

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220575

# 溢洪道交错式阶梯消能工的消能特性研究

陈 润<sup>1</sup>, 李永业<sup>1</sup>, 张乐元<sup>2</sup>, 田 煜<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 运城市河湖务管理中心, 山西 运城 044099)

**摘要:** 为分析不同坡比下交错式阶梯消能工的水力特性,采用数值模拟与模型试验相结合的方法,对比研究了不同流量下1:2.0、1:2.5两种坡比交错式阶梯和矩形台阶消能工的流态、流场、压力场及消能特性等。结果表明,交错式阶梯消能工坡比增加,台阶凹槽处形成的三维漩涡尺度增加,水流旋滚剧烈,水深较大;台阶竖直面压强的绝对值较大,负压区范围增加。两种坡比下台阶水平面压强分布相似,均表现为越靠近台阶外沿压强越小。坡比为1:2.0的阶梯消能工消能率更大,同一坡比消能工的消能率与流量呈非线性关系,流量越大消能率变化越缓慢。交错式阶梯消能工较矩形台阶溢洪道掺气更加充分,消能率更高。研究结果可为交错式阶梯消能工的结构优化提供理论依据。

**关键词:** 阶梯消能工; 消能率; 消能特性; 水力特性

**中图分类号:** TV135.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)01-0120-04

## 1 引言

阶梯式溢洪道的消能问题一直是水利工程研究的重点,近年来通过改变台阶形式来改善阶梯溢洪道的水力特性,增强消能率<sup>[1,2]</sup>。目前常采用模型试验、理论分析和数值模拟三种方法研究消能率。其中,数值模拟方法应用普遍<sup>[3,4]</sup>。如陈群等<sup>[5]</sup>采用 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型和VOF模型在非结构形式的网格划分下,研究不同单宽流量对阶梯式消能工消能率的影响,发现随着单宽流量的增大,消能率逐渐减小。通过改变台阶尺寸可以增大紊动的耗散率,提高消能率;CHRITOULOU G C<sup>[6]</sup>通过研究一定宽高比的阶梯式溢洪道,发现消能率的影响因素有临界水深、台阶高度和台阶数量等;STEPHENSON D<sup>[7]</sup>同时分析了阶梯尺寸和坡比对阶梯式消能工消能效率的影响,发现当坡比在1:1~1:1.5时,消能率最大。增大坡比时阶梯上的水深会达到临界水深的1/3,消能效率随之增大;伍平等<sup>[8]</sup>对比不同坡比下的消能率,发现坡比在1:2~1:3范围消能率随坡比变化显著。为进一步提高水流流态稳定性,减小大流量下台阶的空化空蚀破坏等现象,本文通过数值模拟法对比分析两种坡比溢洪道的交错式阶

梯消能工和矩形台阶消能工的表面压强特性及消能效率,以期为进一步完善阶梯消能工结构及其在实际工程中的应用提供理论依据。

## 2 试验模型

### 2.1 模型参数

试验系统由稳水箱、进水段、阶梯消能工测试段和尾水段组成,见图1。溢洪道阶梯共布置6级,交错式阶梯和矩形台阶消能工坡比 $i$ 分别为1:2.0(体型I、III)、1:2.5(体型II、IV)。每级台阶长度 $l$ 为18.0 cm,高度 $h$ 分别为9.0、7.2 cm。交错式阶梯将台阶宽度等间距分为三部分,削去部分阶梯使其交错分布,布置形式见图2。模拟时选取20、30、40、50、60 m<sup>3</sup>/h五个流量。

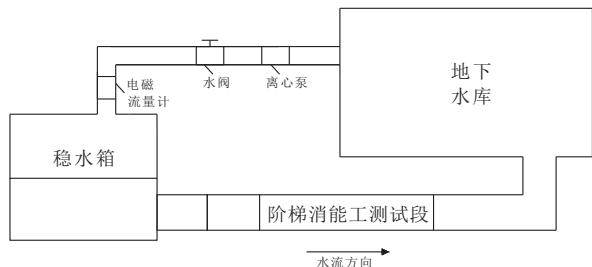


图1 试验系统  
Fig. 1 Test system

### 2.2 断面及测点布置

试验选取台阶上游0.6 m,台阶段1.08 m与

收稿日期: 2022-03-25, 修回日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179116)

作者简介: 陈润(1997-),女,硕士,研究方向为河流动力学, E-mail: chenruncco@163.com

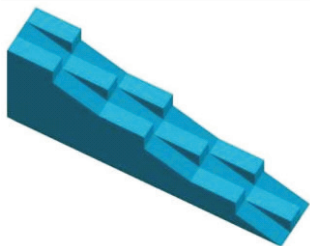


图 2 阶梯布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of steps

下游 0.8 m 为测试段,共长 2.48 m。测试段共布置 3 个纵断面和 2 个横断面。# 1 纵断面上,第 1~6 级台阶正中均等间距布置 3 个测点;# 2、# 3 纵断面上,第 3、4 级台阶处按台阶长度等间距布置 3 个测点,断面及测点布置见图 3。

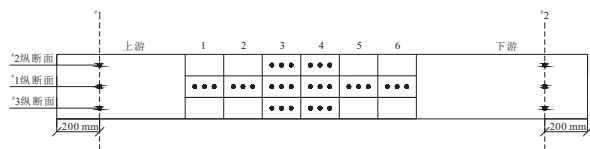


图 3 断面及测点布置图

Fig. 3 The layout diagram of cross section and measuring point

### 3 模型建立与验证

采用 Fluent 软件中的 VOF 与  $\kappa-\epsilon$  数学模型及 PISO 算法进行数值模拟。对坡比为 1 : 3.0 的台阶溢洪道进行模拟,与物理试验测得的流速、水面线进行比较。表明在自由表面为体积分数 0.5 时的水气交界面时,其相对误差最大为 6.2%,证明模拟方法可行。在此基础上进一步研究坡比  $i$  分别为 1 : 2.0、1 : 2.5 的台阶消能特性,为保证计算结果精度,在流量  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$  时测量台阶末端 0.2 m 处的水深进行网格无关性检验,平均水深随网格尺寸的减小而不断减小,当网格尺寸小于 4 mm 时,平均水深基本保持不变。

模型选用 4 mm 网格尺寸,台阶处采用 1

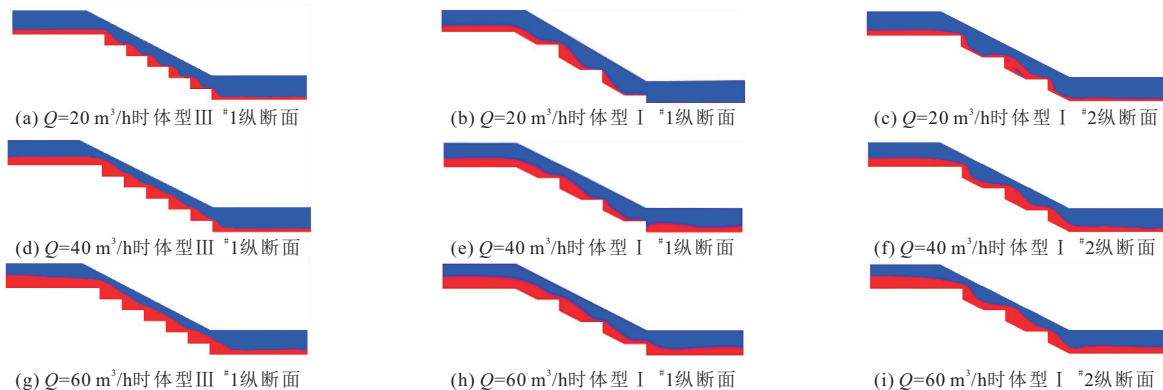
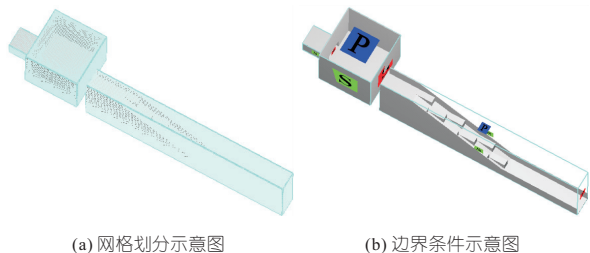


图 5 不同流量下的流态分布

Fig. 5 Flow pattern distribution under different flow rates

mm 网格进行局部加密。进口边界分为两部分,上方空气区域设置为空气入口,下方水流流动区域设置为流速入口;出口边界设置为压力出口;台阶壁面设置为无滑移固体边界。网格划分与边界条件设置见图 4。



(a) 网格划分示意图 (b) 边界条件示意图

图 4 模型建立示意图

Fig. 4 Model building schematic

### 4 结果与分析

#### 4.1 流态分布

对不同流量下交错式阶梯与矩形台阶消能工 # 1、# 2 纵断面的水流流态进行分析,流态见图 5。由图 5 可知,体型 I 的水流流态分布较为复杂,每级台阶末端会形成挑射水流,在台阶倾斜斜面处水深增加,水流发生剧烈碰撞并卷入空气,紊动强烈。体型 III 的水面线近似呈波浪形,纵断面流态分布稳定。体型 I 在 # 1、# 2 纵断面的流态差异明显,横向流态变化较大。水流下泄时会从台阶面流入同级台阶倾斜面凹槽处,水流与倾斜面发生碰撞产生剧烈旋滚,增加掺气浓度。体型 III 的横向流态无明显变化,掺气发生在水流表面。随着流量的增加,体型 I 的消能工掺气量减小,两种体型消能工的水流流态均发生变化。区别滑行水流和跌落水流两种水流流态的经验公式分别为:

$$h/y_c \leq 1.16 (\tan\theta)^{0.165} \quad (1)$$

$$h/y_c \geq 1.3 + 0.57(\tan\theta)^3 \quad (2)$$

式中,  $y_c$  为临界水深;  $\theta$  为坡角。

体型 I 的消能工水流流态变化不明显,  $q \leq 0.056 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时为跌落水流,  $q = 0.069 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时为过渡水流。体型 III 的矩形台阶消能工水流流态由跌落水流转变为滑行水流,  $q \leq 0.042 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时为跌落水流,  $q = 0.056 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时为过渡水流,  $q \geq 0.069 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时为滑行水流。可见相较于矩形台阶消能工, 交错式阶梯消能工的掺气效果较优, 但不易形成滑行水流。

### 4.2 流场分布

40  $\text{m}^3/\text{h}$  流量下的四种体型消能工 #1、#2 纵断面的水流流场见图 6。由图 6 可知, 体型 I、II 的消能工水流在台阶末端发生跃起与空气混掺, 相互碰撞消耗能量。水流从台阶表面下泄时, 台阶内侧的水深大于台阶外侧水深, 水流将一定的势能转化为动能, 这部分能量克服台阶摩擦力后仍有剩余, 使水流流速不断增加。在台阶末端时, 水流发生跃起消耗能量, 与空气混掺, 水流内部相互碰撞, 使流速的增长趋势减缓。在达到下一级台阶时, 水流与台阶倾斜面发生激烈碰撞, 并在台阶竖直面处产生强烈旋滚形成漩涡, 消耗大量能量, 此时流速急剧减小。因台阶布置形式改变, 水流跌落高度增加, 倾斜面向上游倾斜, 受重力影响折返水流较少, 水流漩涡尺度小于矩形台阶。体型 I 的消能工流速矢量方向改变明显大于体型 II 的消能工流速矢量方向改变, 水流之间的碰撞更为剧烈, 消能效果更好。体型 I、II 的消能工横向流场分布较为复杂, 水流从台阶面流入同级倾斜

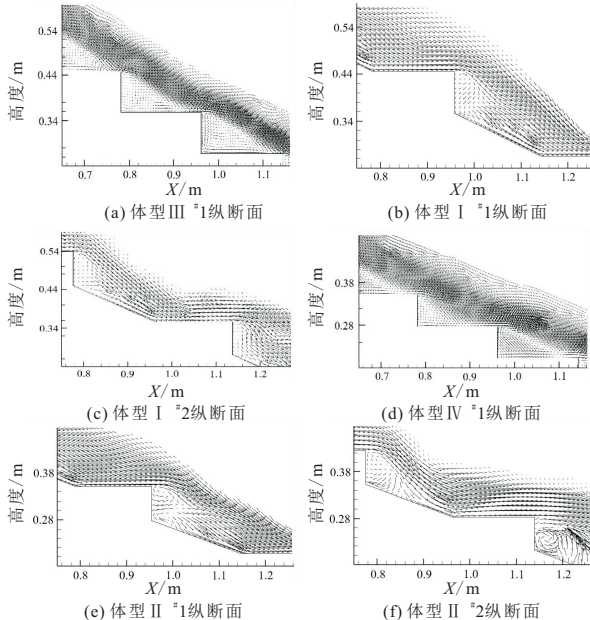


图 6 阶梯消能工纵断面流速矢量图

Fig. 6 Vertical section velocity vector diagram of stepped energy dissipator

面凹槽处产生横向分流, 与倾斜面发生碰撞增加水流紊动, 形成漩涡。而矩形台阶消能工横向水流流态分布均匀无明显变化, 水流主要沿纵断面流入下级台阶, 在台阶竖直面处形成漩涡。矩形台阶消能工台阶面上的水流为二元流, 形成二维漩涡; 交错式阶梯消能工台阶面上水流为三元流, 形成三维漩涡。可见, 交错式阶梯消能工的水流掺气剧烈, 其能量耗散优于矩形台阶的能量耗散, 消能效果更好。

### 4.3 压强分布

研究交错式阶梯消能工的压强特性, 可有效避免水流下泄过程中发生的空化空蚀现象。两种坡比消能工在台阶面上的压强分布见图 7。由图 7 可知, 交错式阶梯消能工压强的最大值出现在台阶倾斜面与下一级台阶水平面的凹槽处。台阶上的水流下泄与台阶倾斜面发生碰撞, 流量越大发生碰撞的位置距离台阶竖直面越远, 台阶倾斜面上的高压区向凹槽处靠近, 在凹槽处水流因改变流动方向产生离心力, 形成更大的压强。台阶竖直面压强随着水深的增加先减小后增大, 到达竖直面底部时压强最大。台阶竖直面顶部区域形成一个负压区, 定义负压区宽度与台阶高度的比值为负压区比。流量从 20  $\text{m}^3/\text{h}$  增加到 60  $\text{m}^3/\text{h}$  时, 消能工负压区增加, 体型 I、II 的消能工负压区比增长约 36%。相同流量下, 体型 I 的

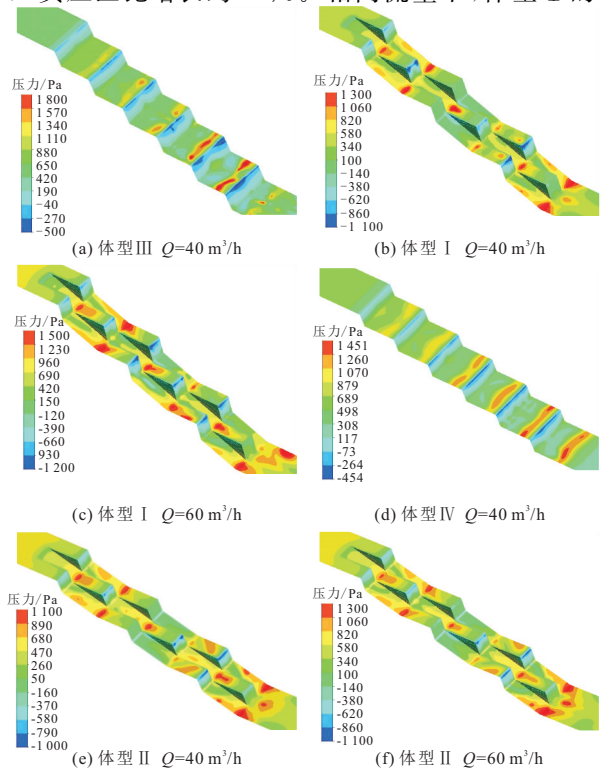


图 7 两种坡比在不同流量下的压强分布

Fig. 7 Pressure distribution of two slopes under different flow rates

负压区比大于体型 II 的负压区比,增加约 15%; 体型 I、II 的负压区比均大于同坡比的矩形台阶的负压区比,需对台阶竖直面进行加固处理。体型 II 的负压绝对值小于体型 I,产生空化空蚀的几率较低。台阶水平面压强随着流量的增加而增大。与矩形台阶消能工水平面压强分布规律不同,体型 I、II 的消能工水流在流经台阶水平面后对台阶水平面造成冲击,在台阶末端形成挑射水流,水流与台阶水平面之间会产生一定间隙,距离台阶外侧压强最小,越靠近台阶内侧压强越大。

#### 4.4 消能率分析

阶梯式溢洪道消能率  $\eta$  根据上下游能量守恒原理,选取<sup>#</sup>1、<sup>#</sup>2 断面进行计算。即:

$$\eta = [(E_1 - E_2)/E_1] \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $E_1$ 、 $E_2$  分别为<sup>#</sup>1、<sup>#</sup>2 断面水流的总能量。

$E_1$ 、 $E_2$  的计算公式为:

$$E_1 = Z_1 + H_1 + \alpha_1 v_1^2 / (2g) \quad (4)$$

$$E_2 = H_2 + \alpha_2 v_2^2 / (2g) \quad (5)$$

式中,  $Z_1$  为上、下游水位差;  $H_1$ 、 $H_2$  分别为上、下游水深;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  均为流速系数,取值均为 1;  $v_1$ 、 $v_2$  分别为上、下游断面的平均流速;  $g$  为重力加速度。

不同流量下两种坡比消能工的消能率见图 8。由图 8 可知,两种坡比消能工的消能率均随流量的增大而减小。当流量逐渐增大时,水流流速随之增加,在流动过程中,减少了水流与台阶之间的碰撞,降低了台阶对水流的摩阻力,使阶梯消能工的消能率逐渐减小。流量从 20 m<sup>3</sup>/h 增加到 60 m<sup>3</sup>/h 时,体型 I、II 的消能工消能率减小约 18%,而体型 III、IV 的消能工消能率减小约 35%,交错式阶梯消能工的消能率下降趋势较缓。在相同流量下,溢洪道坡比不同的交错式阶梯消能工的消能率亦不同。体型 I 消能工的消能率大于体型 II 消能工的消能率,两种坡比交错式阶梯消能

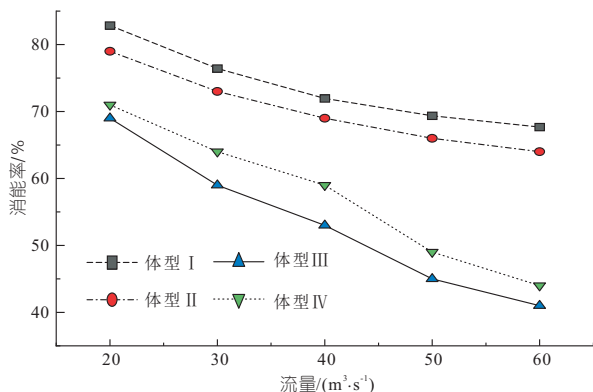


图 8 消能率随流量的变化曲线

Fig. 8 The change curve of energy dissipation rate with flow rate

工的消能率相差约 5%。流量越大,交错式阶梯消能工与传统矩形台阶的消能率相差越大。可见,在流量较大时,交错式阶梯消能工的消能效果更优,可缩短溢洪道长度,节省工程费用。

## 5 结论

a. 交错式阶梯消能工水流流态分布复杂,水流在横向上产生分流,掺气强烈,但不易形成滑行水流。水流属于三元流,在台阶面上形成三维漩涡,体型 I 的消能工流速矢量方向变化更明显,能量耗散与消能效果均优于体型 II。

b. 交错式阶梯消能工台阶竖直面的负压区较矩形台阶增加。体型 I 的负压区大于体型 II 的负压区,但负压绝对值相差较小;台阶水平面压强越靠近台阶外侧越小。

c. 相同工况下,交错式阶梯消能工的消能率高于矩形台阶消能工。体型 I 消能工的消能率大于体型 II 消能工的消能率。由此可知,坡比为 1:2.0 的消能工体型较优,为交错式阶梯消能工的选型提供了一定理论基础。

## 参考文献:

- [1] 田忠,许唯临,余挺,等. "V"形台阶溢洪道的消能特性[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(2):21-25.
- [2] 王磊,刁明军,朱润野,等. "M"形台阶溢洪道的消能特性[J]. 水力发电学报,2015,34(5):95-102.
- [3] 张婷,郝瑞霞,郑秀清. 齿墩内表面不同的两种体型齿墩式内消能工的数值模拟[J]. 水电能源科学,2021,39(3):58-61.
- [4] 骆霄,王均星,张文传,等. 基于 Flow-3D 的高速水流无压溢洪洞内消能工数值模拟[J]. 水电能源科学,2020,38(9):96-100.
- [5] 陈群,戴光清,刘浩吾. 阶梯溢流坝面流场的紊流数值模拟[J]. 天津大学学报,2002,35(1):23-27.
- [6] CHRITODOULOU G C. Energy dissipation on stepped spillways[J]. Journal of hydraulic engineering,1993,119(5):553-660.
- [7] STEPHENSON D. Energy dissipation down stepped spillways [J]. International water power and dam construction,1991,43(9):27-30.
- [8] 伍平,王波,陈云良,等. 阶梯溢洪道不同坡比消能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):24-29.

b. 作为变化环境的两部分,气候变化与下垫面变化在该模式中均予以体现,可望为变化环境下 PMF 估算提供一种新思路。

参考文献:

[1] World Meteorological Organization (WMO). Manual for estimation of probable maximum precipitation[M]. Geneva: WMO, 2009.

[2] WOOD A W, LEUNG L R, SRIDHAR V, et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs [J]. Climatic change, 2004,62(1-3):189-216.

[3] FAN L J. Statistically downscaled temperature scenarios over China[J]. Atmospheric and oceanic science letters, 2009, 2(4): 208-213.

[4] TRIPATHI S, SRINIVAS V V, NANJUNDIAH R S. Downscaling of precipitation for climate change scenarios: A support vector machine approach[J]. Journal of hydrology, 2006, 330(3/4): 621-640.

[5] 刘甜, 金路熠, 梁忠民, 等. 基于多因子协同放大的可能最大暴雨估算[J]. 水电能源科学, 2022, 40

(9):6-9,5.

[6] 刘甜, 梁忠民, 华家鹏, 等. 基于 SWAT 模型的高寒区可能最大洪水计算方法研究[J]. 水力发电, 2016,42(11):24-28.

[7] 肖章玲, 梁忠民, 刘晓伟, 等. 基于相似性理论的洪水超前预报预警研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(6):20-23,28.

[8] 王芳, 葛全胜, 陈泮勤. IPCC 评估报告气温变化观测数据的不确定性分析[J]. 地理学报, 2009, 64(7):828-838.

[9] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the IPCC [M]. New York: Cambridge University Press, 2015.

[10] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理与方法 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[11] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报, 2013(2): 234-242.

[12] 毛飞, 张艳红, 侯英雨, 等. 藏北那曲地区草地退化动态评价[J]. 应用生态学报, 2008,19(2):278-284.

### Calculation of Probable Maximum Flood in Changing Environment

LIU Tian<sup>1</sup>, LIANG Zhong-min<sup>2</sup>, JIN Lu-yi<sup>3</sup>, WANG Shi-wu<sup>1</sup>, WEN Jin-hua<sup>1</sup>, WANG He-long<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Zhejiang Water Conservancy Information & Publicity Center, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** Under the influence of climate change and land use/land cover (LULC) change, the combined influence of multiple factors has significantly increased the difficulty of probable maximum flood (PMF) estimation. A PMF estimation framework was proposed, integrating post-processing of climate model results, probable maximum precipitation (PMP) estimation and future LULC change setting under climate change scenarios, impact analysis of base flow/antecedent rainfall, and similarity-based PMP spatio-temporal distribution. This new framework was applied to the Upper Nujiang River Basin. The results show that the uncertainty of base flow/antecedent rainfall and PMP spatio-temporal distribution are important factors affecting PMF for basins, and the dual-drive of climate change and LULC change has a greater impact on PMF, and the amplitude of change increases with the degree of change.

**Key words:** probable maximum flood; probable maximum precipitation; climate change; land use/land cover change; base flow/ antecedent rainfall; upper Nujiang River Basin

\*\*\*\*\*  
(上接第 123 页)

### Study on Energy Dissipation Characteristics of Staggered Stepped Energy Dissipaters in Spillway

CHEN Run<sup>1</sup>, LI Yong-ye<sup>1</sup>, ZHANG Le-yuan<sup>2</sup>, TIAN Yu<sup>1</sup>

(1. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Yuncheng City River and Lake Affairs Management Center, Yuncheng 044099, China)

**Abstract:** In order to study the hydraulic characteristics of staggered stepped energy dissipaters with different slopes, the flow pattern, flow field, pressure field and energy dissipation characteristics of staggered stepped and rectangular stepped energy dissipaters with slope of 1:2.0 and 1:2.5 under different flow rates were compared and studied by using the method of numerical simulation and model test. The results show that with the increase of the slope of the staggered step dissipator, the three-dimensional vortex scale formed at the step groove increases, the water flow is violent and the water depth is large. The absolute value of the vertical pressure of the step is larger, and the range of negative pressure zone increases. The horizontal pressure distribution of the step under the two slopes is similar, and the closer the step is, the smaller the pressure is. The energy dissipation rate of stepped energy dissipaters with a slope of 1:2.0 is larger. The energy dissipation rate of energy dissipaters with the same slope has a nonlinear relationship with the flow rate. The larger the flow rate is, the slower the energy dissipation rate changes. The staggered stepped energy dissipater is more fully aerated and has higher energy dissipation rate than the rectangular stepped spillway. The conclusions can provide a theoretical basis for the structural optimization of staggered stepped energy dissipater.

**Key words:** step energy dissipator; energy dissipation rate; dissipation characteristics; hydraulic characteristics