

# 黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征

王随继<sup>1</sup>, 范小黎<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 黄河内蒙古河段的河道淤积近年来有所加重, 一些人寄望于人造洪峰冲沙来降低河床。本文根据典型年份的最大洪水的流量—水位过程线变化特征, 揭示黄河内蒙古不同河型段对这些洪水的响应机制, 得出黄河内蒙古河段洪水的流量—水位过程线类型有线形、顺时针环线、逆时针环线 3 类单一关系和线形+逆时针环线、逆时针环线+线形、“8”字形+线形、嵌套状逆时针环线以及交叉线形 5 类复合关系。这些关系总体上可以反映洪水过程中河床是侵蚀还是沉积、何时侵蚀何时沉积、以及冲淤是否具有反复性。黄河内蒙古冲积性河段的河道对同一次洪水过程的响应沿程表现出分化现象, 其中辫状河段以河床侵蚀下降为特征, 弯曲河段以河床明显沉积升高为特征, 而顺直河段以少量沉积或冲淤平衡为特征。不同河型段的河道对洪水的响应趋势与洪水动能的沿程减小相适应, 洪峰含沙量沿程减小是该趋势的具体体现。人造洪峰冲沙难以逆转上述淤积趋势, 对防治洪灾帮助有限。

**关 键 词:** 洪水过程; 河道响应; 不同河型段; 内蒙古河段; 黄河上游

黄河内蒙古河段的河道淤积近年来有所加重, 同时, 随着两岸人口的增长、滨河土地的开发及工业的发展, 使黄河内蒙古河段的人民面临着严重的洪水灾害的威胁, 防洪任务加重。最近几十年内, 就发生了危害十分严重的洪水灾害。比如, 1981 年 8 月 13 日—9 月 13 日, 黄河上游地区连续降雨 30 天, 经刘家峡水库调蓄、河套灌区总干渠适时分洪后, 黄河内蒙古河段的巴彦高勒、三湖河口和昭君坟三站洪峰流量仍然分别达  $5380 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $5450 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $5500 \text{ m}^3/\text{s}$ , 其中  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  以上洪水持续了约 20 天。这次洪水造成 9 段堤防决口, 淹没耕地 27.72 万亩, 毁掉耕地 4 万余亩, 水淹、水围村庄 50 余个, 倒塌房屋 6200 间, 冲毁输电线路 28 km, 电塔 2 处, 扬水站 18 处, 公路 21 km, 直接经济损失为 9248.5 万元(1994 年价), 给国家和当地人民群众造成重大损失。除伏秋大汛洪水外, 内蒙古河段凌汛洪水灾害也很严重。1996 年 3 月发生的凌汛, 在三湖河口水文站流量仅有  $1490 \text{ m}^3/\text{s}$ , 但相应水位为 1020 m, 相当于伏秋洪水  $6500 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时的水位, 超过百年一遇洪水位, 比 1981 年大洪水最高洪水位还高 0.37 m, 造成伊盟达旗乌兰、解放滩乡堤防两处决口, 淹没 9 个村 39 个社, 耕地 7.35 万亩, 草场 2.1 万亩; 致使 2510 间房屋进水, 其中倒塌 1165

间, 造成危房 1345 间。显然, 该河段的洪水灾害的严重性及防治的紧迫性已经引起了人们的重视, 一些研究者针对该段冰凌的时相特点、凌汛的传播特征等进行过必要的研究<sup>[1-3]</sup>, 并在河流治理方面提出过相应的对策<sup>[4-5]</sup>; 许多研究者对黄河内蒙古河段的河床抬高的原因进行过必要的探讨<sup>[6-9]</sup>, 认为黄河上游大坝建设及其水库的运行方式导致了该河段水沙条件变化、引起河床升高; 近年来对包括内蒙古河段在内的黄河上游水力几何形态关系及悬沙冲淤量的时空变化也进行过初步的研究<sup>[10-12]</sup>。无论如何, 人类活动尤其是大坝建设引起下游河床的调整是人们非常关注的<sup>[13-16]</sup>。所有这些研究工作, 对了解黄河内蒙古河段的水沙特性、演变趋势及洪灾威胁等方面都不无裨益。为了消除该河段的洪水威胁, 最近有人呼吁在黑山峡出口建设高坝水库、制造人工洪峰来冲刷内蒙古河道的泥沙, 从而降低河床高程以达到防洪的目的。

该文重点针对典型年份的最大洪水过程的演进特点和黄河内蒙古区间不同河型段分别对它的响应进行初步分析, 在回答上述问题的同时, 揭示该段河流的洪水响应机制, 从而为研究区洪水灾害的防治提供理论依据。

收稿日期: 2009-09; 修订日期: 2010-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771031)。

作者简介: 王随继(1966-), 博士, 副研究员, 主要研究方向为河流沉积学、地貌学及流域地表过程。E-mail: wangsj@igsnr.ac.cn

1 研究区简介

黄河内蒙古河段,自宁蒙交界的麻黄沟至准格尔旗马栅乡榆树湾(图 1),干流全长 823 km。这一河段大部分位于河套盆地,而河套盆地自西向东可划分为 3 个次级的凹陷区,分别称作临河凹陷、白彦花凹陷和呼和浩特凹陷<sup>[7]</sup>。自第四纪以来,这一区域间歇性下沉,地壳沉降速率达 0.20~0.30 cm/a<sup>[18]</sup>,黄河在该盆地发育为冲积性河流。流域内气候干燥,降雨稀少,自西向东,年均降水量由 150 mm/a 增大到 400 mm/a,多年平均径流量为 251.6 亿 m<sup>3</sup>。内蒙古河段上段西有乌兰布和沙漠,整个河段南部比邻库布齐沙漠,流经库布齐沙漠的十大孔兑,每年向黄河平均输入泥沙 0.2381 亿 t<sup>[9]</sup>,为该段河流粗泥沙的主要来源地。整个河段年均输沙 1.44 亿 t,河床质平均中值粒径为 0.104 mm<sup>[20]</sup>。黄河内蒙古河段除了磴口以上的为半限制性河段、喇嘛湾以下的峡谷河段外,中间冲积性河段沿程由辫状河段、弯曲河段和顺直河段组成<sup>[21]</sup>,其中辫状河段位于磴口—西山嘴之间,弯曲河段位于西山嘴—十二连城之间,顺直河段位于十二连城—喇嘛湾之间(图 1)。

该研究用到的洪水资料收集于黄河水利委员会根据实测数据汇编的黄河水沙年报,选取的水文站有巴彦高勒、三湖河口和头道拐,这 3 个水文站分别位于辫状河段、弯曲河段和顺直河段。黄河内蒙古河段上述各站自 1950 年以来的洪水参数的记载非常丰富,要逐年进行分析显得很繁复,为此,主要选取在一些典型年份发生的洪水来分析其过程及河道响应特征。这里选取以下 4 个年份发生的最大洪水过程,即黄河上游青铜峡、刘家峡、龙羊峡三个大型水库未建之前的 1956 年,青铜峡、刘家峡建

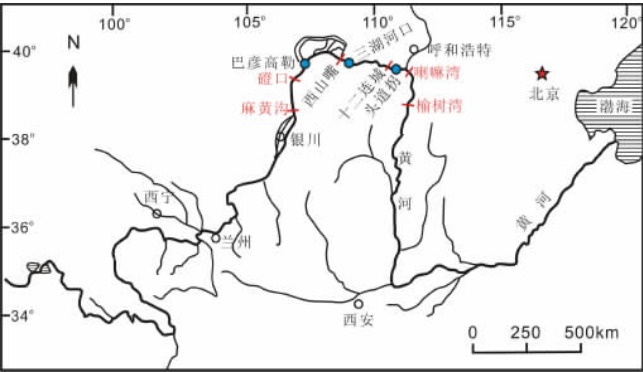


图 1 黄河内蒙古河段水文站位置图

Fig.1 Location of the hydrographic gauging stations in the Neimenggu reach of the Yellow River

成而龙羊峡未建的 1976 年,3 个大型水库都建成之后的 1986 年和 2006 年。其中巴彦高勒水文站建站较晚,没有 1970 年以前的观测数据。另外,头道拐断面缺乏 1956 观测资料,因此增补该站的 1966 年的洪水实测资料。

2 辫状河段洪水过程及河道响应

巴彦高勒水文站在 1976 年、1986 年和 2006 年发生的最大洪水的洪峰流量分别为 3910 m<sup>3</sup>/s、2730 m<sup>3</sup>/s 和 1330 m<sup>3</sup>/s。上述三次洪水的流量—水位过程线见图 2。

由图 2 可见,巴彦高勒断面 1976 年发生的最大洪水的流量—水位过程线当流量超过 2000 m<sup>3</sup>/s

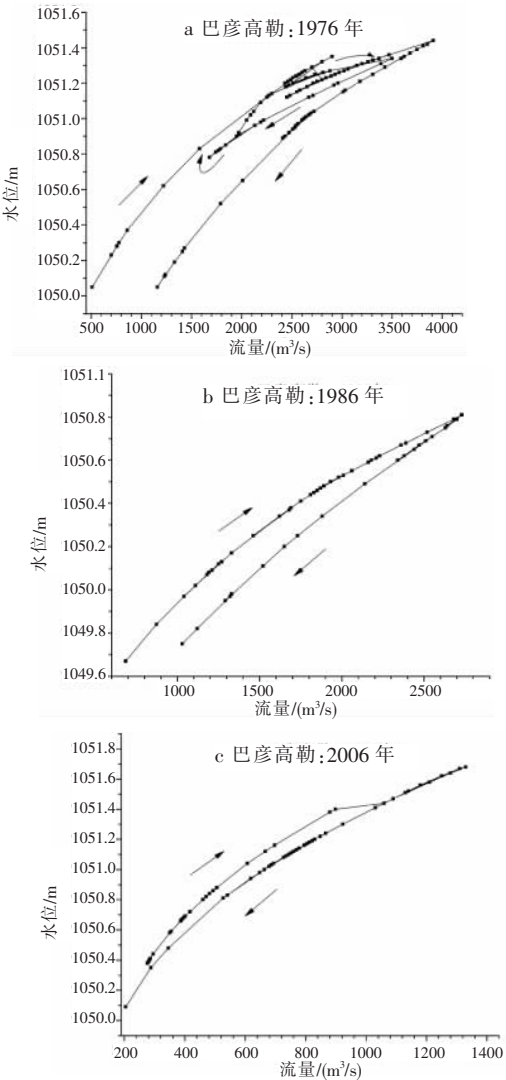


图 2 巴彦高勒断面典型年份洪水的流量—水位过程线  
Fig.2 Discharge—water level hydrograph of the maximal flood that occurred in 1976, 1986 and 2006 at the Bayangaole gauging station

时比较复杂,但总体上呈现顺时针环线特征,同流量水位在洪水上涨阶段比洪水下降阶段高,这表明河床发生了明显的侵蚀,该断面附近的河道对该次洪水的响应特征是河床平均高程因侵蚀而降低。

1986 年发生的最大洪水的流量—水位过程线明显呈现顺时针环线,同流量水位在洪水上涨阶段明显比下降阶段高,河道对该次洪水的响应特征是河床平均高程侵蚀降低。2006 年最大洪水的流量—水位过程线由洪峰附近的线形和洪水初始阶段与洪水结束阶段共同构成的顺时针环线两类过程组成,表明洪峰前后的高水位时期该断面附近的河床冲淤平衡,而在中、低水位期河床明显侵蚀。

这 3 次洪水总体上对巴彦高勒断面及其附近的河床都进行了不同程度的冲刷侵蚀,河床平均高程都有不同程度的降低。

### 3 弯曲河段洪水过程及河道响应

三湖河口水文站在 1956 年、1976 年、1986 年和 2006 年发生的最大洪水的洪峰流量分别为 1740

$\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3850 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2820 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $1550 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上述 4 次洪水的流量—水位过程线见图 3。

由图 3 可见,三湖河口断面 1956 年的最大洪水的流量—水位过程线基本呈现逆时针环线特征,表明洪水过程中河床加积升高,该断面附近的河道对该次洪水的响应特征是河床平均高程因沉积而升高。

1976 年该断面的最大洪水的流量—水位过程线基本呈现“8”字型环线和高水位期的线形特征,表明洪水在低水位期河床以侵蚀为主,中高水位期以河床堆积为主,高水位期河床基本保持不冲不淤状态。该断面附近的河道对该次洪水的响应特征是,河床平均高程在低水位期因侵蚀而降低,中高水位期因淤积而升高,高水位期河床冲淤平衡。

1986 年该断面的最大洪水升降反复,其流量—水位过程线呈现两个逆时针嵌套,总体上呈现逆时针环线特征;2006 年该断面的最大洪水的流量—水位过程线呈现典型的逆时针环线特征。河床对这两次洪水的响应特征与 1956 年的基本相似,都引起明显的沉积。

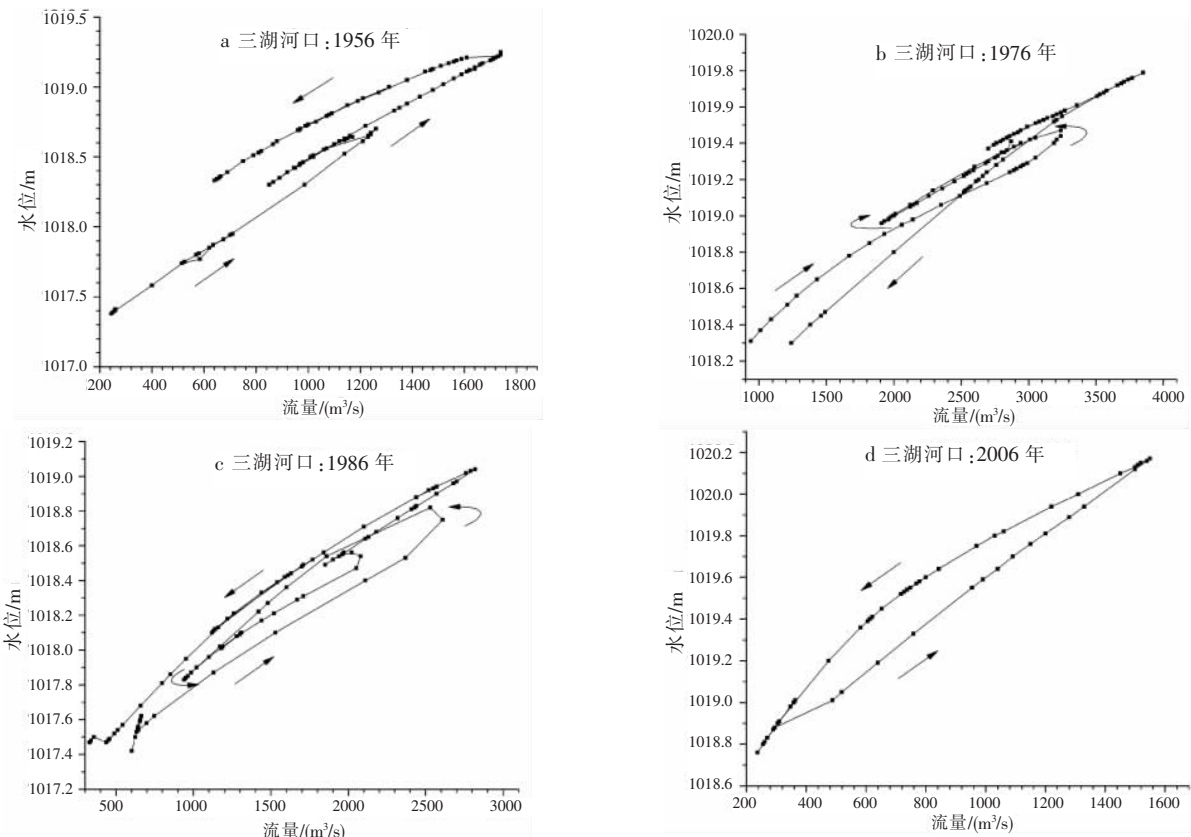


图 3 三湖河口断面典型年份洪水的流量—水位过程线

Fig.3 Discharge—water level hydrograph of the maximal flood that occurred in 1956, 1976, 1986 and 2006 at the Sanhuhekou gauging station

4 顺直河段洪水过程及河道响应

头道拐水文站在 1966 年、1976 年、1986 年和 2006 年发生的最大洪水的洪峰流量分别为 3050 m<sup>3</sup>/s、3650 m<sup>3</sup>/s、2600 m<sup>3</sup>/s 和 1350 m<sup>3</sup>/s。上述四次洪水的流量—水位过程线见图 4。

由图 4 可见,头道拐断面 1966 年和 1976 年发生的最大洪水的流量—水位过程线总体上都呈现逆时针环线特征,表明这两次洪水过程导致断面附近的河床平均高程因淤积而升高。其不同之处在于,1976 年的洪水在洪峰前后高水位期还呈现线形特征,表明 1976 年洪水高水位期河床冲淤基本保持平衡。

1986 年发生的最大洪水升降反复,流量—水位过程线形成两个交叉线形特征,表明同流量水位在洪峰前后高程总体上不变。同流量水位只在流量小于 700 m<sup>3</sup>/s 时洪峰后的高于洪峰前的,这时河床略有淤积。因此,该断面附近的河道对这次洪水的响应特征是,河床基本不冲不淤,河床平均高程无明显变化。

2006 年发生的最大洪水的流量—水位过程线由低水位期的线形和高水位期的逆时针环线两个类型组成,前者表明河床不冲不淤,后者表明河床明显沉积。该断面附近的河道对这次洪水的响应特征是,低水位期河床基本不冲不淤,其平均高程保持不变;高水位期河床以沉积为主,河床平均高程因淤积升高。

5 讨论和结论

巴彦高勒断面位于辫状河段,三湖河口断面位于弯曲河段,而头道拐断面位于顺直河段。因此,不同断面处河道对给定年份同一次洪水的不同响应与其河型及其能耗率有关。

黄河内蒙古河段在上述 3 站洪水的流量—水位过程线可以分为单一关系和复合关系 2 大类,其中单一关系又可分为线形关系、顺时针环线关系和逆时针环线关系 3 类;复合关系依低水位到高水位

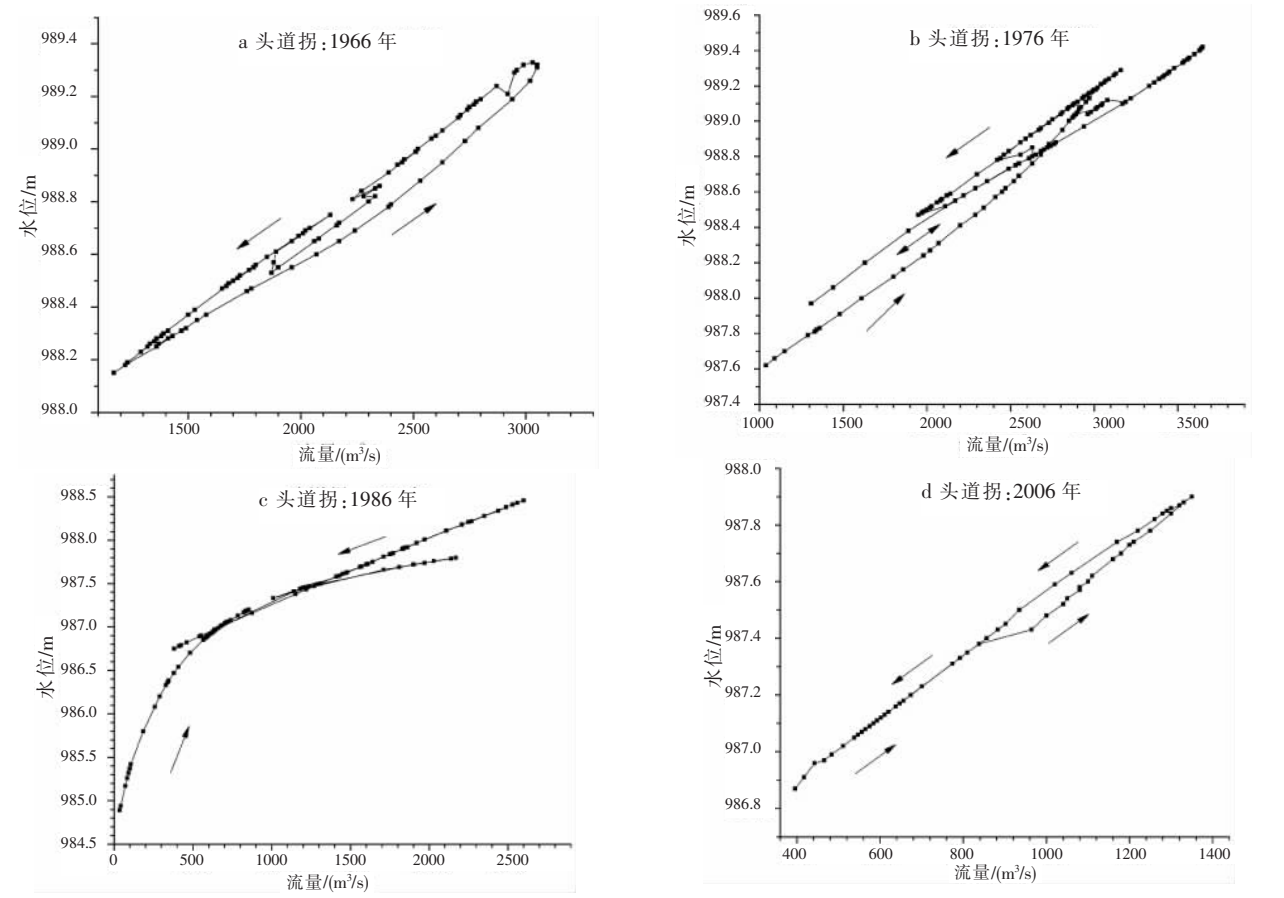


图 4 头道拐断面典型年份洪水的流量—水位过程线  
Fig.4 Discharge—water level hydrograph of the maximal flood that occurred in 1966, 1976, 1986 and 2006 at the Toudaoguai gauging station



顺序,又可划分出线形+逆时针环线关系、逆时针环线+线形关系、“8”字形+线形关系、嵌套状逆时针环线关系(三湖河口 1986 年)、交叉线形关系(头道拐 1986 年)五类。逆时针环线及其与其他类型的复合关系出现的几率最大。

上述不同的洪水流量—水位过程线关系都反映了河道对相应洪水过程的不同响应,有的不冲不淤,有的单纯侵蚀,有的单纯沉积,有的低水位期不冲不淤高水位期沉积,有的低水位期沉积高水位期不冲不淤,有的低水位期侵蚀中水位期沉积高水位期不冲不淤,等等。河道对洪水的响应方式多种多样,但都不超出以下几种情况:即洪水过程中河床的响应是侵蚀还是淤积、何时沉积何时侵蚀、以及冲淤是否具有反复性等。

巴彦高勒断面 3 次洪水都为顺时针环线唯一类型。在给定洪水过程中都以河床侵蚀为特征,表明该辫状河段的洪水动能足够大,侵蚀能力相对强,这与该河段河道比降在内蒙古冲积河段最大相一致。该辫状河段河道的平均宽度及其单位面积的能耗率也是内蒙古冲积河段中最大的,因此,当洪水经过该辫状河段之后,水动力将明显降低。进入弯曲河段时,能耗率大大降低,为适应水动力的降低,洪水在上段侵蚀而来的悬移质其部分相对较粗的泥沙将发生卸载而沉积于河床,导致弯曲河段的河床发生如三湖河口断面所显示的明显沉积,使弯曲河段的河床在洪水过程中以河床沉积为主,河床平均高程升高。至位于更下游的顺直河段,河道比降变得更小这将减小河流的总能耗率,根据总能耗率公式  $\Omega=\gamma gQS$  计算可得,顺直河段的总能耗率是弯曲河段的 69%;同时,顺直河段的河道宽度也相对变小,这将增大河流的单宽能耗率,根据单宽能耗率公式  $\Omega=\gamma gQS/B$  计算可得,顺直河段的单宽能耗率是弯曲河段的 1.7 倍。单宽能耗率大反映河床单位面积上受到的水流作用力强,这就导致顺直河段的沉积作用较其上段的弯曲河段明显减小,表现出如头道拐断面所示的部分年份洪水过程导致河床发生沉积,部分年份只在洪峰前后发生沉积,部分年份则冲淤平衡。

黄河内蒙古河段洪水过程中的水动力沿程变小,能耗率沿程变小,使得其洪峰含沙量明显沿程变小(表 1),其中辫状河段的能耗率减小幅度最大,从而导致辫状河段的洪峰含沙量远大于弯曲河段;而弯曲河段的能耗率较小,使得该段洪峰含沙量比

表 1 黄河内蒙古河段各年份最大洪水的洪峰含沙量比较(单位: kg/m<sup>3</sup>)

Tab.1 Sediment concentration of the maximal peak floods that occurred in 1976, 1986 and 2006 in various reaches of the Yellow River in Inner Mongolia (unit: kg/m<sup>3</sup>)

典型年份洪水	辫状河段 (巴彦高勒站)	弯曲河段 (三湖河口站)	顺直河段 (头道拐站)
1976	29.9	18.0	19.1
1986	62.1	43.8	34.5
2006	33.4	14.2	13.1
平均	41.8	25.3	24.5

其下游的顺直河段略大一些。

从以上的分析可以得出如下初步结论:

(1) 黄河内蒙古河段洪水的流量—水位过程线类型有线形、顺时针环线、逆时针环线三类单一关系和线形+逆时针环线、逆时针环线+线形、“8”字形+线形、嵌套状逆时针环线以及交叉线形五类复合关系。这些关系总体上反映了洪水过程中河床是侵蚀还是沉积、何时侵蚀何时沉积、以及冲淤是否具有反复性。

(2) 黄河内蒙古冲积性河段的河道对同一次洪水过程的响应沿程出现分化,其中辫状河段以河床侵蚀下降为特征,弯曲河段以河床明显沉积升高为特征,而顺直河段以少量沉积或冲淤平衡为特征。不同河型段的河道对洪水的响应趋势与河道比降、宽深比及能耗率沿程减小有关,即与洪水动能的沿程减小相适应,洪峰含沙量沿程减小是该趋势的具体体现。

(3) 根据黄河内蒙古河段天然洪水过程的河道响应特征可以推论,假如利用人造洪峰冲沙,其结果与上述天然洪水的冲淤现象应该相似,侵蚀将发生在内蒙古辫状河段,而沉积将仍然出现在弯曲河段,而顺直河段的沉积稍小一些。人造洪峰可以使辫状河段的河床略有降低,但弯曲河段仍然持续抬升,对于洪灾防治帮助不大。

参考文献

[1] 姚惠明, 秦福兴, 沈国昌, 等. 黄河宁蒙河段凌情特性研究. 水科学进展, 2007, 18(6): 893–899.

[2] 杨赉斐. 黄河宁蒙河段凌汛洪水流量分析研究. 泥沙研究, 1992(6): 62–68.

[3] 佟铮, 马万珍, 王宁. 黄河内蒙古河段凌汛期爆炸破冰的基本方法. 人民黄河, 2003, 25(12): 8–9.

[4] 冯国华. 黄河内蒙古段防凌防洪工程现状及治理措施. 内蒙古水利, 2002(1): 15–16.

[5] 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. 中国沙漠, 2003, 23(2): 152–159.

[6] 侯素珍, 常温花, 王平, 等. 黄河内蒙古段河道萎缩特征及成因. 人民黄河, 2007, 29(1): 24–26.

[7] 李栋梁, 张佳丽. 黄河上游径流量演变特征及成因研究. 水科学进展, 1998, 9(1): 22–28.

[8] 申冠卿, 张源锋, 侯素珍, 等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响. 泥沙研究, 2007(1): 67–75.

[9] 王彦成, 冯学武, 王伦平, 等. 黄河上游干流水库对内蒙古河段的影响. 人民黄河, 1996, 18(1): 5–10.

[10] 冉立山, 王随继, 范小黎, 等. 黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其水沙响应分析. 地理学报, 2009, 64(5): 531–540.

[11] 冉立山, 王随继. 黄河内蒙古河段河道演变及水力几何形态研究. 泥沙研究, 2010(印刷中).

[12] 王随继, 范小黎, 赵晓坤. 黄河上游宁蒙河段悬沙冲淤量时空变化及其影响因素. 地理研究(审稿中).

[13] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Yoshiki Saito, et al. Step-wise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities. Global and Planetary Change, 2007, 57 (3–4): 331–354.

[14] Pereira L S, Goncalves J M, Dong B, et al. Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the upper Yellow River Basin, China. Agricultural Water Management, 2007, 93 (3): 109–122.

[15] Zahar Y, Ghorbel A, Albergel J, Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia). Journal of Hydrology, 2008, 351(3–4): 318–330.

[16] Ta Wanquan, Xiao Honglang, Dong Zhibao. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs’ operation. Geomorphology, 2008, 97: 249–259.

[17] 国家地震局鄂尔多斯活动断裂课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地质出版社, 1988.

[18] 戴英生. 黄河的形成与发育. 人民黄河, 1986(6): 2–7.

[19] 侯素珍, 王平, 常温花, 等. 黄河内蒙古河段冲淤量评估. 人民黄河, 2007, 29(1): 21–23.

[20] 赵文林. 黄河泥沙. 郑州: 黄河水利出版社, 1996.

[21] 王随继. 黄河流域河型转化现象初探. 地理科学进展, 2008, 27(2): 10–17.

## Flood Processes and Channel Responses in Typical Years of the Different Channel Patterns in Neimenggu Reaches of the Upper Yellow River

WANG Suiji<sup>1</sup>, FAN Xiaoli<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,  
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The sedimentation on channel bed in the Neimenggu (Inner Mongolia) reach of the upper Yellow River has been relative severe since the last two decades. Some of researchers expect that artificial flood can erode the channel bed and lower the channel bed. In this work, the discharge–water level hydrographs of the maximal floods that occurred in the typical years have been revealed, and the shapes of the hydrographs include single line, clockwise loop, anticlockwise loop, and complex line plus anticlockwise loop, anticlockwise loop plus line, “8”–shape plus line, nested anticlockwise loop and cross lines. These relations can reflect whether the channel bed is eroded or deposited, when eroded or deposited, and whether the erosion and deposition are iterative. The responses of the Neimenggu channel of the upper Yellow River are different from those at the downstreams. The downward erosion and the depressed channel bed have a braiding channel pattern, the evident upward aggradation has a meandering pattern, and the slight upward aggradation or the balanced erosion–deposition has a straight pattern. This trend is adaptive to the stream power decrease downstreams. The decrease of concentration of suspended sediment downstream is the evidence. Artificial flood can not change the sedimentation trend on the meandering channel bed and can not help people to inhabit in the Hetao plain to avoid the flood hazard.

**Key words:** flood processes; channel response; different channel pattern reaches; Neimenggu reach; upper Yellow River

本文引用格式:  
王随继, 范小黎. 黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征. 地理科学进展, 2010, 29(4): 501–506.