

# 城市雨水径流系数研究进展

张 炜<sup>1,2,3,4</sup>, 于 浩<sup>1,2,3,4</sup>, 陈香宇<sup>1</sup>, 张仪杰<sup>1</sup>, 宋立乾<sup>1</sup>, 逯艳茹<sup>1</sup>, 李思敏<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038; 3. 污水处理及资源化利用河北省工程研究中心, 河北 邯郸 056038; 4. 邯郸市水利利用技术重点实验室, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 径流系数是表征降雨转化为地表径流比例的重要参数, 在水资源管理和城市规划中应用广泛。本文全面评述了径流系数的概念及发展历程、取值方法、影响因素和研究方法, 深入探究了不同影响因素下径流系数的变化以及不同研究方法的优缺点, 强调了跨学科协作在推动技术创新、整合数据和平衡成本效益方面的重要性, 提出了在气候变化和城市化快速推进的当下, 其研究所面临的挑战与未来研究方向, 指出计算机技术、遥感技术、机器学习等新技术和新方法可以为径流系数的研究提供新视角, 为水资源管理和城市规划提供科学的决策支持。

**关键词:** 径流系数; 降雨; 下垫面; 海绵城市

**中图分类号:** TU992

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2025)06-0001-08

**Research progress on urban stormwater runoff coefficients**//ZHANG Wei<sup>1,2,3,4</sup>, YU Hao<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Xiangyu<sup>1</sup>, ZHANG Yijie<sup>1</sup>, SONG Liqian<sup>1</sup>, LU Yanru<sup>1</sup>, LI Simin<sup>1,2,3,4</sup> (1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Handan 056038, China; 3. Hebei Engineering Research Center of Sewage Treatment and Resource Utilization, Handan 056038, China; 4. Handan Key Laboratory of Water Utilization Technology, Handan 056038, China)

**Abstract:** The runoff coefficient is a critical parameter that quantifies the proportion of rainfall converted into surface runoff and is widely used in water resources management and urban planning. This paper provides a comprehensive review of the concept, historical evolution, determination methods, influencing factors, and research methodologies related to the runoff coefficient. It examines how the runoff coefficient varies under different influencing factors and evaluates the advantages and disadvantages of various research approaches. The study emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration in advancing technological innovation, integrating data sources, and balancing cost-effectiveness. In the context of rapid climate change and urbanization, it outlines current challenges and future research directions, highlighting how emerging technologies and methods, such as computer technology, remote sensing, and machine learning, can offer new perspectives for runoff coefficient research and provide scientific support for decision-making in water resources management and urban planning.

**Key words:** runoff coefficient; precipitation; underlying surface; sponge city

随着城市化进程的不断加快和生活生产用水量的逐年增长, 水资源短缺已成为制约我国社会经济可持续发展的主要瓶颈<sup>[1-2]</sup>。与此同时, 城市化导致城市不透水下垫面比例增大, 改变了城市原有的水文特征<sup>[3]</sup>, 径流峰值增大, 峰现时间提前, 加上全球气候变化的影响, 极端暴雨天气时有发生, 虽然排水防涝设施规划建设日趋完善, 但城市雨水内涝的风险防控愈发受到关注<sup>[4]</sup>。为应对以上问题, 历经

10余年的海绵城市建设实践后, 2013年我国正式提出了海绵城市建设, 从径流总量、径流峰值、径流污染和雨水资源化利用4个方面进行规划控制<sup>[5-6]</sup>。

深刻理解城市雨水水文规律, 正确运用天然降雨与地表雨水径流之间的转化关系是海绵城市建设过程中的重要因素。天然降雨到达下垫面后, 除因蒸发(腾)、截留和下渗损失部分雨水外, 其余形成地表径流进入流域<sup>[7]</sup>。径流系数这一概念常被用

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52379008)

**作者简介:** 张炜(1981—), 男, 教授, 硕士, 主要从事海绵城市建设理论与技术研究。E-mail: zhangwei1981@hebeu.edu.cn

**通信作者:** 李思敏(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事雨水利用及资源化研究。E-mail: chyeli@126.com

于反映特定下垫面在降雨时的产流能力<sup>[8]</sup>,在排水防涝设施规划建设、雨水内涝风险评估、雨水资源化利用研究等领域应用广泛<sup>[9-10]</sup>。GB 50014—2021《室外排水设计标准》(以下简称《标准》)规定,径流系数依据下垫面类型取值。受降雨特征、下垫面条件及人类活动等因素影响,在实际降雨过程中径流系数往往波动较大<sup>[11-13]</sup>,利用该径流系数取值方法评估整场降雨径流总量时存在误差<sup>[14]</sup>。

因此,有必要对径流系数进行全面阐述,进一步提高对其研究及应用的认知。本文从径流系数的概念及发展历程、取值方法、影响因素、研究方法等方面,系统分析径流系数的研究现状和存在问题,进一步明确未来的研究方向,为径流系数的深入研究和正确应用提供科学依据。

## 1 径流系数的概念及发展历程

### 1.1 径流系数的概念

径流系数是指任意时段内径流深度与降雨深度的比值<sup>[8]</sup>,反映了天然降雨的径流转化效率<sup>[15-16]</sup>。按照径流系数的适用范围,一般可将径流系数分为流量径流系数和雨量径流系数。流量径流系数,也就是狭义上的径流系数,在《标准》中明确给出了依据下垫面类型划分的径流系数取值方法,表征一定重现期下径流峰值与降雨峰值的比值,主要适用于传统雨水沟渠系统设计流量的设计计算;而雨量径流系数则是考察下垫面汇水范围内径流体积与降雨体积的比值,这对于雨水收集利用系统、雨水调蓄池等设施的规划设计具有实际指导意义。在径流系数应用时,需明晰径流系数的适用场景以及不同类别径流系数的正确取值方法。

### 1.2 径流系数的发展历程

径流系数的概念从提出到现在已有 100 多年历史,大致经历了以下 4 个发展阶段:

第一阶段(18 世纪末至 20 世纪 30 年代),初步概念与理论形成。针对自然降雨到雨水径流过程存在水量损失的现象,1889 年 Kuichling<sup>[17]</sup>提出了设计雨水径流量计算的经典推理公式,引入径流系数概念量化降雨转换为径流的衰减作用。径流系数通常依据设计重现期进行取值<sup>[18]</sup>,Sabzevari 等<sup>[19]</sup>通过不同重现期径流系数取值模型绘制了伊朗重现期为 10~500 a 的径流系数取值表。

第二阶段(20 世纪 40—70 年代),模型的发展与推广。各类模型技术被用于优化径流系数的取值,通过对特定地区的长期观察,李静等<sup>[20]</sup>利用水文数据编制经验公式来估算径流系数,如指数模型、单 EXP 模型等<sup>[21-22]</sup>,但这些模型受地区限制较多,

不具有普适性且取值精度不高。因此径流系数开始依据下垫面类型进行取值,并逐渐在许多国家推广应用,我国的相关设计标准中关于径流系数的取值至今仍沿用此法<sup>[8]</sup>。

第三阶段(20 世纪 80 年代至 20 世纪末),数字化与技术革新。随着计算机和信息技术的发展,双 EXP 模型等复杂水文模型的开发使得大量水文数据的融合分析成为可能,有效提高了径流系数模拟计算的速度和准度<sup>[23]</sup>。而地理信息系统(GIS)技术在复杂下垫面径流系数的研究应用表明,径流系数与不透水率呈正相关关系<sup>[24]</sup>,这也为各国制定城市雨水管理策略提供了理论依据。

第四阶段(21 世纪初至今),现代化技术与未来发展。为应对日趋严格的水资源管理制度和全球气候变化引发的城市内涝风险,径流系数的研究更加注重多尺度、多变量的综合分析,机器学习、人工智能等手段为径流系数的研究提供了新的工具和方法。

## 2 径流系数的取值方法

理想状态下,不考虑径流损失,天然降雨全部转化为地表径流,径流系数取值为 1;一般情况下径流系数小于 1,在极端干燥条件且降水量较小时,径流系数甚至近似为 0<sup>[25]</sup>。《标准》规定,依据下垫面类型不同,屋面、路面和绿地等典型城市下垫面的径流系数取值区间分别为 0.85~0.95、0.25~0.95 和 0.10~0.20。不透水下垫面(如屋面、路面)的径流系数明显高于透水下垫面(如绿地),路面径流系数因其铺砌材料性质的不同,取值区间差异较大。

从国内外对城市不同下垫面径流系数的实测数据(表 1)来看,除西班牙巴塞罗那的金属和塑料屋面<sup>[26]</sup>、菲律宾宿务市的沥青屋面<sup>[28]</sup>、南京市<sup>[32]</sup>和兰州市<sup>[33]</sup>的混凝土路面外,其余国内外城市不同下垫面的径流系数取值各不相同,其原因主要为:①受地理区位及地貌、降雨特征、城市下垫面施工工艺等影响,国内外径流系数取值依据和标准不同;②《标准》中径流系数取值主要用于城市雨水管渠设计流量的设计计算,径流系数反映的是设计重现期下径流峰值和降雨峰值的比值,即前文提及的流量径流系数,而表 1 的部分数据为研究者针对雨水利用系统实测的径流总量与降雨总量的比值,也就是雨量径流系数;③对于海绵理念建设的下垫面<sup>[31-33,37-38]</sup>,通过在源头下垫面人工强化雨水渗透作用,其径流系数取值明显低于传统城市开发模式下垫面;④草坪灌木区<sup>[31-33]</sup>径流系数高于《标准》,这可能与研究对象下垫面的土壤渗透性能差或研究区面积偏小有关。

由此可见,径流系数取值复杂、影响因素众多,

| 种类 | 材质        | 坡度/%    | 面积/m <sup>2</sup> | 地点       | 径流系数        | 参考文献 |
|----|-----------|---------|-------------------|----------|-------------|------|
| 屋面 | 金属        | 30      | 40.6              | 西班牙巴塞罗那  | 0.90        | [26] |
|    | 金属        |         | 132               | 基隆市      | 0.81~0.84   | [27] |
|    | 沥青        | 0       | 942               | 菲律宾宿务市   | 0.93        | [28] |
|    | 沥青        | 0       | 480               | 菲律宾宿务市   | 0.92        | [28] |
|    | 沥青        | 2.5     | 52                | 邯郸市      | 0.62        | [29] |
|    | 沥青        | 0、2、5、7 | 12                | 马来西亚雪兰莪州 | 0.7~0.9     | [30] |
|    | 混凝土       | 3       | 60                | 邯郸市      | 0.62        | [29] |
|    | 混凝土       | 0       | 452               | 菲律宾宿务市   | 0.79        | [28] |
|    | 混凝土       | 0       | 1685              | 菲律宾宿务市   | 0.83        | [28] |
|    | 塑料        | 30      | 40.6              | 西班牙巴塞罗那  | 0.90        | [26] |
|    | 砾石        | 1       | 56.6              | 西班牙巴塞罗那  | 0.62        | [26] |
|    | 绿色屋面(干基质) |         | 1                 | 兰州市      | 0.58        | [31] |
|    | 绿色屋面(湿基质) |         | 1                 | 兰州市      | 0.75        | [31] |
| 路面 | 混凝土       |         | 10                | 南京市      | 0.9~1.0     | [32] |
|    | 混凝土       | 0       | 2.25              | 兰州市      | 0.89        | [33] |
|    | 大块岩石      | 0       |                   | 桂林市      | 0.74        | [34] |
|    | 砾石        | 1、3、7   |                   | 埃塞俄比亚默克莱 | 0.6~0.68    | [35] |
|    | 鹅卵石       | 1、3、7   |                   | 埃塞俄比亚默克莱 | 0.41~0.47   | [35] |
|    | 透水砖       |         | 10                | 南京市      | 0.43~0.71   | [32] |
|    | 透水砖       | 0       | 2.25              | 兰州市      | 0.53        | [33] |
|    | 透水砖       |         | 155               | 镇江市      | 0.025~0.045 | [36] |
|    | 透水沥青      |         | 72                | 北京市      | 0.023       | [37] |
|    | 透水混凝土     |         | 155               | 镇江市      | 0.001~0.003 | [36] |
| 绿地 | 草坪灌木      |         | 10                | 南京市      | 0.2~0.3     | [32] |
|    |           |         | 2.25              | 兰州市      | 0.34        | [33] |

通过经验取值往往误差较大,因此,系统性梳理径流系数的影响因素、掌握不同因素影响下径流系数的变化规律,对于径流系数概念的深入理解和数值的准确选取十分重要。

### 3 径流系数的影响因素

#### 3.1 降雨特征

据统计,2012—2024 年全球平均气温升高约 1℃,且增长速率仍在逐年增大<sup>[38]</sup>,全球气候变化已导致许多地区(特别是热带和高纬度地区)极端降雨事件增多,并由此引发了更为频繁的暴雨和洪水事件<sup>[39]</sup>。降雨特征是径流系数的主要影响因素<sup>[39-40]</sup>,主要包括降雨强度、降雨历时和降雨雨型等。

##### 3.1.1 降雨强度

降雨强度与径流系数呈正相关关系<sup>[41]</sup>。极端降雨事件中的高强度降雨使得地表径流量在短历时内快速增长<sup>[42]</sup>,然而,随着降雨强度的逐渐增大,降雨历时、渗透率等因素对径流系数的影响程度呈逐渐减小趋势<sup>[43]</sup>,当降雨强度突破渗透能力和地表滞蓄容量后,径流系数呈现指数级增长,尤其在城市化区域和短历时暴雨中表现显著<sup>[44]</sup>。通过分析不同影响因素耦合作用下的径流系数变化,发现降雨强度的敏感性最高<sup>[32]</sup>。

##### 3.1.2 降雨历时

降雨历时是降雨的主要特征之一。基于模拟降雨试验,相同雨型降雨的径流系数与降雨历时呈指数函数关系<sup>[45]</sup>,随着降雨历时的延续,径流系数逐渐增大。对于透水沥青路面,降雨历时在 30 min 内时,径流系数为 0~0.21,而当降雨历时延长至 120 min 时,径流系数取值增大为 0.21~0.35<sup>[32]</sup>。以 5 min 为时间间隔研究实际降雨事件中径流系数的变化情况,在不透水下垫面条件下,径流系数快速达到峰值并处于稳定状态,而在透水下垫面条件下,径流系数变化过程包括产生阶段、上升阶段及稳定阶段,在 40 min 时径流系数增幅变缓,进入稳定阶段<sup>[46]</sup>。

##### 3.1.3 降雨雨型

降雨本身是一种随机的自然现象,Campisano 等<sup>[47]</sup>依据降雨过程的雨量分布特征将降雨划分为 7 种雨型,且许多地区实际降雨过程的降雨雨型以单峰雨型为主(前峰型、中峰型及后峰型)。通过实际降雨监测数据可知,不同降雨雨型的径流系数由大到小依次为前峰型、后峰型、中峰型<sup>[48]</sup>。模拟降雨试验也印证了该结论,且进一步明确前峰型降雨对径流系数的影响最大<sup>[46,49]</sup>。

#### 3.2 下垫面特征

降雨转化为雨水径流的过程中,因植被拦截、地

表滞蓄、雨水下渗等原因,下垫面特征对雨水径流量损失的影响最大。下垫面特征包括下垫面种类、坡度、空间尺度等。

### 3.2.1 下垫面种类

下垫面可分为透水下垫面及不透水下垫面两大类。土壤属于常见的透水下垫面。在无植被覆盖的条件下,砂质土壤由于孔隙率较高表现出较强的渗透能力,导致径流系数较低;相反,黏土土壤由于孔隙率低,其渗透性较低,导致径流系数较高<sup>[12]</sup>。此外,土壤的湿度和饱和度也是影响径流系数的重要因素。当土壤处于饱和或接近饱和状态时,其渗透能力显著减弱,地表径流增加,从而使得径流系数增大<sup>[50]</sup>。有植被覆盖环境中的径流系数显著低于无植被覆盖环境,这主要是因为植被能够通过截留雨水、提高土壤的渗透能力以及促进蒸腾作用消耗水分,有效降低径流系数。特别是深根系植物能有效利用和储存水分,进一步削减地表径流<sup>[51-53]</sup>。

对于混凝土、沥青等不透水下垫面,其径流系数通常超过 0.9,降雨几乎完全转化为雨水径流,仅有极少量的蒸发损失<sup>[32]</sup>。与此相比,透水下垫面的径流系数相对较低,其值受降雨强度和下垫面材料的影响更为显著<sup>[37]</sup>。通常,下垫面材料的粒径越大,其径流系数越小;降雨强度越大,径流系数越高,而不透水下垫面的径流系数基本不受降雨强度的影响<sup>[32]</sup>。在降雨强度较小时,径流受降雨历时、土壤渗透性能等因素的影响程度较大,例如土壤、绿色屋顶等下垫面无法形成径流,径流系数为 0;而在沥青或混凝土材质的路面及屋面,降雨强度较小时依旧可以形成径流。由于现代城市中不透水和透水下垫面往往交错分布,可采用不透水率来综合分析复杂地区的径流系数变化,径流系数随着不透水率的增大而增大<sup>[54]</sup>。

### 3.2.2 下垫面坡度

下垫面坡度越大,雨水地表集流时间越短,雨水径流的损失量越少,径流系数越高<sup>[55]</sup>。在 1%、3% 和 7% 坡度下,砾石路面的径流系数分别为 0.60、0.65 和 0.68,而鹅卵石路面分别为 0.41、0.45 和 0.47<sup>[35]</sup>。然而,径流系数随下垫面坡度的增大而增大的现象在下垫面不透水率增加的情况下逐渐减弱<sup>[56]</sup>。下垫面坡度为 25% 可视为一临界点,当坡度处于 0%~25% 范围内,径流系数随着坡度的增加而增大;一旦坡度超过 25%,径流系数开始逐渐减小<sup>[57]</sup>。下垫面坡度对径流系数的影响主要集中在降雨初期,此时坡度越大,径流系数越高<sup>[58]</sup>。随着降雨持续时间的延长,这种影响逐渐减弱。因此,下垫面坡度对降雨初期的瞬时径流系数影响显著,但

对径流总量的影响有限<sup>[35]</sup>。

### 3.2.3 空间尺度

空间尺度是确定径流系数时必须考虑的重要因素。随着空间尺度的增大,排水管网中单位时间内的总径流量相应增大。相关研究表明,径流系数通常随着空间尺度的增大而增大<sup>[59]</sup>。然而,有研究对径流系数随空间尺度增大的理论提出不同见解,认为将小尺度空间下的径流系数推广至大尺度时,需要综合考虑实际情况<sup>[60-61]</sup>。但这种现象仅在低重现期情况较为明显,当重现期较大时,径流系数基本不受空间尺度变化的影响<sup>[62-63]</sup>。

## 3.3 海绵城市建设

为应对水资源短缺、城市内涝等问题,我国提出建设海绵城市。绿色屋顶、屋面雨水回收利用系统、透水铺装等是海绵城市建设的常见单项技术措施。

绿色屋顶在美化环境的同时可以显著降低洪峰流量<sup>[64-65]</sup>。张郁媛等<sup>[66]</sup>基于模拟降雨试验得出绿色屋顶峰值流量径流系数取值范围仅为 0.001~0.382,雨量径流系数取值范围仅为 0.002~0.663,累计径流控制率为 67.85%,暴雨情况下其最小值可达 33.68%,且径流系数随基质层厚度的增大而减小<sup>[18]</sup>,同时径流系数随屋面坡度的增大而增大<sup>[67]</sup>。雨水利用系统通过收集雨水径流降低洪峰流量,干旱期间释放储存的雨水,提高水资源利用效率<sup>[28]</sup>。设置雨水利用系统的屋面径流系数相对传统屋面可减小 10% 左右<sup>[68]</sup>。透水铺装的使用是海绵城市建设过程中的重要举措,对比传统不透水铺装材料,透水铺装通过提高下渗率实现径流控制,透水下垫面对径流量的削减率可高达 90%,显著减小径流系数<sup>[35-37]</sup>。不同透水铺装对径流系数的影响差异较大,如透水砖的径流系数取值范围为 0.43~0.71,远大于透水沥青和透水混凝土<sup>[32]</sup>。

《标准》规定,城市建筑密集区的径流系数取值范围为 0.6~0.7<sup>[8]</sup>,而海绵城市建设能够有效恢复城市原有水文过程。张琳等<sup>[69]</sup>以武汉市青山区为研究对象建立了城市下垫面径流系数 BP 神经网络模型,发现海绵城市建设前后该区域径流系数从 2014 年的 0.539 下降为 2017 年的 0.535,城市开发过程并未增大雨水外排量。刘洁等<sup>[70]</sup>基于城市雨洪管理模型评估了成都某小区的绿色屋顶、透水铺装等海绵城市建设效果,发现雨水径流系数降低,径流峰值削减了 40.49%。

综上,海绵城市建设可提高城市透水下垫面面积占比<sup>[12]</sup>,使径流系数取值范围降至 0.29~0.76<sup>[10]</sup>,有助于提升区域雨水径流总量控制率指标,实现城市低影响开发。

4 径流系数研究方法

径流系数研究方法包括实地观测法、模拟降雨法和模型预测法。

实地观测法是指通过在特定地点设置观测站,直接测量降水量、地表径流量等数据,从而计算得到径流系数<sup>[71-72]</sup>。该方法获取的研究成果与实际场景匹配度最高,Zhang 等<sup>[29]</sup>通过实地观测法确定邯郸市屋面径流系数取值为 0.62。

模拟降雨法是指通过人工模拟降雨试验观测或收集地表径流数据及降雨数据,从而计算径流系数的一种试验方法,适用于理解和预测降雨对城市径流的影响<sup>[32]</sup>。胡云进等<sup>[12]</sup>通过模拟降雨法对城市典型下垫面进行模拟降雨研究,发现降雨强度是影响径流系数的主要因素,且影响程度随着下垫面透水率的增大而增大。

模型预测法是指通过构建各种水文模型来模拟和估计降水转化为地表径流的过程,通过数学和物理公式来预测径流系数。双 EXP 函数是一种基于 logistic 函数的模型,杜遂等<sup>[23]</sup>通过双 EXP 函数构建了径流系数预测模型,优化了城市综合径流系数取值范围,促使城市雨水排放系统运行效能提升了 35.7%,极大地降低了城市内涝风险。

不同的径流系数研究方法在实验设备、前期准备工作、数据收集、数据分析等方面的优缺点见表 2。这些方法在研究径流系数及解析地表产汇流机制过程方面相互补充,为径流系数的研究提供了多维度的研究方法以及科学依据。

表 2 不同研究方法优缺点比较

| 研究方法  | 优点                                | 缺点                                         |
|-------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| 实地观测法 | 数据精度高,可靠性强;揭示径流系数动态过程机制;支撑模型率定及验证 | 成本高昂,实施复杂;时间和空间限制;易受自然和人为因素干扰              |
| 模拟降雨法 | 参数高度可控,机制解析精准;可重复性及对比性;微观过程可视化    | 空间尺度效应限制;成本与复杂度的矛盾;数据外推限制                  |
| 模型预测法 | 多影响因素整合及处理;空间尺度外推及时间连续性;揭示过程机理    | 数据依赖性 with 输入不确定性;模型选择与适用性不确定;计算复杂性与资源需求较大 |

5 挑战与未来研究方向

径流系数研究是水文学和环境工程领域的一项重要工作,关系预测水文过程的准确性和城市雨水管理的科学性。尽管该领域已经取得了显著进展,但仍面临一系列挑战:

a. 数据瓶颈。在许多地区,尤其是发展中国家和偏远地区,缺乏有效降雨数据积累,限制了对城市水文过程的准确理解;发达国家的高分辨率数据

(如土壤水力参数、植被覆盖及空间分布情况等)仍存在缺失。

b. 模型结构与参数化的局限性。模型的精度和适用性依赖于正确的参数选择和足够的验证,这在缺乏基础数据的区域实施难度较大;同时模型模拟过程中存在着异参同效的现象,即不同的参数组合却得出相似的径流模拟结果,但径流系数存在显著差异。

c. 气候变化和人类活动影响。全球气候变化和加速的人类活动(如城市化、土地利用变化)导致极端降雨事件频发,城市雨水水文过程将随之改变,径流系数有可能是个动态变化的参数。

这些挑战为径流系数提供了未来研究方向:

a. 多源数据融合及新技术的应用。高分辨率遥感技术及无人机科技的快速发展为数据的获取提供了有效途径,便于研究人员获取准时、有效的数据。同时大数据时代构建通用数据库,对流域、城市的水文数据进行有效整合,利用人工智能方法处理大量水文和气象数据,根据研究人员提供的数据类型,确定数据分析模型,提高径流系数的预测精度和效率。

b. 模型机理革新。结合机器学习开发更具适应性、能够跨区域应用的水文模型;通过构建分布式模型,将城市管网、农田沟渠及流域水文进行区域化划分,减少对详细地面数据的依赖。

c. 面向城市管理的应用场景拓展。构建径流系数动态取值图谱,支撑海绵城市设施布局优化,预测海绵城市建设及生态修复工程对流域径流系数的长期影响,平衡供水与生态需求。

参考文献:

[ 1 ] 周晋军,庞亚莉,王昊,等.我国城市雨水资源化发展研究综述[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(5):61-74. (ZHOU Jinjun,PANG Yali,WANG Hao,et al. Review of urban rainwater harvesting development in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54 (5):61-74. (in Chinese))

[ 2 ] 张建云,王银堂,刘翠善,等.中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报,2017,36(1):1-6. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,LIU Cuishan,et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(1):1-6. (in Chinese))

[ 3 ] CAI Jie, LI Xiaoping, LIU Lanjian, et al. Coupling and coordinated development of new urbanization and agro-ecological environment in China[J]. Science of the Total Environment,2021,776:145837.

[ 4 ] 徐宗学,卢兴超,施奇妙.城市暴雨洪涝灾害特征与风险

- 评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [5] BARTHWAL S, CHANDOLA-BARTHWAL S, GOYALH, et al. Socio-economic acceptance of rooftop rainwater harvesting: a case study[J]. Urban Water Journal, 2014, 11(3): 231-239.
- [6] DE SÁ SILVA A C R, BIMBATO A M, BALESTIERI J A P, et al. Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: a review[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 76: 103475.
- [7] GUO Xiaoxue, DU Min, GAO Peng, et al. Response of runoff-sediment processes to vegetation restoration patterns under different rainfall regimes on the Loess Plateau[J]. CATENA, 2024, 234: 107647.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [9] 李帅, 熊立华. 变化环境下流域水文模型参数区域化研究现状评述[J]. 水资源研究, 2014, 3(6): 564-575. (LI Shuai, XIONG Lihua. Review of regionalized parameters for watershed hydrological models under changing environment[J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(6): 564-575. (in Chinese))
- [10] LI Jiak, MU Congmu, DENG Chenning, et al. Hydrologic-environmental effects of sponge city under different spatial scales[J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2020, 10(1): 45-56.
- [11] SON J, KWON T. Evaluation and improvement measures of the runoff coefficient of urban parks for sustainable water balance[J]. Land, 2022, 11(7): 1098.
- [12] 胡云进, 应鹏, 郜会彩. 不同类型透水铺装基层结构对雨水径流量控制效果研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(6): 69-72. (HU Yunjin, YING Peng, GAO Huicai. Control effect of different types of permeable pavement base structure on rainwater runoff[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(6): 69-72. (in Chinese))
- [13] DHAKAL N, FANG Xing, CLEVELAND T G, et al. Estimation of volumetric runoff coefficients for Texas watersheds using land-use and rainfall-runoff data[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 138(1): 43-54.
- [14] 唐宁远, 车伍, 潘国庆. 城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(22): 4-8. (TANG Ningyuan, CHE Wu, PAN Guoqing. Runoff coefficient analysis for urban stormwater and flood control and utilization[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(22): 4-8. (in Chinese))
- [15] BIRKINSHAW S J, O' DONNELL G, GLENIS V, et al. Improved hydrological modelling of urban catchments using runoff coefficients[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125884.
- [16] BURAK S, BILGE A H, ÜLKER D. Assessment and simulation of water transfer for the megacity Istanbul[J]. Physical Geography, 2022, 43(6): 784-808.
- [17] KUICHLING E. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1889, 20(1): 1-56.
- [18] DHAKAL N, FANG Xing, ASQUITHW H, et al. Return period adjustment for runoff coefficients based on analysis in undeveloped Texas watersheds[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(6): 476-482.
- [19] SABZEVARI T, HAGHIGHI A T, GHADAMPOUR Z, et al. Estimation of regional design runoff coefficient in the rational method[J]. Journal of Science and Technology, 2024, 48(1): 467-482.
- [20] 李静, 杨允立, 毛毅. 海绵型建筑与小区综合雨量径流系数计算方法[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2876-2881. (LI Jing, YANG Yunli, MAO Yi. Calculation method of composite runoff coefficient for sponge city design of building and sub-district[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2876-2881. (in Chinese))
- [21] ŞEN Z. Modified hydrograph method for arid regions[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(3): 356-365.
- [22] ŞEN Z. Instantaneous runoff coefficient variation and peak discharge estimation model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(4): 270-277.
- [23] 杜遂, 王阳, 洪月菊. 双 EXP 函数径流系数计算模型: 以武汉为例[J]. 中国给水排水, 2024, 40(6): 60-66. (DU Sui, WANG Yang, HONG Yueju. A model with double EXP function for runoff coefficient calculation in Wuhan[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 60-66. (in Chinese))
- [24] BECCIU G, PAOLETTI A. Moments of runoff coefficient and peak discharge estimation in urban catchments[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2000, 5(2): 197-205.
- [25] 罗英杰, 张娜, 李琪, 等. 基于 SWMM 的地表径流量与城市下垫面和降雨特征关系的空间分析: 以中国科学院大学雁栖湖校区为例[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 27-38. (LUO Yingjie, ZHANG Na, LI Qi, et al. Spatial analysis of the effects of urban underlying surface and rainfall events on surface runoff based on SWMM: a case study of Yanqi Lake campus of University of Chinese Academy of Sciences[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 27-38. (in Chinese))
- [26] FARRENY R, MORALES-PINZÓN T, GUIASOLA A, et al. Roof selection for rainwater harvesting: quantity and quality assessments in Spain[J]. Water Research, 2011, 45(10): 3245-3254.

- [27] LIAW C H, TSAI Y L. Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40 (4): 901-912.
- [28] ORAYA A F A, ALBURO B V, CAUBAN M K S, et al. Roof runoff analysis: a case for Cebu Technological University-main campus[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1184 (1): 012015.
- [29] ZHANG Wei, LI Simin, TANG Fengbing. Estimating runoff coefficient for quantity assessment of roof rainwater harvesting system [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30 (2): 220-224.
- [30] CHOW M F, BAKAR M F A, RAZALI M H M. Effects of slopes on the stormwater attenuation performance in extensive green roof[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 164 (1): 012029.
- [31] LIU Wen, FENG Qi, CHEN Weiping, et al. Assessing the runoff retention of extensive green roofs using runoff coefficients and curve numbers and the impacts of substrate moisture[J]. Hydrology Research, 2020, 51 (4): 635-647.
- [32] 燕超, 胡海波, 徐晓梅, 等. 模拟降雨条件下城市下垫面径流系数变化规律[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20 (5): 24-30. (YAN Chao, HU Haibo, XU Xiaomei, et al. Changing pattern of runoff coefficients in urban underlyingsurfaces under simulated rainfall conditions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20 (5): 24-30. (in Chinese))
- [33] LIU Wen, FENG Qi, DEO R C, et al. Experimental study on the rainfall-runoff responses of typical urban surfaces and two green infrastructures using scale-based models [J]. Environmental Management, 2020, 66 (4): 683-693.
- [34] 吴瑶琴, 蒋超华, 徐勤学, 等. 西南喀斯特地区不同岩面形态下岩面径流特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31 (1): 10-17. (WU Yaoqin, JIANG Chaohua, XU Qinxue, et al. Runoff characteristics of rock surface under different rock surface morphology in southwest karst area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31 (1): 10-17. (in Chinese))
- [35] HAGOS A, GRUM B, GEBRU F, et al. Runoff response and sediment yield from urban road surfaces: an experimental study in semi-arid northern Ethiopia [J]. Hydrological Sciences Journal, 2023, 68 (5): 719-730.
- [36] 冯玉启, 王文海, 李俊奇, 等. 透水道路径流系数试验研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50 (5): 27-35. (FENG Yuqi, WANG Wenhai, LI Junqi, et al. Experimental research of the runoff coefficient about permeable road [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (5): 27-35. (in Chinese))
- [37] XIONG Muqi, LENG Guoyong. Global soil water erosion responses to climate and land use changes[J]. CATENA, 2024, 241: 108043.
- [38] KEBEDE MENGISTIE G, DEMISSIE WONDIMAGEGNEHU K, WALKER D W, et al. Value of quality controlled citizen science data for rainfall-runoff characterization in a rapidly urbanizing catchment [J]. Journal of Hydrology, 2024, 629: 130639.
- [39] LI Qiongfang, ZHOU Zhengmo, DONG Jinbo, et al. Comparison of runoff control performance by five permeable pavement systems in Zhenjiang, Yangtze River Delta of China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2022, 27 (10): 05022011.
- [40] XIE Mengyao, REN Zongping, LI Zhanbin, et al. Evolution of the precipitation-stream runoff relationship in different precipitation scenarios in the Yellow River Basin [J]. Urban Climate, 2023, 51: 101609.
- [41] 叶晶萍, 刘政, 欧阳磊, 等. 不同时间尺度小流域径流变化及其归因分析[J]. 生态学报, 2019, 39 (12): 4478-4487. (YE Jingping, LIU Zheng, OUYANG Lei, et al. Runoff changes and their attributions in a small watershed during different time scales [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (12): 4478-4487. (in Chinese))
- [42] CUTHBERT M O, RAU G C, EKSTRÖM R M, et al. Global climate-driven trade-offs between the water retention and cooling benefits of urban greening [J]. Nature Communications, 2022, 13 (1): 518.
- [43] 石虹远, 梅超, 刘家宏, 等. 降雨径流过程对不透水面空间分布的响应解析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55 (7): 45-54. (SHI Hongyuan, MEI Chao, LIU Jiahong, et al. Response analysis of rainfall runoff processes to spatial distribution of impervious area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55 (7): 45-54. (in Chinese))
- [44] LIU Jianbo, LIANG Yue, GAO Guangyao, et al. Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: from indicators to models [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127494.
- [45] 武晟, 汪志荣, 张建丰, 等. 不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11 (5): 55-59. (WU Sheng, WANG Zhirong, ZHANG Jianfeng, et al. Experimental study on relationship among runoff coefficients of different underlying surfaces, rainfall intensity and duration [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11 (5): 55-59. (in Chinese))
- [46] 杜晓丽, 郭闯, 杨明哲, 等. 不同降雨特征下透水沥青的径流系数变化[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 30-37. (DU Xiaoli, GUO Chuang, YANG Mingzhe, et al. Variation of runoff coefficient of permeable asphalt under different rainfall characteristics [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 30-37. (in Chinese))
- [47] CAMPISANO A, DI LIBERTO D, MODICA C, et al. Potential for peak flow reduction by rainwater harvesting

- tanks[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 1507-1514.
- [48] 毕彪,杨建英,钱云楷,等. 密云水库上游地区不同雨型对坡面径流特征的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(3): 607-615. (BI Biao, YANG Jianying, QIAN Yunkai, et al. Effects of different rainfall patterns on slope runoff characteristics in the upper reaches of Miyun Reservoir[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(3): 607-615. (in Chinese))
- [49] 虞美秀,付婷,张建云,等. 长三角地区典型海绵设施水文效益试验研究[J]. *水科学进展*, 2022, 33(6): 894-903. (YU Meixiu, FU Ting, ZHANG Jianyun, et al. Field experiment-based investigation on hydrological benefits of typical sponge facilities in the Yangtze Delta region[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(6): 894-903. (in Chinese))
- [50] 田甜,牟风云,王俊秀,等. 重庆市主城区土地利用变化对地表径流的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 128-135. (TIAN Tian, MOU Fengyuan, WANG Junxiu, et al. Impact of land use change on surface runoff in the main urban area of Chongqing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 128-135. (in Chinese))
- [51] BOER M M, PUIGDEFÁBREGAS J. Assessment of dryland condition using spatial anomalies of vegetation index values[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(18): 4045-4065.
- [52] ANDUALEM T G, PETERSS, HEWA G A, et al. Spatiotemporal trends of urban-induced land use and land cover change and implications on catchment surface imperviousness [J]. *Applied Water Science*, 2023, 13(12): 223.
- [53] 肖雪玲,向小华,吴晓玲. 嘉兴市城市防洪包围圈下垫面变化对洪水风险的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 26-31. (XIAO Xueling, XIANG Xiaohua, WU Xiaoling. Impact of underlying surface changes of urban flood control encirclement of Jiaxing City on flood risk[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 26-31. (in Chinese))
- [54] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 86-92. (MEI Chao, SHI Hongyuan, LI Ruidong, et al. Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 86-92. (in Chinese))
- [55] 向宇国,张丹,陈凡,等. 降雨和坡度对植烟坡耕地产流产沙的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(5): 1121-1127. (XIANG Yuguo, ZHANG Dan, CHEN Fan, et al. Effect of rainfall and slope on runoff and sediment production of tobacco slope farmland[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(5): 1121-1127. (in Chinese))
- [56] 李义豪,李传哲,穆文彬,等. 不同坡度和前期土壤含水率下裸地和草地的降雨产流试验分析[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(14): 45-53. (LI Yihao, LI Chuazhe, MU Wenbin, et al. Analysis of bare soil and grassland rainfall-runoff experiment in different slope gradient and antecedent soil moisture content [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(14): 45-53. (in Chinese))
- [57] JOURGHOLAMI M, KARAMI S, TAVANKAR F, et al. Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests[J]. *Forests*, 2020, 12(1): 49.
- [58] 曹梓豪,赵清贺,丁圣彦,等. 坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1892-1904. (CAO Zihao, ZHAO Qinghe, DING Shengyan, et al. Effect of slope gradient and vegetation cover on sediment yielding characteristics of the riparian slope[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(11): 1892-1904. (in Chinese))
- [59] 张永勇,侯进进,夏军,等. 中国典型城市小区尺度下垫面对径流过程的调控特征与空间差异[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(8): 1427-1442. (ZHANG Yongyong, HOU Jinjin, XIA Jun, et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2022, 52(8): 1427-1442. (in Chinese))
- [60] LEMMA T M, GESSESSE G D, KASSA A K, et al. Effect of spatial scale on runoff coefficient: evidence from the Ethiopian Highlands [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(4): 289-296.
- [61] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(1): 1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(1): 1-8. (in Chinese))
- [62] GUASTINI E, ZUECCO G, ERRICO A, et al. How does streamflow response vary with spatial scale? Analysis of controls in three nested Alpine catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 705-718.
- [63] JAHANSAHI A, BOOIJ M J. Exploring controls on rainfall-runoff events: spatial dynamics of event runoff coefficients in Iran [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2023, 68(7): 954-966.
- [64] ZHANG Qianqian, MIAO Liping, WANG Xiaoke, et al. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 144: 142-150.

(下转第 18 页)

Technology,2025,48(1):e202400257.

[72] ESPINOZA C L M. Flow structure analysis and velocity field reconstruction using reduced order method (POD and DMD: application to stirred tank and oscillating bubble plume [D]. Toulouse: Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,2022.

[73] 李智. 疏浚工程中气泡式防污帘防污特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.

[74] SANTOS C A V,CAMACHO E A R,SILVA A R R,et al. Influence of a bubble curtain device on microplastics dynamics[J]. Engineering Proceedings,2023,56(1):81.

[75] HAZAR C, TÖZ A C. Numerical and experimental simulation on efficiency of air bubble barrier on various pollutants for preventing oil spill spread [J]. Marine Pollution Bulletin,2024,201:116254.

[76] 赵文彬,黄筱云,夏波,等. 气泡幕水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):16-23. (ZHAO Wenbin, HUANG Xiaoyun, XIA Bo, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of bubble curtains [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):16-23. (in Chinese))

[77] 陈珺,黄燕华,洪朋,等. 基于机器学习模型的河道水位预测[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):9-14. (in Chinese))

[78] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):7-14. (LIU Di, SUN Jiaqian, YU Zhongbo. Multi-layer soil moisture inversion based on machine learning models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):7-14. (in Chinese))

[79] 杨雪,李昌利. 水下气泡羽流运动模型仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(10):331-335. (YANG Xue, LI Changli. Simulation of underwater bubble plume motion model[J]. Computer Simulation, 2023, 40 (10): 331-335. (in Chinese))

[80] YANG Xue, SUN Shiming. Underwater bubble plume recognition algorithm based on multi-feature fusion understanding [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2024, 38 (11): 2455009.

(收稿日期:2025-07-27 编辑:雷燕)

+++++

(上接第8页)

[65] 崔瑞君,侯精明,王雁鸿,等. 小区绿色屋顶改造对径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):94-110. (CUI Ruijun, HOU Jingming, WANG Yanhong, et al. Effects of green roof retrofitting in residential communities on runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):94-110. (in Chinese))

[66] 张郁媛,宫永伟,张贤巍,等. 基于监测和模拟的简单式绿色屋顶径流系数取值范围分析[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(1):14-25. (ZHANG Yuyuan, GONG Yongwei, ZHANG Xianwei, et al. Monitoring and simulation-based analysis on runoff coefficient value-taking range of extensive green roof [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (1): 14-25. (in Chinese))

[67] MONTEIRO C M,SANTOSC,CASTRO P M L. Extensive green roofs:different time approaches to runoff coefficient determination[J]. Water,2023,15(10):1852.

[68] 吴俊,王以尧,马艳. 基于新型径流采集方法的城市不同非渗透下垫面径流系数解析[J]. 环境工程,2021,39(2):47-52. (WU Jun, WANG Yiyao, MA Yan. Analysis on runoff coefficients of different impervious underlying surfaces based on a novel runoff collection method for cities [J]. Environmental Engineering, 2021, 39 (2): 47-52. (in Chinese))

[69] 张琳,丁兵,邓金运,等. 基于BP神经网络的城市径流系数对下垫面变化的响应[J]. 长江科学院院报,2025,42(10):32-37. (ZHANG Lin, DING Bing, DENG Jinyun, et al. Response of runoff coefficient to urban underlying surface change based on BP neural network [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42 (10): 32-37. (in Chinese))

[70] 刘洁,张翔,郭舟. 海绵设施结构参数的敏感度分析与优化:以成都某住宅区域为例[J]. 中国农村水利水电,2024(9):160-164. (LIU Jie, ZHANG Xiang, GUO Zhou. Sensitivity analysis and optimization of structural parameters of sponge city facilities: a case study of a residential area in Chengdu [J]. China Rural Water and Hydropower,2024(9):160-164. (in Chinese))

[71] 赵纪芳,翟家齐,刘玉春,等. 滦河流域径流系数时空变化特征及影响因素研究[J]. 水电能源科学,2022,40(3):26-29. (ZHAO Jifang, ZHAI Jiaqi, LIU Yuchun, et al. Research on temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of runoff coefficient in Luanhe River Basin [J]. Water Resources and Power, 2022,40(3):26-29. (in Chinese))

[72] 司伟,黄思琦,王培霞,等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):1-7. (SI Wei, HUANG Siqi, WANG Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (3): 1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-11 编辑:俞云利)