

文章编号:0559-9350(2018)01-0092-11

可能最大降水估算研究综述

林炳章¹, 兰 平², 张叶晖¹, 林智琛¹, 陈晓旻¹

(1. 南京信息工程大学 水文气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 可能最大降水 PMP 用于推求重要水利水电工程、核电工程和滨海大城市防洪的可能最大洪水。80 多年来, 国内外已经对可能最大降水估算开展了大量深入的研究。本文比较系统地统计估算方法、当地暴雨放大法、暴雨移置法、概化估算法、暴雨模式法、数值模拟法和多重分形法等方面综述 PMP 估算方法研究应用现状。对 PMP 估算研究 5 个方面的前沿与热点问题: 山区暴雨移置、短历时 PMP 估算、PMP 估算的不确定性、气候变化对 PMP 估算的影响和 PMP 的概率等进行了阐述。最后展望了 PMP 估算未来的发展趋势和研究方向。

关键词: 可能最大降水; 水文气象途径; 数值模拟; 短历时; 不确定性; 气候变化

中图分类号: TV125

文献标志码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20171223

1 研究背景

1930 年代, 应美国陆军工程师团的请求, 为了推求为设计洪水服务的潜在降雨上限, 美国天气局开展 MPP(Maximum Possible Precipitation)的研究。由于“Maximum”和“Possible”组合在一起表达降雨极值语义太肯定, 忽略了理论和估算上的不确定性, 1940 年代后期更改为 PMP(Probable Maximum Precipitation), 以突出“最大降水”估计值的不确定性^[1]。2009 年, WMO 在 PMP 估算手册(第三版)定义 PMP 为 1 年的特定时间中, 在特定地点和给定时段内, 在某一设计流域上或者给定暴雨面积下, 气象上所可能降下的最大降水深度, 这个降水量是不考虑气候长期变化趋势的^[2]。PMP 作为降水上限^[3], 用于工程设计, 作为大型水库校核洪水^[4]、重要水库大坝溢洪道^[5]、核电工程^[6]等的防洪设计标准。PMP 估算 80 多年的发展历史积累了丰富的工程实践经验, 研究成果丰富^[7]。但是, 2009 年, “莫拉克”台风在台湾岛嘉义县阿里山地区 24、48 h 的降雨量分别为 1 623.5 mm 和 2 361.0 mm, 创造了中国暴雨新纪录^[8], 也接近世界纪录^[2]。这场台风暴雨在台湾中南部地区造成了空前的灾难, 改变了人们对现有 PMP 估算成果的认识, 并影响远东地区 PMP 估计值。

尽管 PMP 不考虑气候的长期变化趋势, 但气候变暖的事实逐渐被学术界和大多数国家政府所接受^[9]。在这种气候背景下, 极端强降雨事件将不断增加, 其中, 中纬度大部分陆地区域和湿润的热带地区的强降水强度可能加大、发生频率可能增加^[10], 导致气候变化对 PMP 可能产生的影响不能忽视。

因此, PMP 估算仍然存在一些需要继续深入探讨的问题。本文将在综述 PMP 估算方法包括统计估算方法、当地暴雨放大法、暴雨移置法、概化估算法、暴雨模式法、数值模拟法^[11-12]、多重分形法^[13]等基础上, 梳理归纳 PMP 估算当前的几个前沿与热点问题: 山区暴雨移置、短历时 PMP 估算、PMP 估算的不确定性、气候变化对 PMP 估算的影响和 PMP 的概率等, 并展望其未来发展趋势和研究方向。

收稿日期: 2017-12-19; 网络出版日期: 2018-01-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180112.1529.003.html>

基金项目: 香港土木工程署《24-hour PMP Updating Study》; 香港土木工程署《4-hour Probable Maximum Precipitation(PMP) Updating Study in Hong Kong》; 2013 年江苏省普通高校研究生科研创新计划项目

作者简介: 林炳章(1944-), 男, 福建厦门人, 教授, 主要从事工程水文设计暴雨等研究。E-mail: lbzl@nuist.com

通讯作者: 兰平(1987-), 女, 博士生, 主要从事可能最大降水估算研究。E-mail: blue8724@163.com

2 PMP估算方法研究

WMO^[2]推荐的PMP估算方法分为两类，一类是统计估算，另一类是水文气象途径。其中，水文气象途径包括当地暴雨放大法、暴雨移置法、概化估算法等。近年来，也有学者尝试应用暴雨模式法、数值模拟法、多重分形法进行PMP估算。

2.1 统计估算法 1961年，美国学者Hershfield^[14]根据Chow^[15]的一般频率方程 $X_T = \bar{X}_n + KS_n$ ，定义了一个特殊的统计量 K_m ：

$$K_m = \frac{X_m - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}} \quad (1)$$

并根据约2700个雨量站(其中90%雨量站点位于美国)的24h雨量记录计算得到 K_m 的最大值为15，用于PMP估算。他进一步研究发现，当历时小于24h时， K_m 等于15对湿润地区过高，而对较干旱的地区又偏小，因此建立了 K_m 与年最大值序列的均值和降雨历时的经验关系图^[16]。Koutsoyiannis^[17]等建立了此经验图的数学关系式：

$$K_m = 20 - 8.6 \ln \left(1 + \frac{\bar{h}^*}{130 \text{mm}} \right) \left(\frac{24 \text{h}}{d} \right)^{0.4} \quad (2)$$

式中： $\bar{h}^*$ 为年降雨序列的均值； d 为时间尺度。

此外，Koutsoyiannis^[18]等还用GEV(Generalized Extreme Value)曲线对 K_m 进行拟合，发现 K_m 的最大值15满足60000年一遇的重现期。Casas等^[19]利用加泰罗尼亚145个雨量站1d的降雨序列数据，建立 K_m 的外包线拟合公式：

$$K_m = -7.56 \ln \bar{X}_n + 40.5 \quad (3)$$

中国学者倾向于以离均系数 Φ_m 取代 K_m ^[7]。此时的统计估算仅从实际发生的大暴雨中寻求 Φ_m ，而没有放大的概念，因此计算出的PMP值往往偏小。华家鹏等^[20]通过水汽放大对统计估算法进行改进。林炳章^[21]认为，从水文统计的角度， K_m 虽借用了频率方程，却不涉及具体频率，只是从统计特性推求放大比，由此推导出 K_m 与 Φ_m 的一个关系式：

$$K_m = \Phi_m \sqrt{\frac{1}{C_1 - C_2 \Phi_m^2}} \quad (4)$$

式中： $C_1 = \frac{(n-1)^3}{n^2(n-2)}$ ， $C_2 = \frac{n-1}{n(n-2)}$ ， n 为样本容量。当 $n \rightarrow \infty$ ， $K_m \rightarrow \Phi_m$ ，即 K_m 是 Φ_m 的一致性估计量。他还提出了适用 K_m 法的两个约束条件 $N_m \geq (\Phi_m^2 + 2)$ ^[21](判断计算是否有效)和 $5.76(\Phi_m^2 + 2) \leq N_s \leq 3.5n$ ^[22-23](控制 K_m 的计算误差，得到比较稳定的估计值)，并得到了 K_m 与 N_m 、 N_s 随着样本容量 n 变化的关系^[22]。该法分别应用于江西省修河拓林水库^[21]、美国德克萨斯州的3个单站^[22]以及香港地区24h的PMP估算^[23-24]。

改进后的统计估算法与传统的频率分析相比，有3个优点：(1)两个约束条件规范了统计估算法的使用范围；(2)在使用资料上不像频率分析法那样只着眼于一个单站或一个流域，而是着眼于一个比较广大的区域，即水文气象一致区。(3)频率分析法是统计外延，而它是统计外包，其实质是在水文气象一致区内，移置经过抽象化了的统计量 K_m ，离差系数 C_m 和样本均值 $\bar{X}_n$ 。需注意，该法也存在一些问题：(1)拿掉最大项 X_m 以后，虽然可以证明当 $n \rightarrow \infty$ ， $K_m \rightarrow \Phi_m$ ，即 K_m 是 Φ_m 的一致性估计量，但是 K_m 的有效性、误差等，仍待解决；(2)PMP估算成果的“可能最大”水平取决于一致区内实测特大暴雨 X_m 的量级，以及实测特大暴雨发生前该地的暴雨统计特性 $\bar{X}_{n-1}$ 和 S_{n-1} ，所以该法对实测降雨资料依赖性很强。

总之，统计估算法概念清楚，计算简便，适用于雨量资料比较充分的中、小流域点PMP快速估

算。

2.2 当地暴雨放大法 若设计流域具有时空分布较严重的大暴雨资料，从中选取一场典型特大暴雨，分析比较其暴雨期间的代表性地面露点温度与当地历史上出现过的最大持续 12 h 地面露点温度，进行适当的水汽放大后得到 PMP，称为当地暴雨放大法^[2,7]。

2.2.1 水汽放大法 水汽放大法是当地暴雨放大最主要的方法，其核心是用地面露点温度计算可降水量，典型暴雨代表性露点和可能最大露点的选定就很重要。而露点的近似物理上限是暖湿气团源地最高海表水温 SST，因此其取值的可变范围有限，反映到水汽放大倍比上，一般只放大 20% ~ 30%，最多放大到 40% ~ 50%。该法得到的 PMP 足够安全，被国内外普遍采用^[7]。

2.2.2 水汽风速放大及水汽输送效率放大 水汽风速放大及水汽输送效率放大，这两种对典型暴雨的放大方法，基本概念一样^[7]，只是选取的指标不同，前者取风速和水汽的最大值，后者取风速与水汽乘积的最大值。梁忠民等^[25]借鉴港口设计中“风玫瑰图”概念，改进传统水汽风速放大方法，成果比较满意。这两种方法虽然物理概念明确，但是暴雨代表性水汽风速选取的任意性，实际暴雨观测资料中风速与降雨量的非正比关系，特别是暴雨期间高空风速观测资料的缺乏，使得估计值很不稳定。因此，设计人员在使用时需特别谨慎。

2.3 暴雨移置法 当设计流域缺少时空分布较为恶劣的特大暴雨资料时，将气象一致区的实测特大暴雨作为目标暴雨移置过来并进行适当放大以推求 PMP，就叫做暴雨移置^[7]。暴雨移置的关键在于只能移置不受地形影响的那部分雨量及其空间分布，因此暴雨分割就很重要，需将山地暴雨分割成纯由大气因素造成的辐合雨分量以及受地形影响的地形雨分量。此外，确定合理的移置范围也很重要。由于移置的暴雨是实际出现过的，移置后又经过合理改正，计算成果可信度较高，此法被世界各国广泛采用^[2]。

2.4 概化估算法 概化估算法是美国用以估算小流域 PMP 包括暴雨放大、移置、外包等的一整套方法，中国一般简称为时面深概化法^[7]。概化估算是在一个大区域内许多大小不同流域 PMP 估算成果的区域概化，包括 PMP 空间分布的概化(椭圆形或圆形)和时程分布的概化(单峰型)^[2]等。美国按不同的气候区逐步编制的一系列 HMR(Hydro Meteorological Report)^[1,26-28]，提供了概化的 PMP 估算值及 D-A-D 时面深曲线图，我国于 1978—1979 年也完成了类似的“全国 PMP 等值线图”^[29]。美国的 HMR 指导了联邦和州政府的大型水利工程建设的防洪设计工作，而我国的 PMP 等值线图没有起到相应的作用。此法亦为印度^[30-31]、澳大利亚^[32-35]、马来西亚^[36]、巴基斯坦^[37]等国所采用，尤以澳大利亚最为系统，分别研究了澳大利亚东南部、凯瑟琳河流域、短历时暴雨和热带暴雨等的 PMP 概化估算^[32-35]。随着 GIS 技术的不断发展，为时面深计算提供了一种新手段^[38]。概化估算的优点是一个地区所有资料能得到充分利用；地区内采用统一方式完成历时、面积的地区变化修匀；地区内各流域估算一致。概化的效果取决于样本资料的多寡；若增加了暴雨移置的样本，并进行水汽放大，则其外包后的曲线值，还可以用来评价 PMP 估算的成果^[23]。但是，重大工程一般不采用概化 PMP 的成果，而是进行单站 PMP 估算，并加以更详细的分析、论证、估算和比较。

2.5 暴雨模式法 暴雨模式法是 Collier 和 Hardaker^[39-40]提出的一维降雨模式。该模式认为一场暴雨露点的变化受太阳能加热、地形抬升、低层辐合等 3 个因素的影响，即：

$$\Delta T = \frac{G}{C_p \rho_a H} + \frac{v^2 h T_{\min}}{g d^2} + \frac{w v T_{\min}}{g L} \quad (5)$$

式中： ΔT 为露点的变化； G 为月平均热量； H 为有效热量高度； ρ_a 为空气密度； C_p 为特定的干空气热量； v 为水平方向上的风速； g 为重力加速度； w 为垂直速度； h 为高程； L 为辐合尺度； d 为表示地形宽度的一个常数； $T_{\min}$ 为流域每月最小温度。

从式(5)可以得到最大露点温度的计算公式^[41]：

$$T_{dm} = T_{\min} + \frac{\Delta T}{2} \quad (6)$$

再由式(6)计算最大可降水量 $M_{\max}$ ^[41]。最后，得到 PMP 的计算公式为：

$$PMP = M_{\max} E \quad (7)$$

式中 E 为暴雨效率,是指暴雨发生期间实测最大雨量与代表性气柱的可降水量的比率^[42]。

假定地面露点温度 27.5℃,按饱和假绝热大气从地面到 200 hPa 高空的可降水量只有 100 mm,倘若没有源源不断的水汽输送,不能产生特大暴雨。因此,该法难以反映动态的水汽输送,仅把可降水量来回计算两次,不能算是真正的暴雨模式,可以认为是一种变相的水汽放大。

2.6 数值模拟法 数值模拟是利用计算机去模拟、预报天气和预测气候的一种技术,在气象领域应用广泛。1988 年,王作述^[11]利用我国自主发展的有限区域细网格降水数值预报模式检验了用水汽净输送法估算的汉江上游石泉以上流域 PMP^[43]。Abbs^[12]用科罗拉多州立大学研制的区域气候模式模拟澳大利亚极端降雨个例。Abbs 认为降水量与可降水量呈线性相关,降雨效率不会随着水汽的增加而增加,地形能够影响降雨的分布但不能从天气动力尺度影响暴雨。Ohara^[44]等通过修改 MM5 模式中的水汽等物理化参数方案,论证了水汽和水汽输送通量的增加会导致降雨量的增加。刘俊杰^[45]运用 WRF 模式进行“莫拉克”台风同化移置试验,研究莫拉克台风暴雨在我国东南沿海登陆后可能产生的影响,探讨数值模式在 PMP 估算中运用的可能性。Ishida^[46-47]等用 MM5 模式改变水汽输送方向后,又对其进行水汽放大试验,试验表明,模拟的降雨量比实际观测的降雨量要大。数值模拟法具有不同于传统 PMP 估算方法的优点:(1)它综合了陆地的能量和质量交换(包括地形抬升影响、水汽辐合、大气的非线性等),而如水汽放大法仅仅假设的是一种线性放大倍比关系;(2)当初始场是降尺度的 NCEP/NCAR 再分析数据时,可以估算观测站点稀疏地方的 PMP 值;(3)一旦参数化方案确定,降水场就客观唯一确定;(4)模拟结果在空间分布上呈现更好;(5)最重要的是,初始场既可以是历史数据、再分析数据,也可以是全球气候模式输出结果,这为研究 PMP 的过去,现在和未来提供了一种新的研究手段,也为研究气候变化对 PMP 的影响开拓了新思路。

但是,由于研究者缺乏工程设计经验,误把 PMP 当成纯粹的动力气象方程的简单输出,以上叙述的优点恰恰是数值模拟法在估算 PMP 时的缺点,因为:(1)数值模拟方程建立在地球尺度上,对估算流域尺度或是暴雨中心点的 PMP 无能为力;(2)对 NCEP/NCAR 再分析数据降尺度后所产生的新误差,给估算成果带来许多不确定性;(3)模拟过程中假定不同初始场,又进一步增加估算成果的不确定性。总之,PMP 是一种相对某一特定流域特定时段的极端降雨事件,是为工程防洪安全服务的。而数值模式的诸多不确定性,导致应用它来预估未来的极端降雨事件并达到实用,仍面临许多挑战。

2.7 多重分形法 基于观测值的估计值与历史资料的历时和序列长度有关,Douglas 和 Barros^[13]定义了分形最大雨量(Fractal Maximum Precipitation, FMP),其表达式为:

$$A_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda} T}{\lambda} \propto \lambda^{\gamma_{\max} - 1} \propto \tau^{1 - \gamma_{\max}} \quad (8)$$

式中: T 为研究的降雨时间序列; τ 为某降雨历时; ε 为对应降雨历时的雨强; λ 为尺度(比例)系数; A_{λ} 为该降雨历时下的最大累积量。

该法优点是推算极端降水序列最大值不受经验和客观方法影响。但是,由于其估算过程复杂、假定过多,又集合不同尺度的雨量资料,同时把 PMP 估值与概率联系在一起,冲击了 PMP 作为降雨物理上限的内涵。尽管此法没有被工程界所采用,但也另辟蹊径。

3 PMP 估算研究的前沿与热点问题

总结国内外 PMP 最新研究成果,着重 PMP 研究的前沿与热点,归纳为以下 5 个方面。

3.1 山区暴雨移置 地形包括测站经纬度、坡度与坡向、海拔高程与地形特征等,对暴雨的综合作用包括触发、辐合、增强^[48]等三个方面,这导致降水在时空分布上比较复杂。因此如何在 PMP 估算中定量考虑地形的影响,一直是一个难题。暴雨移置是山区 PMP 估算最常用的方法,而暴雨移置的前提是暴雨分割。Hansen^[49]提出山区 PMP 是由受天气系统影响的辐合雨部分和受地形影响的地形雨部分组成。林炳章^[50-51]进一步提出一种定量估算地形对暴雨影响的暴雨分割技术—分时段地形增强因

子法(Step-Duration-Orographic-Intensification-Factor, SDOIF)。

文献[50-51]定义了平均地形增强因子 $\bar{f}_{\Delta t}(x, y)$:

$$\bar{f}_{\Delta t}(x, y) \approx \frac{\bar{R}_{\Delta t}(x, y)}{\bar{R}_{0\Delta t}} \quad (9)$$

式中: $\bar{f}_{\Delta t}(x, y)$ 的物理意义是表示流域内某点 (x, y) 的地形对 Δt 时段内暴雨的平均增强幅度,称为 Δt 时段的增强因子,它包括地形触发、抬升、缩窄、水汽障碍等综合影响; $\bar{R}_{\Delta t}(x, y)$ 为暴雨行进路径上某一山地空间点 (x, y) Δt 时段实测雨量极值的多年平均值; $\bar{R}_{0\Delta t}$ 为暴雨行进路径上不受地形影响的 Δt 时段多年平均实测雨量极值,往往在水汽入流方向上平坦的滨河或滨海地区选取站点,同时为了减少单站计算误差,在资料允许的条件下选取几个站的平均值。

某点 (x, y) 上 Δt 时段的暴雨辐合雨分量为:

$$\bar{R}_{0\Delta t} \approx \frac{R_{\Delta t}(x, y)}{\bar{f}_{\Delta t}(x, y)} \quad (10)$$

式中: $\bar{R}_{0\Delta t}(x, y)$ 为 Δt 时段 (x, y) 点暴雨辐合分量; $R_{\Delta t}(x, y)$ 为 Δt 时段 (x, y) 点实际暴雨量; $\bar{f}_{\Delta t}(x, y)$ 为 (x, y) 点上, Δt 时段内平均地形增强因子。

根据对流域面积、形状及流域内雨量站数量的分析,构建较为密集的网格进行计算,以便覆盖整个流域。所以,某流域 Δt 时段内的流域平均PMP是:

$$PMP_{\Delta t, A} = \frac{1}{m \times n - k} \sum_i^m \sum_j^n PMP_{0, \Delta t}(x_i, y_j) \bar{f}_{\Delta t}(x_i, y_j) \quad (11)$$

式中: $PMP_{0, \Delta t}(x_i, y_j)$ 为当PMP发生时,在 (x, y) 点上 Δt 时段的PMP辐合分量; $\bar{f}_{\Delta t}(x_i, y_j)$ 为设计地 Δt 时段平均地形增强因子; m 和 n 分别为 x 和 y 方向上计算总格点数; k 为位于流域外格点数,此时 $PMP_{0, \Delta t}(x_i, y_j) = 0$ 。

该法建立在综合考虑暴雨天气分析、研究区和移置区雨量统计特性和地形影响等基础上。应用SDOIF暴雨分割技术进行暴雨移置,不仅可以推估研究区暴雨中心地带的PMP估计值,也可以推估PMP的空间分布形态,即PMP估值等雨量线。目前,该法被WMO收录^[2],林炳章^[23]、张叶晖^[52]、Yam^[53]等也利用该法对莫拉克台风暴雨进行分割并移置到香港估算24 h PMP。林炳章、张叶晖等人的研究表明^[23, 52-53],阿里山地形对莫拉克台风暴雨中心区的增幅约为45%,如图1所示。同时,在分析我国东南沿海台风路径以及台风暴雨天气背景的基础上,认为分割后的莫拉克台风暴雨辐合分量移置范围将覆盖我国东南沿海地区。

3.2 短历时PMP估算方法 高风险水库工程、重大工程防洪排涝、核电厂厂址^[54]和城市防洪^[55-56]等有时需要推求短历时PMP。对于短历时,并无严格定义,水文上有时将小于24 h的PMP称为短历时PMP^[57]。目前,推求短历时PMP尚未形成成熟系统的方法。但是统计估算法^[58]、概化估算法^[34, 55, 59-60],暴雨移置^[23]等传统PMP估算方法不受流域面积和历时长短的限制,只要特大短历时暴雨资料丰富,就能用于推求短历时PMP。需注意,典型暴雨资料收集时,除考虑台风暴雨个例,还应考虑低压槽、强对流等暴雨个例,而且不在规范规定的观测时段的短历时历史资料(如4 h、5 h等)非常难获得。所以,估算短历时PMP,面临的最大困难是资料的有效性和充分性。此外,当进行水汽放大,由于估算历时较短,在选取地面代表性露点温度时,需要从成因分析上进一步研究比较持续最大12 h露点与持续最大6 h露点计算大气可降水量的差别及其合理性。

3.3 PMP估算的不确定性研究 PMP是特定地区、特定时段内可能的降水上限。实际应用时,设计人员不是用公式直接计算得到唯一的PMP理论值,而是通过一系列的客观判断方法逐步推导得到PMP估计值。最后从工程设计需要,对其进行成果合理性分析^[2, 7],包括与本地或邻近的实测大暴雨比较;与本地或邻近的PMP估算案例比较;与世界实测最大降雨量比较等。受降雨机制本身的复杂多变性,数据的不足,估算方法的不同以及设计人员对未来认知能力的限制、主观判断的影响等,

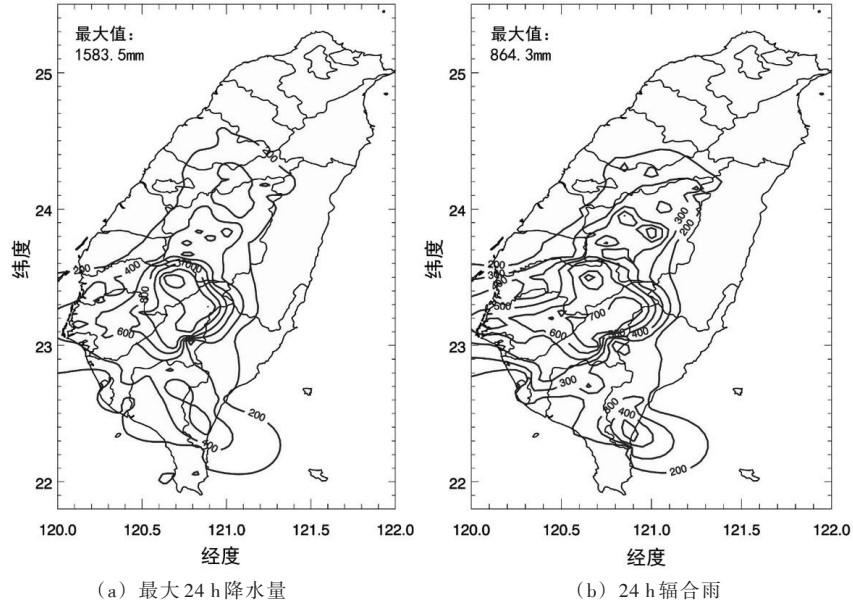


图1 莫拉克台风期间最大24 h降雨等值线和去除地形影响后的辐合雨等值线

PMP估计值肯定比自然界实际的降雨上限或PMP理论值偏小，PMP估算显然存在不确定性^[61]。近年来，研究人员尝试从科学研究的角度对PMP估算进行不确定分析，从以下两方面阐述。

3.3.1 统计估算法不确定性分析 统计估算法本身作为一种统计分析方法，其不确定性主要由样本序列的长度和样本中有无特大值引起。当然地区的差异性，有效站点数也会有影响。Abhishek^[62]研究发现若按照WMO估算手册^[2]给出的外包线对 K_m 取值所得到的结果，比用当地 K_m 值重新建立外包关系后取值的结果大。Salas^[63]等根据样本均值和标准差的不确定性，建立了PMP的计算公式：

$$\widehat{P}_d = E(\widehat{P}) \pm c \times \sigma(\widehat{P}) \quad (12)$$

式中： $\widehat{P}_d$ 为PMP的设计值； $E(\widehat{P})$ 为PMP的期望值， $E(\widehat{P}) = E(\bar{X}_n) + K \times E(S_n)$ ； $\sigma(\widehat{P})$ 为PMP的标准差，由方差 $\text{Var}(\widehat{P}) = \text{Var}(\bar{X}_n) + K^2 \text{Var}(S_n) + 2K\text{Cov}(\bar{X}_n, S_n)$ 计算而来，与年降水序列的分布形态有关； c 为一个常数，一般取 $c > 1$ 。

从式(12)可以得到PMP取值范围的概率 P ：

$$P[E(\widehat{P}) - c\sigma(\widehat{P}) < \widehat{P} < E(\widehat{P}) + c\sigma(\widehat{P})] \geq 1 - \frac{1}{c^2} \quad (13)$$

因为式(13)中的常数 c 是一个经验值， c 越大， P 越大。但 c 无法合理推估，由此推估的PMP估值的不确定性也相应增加了。

3.3.2 水文气象法不确定性分析 PMP估计值的不确定性由极端强降雨事件、湿度、暴雨效率、风速、地形等引起。比如，在应用SDOIF^[50]时，基准站选取的不同，OIF(地形增强因子)值就不同，从而分割一场暴雨的辐合分量和地形分量也不同；选取的暴雨样本影响辐合雨分量的设计模式。可降水量是估算PMP一个重要的中间量。Chen和Bradley^[64]认为，在水汽放大假绝热的假定条件下，利用美国中部地区历史最大持续12 h露点和典型暴雨持续12 h露点计算出的历史可能最大可降水量和典型暴雨的最大可降水量结果偏大，最终导致PMP值比用幂指数湿度廓线的计算结果平均高估计约为6.9%。他们建立了一个描述露点和可降水量关系的经验公式(式(14))，用于计算可降水量，计算结果更接近于实际。

$$W_m(T_{dm}) = 14.38e^{0.058T_{dm}} \quad (14)$$

式中： W_m 为历史可能最大可降水量； T_{dm} 为历史最大1 000 hPa等压面持续12 h露点温度。陈宏等^[65]研究发现假绝热法推求的可降水量偏大，需进行纬度订正：

$$y = 59.9 \ln(x) + 200.7 \quad (15)$$

式中： y 为相对误差； x 为纬度。

Micovic^[61]等以 La Joie 大坝 24 h PMP 估算为例，根据 5 个影响 PMP 估算结果并彼此相互独立的主要因子，即典型暴雨 24 h 最大雨量、水汽放大因子、水平移置因子、暴雨效率和暴雨中心，建立了一个考虑不确定性因素的 PMP 估计方程：

$$PMP_{24} = P_{24C} \times FMM \times FMHT \times FSC \times FSE \quad (16)$$

式中： PMP_{24} 为通过水文气象分析得到的 24 h PMP 估计值； P_{24C} 为典型暴雨 24 h 最大雨量； FMM 为影响水汽放大和地面露点的因子； $FMHT$ 为把典型暴雨移置到研究区域的水平位移因子； FSC 为形成流域最大面平均雨量的暴雨中心； FSE 为暴雨效率。

每一个影响因子都用一个似然函数分布进行描述，用蒙特卡洛方法模拟后表明：影响 PMP 最重要的因素是暴雨效率和水汽放大因子。

3.4 气候变化对 PMP 估算的影响 澳大利亚是最早开展气候变化对 PMP 估算影响的国家^[66]。他们认为评估气候变化对 PMP 的影响，需考虑有效水汽、雨深-面积关系、暴雨类型等因素，同时由于 PMP 估算方法与一些极端降雨事件有关，因此还要考虑实测极值雨量和预测极值雨量的变化^[66]。目前，气候变化对 PMP 估算的影响主要研究思路是利用不同的气候模式如加拿大区域气候模式^[67-69]、IPCC RCP 8.5 情景模拟^[70-72]、全球气候模型 Had CM3 和 CGCM3^[66]等的输出结果，包括气温、露点温度、风速、可降水量、降水量等，再带入水汽放大法、统计估算法等进行具体分析。这一研究思路被澳大利亚、加拿大、美国、韩国等国家所采用^[66-73]。Choi 等^[74]还利用统计方法对 30 年滑动均值序列和累加平均两种数据对 1 d 的 PMP 进行分析。AECOM 和林炳章^[23]等从 SST 与露点温度上限的关系出发，发现 SST 升高并未导致露点温度上限的明显增加。已有研究表明，大部分学者认为在气候变化的条件下，PMP 大小会有不同程度的增加。但是，澳大利亚学者认为尚不能完全明确气候变暖下，降雨将如何变化，因此并不能确定 PMP 的大小会增加。中国学者认为气候变化可能会引起 SST 升高，然后可能改变露点温度的上限，从而影响到大气可降水量。同时气候变化引起极端水文气象事件的增多，这就增加了可供移置的暴雨样本数^[23]，例如 2009 年以前的东亚 PMP 估算就无法想象会有莫拉克台风这类特大暴雨出现可供选择。

3.5 PMP 的概率 目前对 PMP 的概率有以下 4 种观点：(1)我国 1979 年版的《水利水电工程设计洪水计算规范》第 32 条指出：“根据频率计算成果分析选定可能最大洪水时，采用值不得小于万年一遇洪水数值”^[75]，即把 PMP/PMF 与频率计算的万年一遇相联系；希腊学者 Koutsoyiannis 认为 PMP 相当于 60 000 年一遇的降水事件^[18]。(2)1986 年，美国联邦政府成立了“PMF 风险分析工作小组”，探讨 PMF 的概率可行性问题，结论是：“至今仍然没有一种办法能够赋予 PMF 一个可靠、一致、可信的概率”^[76]。(3)从纯数理统计观点来看，PMP 是降雨的物理上限^[77]，则有：

$$P(P \geq PMP) = 0 \quad (17)$$

式中： P 为等于、大于 PMP 的降雨事件，即 PMP 的概率应为 0。本文也认同此观点。(4)林炳章^[78-79]

认为 PMP 的概率就是“如何确定频率密度函数积分上限 b ”， $P(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = \int_a^b f(x)dx = 1$ 。研究发现，频率分布曲线上端“沿着某一未知的渐近线逐渐收敛于某一未知值。分布曲线上端的这一形态变化说明频率估计值存在上限。”这一新发现为探索频率估计值与 PMP 估算的统一提供了新的研究方向。

4 结论与展望

(1)经过 80 多年的发展，传统 PMP 估算方法在理论和方法上已经比较成熟和完善。目前国际上 PMP 估算实践中常用的 4 种方法是：水汽放大法、暴雨移置法、时-面-深曲线法和统计估算法，最常用且比较合理的方法是暴雨移置法，SDOIF 法为山区暴雨移置扩展了移置范围。工程设计实践往

往是几种方法综合应用,即暴雨移置后,通过水汽放大校正,D-A-D曲线提供地区暴雨的点-面和历时-雨深的外包曲线。此外,暴雨模式法、数值模拟法、多重分形法等为PMP估算开辟了新的研究思路。(2)现有山区暴雨移置方法基本是半经验半理论的,没有根本性涉及地形影响降雨的物理机制。未来或许有可能借助气象领域在该方向研究进展,尝试建立具有物理机理的方法估算山区PMP。但是,在这之前的一段时间内,半理论半经验的暴雨移置技术仍将是主流方法,因为目前数值降雨模式中缺乏有效反映地形、地貌的参数,定量考虑地形对模式的反馈作用仍然比较困难。(3)对于短历时PMP估算,未来随着观测资料时间分辨率提高,逐分钟、逐小时雨量资料的普及利用,可供研究的短历时降雨个例随之增加,从而使估算更直接有效。(4)PMP估算方法的不确定性导致PMP估算成果不是一个确定的单值,而是一个区间值。从工程实践的角度,如何得到一个合理的PMP结果就非常重要。(5)气候变化对PMP估算的影响以及PMP的概率,是目前国际工程水文学学术界的两大热门话题。现有研究表明,尚不能完全确定PMP的估值在气候变化的情况下会增加。相信随着气候模式的不断改进、可利用数据类型的增加以及对影响PMP估算因子更加深入地认识,能更加科学的分析气候变化对PMP的影响。对PMP概率而言,利用频率分析计算与PMP估算的互补性,若能用实际资料分析、证明频率估计值上端是收敛、有限的,那么就可以定量的方式验证PMP估计值的合理性。

总的来说,PMP是为重大水利工程安全设计和重要滨河与滨海城市的防洪规划服务的,PMP是个工程设计标准问题,不是一个简单的理论分析问题。工程设计讲究现实,在研究区附近历史上出现一个特大暴雨是一个事实,接下去的问题是:今后会不会再出现类似的暴雨,有没有可能更大?依据是什么,这就是设计暴雨研究中作为水文气象途径的PMP估算要回答的问题。PMP估算要求估算方法概念清楚,参数有明确的物理意义并能从实测资料中分析获得,计算过程不能有过多假定,PMP估算成果具有可比性,符合常识和经验范围。就目前现状及可预见的未来,暴雨移置加移置修正和调整,包括移置水汽放大和辐合雨方位调整,仍是一条比较可行的PMP估算途径;此外,在资料允许的条件下,统计估算法可以快速提供PMP点估计值供参考。其它估算尝试,包括数值模式、多重分析法等,由于缺乏物理概念的分析、计算参数的不确定性、资料不足,尤其是无法用实际资料进行验证,都无法得到工程界的认可,还需做更多研究。

参 考 文 献:

- [1] LUTHER H H, REICHELDERFER F W . Generalized estimates of probable maximum precipitation for the United States West of the 105th Meridian for areas to 400 square miles and durations to 24 hours[R] . Technical paper No. 38, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D. C., 1961 .
- [2] WMO (World Meteorological Organization). Manual for estimation of probable maximum precipitation[M] . Geneva, 2009 .
- [3] 郭生练,刘长军,熊立华.设计洪水计算方法研究进展与评价[J].水利学报,2016,47(3):302-314.
- [4] 王国安.关于我国水库的防洪标准问题[J].水利学报,2002(12):22-25.
- [5] VANCE A M . The estimation of extreme precipitation as the basis for design floods resume of practice in the United States[J] . Floods and Their Computation, 1967(1): 84-104 .
- [6] DL/T 5409.3-2010,核电厂工程勘测技术规程第3部分:水文气象[S].北京:国家能源局,2010.
- [7] 王国安.可能最大暴雨和洪水计算原理与方法[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [8] 黄奕武,陈世倜.“莫拉克”在台湾引起的强降水会发生在香港吗?[J].天气预报技术总结专刊,2012,4(2):33-42.
- [9] IPCC . Climate change 2013: the physical science basis[M] . Cambridge: Cambridge University Press, 2013 .
- [10] 秦大河, THOMAS S, 等 . IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.
- [11] 王作述.可能最大暴雨的一个数值试验研究[J].河海大学学报,1988,3(16):81-87.
- [12] ABBS D J . A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maxi-

- imum precipitation[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 785–796.
- [13] DOUGLAS E M, BARROS P. Probable maximum precipitation estimation using multifractals: Application in the Eastern United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4: 1012–1024.
- [14] HERSHFIELD D M. Estimating the probable maximum precipitation[J]. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1961, 87(5): 99–106.
- [15] CHOW V T. A general formula for hydrologic frequency analysis[J]. *Transactions American Geophysical Union*, 1951, 32(2): 231–237.
- [16] HERSHFIELD D M. Method for estimating probable maximum precipitation[J]. *J. Am. Water Works Assoc.*, 1965, 57: 965–972.
- [17] KOUTSOYINANNIS D, PAPALEXIOU S M. Extreme rainfall: global perspective[M]//*Handbook of Applied Hydrology*. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill, 2016.
- [18] KOUTSOYINANNIS D. A probable view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(4): 1313–1322.
- [19] CASAS M C, RODRÍGUEZ R, NIETO, et al. The estimation of probable maximum precipitation: the case of Catalonia[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1146: 291–302.
- [20] 华家鹏, 黄勇, 杨惠, 等. 利用统计估算放大法推求可能最大暴雨[J]. *河海大学学报*, 2007, 35(3): 255–257.
- [21] 林炳章. 统计估算法在可能最大降水研究中的应用[J]. *河海大学学报*, 1981(1): 52–62.
- [22] LIN B Z, JOHN V. A new look at the statistical estimation of PMP[J]. *Engineering Hydrology*, 1993: 629–634.
- [23] AECOM Asia Company Limited, LIN B Z. 24-hour probable maximum precipitation updating study, GEO Report No. 314[R]. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, 2015.
- [24] LAN P, LIN B Z, ZHANG Y H, et al. Probable maximum precipitation estimation using the revised Km-value method in Hong Kong[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001517.
- [25] 梁忠民, 季俊杰, 卜慧, 等. 水汽风速放大计算可能最大暴雨方法[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 14–17.
- [26] U.S. Weather Bureau (USWB). Generalized estimates of maximum possible precipitation over the United States east of the 105th meridian for areas from 10, 200 and 500 square miles[R]. *Hydrometeorological Report No. 23*, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C., 1947.
- [27] LUTHER H H, REICHELDERFER F W. Generalized estimates of probable maximum precipitation and rainfall-frequency data for puerto rico and virgin islands for areas to 400 square miles, durations to 24 hours, and return periods from 1 to 100 years[R]. *Technical paper No. 42*, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D. C., 1961.
- [28] HANSEN E M, SCHREINER L C, MILLER J F. Application of probable maximum precipitation estimates, United States east of the 105th meridian[R]. *Hydrometeorological Report No. 52*, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, 1982.
- [29] 叶永毅, 胡明思. 关于中国可能最大暴雨等值线图编制中的几个问题[J]. *水利水电技术*, 1979(7): 11–19.
- [30] RAKHECHA P R, KENNEDY M R. A generalized technique for the estimation of probable maximum precipitation in India[J]. *Journal of Hydrology*, 1985, 78: 345–359.
- [31] RAKHECHA P R, MANDAL B N, KULKARNI A K, et al. Estimation of probable maximum precipitation for catchments in eastern India by a generalized method[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1995, 51: 67–74.
- [32] MINTY L J, MEIGHEN J, KENNEDY M R. Development of the generalized southeast Australia method for estimating probable maximum precipitation[R]. *Hydrological report series No.4*, Hydrometeorological Advisory Service, Bureau of Meteorology, Australia, 1996.
- [33] TAYLOR B F, MINTY L J, XUEREK K C, et al. Generalized probable maximum precipitation estimates for the Katherine River catchment to Katherine town[R]. *Hydrometeorological Advisory Service Report No: GPMP/16*,

- Bureau of Meteorology, Melbourne, 1998 .
- [34] Bureau of Meteorology . The estimation of probable maximum precipitation in Australia: generalised short-duration method[R] . Hydrometeorological Advisory Service, Australia, 2003 .
 - [35] WALLAND D, MEIGHEN J, XUEREK K, et al . Revision of the generalized tropical storm method for estimating probable maximum precipitation[R] . Hydrological report series No.8, Hydrometeorological Advisory Service, Bureau of Meteorology, Melbourne, 2003 .
 - [36] ABDULLAH A M, HASHIM A . Generalized long duration probable maximum precipitation (PMP) isohyet map for Peninsular Malaysia[J] . Journal of Spatial Hydrology, 2004, 4(1): 1-15 .
 - [37] SOLAIMANI K, ABKAR A, HABIBNEJAD M, et al . Analysis of depth-area-duration curves of rainfall in semi-arid and arid region using geostatistical methods case study: Sirjan Kafeh Namak watershed[J] . Pakistan Journal of Biological Sciences, 2006, 9 (9): 1764-1768 .
 - [38] KINGPAIBOON S, NETWONG T . Relation of probable maximum precipitation depth-area-duration using GIS [C]//24th Annual ESRI International User Conference, 2004 .
 - [39] COLLIER C G, HARDAKER P J . Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach[J] . Journal of Hydrology, 1996, 183: 277-306 .
 - [40] HARDAKER P J . Estimation of probable maximum precipitation (PMP) for the Evinos catchment in Greece using a storm model approach[J] . Meteorological Applications, 1996, 3(2): 137-145 .
 - [41] WIESNER C J . Hydrometeorology[M] . London: Chapman and Hall Ltd . , 1970 .
 - [42] NERC (Natural Environment Research Council). Flood studies report[M] . London: Natural Environment Research Council, 1975 .
 - [43] 邹进上, 刘慧兰, 涂蓉玲 . 应用水汽净输送法估算汉江上游秋季可能最大降水[J] . 华东水利学院学报, 1983(2): 51-61 .
 - [44] OHARA N, KAVVAS M L, KURE S, et al . Physically based estimation of maximum precipitation over American River Watershed, California[J] . Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(4): 351-361 .
 - [45] 刘俊杰 . WRF模式在可能最大降水估算中的应用探讨[D] . 南京: 南京信息工程大学, 2014 .
 - [46] ISHIDA K, KAVVAS M L, JANG S, et al . Physically based estimation of maximum precipitation over three watersheds in Northern California: atmospheric boundary condition shifting[J] . Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001026, 04014052 .
 - [47] ISHIDA K, KAVVAS M L, JANG S, et al . Physically based estimation of maximum precipitation over three watersheds in Northern California: relative humidity maximization method[J] . Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001175, 04015014 .
 - [48] 文迁, 谭国良, 罗嗣林 . 降水分布受地形影响的分析[J] . 水文, 1997(S1): 63-65 .
 - [49] HANSEN E M . Probable maximum precipitation for design floods in the United States[J] . Journal of Hydrology, 1987, 96: 267-278 .
 - [50] 林炳章 . 分时段地形增强因子法在山区 PMP 估算中的应用[J] . 河海大学学报, 1988, 16(3): 40-52 .
 - [51] LIN B Z . Application of the step-duration orographic intensification coefficient method to the estimation of orographic effects on rainfall[J] . Atmospheric Deposition (Proceedings of the Baltimore Symposium), 1989: 259-266 .
 - [52] 张叶晖, 陈宏, 兰平 . 莫拉克台风暴雨移置香港地区的 PMP 分析研究[J] . 水文, 2014, 34(5): 25-30 .
 - [53] YAM C F, LIN B Z, SUN H W, et al . Study of 24-hour probable maximum precipitation and associated landslide hazards for Hong Kong[J] . Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015, 2(28): 1040-1045 .
 - [54] 胡琳琳 . 浙江苍南核电厂可能最大暴雨研究[D] . 杭州: 浙江大学, 2013 .
 - [55] HKO (Hong Kong Observatory) . The 4-hour probable maximum precipitation for Hong Kong: an updating study [R] . Hong Kong Observatory, 2000 .
 - [56] CHING S S . Review of approaches, applications and updating 1-hour and 2-hour probable maximum precipitation (PMP) estimates for Hong Kong[D] . Hong Kong: The University of Hong Kong, 2015 .
 - [57] 华家鹏, 吴艳红, 苗艳红, 等 . 短历时可能最大暴雨的一种计算方法[J] . 水电能源科学, 2006, 24(6): 33-35 .

- [58] CASAS M C, RODRÍGUEZ R, PROHOM M, et al . Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain)[J] . International Journal of Climatology, 2011, 31(9): 1322–1327 .
- [59] THOMPSON C S, TOMLINSON A I . Probable maximum precipitation in New Zealand for small areas and short durations[J] . Journal of Hydrology, 1993, 31(2): 78–90 .
- [60] CHANG W L, HUI T W . Probable maximum precipitation for Hong Kong[Z] . Hong Kong: Hong Kong Observatory, 2001 .
- [61] MICOVIC Z, SCHAEFER M G, TAYLOR G H . Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates[J] . Journal of Hydrology, 2015, 521: 360–373 .
- [62] ABHISHEK S . Computation of probable maximum precipitation (PMP) and its uncertainty[D] . College Station: Texas A&M University, 2016 .
- [63] SALAS J, GAVILÁN G, SALAS F R, et al . Uncertainty of the PMP and PMF[M] . Handbook of Engineering Hydrology, 2014 .
- [64] CHEN L C, BRADLEY A A . Adequacy of using surface humidity to estimate atmospheric moisture availability for probable maximum precipitation [J] . Water Resources Research, 2006, 42, W09410, DOI: 10.1029/2005WR004469 .
- [65] 陈宏, 林炳章, 张叶晖 . PMP估算中大气可降水量计算方法的探讨[J] . 水文, 2014, 34(3): 1–4 .
- [66] Hydrometeorological Advisory Service Water Division . Hydrology report series, HRS report No. 12, climate change and probable maximum precipitation[R] . Australian Government Bureau of Meteorology, 2009 .
- [67] BEAUCHAMP J, LECONTE R, TRUDEL M, et al . Estimation of the summer–fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate[J] . Water Resources Research, 2011, 49: 3852–3862 .
- [68] ROUSSEAU A N, KLEIN I M, FREUDIGER D, et al . Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada[J] . Journal of Hydrology, 2014, 519: 3094–3109 .
- [69] ROUHANI H, LECONTE R . A novel method to estimate the maximization ratio of the Probable Maximum Precipitation (PMP) using regional climate model output[J] . Water Resources Research, 2016, 52(9): 7347–7365. DOI: 10.1002/2016WR018603 .
- [70] KUNKEL K E, KARL T R, EASTERLING D R, et al . Probable maximum precipitation and climate change[J] . Geophysical Research Letters, 2013, 40(7): 1402–1408 .
- [71] PARK M, PARK M, KIM S, et al . J . Extreme storm estimation by climate change using precipitable water[J] . Journal of Kosham, 2013, 13(1): 121–127 .
- [72] LEE O, KIM S . Future PMPs projection under future dew point temperature variation of RCP 8.5 climate change scenario[J] . Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2016, 16(2): 505–514 .
- [73] AFROOZ A H, AKBARI H, RAKHSHANDEHROO G R, et al . Climate change impact on probable maximum precipitation in Chenar–Rahdar river basin[J] . Watershed Management, 2015: 36–47 .
- [74] CHOI Y J, SIM K B, KIM S, et al . Trend analysis of 1-day probable maximum precipitation[J] . Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2015, 15(1): 369–375 .
- [75] 水利部, 电力工业部 . 水利水电工程设计洪水计算规范(SDJ 22-79(试行)) [M] . 北京: 水利出版社, 1980 .
- [76] Hydrology Subcommittee of the Interagency Advisory Committee on Water Data. Feasibility of assigning a probability to the probable maximum flood[R] . Office of Water Data Coordination, 1986 .
- [77] 王国安 . 中国设计洪水及标准问题[J] . 水利学报, 1991(4): 68–76 .
- [78] LIN B, BONNIN G M, MARTIN D L, et al . Regional frequency studies of annual extreme precipitation in the United States based on regional L-moments analysis[C]//EWRI Proceedings . Omaha, Nebraska, USA . 2006 .
- [79] 林炳章, 邵月红, 闫桂霞, 等 . 水文气象促进工程水文计算核心课题研究的发展[C]//中国水文科技新发展——2012中国水文学术讨论会论文集 . 南京: 河海大学出版社, 2012 .

(下转第 114 页)

Review of probable maximum precipitation estimation

LIN Bingzhang¹, LAN Ping², ZHANG Yehui¹, LIN Zhicheng¹, CHEN Xiaoyang¹

(1. *College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*

2. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*)

Abstract: Probable maximum precipitation (PMP) has been used to calculate the probable maximum flood (PMF) in design of important water conservancy and hydropower project, nuclear power project and urban flood prevention planning. A review of PMP estimation methods of statistical method, in-situ storm maximization, storm transposition and generalized method, storm model, numerical modeling, multifractals method, etc. are systematically stated. The frontier and hot issues of PMP estimation are briefly addressed in five topics, including the storm transposition in mountainous areas, short duration PMP estimation, uncertainties associated with PMP estimation, the impact of climate change on PMP and the probability of PMP. The research emphasis and directions of PMP estimation are discussed as well.

Keyword: Probable Maximum Precipitation (PMP); hydrometeorological approach; numerical modeling; short duration; uncertainties; climate change

(责任编辑: 韩 昆)