

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222358

非恒定来流过程对复式河道水动力的影响试验研究

付俊^{1a}, 张涛涛^{2, 1b}, 刘佳明^{1a}, 刘杰卿^{1a}

(1. 河海大学 a. 水利水电学院; b. 水科学研究院, 江苏 南京 210098;

2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 非恒定来流过程改变了复式河道水动力特性, 进而决定了滩槽的物质传输和能量传递过程。为研究不同非恒定来流过程对复式河道水动力特性的影响, 开展室内水槽试验, 考虑流量变幅、非恒定周期及涨水历时三个因素, 分析不同非恒定来流过程对复式河道水位、水流非恒定性及滩槽单宽流量过程的影响。结果表明, 随着流量变幅增加, 水位波峰增长斜率大于波谷, 波高线性增加, 滩槽单宽流量过程均沿时间发生变形, 主槽的下降过程和滩地的上升过程存在明显的缓变过程; 随着非恒定周期增加, 水位波峰增加, 波谷降低, 波高也呈线性增加, 滩槽单宽流量沿时间变形的现象消失; 水位波峰波谷与水文偏度同步变化, 水文偏度(涨落水历时之比)大于1时, 滩槽单宽流量的上升过程也会存在明显的缓变阶段。

关键词: 复式河道; 非恒定; 来流过程; 主槽; 滩地

中图分类号: TV133.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0041-05

1 引言

由主槽和河漫滩构成的复式断面是天然河道典型的断面形式。在汛期, 上游来流量增大, 水流漫溢至滩地, 形成复式过水断面, 滩槽共同过流。同时, 受暴雨、水电站泄洪日调节等过程的影响, 来流过程发生变化, 水位涨落频繁, 水流以连续非恒定流的形式在复式河道中传播。非恒定流的水文变化和脉冲的周期性扰动, 促进了滩槽环境系统之间物质、能量和信息的传递与交换, 水流裹挟泥沙、营养盐等物质在滩槽间往复运动, 改善了水体环境, 有利于水生动植物的生长和繁殖^[1-2]。非恒定来流过程改变了复式河道水动力特性, 而复式河道水动力特性直接决定了滩槽物质的传输和能量的传递过程, 对滩槽生态系统的塑造和河漫滩的演化具有重要影响^[3-4]。然而以往研究主要关注恒定来流条件下河道形态、壁面特性等外部环境因素对复式河道过流能力和水流结构的影响^[5-6], 而忽略了非恒定动态来流过程对复式河道水动力的影响。为此, 本文建立了室内水槽概化

模型, 探讨流量变幅、非恒定周期及涨水历时单一变量变化对复式河道水位、非恒定性、水位流量曲线及滩槽单宽流量过程的影响, 结果不仅能提高对漫滩水力学的认识, 还能为水利工程生态调度提供参考。

2 试验设置

2.1 试验水槽与量测设备

本次室内水槽试验在河海大学泥沙实验室内开展。可变坡循环水槽长 24.0 m, 宽 1.2 m, 深 0.7 m。水槽两侧为玻璃面, 底部为钢底。为保证水流均匀, 在水槽进口处设置了整流栅, 对水流进行整流和消能。在研究非恒定流时, 进口流量过程的稳定性尤为重要。为精确控制非恒定来流过程, 对试验水槽加装了非恒定流控制系统, 其由可编程控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、变频器、流量计和水泵组成, 通过比例-积分-微分控制器(Proportion Integration Differentiation, PID)的控制信号与电磁流量计的测量结果相连接, 形成闭环自动控制系统, 可生成周期

收稿日期: 2022-11-09, **修回日期:** 2022-12-24

基金项目: 国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209); 高等学校学科引智计划项目(B17015); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室自主研究项目(521013152)

作者简介: 付俊(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学, E-mail: 1064533971@qq.com

通讯作者: 张涛涛(1992-), 男, 副教授, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: ztt714521@163.com

性稳定的非恒定流过程。

采用重力相似准则,按比尺 $\lambda_L=40$ 来建立概化模型。结合已有研究,概化试验的河道断面形式采用直立非对称复式断面,主槽床面光滑,滩地由空心砖和石英砂砌筑而成,床面为水泥砂浆抹面。主槽和滩地宽度均为 0.6 m,滩地高度 0.2 m。复式河道物理模型见图 1。

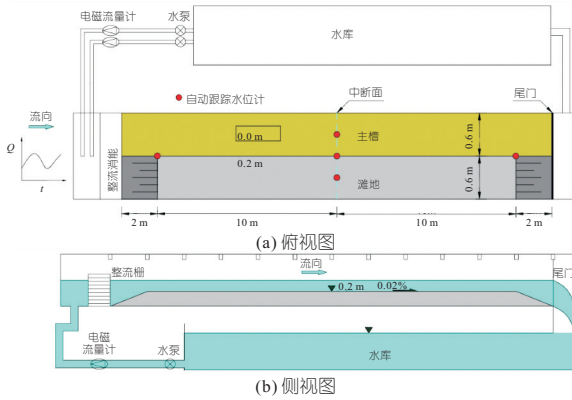


图 1 复式河道物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model of compound open channel

水位和流速分别通过自动跟踪水位计(南京水利科学研究院生产,ZWT-40 型跟踪式水位仪,精度 0.1 mm,频率 1 Hz)和旋桨流速仪(南京水利科学研究院生产,ZX-II 型无线旋桨流速仪,精度 2%,频率 1 Hz)进行测量。流速测量断面靠近中断面,自动跟踪水位计共布置 5 台,其中上下游滩槽交界面各布置 1 台,中游滩地、主槽、滩槽交界面各布置 1 台,具体位置见图 1(a)。断面流速测点布置见图 2。在 9 条垂线上布置了旋桨流速

仪,主槽和滩地各布置 4 条垂线,滩槽交界面布置 1 条垂线,测点水平间距为 0.12 m,垂直间距为 0.02 m,总共布置测点 103 个。

2.2 工况设置

在已有的试验研究中,非恒定流过程概化形式各异,但以三角形的波形居多^[7]。三角形非恒定流波形不易保持稳定,在非恒定性较强时,波峰波谷变化剧烈。在现实情况中,明渠非恒定流基本上均包含了涨水过程及落水过程,正弦函数表示的波形较为符合这一情况。因此,本文的非恒定流试验采用正弦型周期性非恒定流过程^[8]:

$$Q(t) = Q_0 + Q_m \sin^{\Gamma} \left[\frac{t}{T} \right]^{-\ln 2 / \ln(t_p/T)} \pi \quad (1)$$

式中, $Q(t)$ 为进口流量过程; Q_0 为基流流量; Q_m 为流量变幅; Γ 为反映洪水曲线圆度的无量纲参数,本文取 2; T 为洪水周期; t_p 为涨水历时。

工况设置考虑流量变幅 Q_m (峰值流量与基流流量之差)、非恒定周期 T 、涨水历时 t_p 三个非恒定特征参数,工况 1 为基础工况,工况 2~5 改变流量变幅,与之类似,工况 6~9、10~13 仅分别改变非恒定周期和涨水历时,具体参数设置见表 1。各工况进口流量过程曲线(图 3)通过式(1)拟合得到。基流流量 50 L/s,基流水位 0.35 m。由于涨水历时的变化,水文偏度(涨水历时与落水历时之比($t_p/(T-t_p)$))在 0.5~2.0 之间。在每组试验开始前,需重复 8~10 个连续周期的非恒定流过程,使用水位计监测水位变化过程,待水位呈现平稳的周期变化后,开始同时采集水位和流速数据。

表 1 各工况进口流量参数

Tab. 1 Inlet flow parameters in each conditions

工况	$Q_m / (L \cdot s^{-1})$	T / min	t_p / min	$t_p / (T - t_p)$
1	20	3	1.50	1.0
2	10	3	1.50	1.0
3	15	3	1.50	1.0
4	25	3	1.50	1.0
5	30	3	1.50	1.0
6	20	4	2.00	1.0
7	20	5	2.50	1.0
8	20	6	3.00	1.0
9	20	7	3.50	1.0
10	20	3	1.00	0.5
11	20	3	1.25	0.7
12	20	3	1.75	1.4
13	20	3	2.00	2.0

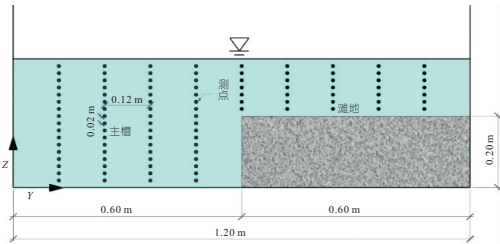


图 2 流速测点布置示意图(模型横断面)

Fig. 2 Layout diagram of velocity measuring points (cross section)

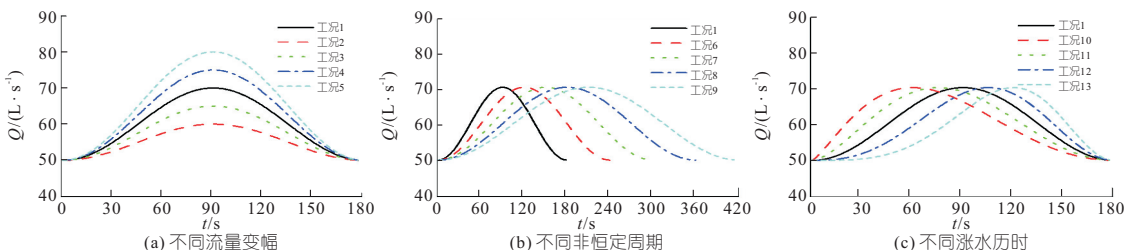


图 3 不同流量变幅、非恒定周期、涨水历时下进口流量过程曲线

Fig. 3 Curves of inlet discharge process under different discharge amplitude, unsteady period and rising duration

3 结果与分析

3.1 滩槽水位过程

水位可反映水流的变化过程,是进行非恒定流研究时重要的水力参数之一。图 4 为不同非恒定来流过程下主槽(2 水位计)、滩槽交界(3 水位计)及滩地(4 水位计)的水位变化过程。由图 4 可知,在本试验条件下,滩地、滩槽交界面、主槽水位曲线几乎重合,滩槽水位涨落过程一致。

为了探究非恒定特征参数对水位波峰、波谷的影响,提取了滩槽交界处(3 水位计)水位的波峰和波谷值。由图 5(a)可看出,随着流量变幅的增加,水位波峰和波谷同步增加,呈良好的线性关系,且波峰流量对水位波峰的增长贡献更大,导致水位波峰增长斜率更大。由图 5(b)可知,水位波峰随非恒定周期的增加而增加,波谷则相反。图 5(c)为涨水历时对水位波峰波谷的影响。由图 5(c)可看出,随着涨水时间增加,水位波峰、波谷一同降低,二者降低趋势相近,说明水文偏度(涨水历时与落水历时之比)的增长有利于洪水快速下泄,降低全过程的水位。此外,波高(水位波峰与波谷之差)对于流量变幅和非恒定周期更敏感。

随着流量变幅和洪水周期的增加,波高均线性增加,而随着水文偏度增加,波高基本保持不变。

3.2 水流的非恒定性

非恒定流在传播过程中,水力要素随时间的变化程度反映了水流的非恒定性。NEZU I 等^[9]通过非恒定流水面涨水速率与对流速度之比定义的非恒定参数 α ,可表征水流的非恒定强度,其值越大,非恒定性越强,计算表达式为:

$$\alpha = \frac{1}{(U_p + U_b)/2} \frac{h_p - h_b}{t_p} \quad (2)$$

式中, h 为水深; U 为非恒定过程中的垂线平均流速; t_p 为涨水历时;下标 $b、p$ 分别表示基流、峰流。

为了解流量变幅、非恒定周期和涨水历时对水流非恒定性的影响,通过式(2)计算了不同流量变幅、非恒定周期、涨水历时下的非恒定参数 α ,结果见图 6。由图 6 可知,水流非恒定性随流量变幅的增大而增强,随非恒定周期和涨水历时的增大而减弱。此外,水流非恒定性对非恒定周期而言并不敏感,非恒定周期增加 1 min,非恒定参数约降低 0.1。而涨水历时由 1 min 增至 2 min,水文偏度由 0.5 增至 2.0,非恒定参数则降低了 0.52。

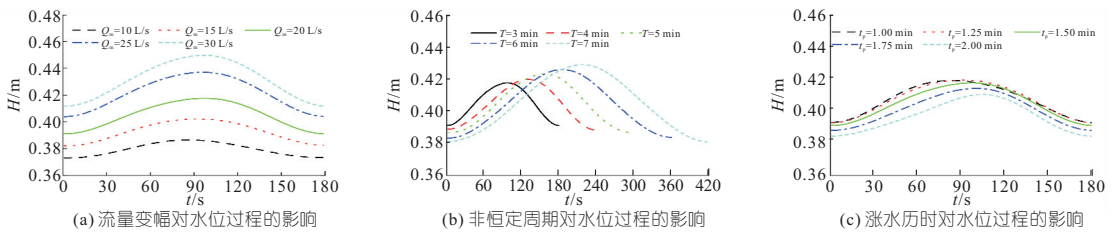


图 4 流量变幅、非恒定周期、涨水历时对滩槽水位过程的影响

Fig. 4 Influence of discharge amplitude, unsteady period and rising duration on water level process of main channel and floodplain

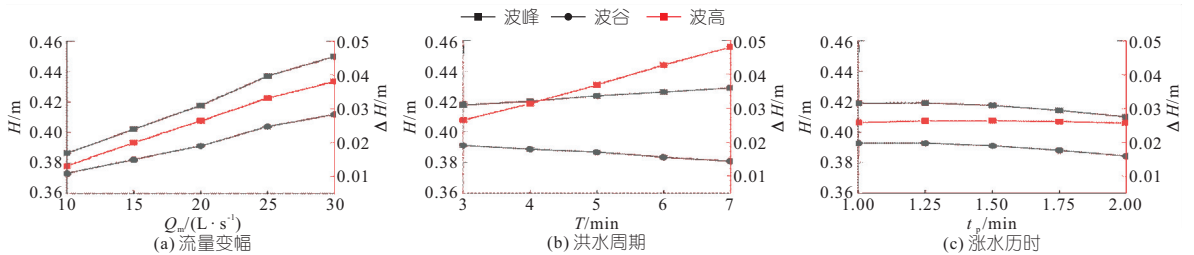


图 5 流量变幅、洪水周期、涨水历时对水位波峰、波谷、波高的影响

Fig. 5 Influence of discharge amplitude, unsteady period and rising duration on water level wave peak, valley and height

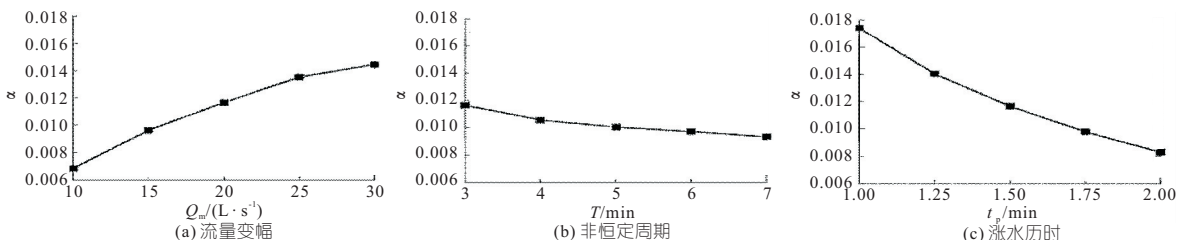


图 6 流量变幅、非恒定周期、涨水历时与非恒定参数的关系

Fig. 6 Relationship between discharge amplitude, unsteady period, rising duration and unsteady parameters

图 7 为不同流量变幅、非恒定周期、涨水历时下的水位流量关系。由图 7 可看出,与天然河道情况类似,非恒定流条件下,水位流量关系呈逆时针绳套曲线^[9]。由图 7(a)可知,随着流量变幅的增加,水流非恒定性增强,水位流量关系曲线向上平移,且长度被拉长,最终导致水位波峰波谷同时增加。由图 7(b)可知,非恒定周期的增加降低了水流的非恒定性,水位流量关系曲线产生逆时针旋转,斜率增大,致使波峰增加,波谷降低。由图 7(c)可知,水文偏度越接近 1,绳套曲线椭圆度(长轴与短轴之比)越小,过大或过小的水文偏度均会增大绳套曲线的椭圆度。

3.3 滩槽单宽流量过程

为研究不同非恒定来流条件下滩地和主槽的单宽流量变化特征,对各时刻垂线流速沿水深进行积分,获得了所有工况下滩地和主槽的单宽流量过程。单宽流量积分表达式为:

$$q = \sum_{i=1}^{n-1} u_i dh + u_n (H - h_n) \quad (3)$$

式中, q 为单宽流量; n 为垂线流速测点个数; u_i 、 h_i 分别为垂线第 i 个测点对应的流速、高程; H 为水面高程; dh 为垂线流速测点的距离。

图 8 为不同流量变幅下滩地和主槽的单宽流量随时间变化过程。由图 8 可看出,单宽流量峰值随流量变幅增大而增大。滩槽单宽流量到达峰值的时间均处于水位上涨阶段,且主槽单宽流量

先于滩地到达峰值。在整个过程中,主槽单宽流量约为滩地的 2 倍,在滩槽交界处,单宽流量一直处于最低值。滩槽单宽流量随流量变幅的变化而呈不同变化过程,随着流量变幅增大,滩槽单宽流量沿时间产生变形,主槽的下降过程呈平稳下降和快速下降两部分,而滩地的上升过程呈快速上升和平稳上升两个阶段(图 8(c)~(e)中黑色虚线区域)。

图 9 为不同非恒定周期下滩地和主槽的单宽流量随时间变化过程。由图 9 可看出,当非恒定周期较小时,主槽和滩地的单宽流量过程沿时间存在变形(图 9(a))。当非恒定周期增大时,水流非恒定性降低,滩槽单宽流量涨落过程变缓,沿时间变形的现象消失。此外,主槽各位置单宽流量到达峰值的时间均不同,存在明显的相位差(图 9(b)~(e)),与主槽不同的是,滩地各垂线单宽流量涨落过程基本一致,且随着非恒定周期的增加,各条垂线单宽流量差值逐渐减小,最终趋于同一水平。

图 10 为不同涨水历时下滩地和主槽的单宽流量随时间变化过程。由图 10 可知,当水文偏度小于 1 时(涨水历时 t_p 小于 1.5 min),滩槽单宽流量陡涨缓落,沿时间变形的现象并不明显,且滩槽单宽流量峰值时间与水位峰值时间差较大;相反,当水文偏度大于 1 时(涨水历时 t_p 大于 1.5 min),滩槽单宽流量缓涨陡落,沿时间产生了明

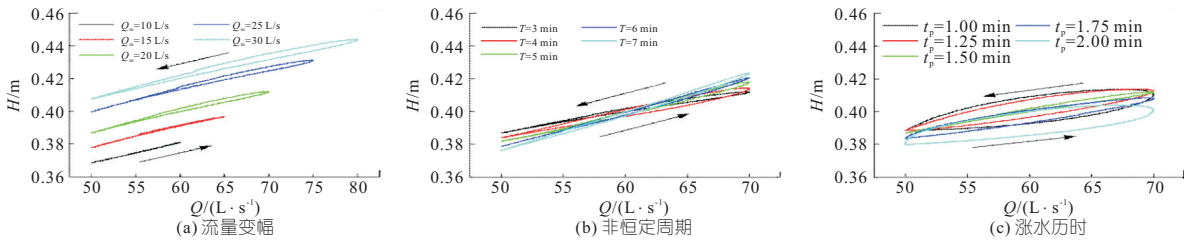


图 7 流量变幅、非恒定周期、涨水历时对水位流量关系曲线的影响

Fig. 7 Influence of discharge amplitude, unsteady period and rising duration on stage discharge relationship curves

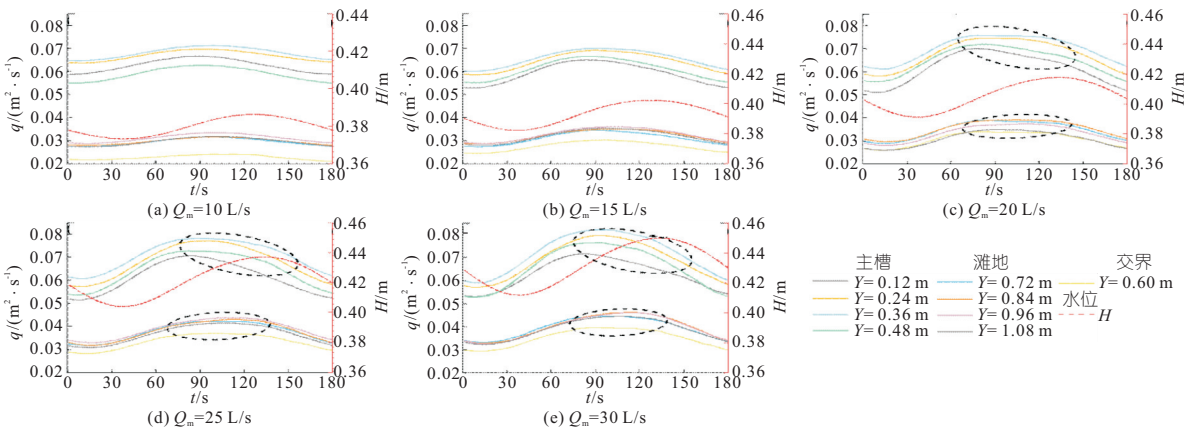


图 8 流量变幅对滩地和主槽单宽流量过程的影响

Fig. 8 Influence of discharge amplitude on discharge per unit width process of main channel and floodplain

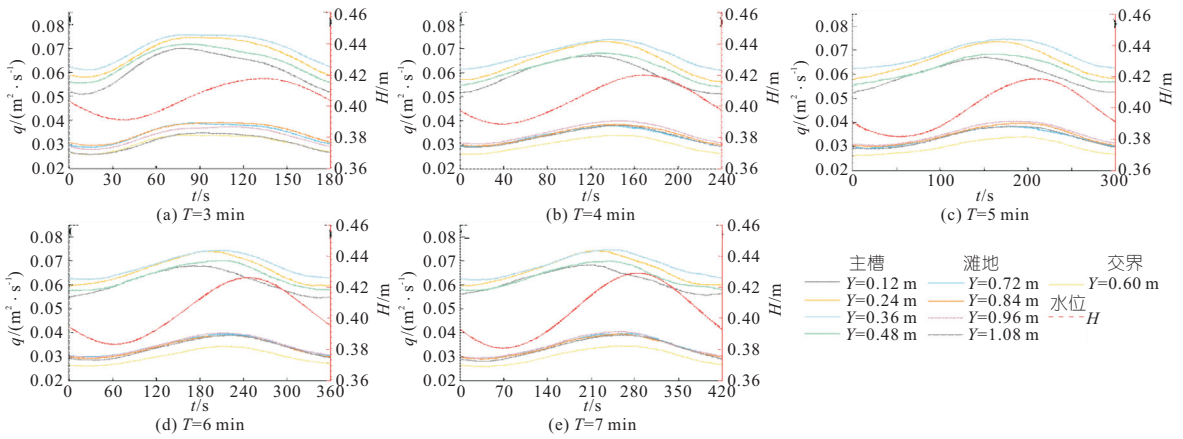


图 9 非恒定周期对滩地和主槽单宽流量过程的影响

Fig. 9 Influence of unsteady period on discharge per unit width process of main channel and floodplain

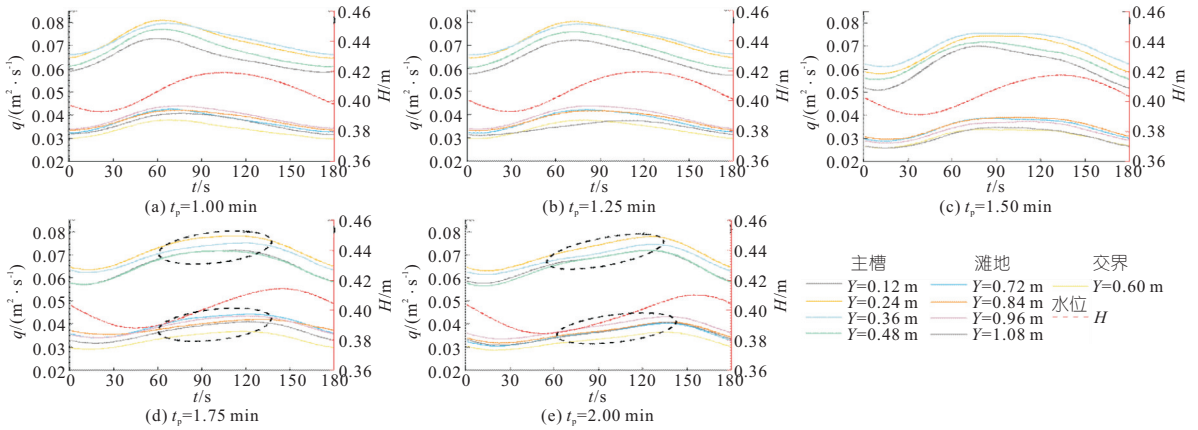


图 10 涨水历时对滩地和主槽单宽流量过程的影响

Fig. 10 Influence of rising duration on discharge per unit width process of main channel and floodplain

显的变形,上升阶段被分为快速上升和平稳上升两个部分(图 10(d)~(e)黑色虚线区域),且滩槽单宽流量峰值时间与水位峰值时间接近。此外,当水文偏度等于 1 时,滩槽单宽流量峰值明显小于其他情况,说明水文偏度对单宽流量峰值也具有一定的影响。

4 结论

- a. 水位波峰、波谷、波高受非恒定来流过程的影响,其斜率存在明显差异。
- b. 水流的非恒定性与流量变幅呈正相关,与非恒定周期和水文偏度呈负相关。
- c. 滩槽单宽流量受流量变幅、非恒定周期、水文偏度的影响而呈现不同的涨落过程,表明非恒定来流特征参数共同影响了复式河道滩槽水动力动态变化过程。

参考文献:

[1] SINGH H V, FAULKNER B R, KEELEY A A, et al. Floodplain restoration increases hyporheic flow in the Yakima River Watershed, Washington [J]. Ecological engineering, 2018, 116: 110-120.

[2] HAYES DANIEL S, BRÄNDLE J M, SELIGER C,

et al. Advancing towards functional environmental flows for temperate floodplain rivers[J]. Science of the total environment, 2018, 633:1089-1104.

[3] MCMILLAN S K, NOE G B. Increasing floodplain connectivity through urban stream restoration increases nutrient and sediment retention [J]. Ecological engineering, 2017, 108: 284-295.

[4] 邱利文, 沈健, 张定军, 等. 三峡大坝下游河漫滩生态修复治理过程及效果 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(10):191-194.

[5] 姬昌辉, 张幸农, 谢瑞. 水深及滩地糙率对复式断面河道过流能力的影响[J]. 人民黄河, 2015, 37(1):42-45.

[6] KHATUA K K, PATRA K C, MOHANTY P K. Stage-discharge prediction for straight and smooth compound channels with wide floodplains [J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 138(1): 93-99.

[7] 马爱兴, 陆彦, 陆永军, 等. 明渠非恒定流流速分布及推移质运动研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(1):134-142.

[8] 杨荣富, 丁晶. 单峰型洪水过程线的概化及随机模拟 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 1990(5):67-73.

[9] NEZU I, SANJOU M. Numerical calculation of turbulence structure in depth-varying unsteady open-channel flows [J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 132(7):681-695.

