

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.025

河道形态改造对城市河流生态水力性能的影响

唐杰^{1,2}, 陈垚^{1,3}, 程麒铭¹, 刘非^{1,3}, 邓淋月¹, 袁绍春^{1,3}

(1. 重庆交通大学航海学院, 重庆 400074; 2. 中铁建发展集团有限公司, 北京 100043;
3. 重庆交通大学环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074)

摘要:为探究城市河道形态改造的有效性,根据河道自然修复理念,采用正弦函数对典型城市渠化河道的河宽、水深和蜿蜒度等地形几何变量进行振荡波动,并借助数字河道合成技术生成6种河道数字地形模型,在此基础上采用二维水动力模型考察不同河道形态改造对河床干扰度、水力形态多样性指数和浅滩缓流生境面积等生态水力指标的影响。结果表明:研究河段城市渠化河道生态水力性能随地形几何变量的振荡波动而变化,且河道空间形态越复杂,河道生态水力性能越好;在高流量($8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$)下,“深潭-浅滩”形态构造下河床干扰度平均减少88.2%,水力形态多样性指数平均提高37.4%,而浅滩缓流生境面积增加24.9倍,表明河流生态水力性能得到显著改善;城市河道近自然形态重构能大幅降低河道对于流量变化的敏感性,并显著提高河道生态结构稳定性,有助于河流生态系统的恢复。

关键词:河道形态改造;河道修复;水力模型;河床干扰度;水力形态多样性指数;浅滩缓流生境面积
中图分类号:TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0185-09

Influence of river course form transformation on ecological hydraulic performance of urban rivers//TANG Jie^{1,2}, CHEN Yao^{1,3}, CHENG Qiming¹, LIU Fei^{1,3}, DENG Linyue¹, YUAN Shaochun^{1,3} (1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. CRCC Development Group Co., Ltd., Beijing 100043, China; 3. Engineering Laboratory of Environmental and Hydraulic Engineering in Chongqing, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to explore the effectiveness of urban river course form transformation, sine function was used to oscillate the topographic geometric variables such as river width, water depth and meandering degree of typical urban channelized river according to the concept of natural river course restoration. Six kinds of digital terrain models of river course were generated with the help of digital river course synthesis technology. On this basis, a two-dimensional hydrodynamic model was used to investigate the influence of different river course forms on the river bed disturbance, hydro-morphological index of diversity, shallow slow-water habitat area and other ecological hydraulic indicators. The results show that the ecological hydraulic performance of urban channelized river in the study changes with the fluctuation of topographic geometric variables, and the more complex the spatial shape of the river course, the better the ecological hydraulic performance of the river. Under high discharge ($8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$), the river bed disturbance under the “deep pool-shoal” morphology structure is reduced by 88.2% on average, the hydro-morphological index of diversity is increased by 37.4% on average, and the shallow slow-water habitat area is increased by 24.9 times, indicating that the ecological hydraulic performance of the river has been significantly improved. The reconstruction of near natural form of urban rivers can significantly reduce the sensitivity of rivers to discharge changes, and significantly improve the stability of river ecological structure, which is conducive to the restoration of river ecosystems.

Key words: river course form transformation; river course restoration; hydraulic model; river bed disturbance; hydro-morphological index of diversity; shallow slow-water habitat area

基金项目:重庆交通大学研究生科研创新项目(2020S0026);重庆市建设科技计划(城科字2020第5-7)

作者简介:唐杰(1995—),男,助理工程师,硕士,主要从事河流生态水力学研究。E-mail: 551996847@qq.com

通信作者:陈垚(1983—),男,教授,博士,主要从事水污染防治与城市雨洪管理研究。E-mail: chenyaoc@cjtu.edu.cn

随着城市化进程的不断推进,河流的水文循环过程、泥沙输移和营养物质的流动受到影响,使得河流水文情势和河道形态发生显著改变,造成水质恶化,生物多样性锐减^[1-3],加剧城市河流生态系统的退化过程^[4]。大多数河道治理工程采用单一生物化学手段解决河流水质问题,缺乏生态标准或恢复预期目标^[5-6],忽视河流自然属性及过程的治理模式也将造成生态结构受损。相关研究指出,水文情势、水力条件和河道地形地貌特征共同决定河流生态结构^[7],近年来对生态流量和水资源承载力^[8]等生态水文指标的研究彰显了水文情势对于水域生物群落结构和生态功能的重要性,如班璇等^[9]采用变化范围法计算气候变化对大坝下游不同流量的脉冲次数,指出水文情势过度波动不利于水生态结构稳定;程俊翔等^[10]引进国外水文指标改变体系,阐述该体系在水文水资源管理实践中的应用意义;华祖林等^[2]提出一种针对严重城市化的河流生态水位和流量的计算方法并证明其可行性,建议采取基于过程的修复措施从本质上恢复河流的自然生态系统。

水力条件也直接影响水生生物群落结构,并驱动着河流生态功能的演化过程,已被确定为河流生态健康的关键调控因子^[11-12]。相关研究证实,通过恢复河道近自然化形态来改善河道水力条件,降低城市水文变化的影响,可修复城市河流生态结构^[13]。天然河道一般具备完整且复杂的自然蜿蜒、深潭-浅滩形态和侧向河漫滩等河道形态^[14]。德国德莱萨姆河以仿照自然形态改造廊道结构,构建生态敏感区以形成高质量生境区,大大提升了生物多样性^[15];增设生态丁坝和生态护岸等河道形态改造措施在国内河道治理工程中也取得较好生态效益^[16-17]。

数值模拟手段可以在工程实践前使河道形态改造设计方案能满足水力条件的生态营造目标,但需要掌握河道形态改造对生态水力条件的影响机制,在给定的生态框架内进行预模拟^[18],确定最佳河道形态改造设计方案。本文在对河道河宽、水深和蜿蜒度等地形几何变量按正弦函数进行振荡波动的基础上,利用 R 语言程序包^[19-20]生成 6 种河道数字地形模型(digital terrain models,DTMs),采用 MIKE 模型考察不同河道形态改造对河床干扰度 τ^* 、水力形态多样性指数(hydro-morphological index of diversity, HMID)和浅滩缓流生境面积(shallow slow-water habitat area, SSWHA)等生态水力指标的影响,进而阐明不同河道形态改造设计方案的生态有效性,以期城市河流近自然修复提供科学依据。

1 研究方法

1.1 评价步骤

为定量评价城市河道形态改造方案产生的生态水力效应,通过如下 4 个步骤来完成不同河道形态的数字模型构建及其生态水力效应的数值模拟评价:①选取研究河段(本文以西部(重庆)科学城境内的梁滩河 200 m 的典型“三面光”渠化河道为研究背景),通过现场实测获取该渠化河道的全深、全宽和坡度等平面几何参数,以形成具有代表性的城市化河道地形几何变量。②利用河道地形合成程序^[19]将具有不同地形几何变量值的河道生成 DTMs,包括原始渠化河道以及具有不同水深、宽度和蜿蜒度等几何变量值的 5 种形态重塑河道。在对河道形态进行重塑设计时,遵循河道形态的复杂性,按照自然河流特征进行渐进式变化,同时关注河道设计的尺度要求,未对河道的局部水力结构进行详细研究。③利用 MIKE 二维水动力模型对生成的河道 DTMs 进行 2D 水力模型模拟,并根据模拟输出结果对不同形态河道的生态水力效应进行评估。④分别根据 τ^* 、HMID 和 SSWHA 等生态水力指标,定量评价不同形态重塑河道的河床稳定性、水力多样性营造能力和适宜水生栖息地的生态可获得性,并对比分析形态重塑河道与原始渠化河道的生态水力性能。

1.2 河道形态设计

在利用“RiverBuilder”R 语言包合成数字河道时,通过输入的控制性参数、变异性参数以及选择的河道地形变异性几何函数生成 DTMs。其中,控制性参数为合成河道的初始几何参数,包括实测获得的河道长度、宽度、水深、坡度、横截面形状等;变异性参数包括周期波动函数的振幅、频率、初相位等,主要用于对控制性参数进行取值。河道全宽 W_{bf} 、河道全深 H_{bf} 和河床高程 Z_{ti} 的计算公式为

$$W_{bf} = \overline{W_{bf}}f(x_i) + \overline{W_{bf}} \quad (1)$$

$$H_{bf} = \overline{H_{bf}}f(x_i) + \overline{H_{bf}} \quad (2)$$

$$Z_{ti} = \overline{H_{bf}}f(x_i) + \overline{H_{bf}} + S_i + Z_d \quad (3)$$

式中: W_{bf} 、 H_{bf} 、 Z_{ti} 分别为位于 x_i 处的河道全宽、河道全深和河床高程; $\overline{W_{bf}}$ 为平均满岸宽度; $\overline{H_{bf}}$ 为平均满岸高程; S_i 为坡面在 x_i 处的纵向坡度; Z_d 为河床高程基准面; $f(x_i)$ 为 RiverBuilder 中的线性、三角和柏林函数,通过函数的自由组合实现河道变异性参数进行无限种可能的几何变量函数变化^[19]。一般而言,使用以下正弦函数振荡便能实现 W_{bf} 和 Z_{ti} 平均值的变异性:

$$y(x_i) = a_s \sin(b_s x_{ri} + \theta_s) \quad (4)$$

式中: $y(x_i)$ 为相关控制函数值; a_s 、 b_s 、 θ_s 分别为正弦分量的振幅、角频率和相位; x_n 为直角坐标系弧度制对应的位置,rad。

基于梁滩河研究段实测的控制性参数,并参考 Anim 等^[14]河道设计案例,根据原始渠化河道形态几何参数,合成型态单一的城市化河道 DTMs;在该河道 DTMs 基础上,根据河道宽度、蜿蜒度和河床高程的组合变化,创建 5 种不同河道形态 DTMs,生成不同形态河道(图 1 和图 2)。表 1 为河道形态设计说明,各河道的 DTMs 控制性参数相同,包括河道高程为 270 m、河道长度为 200 m、河道坡度为 0.0026%、河道全宽为 10 m、河道全深为 1 m,变异性参数取值见表 2。同时,为研究控制变量,每种河道形态控制性参数取值与初始实测的城市化河道保持一致,且同类型变异性参数取值相同。

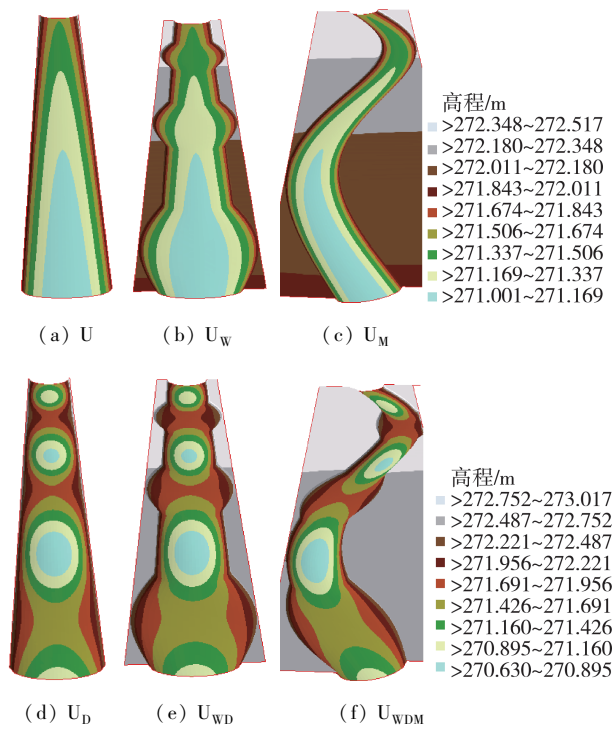


图 1 河道形态不规则三角网格

Fig.1 Irregular triangular network of river course form

1.3 二维水动力模型

MIKE21 水动力模块可用于求解以垂线平均流为对象的平面流场参数^[21],已广泛应用于河流、湖泊、河口与海岸水动力及泥沙模拟,本文采用 MIKE21 模块完成河道二维水动力建模。在建模时根据 RiverBuilder 为每个河道 DTMs 生成的数据坐标点分别构建矩形网格。其中,每个网格有 200 个纵向节点,节点间距为 0.4 m,涡黏系数采用 Smagorinsky 公式默认值 0.28,曼宁系数 n 取 0.04,代表典型的无植被粗颗粒表面粗糙度^[14,22],分别采用流量和水位作为河道上、下游边界条件。在确定

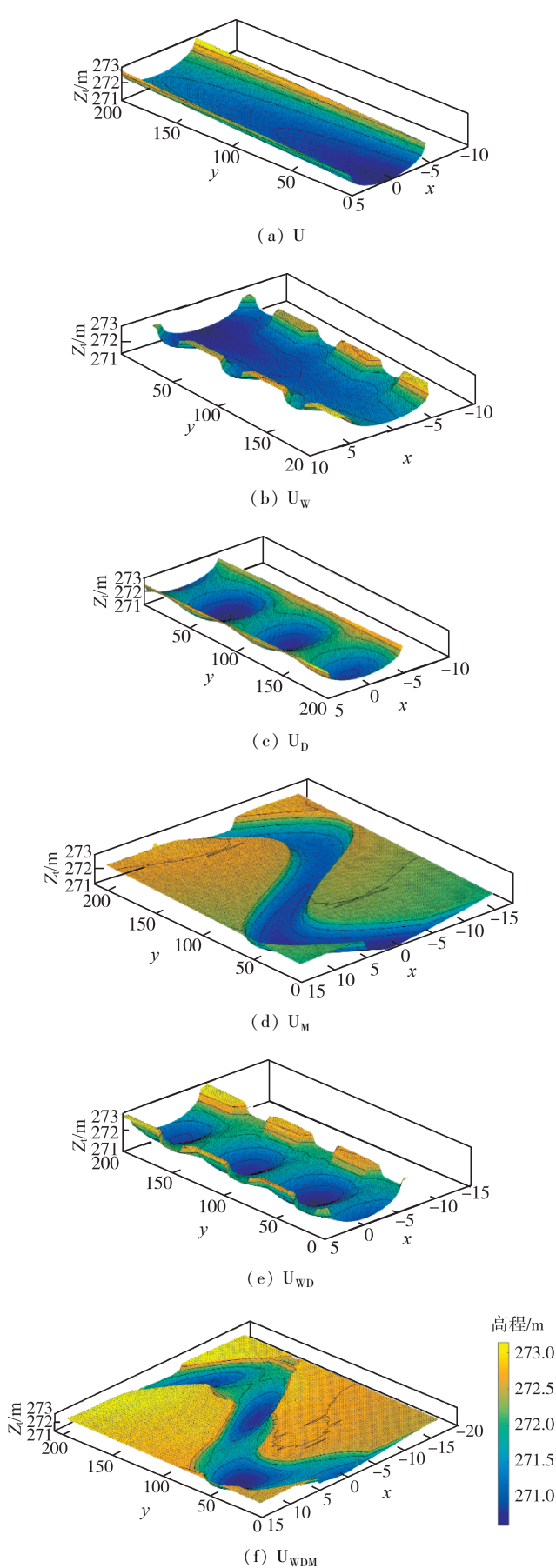


图 2 河道形态三维图
Fig.2 Three-dimensional diagram of river course

表 1 河道形态设计说明

Table 1 Description of river course form design

河道形态	形态描述	形态改造目标
U	直线均质、无宽度和水深变化河道	自然河道被大幅人为渠化改造的结果,通常具有均匀横断面和河床坡度
U _w	只有宽度波动的城市河道	局部加宽的直线河道
U _D	只有水深波动的城市河道	构建河床高程起伏,在一定程度上提高河道生态水力性能
U _M	只有蜿蜒度变化的城市河道	类似部分弯曲的城市河道或公园河道
U _{WD}	宽度和水深都波动的城市河道	构造具有局部加宽并有高程起伏的河床,形成浅且宽的河滩和深且窄的水池,类似自然河流“深潭-浅滩”结构
U _{WDM}	既有宽度和水深波动,又具备蜿蜒度的近自然河道	近自然化改造的目标形态

表 2 河道形态设计变异性参数取值

Table 2 Variability parameter value of river course form design

河道形态	宽度 振幅/ m	宽度 频率/ Hz	宽度 相位/ rad	河床 高程 振幅/ m	河床 高程 频率/ Hz	河床 高程 初相 位/rad	蜿蜒 度振 幅/m	蜿蜒 度频 率/Hz	蜿蜒 度初 相位/ rad
U	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U _w	0.25	2	0	0	0	0	0	0	0
U _D	0	0	0	0.5	2	0	0	0	0
U _M	0	0	0	0	0	0	10	1	0
U _{WD}	0.25	2	0	0.5	2	0	0	0	0
U _{WDM}	0.25	2	0	0.5	2	0	10	1	0

河道上游边界时,先根据河道 DTMs 典型断面计算出河道湿周和断面面积,再利用曼宁方程计算出满岸流量 Q_{bf} ,最后按 Q_{bf} 值递减原则设置上游流量边界值。根据 DTMs 提取边界断面,再代入上游流量值计算得出水位-流量关系曲线来设置下游水位。各河道形态模拟 10 次后输出流速 V 、总水深 D 、床层剪切应力 τ_b 和水面高程 W_{se} 等信息。采用 ArcGIS 10.8 对构建的水动力模型结果进行处理和分析,用来研究不同河道形态对河流生态水力性能的影响^[23-25]。

1.4 生态水力指标

本文主要探讨 τ^* 、HMID、SSWHA 3 个与河流生态系统功能有直接联系的水力特性指标,并通过 ArcGIS 软件中 Python 决策树对二维水动力模型输出栅格进行脚本处理后计算确定。

a. 采用 τ^* 表征河床质运动和底栖生物群落扰动程度。频繁的河床扰动不仅加剧河道形态退化与结构不稳定性,而且也加速河流生物群漂移过程^[26-27]。为定量表征河道河床移动潜力与趋势,通常采用无量纲床层剪切应力——Shields 应力,亦称为河床干扰度 τ^* 来评价河床稳定性,其在二维水动力模型网格中的计算公式为

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{D_{50}(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5)$$

式中: τ_b 为床层剪切应力; γ_s 、 γ_w 分别为河床质和水的容重; D_{50} 为河床底质中值粒径。根据 τ^* 与其临

界值 $\tau_c^* = 0.045$ 的比较来区分河床稳定性, $\tau^* > \tau_c^*$ 时为流动性河床, $\tau^* \leq \tau_c^*$ 则为稳定性河床^[28]。

b. 采用 HMID 表征河道水力多样性营造能力。研究证实河道内流速和水深的空间分布多样性在维护河流生物群落多样性和生态系统健康方面具有极其重要的作用,满足河流内不同生物群生活史对策的适宜响应^[7,29-30]。本研究采用 Gostner 等^[31] 提出的 HMID 指标定量表征流速-水深空间分布的水力异质性,即根据流速和水深的变异系数评价河道整体水力形态多样性:

$$H_{MID} = (1 + C_{vu})^2 + (1 + C_{vd})^2 \quad (6)$$

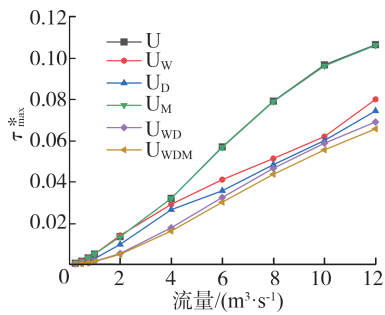
式中: H_{MID} 为 HMID 指标值; C_{vu} 、 C_{vd} 分别为流速和水深的变异系数。 H_{MID} 数值越大,河道水力形态多样性越高。

c. 采用 SSWHA 表征河道适宜水生栖息地的生态可获得性。浅滩和缓流水生栖息地的可获得性直接影响依赖该栖息地生物群落的分布和丰度,也促成物种自然进化差异,在洪涝条件下能作为水生生物繁殖的适宜栖息地和避难所^[1]。相关研究表明,当流速和水深分别为 $0 \sim 0.2$ m/s 和 $0 \sim 0.3$ m 时,可作为鲫鱼等常见鱼类和大型底栖无脊椎动物最适宜生长水动力条件^[7,32-33]。本文以此流速和水深范围作为浅滩缓流生境区域判定标准,用 ArcGIS-Python 决策树对 MIKE21 输出的流速-水深栅格图进行脚本处理,定位同时符合流速和水深阈值的网格单元并计算面积,即为河道 SSWHA 值。

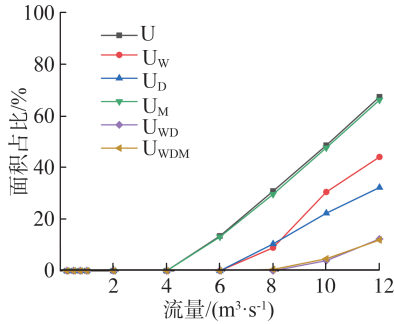
2 结果与分析

2.1 河床稳定性

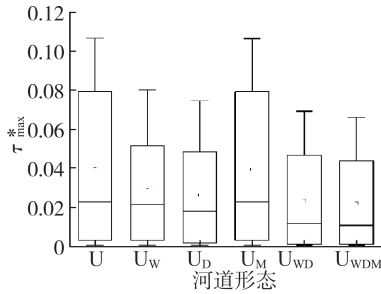
图 3 为河道形态改造对河床干扰度的影响。由图 3(a) 可见,以满岸流量 ($Q_{bf} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$) 为最大值递减的流量工况下,不同形态河道最大河床干扰度 $\tau_{\max}^*$ 均随河道流量增加而增强,其中,无宽度和水深波动的 U 和 U_M 河道 $\tau_{\max}^*$ 随流量增加速率最快,且较其他河道差异更显著;同时,河道地形变化的几何变量越多,各流量下 $\tau_{\max}^*$ 越小。利用河床干扰度阈值



(a) 最大河床干扰度变化



(b) $\tau^* > \tau_c^*$ 的面积占比



(c) 最大河床干扰度日分布箱线图

图3 河道形态改造对河床干扰度的影响

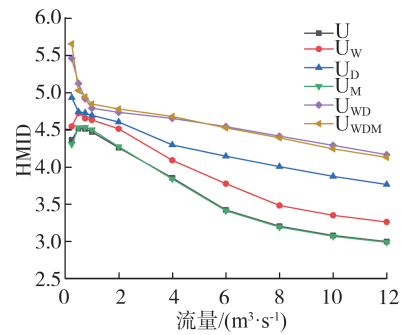
Fig.3 Effect of river course form transformation on river bed disturbance

τ_c^* 为判定标准,计算出每种河道在不同流量下超过 τ_c^* 的网格面积占比见图 3(b),可见河道具有流动性的河床面积随地形几何变量增多而减少,高流量 ($8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$) 下 U_{WD} 和 U_{WDM} 河道较其他河道具有更稳定的河床。同时,仅宽度或水深变量波动的河道 (U_W 、 U_D) 随流量增加,其河床也较 U 和 U_M 河道呈现出更好的稳定性,且 U_D 河道的河床稳定性优于 U_W 河道。可见,河道蜿蜒度对河床稳定性几乎无影响,而宽度和水深对河床稳定性具有显著影响。如低流量 ($\leq 1 \text{ m}^3/\text{s}$) 条件下,各河道 $\tau_{\max}^*$ 均较小,且不存在流动性河床面;但当河道流量超过 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,仅宽度或水深变化能有效降低流量对河床的扰动,且随着流量增加,单一几何变量对河床扰动的抵抗能力明显不及复合几何变量河道。研究证实,宽度和水深同时波动时,流动河床面积大幅减少。在 Q_{bf} 条件下, U 河道有近 68% 的河床处于不稳定流动状态,相较而言, U_{WD} 和 U_{WDM} 河道则增加约 56% 未被

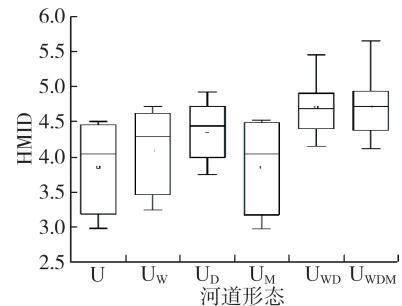
扰动的水生栖息地区域。此外,由图 3(c) 可见,与其他河道相比, U 和 U_M 河道中 $\tau^* > \tau_c^*$ 情况发生频率更高,且发生频率随河道宽度和水深波动而减少,如 U_{WD} 和 U_{WDM} 河道, $\tau_{\max}^*$ 中位数仅为 0.016 和 0.017,明显低于其他河道,因此该两类河道的河床较稳定。

2.2 水力形态多样性

图 4 为河道形态改造对 HMID 的影响。由图 4(a) 可见,不同河道形态下,水力多样性随流量大小呈现出不同变化规律,蜿蜒度对河道 HMID 几乎无影响,且河道水力形态多样性总体上随流量增加呈现出下降趋势,但并非流量越低河道 HMID 就越高。如 U 、 U_W 、 U_M 河道在 $0.25 \sim 0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,其 HMID 随流量增加反而呈上升趋势;当流量增至 $2 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$ 区间时, HMID 则随流量增加而出现陡降现象,而其他河道 (U_D 、 U_{WD} 和 U_{WDM}) 则缓慢下降,且降幅较低。在高流量 ($8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$) 条件下,“深潭-浅滩”式河道 (U_{WD} 和 U_{WDM}) 的 HMID 几乎是 U 河道的 1.5 倍,体现较高的流速和水深空间分布差异性,能保持较高且较稳定的水力形态多样性;而无河床高程起伏的河道 (U 、 U_W 和 U_M) 在不同流量下的流速和水深变化范围均明显低于其他河道,导致 HMID 相对较小且易受流量变化影响。由图 4(b) 可见, U 河道添加宽度、水深等几何变量时,其 HMID 总体得到提高,且受流量变化的影响逐渐降低,呈现出更稳定的 HMID。结果表明,水深波动对



(a) HMID 变化



(b) HMID 日分布箱线图

图4 河道形态改造对 HMID 的影响

Fig.4 Effect of river course form transformation on HMID

河道水力形态多样性的改善强于宽度波动,原因是水深波动引起横断面发生变化而改变流速,由式(6)可知,河道流速和水深同时发生变化时 HMID 计算值显著增大;而宽度波动仅改变流速,并不会造成河道水深发生变化。由此可见,以河道 HMID 作为判定标准时,河床地形起伏的形态营造是影响河流水力形态多样性的关键因素。

2.3 适宜生境可获得性

图 5 为河道形态改造对 SSWHA 的影响。由图 5(a)可见,不同形态河道下,SSWHA 具有相似变化趋势,均随流量增加而减少。其中,低流量(0.25 ~ 1 m³/s)下,U、U_w和 U_M河道 SSWHA 较大,显著高于具有河床起伏地形的 U_D、U_{WD}和 U_{WDM}河道,表明低流量下无水深波动的河道具有更大 SSWHA,而河道蜿蜒度波动也能在一定程度上增加浅水缓流生境区域。无水深波动的河道在低流量下较快达到流速和水深的阈值范围,且局部拓宽也增加河道横断面面积,使得 U_w河道在低流量时具有最大适宜生境面积。但当流量高于 1 m³/s 时,U、U_w和 U_M河道 SSWHA 急剧下降,当流量达到 6 m³/s 时 U 和 U_M河道 SSWHA 已接近 0;U_w河道在中流量(1 ~ 6 m³/s)范围内 SSWHA 维持较高数值,但随着流量超过 8 m³/s,其值开始低于 U_D河道,并随流量增加而陡降至趋于 0。相反,U_D、U_{WD}和 U_{WDM}河道的适宜生境面积整体上表现出较好稳定性,在中、高流量(1 ~ 12 m³/s)下,3 种河道 SSWHA 对流量变化的敏感度低于其他

河道。研究结果表明,在暴雨洪水等流量剧变事件下,具有河床起伏地形的河道更能抵抗河道流量剧变对水生生物适宜生境区域的影响,进而使其具有保持河道生态稳定性的能力。由图 5(a)(b)可知,U 河道在低流量下具有较大 SSWHA,但其中位数仅为 179.5 m²,明显小于 U_{WD}和 U_{WDM}河道的中位数生境面积(分别为 195.8 m²和 209.1 m²);同时 U_w和 U_D河道的 SSWHA 中位数分别达到最大(145.8 m²)和最小(255.8 m²),且 U_w河道的均值也处于最高水平。结果表明,河道宽度是影响 SSWHA 可获得性的关键,增加河道宽度的波动性能显著提高 SSWHA。因此,在城市降雨径流引起的河流流量突增事件频发的情况下,增加“三面光”城市渠化河道的宽度波动,并辅以河床起伏地形和蜿蜒度,重塑弯曲的“深潭-浅滩”近自然形态河道,对于维持河道生态结构稳定,提升河流适宜生境的可获得性具有重要意义。

3 讨论

3.1 河道形态重塑产生的生态水力效应

河道形态改造对河流生态水力性能的影响结果表明,“三面光”式城市渠化河道因其形态无宽度、水深和蜿蜒度的变化而表现出形状规则且横断面单一,导致河道形成的水力作用较为简单,且相较于自然河道,均质化河道形态对河流水力条件产生不可逆的损害。同时,河道地形添加的几何变量越多,河流生态水力性能越好。当河道宽度、水深和蜿蜒度等几何变量同时发生变化时,河道对径流情势变化的敏感性就会降低,进一步证实河道形态空间多样性对维护河流生态系统健康具有重要作用^[34-35]。本研究仅对河道的宽度、水深和蜿蜒度等地形几何变量进行研究,且结果证实 3 种几何变量同时波动时会产生较好的生态水力效应,但并不代表一味地增加河道地形几何变量或在某一变量上增加函数组合进行振荡波动,能够使重塑后的河道产生最优水力性能。未来将对河道地形几何变量的优化组合进行系统研究,以探寻不同河道最佳形态改造设计方案。总体而言,将城市河道形态几何变量进行连贯性的振荡波动,能产生自然河道所特有的形态动力学过程,有效减缓变化水文情势对河流生态水力条件的影响,将避免河流内生物群落在短时间内发生退化,进而实现城市河道近自然修复的生态目标。

研究结果表明,将河床均质化的城市河道改造为“深潭-浅滩”复杂形态时,河流的生态水力效应得到明显改善,在此基础上增加平面蜿蜒度变化形成近自然的河道形态,可有效提高河道适宜水生栖

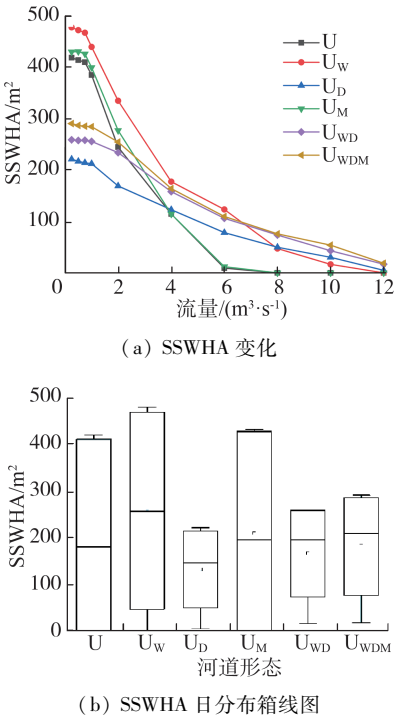


图 5 河道形态改造对 SSWHA 的影响

Fig. 5 Effect of river course form transformation on SSWHA

息地的可获得性。研究得出,恢复自然河道特有的“深潭-浅滩”结构可促进高、低流量下剪切应力的逆转过程,也有助于高流量下水流在深潭和浅滩间的加速与降速过程^[36],使河道流速、水深和湍流等水力特性产生时空分布异质性^[37],进而有效促进河道水生栖息地形成,并提高其生境适宜性。本研究尚不能得出该典型城市河道的最佳形态改造设计方案,但研究已证实,即使对“三面光”式城市渠化河道在几何形态上进行较小幅度的宽度或深度波动,也能在一定程度上改善河流的生态水力条件。总体而言,具有复杂地形的河道能与水文情势形成多重物理机制过程,而不同形态的河道会以不同方式调控河道内水流过程,进而形成不同形态的水力条件。研究进一步证实,即使在城市暴雨径流导致河流水文情势发生明显改变的情况下,河道地形几何变量发生振动波动也能有效降低河床干扰,减少水流对河床的冲刷,增大河道内水生生物的适宜生境区域,并提高水力形态生态多样性。

3.2 城市河道形态改造对河流生态系统近自然修复的能力

将经形态改造后形成的 5 种河道在高流量(8~12 m³/s)下与 U 河道在同一断面的生态水力指标进行对比,并分别用平均增加(+)和平均减少(-)的百分比来表示(表 3)。结果表明,河道形态的近自然重塑使河流生态水力条件得到明显改善,与 U 河道相比,形态最复杂的 U_{WDM}河道下河床干扰度平均减少 87.3%,HMID 平均提高 36.5%,而适宜生境面积平均扩大 26.9 倍。研究中发现,河道蜿蜒度对河流 3 个生态水力指标影响甚微,原因在于本研究对蜿蜒度振荡波动仅局限于河道平面形态,而在河流近自然修复工程中河道弯曲程度同样对河流生态过程具有重要作用。

表 3 高流量下 5 种河道形态与 U 河道的生态水力性能差异

河道形态	差异比例/%		
	不稳定河床面积	HMID	SSWHA
U _W	-39.6	+9.2	+1921.7
U _D	-59.4	+24.5	+1664.9
U _M	-0.6	0	+30.1
U _{WD}	-88.2	+37.4	+2489.7
U _{WDM}	-87.3	+36.5	+2688.6

研究结果表明,在河道宽度、河床地形高程和河道中心线上添加正弦函数进行组合振荡波动时,将产生近自然条件的多样性水力特征。结果证实,对

均质化河道进行近自然形态结构重塑,能产生水生系统所需的空間多样性,进而促进河流生态系统中泥沙输移、营养物扩散等自然动态过程发生。河流自然生态系统的恢复,不仅与河道形态有关,还受河流水文情势的直接影响,有研究表明,城市化下形成的水文情势与自然水文情势存在较大差异性,在一定程度上加剧河流生态系统的退化过程^[13]。因此,仅依靠城市河道形态的近自然重塑,而不考虑城市区域水文情势的近自然恢复,难以实现城市河流生态系统自然恢复目标。因为城市降雨径流的改变、集中式的径流排放模式将对形态改造河道产生持续冲刷和破坏效应,最终影响形态重塑河道生态水力性能的稳定性和持续性。因此,城市河流生态系统的恢复,不仅需要河道形态进行近自然重塑改造,而且还需对水文情势进行近自然恢复(如采用海绵城市建设理念,减少城市开发对河流水文情势的影响),从上述两个途径对城市河流进行近自然恢复,可实现河流系统的生态完整性和结构稳定性。

4 结 论

本文根据河流自然修复理论,采用数字河道合成技术,并结合二维水动力模型定量评价河道形态改造对城市河流生态水力性能的影响。结果表明,“三面光”式城市渠化河道的生态水力性能随河道宽度、河床高程、蜿蜒度等地形几何变量的振荡变化而不断改善,且河道空间形态越复杂,河道的生态水力性能越好。河床稳定性和 HMID 主要受河床地形起伏导致的水深波动影响,而 SSWHA 受宽度波动影响较大,在高流量(8~12 m³/s)下,相较于未改造的 U 河道,“深潭-浅滩”式 U_{WD}河道形态构造下河床干扰度平均减少 88.2%,HMID 平均提高 37.4%,而 SSWHA 可增加 24.9 倍,表明河流的生态水力条件得到显著改善;加入蜿蜒度变量的 U_{WDM}河道的 3 个生态水力指标与 U_{WD}河道无明显差异,单独的蜿蜒度对河流生态水力性能影响较小。城市河道的近自然形态重构可大幅降低河道对流量变化的敏感性,并显著提高河道生态结构的稳定性,有助于河流生态系统的恢复。

参考文献:

[1] VIETZ G J, SAMMONDS M J, STEWARDSON M J. Impacts of flow regulation on slackwaters in river channels [J]. Water Resources Research, 2013, 49 (4): 1797-1811.

[2] 华祖林,董越洋,褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU

- Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 140-144. (in Chinese))
- [3] 卢纯.“共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making Efforts to Protect the Yangtze River Together” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 283-295. (in Chinese))
- [4] 李廷梅, 于鲁冀, 吕晓燕. 针对城市河流功能需求的生态修复技术概述[J]. 环境工程, 2016, 34(6): 6-9. (LI Tingmei, YU Lujie, LYU Xiaoyan. An overview of ecological restoration technology for urban river function requirement [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(6): 6-9. (in Chinese))
- [5] FLETCHER T D, VIETZ G, WALSH C J. Protection of stream ecosystems from urban stormwater runoff: the multiple benefits of an ecohydrological approach [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2014, 38(5): 543-555.
- [6] VIOLIN C R, CADA P, SUDDUTH E B, et al. Effects of urbanization and urban stream restoration on the physical and biological structure of stream ecosystems [J]. Ecological Applications, 2011, 21(6): 1932-1949.
- [7] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 550-559. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. Holistic conceptual model for the structure and function of river ecosystems [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 550-559. (in Chinese))
- [8] 崔晨韵, 朱永华, 吕海深, 等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 406-412. (in Chinese))
- [9] 班璇, 师崇文, 郭辉, 等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [10] 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 24-32. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 24-32. (in Chinese))
- [11] JOWETT I G. Hydraulic constraints on habitat suitability for benthic invertebrates in gravel-bed rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5): 495-507.
- [12] CIENCIALA P. Hydrogeomorphic controls on spatial pattern of fish habitat in a mountain stream [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2015.
- [13] ANIM D O, FLETCHER T D, VIETZ G J, et al. Restoring in-stream habitat in urban catchments: modify flow or the channel? [J]. Ecohydrology, 2019, 12(1): e2050.
- [14] ANIM D O, FLETCHER T D, VIETZ G J, et al. How alternative urban stream channel designs influence ecohydraulic conditions [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247: 242-252.
- [15] 吴宸晖, 鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 136-144. (WU Chenhui, JU Maosen. International experience of river ecological restoration and its enlightenment to the Yangtze River Protection [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 136-144. (in Chinese))
- [16] 张先起, 李亚敏, 李恩宽, 等. 基于生态的城镇河道整治与环境修复方案研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(2): 36-38. (ZHANG Xianqi, LI Yamin, LI Enkuan, et al. Research on urban river training and environment rehabilitation program based on ecology [J]. Yellow River, 2013, 35(2): 36-38. (in Chinese))
- [17] 黄显峰, 郑延科, 方国华, 等. 平原河网地区河流生态修复技术研究与实践[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 170-176. (HUANG Xianfeng, ZHENG Yanke, FANG Guohua, et al. Research and practices of river ecological restoration technology applied in plain river network area [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 170-176. (in Chinese))
- [18] THEODOROPOULOS C, STAMOU A, VARDAKAS L, et al. River restoration is prone to failure unless pre-optimized within a mechanistic ecological framework insights from a model-based case study [J]. Water Research, 2020, 173: 115550.
- [19] BROWN R, PASTERNAK G, WALLENDER W. Synthetic river valleys: creating prescribed topography for form-process inquiry and river rehabilitation design [J]. Geomorphology, 2014, 214: 40-55.
- [20] BROWN R, PASTERNAK G, LIN T. The topographic design of river channels for form-process linkages [J]. Environmental Management, 2015, 57(4): 929-942.
- [21] 麻蓉, 白涛, 黄强, 等. MIKE 21 模型及其在城市内涝模拟中的应用[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 172-179. (MA Rong, BAI Tao, HUANG Qiang, et al. MIKE 21 model and its application on urban waterlogging simulation [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 172-179. (in Chinese))
- [22] ARCEMENT G J, SCHNEIDER V R. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains [M]. Reston: Publications Warehouse, 1989.
- [23] BROWN R A, PASTERNAK G B, LIN T. The

- topographic design of river channels for form-process linkages [J]. Environmental Management, 2016, 57: 929.
- [24] LANE B A, PASTERNAK G B, SANDOVAL SOLIS S. Integrated analysis of flow, form, and function for river management and design testing [J]. Ecohydrology, 2018, 11(5): e1969.
- [25] GIBBINS C, BATALLA R J, VERICAT D. Invertebrate drift and benthic exhaustion during disturbance: response of mayflies (*ephemeroptera*) to increasing shear stress and river-bed instability [J]. River Research and Applications, 2010, 26(4): 499-511.
- [26] HAWLEY R J, WOOTEN M S, MACMANNIS K R, et al. When do macroinvertebrate communities of reference streams resemble urban streams? the biological relevance of Q critical [J]. Freshwater Science, 2016, 35(3): 778-794.
- [27] LOBERA G, MUÑOZ I, LÓPEZ-TARAZÓN J, et al. Effects of flow regulation on river bed dynamics and invertebrate communities in a mediterranean river [J]. Hydrobiologia, 2017, 784: 283-304.
- [28] SAWYER A M, PASTERNAK G B, MOIR H J, et al. Riffle-pool maintenance and flow convergence routing observed on a large gravel-bed river [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 143-160.
- [29] VERBERK W C E P, SIEPEL H, ESSELINK H. Life-history strategies in freshwater macroinvertebrates [J]. Freshwater Biology, 2008, 53(9): 1722-1738.
- [30] ROSENFELD J S, CAMPBELL K, LEUNG E S, et al. Habitat effects on depth and velocity frequency distributions: implications for modeling hydraulic variation and fish habitat suitability in streams [J]. Geomorphology, 2011, 130(3): 127-135.
- [31] GOSTNER W, PARASIEWICZ P, SCHLEISS A J. A case study on spatial and temporal hydraulic variability in an alpine gravel-bed stream based on the hydromorphological index of diversity [J]. Ecohydrology, 2013, 6(4): 652-667.
- [32] SHEARER K, HAYES J, JOWETT I, et al. Habitat suitability curves for benthic macroinvertebrates from a small new zealand river [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 2015, 49(2): 178-191.
- [33] NESTLER J M, MILHOUS R T, PAYNE T R, et al. History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology [J]. River Research and Applications, 2019, 35(8): 1155-1180.
- [34] ESCOBAR M, PASTERNAK G. A hydrogeomorphic dynamics approach to assess in-stream ecological functionality using the functional flows model, Part 1: model characteristics [J]. River Research and Applications, 2010, 26: 1103-1128.
- [35] SCHWARTZ J S, NEFF K J, DWORAK F E, et al. Restoring riffle-pool structure in an incised, straightened urban stream channel using an ecohydraulic modeling approach [J]. Ecological Engineering, 2015, 78: 112-126.
- [36] BROWN R A, PASTERNAK G B. Bed and width oscillations form coherent patterns in a partially confined, regulated gravel-cobble-bedded river adjusting to anthropogenic disturbances [J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(1): 1-20.
- [37] CLARKE S, BURGESSGAMBLE L, WHARTON G. Linking form and function: towards an eco-hydromorphic approach to sustainable river restoration [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2003, 13: 439-450.

(收稿日期: 2021-08-20 编辑: 王芳)

(上接第 63 页)

- [20] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述 [J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3873-3884. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Review on urban design rainstorm [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(33): 3873-3884. (in Chinese))
- [21] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析 [J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [22] 蔡怡亨, 韩振宇, 周波涛. 对基于 RegCM4 降尺度的中国区域性暴雨事件模拟评估 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 420-429. (CAI Yiheng, HAN Zhenyu, ZHOU Botao. Evaluation of RegCM4 downscaling simulations on regional rainstorm events in China [J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 420-429. (in Chinese))
- [23] 张冬峰, 高学杰. 中国 21 世纪气候变化的 RegCM4 多模拟集合预估 [J]. 科学通报, 2020, 65(23): 2516-2526. (ZHANG Dongfeng, GAO Xuejie. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(23): 2516-2526. (in Chinese))
- [24] 戴有学, 王振华, 戴临栋, 等. 山西临汾市城区暴雨强度公式修订分析研究 [J]. 自然灾害学报, 2017, 26(6): 197-206. (DAI Youxue, WANG Zhenhua, DAI Lindong, et al. Study on the revision of rainstorm intensity formula in urban area in Linfen of Shanxi Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(6): 197-206. (in Chinese))
- [25] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估 [J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-10 编辑: 王芳)