计

Fig.3 Relationship R values between bank-full discharge of Sanhuhekou and different years moving average water quantity of flood season

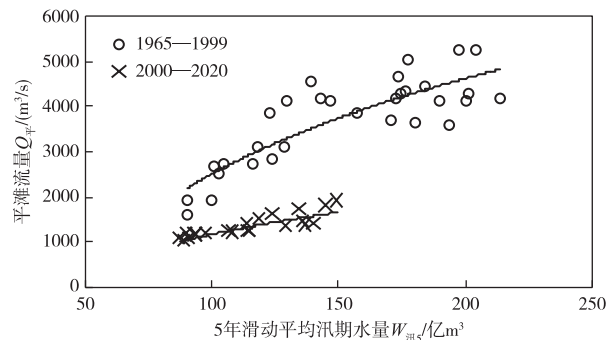


图 4 三湖河口平滩流量与汛期水量的关系

Fig.4 Relationship between bank-full discharge of Sanhuhekou and water quantity of flood season

沙系数, $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 。式(4)、式(5)的相关系数 R 值分别为 0.81、0.84, 说明三湖河口断面平滩流量与下河沿站 5 年滑动平均汛期来沙系数相关关系比较密切。图 5 中两条关系线的变化趋势表明, 三湖河口断面平滩流量随着下河沿站 5 年滑动平均汛期来沙系数的增大(减小)而减小(增大), 由河床演变原理可知, 对于某一河段而言, 5 年滑动平均汛期来沙系数大, 表明连续 5 年汛期水沙搭配关系差, 相同流量下, 连续 5 年汛期含沙量高, 水流挟沙力相同的情况下, 连续 5 年河道汛期淤积加重, 河道平滩流量有所减小; 汛期 5 年滑动来沙系数小, 表明连续 5 年汛期水沙搭配关系好, 相同流量下, 连续 5 年汛期含沙量低, 水流挟沙力相同的情况下, 连续 5 年河道汛期冲刷增强, 河道平滩流量有所增大^[12]。

3.4 三湖河口平滩流量与下河沿汛期水流过程参数的关系 图 6 点绘了宁蒙河段三湖河口断面历年汛后平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均汛期水流过程参数的关系, 由图中点群分布特征可见, 1965—1999 年三湖河口断面平滩流量和下河沿站汛期水流过程参数的关系点群与 2000—2020 年两者之间的关系点群存在明显分区, 表明两个时段, 三湖河口平滩流量和下河沿汛期水流过程参数的关系遵循不同的规律^[13], 利用回归分析的方法, 建立了 1965—1999 年、2000—2020 年三湖河口断面历年平滩流量和下河沿站 5 年滑动平均汛期水流过程参数的关系式:

1965—1999 年:

$$Q_{\text{平}} = 1198 \ln \theta_{\text{汛}5} + 4954 \quad (6)$$

2000—2020 年:

$$Q_{\text{平}} = 228 \ln \theta_{\text{汛}5} + 1801 \quad (7)$$

式(6)一式(7)中: $Q_{\text{平}}$ 为三湖河口断面历年汛后平滩流量, m^3/s ; $\theta_{\text{汛}5}$ 为下河沿站 5 年滑动平均汛期水流过程参数。式(6)、式(7)的相关系数 R 值分别为 0.83、0.82, 反映出三湖河口断面平滩流量与下河沿站 5 年滑动平均汛期水流过程参数相关关系良好。图 6 中两条关系线的变化趋势表明, 三湖河口断面平滩流量随着下河沿站 5 年滑动平均汛期水流过程参数的增大(减小)而增大(减小), 由河床演变原理可知, 对于某一河段而言, 5 年滑动平均汛期水流过程参数大, 相同水量下, 连续 5 年汛期水流流量变化幅度大, 连续 5 年汛期洪水过程居多, 连续 5 年汛期水流输沙能力强, 河道平滩流量有所增大; 5 年滑动平均汛期水流过程参数小, 相同水量下, 连续 5 年汛期水流流量变化幅度小, 连续 5 年汛期洪水过程较少, 连续 5 年汛期水流输沙能力弱, 河道平滩流量有所减小^[14]。

4 主要结论

(1) 1965—2020 年, 黄河上游宁蒙河段沿程六个水文站平滩流量总体的变化趋势是减小, 由二十世纪六十年代中期的 $3600 \sim 5800 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小到目前的 $1900 \sim 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。受水沙变化与人类活动的影响,

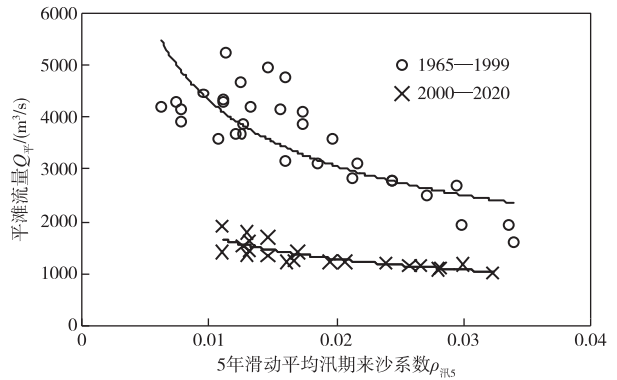


图 5 三湖河口平滩流量与汛期来沙系数的关系

Fig.5 Relationship between bank-full discharge of Sanhuhekou and the coming sediment coefficient of flood season

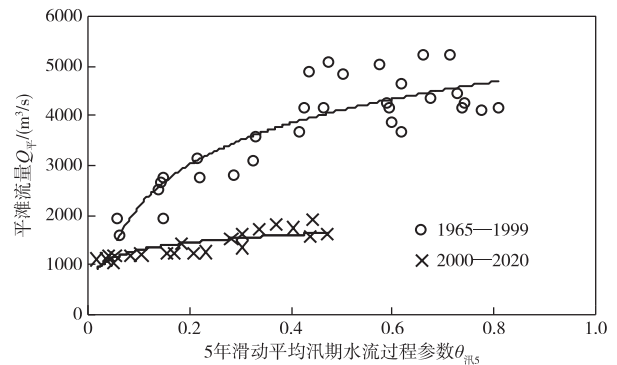


图 6 三湖河口平滩流量与汛期水流过程参数的关系

Fig.6 Relationship between bank-full discharge of Sanhuhekou and flow process parameter of flood season

宁蒙河段平滩流量变化表现出明显的阶段性, 1968年后, 刘家峡水库运用, 宁蒙河段平滩流量减小; 1980年后, 宁蒙河段平滩流量有所恢复; 1986年后, 龙羊峡水库运用, 宁蒙河段平滩流量又呈减小趋势。

(2) 宁蒙河段三湖河口断面平滩流量与下河沿站汛期水沙过程关系 R 值明显大于三湖河口断面平滩流量与下河沿站站年水沙过程关系 R 值, 表明三湖河口断面平滩流量与下河沿站汛期水沙过程关系要优于三湖河口断面平滩流量与下河沿站年水沙过程关系; 由此可见, 与年际水沙过程相比, 汛期水沙过程对黄河上游宁蒙河段演变更重要。

(3) 1965—1999年宁蒙河段三湖河口平滩流量和下河沿站汛期水沙过程的关系点群与2000—2020年两者之间的关系点群存在明显分区, 分析其原因, 与1965—1999年相比, 2000—2020年进入宁蒙河段的沙量减少的幅度大于水量减少的幅度, 水沙关系有所改变, 宁蒙河段河床演变机理发生了某种程度的变化, 三湖河口平滩流量和下河沿站汛期水沙过程的关系遵循不同的规律。

(4) 建立的宁蒙河段三湖河口平滩流量和下河沿站汛期水沙过程的单因素关系式表明, 三湖河口平滩流量随着下河沿站汛期平均水量的增大而增大, 随着下河沿站汛期平均来沙系数的增大而减小, 随着下河沿站汛期水流过程参数的增大而增大, 由河床演变的原理可知, 对于某一河段而言, 5年滑动平均汛期水量大, 5年滑动平均汛期来沙系数小, 5年滑动平均汛期水流过程参数大, 表明河床经历了连续5年较强水流动力的塑造, 且连续5年汛期水沙搭配关系好, 河道平滩流量必然有所增大, 反之, 河道平滩流量必然有所减小。

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] 李国英. 维持黄河健康生命[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (LI G Y. Maintaining Healthy Llife of the Yellow River[M]. Zhengzhou: TheYellow River Water Conservancy Press, 2005. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 胡春宏, 张双虎, 张晓明. 新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 122-130. (HU C H, ZHANG S H, ZHANG X M. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 122-130. (in Chinese))
- [6] 刘晓燕, 高云飞, 党素珍. 黄土高原产沙情势变化[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (LIU X Y, GAO Y F, DANG S Z. Changes in Sediment Production on the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese))
- [7] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 1-11. (HU C H, ZHANG X M. Soil erosion control in the Loess Plateau and changes in runoff and sediment discharge of the Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 1-11. (in Chinese))
- [8] 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))

- [9] 胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 725-733. (HU C H, ZHANG X M, ZHAO Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 725-733. (in Chinese))
- [10] 安催花, 罗秋实, 陈翠霞, 等. 变化水沙条件下黄河防洪减淤和水沙调控模式研究[R]. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 2020. (AN C H, LUO Q S, CHEN C X, et al. Research on flood control, sedimentation reduction, and runoff and sediment regulation models of the Yellow River under Changing runoff and sediment conditions[R]. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., 2022. (in Chinese))
- [11] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1293-1300. (LIU X Y, YANG S T, WANG F G, et al. Analysis of the sediment reduction effect of terraced fields and forest grass vegetation on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1293-1300. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 胡春宏, 张晓明. 近十年我国江河水沙变化、水沙调控与泥沙资源化利用研究[J]. 中国水利, 2022(19): 24-28. (HU C H, ZHANG X M. Study on the change of water and sediment, regulation of water and sediment and utilization of sediment resources in China in recent ten years[J]. China Water Resources, 2022(19): 24-28. (in Chinese))
- [14] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1028-1039. (HU C H, ZHANG X M. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1028-1039. (in Chinese))

Variation of bank-full discharge and its response relationship with flow and sediment processes of Ningmeng reach in Upper Yellow River

HAN Xiaojun¹, LU Shuhui², SHI Hongling³, LIU Yu¹, ZHANG Haixia¹, ZHANG Zhihao³

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

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

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

Abstract: Using the methods of data analyses, Variation of bank-full discharge and its response relationship with flow and sediment processes of Ningmeng reach was researched in Upper Yellow River. The result show that, the variation trend of bank-full discharge of Ningmeng reach is to decrease in Upper Yellow River. From 3600-5800 m³/s in the mid-1960s to the current 1900-4000 m³/s. Compared with before 2000 and after 2000, there are obvious subregions of the point group of relationship between bank-full discharge of Sanhuhekou and flow and sediment processes of flood season. The evolution mechanism of Ningmeng reach changed in Upper Yellow River after 2000, and follows different rules. According to the established relationship between bank-full discharge of Sanhuhekou and flow and sediment processes of flood season, the bank-full discharge increases(decreases) with the increase(decrease) of water quantity of flood season, it increases(decreases) with the decrease(increase) of the coming sediment coefficient of flood season, it increases(decreases) with the increase(decrease) of the flow process parameter of flood season.

Keywords: Upper Yellow River; Ningmeng reach; bank-full discharge; flow and sediment processes; channel evolution; response relationship

(责任编辑: 祁 伟)