

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221217

郑州市新、老城区暴雨内涝灾害风险指标重要性分析

张金萍^{a,b}, 陈蔚^a, 方宏远^a, 张浩锐^a

(郑州大学 a. 水利与土木工程学院; b. 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为探究影响城市暴雨内涝灾害风险的评价指标及各指标的重要性,以郑州市高新区和金水区作为新、老城区的代表,建立了涵盖自然要素和社会要素的风险指标评价体系,并利用随机森林模型分别确定了各评价指标对新、老城区暴雨内涝灾害影响的重要程度。结果表明,对于新、老城区来说,孕灾环境敏感性均是最重要的一级指标,其中,不透水率、管道密度分别是地表、地下孕灾环境最重要的三级指标;致灾因子危险性对于金水区和高新区的重要性最低,且雨量的重要性远大于雨型;新、老城区的差异主要体现在承灾体稳定性,其对于金水区、高新区的重要性分别为0.23、0.09。结果可为郑州市暴雨内涝灾害的防治提供一定参考。

关键词: 城市暴雨内涝灾害; 风险评价体系; 新、老城区; 随机森林; 指标重要性

中图分类号: P333.2; [TV11]; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)06-0059-05

1 概况

郑州市地处河南省中北部,金水区、高新区分别为郑州市政治经济中心城区、科学技术开发区。其中,金水区位于郑州市主城区东北部,是郑州市老城区所在地,人口密集,经济发达,常住人口为161.75万人;高新区位于郑州市主城区西北部,是1988年河南省启动筹建的第一个开发区,为郑州市新建城区,建成区面积约65 km²,常住人口为54.6万人。研究区地理位置及土地利用类型见图1。近年来,在全球气候变化和人类活动的

双重影响下,极端天气频发,城市暴雨内涝灾害愈发严重。仅2022年上半年,全国就有52个城市因强降雨出现不同程度的积水内涝达73次^[1],城市暴雨内涝灾害已成为制约我国经济社会持续健康发展的重要因素。城市暴雨内涝灾害致灾机理复杂,涉及因素众多且各因素重要性不一。同时,经济社会的发展改变了城市建设理念和雨水管网设计标准,引起了新、老城区之间各因素重要性的差别。鉴此,本文选取郑州市高新区和金水区分别作为新、老城区的代表,运用随机森林模型分别评估各因素对暴雨内涝灾害的影响,以探究不同经济发展状况下,城市系统暴雨内涝灾害风险指标重要性程度的区别。

2 数据资料

(1)降雨数据。设计降雨根据郑州市暴雨强度公式^[2]获得,具体公式为:

$$i = 32.9(1 + 0.965 \lg P) / (t + 24.8)^{0.929} \quad (1)$$

式中, i 为设计降雨强度,mm/min; P 为降雨重现期, a ; t 为降雨历时,min。

(2)下垫面数据。包括研究区遥感影像资料、DEM数据、坡度数据及土地利用类型数据。其中,遥感影像和DEM高程数据来自地理空间数

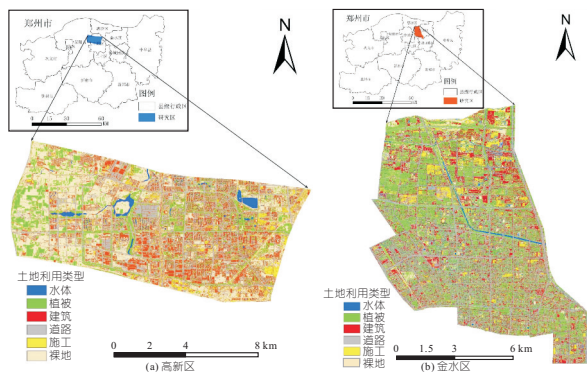


图1 郑州市新、老城区地理位置及土地利用类型

Fig. 1 Geographical location and land use types of new and old urban areas in Zhengzhou City

收稿日期: 2022-06-10, 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200205); 2021年度河南省基金项目(212300410404); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A15); 郑州大学青年教师培育基金项目(JC202042037)

作者简介: 张金萍(1979-),女,博士、教授、博导,研究方向为水资源开发利用与管理,E-mail:Jinping2000_zh@163.com

据云,土地利用类型数据则是由遥感影像在 ArcGIS 中分析得到。

(3)雨水管网数据。来源于《郑州市排水工程规划(2011~2020 年)》,主要包括管道、泵站、检查井和排水口。

(4)社会经济数据。包括人口、GDP、道路、避难所、公安部门和医院分布。其中,人口数据和 GDP 数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.gendata.cn>);道路数据由路网规划结合遥感影像获得;避难所、公安部门、医院分布来源于百度地图兴趣点获取。

3 城市暴雨内涝灾害风险评价指标体系构建

3.1 评价指标选择

城市暴雨内涝灾害的主要致灾因子是降雨。综合考虑降雨的“量”与“型”,选择总雨量、雨强及峰值雨量作为雨量评价指标,选择峰倍比和雨峰系数作为雨型评价指标。

孕灾环境敏感性包括地表孕灾环境敏感性和地下孕灾环境敏感性。大量的不透水面积削减了降雨的下渗和存蓄^[3],地表起伏导致低洼地区更易积水,因此选择不透水面占比、DEM 高程和坡度作为地表孕灾环境敏感性评价指标。另一方面,城市地下排水管网系统是及时宣泄雨水、有效缓解城市暴雨内涝灾害的重要措施,因此可选择管网长度密度、管网容量密度、管道超载风险指数、节点溢流风险指数、淹没风险指数等作为地下孕灾环境敏感性评价指标。

承灾体韧性由承灾体脆弱性和承灾体稳定性共同体现。暴雨内涝灾害使城市人口和财产受损,交通路网破坏,造成城市部分功能瘫痪。因此,选择人口密度、GDP 密度和道路密度作为承灾体脆弱性指标。同时,城市系统会采取疏散群众、灾后救援等相应措施以减少灾害损失,故选择避难所密度、医疗部门密度和公安部门密度作为承灾体稳定性指标。

城市暴雨内涝灾害风险评价指标体系见图 2。

3.2 指标值计算

考虑新、老城区内部环境差异,根据高新区和金水区的河流水系、街道建筑、用地规划等要求,分别将其划分为 16、17 个子区域,划分结果见图 3。

除管道超载风险指数、节点溢流风险指数、淹没风险指数这三个三级指标外,其余内涝灾害风

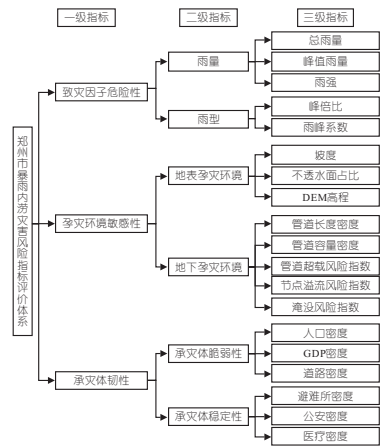


图 2 城市暴雨内涝灾害风险评价指标体系
Fig. 2 Index system of urban rainstorm waterlogging disaster risk assessment

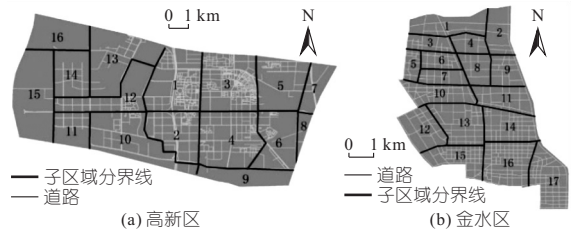


图 3 高新区、金水区子区域划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sub-regional division of Gaoxin District and Jinshui District

险评价指标均可由所收集和处理好过的数据资料得到。

运用 SWMM 模型^[4]模拟金水区和高新区各子区域在遭遇重现期为 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0、8.0、10.0 a 的 9 场暴雨及“7.20”暴雨时的降雨径流过程,由模拟结果计算管道超载风险指数 A、节点溢流风险指数 B 和淹没风险指数 C,具体指标计算公式分别为:

$$A = T_{C实} / T_{C允} \quad (2)$$

$$B = V_{实} / V_{允} \quad (3)$$

$$C = T_{J实} / T_{J允} \quad (4)$$

式中, $T_{C实}$ 为管道实际超载时长, min; $T_{C允}$ 为管道允许超载时长, min; $V_{实}$ 为节点实际溢流量, m^3 ; $V_{允}$ 为节点允许溢流量, m^3 ; $T_{J实}$ 为节点实际积水时长, min; $T_{J允}$ 为节点允许积水时长, min。

3.3 灾害风险等级划分

3.3.1 指标权重计算

利用主成分分析法^[5]计算各评价指标权重,其中,致灾因子危险性指标权重由郑州市 2011~2018 年的 190 场实测短历时单峰降雨计算,孕灾环境敏感性及承灾体韧性指标权重由各子区域指标值计算。根据评价指标与暴雨洪涝灾害风险之间的正、负相关关系将指标分为正向指标与负向

指标两类,结果见表 1。

表 1 各评价指标权重值汇总

Tab. 1 Summary of weight values of each evaluation indexes

一级指标	二级指标	三级指标	单位	权重	指标性质		
致灾因子 危险性	雨量	总雨量	mm	0.163	正向		
		雨强	mm/h	0.403	正向		
		峰值雨量	mm	0.433	正向		
	雨型	峰倍比		0.804	正向		
		雨峰系数		0.196	负向		
孕灾环境 敏感性	地表孕	坡度		0.345	正向		
		灾环境	不透水率百分比	%	0.356	正向	
	地下孕	DEM		m	0.299	负向	
			管道密度(长度)	m/km ²	0.214	负向	
		灾环境	管道密度(容量)	m ³ /km ²	0.302	负向	
			管道超载风险指数		0.166	正向	
		节点溢流风险指数		0.190	正向		
		淹没风险指数		0.128	正向		
		承灾体 韧性	承灾体	人口密度	人/km ²	0.389	正向
			脆弱性	GDP 密度	亿/km ²	0.365	正向
		承灾体 稳定性	道路密度		m/km ²	0.246	正向
				公安密度	m ² /km ²	0.349	负向
	避难所密度			m ² /km ²	0.372	负向	
			医院密度	m ² /km ²	0.279	负向	

3.3.2 风险等级划分

利用加权评价法^[6]计算各子区域遭遇不同暴雨时的综合风险指数,其中正向指标的权重值取其本身,负向指标的权重值取其相反数。对计算所得的综合风险指数进行归一化处理 and 风险等级划分,划分标准见表 2。

表 2 风险等级划分

Tab. 2 Risk classification

综合风险指数	风险等级	综合风险指数	风险等级
[0.0, 0.25)	无风险地区	[0.50, 0.75)	中风险地区
[0.25, 0.50)	低风险地区	[0.75, 1.00]	高风险地区

4 郑州市新、老城区暴雨内涝灾害指标重要性分析

4.1 随机森林模型原理

随机森林算法属于集成学习的一种,主要有分类和回归 2 种应用^[7]。随机森林由多棵决策树组成,利用 Bootstrap 抽样方法得到训练样本集,并利用训练集对决策树进行训练,最终的分类结果由每棵树投票产生。本文利用 R 语言的 random forest 包实现随机森林的分类。

4.1.1 模型评价参数

实际应用中,常用准确率(ACC)、受试者工作特征曲线下面积(AUC)、KAPPA 系数作为随机森林模型性能评价参数^[8]。其中,ACC 表征有多少样本被准确预测,该值越接近于 1 表明分类

器分类结果越好;AUC 表征预测高值(灵敏度)和低值(特异性)的准确性,该值通常在 0.5~1.0 之间,值为 1.0 时表示该模型有完美的预测精度;KAPPA 系数是一种衡量分类精度的指标,其计算基于混淆矩阵。通常 KAPPA 系数的值落在 0~1 之间,当 KAPPA 系数大于 0.8 时,认为模型模拟的分类结果与实际几乎完全一致。

4.1.2 指标重要度衡量方法

在随机森林方法中,可采用平均基尼不纯度减少和平均准确度下降两种方法衡量各因子的重要性^[9]。平均基尼不纯度减少通过计算每个因子对分类树节点上观测值的异质性的影响程度来判断因子重要性,该值越大表示因子越重要;平均准确度下降是给某个因子随机加入噪声,所导致准确率下降越多的因子重要性越高。

4.2 随机森林模型建立

利用所提出的风险等级划分结果建立随机森林模型,自变量为每个子区域在遭受每场降雨时的 19 项指标值,因变量为风险等级划分结果,模型决策树数量为 500。将金水区的 170 组样本数据集和高新区 160 组样本数据集分别随机分为训练集(80%)和测试集(20%),使用训练集建立模型,然后将该模型应用于测试集,并通过模型评价参数评估模型性能。新、老城区模型的评价参数值见表 3。

表 3 模型评价参数

Tab. 3 Model evaluation parameters

评价参数	金水区模型参数数值	高新区模型参数数值
ACC	0.970	0.968
AUC	0.999	0.998
KAPPA	0.954	0.947

由表 3 可知,两个城区的随机森林模型 ACC 分别为 97.0%、96.8%,表明模型有很高的准确率;AUC 值分别为 0.999、0.998,说明模型有几乎完美的预测精度;KAPPA 系数分别为 0.954、0.947,即认为模型模拟的分类结果与实际几乎完全一致。因此,本文建立的随机森林模型结构较优,结果可信度较高。

4.3 新、老城区暴雨内涝灾害指标重要性分析

根据随机森林模型的结果,将高新区和金水区指标重要性程度进行归一化,结果见图 4。应用平均基尼不纯度减少和平均准确度下降两种评价方式对金水区和高新区暴雨内涝灾害指标体系中的一、二、三级指标分别进行对比,结果见图 5。

由图 4、5 可看出:①一级指标中,对于金水区和高新区来说,孕灾环境敏感性均为最重要的指

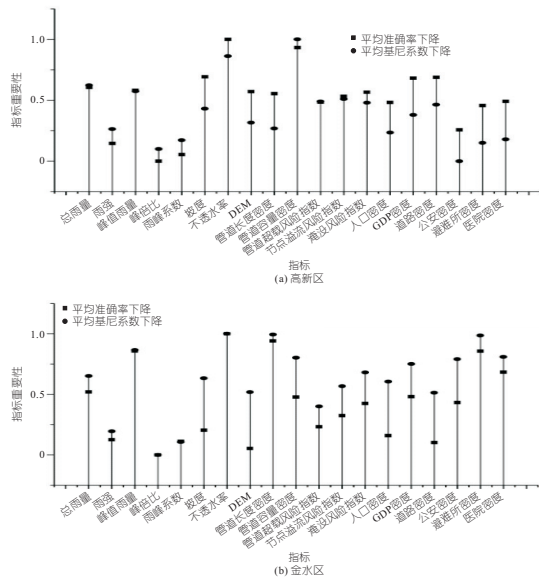


图 4 新、老城区指标重要性

Fig. 4 Importance of indicators of new and old urban areas

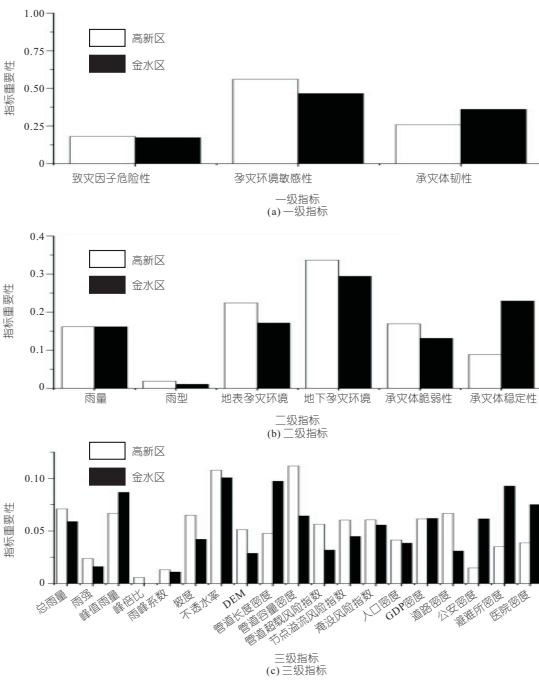


图 5 新、老城区指标重要性对比

Fig. 5 Comparison of index importance between new and old urban areas

标,其次是承灾体韧性,致灾因子危险性对暴雨内涝灾害的影响最小,且在新、老城区重要性大致相同。整体来看,高新区致灾因子危险性和孕灾环境敏感性的重要性均大于金水区,但承灾体韧性的重要性较小。②无论是金水区还是高新区,致灾因子危险性的二级指标中,雨量均是对暴雨内涝灾害影响最大的指标。对金水区而言,峰值雨量是暴雨内涝灾害影响最大的指标,在 19 个指标中排第 4 位。总雨量是高新区暴雨内涝灾害影响最大的指标,在所有指标中排第 3 位,峰值雨量排

第 4 位。相对而言,雨型指标影响程度较小,各三级指标均未表现出明显的重要性。③从孕灾环境敏感性来看,新、老城区地下孕灾环境敏感性的重要性均高于地表孕灾环境敏感性。其中,不透水率不仅是金水区和高新区排名靠前的地表孕灾环境敏感性三级指标,也是整个暴雨内涝灾害评价指标体系中重要性程度最突出的指标。金水区作为郑州市的老城区,地面不透水面积占比高达 67.40%,而高新区作为郑州市新兴的技术开发区,不透水面积占比也在不断增加,目前已达 53.51%。如此高的城市地表不透水面占比使降雨迅速产流,加之地形坡度的综合作用,地表汇流集中,容易形成内涝积水。在地下孕灾环境敏感性的三级指标中,与地下排水管网密切相关的管道长度密度和管道容量密度等指标也在金水区和高新区有较高的重要性。由此可见,合理的管道布设对城市防洪除涝十分重要。当前高新区的管道长度密度、管道容量密度分别是金水区的 1.47、2.63 倍,拥有较好的雨水排泄条件,且高新区在建设过程中注重基础设施绿化改造,加大了区域内对雨洪的拦蓄和滞存能力。而金水区一方面城镇化水平较高,不透水面占比较大,易产生汇流,另一方面该区域的雨水管网排水能力却明显不如高新区。可见,现状经济发展条件下,金水区地表孕灾环境与地下排水系统建设不匹配。④新、老城区暴雨内涝灾害承灾体韧性指标重要性差别较大。金水区的脆弱性比高新区稍低(重要性分别为 0.132、0.170),但稳定性却远大于高新区(重要性分别为 0.229、0.095)。这主要是由于金水区人口密度、GDP 密度和道路密度均大于高新区,暴雨内涝灾害潜在风险较大。同时,金水区区域内的公安密度、医院密度分别为 233.84、1 760.7 m^2/km^2 ,是高新区的 5.73、3.96 倍,因而又具有较高的承灾体韧性。由此可见,金水区人口密集经济发达,脆弱性更高,同时城市建设更为成熟,稳定性也较高。但需要说明的是,承灾体韧性中,高新区拥有良好的避难所应急设施和条件。

5 结论

a. 总雨量与峰值雨量是金水区和高新区暴雨内涝灾害的重要致灾因素,因此新、老城区均需提高雨量预报的准确性。相比之下雨型对暴雨内涝灾害的影响不明显。

b. 地表不透水面积占比和管网排水能力是城市防洪除涝的关键,在高度城市化的地区尤其要

注意地表孕灾环境与地下排水管网建设不匹配的问题。

c. 新、老城区在承灾体稳定性方面差别较大,对于城市化程度较高的金水区来说,避难所和医疗部门在暴雨内涝灾害来临时发挥着重要作用。

参考文献:

[1] 中国建设新闻网. 住房和城乡建设部积极应对极端天气,持续抓好城市排水防涝工作[EB/OL]. (2022-07-19)[2022-08-11]. <http://www.chinajsb.cn/html/202207/11/28019.html>.

[2] 许拯民,荆燕燕. 关于城市暴雨强度公式推求的研究[J]. 水文, 2014, 34(3): 53-56.

[3] FAN L, XIAODING L, TAO X, et al. Driving factors and risk assessment of rainstorm waterlogging in urban agglomeration areas: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Water, 2021, 13(6): 770.

[4] 张金萍,张浩锐,方宏远. 基于 SWMM 和 SCS 法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 110-121.

[5] AYESHA S R, ATAUR R. Application of principal component analysis and cluster analysis in regional flood frequency analysis: A case study in New South Wales, Australia[J]. Water, 2020, 12(3): 781.

[6] 刘娜. 南京市主城区暴雨内涝灾害风险评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.

[7] 甄亿位,郝敏,陆宝宏,等. 基于随机森林的中长期降水量预测模型研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 6-10.

[8] 林奕晨,周鹏,潘悦,等. 荆州市洪涝灾害影响因子探究及风险评估——基于随机森林和 XGBoost 算法[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 125-132.

[9] 付宇,曹文庚,张娟娟. 基于随机森林建模预测河套盆地高砷地下水风险分布[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 860-870.

Importance Analysis of Disaster Risk Indicators for Storm Flooding in New and Old Urban Areas of Zhengzhou City

ZHANG Jin-ping^{a,b}, CHEN Wei^a, FANG Hong-yuan^a, ZHANG Hao-ru^a

(a. School of Water Conservancy and Civil Engineering; b. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Gaoxin District and Jinshui District were selected as the representatives of the new and old urban areas of Zhengzhou to explore the evaluation indexes that affect the risk of rainstorm waterlogging in cities and the importance of each index, and a risk index evaluation system covering natural and social factors was established. The importance of each evaluation index in new and old urban areas was determined by using random forest model. The results show that for both new and old urban areas, the sensitivity of disaster-inducing environment is the most important first-level indicator. Among them, imperviousness and pipe density are the most important tertiary indicators for surface and subsurface disaster-preventing environments, respectively. The risk of disaster-causing factors is the least important for Jinshui District and Gaoxin District, and the importance of rainfall is much greater than that of rain type. The difference between the old and new urban areas is mainly reflected in the stability of disaster-bearing body, whose importance is 0.23 and 0.09 for Jinshui District and Gaoxin District. The conclusion can provide some reference for the prevention and control of rainstorm waterlogging disaster in Zhengzhou.

Key words: urban rainstorm waterlogging disaster; risk evaluation system; new and old urban areas; random forest; importance of indicators

(上接第 109 页)

Application of Energy Dissipation Piers in Segmented Pier Type Step Energy Dissipator

WANG Lei^a, TIAN Yu^b, FENG Zi-wei^b, LI Qian^b

(a. Architectural Design and Research Institute; b. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the aerated concentration of the stepped energy dissipator, mitigate the damage of cavitation and cavitation erosion, and improve the energy dissipation rate, the stepped energy dissipator with segmented piers was proposed. The influence of the arrangement of the front pier and the reverse pier of the energy dissipator on the hydraulic characteristics of the stepped energy dissipator with segmented piers was studied by numerical simulation. The results show that the stepped energy dissipators with segmented piers generate hydraulic jump near the energy dissipators in the flat and straight section of the terrace. The arrangement of the main pier has better effect of hydraulic jump aeration, higher concentration of aeration along the way, and better effect of cavitation erosion mitigation; The flow velocity along each stage increases gradually, and the arrangement of the main pier has lower flow velocity and better energy dissipation effect; A large range of positive pressure is formed on the upstream area and the upstream area of the energy dissipation pier, and negative pressure is generated on the top and back surface of the energy dissipation pier. The arrangement of the positive pier has a high blocking effect on the water flow, and the arrangement of the reverse pier has a large negative pressure; Under each flow condition, the energy dissipation rate of the two arrangement forms is higher, and the energy dissipation rate of the positive pier arrangement form is higher when the flow is larger, which has better energy dissipation effect. The arrangement of the main pier has better effect in reducing the cavitation damage of the step and improving the energy dissipation rate, which can provide a reference for the structural design of the stepped energy dissipator with segmented piers.

Key words: step energy dissipator; trapezoidal energy dissipation pier; velocity characteristics; pressure characteristics; energy dissipation characteristics