

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.011

降雨点面折减系数计算方法综述

常琛朝^{1,2}, 黄津辉^{1,2}, 陈以恒^{2,3}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 南开大学中加水与环境安全联合研发中心, 天津 300350;
3. 南开大学深圳研究院, 广东 深圳 518000)

摘要: 概括了降雨点面折减系数 (ARF) 的影响因素, 包括流域面积、降雨持续时间、重现期、地形、天气类型和季节等, 综述了估算 ARF 的定点定面法和动点动面法的算法过程、基础数据类型和应用范围, 分析了各种方法的特点和适用性。指出方法的选择对 ARF 的计算有显著的影响, ARF 的经验法虽然计算烦琐, 对数据要求高, 但其时间和空间适用性强, 仍具有优势。解析法及动点动面法往往依赖于简化的假设, 应用范围有限。未来应系统研究各种计算方法的差异, 并借助于卫星、雷达等高分辨率降雨数据, 开展 ARF 的空间分析, 为工程设计及水文模拟提供更可靠的信息。

关键词: 点面折减系数; 设计降雨; 面降雨; 降雨频率分布

中图分类号: TV125 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)02-0076-07

Review on calculation methods of areal reduction factor // CHANG Chenchao^{1,2}, HUANG Jinhui^{1,2}, CHEN Yiheng^{2,3}
(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Sino-Canada Joint R&D Centre for Water and Environmental Safety, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Shenzhen Research Institute of Nankai, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The influencing factors of rainfall area reduction factor (ARF) are summarized, including watershed area, rainfall duration, return period, terrain, weather type and season. This paper summarizes the algorithm process, basic data types and application scope of “fixed-point fixed-surface” method and “moving-point moving-surface” method for estimating ARF, and analyzes the characteristics and applicability of various methods. It is pointed out that the selection of methods has a significant impact on the calculation of ARF. Although the empirical method of ARF is cumbersome and requires high data, it still has advantages because of its strong applicability in time and space. Analytical method and “moving-point moving-surface” method often rely on simplified assumptions, and their application range is limited. In the future, systematic research should be carried out on the differences of various calculation methods, and spatial analysis of ARF should be developed with the help of high-resolution rainfall data such as satellite and radar, so as to provide more reliable information for engineering design and hydrological simulation.

Key words: areal reduction factor (ARF); design rainfall; areal rainfall; rainfall frequency distribution

伴随着城市的快速扩张, 城市区域及其周边地区的气候条件发生了显著改变, 降水的空间分布差异日趋增大^[1]。准确的面降水量的获取对于径流模拟、城市下水管道系统设计、城市防洪措施和洪水预测均具有重要意义^[2-4]。然而, 具有长序列降雨资料的站点分布通常是稀疏的, 而雨量站的测量通常只代表一个点的降水量^[5]。研究表明, 降水强度在 1 km 的范围内或在 1 min 的时间尺度内都会发生

显著的变化^[2,6], 加之降水的空间衰减性, 导致面雨量通常小于实测的点雨量^[7]。通过引入点面折减系数 (areal reduction factor, ARF), 将点雨量间接转化为面雨量是水文模拟及工程设计上常用的方法^[8]。ARF 定义为在给定持续时间和重现期下, 点雨量与面平均雨量的比值^[9]。通常 ARFs 是一组曲线, 显示 ARF 随流域面积、持续时间和平均重现期的变化。

基金项目: 科技部重点研发项目 (2016YFC0400709)

作者简介: 常琛朝 (1992—), 女, 博士研究生, 主要从事城市水文研究。E-mail: changchenchao@163.com

通信作者: 黄津辉 (1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事生态水文、生态处理与修复技术等研究。E-mail: huangji@nankai.edu.cn

ARF 的计算方法分为两大类。一类是定点定面法,用于将点设计雨量转化为面设计雨量^[10]。美国气象局 1957 年首次使用 ARF 的概念估算设计洪水^[11],建立了 ARF 与面积和持续时间^[12-14]的关系。研究者进一步考虑了重现期的影响,又相继发展多种计算 ARF 的经验方法^[12-14]。一些研究者尝试将 ARF 的算法建立在数学和统计框架之上,提出基于尺度效应和分形理论的 ARF 的解析法^[10,15-16]。另一类是动点动面法,基于场次降水数据统计降水中心雨量与面雨量的关系,主要用于计算面最大可能降水量^[17-18]。

ARF 通常随流域面积和重现期的增加而减小,随持续时间的增加而增大,这在不同区域的研究中也得到验证^[9-10,13,19-20]。除上述 3 个因素外,研究者也开始关注 ARF 对地形、流域形状及气候条件等因素的依赖性^[21-22]。研究表明,ARF 存在季节性差异,暖季的 ARF 比冷季小,这可能是由于夏季对流活动增加导致的^[19]。随着科技的发展,高分辨率卫星和雷达降水数据也开始用于计算 ARF^[18,23]。经历几十年的发展,ARF 的计算方法已多种多样,其中点雨量或面雨量计算方法中,雨量站密度及降水数据时间分辨率不同,会导致 ARF 的研究结果不一致,为实际运用中如何选择 ARF 计算方法造成了困难。目前关于 ARF 的综述文章很少,缺乏对 ARF 的计算方法、影响因素、数据的选择、实际应用及存在问题等的分析与总结。本文主要概述 ARF 对各种因素的依赖性,总结目前国际上用于估算 ARF 的定点定面法(经验法和解析法)和动点动面法,并分析各种方法的适用性及 ARF 的未来研究展望。

1 ARF 的影响因素

由于区域气候条件(地理位置、水汽循环等)和局地条件(下垫面类型、高程等)的不同,降雨表现出显著的空间异质性^[2,24-25]。这是点降水量和面降水量存在差异的主要原因。流域面积越大,包含的空间异质性信息越多,降水的空间变异性越大,导致在流域尺度上,平均的面降水量比单个站点的降水量要小^[19]。随着集水面积和重现期的增加,这种效应更加明显,因此随着流域面积的增加,ARF 表现出减小的趋势^[9,19]。

影响点与面降水量关系的另一个因素是区域气象和气候条件。对于不同类型的天气条件,风暴事件可能会覆盖不同的面积,导致点降水量和面平均降水量的差异^[23]。Skaugen^[26]的研究得出大规模锋面降水事件的空间平均值不会随着面积的增加而大幅度的减少,而对于小规模对流事件,结果则相反。

降水历时从一定程度上反映了降水的类型,短历时强降水的范围小、空间异质性高,因此相同流域面积和重现期下,短降水历时对应的 ARF 会更小^[18-19]。

不同的天气条件也可能导致不同的降雨强度,因此,ARF 通常是降雨事件严重程度的函数。这种严重程度是根据降雨发生的频率来定义的,即事件的重现期。对于重现期大的降水,随研究区域面积的增加 ARF 下降的程度要高于低重现期的降水^[9,13]。Yoo 等^[21]的研究表明,如果重现期超过 100 a,则 ARF 对重现期不敏感。然而,当重现期小于 100 a 时,不能忽略 ARF 对重现期的依赖关系。Allen 等^[19]的研究发现,ARF 存在季节性差异,暖季的 ARF 比冷季小,这可能是由于夏季对流活动增加导致的,并建议在对降水量进行空间插值时考虑地形的影响。地形和城市化也是影响 ARF 的因素,因为这些因素会影响降雨的形成,但是由于数据资料的缺乏,目前相关的研究较少。

2 ARF 计算方法

目前,ARF 的计算方法主要有暴雨的定点定面法和动点动面法两类。定点定面关系,理论上是指某一固定流域(同心圆或同心正方形、矩形)中心点雨量与其面平均雨量之间的关系^[27],通常在水文实践中,将特定重现期和持续时间的点设计降水量转换为面设计降水量^[5]。动点动面关系,也称暴雨中心点面关系,是不受流域边界限制的暴雨中心点雨量与同场次雨量等值线包围面积内面平均雨量的比值,中心点与降雨范围都是随着暴雨场次的变化而不断变动^[28];这种方法主要用于将点最大可能降水量(probable maximum precipitation, PMP)转换为面平均 PMP^[5]。研究表明动点动面法计算的 ARF 通常比定点定面法计算的 ARF 略小^[10,21]。

2.1 定点定面法

定点定面法因计算简便,在工程实践中普遍使用。基于不同的原理,定点定面法又可分为经验法和解析法。许多国家目前的设计降水准则中的 ARFs 是基于经验方法建立的^[2,12,19]。随后,基于降水的相关性和尺度关系,几种新的解析方法被相继提出^[10,29]。

2.1.1 经验法

经验法推求 ARF 是目前工程设计中最常用的方法,例如 1957 年美国气象局所提出的方法^[19]和英国在 1975 年发布的洪水研究报告建议的方法^[12]。后者是对美国气象局所提方法的简化,假定“平均值的比率”可以近似“比率的平均值”,计算更为简便,但这两种方法均未考虑重现期的影响。

Bell^[13]在1976年重新对洪水报告中ARF的计算方法进行了改进,并考虑了重现期的影响,结果表明随降雨重现期的增加,ARF的下降速度更快;而在1975年英国自然环境研究理事会(Natural Environment Research Council, NERC)的英国洪水研究报告中,ARF计算方法会导致更保守的估计。基于Bell的研究,Stewart^[30]在1989年重新评估了英格兰西北部一个高地地区的ARF,其引入了降雨的标准化方法,从而利用降雨增长曲线而不是实际降雨频率曲线导出ARF。NOAA 1980年技术报告论述了美国对ARF的定义,考虑了流域面积、持续时间及重现期的影响^[31]。

研究者较多使用不同持续时间点雨量和面雨量年极值序列来计算ARF值^[2,9,32],基础数据的时间分辨率大多可以达到小时级别,计算过程表征的是点降水频率曲线与面降水频率曲线之间的关系,这时点降水极值和面降水极值在时间上可能并不同步;但也有研究者筛选高于某个重现期的降水事件^[6],用与点降水同步的面降水来计算ARF,这种方法采用的也是定点定面法,但选取的点雨量和面雨量在时间上是同步的。Yoo等^[21]的研究中考虑了重现期的影响,基于日降水数据计算了降水持续时间为24h的ARF。由于使用的降水数据的不同,得到的ARF的值会有一定的差异,其意义和目的也不相同。

在计算ARF时,点雨量和面雨量的计算是关键的步骤。其中点雨量的计算方法包括中心站点法、最大值法和同频次均值法。同频次均值法克服了中心站点法和最大值法计算的点雨量存在的偶然性缺陷,计算结果较为合理,是目前普遍使用的方法,如彭博^[27]、刘成林^[28]、郭金燕^[33]、金新芽等^[34]、杜长辉^[35]、蒋春宇等^[36]、原彪^[37]的研究均是使用了此法。本质上,ARF反映的是点频率曲线与面频率曲线的关系,同频次均值法^[13]是对区域点频率曲线计算的一种简化方法^[13],后续的研究者对Bell方法进行了改进^[23,38],但目前国内多数研究计算区域点雨量时仍采用同频次均值法。

面雨量的计算方法较多,其准确性是影响点面关系准确性的主要因素。面雨量的计算方法包括泰森加权法、算术平均法及插值方法。算术平均法相对简单,然而只适合于地形较为平坦,雨量站均匀分布的地区,郭金燕^[33]、金新芽等^[34]、杜长辉^[35]、蒋春宇等^[36]的研究使用此法。在雨量站分布不均匀的地区,可用泰森法获得一系列权重因子,求得的面雨量会较为准确,如刘成林^[28]、李文涛等^[39]和陈正明^[40]的研究。插值方法考虑所在地区的地理环境

条件和降水的空间变异性,显示出一定的优势。这类方法主要包括逐步订正格点法、距离平方倒数法、克里金法、趋势面法、多元二次回归法以及神经网络技术等^[39],这类方法较传统方法精度高,但计算过程较为复杂,通用性差。由于点面关系中的点雨量和面雨量在不同计算方法中的含义是不相同的,因此各种点面关系各有其适用条件,不应任意借用。

研究者基于ARF的基本定义,得到不同重现期及持续时间的ARF后,利用不同形式的公式进行拟合,得到更便于使用的经验表达式(表1)。Koutsoyiannis等^[14]基于NERC方法得到的ARF计算值,随后拟合公式得到ARF关于流域面积和重现期的经验表达。Yoo等^[21]用伽马分布估算降水的重现期,并未使用降水的极值序列,而是基于日降水计算了ARF,并提出了经验公式。刘成林^[28]对广州市点面关系进行研究,面雨量用泰森多边形法进行计算,得到ARF后,用幂函数进行拟合,得到广州市中心城区点面关系折减系数的函数表达式。Mineo等^[6]基于重现期大于2a的降水事件,利用点雨量和面雨量的比值求得ARF,进而提出了ARF关于流域面积和持续时间的函数。然而,这些经验公式有较强的地域性,一般需要利用当地的降水数据,重新计算公式的参数才能使用。

2.1.2 解析法

解析法侧重于发展基于数学框架的点雨量和面雨量之间的理论关系,并对降雨空间相关结构提出一系列假设,主要包括基于空间相关性及降水尺度不变性提出的方法。空间相关性法是基于降水的空间相关结构(spatial correlation structure)建立起来的,依赖于各向同性的假设和降水过程的特定统计分布。Omelayo^[15]假设降雨在空间上呈对数正态分布,并利用平均空间相关系数来估计ARF,公式如表1所示,可以看出,ARF的大小取决于空间相关系数、重现期、标准差和研究区内站点数量。Rodriguez-Iturbe等^[41]提出基于特定距离的两个气象站降水量的相关性来估计ARF的方法,该方法假设一个特定的空间相关结构,假设点雨量既有各向同性又符合零均值的高斯分布。Sivapalan等^[10]的研究中指出,Rodriguez-Iturbe等^[41]的方法不太适合降水极值分布特征,因此选择在极值分布中利用空间相关性特征,假设点雨量和面雨量的极值分布呈Gumbel分布。方程清楚地表明,ARF取决于集水面积、空间相关长度、持续时间和重现期。基于降水尺度不变性,De Michele等^[29]利用动态尺度(dynamic scaling)和统计自相似度(statistical self-affinity)的概念,提出年平均最大降水量关于持续时间 d 和流域

表1 ARF 估算方法

Table 1 Estimation methods of ARF

类型	研究者	估算公式	因子	降水数据	参考文献
经验法	US Weather Bureau	$F_{\text{TP29}} = \frac{\sum_j \sum_i P'_{ij}}{\sum_j \sum_i P_{ij}}$	A, d	通用	[11]
	UK NERC	$F_{\text{FSR}} = \frac{1}{IJ} \sum_j \sum_i \frac{P'_{ij}}{P_{ij}}$	A, d	通用	[12]
	Bell	沿用 NERC (1975) 的方法, 用频率分布拟合点面降水, 并计算指定返回周期的 ARF	A, d, T	通用	[13]
	NOAA Technical Report	$F_{\text{NWS}}(f, d, A) = \frac{X_A(f, d, A)}{X_A(f, d, 0)}$ 其中 $X(f) = u + K(f)\sigma$	A, d, T	通用	[31]
	Koutsoyiannis 等	$F = 1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01\ln A}}{d^{0.35}}$	A, d	降水事件	[14]
	Yoo 等	$F = 1 - \text{Mexp}[-(aA^b)^{-1}]$	A	日降水	[21]
	Mineo 等	$F(d, A) = \frac{\gamma(d)^{c(d)}}{[\gamma(d) + A]^{c(d)}}$ 其中 $\gamma(d) = 18.08d$ $c(d) = 0.19d^{-0.058}$	A, d	降水事件	[6]
解析法	Omolayo	$F = \exp\left[K_T \sigma \left(\sqrt{\frac{1 + (n-1)\rho}{n}} - 1\right)\right]$	A, d, T	降水极值序列	[15]
	Sivapalan 等	$F(d, A, T) = \frac{\alpha^* \left[\alpha_A \mu_A - \ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)\right]}{\alpha_A \left[\alpha^* \mu^* - \ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)\right]}$	A, d, T	降水极值序列	[10]
	De Michele 等	$F(d, A) = \left[1 + \omega \left(\frac{A^z}{d}\right)^b\right]^{-v/b}$	A, d	降水极值序列	[29]

注: F_{TP29} 、 F_{FSR} 、 F_{NWS} 、 F 为不同经验公式中的点面折减系数; P'_{ij} 为第 i 个站点第 j 年的平均面降水量; P_{ij} 为第 i 个站点第 j 年的平均点雨量; f 为频率; d 为持续时间; A 为流域面积; $X_A(f, d, A)$ 为平均面雨量; $X_A(f, d, 0)$ 为代表的点雨量; μ 为降雨样本的均值; σ 为降雨样本的标准差; $K(f)$ 为频率系数, 取决于拟合方程的形式, 为 Gumbel 拟合参数; K_T 为对应于重现期 T 的频率因子; ρ 为平均空间相关系数; n 为水文站数量; α^* 、 μ^* 为点雨量分布曲线参数; α_A 、 μ_A 为面雨量分布曲线参数; v 、 ω 、 z 、 a 、 b 为实测降水计算的 ARF 拟合方程得到的参数。

面积 A 的表达式, 通过拟合经验法计算 ARF, 得到表达式的参数值。该方法所需参数较少, 计算相对简便, 但是表达式本身并未考虑重现期的影响, 可以通过拟合得到不同重现期下的参数来计算不同重现期的 ARF。Veneziano 等^[22] 利用降雨时空分布的多重分形特性计算 ARF。虽然这些 ARF 的解析表达基于一定的理论基础, 但仍需要合理的数据来估计模型参数, 从而计算 ARF。另外, 这些方法在大范围的时间和空间尺度上的应用还有待进一步评估^[2]。

ARF 的计算方法众多, 得到的 ARF 的数值差异也较大。目前, 对于 ARF 的差异是来源于方法的不同、所用数据的不同还是区域的独特性尚不清楚。Pavlovic 等^[9] 分析了 4 种不同类型定点定面方法 (经验法、基于空间相关性的解析法、基于降水时空尺度效应的解析法及利用极值理论的方法) 之间的差异, 利用俄克拉荷马州高质量的雷达数据和密集的降水站点, 对 4 种方法进行了检验, 结果表明, 无论使用何种方法, ARF 的估计值都有很大的不确定性, 重现期越长, 持续时间越短, 面积越大, 差异越明显。总之, 方法的选择对 ARF 估计有显著的影响,

特别是对于较短持续时间降雨的情况。Mineo 等^[6] 对比了 4 种经验法估算 ARF 的潜力, 结果表明这些公式并不能有效地估算研究区的 ARF, 这种差异是不可忽略的, 特别是对于短降雨持续时间和研究面积较大时。ARF 的经验表达式具有较强的地域性, 在不同的气候和地形区, 需要依据当地的降水数据进行参数的计算, 以获得准确度更高的结果。

2.2 动点动面法

动点动面法也称暴雨中心法, 该方法用于计算 ARF 的面积不是固定的, 而是根据降雨事件而变化。此时, ARF 定义为识别的暴雨事件面积范围内的面降水量与降雨中心处降水量 (最大点降水) 的比值。该方法的一个优点是可以反映降水事件的空间结构, 且点雨量与面雨量是时间同步的^[2]。但是该方法需要高分辨率的降水空间分布, 需要通过天气雷达或高密度地面测量网络获得^[18]。暴雨中心法经常被用来估计 PMP, 该方法适用于较小的流域, 对于多中心的暴雨难以实施, 因此, 该方法的应用较少^[2, 42]。

暴雨中心法的基本步骤为: 暴雨识别与分类, 暴雨参照面积计算, 计算暴雨范围内的面降水, 识别暴

雨范围内的最大点降水量, 计算 $ARF^{[17,18,43]}$ 。最初, 研究者常将暴雨范围的参考形状设置为圆形或正方形^[44-45], 这对于窄带形状的区域并不适用, 随后研究者建议采用椭圆形作为暴雨范围的参考形状^[46]。面降水量的确定方法因使用的数据不同而不同, 对于密集的站点数据, 可通过雨量等高线进行积分获取^[2,42], 或者通过插值方法, 将数据转化为网格降水量来计算^[43]。对于雷达数据, Bacchi 等^[44]尝试基于泊松时空过程交叉的理论估算面降水。Kang 等^[46-47]通过改变椭圆降水区域长短轴比例获取优化的面降水量。

研究者对定点定面法和动点动面法的比较也进行了研究。Wright 等^[20]利用雷达数据用暴雨中心法计算了 ARF , 并于美国气象局的 ARF 计算公式 (F_{TP29}) 进行对比, 证明后者计算的 ARF 不能充分代表极端降雨的真实特性, 缺乏代表性主要是由于公式混合了不同类型风暴的降雨观测结果。Biondi 等^[43]研究表明, 动点动面法 (暴雨中心法) 计算的 ARF 通常比定点定面法计算的 ARF 略小, 可能的原因包括两个: ①强降雨风暴可能受有限区域范围内的对流事件控制, 降雨范围小; ②风暴中最强的降雨点可能位于定点定面法使用的边界之外^[2]。

动点动面法虽然实际应用较少, 但其物理意义明确, 常用来分析降水空间变异性及不同类型降水的影响。Kim 等^[18]基于雷达数据, 采用风暴识别算法识别出 54 758 个椭圆形极端风暴事件, 研究了降雨的空间变异性对 ARF 的影响, 并量化了不同风暴形状之间数值的相对差异。风暴内部的空间变异性 (降水量的变异系数), 与面积和持续时间一样是 ARF 值的重要影响因素, 表明未来估算区域降水量的设计框架须将降雨的空间变异性考虑在内。也有研究者关注不同类型降水的 ARF 的差别。Biondi 等^[43]分别计算了对流降水和锋面系统降水对应的 ARF , 发现对流降水的 ARF 随面积的衰减比锋面系统降水更明显, 在 2 000 km² 的流域面积, ARF 降至 0.5 左右。

3 不同类型降水数据的应用

ARF 常通过密集的雨量表网络来计算。随着高时空分辨率雷达和卫星数据的出现, 一些研究者尝试将其应用于 ARF 的计算^[18-19]。与实测的气象站数据相比, 雷达数据的空间分辨率更高, 从而更好地展现了降雨的空间模式。然而, 雷达降水的时间记录通常较短, 不能反映重现期对 ARF 的影响^[19]。Allen 等^[19]对雷达数据和雨量站数据计算的 ARF 进行了对比, 发现基于雷达数据计算的 ARF 随面积

的衰减速度快于基于雨量站计算的数值, 由于数据时间限制, 作者并未得出哪个数据平台能更准确地衡量降水的空间变异性。Kim 等^[18]利用分辨率为 1 km × 1 km 的雷达数据, 定量描述风暴内部结构变化对 ARF 的影响。Pavlovic 等^[9]利用 4 km × 4 km 的雷达与雨量站融合数据计算了不同面积 (16 ~ 1 296 km²) 和持续时间 (1 ~ 24 h) 的 ARF , 并对 4 种方法计算的 ARF 进行了比较。随着技术的发展, 雷达数据的质量会更可靠, 其应用于 ARF 会有很大的潜力。Li 等^[23]在 2015 年利用气候模型模拟得到的降水数据计算研究区的 ARF , 并评估了在气候变暖背景下, 未来降水模式的 ARF 的变化趋势。Kao 等^[48]比较了 4 种降水产品计算 ARF 的差异, 结果表明不同数据源计算得到的 ARF 变化趋势一致, 差别较小, 说明 ARF 对数据源敏感度较低。不论何种降水数据集, 其数据本身的准确性是一个重要问题^[23], 随着技术的不断进步, 应更多地尝试将新数据应用于 ARF 的计算。

4 结 语

ARF 随流域面积、持续时间及重现期的变化而变化, 除此之外, 天气条件、地形、季节及计算方法也是影响 ARF 的重要因素。本文详细总结了目前 ARF 的计算方法及各方法的特点和适用性。动点动面法主要用于将点最大可能降水量转换为面平均降水量; 定点定面法常用于水文实践中, 将点设计降水量转换为面平均设计降水量。后者包括简单易用的经验法和基于数学原理的解析法; 经验法简单易用, 在不同区域适用性强; 解析法虽然基于一定的数学和统计框架, 但其依赖于简化的假设, 适用范围有限。研究表明, 基于经验法计算的 ARF 往往更可靠。与经验方法相比, 解析法的计算量和对数据要求要小得多, 但目前缺乏对其稳健性和区域性的验证研究。关于 ARF 各计算方法的比较研究表明, 不同方法计算得到的 ARF 的数值差异较大, 方法的选择对 ARF 估计有显著的影响, 特别是对于短持续时间的设计降雨。未来需要更系统地研究 ARF 各种计算方法之间的差异, 以确定最适宜的 ARF 计算方法。雷达等降水数据的使用给 ARF 的计算提供了更好的支持, 但数据准确性、时间记录长度及计算 ARF 是否存在偏差都是需要考虑的问题, 还需更多的研究去论证。随着降水监测网络的建设和降水数据的丰富, ARF 的经验公式应该随着降水数据的更新而不断更新, 为水利和水文基础设施的设计应对气候变化做好准备。

参考文献:

- [1] 黄津辉,王超,范泽华. 天津市设计暴雨雨型的演变 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 38-43. (HUANG Jinhui, WANG Chao, FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 38-43. (in Chinese))
- [2] SVENSSON C, JONES D A. Review of methods for deriving areal reduction factors[J]. Journal of Flood Risk Management, 2010, 3(3): 232-245.
- [3] 严方家,李琼芳,王燕,等. 镇江市中长历时设计暴雨计算[J]. 水资源保护, 2020, 37(2): 108-111. (YAN Fangjia, LI Qiongfang, WANG Yan, et al. Medium and long duration design rainstorm in Zhenjiang City [J]. Water Resources Protection, 2000, 37(2): 108-111. (in Chinese))
- [4] 张轩,张行南,江唯佳,等. 秦淮河流域东电站水位预报研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 41-46. (ZHANG Xuan, ZHANG Xingnan, JIANG Weijia, et al. Study on water level forecast of Dongshan Station in Qinhuai River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 41-46. (in Chinese))
- [5] LEE J, PARK K, YOO C. Bias from rainfall spatial distribution in the application of areal reduction factor [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12): 5229-5241.
- [6] MINEO C, RIDOLFI E, NAPOLITANO F, et al. The areal reduction factor: a new analytical expression for the lazio region in central Italy [J]. Journal of Hydrology, 2018, 560: 471-479.
- [7] LANGOUSIS A, KALERIS V. Theoretical framework to estimate spatial rainfall averages conditional on river discharges and point rainfall measurements from a single location: an application to western greece [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 9(11): 12463-12522.
- [8] 宋承新. 山东省定点定面雨量关系浅析[J]. 水文, 1997(2): 27-30. (SONG Chengxin. Analysis of relations between fixed point and fixed area for strom in Shandong [J]. Journal of China Hydrology, 1997(2): 27-30. (in Chinese))
- [9] PAVLOVIC S, PERICA S, LAURENT M S, et al. Intercomparison of selected fixed-area areal reduction factor methods [J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 419-430.
- [10] SIVAPALAN M, BLOSCHL G. Transformation of point rainfall to areal rainfall: intensity-duration-frequency curves[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204: 150-167.
- [11] US Weather Bureau. Rainfall intensity-frequency regime Part 1. the Ohio Valley, TP-29[R]. Washington, D. C. : U. S. Deptment of Commerce, 1957.
- [12] NERC. Flood studies report, Vol. II [R]. London: Natural Environment Research Council, 1975.
- [13] BELL F C. The areal reduction factor in rainfall frequency estimation, Institute of Hydrology Report No. 35 [R]. London: Natural Environment Research Council, 1976.
- [14] KOUTSOYIANNIS T, XANTHOPOULOS D. Engineering hydrology [M]. 3rd ed. Athens: National Technical University of Athens, 1999.
- [15] OMOLAYO A S. Relationships between point and areal rainfall for flood and drought assessments [D]. Sydney: University of New South Wales, 1989.
- [16] PIETERSEN J P J, GERICKE O J, SMITHERS J C, et al. Review of current methods for estimating areal reduction factors applied to south african design point rainfall and preliminary identification of new methods [J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineers, 2015, 57(1): 16-30.
- [17] OMOLAYO A S. On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation [J]. Journal of Hydrology, 1993, 145(1/2): 191-205.
- [18] KIM J, LEE J, KIM D, et al. The role of rainfall spatial variability in estimating areal reduction factors [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 416-426.
- [19] ALLEN R J, DEGAETANO A T. Areal reduction factors for two eastern united states regions with high rain-gauge density [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(4): 327-335.
- [20] WRIGHT D B, SMITH J A, BAECK M L. Critical examination of area reduction factors [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 769-776.
- [21] YOO C, KIM K, KIM H S, et al. Estimation of areal reduction factors using a mixed gamma distribution [J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(3): 271-284.
- [22] VENEZIANO D, LANGOUSIS A. The areal reduction factor: a multifractal analysis [J]. Water Resources Research, 2005, 41(7): 1-15.
- [23] LI J W, SHARMA A, JOHNSON F, et al. Evaluating the effect of climate change on areal reduction factors using regional climate model projections [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 419-434.
- [24] MUTHUSAMY M, SCHELLART A, TAIT S, et al. Geostatistical upscaling of rain gauge data to support uncertainty analysis of lumped urban hydrological models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 21(2): 1077-1091.
- [25] 曾明,张雨凤,李琼芳,等. 上海市不同历时暴雨组合概率研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(4): 82-86. (ZENG Ming, ZHANG Yufeng, LI Qiongfang, et al. Study on probability for rainstorm combinations during different durations in Shanghai City [J]. Water Resources

- Protection, 2015, 31(4): 82-86. (in Chinese))
- [26] SKAUGEN T. Classification of rainfall into small-and large-scale events by statistical pattern recognition [J]. Journal of Hydrology, 1997, 200(1/2/3/4): 40-57.
- [27] 彭博. 降雨空间分布及点面关系研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [28] 刘成林. 城市排水防涝系统设计降雨时空分布特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [29] DE MICHELE C, KOTTEGODA N T, ROSSO R. The derivation of areal reduction factor of storm rainfall from its scaling properties [J]. Water Resources Research, 2001, 37(12): 3247-3252.
- [30] STEWART E J. Areal reduction factors for design storm construction: joint use of raingauge and radar data [C]// New Directions for Surface Water Modeling (Proceedings of the Baltimore Symposium). Baltimore: IAHS Publ, 1989: 31-40.
- [31] MYERS V A, ZEHR R M. A methodology for point-to-area rainfall frequency ratios. NOAA Technical Report NWS 24 [R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 1980.
- [32] BARBERO G, MOISELLO U, TODESCHINI S. Evaluation of the areal reduction factor in an urban area through rainfall records of limited length: a case study [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(11): 1-10.
- [33] 郭金燕. 北京市 24 h、3d 暴雨定点定面关系分析[J]. 北京水利, 2001(4): 22-24. (GUO Jinyan. Analysis of relations between fixed point and fixed area for 24 h and 36 h storm in Beijing [J]. Beijing Water Resources, 2001(4): 22-24. (in Chinese))
- [34] 金新芽, 邵学强, 马志鑫, 等. 浙江省暴雨定点定面关系分析[J]. 浙江水利科技, 2003(2): 7-8. (JIN Xinya, SHAO Xueqiang, MA Zhixin, et al. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Zhejiang [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2003(2): 7-8. (in Chinese))
- [35] 杜长辉. 宿州、淮北两市暴雨定点定面关系分析[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(15): 159-160. (DU Changhui. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Suzhou and Huaibei [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2009, 15(15): 159-160. (in Chinese))
- [36] 蒋春宇, 黄领梅, 沈冰, 等. 无定河流域暴雨定点定面关系分析 [C]// 第十二届中国水论坛. 福州: 中国水利水电出版社, 2014: 98-100.
- [37] 原彪. 张家口市坝上地区暴雨点面关系分析[J]. 河北水利科技, 2000(4): 33-35. (YUAN Biao. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Zhangjiakou Dam Area [J]. Hebei Water Resources, 2000(4): 33-35. (in Chinese))
- [38] SIRIWARDENA L, WEINMANN P E. Derivation of areal reduction factors for design rainfalls in Victoria. Report 96/4 [R]. Sydney: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1996.
- [39] 李文涛, 王广华, 周建华, 等. 深层隧道排水系统规划设计中降雨点面关系研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2): 1-4. (LI Wentao, WANG Guanghua, ZHOU Jianhua, et al. Study on relationship between point rainfall and areal rainfall in planning and design of deep tunnel drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 1-4. (in Chinese))
- [40] 陈正明. 广东省设计暴雨定点定面关系分析[J]. 广东水电科技, 1986(1): 30-35. (CHEN Zhengming. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Guangzhou [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 1986(1): 30-35. (in Chinese))
- [41] RODRIGUEZ-ITURBE I, MEJÍA J M. On the transformation of point rainfall to areal rainfall [J]. Water Resources Research, 1974, 10(4): 729-735.
- [42] ASQUITH W H, FAMIGLIETTI J S. Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach [J]. Journal of Hydrology, 2000, 230(1/2): 55-69.
- [43] BIONDI D, GRECO A, DE LUCA D L. Fixed-area vs storm-centered areal reduction factors: a Mediterranean case study [J]. Journal of Hydrology, 2020: 125654.
- [44] BACCHI B, RANZI R. On the derivation of the areal reduction factor of storms [J]. Atmospheric Research, 1996, 42(1): 123-35.
- [45] DURRANS S R, JULIAN L T, YEKT M. Estimation of depth-area relationships using radar-rainfall data [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(5): 356-67.
- [46] KANG B, KIM E, KIM J G, et al. Comparative study on spatiotemporal characteristics of fixed-area and storm-centered ARFs [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2019, 24(10): 04019044.
- [47] OLIVERA F, CHOI J, KIM D, et al. Estimation of average rainfall areal reduction factors in Texas using NEXRAD data [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(6): 438-448.
- [48] KAO S C, DENEALE S T, YEGOROVA E, et al. Variability of precipitation areal reduction factors in the conterminous United States [J]. Journal of Hydrology, 2020, 1: 100064.

(收稿日期: 2021-01-26 编辑: 王芳)