

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.006

黄河尾间河道平滩流量变化对来水来沙的响应

侯志军¹ 李 勇^{1,2} 庞隆霞³

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;
3. 黄河水利委员会三门峡库区水文水资源局, 河南 三门峡 472000)

摘要 通过分析 1976 年清水沟流路以来黄河河口尾间河道冲淤变化及河槽萎缩特点,探讨了利津平滩流量变化对来水来沙及河口延伸的关系。结果表明,河口区平滩流量变化不仅与来水量、洪峰流量、水沙搭配系数、河口河长相关,而且与前期河床条件有关。给出了维持河口河道 4 000 m³/s 平滩流量需要的水量、洪峰流量及水沙搭配的定量关系以及河口延伸长度的限制条件,为河口尾间河道的综合治理提供一定的参考。

关键词 黄河河口河道 冲淤变化 平滩流量 来水量 水沙搭配系数 河口河长 响应关系

中图分类号 :P334⁺.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)02-0023-05

Response of bankfull discharge in tail reaches of Yellow River estuary to runoff and sediment load//HOU Zhi-jun¹, LI Yong^{1,2}, PANG Long-xia³ (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Water Resources and electricity, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Sanmenxia Reservoir Regions Hydrology Water Resource Bureau, YRCC, Sanmenxia 472000, China)

Abstract : By analyzing the characteristics of erosion-deposition variation and channel shrinkage in the tail reaches of Yellow River estuary since the tail reaches of Yellow River estuary changed to Qingshuigou flow path in 1976, the relationship between the bankfull discharge at Lijin station and the incident runoff and sediment as well as the extension of river length was studied. The results show that the bankfull discharge in tail reaches of Yellow River estuary relates with the runoff volume, flood peak discharge, coefficient of water and sediment, channel length and preceding bed-channel conditions. The quantitative relationship among the water volume, the peak discharge and the coefficient of the water and the sediment load for the bankfull discharge of 4 000 m³/s as well as the restriction conditions for the channel length is proposed. It may provide a reference for the integrated management of tail reaches.

Key words : tail reach of Yellow River estuary; erosion-deposition variation; bankfull discharge; runoff volume; coefficient of water and sediment; channel length; response relation

黄河口是黄河水沙的承泄区,也是黄河下游河道的侵蚀基准面,是黄河流域系统的重要组成部分。黄河河口河道的冲淤变化直接表现为河道平滩流量的变化,平滩流量的变化过程不仅与该区域河道的边界条件有关,同时还与来水来沙及河道的淤积延伸等条件有关。1976 年黄河入海口改道清水沟流路,此后的多年间水沙条件及河道边界条件都发生了较大变化,其中河道边界条件的改变包括 1976 年的河口改道、1996 年的清 8 改汴、1997 年及 2001 年在义和至清 6 之间的挖河疏浚工程以及入海流路的淤积延伸等。来水来沙变化主要发生在 1986 年后,进入黄河口的水沙条件发生变异,水沙量骤减,并发生了多次长时间断流^[1];1999 年小浪底水库建成并

投入运用,2002 年至今实施了调水调沙,使进入河口的水沙条件发生改变。以上这些因素的综合作用使河口区河道冲淤及平滩流量发生了显著的改变。本文着重分析黄河入海口改道清水沟流路以来河口区河段冲淤变化以及水沙条件变化等因素对河口区平滩流量的影响,并初步分析各个影响因子对平滩流量变化的影响关系。

国内外关于平滩流量的研究较多,大体可分为 3 类:①平滩流量的确定方法;②平滩流量作为造床流量,在河床演变中,特别是在河相关系研究中的应用;③平滩流量与不同影响因子之间的关系及计算方法。本文属于第③类研究。

以往较多的研究是将平滩流量与流域面积之间

建立关系,但不同研究者给出的指数不同,在0.05~0.95之间变化^[2],原因是不同地区河流的气候条件、下垫面条件、河床边界组成、来沙量和颗粒大小、人类活动影响程度等不同。钱意颖等^[3]认为,平滩流量与多年汛期平均流量有关,由此将平滩流量与过去若干年的水流条件联系起来,体现了现有河槽形态是多年累积作用结果的概念。林秀芝等^[4]研究了渭河华县站平滩流量对来水来沙的响应,发现平滩流量与年来水量和汛期水量2年滑动平均值的关系较好。吴保生等^[5]得到了黄河下游平滩流量与花园口汛期流量、汛期来沙系数4年滑动值之间的关系。胡春宏等^[6]得到了黄河下游平滩流量与花园口年均径流量之间的关系,并采用数学模型对黄河下游平滩流量对来水来沙的响应作了分析。虞邦义等^[7]采用不同方法对淮河中游造床流量进行了计算,并建立了造床流量与多年平均流量及汛期平均流量的经验公式。

概括以往研究可以得到如下认识:①平滩流量与流域面积联系起来的方法在黄河下游不宜采用,原因是黄河下游包括河口的来流受到的干扰程度较大,受到的影响因较多;②以某一频率的洪水作为平滩流量的方法太过粗略,黄河有大量的水沙资料不能充分利用;③用输沙量最大的方法所得平滩流量不够稳定,有时会由于有多个峰值难以确定;④将滑动平均流量作为自变量,在一定程度上考虑了前期来水条件的累积影响,对本文的研究具有重要的参考价值。

1 尾间河道冲淤变化

图1为黄河入海口改道清水沟流路以来黄河河口利津—清7河段累积冲淤量过程。从图1可以看出,黄河尾间河段的冲淤变化主要经历了1976—1979年强烈淤积、1979—1984年强烈冲刷、1985—1999年持续淤积及1999—2009年持续冲刷等4个阶段。1976—1979年间,受流路改道的影响,当年改道点以上发生溯源冲刷,但由于此期间来水来沙条件恶化,再加上改道点以下还未形成固定的河槽,水流漫流入海,流路范围内发生大量淤积,继而影响到

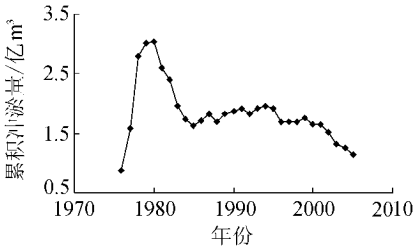


图1 利津—清7河段 1976—2009 年来累积冲淤量

改道。

1979年汛期,清4断面以下河道南摆,自此河口段河道相对稳定下来,单股河道形成,改善了行水条件,河道输沙能力增强,再加上1981—1983年有利的水沙条件,使该时期河口河道强烈冲刷。1985—1999年,受1986年后水沙变异、河口淤积延伸的影响,该时期为持续淤积阶段;1999年至今,受小浪底水库运用影响,该时期为持续冲刷阶段。可以看出,河道的冲淤变化主要受来水来沙条件影响,同时还受河道自身边界条件改变、河口淤积延伸等多种因素的影响^[8]。

1.1 河槽形态变化

在河道的冲淤变化中,横断面形态变化最为直观。图2为河口段渔洼断面1976年以来不同时期横断面形态变化。从图2中可以看出:①1979年与清水沟流路初期的1976年相比,主河槽产生较大的淤积抬升,平均淤高约2.2 m。②经过1979—1984年的累积冲刷,1984年主河槽较1979年变得又宽又深,河槽面积增大很多。③1984—1999年,随着来水来沙量减少,河槽出现淤积;1999年河槽较1984年变得窄浅。④1999年后因水沙条件的改善,主河槽有所冲刷加深,河宽及滩面变化不大。

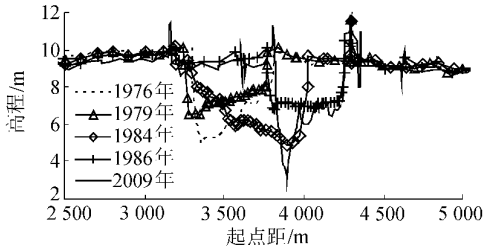


图2 不同年份渔洼断面形态变化

1.2 平滩面积及河宽变化

河道冲淤及平滩流量变化主要反映在平滩面积的变化。图3为河口河段渔洼断面平滩面积及平滩河宽变化过程。从图3中可以看出,渔洼断面的主槽面积变化过程与图1所示河口河段累积冲淤量的变化过程相似,即河口河段的冲淤变化与渔洼断面平滩面积变化趋势是一致的。另外,平滩河宽与平

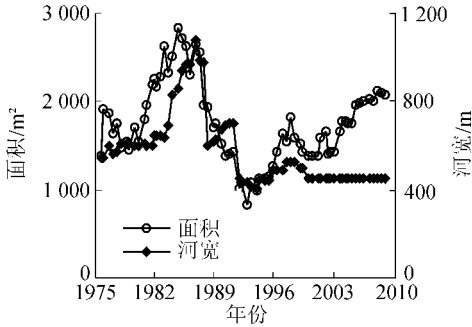


图3 渔洼断面平滩面积及河宽变化过程

滩面积具有较好的同步滞后性,说明主槽面积的增大必然引起河宽的增大,但2000年以后,随着主槽面积的增大,河宽变化不大,说明该阶段主槽主要以冲深为主。

1.3 平滩流量变化

河道的冲淤变化,特别是主河槽的冲淤变化必然引起平滩流量的调整,平滩流量是河道冲淤变化的重要指标。平滩流量变化是与一定来水来沙条件相适应的,不同的水沙条件塑造不同的河槽,因此对应不同的平滩流量。河口改道清水沟以来,利津站断面平滩流量及当年来水量变化见图4。从图4中可以看出,利津站断面平滩流量与年来水量过程具有一定的同步性。1976年汛期水沙条件较好,改道点以上河道发生明显冲刷,平滩流量较大;1977—1981年来水量偏小,主河槽发生淤积,平滩流量减小到 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右;年来水量较丰的1981—1985年,河口河道发生了沿程和溯源冲刷,平滩流量增大至 $5000\sim 6000\text{ m}^3/\text{s}$,基本恢复到改道初期状况;1986年以后,由于水沙条件的变化,年来水量减少、水沙搭配不合理,使平滩流量大幅度减小至 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右;1996年后,受清8改汴溯源冲刷的影响,主河槽发生冲刷,平滩流量略有增加;2002年以后小浪底水库实施连续调水调沙,尽管水量不大,但来沙量较小,使河口河道主槽发生持续冲刷,平滩流量逐步增大,到2009年利津站平滩流量已增大到 $4500\text{ m}^3/\text{s}$ 以上。可以看出,河口尾闾河段平滩流量有随来水量的增大而增大、随来水量的减少而减少的趋势,但这种关系并不完全对应,说明平滩流量还受其他因素影响,如洪峰流量大小及历时、前期河床条件及河口流路淤积延伸等。

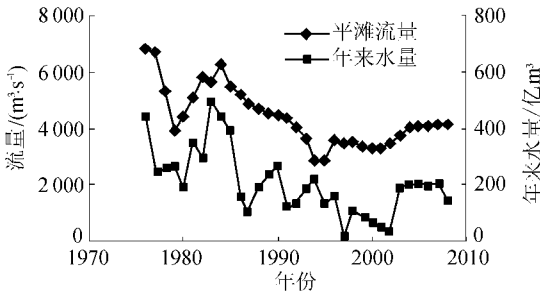


图4 利津站平滩流量与年来水量变化

1.4 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时的水位变化

同流量水位变化在一定程度上可以反映河道的冲淤变化及平滩流量的变化过程。图5为利津站 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时水位及年流量的变化过程,从图5中可以看出,平滩流量与最大流量具有较好的跟随性,且 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时水位的变化与平滩流量、最大流量有较好的反对应关系,说明河道的冲淤引起

同流量水位的变化,同时导致平滩流量的变化。

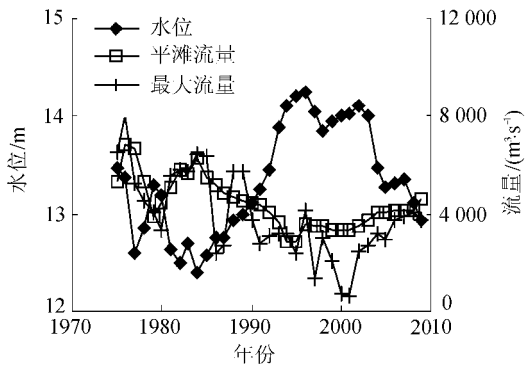


图5 利津站 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时水位及年流量的变化

2 平滩流量变化与来水来沙量的响应关系

2.1 平滩流量变化对来水量的响应

河口区的平滩流量不仅与当年来水量有关,同时也与往年来水量有关,往年的来水量累积作用结果代表前期水沙条件影响。分析发现,利津站平滩流量与年来水量及汛期水量的2年滑动组合值相关较密切,即年来水量当年占0.4权重、上年占0.6权重(图6)以及当年汛期水量占0.4权重上年占0.6权重的水量组合值(图略)与利津平滩流量的相关性较强,其相关系数 R 均在0.87以上。可见,利津站的平滩流量随着年(或汛期)来水量的增大而增大,且上年水量(或汛期水量)对当年平滩流量的塑造起主要作用,当年水量(或汛期水量)起次要作用。由图6还可以看出,若要维持河口区平滩流量 $4000\text{ m}^3/\text{s}$,则利津站年水量应大于或等于150亿 m^3 ,或汛期水量大于或等于100亿 m^3 。

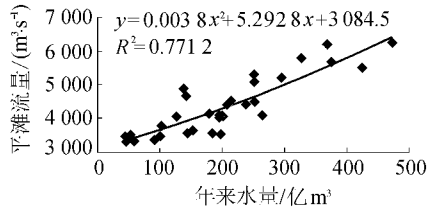


图6 利津站平滩流量与2年滑动年平均水量关系

刘成^[9]在分析黄河干流水沙变化时指出,黄河下游2000年以后的6年来水平均值已减少到132亿 m^3 ;胡春宏等^[10]在探讨黄河河口平滩流量时曾指出,如果维持 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 平滩流量,则年来水量应大于或等于223亿 m^3 或汛期水量大于或等于141亿 m^3 ;刘晓燕等^[11]在探讨维持黄河下游主槽平滩流量 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 所需水量时指出,小浪底水库拦沙期结束后,基本维持黄河下游主槽过流能力 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右所需的低限洪水水量约为150亿 m^3 ;本文研究应用的水沙系列为1976—2009年,年来水量与平滩流量关系较好,且与刘晓燕等^[11]的研究成

果基本一致。

2.2 平滩流量变化对最大流量的响应

河口河段平滩流量变化不仅与来水量有关,同时还与洪峰流量大小及其历时、前期河床条件有关。分别点绘了利津站平滩流量与当年最大3d流量平均值(代表峰期流量大小及历时)与上一年平滩流量(代表前期河床条件)加权组合值的相关关系(图7),当年洪峰流量与上一年平滩流量加权组合值关系(图略)。从图7中可以看出,河口区河段平滩流量与当年最大3d流量、洪峰流量及前期河床条件综合值相关关系很好,前期河床作用占80%,当年洪峰流量或最大3d流量作用占20%,相关系数R接近0.98。即平滩流量主要是多年水沙条件累计塑造河床的结果,且与当年来水大小及过程直接相关。

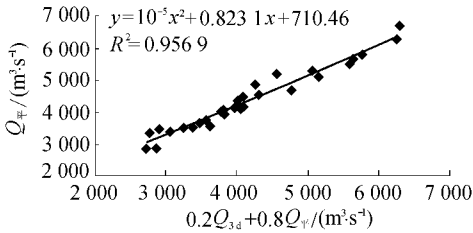


图7 利津站平滩流量与当年最大3d流量

根据河口区利津站平滩流量与当年最大3d流量、前期平滩流量关系(图7)以及当年洪峰流量和前期平滩流量关系,可以推算出若要维持河口区平滩流量大于或等于4000 m³/s,不仅需要一定的年来水量和汛期水量,同时还要保证洪水期最大3d流量平均值大于或等于3000 m³/s,或者保证当年洪峰流量大于或等于3200 m³/s。

2.3 平滩流量变化与水沙搭配系数的关系

由于进入河口区的水沙主要来自汛期,1976年以来年平均汛期水量约占年来水量的60%,沙量约占年来沙量的90%,且河槽主要的冲淤变化也在汛期。分析汛期水沙搭配系数(汛期平均含沙量/汛期平均流量)与平滩流量的关系,发现平滩流量与汛期水沙搭配系数的2年滑动值(当年权重为0.5,上一年权重为0.5)存在较好关系(图8),其相关系数达0.83。由此

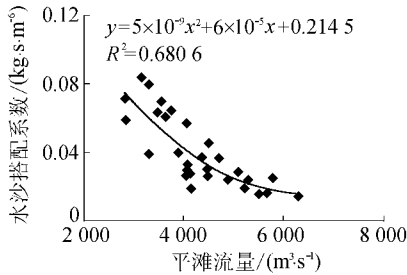


图8 利津站平滩流量与2年滑动汛期水沙搭配系数的关系

可见,河口利津站平滩流量不仅与当年水沙搭配情况有关,而且还受往年水沙搭配情况的影响,平滩流量与汛期水沙搭配系数呈反比关系,即平滩流量随汛期水沙搭配系数的增大而减小。如果使河口河段平滩流量大于或等于4000 m³/s时,则利津站汛期水沙搭配系数应小于或等于0.04(kg·s)/m⁶。

水沙搭配系数是反映来水来沙搭配关系的一个重要指标,它间接反映水流挟沙能力的大小,与河道的冲淤存在一定关系,但相关性不是很高,而平滩流量与河道冲淤密切相关。因此,水沙搭配系数与平滩流量存在一定关系,但相关性也不是很高。

2.4 河口淤积延伸对平滩流量的影响

河口河段因其特殊的地理位置,其平滩流量不但与该河段来水来沙有关,还受河口因素影响。河口因素主要指河口淤积延伸、海洋的潮流和波浪等方面。潮流和波浪等海洋动力要素对河口入海区河段的短期冲淤有一定的影响,但因其变化较快,很难用一个时段的特征值去描述它,这里暂不考虑。对于河口的淤积延伸,可以用西河口以下河长来描述,图9为1976年以来利津站平滩流量与西河口以下河长的关系。从图9中可以看出,西河口以下河长与利津站平滩流量呈反比关系,其相关系数R约为0.75,说明河口的淤积延伸不但加重河口河段的淤积^[8],而且还制约着平滩流量的增加,如果维持河口区平滩流量大于或等于4000 m³/s,则西河口以下河长应控制在60 km以内。

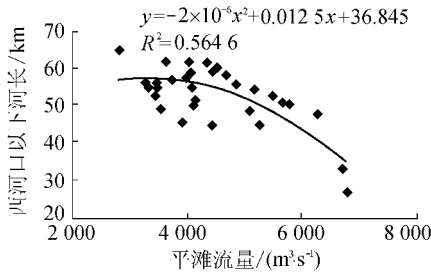


图9 利津站平滩流量与西河口以下河长的关系

河口的延伸长度间接反映河道的冲淤变化,延伸长度越大,侵蚀基准面越高,河道就越容易淤积;反之则容易冲刷。由文献^[8]可知,河口的延伸长度与河口河道的冲淤存在一定的关系,但关系不太密切,且利津站断面距黄河入海口较远,其平滩流量变化与河口延伸长度存在一定关系,但相关性不是很强。

2.5 河口平滩流量的综合影响因素分析

由以上分析可知,河口河段的平滩流量与多因子存在相关关系,其中平滩流量与上年平滩流量、当年洪峰流量(或最大3d流量)的加权组合值关系最为密切,因该因子含有平滩流量,暂不进行综合分

析) ,其次是年来水量(或汛期水量)的2年滑动组合值,与水沙搭配系数2年滑动组合值、西河口以下河长的相关性稍弱。为全面表述平滩流量与各相关因子之间的关系,运用多元回归方法,建立平滩流量与水沙过程、淤积延伸长度的综合关系式:

$$Q_{\text{平}} = 712.5(0.6W_{\text{上}} + 0.4W_{\text{当}})^{0.351}(0.5\rho_{\text{上}} + 0.5\rho_{\text{当}})^{-0.028}L^{-0.01} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{平}}$ 为当年平滩流量, m^3/s ; $W_{\text{上}}$, $W_{\text{当}}$ 分别为上年来水量、当年来水量,亿 m^3 ; $\rho_{\text{上}}$, $\rho_{\text{当}}$ 分别为上年水沙搭配系数及当年水沙搭配系数($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$); L 为当年西河口以下河长,km。

式(1)的复相关系数 $R = 0.93$,可以看出,式(1)的复相关系数明显高于单因子与平滩流量的相关系数,由式(1)中3项指数的正负可知,尾间河道平滩流量随来水量的增大(或减小)而增大(或减小),随水沙搭配系数的增大(或减小)而减小(或增大),随西河口以下河长的增大(或减小)而减小(或增大),这与单因素分析的结果是一致的。比较3项指数的大小可知,0.351远大于-0.028及-0.01,说明平滩流量与来水量的关系比与水沙搭配系数及河长的关系要密切得多。

3 结 语

河口区河道平滩流量的大小反映了主槽过洪能力。1976年黄河入海口改道清水沟流路以来,河口河段发生了较大的冲淤变化,从而引起了平滩流量的较大变化。河口区平滩流量不仅与来水来沙量有关,同时还与前期河床条件、河口的淤积延伸等因素有关。

河口河段平滩面积与平滩河宽基本呈正比关系,平滩流量与洪峰流量有较好的跟随性,且与同流量($3000\text{m}^3/\text{s}$)水位成反比,平滩流量与前期平滩流量、来水量、洪峰流量、最大3d流量存在较好的正相关关系,并与水沙搭配系数、河口河道长度呈负相

关关系,同时与前期河床条件存在较大关系。

如果维持河口河段平滩流量大于或等于 $4000\text{m}^3/\text{s}$,则需要年来水量大于或等于150亿 m^3 ,或汛期水量大于或等于100亿 m^3 ,且满足洪峰流量大于或等于 $3200\text{m}^3/\text{s}$ 或最大3d洪峰平均流量大于或等于 $3000\text{m}^3/\text{s}$,水沙搭配系数大于或等于 $0.04(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$ 的水沙条件,同时还应控制西河口以下河长小于或等于60km。

参考文献:

[1] 茹玉英,刘杰,朱岐武,等.黄河口水沙变异特征研究[J].人民黄河,2004(12):44-47.
[2] McCANDLESST L. Maryland stream survey: bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Allegheny Plateau and the Valley and Ridge Hydrologic Regions[R]. Beijing: Fish and Wildlife Service Chesapeake Bay Field Office, 2003.
[3] 钱颖颖,吴知,米粹侠,等.关于在多沙河流上修建水库保持有效库容的初步分析[G]//水库泥沙报告汇编.黄河水库泥沙观测研究成果交流会文集.郑州:黄河水利科学研究院,1972.
[4] 林秀芝,田勇,伊晓燕,等.渭河下游平滩流量变化对来水来沙的响应[J].泥沙研究,2005(5):1-4.
[5] 吴保生,夏军强,张原锋.黄河下游平滩流量对来水来沙变化的响应[J].水利学报,2007,38(7):886-892.
[6] 胡春宏,郭庆超,陈建国,等.塑造和维持黄河下游中水河槽措施研究[J].水利学报,2006,37(4):381-388.
[7] 虞邦义,郝玉锁,赵凯.淮河中营造床流量计算[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(2):210-214.
[8] 侯志军,由宝宏,李士国.近年来黄河尾间河道冲淤特性分析[J].泥沙研究,2009,1(1):48-53.
[9] 刘成.黄河干流沿程水沙变化极影响因素分析[J].水利水电科技进展,2008,28(3):1-7.
[10] 胡春宏,张治昊.黄河口尾间河道平滩流量与水沙过程响应关系[J].水科学进展,2009,20(2):209-214.
[11] 刘晓燕,申冠卿,李小平,等.维持黄河下游主槽平滩流量 $4000\text{m}^3/\text{s}$ 所需水量[J].水利学报,2007,38(9):1140-1144.

(收稿日期 2010-06-04 编辑:方宇彤)

(上接第15页)

[8] 吴作平,杨国录,甘明辉.荆江—洞庭湖水沙数学模型研究[J].水利学报,2003,34(7):96-100.
[9] FANG Hong-wei, CHEN Ming-hong, CHEN Qian-hai. One-dimensional simulation of non-uniform sediment transport under unsteady flows[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(4):316-328.
[10] 郑毅,方红卫,韩冬.DWSM模型产汇流模块的原理及应用[J].南水北调与水利科技,2008,3(3):28-31.
[11] SL265—2001 水闸设计规范[S].
[12] 北京市水利科学研究所.北运河北关分洪枢纽改建工

程拦河闸水工模型试验研究[R].北京:北京市水利科学研究所,2007.
[13] 北京市水利科学研究所.北运河北关分洪枢纽改建工程分洪闸水工模型试验研究[R].北京:北京市水利科学研究所,2007.
[14] 北京市水利科学研究所.北运河杨洼闸改建工程水工模型试验研究[R].北京:北京市水利科学研究所,2005.
[15] 天津水利水电勘测设计研究院.北三河系防洪规划[R].天津:天津水利水电勘测设计研究院,2004.

(收稿日期 2010-05-06 编辑:高建群)