

# 我国面雨量研究及业务应用进展

高琦<sup>1, 2</sup> 徐明<sup>1</sup> 李武阶<sup>2, 3</sup> 彭涛<sup>1</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2 武汉中心气象台, 武汉 430074;

3 华中区域数值天气预报中心, 武汉 430074)

**摘要:** 面雨量是防汛部门在洪水预报与水库调度中一个非常重要的参数, 是洪水预报中最重要的预报对象。介绍了国内外水文气象学者在面雨量的插值与估算方法和面雨量预报方法方面的研究及业务实践进展, 为各地结合自身流域特点, 开展面雨量预报业务及研究提供参考。

**关键词:** 面雨量、估算方法、监测与预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.009

## Researches and Applications on Area Precipitation in China

Gao Qi<sup>1, 2</sup>, Xu Ming<sup>1</sup>, Li Wujie<sup>2, 3</sup>, Peng Tao<sup>1</sup>

(1 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074 3 Wuhan Regional Numerical Weather Prediction Centers, Wuhan 430074)

**Abstract:** Area precipitation is a very important parameter in flood forecasting and reservoir operation. It is also the most important forecast object in the flood forecast. This article introduces the researches and applications on interpolation, estimation and forecast methods of area precipitation in the researches by hydrometeorological scholars from at home and abroad.

**Keywords:** area precipitation, interpolation, estimation, forecast

### 1 引言

面雨量是一个经典的水文学概念, 它是指某一时段内一定面积上的平均雨量, 因其能够客观反映降水对确定流域的影响, 因而成为防汛部门分析水情、进行洪水预报的重要参数。准确的流域面雨量预报, 可为流域的防汛抗洪、水库调度及蓄水发电、城市供水、水资源科学利用等提供可靠的决策依据。关于面雨量的研究, 国内学者开展了一系列的工作。目前主要关注的是面雨量的插值与估算方法、面雨量分布及演变特征, 以及面雨量预报方法研究等几个方面。本文拟就面雨量研究的若干进展做简要综述, 为相关科研和业务人员提供参考。

### 2 依靠站点雨量数据计算面雨量的插值方法研究

目前水文气象业务中面雨量的计算主要依靠“点一面”转换来实现, 即: 利用一定的插值方法, 把流域内有限的气象、水文站的“点”雨量数据形成能够有效表征一段时间内流域降水整体水平的“面”

雨量数据。由于地面气象站的空间分布不均匀, 人们发展出了多种针对站点降水观测资料的空间插值方法来计算面雨量。简单的插值方法只根据待插值点(栅格中心)相对样本点(站点)的位置和样本值(雨量观测)来计算, 复杂的函数插值方法和统计插值方法还可以将高程、地形等影响降雨的因素考虑进来, 以改善插值效果。

常用的面雨量插值方法有泰森多边形法、算术平均法、等值线法、反距离加权法和逐步格点订正法等。算术平均法<sup>[1]</sup>, 算法简单易行, 但它只能在流域面积小, 流域内地形起伏不大, 且测站多而分布较均匀时采用。泰森多边形法<sup>[2]</sup>的优点是考虑到各雨量测站的权重, 且当测站固定不变时, 各测站的权重也不变, 而在以往的业务试验中存在无法根据站点变化自动更新站点权重的问题。徐晶等<sup>[3]</sup>通过解决了程序计算环绕各雨量站的多边形面积问题, 克服了这个技术难点, 实现了面雨量计算程序自动化, 能适应不同流域的站点变化。目前, 泰森多边形法是我国七大江河面雨量监测中规定使用的方法。反距离加权法<sup>[4]</sup>可以看作是泰森多边形插值法的一种拓展。它认为距离待估点越近的测站, 其贡献越大, 距离越远, 则贡献越小, 到了一定距离之外就没有贡献。这种插值方法在计算权重时可以取距离的一次方, 也可以取二次、多

收稿日期: 2013年10月8号; 修回日期: 2014年2月25日

第一作者: 高琦(1980—), Email: qiqi\_166@hotmail.com

资助信息: 公益性行业气象专项(GYHY201106003, GYHY201206028, GYHY201306059)

次幂, 距离幂次数越大, 距离的影响就越大。决定站点参与计算与否的距离半径越大, 插值结果越平滑, 反之变化越大。反距离加权法简单易行, 计算量小, 可自动化运行, 目前仍广泛应用于气象、水文业务中。等值线法<sup>[5]</sup>的思路是, 先根据流域内各测站实测的雨量资料绘出等雨量线, 然后用求积仪或其他方法求各相邻两等雨量线间的面积, 再分别乘以各相邻两等雨量线雨深的平均值, 即得该面积上的降水总量。等值线能反映降水的地区分布和地形对降水的影响, 但它要求流域内雨量测站多而且分布均匀, 而且每次降水过程中等雨量线的走向不同, 导致各相邻两等雨量线间的面积也不同, 这样使得绘算工作繁琐。因此应用受到限制, 适于分析较典型的致洪暴雨过程。逐步格点订正法, 包括Barnes客观分析法<sup>[6]</sup>和Cressman客观分析法<sup>[7]</sup>。采用迭代算法进行连续矫正, 通过每一步用插值得到的格点场来反算样本点的雨量, 再利用其与观测值的误差再用来矫正格点场的插值。该方法的缺点是涉及流域外资料, 计算较麻烦, 效果却不一定理想。目前, 美国国家气象局河流预报中心使用的插值方法除了算术平均、等雨量线分析、泰森多边形、距离加权法外, 还使用指标站法进行面雨量插值, 即在该国一些地区(主要是山区), 利用基于气候研究基础上预先确定的站权重来计算流域平均降水面雨量。此外, 面雨量的插值方法还包括细网格雨量法<sup>[8]</sup>、地理统计方法<sup>[9]</sup>以及基于函数插值的最优插值<sup>[10]</sup>和薄板平滑样条插值法<sup>[11]</sup>等。

文中提到的方法各有其优点, 同时也存在各自的局限性。面雨量计算的结果, 既受到插值方法的影响, 也受地形、台站分布及站网密度的制约。方慈安等<sup>[12]</sup>, 对利用泰森多边形法、逐步订正网格法、算术平均法计算的1998—2000年湖南省5个流域的面雨量进行了对比, 结果显示: 各种算法平均值的差异不大, 而逐日差异较大。李武阶等<sup>[13]</sup>利用算数平均法、泰森多边形法、等值线法对1960—1990年发生在三峡区间的60次降雨过程的面雨量进行计算, 结果表明: 选取同样站点的情况下, 泰森多边形法计算的面雨量较算术平均法及等值线法高; 同种方法计算的气象站点面雨量结果高于水文站点; 而在站网密度大的地区, 同一过程不同方法算出的面雨量差小。郁淑华<sup>[14]</sup>对比了等值线法、泰森多边形法及算术平均法计算的面雨量结果, 得到了气象上算术平均法接近等值线法, 因而优于泰森多边形法的结论, 同时算术平均法、泰森多边形法的计算结果比等值线法偏高。由于面雨量无法测得真值, 关于各种插值方法比较的试

验, 往往反映的是某特定流域特定时期的平均状况, 在实际工作中还应结合具体流域的实际情况、业务化可操作性以及水文服务的具体需求进行选择。

### 3 基于遥感新观测技术面雨量估算方法研究

国内外学者在100多年的历史中对面雨量估算技术做了大量的研究工作, 但如何准确估算面雨量始终是一个科学难题。随着气象学、数学、水文学、遥感等学科技术的发展, 流域面雨量的估算技术也有了长足的发展, 利用卫星、雷达等遥感技术估测降水和高密度自动气象站降水资料的结合应用, 已成为面雨量估算技术的主要趋势<sup>[15]</sup>。

近年来, 雷达、卫星等新观测手段越来越多地应用于降水监测和预报。如美国国家气象局河流预报中心利用MAPX网格技术, 即利用区域内4km×4km WSR-88D 雷达形成的1h降水估计产品基础上再通过算术平均法估算该区域面雨量。雷达、卫星估测降水的基本原理都是根据云团对电磁波的反射特征来推算云团的可降水量。由于电磁波的空间连续性, 用雷达、卫星可估算出高空间分辨率的降水场, 这是传统的雨量计观测所无法比拟的。但由于雷达、卫星是通过间接方式估算降水的, 按一定的关系式换算的结果与雨量计观测相比往往有较大的出入, 因此还需要与传统的常规观测相结合, 经过校正后才能成为符合实际情况的估计降水产品。具体做法可将雷达、卫星估计降水与地面雨量观测资料进行融合, 得到时空连续的面雨量分析场<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 基于雷达估算面雨量方法研究

雷达估计降水与雨量计观测资料进行融合的较直接的方法, 就是将雨量计降水和对对应位置的雷达像素反演降水的比率拟合合成曲面, 利用此曲面来修正整个雷达反演的降水场<sup>[17]</sup>。地理统计中的协同克里金方法是融合雷达估计降水和雨量计观测资料的另一常用方法<sup>[18]</sup>。此外还有其他各种模型, 如考虑了降水的持续性, 又可实时校正雷达估计降水应用的卡尔曼滤波模型<sup>[19]</sup>, 应用回归方法(包括一般线性回归、岭回归和稳健回归)的统计模型<sup>[20]</sup>, 并基于GIS开发的业务系统<sup>[21]</sup>, 以及针对所研究流域只被部分雨区覆盖时估算降水场的多变量统计模型<sup>[22]</sup>等。

雷达本身的探测误差以及不同的降水类型, 雷达气象方程中各参数的不同, 不同天气系统、不同地点, 都对对应着不同的Z-I关系(即反射因子—雨强关系), 使得利用雷达来估算降水在某些时候误差很大。国内许多学者及工程技术人员围绕相关问题展开了大量研究: 万玉发等<sup>[23]</sup>根据雨量计与其垂直上空雷

达的小时累计量之间存在的符合幂律的相关性，提出了一种基于准同雨团样本概念雷达与雨量计实时同步结合的降水估算新技术；戴铁丕等<sup>[24]</sup>利用平均校准方法校准雷达估测降水，并提出了“平均订正因子校准法”的新思路，这种方法具有简便、校准后区域总降水量较准确等优点；赵坤等<sup>[25]</sup>、李致家等<sup>[26]</sup>对传统卡尔曼滤波方法进行了改进，运用少量雨量计对雷达估测降水进行校正，并将处理的数据作为水文模型的输入，取得了较好的效果；刘晓阳等<sup>[27]</sup>用最优插值方法获得雷达雨量计联合估测的梅山水库集水区降水分布。

### 3.2 基于卫星估算面雨量方法研究

卫星估计降水是像素化的图像，因此原则上可直接用于面雨量的估算。但由于卫星对雨区识别的准确性较高，而对降水量估计的准确性较低，在用于面雨量估算时，一般需要经过地面观测资料订正或融合。在高原、海洋等地面雨量观测不足的地区，单纯用雨量观测修正也有困难。这时就有必要借助其他来源的资料，如数值预报产品作为第一猜测场，来进行资料融合。Grimes等<sup>[28]</sup>采用协同克里金方法结合卫星和地面观测资料进行面雨量计算；王登炎等<sup>[29]</sup>用变分法结合卫星估计降水和数值预报产品进行面雨量预报；师春香等<sup>[30]</sup>用人工神经网络方法，徐晶等<sup>[31]</sup>用最优化方法，刘洪鹏等<sup>[32]</sup>用反距离权重法，潘永地等<sup>[33]</sup>则利用气象卫星水汽通道资料修正地面观测资料的插值结果，再计算流域面雨量，以及直接利用卫星估计降水产品估算面雨量<sup>[34]</sup>的尝试，等等。这些工作为卫星估计降水资料用于面雨量的估算提供了多种行之有效的方法。

比较而言，卫星估计降水监测范围较广，适合于大范围降水场的估计，而地面雷达估计降水准确性较高，适合于中小流域。将两者的优势结合起来，联合卫星和雷达可对大流域的面雨量进行估算。例如我国“八五”期间所构建的利用雷达网和卫星联合估算长江流域大范围降水的LARORAS系统<sup>[35]</sup>，对防汛抗洪和大型水库工程建设具有重大应用价值；阿迈德·迪狄安·迪阿罗等<sup>[36]</sup>联合卫星和雷达重构淮河流域大范围的降水场，用精度更高的雷达估计降水来订正卫星估计降水，所得结果的精度高于单独使用卫星估算结果的精度；基于CINRAD和卫星的淮河流域致洪暴雨综合定量估测及预警系统<sup>[37]</sup>，在2003年淮河流域洪灾期间气象服务中取得明显效果。

随着遥感技术和计算技术的发展，综合运用地面气象站（特别是自动气象站）降水观测和卫星、雷达估测降水资料进行快速同化、融合得出降水场已成为

可能，这方面的研究越来越受到重视，具有广阔的业务应用前景。

## 4 模式预报降水(QPF)在洪水(面雨量)预报方面的应用

近些年来，随着观数值预报理论和方法的发展，数值预报正成为暴雨预报实现定点、定时和定量的科学手段，为水文模型预见期降水的预报提供了强有力的支撑。预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度，预见期愈长，预见期内的降雨对预报值影响愈大<sup>[38]</sup>。

面雨量是水文上重要的参数，是水文预报模型中最重要的预报对象，是一切洪水预报模型的输入场。李才媛等<sup>[39]</sup>、熊秋芬等<sup>[40]</sup>分别利用T213、MAPS模式产品进行面雨量预报，并对结果进行检验；朱红芳等<sup>[41]</sup>利用我国新一代数值预报模式GRAPES输出的降水预报制作了2005年7—9月淮河流域的面雨量预报，并对其与预报员制作的面雨量预报和面雨量实况进行了对比分析；张玉琴等<sup>[42]</sup>通过分析检验2007—2009年5—10月T213德国(Gem)日本(Jap)模式在雅砻江流域各区的面雨量，了解各模式在雅砻江流域的预报效果，再采用多元回归集成预报流域各区间的面雨量，在此基础上，将集成预报面雨量与二滩电站的入库流量进行分析比较。

尽管以上的研究已明显提高了洪水预报精度，但定量降水预报(QPF)精细化及准确率离水文预报的需求还是有较大的差距<sup>[43]</sup>。如在水文预报中，要求QPF的空间和时间分辨率分别达到10km和1h，QPF准确度也要达到10%以上，而目前的QPF还远没有达到这些要求。可喜的是这方面的研究工作目前已开始得到了相关学者的重视：刘勇等<sup>[44]</sup>充分利用降水量间统计分析的结果，通过在模型中引入坡度、坡向变量，对祁连山中东部地区降水量空间变化模式进行尺度下移，得到了该地区具有多尺度特性的高空间分辨率降水量的分析模型。此外，数值模式的自嵌套技术以及多模式的互嵌套技术开始用于提高模式空间分辨率<sup>[45-46]</sup>。

## 5 总结与展望

流域面雨量监测与预报业务是目前气象部门的业务工作之一，推进流域面雨量业务发展，一是要加强降水天气过程的机理研究，加深对天气系统之间的内在联系及演变规律的认识；二是通过增大观测密度，改善观测手段，提高面雨量检测的空间及时间精度，提供实时滚动面雨量监测产品，从而为洪峰预报提供第一手资料；三是加强对数值预报产品的开发及客观

释用技术, 提高定量降水预报产品的准确率及预报时效, 进而提高面雨量预报的准确性和时效; 四是结合洪峰及洪涝灾害对流域面雨量特征进行研究, 确定流域灾害面雨量临界值, 实现面雨量临界预警; 五是通过开展流域延伸期、中长期面雨量预报, 为流域水库调度、蓄水等决策提供参考; 六是进行流域面雨量检验方法研究工作, 以期建立起包含流域界定和选择的代表站、地理信息、面雨量计算、预报、检验评定、资料库、服务等内容组成的完整的面雨量预报业务系统, 也会把面雨量预报业务系统提高到一个更高水平, 为抵御特大洪水、防灾减灾提供更加优质的气象服务。

### 参考文献

- [1] 王铭才. 大气科学常用公式. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] Thiessen A H. Precipitation for large areas. *Monthly Weather Review*, 1911, 39: 1082-1084.
- [3] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. *气象*, 2001, 27(11): 13-16.
- [4] Bedient P B, Huber W C. *Hydrology and Floodplain Analysis* (2nd Ed). MA: Addison-Vesley Reading, 1992.
- [5] 丁一汇. 现代天气学中的诊断分析方法. 北京: 气象出版社, 1984.
- [6] Barnes S L. Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations. Norman: National Severe Storms Laboratory, NOAA Tech Memo ERL NSSL-62, OK 73069, 1973: 60.
- [7] Cressman G P. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 1959, 87: 367-374.
- [8] 单九生, 张瑛, 周建雄. 细网格推算流域面雨量方法应用浅析. *江西气象科技*, 2001, 24(2): 11-14.
- [9] Cressie N A C. *Statistics for Spatial Data* (Revised Edition). New York: J Wiley, 1993.
- [10] Pardo-Igúzquiza E. Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *Int J Climate*, 1998, 18: 1031-1047.
- [11] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall with thin plate smoothing splines-Part 1: Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2: 139-151.
- [12] 方慈安, 潘志祥, 叶成志, 等. 几种流域面雨量计算方法的比较. *气象*, 2003, 29(7): 23-26.
- [13] 李武阶, 王仁乔, 郑启松. 几种面雨量计算方法在气象和水文上的应用比较. *暴雨灾害*, 2000, 10: 62-67.
- [14] 郁淑华. 面雨量计算方法的比较分析. *四川气象*, 2001, 21(3): 3-5.
- [15] 徐晶, 姚学祥. 雨量估算技术综述. *气象*, 2007, 33(7): 15-21.
- [16] Collier C G. Development in radar and remote-sensing methods for measuring and forecasting rainfall. *Phil Tram R Soc Lord A*, 2002, 360: 1345-1361.
- [17] Wood S J, Jones D A, Moore R J. Static and dynamic calibration of radar data for hydrological use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2000, 4(4): 545-554.
- [18] Seo D J, Krajewski W T, Bowles D S. Stochastic interpolation of rainfall data from rain gauges and radar using Cokriging. 1. Design of experiments. *Water Resources Research*. 1990, 26(3): 469-477.
- [19] Pack E B. Space-time calibration of radar rainfall data. *App1 Statist*, 2001, 50: 221-241.
- [20] SoKol Z. The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. *Stud Geophys Geod*, 2003, 47: 587-604.
- [21] 何健, 王春林, 毛夏, 等. 利用雷达回波与GIS技术反演面雨量研究. *气象科技*, 2006, 34 (3): 336-339.
- [22] Seo D J. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. *Journal of Hydrology*, 1998, 208: 37-52.
- [23] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. *气象学报*, 2008(1): 262-273.
- [24] 戴铁丕, 傅德胜. 天气雷达一雨量计网联合探测区域降水量的精度. *南京气象学院学报*, 1990(4): 592-597.
- [25] 赵坤, 葛文忠, 李致家. 在雷达测雨和洪水预报中自适应卡尔曼滤波法的应用. *高原气象*, 2005(6): 956-965.
- [26] 李致家, 刘金涛, 葛文忠. 雷达估测降水与水文模型的耦合在洪水预报中的应用. *河海大学学报: 自然科学版*, 2004(6): 601-606.
- [27] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人. 雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量. *水利学报*, 2002(4): 51-55.
- [28] Grimes D I F, Pardo-Igúzquiza E, Bonifacio R. Optimal area rainfall estimation using rain gauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, 1999, 222: 93-108.
- [29] 王登炎, 李德俊, 金琪. 变分法和卫星云图模式识别在强降水面雨量预报中的应用. *气象*, 2003, 29 (3): 2 0-22.
- [30] 师春香, 卢乃锰, 张文建. 卫星面降水估计人工神经网络方法. *气候与环境研究*, 2001, 6: 467-471.
- [31] 徐晶, 毕宝贵. 卫星估计降水量产品的优化处理区检验. *气象*, 2005, 31(2): 27-31.
- [32] 刘洪鹏, 刘文. 省域卫星估测降水的资料融合技术及精度分析. *山东气象*, 2003, 23(4): 22-24.
- [33] 潘永地, 姚益平. 地面雨量计结合卫星水汽通道资料估算面降水量. *气象*, 2005, 30(9): 28-30.
- [34] 杨扬, 戚建国. 数字卫星云图估算面雨量的应用试验. *气象*, 1995, 21 (3): 35-39.
- [35] 万玉发, 张家国, 杨洪平, 等. 联合雷达网和卫星定量监测与预报长江流域大范围降水. *应用气象学报*, 1998, 9 (1): 94-103.
- [36] 阿迈德·迪狄安·迪阿罗, 刘晓阳, 毛节泰, 等. 卫星雷达联合重构大尺度流域降水场. *高原气象*, 2004, 23: 11-17.
- [37] 张爱民, 郑媛媛, 郑兰芝, 等. 基于CINRAD和卫星的淮河流域致洪暴雨综合定量估测及预警研究. *热带气象学报*, 2006, 22 (1): 96-100.
- [38] 崔春光, 彭涛, 殷志远, 等. 暴雨洪涝预报研究的若干进展. *气象科技进展*, 2011, 1(2): 32-37.
- [39] 李才媛, 宋清翠, 金琪. 短期强降水面雨量预报与T213产品的天气学释用. *气象*, 2003, 29(3): 27-31.
- [40] 熊秋芬, 王丽, 郑启松, 等. 三峡区间面雨量预报方法及其预报试验. *气象*, 2000, 26(10): 19-23.
- [41] 朱红芳, 王东勇, 朱鹏飞, 等. GRAPES模式在淮河流域面雨量预报中的应用. *气象*, 2007, 33(3): 76-82.
- [42] 张玉琴, 吴朝野, 何国平, 等. 基于数值预报产品的面雨量分析与检验. *高原山地气象研究*, 2011, 31(3): 60-64.
- [43] 宗志平, 代刊, 蒋星. 定量降水预报技术研究进展. *气象科技进展*, 2012, 2(5): 29-35.
- [44] 刘勇, 邹松兵. 祁连山地区高分辨率气温降水量分布模型. *兰州大学学报(s)*, 2006, 42(1): 7-12.
- [45] 沈愈. EOF迭代降尺度方案及其在华东梅汛期降水预测中的应用. *高原气象*, 2008, 27: 52-63.
- [46] 邓伟涛. 利用CAM-RegCM嵌套模式预测我国夏季降水异常. 南京: 南京信息工程大学, 2008.