

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.01.012

# 基于在线监测的雨水花园系统径流水量控制方法

何 茜

(西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌 615013)

**摘要:** 目前常规的雨水花园系统主要通过搭建绿色屋顶等雨水滞留设施, 实现对径流水量的控制, 因其缺少对排水管道拓扑结构的分析步骤, 导致径流控制效果不佳。针对这一问题, 提出基于在线监测的雨水花园系统径流水量控制方法。使用传感设备实现对径流水量的实时监测, 并增加蓄存功能; 以监测结果为基础, 对排水管道拓扑结构差异展开分析, 并通过调整模拟降水量、调蓄容积等参数实现对径流水量的控制。结果表明: 上述方法可以达成较高的地表径流衰减率, 具备良好的径流水量调控能力。

**关键词:** 雨水花园; 径流水量; 径流控制; 在线监测

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1673-1891(2024)01-0087-07

## Online Monitoring-based Runoff Control Method for Rain Garden System

HE Qian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang 615013, Sichuan, China)

**Abstract:** For present conventional rain garden systems, the runoff control is realized mainly by building rainwater retention facilities such as green roofs, which leads to poor runoff control due to lack of analysis approach to drainage pipe topology. In this regard, an online monitoring-based runoff control method for rain garden systems is proposed. The method uses sensing devices to realize real-time monitoring of runoff volume and adds water storage functions. Based on the monitoring results, the differences in drainage pipe topology are quantified and analyzed, and the runoff volume control is realized by adjusting parameters such as simulated precipitation and storage volume. In the experiments, the proposed method is validated for its regulation performance. The results show that the proposed method has a high attenuation rate of surface runoff when it is used to control the runoff volume, and has a better runoff volume control capability.

**Keywords:** rain garden; runoff volume; runoff control; online monitoring

### 0 引言

目前, 城市所使用的雨水调控设施主要为地下水排水管道, 通过在地下建设复杂的排水管道, 雨水经由管道输送最终会排向河流, 从而实现雨水调

控<sup>[1]</sup>。这种方法可以在一定程度上满足小规模城市的雨水调控需求, 但是针对规模较大的发达城市, 或者是对于降水较为频繁且地势不利于排水的城市区域, 常规的排水管道法难以将降水完全排除, 易增大内涝风险。对此, 为突破上述雨水调控方法

收稿日期: 2023-10-08

基金项目: 西昌学院博士生研究启动项目(YBZ202145)。

作者简介: 何茜(1983—), 女, 四川西昌人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 土木工程技术、海绵城市, e-mail: lingxi1109@163.com。

的限制,可采用雨水花园系统实现动态的降水调控。雨水花园系统具备调蓄、净化等功能,可以帮助城市调节地表径流,从而避免城市内涝。

作为生态调节的有力手段,雨水花园系统以地表径流的宏观调控为主要目的,通过纵向结构的设计与调整,可以使雨水无须流经排水管道,直接通过地表渗流实现雨水调控<sup>[2]</sup>。常规的雨水花园系统一般包括过滤层、填料层、种植土层等,每层填料的土质都需根据调控目标进行灵活调整。表层降水通过覆盖层以及种植层的植物进行过滤,流经分流管道,最终通过溢流系统实现雨水溢流<sup>[3-4]</sup>。通过在城市屋顶、绿化带以及排水道路上安装雨水直流水设施,不仅可以使雨水以层层渗入的方式实现排流,同时也可以提高区域的生态效益和地区的水体质量。

然而,在实际应用中发现,目前常规的雨水花园系统主要通过搭建绿色屋顶等雨水滞留设施,实现对径流水量的控制,因其缺少对排水管道拓扑结构的分析步骤,导致径流控制效果不佳。因此,基于上述对雨水花园的分析,本文设计了一种基于在线监测的雨水花园系统径流量控制方法。

## 1 雨水花园系统在线监测功能设计

为实现对雨水花园系统径流水量的有效调控,本文对常规的雨水花园系统的功能进行优化,通过增加蓄存功能改善系统对径流水量的调控性能。故首先需要针对雨水花园的在线监测功能展开设计,并实现效益评估及风险预警。

常规的雨水花园系统在纵向上可以分为5个层次,分别为降水调蓄层、植被覆盖层、土体过滤层、排水层及植物涵养层。其中,植物涵养层主要通过表层植被实现雨水过滤,从而改善水体质量,该层可以有效解决水体污染问题,从而提高区域的生态环境效益。根据研究区域的自然环境,调整表层植被的配置方案,选取最为适合的植被品种以及植被

面积,实现雨水过滤与水质净化。降水调蓄层可以对降水中的部分悬浮颗粒进行沉降处理,从而为地表水径流提供存储空间。植被覆盖层与植物涵养层的区别在于,覆盖层主要目的是抵抗雨水冲刷,从而防止水土流失。因此植被覆盖层主要以质地较硬的木条以及砂砾层为主,不仅能够保留住土壤的水分,同时内部疏松多孔的环境也非常适合微生物生长,从而提高土壤土质<sup>[5]</sup>。排水层主要通过不同形式的排水设施将多余的地表水进行排出,从而避免出现内涝的情况。排水层一般可以分为渗透排水以及过滤排水2种形式。其中,渗透排水主要通过调节每层土壤的结构与密度,使地表径流无须流经排水管道,直接通过渗漏的方式排出。过滤排水主要通过设置排水层,使雨水通过层层过滤最终排出,2种方法均可避免常规的管道排水在排水负荷方面的局限性,实现灵活化排水。本文依据常规系统分为进水模块以及蓄水模块2部分,利用传感器实现对径流水量的统计与监测,并构建数据传输系统以及分析系统实现对径流控制。雨水花园在线监测系统结构如图1所示。

如图1所示,本文设计的径流量在线监测系统共包括4个部分,分别为径流量感知子系统、径流数据传输子系统、径流数据分析子系统及动态预警子系统。其中,径流量感知子系统中包含进水模块以及蓄水模块,二者均通过传感设备实现对径流水量的统计与测量,采用多参数水质仪实现对水质的检测,并通过在进水池以及蓄水池中安装流量计实现对径流水量的统计。本文用到的所有传感设备以及测量指标如表1所示。

为提高系统对于雨水花园的气候调控性能,本文设计的在线监测功能中还添加了气象站模块,通过采用雨量计、温度计、湿度计、辐射传感器、风速风向仪、气压仪等设备,采集雨水花园的气象信息,从而获取雨水花园的降水情况、空气湿度、空气温度、太阳辐照度、风速风向以及气压等相关气象参

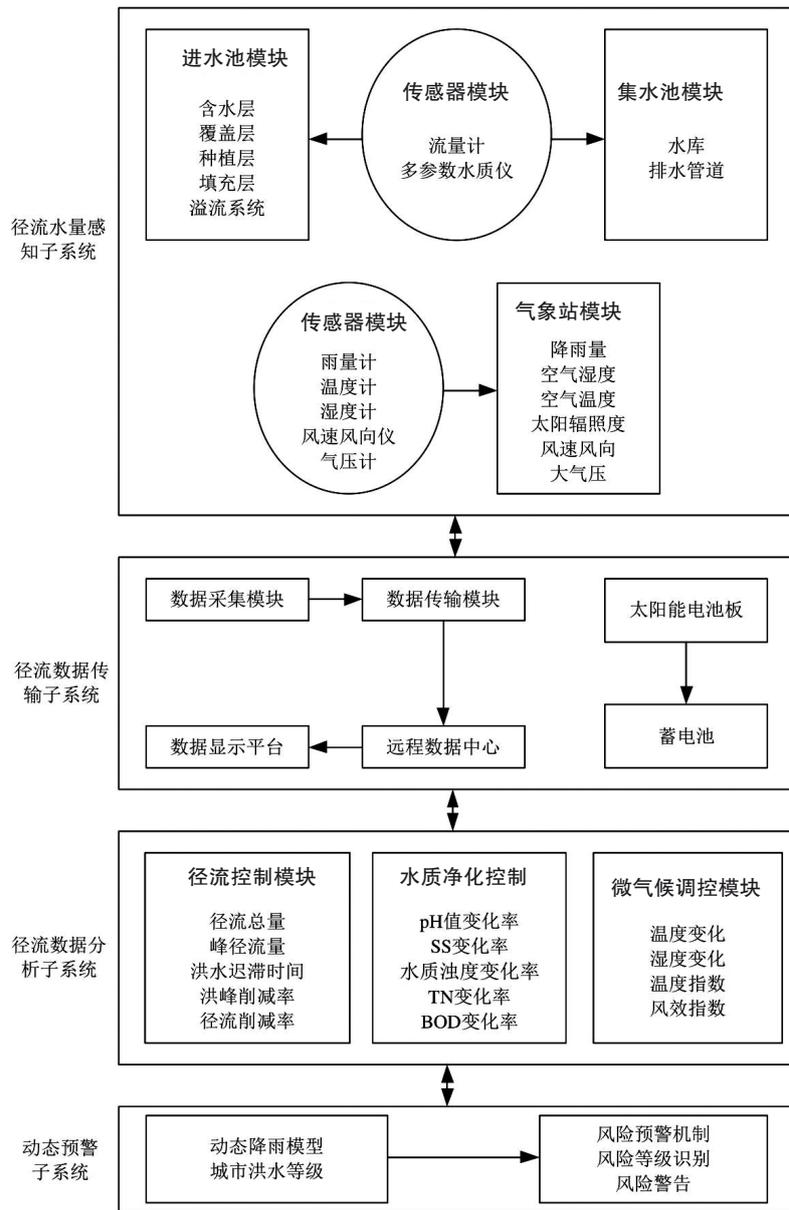


图 1 前池雨水花园在线监测系统结构

数<sup>[6]</sup>。传感设备所采集到的雨水花园气象信息数据均会经由传输系统进行传输,传输系统中包含远程数据控制中心与数据展示平台,可以实现对雨水花园气象数据的远程控制以及数据可视化展示。

雨水花园气象数据经由传输系统可视化处理后,会传输至分析系统,并完成径流控制分析,具体控制内容包括总径流量、峰径流量、洪峰迟滞时间、洪峰削减率以及径流削减率。除径流控制外,分析系统还会根据感知系统中多参数水质仪测量出的水质数据,对雨水花园的水质进行净化处理,具体

需要调控水质 pH 值变化率、SS 变化率、水质浊度变化率以及 TN 变化率<sup>[7-8]</sup>。同时分析系统也会根据温度变化量、湿度变化量、温湿指数以及风效指数等气象数据对雨水花园的微气候进行调控。

在预警系统中,本文通过将雨水下渗量、管道分流量、溢出量及降雨量的洪涝数据使用贝叶斯分类器进行分析,从而判定城市的内涝程度,根据判定结果及风险等级识别结果,实现城市洪涝风险预警<sup>[9]</sup>。

通过上述步骤即可建立起雨水花园系统中的在线监测模块,并完成对于径流水量监测功能的详

表 1 传感器类型及测量指标

传感器名称	测量指标
流量计 A	入口瞬时流量
多参数水质仪 A	测量进水中每种污染物的浓度
流量计 B	导流口瞬时流量
流量计 C	溢流口瞬时流量
多参数水质仪 B	集水池中污染物浓度
雨量计 A	背景组中一段时间内累积降雨量
湿度计 A	测量背景组中空气的相对湿度
温度计 A	测量背景组中的空气温度
总辐射传感器 A	背景组中太阳辐射度
风速风向仪 A	背景组风速
气压计 A	测量背景组中的大气压力
雨量计 B	雨水花园一段时间内累积降雨量
温度计 B	雨水花园中空气温度
湿度计 B	雨水花园中空气相对湿度
总辐射传感器 B	雨水花园中太阳辐射度
风速风向仪 B	雨水花园风速
气压计 B	雨水花园中大气压力

细设计,为后续的径流雨量控制提供帮助。

## 2 雨水花园系统径流管道拓扑结构分析与量化

以上文监测到的雨水花园系统径流量数据为基础,本文通过搭建调控模型实现对径流量的合理控制。对此,首先需要对研究区域进行分析,并以雨水管道为起点,对雨水管网的拓扑结构进行分析与量化,具体实现过程如下。

本文研究地点为四川省凉山彝族自治州宁南县,在该区域内划分 10 个排水分区,不同分区下的径流量差异较小,雨量分布较为平均,且排水管道建设坡度较小。因此,不同分区下的排水性能较为接近,便于对径流量进行分析与调控。

为对雨水管网的拓扑结构进行分析,本文首先需要对拓扑结构的差异性进行量化处理。对此,本文以雨水管道的接口处作为节点,并引入流通时间

指标,具体计算公式如式(1)所示:

$$A_m = K \times \sum L_i \times \frac{F_i}{F_n} \quad (1)$$

式中: $A_m$ 表示编号为  $m$  的雨水管道分区的流通时间指标; $K$ 表示雨水管网拓扑结构的形状系数,即雨水管道与排水分区周长之比; $L_i$ 表示雨水流通长度; $F_i$ 表示雨水管道接口为  $i$  时的雨水流通面积; $F_n$ 表示编号为  $n$  的雨水管道分区总面积<sup>[10-11]</sup>。

管道节点离排水管口的距离越近,说明该管道内雨水的流通时间也就越长。雨水管网拓扑结构的形状系数越大,代表该区域内排水分区形状越呈现不规则的变化,即排水管道排列组合形式更为复杂。采用式(1)计算出不同排水分区下的雨水流通时间指标,并计算出加权管道的流通距离。

为保证对于径流量的量化分析工作能够顺利进行,本文结合 EPA SWMM 软件构建出径流量调控模型。将上文中计算出的径流量数据资料导入 EPA SWMM 软件中,通过定义管道节点数量、单个排水管道长度、排水管道数量以及排水分区数量,搭建出排水分区模型。构建出的排水分区模型中包括 700 个排水子分区,每个子分区的平均面积为  $1.25 \text{ m}^2$ 。本文所搭建的雨水花园系统径流量调控模型中,主要通过调整下垫面的参数实现对径流量的控制。对此,本文结合研究区域的地理位置以及地质特征,将下垫面共分为通行路面、建筑路面以及植被路面 3 种类型,通过对 3 种下垫面类型中的冲刷模型参数进行设定,从而调整雨水径流,具体冲刷模型参数<sup>[12]</sup>如表 2 所示。

根据上述冲刷模型参数,可构建累积指数增长

表 2 冲刷模型参数配置

参数	通行路面	建筑路面	植被路面
最大累积/mm	210	220	180
半饱和累积时间/h	8	10	10
冲刷系数	0.12	0.12	0.06
冲刷指数	1.85	1.75	1.25
冲刷清除率/%	75	0	0

函数,具体函数表达式如式(2)所示:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \quad (2)$$

式中: $B$ 表示下垫面污染物的累积程度; $C_1$ 表示排水分区内污染物的最大累积量; $C_2$ 表示污染物排列参数; $t$ 表示累积时间。由此构建出的降雨冲刷指数模型表达式如式(3)所示:

$$W = C_3 q^{C_4} B \quad (3)$$

式中: $W$ 表示雨水冲刷负荷程度; $q$ 表示单位面积内的排水区径流量; $C_3$ 表示雨水冲刷参数; $C_4$ 表示径流雨量指数<sup>[13]</sup>。

通过上述步骤即可计算出冲刷负荷程度,结合冲刷模型参数即可构建出冲刷模型,并完成对雨水管网的拓扑结构进行分析与量化。

### 3 雨水花园系统径流水量控制参数的调整

为实现对雨水花园系统径流水量的控制,本文在选取控制特征参数后,通过调整控制参数的大小,实现对径流水量的合理调控。考虑到本文选择的研究区域内存在大量的工业建筑,因此与传统的雨水花园系统相比,本文所设计的雨水花园系统需要更大的汇流面积。为此,设定研究区域雨水的径流过程为平衡状态,即排水区域内的径流首先会流经雨水花园的前池,待汇流流量超过前池的调蓄容积时,溢出的径流会流至雨水花园的蓄水中。

由于模型的特征宽度将会影响排水区的划分效果,本文首先对上文中雨水冲刷模型的特征参数宽度进行优化。由于本文选取的研究区域可近似地看作一个矩形,因此,通过测量研究区域的径流面积以及汇流长度,可以实现对特征宽度的计算。采用上述方法不仅可以直接计算出模型的特征宽度,同时还可以有效避免因实地测量误差较大导致的计算结果的偏差<sup>[14]</sup>。模型的特征宽度 $L$ 计算公式如式(4)所示:

$$L = \frac{1}{2} L_1 - L_2 \quad (4)$$

式中: $L_1$ 表示地表径流汇流长度; $L_2$ 表示排水分区的

区域边长。

采用式(4)对排水分区的每一个区域的特征宽度进行计算,再根据排列结果对总区域的特征宽度进行求和,即可得到径流水量控制模型的特征宽度。为实现对径流水量的有效控制,本文还设计了降雨模型,具体模型表达式如式(5)所示:

$$a = \frac{A(1 + ClgP)}{(t + b)^n} \quad (5)$$

式中: $a$ 表示单位统计时间内排水区域内的降水强度; $C$ 表示雨量变化参数; $P$ 表示雨量波动周期; $t$ 表示降雨累计时间; $A$ 表示区域面积修正参数; $b$ 表示单次降雨周期内的降水持续时间; $n$ 表示降雨衰减参数。

通过上述的降雨模型可以实现对地表径流的控制,考虑到雨水花园系统自身具备雨水调蓄能力,因此本文通过模拟雨水花园的调蓄容积实现对地表径流的联合控制,具体计算公式如式(6)所示:

$$V = 10H\phi F \quad (6)$$

式中: $V$ 表示雨水花园系统的模拟调蓄容积; $H$ 表示单位时间内的模拟降水量; $\phi$ 表示综合降水径流参数; $F$ 表示排水区的调蓄面积<sup>[15]</sup>。

通过式(6)可以计算出雨水花园的调蓄容积,将式(5)与式(6)进行结合,即可根据雨水花园的排水区域特征宽度大小明确径流水量控制需求,再结合降水模拟量以及调蓄模拟容积量实现对径流水量的合理调整。

通过上述步骤即可完成对于调蓄容积、排水区宽度以及模拟降水量的调整,从而对雨水花园的径流量进行有效控制。将本节内容与上述提到的径流管道拓扑结构分析与量化、径流在线监测功能等相关内容进行结合,至此,基于在线监测的雨水花园系统径流水量控制方法设计完成。

### 4 实验验证

为证明本文提出的基于在线监测的雨水花园系统径流水量控制方法在实际控制效果,在理论部

分的设计完成后,设计如下实验。

### 4.1 实验方法

为保证实验效果,本次实验选取了2种常规的雨水花园系统径流水量控制方法作为对比对象,分别为基于SWMM的雨水花园系统径流水量控制方法,以及基于Hydrus的雨水花园系统径流水量控制方法。

为提高实验结果的准确性,实验以凉山州宁南县某区域作为研究对象,通过采用3种方法对该区域的径流水量进行模拟调控,并设定调控指标,通过对比径流模拟结果从而比较3种方法对于径流水量的调控性能。

实验开始前,采集10年来该地区真实的径流量历史数据,并在MATLAB环境中对研究区域的径流特征进行模拟,共将研究区域分为10个排水分区,并针对每个排水分区的实际径流调节性能设定了不同的拟合修正系数,具体如表3所示。

表 3 拟合修正系数

排水分区编号	拟合修正系数
01	0.95
02	0.94
03	0.97
04	0.92
05	0.96
06	0.91
07	0.96
08	0.93
09	0.95
10	0.94

为比较不同方法对于地表径流水量的调节性能,本次实验选取了12个降雨重现期,每个降雨重现期的降水量以及降雨历时均有所不同,分别采用3种方法对研究区域的径流模型进行模拟控制,待控制完成后,通过对比控制前后的地表径流削减率,从而比较三种方法的实际调节性能。

### 4.2 实验结果与分析

本次实验选择的对比标准为不同方法对于地表径流水量的调节能力,具体衡量标准为调节前后地表径流衰减率的变化情况,该值越高,代表方法对于地表径流水量的调经性能就越好,具体实验结果如图2所示。

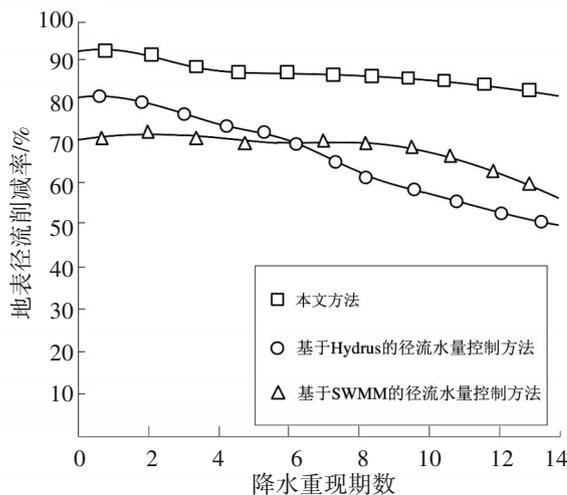


图 2 不同降雨重现期下地表径流削减率对比结果

由图2可以看出,在针对降水量以及降雨历时不同的区域进行模拟调控时,不同方法对于地表径流水量的调控性能有所不同;本文提出的基于在线监测的径流水量控制方法能够有效调节地表径流,地表径流衰减率较大,平均值为85%。而2种常规方法下的地表径流衰减率明显较低,由此可以证明本文方法对于径流水量的调节能力要优于常规的调节方法。

### 5 结束语

本文针对常规的雨水花园系统对于径流水量控制程度不够充分的问题,通过对常规的雨水花园系统进行优化,提出了一种结合在线监测以及蓄水功能的雨水花园系统。通过对雨水花园系统的各项功能进行设计,实现了对径流水量的实时监测,在此基础上通过对模拟降水量以及调蓄容积等相关参数进行设计,可以有效实现对径流水量的调控,提高城市水资源的高效管理与利用。

## 参考文献:

- [1] CHAUDHRY A K ,ALAM M A ,KUMAR K. Groundwater contamination monitoring and modeling for a part of Satluj River basin[J]. Desalination Publications,2021,16(5):417-523.
- [2] BAI L, HUO Z,ZENG Z, et al. Groundwater flow monitoring using time-lapse electrical resistivity and Self Potential data[J]. Journal of Applied Geophysics,2021,193(1):20-30.
- [3] MARLETTA V. Design of an FBG based water leakage monitoring system, case of study: an FBG pressure sensor[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine,2021,24(5):75-82.
- [4] EATON A ,EATON A,BURLINGAME G, et al. Aligning quality assurance requirements and water quality monitoring goals [J]. Journal-American Water Works Association,2021,113(9):22-31.
- [5] HAMEDANI A G,LEDARI M B,SABOOHI Y. Water-energy nexus: condition monitoring and the performance optimization of a hybrid cooling system[J]. Water-Energy Nexus,2021,4:149-164.
- [6] 李丹丹,杨军,宋玉玲,等.应用苔藓植物监测水体污染——研究、应用与展望[J].广西植物,2021,41(10):1719-1729.
- [7] SF A,BMT A, AC A , et al. Understanding power, social capital and trust alongside near real-time water quality monitoring and technological development collaboration[J]. Journal of Rural Studies,2022,92:120-131.
- [8] SRIVASTAVA N, CHATTOPADHYAY J. Advancement in the use of microbes as primers for monitoring water quality [M]//SINGH J,SHARMA D. Microbial resource technologies for sustainable development. Amsterdam:Elsevier Inc,2022:227-236.
- [9] DUTTA K,DAVEREY A,SARKAR A . Surface and groundwater pollution: monitoring and remediation methods[J]. Environmental Quality Management,2022,31(4):9-15.
- [10] CASCONI C,MURPHY K R,MARKENSTEN H, et al. Abspectroscopy, a Python toolbox for absorbance-based sensor data in water quality monitoring[J]. Environmental Science: Water Research & Technology,2022,8(4):836-842.
- [11] RASHID A,BHUIYAN M A,PRAMANIK B, et al. A comparison of environmental impacts between rainwater harvesting and rain garden scenarios[J]. Process Safety and Environmental Protection,2022,159:198-212.
- [12] INGLES J,LOUW T M,BOOYSEN M J. Water quality assessment using a portable UV optical absorbance nitrate sensor with a scintillator and smartphone camera[J]. Water SA,2021,47(1):135-140.
- [13] 张爱民,郝天鹏,周和平,等.新疆白杨河流域特征及生态植被需水量分析[J].生态学报,2021,41(5):1921-1930.
- [14] DING B,ZHANG Y,YU X, et al. Effects of forest cover type and ratio changes on runoff and its components[J]. International Soil and Water Conservation Research,2022,10(3):445-456.
- [15] 徐铭美,方睿,罗鸣,等.基于小样本学习的降雨云分类及天气预测[J].计算机仿真,2023,40(1):349-353.