

黄河内蒙古段洪峰特征及水沙关系变化

师长兴, 邵文伟, 范小黎, 周园园, 贺 莉

(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院重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 本文通过黄河头道拐站 1950-2009 年水沙年系列进行突变点分析, 识别出 1969 年、1986 年、1996 年 3 个突变点, 将黄河内蒙古段水文过程划分为 4 个时期。在此基础上, 利用内蒙古段 6 个水文站长系列日流量、日含沙量及泥沙组成数据, 划分了各站的夏汛洪峰, 并统计分析了分期洪峰的水沙分布特征和洪峰水沙关系, 揭示出夏汛洪峰流量和输沙率逐渐减少的规律: 1996-2006 年与 1954-1968 年相比, 夏汛洪峰水沙量占全年水沙的比例都减少了约一半, 流量级频率与输沙率乘积的峰值对应的流量也降低了约一半。分析认为, 黄河内蒙古段夏汛洪峰特征阶段性变化既有大型水库的影响, 又有气候变化及人类活动的影响, 而且后者的作用越来越大。分析发现, 20 世纪 90 年代以前, 黄河上游水沙变化只是改变了内蒙古段来沙中粗颗粒泥沙的水沙关系, 显示出大流量输送粗颗粒泥沙能力相对增强的趋向; 进入内蒙段后, 通过泥沙冲淤调整, 分粒径组泥沙水沙关系变化比较复杂。近期在水沙条件巨大变化下, 河流的输沙特性并没有发生根本变化, 但是无论全沙还是分组沙, 水沙关系曲线变陡, 大流量输送泥沙能力相对增强。

关 键 词: 黄河; 洪峰; 水沙关系

1 引言

黄河自磴口进入河套平原。河套平原是新生代断陷盆地, 黄河在此发育为典型的冲积性河道(图 1)。其中磴口至三湖河口段属游荡性河道, 河道长约 214 km, 比降 0.144‰ 左右, 滩槽高差 1~2 m, 部分河段主槽已高出堤内地面; 三湖河口以下至头道拐河段属弯曲性河道, 长 311 km, 比降 0.103‰, 主槽相对较稳定, 滩槽高差大于 2 m。黄河内蒙古河段径流主要来自上游, 区间河套灌区每年从黄河引

水, 主要入黄支流为十大孔兑, 但径流十分小, 与黄河干流径流相比, 几可忽略不计。

自黄河上游陆续建设了三盛公、青铜峡、刘家峡、龙羊峡等水利工程以来, 黄河内蒙河段的水沙条件发生了剧烈变化, 引起了显著的河床冲淤调整, 近 20 多年来河床因淤积抬高且缩小, 行洪能力下降, 凌汛漫滩灾害频率增加。因此, 许多学者对黄河内蒙古段的水沙变化和河道冲淤等相关问题开展了多方面研究^[1-8]。洪水是造床的主要动力, 因此分析洪峰特征和水沙关系变化及其原因是掌握水沙条件变化情势的关键, 对于水沙调节和河道整治十分重要。由于其重要性, 已有研究在不同河流上对这一问题进行了探讨^[9-13]。本文利用时间跨度约 60 年的内蒙河段水文资料针对这一问题进行分析研究。

2 数据来源和研究方法

磴口以下沿河套河段先后设置了 7 个水文站,



图 1 黄河内蒙古段简图

Fig.1 Sketch of the Inner Mongolian reach of the Yellow River

收稿日期: 2012-03; 修订日期: 2012-06.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403305); 中国科学院地理科学与资源研究所 2009 年度自主部署创新项目(200904004)。

作者简介: 师长兴(1963-), 男, 河北正定人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事河流地貌、流域物质迁移与环境变化研究。

E-mail: shicx@igsnrr.ac.cn

包括磴口、巴彦高勒、渡口、三湖河口、昭君坟、包头、头道拐。渡口站水文测量止于1972年底,巴彦高勒起于1973年初,两站距离相近,可作为一个水文站对待;包头站水文测量终于1965年,昭君坟始于1966年,两站也较靠近,可作为一个水文站对待。所以,整个区间可看作有5个水文站。1958年后在磴口和巴彦高勒之间,修建了三盛公水利枢纽。由于磴口站水文数据自1962年以后才有,而且缺测年份较多,又在三盛公水利枢纽以上,所以不用磴口站水文泥沙数据,只分析巴彦高勒以下4站的水沙数据。本文搜集了1951年以来4站的日流量、含沙量、月均泥沙颗粒组成数据。其中除了部分站有个别年份缺测外,还缺少20世纪90年代-2005年和2007年的数据。

利用收集到的各站水沙数据,设定一定洪峰峰谷差值,并考虑含沙量的变化,首先对头道拐的场次洪峰进行了识别,然后,根据洪峰传播的时间,向上划分出各水文站对应的洪峰,每站共划分出212场夏汛洪峰;进而计算了每场洪峰的水量、平均流量、以及洪峰的输沙量、颗粒分级输沙量。在此基础上,利用统计分析方法,分析探讨了黄河内蒙古套河段洪峰特征变化及水沙关系。

3 河段年水沙变化的阶段性

为了分析研究河段洪峰水沙变化的阶段特征,并揭示径流输沙变化的突变特性,利用1950-2009年头道拐站连续的年径流及输沙序列,采用有序聚类法与秩和检验法^[14]分析了突变点。如图2所示,在0.01显著水平上,年径流系列在1986年存在一个明显的突变点,年输沙系列同样也在这一年发生

了显著突变;此外,在1969年也存在一个次级的突变点。在0.05显著水平上,年径流系列在1996年也存在一个突变点。由此以突变点将河段水沙变化划分为4个阶段,即1951-1968年、1969-1985年、1986-1995年和1996-2009年。

4 洪峰水沙规模及阶段变化

按1954-2009年间有资料的39年的水沙统计,巴颜高勒站夏汛洪水总量为5747亿 m^3 ,总输沙量40.2亿t。无论是巴颜高勒站还是头道拐站,夏汛洪量占到年总水量的60%,沙量占全年来沙量的82%。加上1991-2002年间资料,头道拐站夏汛洪量及其沙量占全年的比例分别为56%和80%。

夏汛洪量及沙量占全年水沙的比例阶段变化明显。以头道拐站为例,1954-1968年期间总洪量占总水量的69%,输送全部来沙量的86%;1969-1985年间分别降低至57%和82%;1986-1995年间为40%和67%;1996-2009年间又分别降至32%和49%(图3),即洪峰流量占年径流量的比例及其输沙量占年输沙量的比例越来越低。

5 洪峰流量及输沙分布特征

黄河内蒙古段洪峰平均流量也随时间明显逐渐减小。仍以头道拐为例,1954-1968年平均流量为1429 m^3/s ,1969-1985年为1189 m^3/s ,1986-1995年为816 m^3/s ,1996-2009年只有560 m^3/s 。

随着洪峰流量的减少,洪峰流量的分布也发生了变化。以500 m^3/s 间隔统计洪峰平均流量的分布频率(图4)。可见,1952-2009年洪峰平均流量以

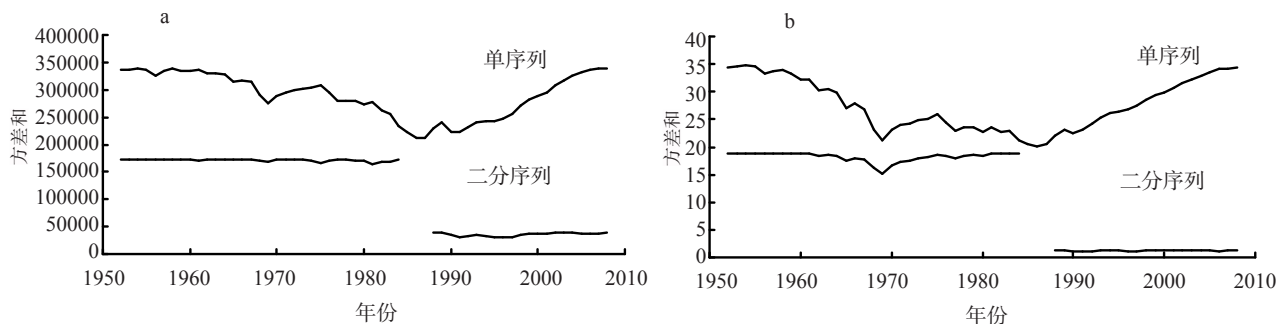


图2 1950-2009年头道拐站径流(a)与输沙(b)突变点分析结果

Fig.2 Graph of abrupt changes in the series of annual runoff (a) and sediment load (b) detected by sequential cluster analysis and order test

500~1000 m³/s 发生频率最高,大于 1000 m³/s 流量发生频率逐渐降低。从分阶段来看,1995 年以前 3 个时期中发生频率较高的流量都在 500~1000 m³/s 间,但较大的流量级发生频率越来越低。1996-2009 年发生频率最高的流量在 0~500 m³/s 间,没有大于 1500 m³/s 的日均流量。

流量发生频率与输沙率的乘积反映不同流量在河床塑造中所起作用的大小,被称为地貌功,其中的最大值所对应的流量可作为造床流量^[15]。如图 5 所示,随着低洪峰流量频率的增加和高洪峰流量的减少,造床流量在减小。其中,1952-1968 年和 1969-1985 年最大值在 1500~2000 m³/s 间;1986-1995 年最大值在 1000~1500 m³/s 间;1996-2009 年

最大值降至 500~1000 m³/s 间。

6 洪峰水沙关系

6.1 全沙

流量(Q)与含沙量(S)或流量与输沙率(Q_s)幂指数关系反映流域产沙特征及河流输沙特性^[16],这一水沙关系可以表示为:

$$Q_s = aQ^b \tag{1}$$

式中: a 为系数; b 为幂指数。利用内蒙河段 4 个水文站的洪峰数据,点绘了各站洪峰日平均流量与输沙率之间的关系。图 6 以头道拐站 1952-2009 年为例显示二者间存在显著的幂指数关系。

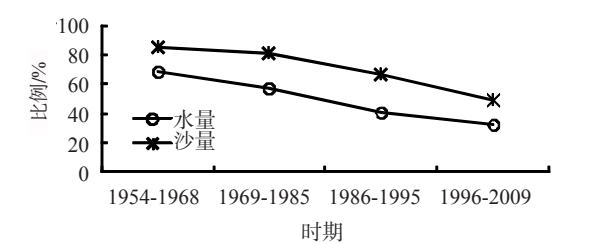


图 3 头道拐站夏汛洪峰流量和输沙量占全年水沙量比例

Fig.3 Changes in percentage of water discharge and sediment load of summer floods in annual totals

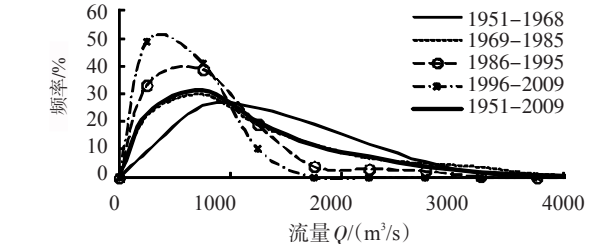


图 4 头道拐站夏汛洪峰平均流量发生频率

Fig.4 Frequency distribution of mean discharge of summer flood peaks recorded at Toudaoguai station

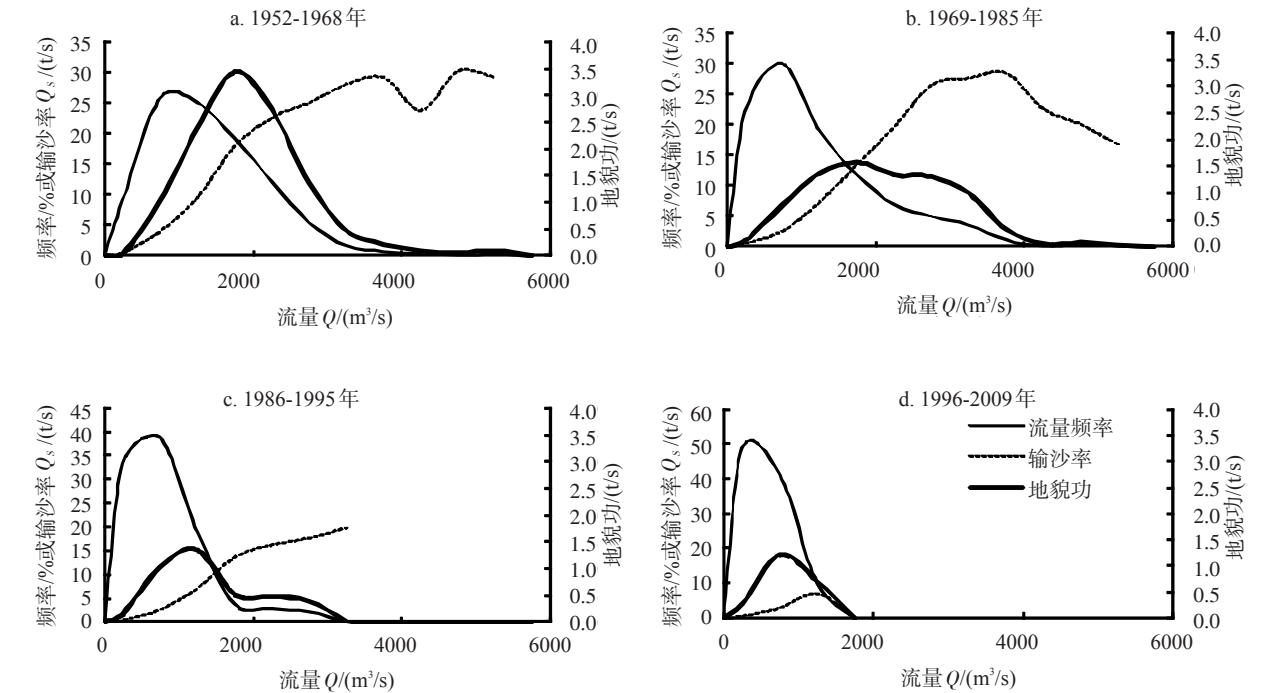


图 5 头道拐站不同时段洪峰平均流量发生频率与输沙率及其乘积图

Fig.5 Frequency distribution of mean discharge and sediment load of the summer flood peaks and their product

按不同时期建立了各站洪峰日平均流量与输沙率之间的回归关系,并统计检验回归方程的差异,发现巴彦高勒站水沙关系第一个时期与第二个时期在0.01水平上无显著差异,但后3个时期前后之间水沙关系差别显著。

$$1951-1968: Q_s = 0.00425 Q^{1.99} \quad (2)$$

$$1969-1985: Q_s = 0.00362 Q^{1.95} \quad (3)$$

$$1986-1990: Q_s = 0.00905 Q^{1.86} \quad (4)$$

$$2006-2009: Q_s = 0.00195 Q^{2.10} \quad (5)$$

式中: Q_s 为输沙量(kg/s); Q 为流量(m^3/s)。

三湖河口站、昭君坟站及头道拐站的水沙关系系数见图7。与巴彦高勒站不同,3站1969-1985年间水沙关系与1951-1968年间在0.01水平上有显著区别;1969-1985年间与1986-1990年间差别不明显;2006-2009年间头道拐站水沙关系系数值显著降低,幂指数显著抬高;三湖河口站此期的水沙关系与前一个时期在0.01水平上差别不显著。

通过统计检验对比同期沿程水沙关系,结果显示4个时期中1968年以前和1986-1990年间水沙关系沿程变化在0.01水平上不显著;1969-1985年和2006-2009年时期的水沙关系沿程变化显著,因此水沙关系系数与幂指数关系数据点分布范围较大(图8),且2006-2009年间水沙关系沿程变化最大。

6.2 不同粒径组泥沙

将悬沙粒度划分为<0.005 mm、0.005~0.05 mm、0.05~0.1 mm和>0.1 mm即粘土级颗粒、粉沙、极细沙和沙4组。本文建立了洪峰流量与分组粒径泥沙输沙率的幂函数关系。由图9可见,巴彦高勒站分组粒径泥沙的水沙关系中,<0.005 mm粒径组的系数 a 从1960-1968年至1986-1990年呈上升趋势,至2006-2009年又发生下降。幂指数 b 变化趋势恰好相反。其他粒径组水沙关系的系数 a 都

呈下降趋势,幂指数 b 都呈上升趋势。头道拐站前3个时期分组粒径泥沙的水沙关系的系数与幂指数变化比较复杂,<0.005 mm粒径组系数 a 有上升趋势,幂指数 b 有下降趋势;相反,0.05~0.1 mm粒径组 a 有下降趋势,幂指数 b 有上升趋势。其他两组粒径组泥沙的水沙关系的系数与幂指数变化趋势不明显。2006-2009年期间,与全沙一致,系数显著降低,幂指数显著抬高。统计检验不同时期不同粒径组泥沙水沙关系回归方程的差异,发现除个别时期外,都有显著区别。

无论在头道拐站还是巴彦高勒站,>0.1 mm粒径组水沙关系的系数和幂指数长期变化相比其他粒径组长期变化幅度最大。

用水沙关系系数的比值 Δa 和幂指数的差值 Δb 比较巴彦高勒站和头道拐站分期水沙关系的异

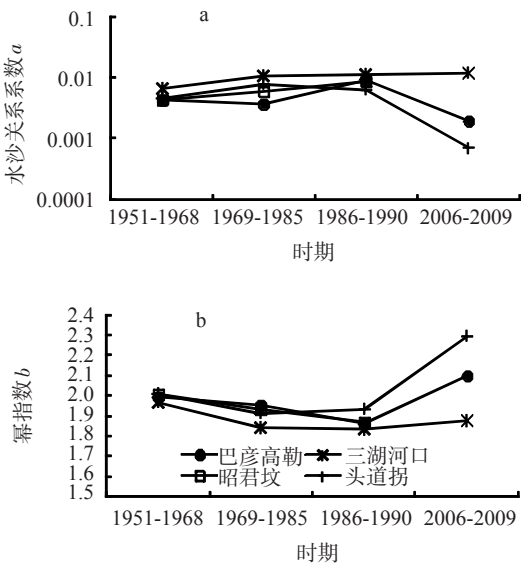


图7 内蒙河段水沙关系系数(a)与幂指数(b)变化
Fig.7 Changes of intercept (a) and slope (b) values of sediment rating curves for the Inner Mongolian reach

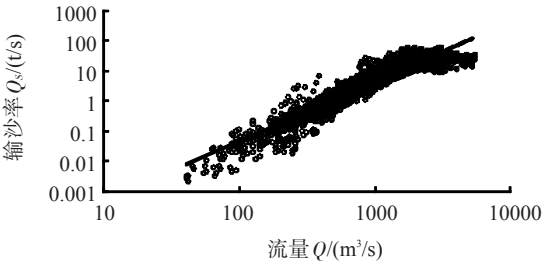


图6 头道拐站洪峰日平均流量与输沙率关系
Fig.6 Relationship of daily mean discharge and sediment load of summer floods recorded at Toudaoguai station

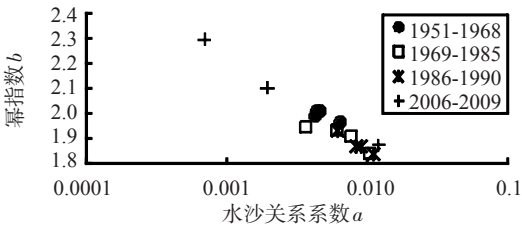


图8 内蒙河段四期水沙关系系数与幂指数关系图
Fig.8 Correlation between slope and intercept of sediment rating curves in four periods for the Inner Mongolian reach

同(图10)。对于<0.005 mm泥沙,巴彦高勒站水沙关系系数前两个时期比头道拐站的小,后两个时期比头道拐站大。巴彦高勒站与头道拐站的系数比值越来越大,幂指数之差则越来越小。1969-1985年期间巴彦高勒站0.005~0.05 mm粒径组水沙关系系数比头道拐站小,幂指数比头道拐站大,其他时期巴彦高勒站水沙关系系数都比头道拐站大,幂指数都比头道拐站小,2006-2009年巴彦高勒站与头

道拐站的系数比值最大,幂指数之差则最小。0.05~0.1 mm粒径组系数比值和幂指数之差在1960-1968年、1986-1990年和2006-2009年巴彦高勒站和头道拐站水沙关系在0.01水平上无差别,1969-1985年巴彦高勒站水沙关系系数比头道拐站的小,幂指数都比头道拐站的大。巴彦高勒站与头道拐站>0.1 mm泥沙的水沙关系系数的比值在前3个时期有上升趋势,幂指数之差有下降趋势。到

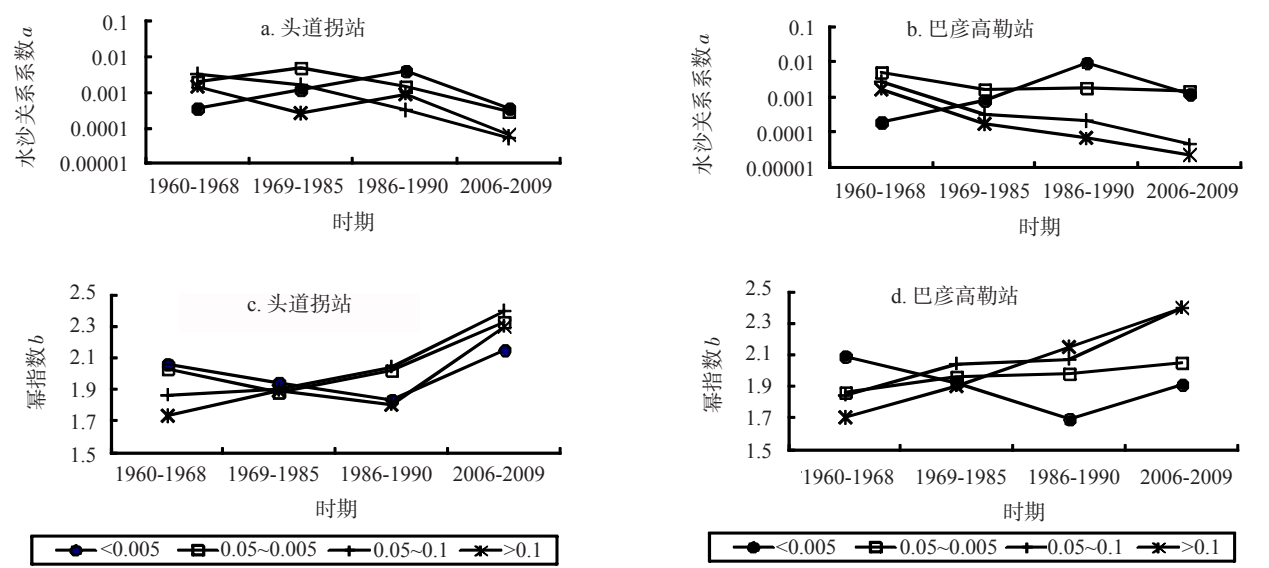


图9 不同时期头道拐站和巴彦高勒站汛期洪峰流量与4个粒径组泥沙输沙率之间关系系数和幂指数变化
Fig.9 Temporal changes in the slope and intercept values of sediment rating curves for four sediment grain size groups for Bayangaole (a, c) and Toudaoguai (b, d) stations

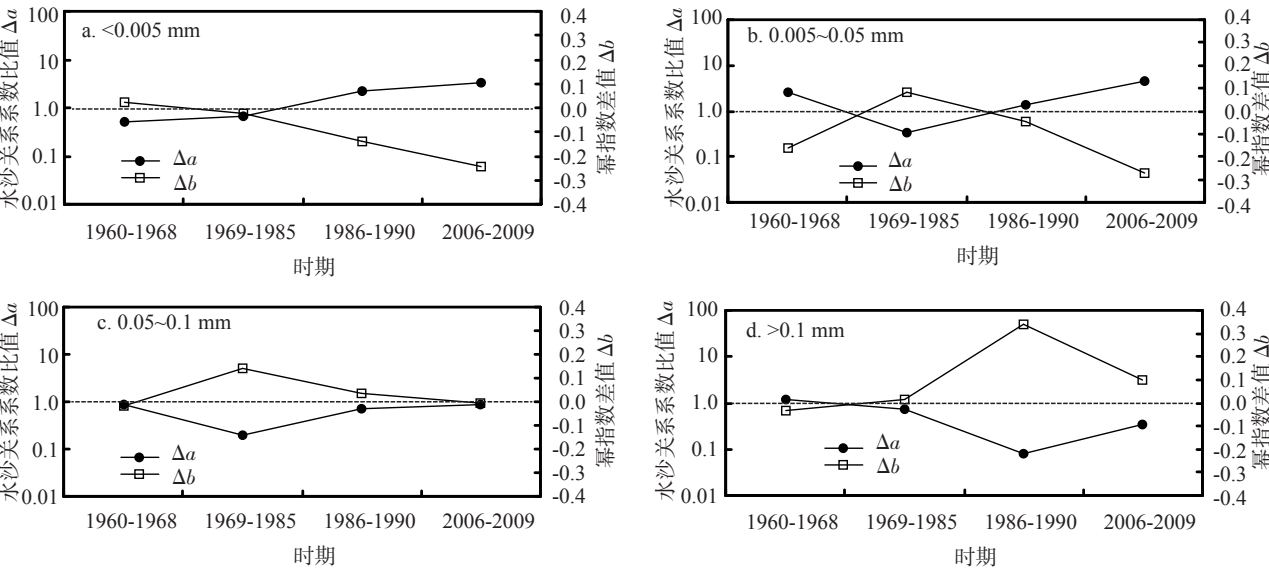


图10 不同时期巴彦高勒站与头道拐站汛期洪峰流量与4个粒径组泥沙输沙率之间的关系系数比值和幂指数差值
Fig.10 Ratios of intercept values and differences of slope values of sediment rating curves between Bayangaole and Toudaoguai stations for four sediment grain size groups

2006-2009年这一趋势发生了转变。只有1986-1990年巴彦高勒站水沙关系与头道拐站有明显区别,巴彦高勒站比头道拐站的系数小,幂指数大。

7 讨论

(1) 以上对内蒙河段沿程各站水沙过程进行了分析,结果显示,按头道拐站水沙过程存在3个突变点。3个突变点的发生原因有所不同。①第一个突变发生于1969年,是泥沙过程发生突变,发生这一变化的原因应该主要与上游水库的修建有关。建于宁夏黄河上的青铜峡和建于兰州上游的刘家峡水库先后于1967年和1968年投入运用。其中青铜峡水库正常蓄水位设计库容6.06亿 m^3 ,投入运用后的头5年因泥沙淤积,损失87%库容^[17],加上该水库大坝距巴彦高勒站不足250 km,对内蒙段河道冲淤变化和水沙关系变化起着重要作用。刘家峡水库正常蓄水位设计库容57亿 m^3 ,蓄水运行后至2005年的37年期间共淤积泥沙16.32亿 m^3 ^[18]。由此可见,青铜峡和刘家峡水库建成运用足以明显改变内蒙河段来沙过程。②1986年水沙过程同时发生突变,与龙羊峡水库建成投入运用恰好吻合。龙羊峡水库库容274亿 m^3 ,对径流进行多年调节,至2009年蓄水量215.4亿 m^3 ,年均9.4亿 m^3/a ,可见,龙羊峡水库对1986年突变点出现起到了一定作用。不过,其他因素作用更大。其中龙羊峡水库入口站唐乃亥站代表河源区来水,1986-2009年年径流量比1950-1986年减少了30亿 m^3/a ;兰州站与头道拐站径流差大致代表了宁蒙段的用水,1986-2009年两站年径流量差比1950-1986年增加了28亿 m^3/a 。③1996年之后水量减少明显,产生突变原因与1996年以后唐乃亥以上河源区来水减少、宁蒙河段的引水增加以及水库蓄水增加有关,其中河源区来水减少影响最大。据统计,头道拐站1996-2009年期间较1986-1995年期间平均径流量减少了38亿 m^3/a 。在唐乃亥站后一时期比前一时期减少了17亿 m^3/a ;而在兰州站减少量增加了9亿 m^3/a ,达到26亿 m^3/a 。究其原因主要是水库增蓄的结果。1998-2009年兰州以上大中型水库年增蓄水量平均为11.9亿 m^3/a ,其中龙羊峡、刘家峡水库年增蓄水量平均为11.7亿 m^3/a 。兰州至头道拐河段支流汇入可忽略不计,所以从兰州至头道拐径流量进一步减少是由于引水增加的结果。

(2) 内蒙河段夏汛洪峰特征的阶段变化也有不同原因。首先,相对来说,龙羊峡和刘家峡水库通过改变水沙的年内分配,对洪峰特征的变化起着比年际间水沙变化更大的作用。两库在汛期增加蓄水,在非汛期泄水^[19],1986年以前,刘家峡单独调蓄,汛期平均蓄水28亿 m^3/a ,非汛期平均泄水26亿 m^3/a 。同期,头道拐站汛期径流量比1968年以前17年平均减少约36亿 m^3/a ,即水库调节在汛期水量变化中约占79%的份额。不过1968-1986年头道拐站汛期径流量仍可达到130亿 m^3/a ,因此水库对水流的调节作用对洪峰流量分布改变程度不大,最大输沙率与频率乘积对应的流量级没变,同时在水库拦减泥沙条件下,内蒙河段发生了冲刷。1968-1986年宁蒙段夏汛期间引水量比1968年以前还略有减少,因此对夏汛洪峰特征的阶段变化影响不大。1986年后,龙、刘两库联合调节,至2004年,汛期平均蓄水增加到43亿 m^3/a ,其中1996年前约为42亿 m^3/a ,以后约为44亿 m^3/a 。非汛期平均泄水增加到37亿 m^3/a ,1996年之前和以后分别为40亿 m^3/a 和33亿 m^3/a 。1987-1995年头道拐站汛期径流量比1968年以前17年平均减少约94亿 m^3/a ,即水库调节在汛期水量变化中约占45%的份额。1996-2004年头道拐站汛期径流量比1968年以前17年平均减少约121亿 m^3/a ,即水库调节在汛期水量变化中约占36%的份额。宁蒙段引水增量在1987-1995年和1996-2004年分别只有约4亿 m^3/a 和7亿 m^3/a ,对汛期水量变化只起到约4%和约6%的作用。因此超过近期汛期径流减少量的50%以上应归结为兰州以上气候变化及支流流域内人类活动作用影响。这是造成内蒙河段黄河汛期洪峰流量不断减小,造床流量持续衰减的主要原因。

(3) 研究认为,水沙关系的变化与流域的产水产沙特征以及河道的冲淤特征有一定的联系^[16,20]。巴彦高勒站作为研究河段的进口站,其水沙条件代表了内蒙河段的来水来沙条件。由于上游流域产水产流的变化、水库水沙调节的影响,巴彦高勒站水沙条件不断变化,水沙关系不断改变。然而从以上的分析结果看,1990年以前的3个阶段全沙水沙关系没有随水沙条件发生明显的趋势性变化。只有2006-2009年期间水沙关系的指数 b 显著上升,系数 a 值显著下降。分粒径组泥沙情况有所不同。分粒径组泥沙中粉沙、极细沙和沙的水沙关系变化趋势性明显,与阶段性水沙量的变化有一定的

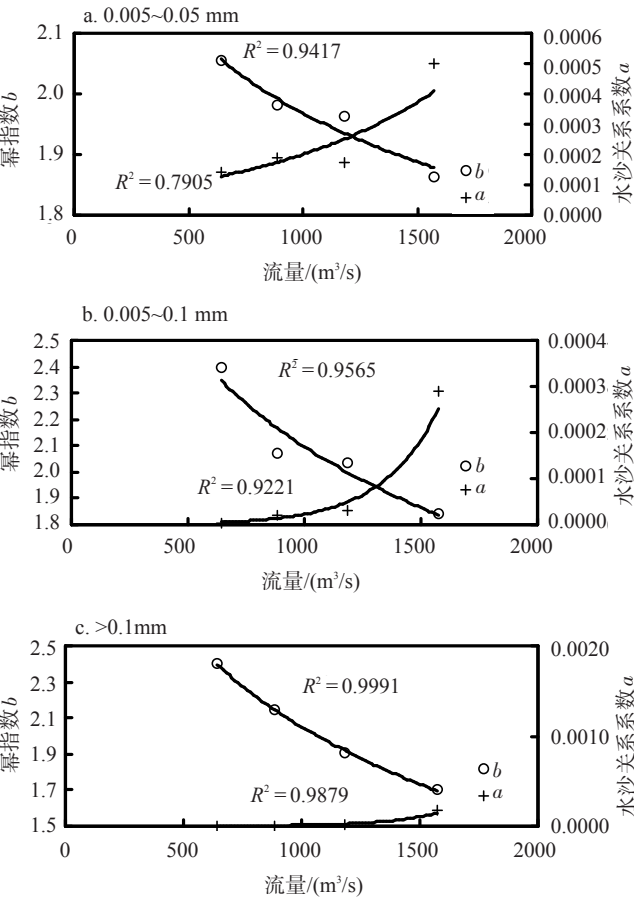


图 11 巴彦高勒站不同粒径组泥沙水沙关系系数和幂指数与时段平均流量关系

Fig.11 Correlation between mean water discharge and slope/intercept values of sediment rating curves of different sediment grain size groups in four periods at Bayangaole station

关系。水沙关系系数与时段平均流量成正比;幂指数与平均流量成反比(图 11)。由于更多地决定于流域产沙多少,粘土级泥沙水沙关系与来水条件关系不明显,同时也干扰了全沙的水沙关系。

(4) 然而,进入内蒙河段后,除 2006-2009 年阶段外,不论是全沙还是分粒径组泥沙水沙关系的系

数和指数与来水来沙条件缺少相关性。究其原因,估计与河段河道冲淤调整有关。因为内蒙河段是一条冲积性河道,冲积性河道允许水沙条件与河床边界条件间通过泥沙冲淤作适应性调整。调整过程中的负反馈机制^[15]保持下游水沙关系变幅较小且影响了与来水来沙的关系。表 1 是几个时期汛期来沙和河段冲淤情况,其中按逐年河段冲淤情况,将 1968 年以前划分为两个时期,1959 年前淤积比较严重,1960-1968 年河段总体为冲刷。1969-1985 年间河段总体也是冲刷。其后两个时期虽然巴彦高勒站输入与头道拐站输出之差显示河道是冲刷的,但如考虑区间十大孔兑来沙,河段总体仍是淤积的。在大幅度的冲淤调整条件下,内蒙河段 1990 年前的水沙关系与来水来沙条件缺少相关性。另外,由于各个时期沿程冲淤调整,从图 7 和图 9 可以看到,巴彦高勒站和头道拐站全沙和分粒径组泥沙水沙关系的变化在 1990 年以前基本上不同步。

(5) 2006-2009 年期间,来水来沙发生了更加明显的变化,巴彦高勒站和头道拐站水沙关系也发生了同步变化,但从图 7 三湖河口水沙关系变化过程看,通过泥沙冲淤,水沙关系仍可通过沿程调整保持稳定。因此图 7 和图 9 中头道拐站 2006-2009 年水沙关系的显著变化,是三湖河口—头道拐段在这一时段上游来水条件下所显示的输沙特征。另外,相对之前 3 个时期,不论粗细泥沙水沙关系都变陡。Asselman^[16]认为可以根据 $a-b$ 关系直线的相对位置判断河流的输沙特性,位置相对高表示河流的泥沙更多地由高流量级水流输送。图 8 中不同时期数据点基本上落在一条直线上,说明即使近期水沙条件发生显著变化,大流量泥沙输送能力有增加的趋势,但河流的输沙特性并没有发生根本变化。

(6) 还有一点值得注意的是,从图 10 中头道拐站和巴彦高勒站 $>0.1\text{ mm}$ 泥沙的水沙关系系数对

表 1 1954-2009 年黄河内蒙古段分时段来沙与冲淤情况(单位:万 t)

Tab.1 Sediment input and erosion/deposition in the Inner Mongolian reach(unit:10⁴ t)

时期	巴彦高勒站 洪峰输沙总量	全沙	<0.005 mm	0.005~ 0.05 mm	0.05~ 0.1 mm	>0.1 mm	十大孔兑 来沙
1954-1959	136189	49219	—	—	—	—	—
1960-1968	128811	-20880	-3846	-8473	-4085	-4476	18716
1969-1985	111596	-42705	-9038	-21679	-11466	-426	30658
1986-1990	19197	-831	-651	-75	-53	-51	23498
2006-2009	6163	-1372	-356	-860	-92	-64	—

比看,在1985年以前,河道冲刷中,两站差别不大,但在淤积中则差别明显;而细颗粒则相反。这反映了粗颗粒泥沙在冲刷过程中,能够被冲起的较少;淤积时粗颗粒更容易淤积的特征。

8 结论

(1) 按头道拐水文站的水沙过程,内蒙河段的水沙在1969年、1986年、1996年存在3个突变点。第一个突变泥沙显著减少,第二个突变水量和泥沙同时明显减少,第三个突变水量进一步明显减少。

(2) 1995年以前3个时期中,内蒙河段夏汛期洪峰发生频率较高的流量都在500~1000 m³/s间,但是较大的流量级发生频率越来越小;1996-2009年,0~500 m³/s间流量发生频率最高。流量发生频率与输沙率的乘积最大值对应的流量从1952-1968年1500~2000 m³/s,降低到1996-2009年的500~1000 m³/s之间。

(3) 黄河内蒙古段夏汛期水沙过程及洪峰特征的阶段性变化与青铜峡、刘家峡、龙羊峡水库的建成运行以及宁蒙河段引水有一定关系,同时也受河源区气候变化以及支流流域内人类活动的影响,而且近期后者的影响作用相对更大。

(4) 尽管不同时期各水文站间存在统计意义上不同的水沙关系,但是1990年前全沙水沙关系变化较小;内蒙河段出口站分粒径组泥沙水沙关系变化比较复杂,这一现象与来沙条件以及内蒙河段冲积性河道冲淤调整有关;河段入口站(巴彦高勒站)粉沙级粒度以上泥沙水沙关系幂函数指数有随时间增大的趋势,与上游水沙条件变化有关。近期河流的输沙特性没有发生根本变化,但是各站不同粒径组泥沙水沙关系幂指数显著增加,系数显著减小,大流量泥沙输送能力相对增强。

参考文献

- [1] 王彦成,王文生,李宁,等.黄河内蒙平原段1954年-1991年河床的冲淤演变.内蒙古水利,1994(2): 24-27.
- [2] 杨根生.河道淤积泥沙来源分析及治理对策.北京:海洋出版社,2002.
- [3] 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.泥沙研究,2007(1): 67-75.
- [4] 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.水利学报,2009,40(9): 1048-1054.
- [5] 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.泥沙研究,2010(5): 19-25.
- [6] 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.
- [7] 秦毅,张晓芳,王凤龙,等.黄河内蒙古河段冲淤演变及其影响因素.地理学报,2011,66(3): 324-330.
- [8] Yao Zhengyi, Ta Wanquan, Jia Xiaopeng, et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008. Geomorphology, 2011, 127(1-2): 99-106.
- [9] Hoffmann T, Thorndycraft V R, Brown A G, et al. Human impact on fluvial regimes and sediment flux during the Holocene: Review and future research agenda. Global and Planetary Change, 2010, 72(3): 97-98.
- [10] Benito G, Rico M, Sánchez-Moya Y, et al. The impact of late Holocene climatic variability and land use change on the flood hydrology of the Guadalentín River, southeast Spain. Global and Planetary Change, 2010, 70(1-4): 53-63.
- [11] Tena A, Batalla R J, Vericat D, et al. Suspended sediment dynamics in a large regulated river over a 10-year period (the lower Ebro, NE Iberian Peninsula). Geomorphology, 2011, 125(1): 73-84.
- [12] Lammersena R, Engelb H, van de Langemheena W, et al. Impact of river training and retention measures on flood peaks along the Rhine. Journal of Hydrology, 2002, 267(1-2): 115-124.
- [13] Fan Xiaoli, Shi Changxing, Zhou Yuanyuan, et al. Sediment rating curves in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River and their implications. Quaternary International, 2012, doi: 10.1016/j.quaint.2012.04.044.
- [14] 丁晶,邓育仁.随机水文学.成都:成都科技大学出版社,1988.
- [15] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学.北京:科学出版社,1987.
- [16] Asselman N E M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, 2000, 234(3-4): 228-248.
- [17] 李天全.青铜峡水库泥沙淤积.大坝与安全,1998(4): 21-27.
- [18] 郭家麟.刘家峡水库泥沙淤积形态分析.人民黄河,2011,33(1): 20-22.
- [19] 尚红霞,郑艳爽,张晓华.水库运用对宁蒙河道水沙条件的影响.人民黄河,2008,30(12): 28-30.
- [20] Syvitski J P, Morehead M D, Bahr D B, et al. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. Water Resources Research, 2000, 36(9): 2747-2760.

A Study on Characteristics and Sediment Rating Curves of Floods in the Inner Mongolian Reach of the Yellow River

SHI Changxing, SHAO Wenwei, FAN Xiaoli, ZHOU Yuanyuan, HE Li

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: In the series of annual runoff and sediment load recorded at Toudaoguai station in the period of 1950-2009, three abrupt changes in the years 1969, 1986 and 1996 were identified. According to the three abrupt changes, the hydrological series in the Inner Mongolian reach were divided into four periods. Summer flood peaks were identified from the series of daily water discharge and sediment concentration recorded at six hydrological stations along the Inner Mongolian reach, and statistical analysis was carried out on the frequency distribution of water discharge and sediment load as well as the sediment rating curves of the flood peaks. It was revealed that the water discharge and sediment load of the flood peaks decreased gradually from the earlier to the later periods, with both their percentages in the annual total and the water discharge corresponding to the peaks of product of the water discharge frequency and sediment load being reduced by about two times from the period 1954-1968 to 1996-2006. These changes could be attributed to the flow regulation by large dams and to the flow reduction by climate change, water diversion in the Ningxia-Inner Mongolian reach and other human interferences. It was found that changes in water and sediment input before the 1990s only altered the relation between water discharge and sediment load coarser than 0.005 mm at the entrance of the Inner Mongolian reach, with a tendency of coarser sediment being entrained by the larger flows. In the Inner Mongolian reach, no tendency was identified in the changes of relation of water discharge and sediment load due to the adjustment of sediment scour and deposition before the 1990s. As a result of the great variations of water and sediment inputs in recent years, although there was not an observable change in the sediment transport regime, the sediment rating curves of either the total load or the load of each particle size group became steep, showing an increasing tendency of sediment transport capacity of the larger flows.

Key words: the Yellow River; flood peak; sediment rating curve

本文引用格式:

师长兴, 邵文伟, 范小黎, 等. 黄河内蒙古段洪峰特征及水沙关系变化. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1124-1132.