

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.022

基于局部回归的城市特征降雨研究

黄吉霖¹, 蒋青松¹, 朱滔², 曾嵘², 赵磊³, 刘永¹

(1. 北京大学环境科学与工程学院 国家环境保护河流全物质通量重点实验室, 北京 100871; 2. 昆明滇池投资有限责任公司, 云南 昆明 650100; 3. 云南师范大学信息学院 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要: 随着对海绵城市设计以及城市雨洪管理和面源污染管控等的精细化要求,科学表达特征降雨是其中关键的基础工作。特征降雨是指在某一降雨类型中能够代表该类降雨统计特征的单次连续降雨过程,传统的短历时暴雨雨型设计不适合长时间的降雨分析,也不宜用于表征不同降雨量下的典型降雨雨型。为此,以滇池流域20多年的逐小时降雨数据为基础,通过对降雨类型的划分,采用基于累积分布与Logistic回归处理的局部加权线性回归方法对降雨数据进行拟合,识别多降雨量类型下的降雨规律,形成特征降雨。结果显示,针对不同的降雨类型,参数优化后的局部加权线性回归模型可有效识别累积降雨量、降雨历时与降雨强度等特征,可为城市径流模拟提供典型降雨边界条件,对理解城市降雨规律及相关的雨污合流和面源污染治理等具有重要的支撑作用。

关键词: 特征降雨; 局部加权线性回归; Logistic回归; 累积分布; 滇池流域

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0131-08

Determination of Characteristic Rainfall at Urban Scale Based on Local Regression Method

HUANG Ji-lin¹, JIANG Qing-song¹, ZHU Tao², ZENG Rong², ZHAO Lei³,
LIU Yong¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of All Materials Flux in Rivers, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Kunming Dianchi Investment Co. Ltd., Kunming 650100, China; 3. Engineering Research Center of GIS Technology in Western China <Ministry of Education>, School of Information Science Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: With the deep requirements of sponge city design, urban stormwater management and non-point source pollution control, scientific expression of characteristic rainfall is one of the key basic tasks. Characteristic rainfall refers to a single continuous rainfall process that can represent the statistical characteristics in a certain type of rainfall. The traditional short-duration rainstorm pattern design is not suitable for long-term rainfall analysis and cannot be used to identify typical rainfall patterns under different rainfall scenarios. Therefore, based on the hourly rainfall data of Dianchi Basin over the past 20 years, through the classification of rainfall types, the locally weighted linear regression method based on

基金项目: 中央水污染防治资金资助项目(201712245); 国家自然科学基金资助项目(51779002)

通信作者: 刘永 E-mail: yongliu@pku.edu.cn

the cumulative distribution and Logistic regression processing was used to fit the rainfall process, identify the rainfall features under the multiple rainfall types, and eventually form the characteristic rainfall. The results showed that for different types of rainfall, the optimized locally weighted linear regression model could effectively identify the characteristics such as cumulative rainfall, rainfall duration and rainfall intensity, provide typical rainfall boundary conditions for runoff simulation, and play a supporting role in understanding the nature of urban rainfall and its related rainwater pollution and the strategies of non-point source control.

Key words: characteristic rainfall; locally weighted linear regression; Logistic regression; cumulative distribution; Dianchi Basin

降雨及其产生的地表径流在维系自然水循环等方面发挥着不可替代的作用,在市政工程及农业管理措施的设计中,常借助降雨驱动的径流模型进行水情模拟、水量统计和水质分析^[1-2]。但由于降雨时间和降雨量具有很强的不确定性,难以对其规律性特征进行量化,从而难以为上述设计提供科学基础^[3]。特征降雨是径流模型的重要参数,是指在某区域内出现频率高的能够代表指定降雨类型的降雨场次,其具有明确的降雨历时与降雨强度等特征。降雨具有系列性、随机性、循环性等特性,基于历史降雨数据资料,采用数理分析方法,科学表达特征降雨,是一项关键的基础性工作^[4]。然而,当前降雨相关研究主要集中在降雨预测、降雨径流、降雨历时、降雨雨型、降雨时间序列等方面^[5-9],对特征降雨这一基础性工作的研究不足,因此探究如何科学表达典型降雨的特征,并构建一套规范的特征降雨体系以及操作方案就显得尤为重要。

特征降雨是设计不同降雨雨型的重要方法。目前常见的设计雨型有芝加哥雨型、Pilgrim & Cordery 雨型、Huff 雨型和 Yen & Chow 雨型,此外,国外雨型设计还有概率密度函数法、随机模型法和离散法等。近年来国内应用较多的主要是芝加哥雨型和 Pilgrim & Cordery 雨型^[10]。降雨雨型和降雨强度作为描述降雨特征最常用的参数,在水文水动力和水质模拟分析中具有重要作用。但目前的研究主要是围绕短时的暴雨雨型进行设计,不适合于较长时间的降雨场次或者不同降雨量下的典型降雨雨型设计。目前选择特征降雨的主流做法是根据历史统计资料,从降雨中找出目标历时的降雨场次,用年最大值法进行统计计算不同降雨历时下不同重现期对应的降雨量。同时根据对降雨资料的统计

与雨型的分析,人工挑选典型的年际降雨间隔^[4]。也有学者通过统计聚类分析来识别和分类降雨模式^[11]。

鉴于此,笔者基于昆明市 20 多年的逐小时降雨数据资料,进行降雨分类并识别每种降雨类型下的特征降雨序列。借助降雨累积分布拟合与局部加权回归方法的结合,实现对降雨资料的直接分析。相比已有的雨型设计方法,该方法更能直观反映指定区域的具有代表性的典型降雨,对区域径流及其污染负荷的系统研究具有更好的支撑作用。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

以昆明市的特征降雨为研究对象,对昆明城区(大观楼气象站)1995 年—2018 年的逐小时降雨数据进行统计,得到昆明城区降雨的变化趋势及雨量的年际与年内分布特征。分析显示,昆明市在 1995 年—2018 年的年降雨量维持在 1 000 mm 左右,但是 2009 年之后,年降雨量波动有变大的趋势(见图 1),说明昆明市的降雨在时间分布上不均匀。

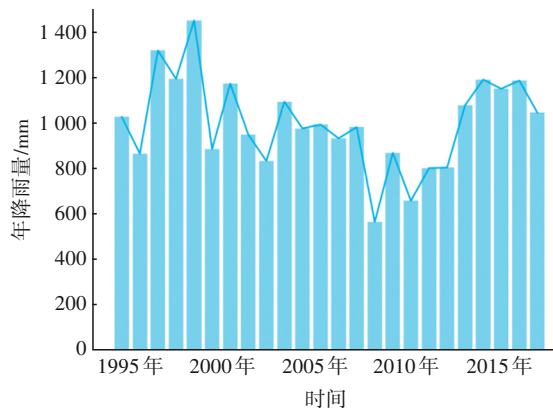


图1 昆明市 1995 年—2018 年的年降雨量变化

Fig.1 Change of annual rainfall in Kunming from 1995 to 2018

1995年—2018年的降雨量月均值显示,昆明市的降雨在年内分布非常不均匀,降雨主要集中在5月—10月,占全年降雨的90%以上(见图2)。旱季与雨季的降雨量差别,一定程度上导致了不同时期的水质差别。

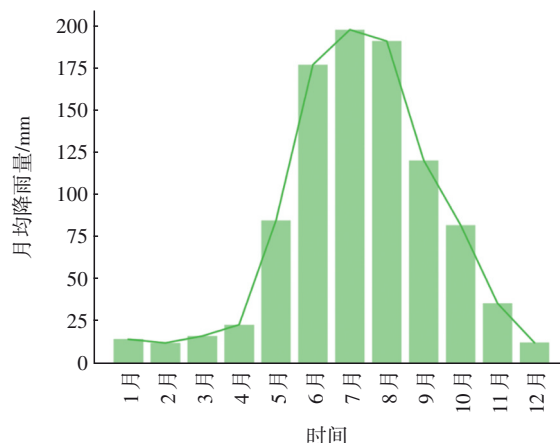


图2 昆明市1995年—2018年的月均降雨量变化

Fig.2 Change of monthly rainfall in Kunming from 1995 to 2018

1.2 数据预处理

由于传统气象科学没有“降雨场次”的概念,而情景分析的设计需要单场降雨信息(涉及降雨量、降雨历时和降雨过程线等特征),寻找特征降雨的划定是应对这一需求的重要办法。降雨场次的划分是进行特征降雨拟合的必要前提,尽管有对降雨场次划分进行定义,但是目前国内并没有统一。学界通常认为,降雨场次划分有2种方式:①按日降雨量划分,例如,每天8点到次日8点之间的降雨作为一场降雨;②按实际降雨场次划分,实际降雨场次根据降雨间隔时间来确定,降雨间隔时间根据具体的应用情况设定^[12]。按日降雨量划分的优点是简单且时间固定,而按实际降雨场次划分则更能体现出降雨的实际情况,计算径流量更准确。Guo等人^[13]的研究采用按实际降雨场次划分的方式,王虹等人^[14]的研究中也提到美国的径流总量计算方法有采用实际降雨场次划分的。尽管如此,美国的EPA技术导则以及我国的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》采用的降雨场次都是按日降雨量来划分的。

本研究推算的特征降雨使用的数据频率为1 h,数值代表每1 h内的降雨量。在统计样本选取中,记录选定降雨场次的开始时间及逐小时降雨量,作

为各降雨历时的有效降雨资料样本。同一场次降雨过程中,降雨过程连续,不受日、月界的限制。对大观楼气象站1995年—2018年的逐小时降雨数据进行统计分析可知,总计2 133场降雨,最大降雨历时为90 h,发生于1997年9月25日16时—29日10时;最大降雨量为146.6 mm,发生于2007年7月19日11时—22日8时。由于小于2 mm的降雨几乎不产生地表径流,剔除后得到1 193场降雨。经过数据比对,发现以6 h间隔划分的降雨场次不存在明显的双峰或多峰现象,因此本研究以单峰形式来识别特征降雨。

在此基础上,对逐小时降雨数据采用累积分布的形式,可得到单次降雨累积曲线。采用累积分布是因为原始数据可能会由于降雨时间过长而导致降雨时段中出现0值的现象,使得结果出现偏误;或是由于降雨集中在前一小时,而后一小时降雨量较小,使得特征降雨在短时间内波动剧烈。然后采用Logistic函数对单次累积降雨数据进行拟合和平滑处理。Logistic函数的曲线类似于机器学习里的Sigmoid函数,因此也被称为Sigmoid曲线。

$$P(t) = \frac{KP_0 e^{rt}}{K + P_0(e^{rt} - 1)} \quad (1)$$

式中: P_0 为初始值,即每场降雨第1小时的降雨量; K 为终值(累积分布的最大值); r 为增长率,衡量曲线的变化快慢。经过累积分布处理后的降雨数据,其每种类型的降雨趋势更加平滑,可以综合反映降雨的基本趋势与特征情况,更有利于计算特征降雨。

1.3 特征降雨拟合

通常降雨过程中雨强在不断变化,是一个非线性过程。从数百场实际降雨过程中寻找能够代表该降雨类型的特征降雨,需要科学拟合其多种特征,并避免非线性的欠拟合与过拟合现象。传统的线性回归是全局线性回归,使用全部的样本计算回归系数,只适用于线性拟合;而局部加权线性回归算法是非线性拟合的常用方法,即:通过引入权值(核函数),在预测时只使用与预测点相近的部分样本来计算回归系数,该方法与K-近邻算法类似,都是用最近的若干样本点进行计算^[15],再通过线性叠加实现非线性拟合目的^[16]。

具体而言,为克服线性回归应用于非线性数据时出现的欠拟合现象,出现了局部加权思想,其对

训练变量 x 添加权重 w_{ii} (为了区分权重和回归系数,采用 θ 表示回归系数, w_{ii} 表示权重),设预测点为 x_i ,计算所有训练变量 x 与测试变量 x_i 的距离,距离越远,则权重值就越小(则对局部拟合直线的影响就越小)。

局部加权线性回归采用核函数对附近的点赋予更高的权重。核函数的类型可以自主选择,最常用的是高斯核函数,对应的权重如下:

$$w_{ii} = \exp\left(\frac{|x_i - x|^2}{-2k^2}\right) \quad (2)$$

上述公式中包含一个需要设定的参数 k ,它决定了对附近的点赋予权重的大小,这也是使用局部加权线性回归时唯一需要考虑的参数。 k 值越小,权重的差异就越大,当 k 值太小时,就仅有局部的点参与回归系数的求取,距离较远的样本点权重都趋近于0,无法参与回归参数的求取,这样会造成过拟合的现象;如果 k 值取无穷大,则所有的权重都趋近于1, w_{ii} 也就近似等于单位矩阵,局部加权线性回归变成了标准的无偏差线性回归,这样会造成欠拟合的现象。

根据 Logistic 回归预处理得到的降雨过程结果,将该类型所有场次的降雨时间序列都纳入局部加权回归的拟合中。例如,在降雨 $t=4$ h时刻,将采用全部降雨场次在 $t=4$ h邻近的数据进行预测。通过不同时间的预测值估计,即可得到特征降雨。最后,为使计算的特征降雨更具有代表性(消除噪音影响),再次使用 Logistic 回归进行平滑处理。当拟合的累积降雨的变化率 <0.1 mm/h时,即认为降雨结束。

2 结果与讨论

2.1 特征降雨

不同类型的降雨,其特征降雨也存在较大差异,因此首先需要对降雨进行分类。目前较为常见的分类方式有手动与自动两种。由于自动分类的结果具有很大的不确定性,本研究选择手动分类,能够在指定降雨量条件下更好地确认不同降雨类型的特征降雨。手动分类参考中国气象局对日降雨量的分类,为了更好地适应昆明市的降雨特征分布和用于径流污染负荷的分析,将降雨规模进行改进,设定降雨量分别为2~5、5~10、10~20、20~30、30~50、>50 mm,共计6类降雨,具体的统计情况如表1

所示。

表1 6种类型降雨的描述性统计

Tab.1 Descriptive statistics of 6 types of rainfall

项 目	降雨量/mm					
	2~5	5~10	10~20	20~30	30~50	>50
降雨场次	333	281	261	142	106	70
降雨量中位数/mm	3.2	6.9	13.5	24.4	37.8	66
降雨历时中位数/h	6	8	11	16	19	28
降雨历时最大值/h	33	41	57	72	79	90

对这6类降雨进行特征降雨拟合,建立局部加权线性回归函数,对样本点做局部加权,通过不断地调整权重参数,提取每一类别的降雨特征,得到的特征降雨类型如图3所示。

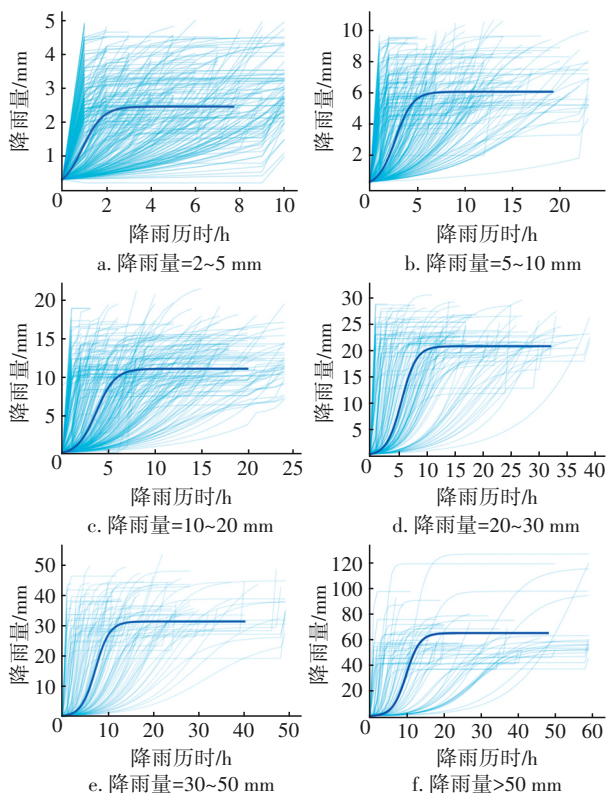


图3 6种类型的特征降雨

Fig.3 Six types of characteristic rainfall

如图3所示,通过 Logistics 回归预处理和局部加权线性回归拟合的特征降雨曲线,可以清晰反映该类型降雨的特征与过程变化。拟合出的特征降雨对于确定不同降雨量条件下径流及其污染物浓度的变化规律具有重要的指导作用,例如确定雨污

合流排水管网进入污水处理厂过程中污染物在时间上的变化,这将有利于对污水处理厂的运行调度做出及时调整。

分别从适用情形、设计方法、所用参数、数据要求以及研究目的等方面对本研究提出的特征降雨与其他传统的降雨雨型(芝加哥雨型^[9]、Huff雨型^[9]、Pilgrim & Cordery雨型^[9]、Yen & Chow雨型^[8]、概率密度函数法雨型^[10]、衰减指数法雨型^[10]、SCS雨型^[10]、侵蚀性特征降雨^[17])进行了对比,并分别总结了它们的优缺点。

① 适用情形。本研究提出的特征降雨适用于分析不同降雨量条件下最典型降雨导致的下垫面径流及其污染物负荷的变化规律;而其他几种传统的降雨雨型则适用于极端强降雨天气条件,其中,Yen & Chow雨型主要用于中小型水库的暴雨(洪水)计算。

② 设计方法。本研究提出的特征降雨:降雨量采用累积分布的形式,然后采用Logistics回归预处理和局部加权线性回归拟合。芝加哥雨型:反映雨强-历时的关系,一般采用公式表达。Huff雨型:根据最大雨强发生在历时的4个等分段,按时间分配成4类典型雨型,对每一类典型雨型做出各种不同频率的无时间分配过程。Pilgrim & Cordery雨型:把雨峰时段放在出现可能性最大的位置上,而雨峰时段在总雨量中的比例取各场降雨雨峰所占比例的平均值,这是一种采用无级序平均法推求的设计暴雨雨型。Yen & Chow雨型:根据选定的设计暴雨雨型特征值,配合三角型、抛物线型概化来确定设计暴雨的时程分配。概率密度函数法雨型:概率密度函数是一个描述随机变量的输出值在某个确定的取值点附近的可能性的函数,累积分布函数的一次微分为概率密度函数,因此,可利用概率密度函数来描述设计雨型,具体的有Gumbel、Weibull、Lognormal和Burr等概率密度函数。衰减指数法雨型:暴雨衰减指数越大表示降雨越集中,将计算得出的各时段设计雨量的最大值放在峰值位置,次大降雨量放在最大值左边,其余时段雨量从大到小排序,奇数放在左边,偶数放在右边,当一边排满时,其余的按从大到小全放到另一边。SCS雨型:把降雨分为4种类型,其中SCS-II代表由夏季阵雨形成的降雨历时短但强度高的降雨类型,是一种使用各时段百分比累积数据的雨型。侵蚀性特征降雨:采

用非参数Mann-Kendall(简称MK)趋势检验、一般统计性分析。

③ 所用参数。本研究提出的特征降雨:降雨初值、降雨终值、增长率、权值。芝加哥雨型:降雨历时、平均雨强、瞬时雨强、峰前历时、峰后历时、雨峰相对位置及暴雨公式中的参数。Huff雨型:降雨时间间隔、降雨场次、预先设定标准值、降雨峰值与时间区间等。Pilgrim & Cordery雨型:时间步长、雨量序号、各场次降雨量占总降雨场次中的分位数等。Yen & Chow雨型:暴雨雨量、暴雨历时、无量纲三角雨量均值等。概率密度函数法雨型:雨峰时刻、雨峰流量、降雨设计历时等。衰减指数法雨型:汇流时间内的暴雨量、暴雨强度、暴雨分配系数、暴雨衰减系数等。SCS雨型:降雨时段、时程分布比例等。侵蚀性特征降雨:MK趋势检验系数、显著性水平等。

④ 数据要求。本研究提出的特征降雨:时间跨度大、数据规模大、逐小时数据。除侵蚀性特征降雨之外的传统方法:短历时、数据集中且体量小、逐分钟数据。侵蚀性特征降雨:日降雨数据。

⑤ 研究目的。本研究提出的特征降雨:是降雨径流水质模型边界条件的重要输入,目的是研究降雨与径流及其污染物浓度之间的关系,并提升降雨径流水质模型模拟结果的准确性,更关注一般降雨下的径流与污染负荷的规律。除侵蚀性特征降雨之外的传统方法:是城市排水设施的设计降雨,目的是服务于极端降雨天气下的城市排水工程设计,更关注极端降雨天气。侵蚀性特征降雨:是季节、年际差异的描述性统计降雨,目的是判断降雨变化是否会改变流域的水沙情况。

⑥ 优缺点。本研究提出的特征降雨:可以获取更贴近通常情况下的典型降雨,同时提升降雨径流水质模型边界条件的准确性,并且数据跨度和数据量大,可以包含更多的降雨信息;缺点是仅考虑单峰情景,对于其他地区的降雨情况没有做进一步的验证。芝加哥雨型:假定分析地区为单峰型,并根据综合雨峰位置系数和暴雨强度公式来确定最终形态,受历时影响较小,雨峰部分与历时无关,洪峰流量相当稳定,与频率分析法的误差小;缺点是雨峰处过于尖瘦。Huff雨型:受历时影响非常显著,若历时选取不当,会造成较大误差;与其他雨型相比,Huff雨型更接近实际降雨过程,但推导方法比较繁琐,对当地的降雨资料依赖性很强,必须具备足

够多的降雨资料。Pilgrim & Cordery 雨型:受历时影响较小,洪峰流量稳定;汇流时间从上而下逐渐增大,而降雨历时也要不断变化才能减小误差。Yen & Chow 雨型:降雨历时要不断变化才能减小误差;需要的当地降雨资料较多,精度会存在偏误。概率密度函数法雨型:能较好地反映降雨时程分布特征,适合用于设计雨型的构建,但具有一定的局限性,选择何种分布取决于当地降雨特征。衰减指数法雨型:相对于同频率雨型来说整体雨量过程相似,雨量偏差不大,结果合理,但不同暴雨衰减系数对雨型结果影响较大。SCS 雨型:仅适用于夏季阵雨导致的降雨历时短但强度大的类型,不适用于其他极端天气导致的降雨。

2.2 预处理对特征降雨稳健性的提升

为避免降雨时间间隔过大而导致其中有些时间段降雨量为0,使模拟结果出现间断的现象,本研究对原始数据进行累积处理,并采用 Logistic 函数对数据进行拟合和平滑处理。本研究对比了是否采用累积分布对特征降雨形式的影响。在不使用累积分布的情形下,特征降雨的曲线呈现锯齿状(见图4),这与特征降雨的典型性相违背,特征降雨需要统计得出能够代表这一类型的典型降雨,而如果不采用基于 Logistic 函数拟合及平滑处理的数据,则会使特征降雨的表现结果趋于过拟合,而过拟合会导致特征降雨的结果失去泛化性。因此采用累积分布,并使用 Logistic 函数进行拟合是一种合适的处理办法。

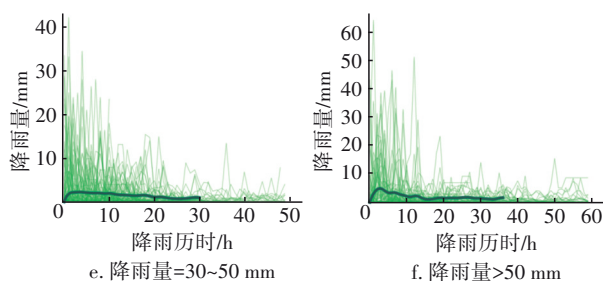
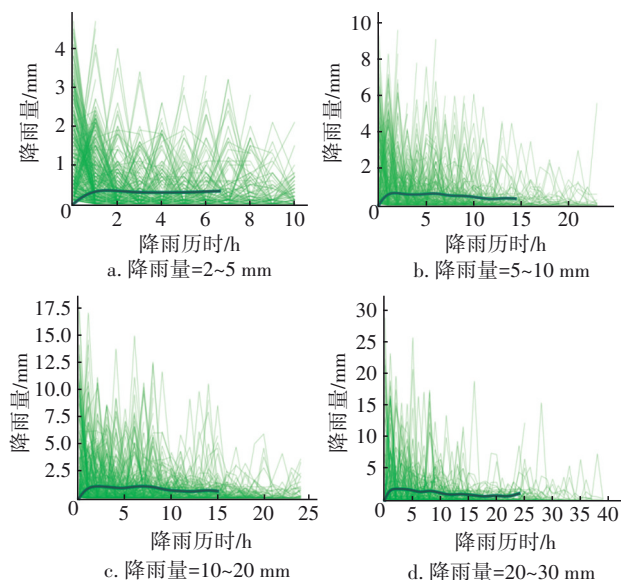


图4 数据未采用累积分布处理时6种类型的特征降雨

Fig.4 Six types of characteristic rainfall without cumulative distribution

6种类型特征降雨的参数如表2所示。对比可知,随着降雨量的增大,特征降雨的增长率呈现出递减的趋势,在降雨量>50 mm时达到极小值0.55,增长率反映了特征降雨曲线的增长幅度,增长率越小说明在降雨后期增长速度越缓慢。6种类型特征降雨的 P_0 值均为0.2。同时,终值 K 与降雨历时随着降雨量的增大而呈现出逐渐增大的趋势。一般而言,随着降雨时长的增加,累积场次降雨量也会逐渐增加,因此表2的数据符合降雨的基本规律。

表2 Logistic 函数参数估值

Tab.2 Parameters of Logistic function

特征降雨类型/mm	增长率 r	终值 K	降雨历时/h
2~5	2.16	2.45	8
5~10	1.10	6.06	18
10~20	0.98	11.17	20
20~30	0.76	20.92	32
30~50	0.64	31.47	40
>50	0.55	65.30	48

2.3 特征降雨与场次降雨量、降雨历时的关系

不同于城市排水设施设计的降雨雨型需求,本研究提出特征降雨的目的是了解地区长时间下的降雨典型模式,及其作为径流水质模型的重要输入边界条件,用于水质模型并分析其对水质变化规律的影响。由于优化了降雨边界条件的输入,因此更有利于研究降雨与径流及其污染物浓度之间的关系,并可以更大程度地提升降雨径流水质模型模拟结果的准确性。由于本研究所提出的特征降雨应用场景不同于城市排水工程设计,因此不会涉及到特定的设计降雨量、一定设计重现期标准和历时对应的降雨强度或设计降雨过程线,不考虑管道的大小与排水的快慢,而只考虑最一般且普遍的降雨情形,即更加关注一般降雨的典型性。在典型和一般降雨的条件下,将本研究提出的特征降雨应用于径

流水质模型的降雨情景设计中,以观察径流污染负荷呈现何种变化趋势。

为了进一步区分本研究所提出的特征降雨与其他常见的降雨雨型、降雨过程线或降雨指标的差别,比较了特征降雨与滇池流域当地多年平均场次降雨量、平均降雨历时、中位数场次降雨量、中位数降雨历时的关系,如表3所示。可知,特征降雨量普遍小于当地多年平均场次降雨量及中位数场次降雨量,其中与中位数场次降雨量的差距较小,其原因在于平均场次降雨量更多地反映了极值,因而中位数场次降雨量表现得更加稳健。特征降雨量最小的原因在于它并不是一个反映均值或中值的指标,而是一个能够代表该类型降雨最典型的形式,能够反映出该类型降雨的绝大部分特征,并且不会出现过拟合的情况,即呈现了一些少有降雨场次的异常情形,因而特征降雨量呈现出数值较小的情况,这表明一类降雨类型中,分布较多的还是降雨量偏初始分类下界的降雨。正是因为考虑了这种情形,因而特征降雨可以表现得更为稳健,更能代表该类降雨的典型特征,并且被输入降雨径流模型从而提高模型的准确性。同样地,特征降雨历时也比平均降雨历时或中位数降雨历时普遍更长。

表3 特征降雨与当地多年平均场次降雨量、降雨历时的关系

Tab.3 Relationship between characteristic rainfall and local average annual rainfall and duration

降雨类型/mm	特征降雨量/mm	平均雨量/mm	中位数雨量/mm	特征降雨历时/h	平均历时/h	中位数历时/h
2~5	2.3	3.3	3.2	8	7.2	6
5~10	6.1	7.2	6.9	18	10.2	8
10~20	11.2	14.0	13.5	20	13.7	11
20~30	21.4	24.6	24.4	32	18.1	16
30~50	32.3	39.0	37.8	40	23.9	19
>50	66.7	73.1	65.9	48	35.9	28

3 结论

① 特征降雨是指在某一类型降雨中获取一场能够代表该类降雨统计特征的降雨。特征降雨是设计雨型的重要基础,对城市市政建设和水污染治理有着重要的作用。本研究提出的方法能够有效地计算得到昆明市的降雨类型和降雨强度,并将两者结合,得到特征降雨的数学表达形式,其在降

雨分析中具有重要作用。

② 局部加权线性回归模型可以有效识别不同类型降雨的特征,通过参数优化,拟合得到昆明市1995年—2018年不同降雨量下的典型降雨过程和重要的降雨特征。

典型降雨分析是一个复杂的过程,并由于降雨时间、降雨量具有很强的不确定性,不易归纳降雨特征,使得机理模型也无法获得不同降雨类型下的典型降雨过程,影响了基于模型的工程设计。本研究提出的特征降雨是基于滇池流域单峰类型的降雨特点与特定的降雨间隔,如果在有足够多的场次数数据与明晰的峰值状态时,即可推广到全国范围内的其他地区,从而得到每个地区相应的特征降雨。本研究构建的特征降雨方法可对缺乏降雨、径流及其污染详细资料的地区进行快速高效的典型性降雨设计,但由于本研究未详细考虑降雨的峰值状态与降雨场次划分间隔时间的关系,结果的代表性仍需未来更多城市的分析验证。

参考文献:

[1] NOURANI V. An emotional ANN (EANN) approach to modeling rainfall-runoff process [J]. Journal of Hydrology, 2017, 544: 267-277.

[2] 郭怀成, 向男, 周丰, 等. 滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1298-1307.

GUO Huaicheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, et al. First flush effects of storm events of Baoxiang River in Lake Dianchi watershed [J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1298-1307 (in Chinese).

[3] ASSENG S, MCINTOSH P C, THOMAS G, et al. Is a 10-day rainfall forecast of value in dry-land wheat cropping? [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 216: 170-176.

[4] 彭竹葳. 基于SWMM的滇池环湖截污干渠(东岸段)的截流能力及运行状况分析[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

PENG Zhuwei. Study on Intercepting Capability and Operational State of Interception Trunk (Eastern Section) of the Dianchi Lake Based on SWMM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).

[5] 贺佳佳, 陈凯, 陈劲松, 等. 一种多时间尺度SVM局部短时临近降雨预测方法[J]. 气象, 2017, 43(4): 402-412.

- HE Jiajia, CHEN Kai, CHEN Jinsong, *et al.* A multi-time scale SVM method for local short-term rainfall prediction [J]. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(4): 402–412 (in Chinese).
- [6] HSU K, GUPTA H V, SOROOSHIAN S. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(10): 2517–2530.
- [7] NG J L, AZIZ S A, HUANG Y F, *et al.* Uncertainty analysis of rainfall depth duration frequency curves using the bootstrap resampling technique [J]. *Journal of Earth System Science*, 2019, 128: 113.
- [8] 成丹, 陈正洪, 方怡. 宜昌市区短历时暴雨雨型特征 [J]. *暴雨灾害*, 2015, 34(3): 249–253.
- CHENG Dan, CHEN Zhenghong, FANG Yi. The analysis of the designed storm pattern over Yichang [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2015, 34(3): 249–253 (in Chinese).
- [9] 成丹, 陈正洪. 湖北宜昌市区暴雨雨型的演变特征 [J]. *干旱气象*, 2017, 35(2): 225–231.
- CHENG Dan, CHEN Zhenghong. Evolution characteristics of rainstorm hyetograph in Yichang of Hubei Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(2): 225–231 (in Chinese).
- [10] 叶姗姗, 叶兴成, 王以超, 等. 基于Copula函数的设计暴雨雨型研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 63–68.
- YE Shanshan, YE Xingcheng, WANG Yichao, *et al.* Research on design rainstorm pattern based on Copula function [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 63–68 (in Chinese).
- [11] WU S J, YANG J C, TUNG Y K. Identification and stochastic generation of representative rainfall temporal patterns in Hong Kong territory [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2006, 20(3): 171–183.
- [12] 王家彪, 赵建世, 沈子寅, 等. 关于海绵城市两种降雨控制模式的讨论 [J]. *水利学报*, 2017, 48(12): 1490–1498.
- WANG Jiabiao, ZHAO Jianshi, SHEN Ziyin, *et al.* Discussion about the two rainfall control approaches in sponge city construction [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 48(12): 1490–1498 (in Chinese).
- [13] GUO J, URBONAS B, MACKENZIE K. Water quality capture volume for storm water BMP and LID designs [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(4): 682–686.
- [14] 王虹, 丁留谦, 程晓陶, 等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义 [J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1261–1271.
- WANG Hong, DING Liuqian, CHENG Xiaotao, *et al.* Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 46(11): 1261–1271 (in Chinese).
- [15] 张明瀚, 王奎, 王毅. 基于局部加权线性回归模型的风速短期预测研究 [J]. *能源研究与管理*, 2018(4): 44–46.
- ZHANG Minghan, WANG Kui, WANG Yi. Short-term wind speed forecasting based on local weighted linear regression [J]. *Energy Research and Management*, 2018(4): 44–46 (in Chinese).
- [16] DUDEK G. Pattern-based local linear regression models for short-term load forecasting [J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 130: 139–147.
- [17] 何毅, 穆兴民, 赵广举, 等. 基于黄河河潼区间输沙量过程的特征性降雨研究 [J]. *泥沙研究*, 2015(2): 53–59.
- HE Yi, MU Xingmin, ZHAO Guangju, *et al.* Variation of erosive rainfall and extreme rainfall based on processes of sediment discharge in Hekou–Tongguan reach of the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(2): 53–59 (in Chinese).

作者简介: 黄吉霖(1997–), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为环境规划与水质模型。

E-mail: jilinhuang@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-03-30

修回日期: 2020-05-15

(编辑: 刘贵春)