

文章编号:1004-9045(2008)04-0373-05

雷达测雨及其在水文水资源中的应用研究进展

张利平^{1,2}, 赵志朋¹, 胡志芳¹, 殷志远²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074)

摘要:在回顾国内外雷达网建设和在水文水资源学中发挥重要作用的基础上,着重对国内外的雷达降水的估测算法、雷达临近降水预报和雷达测雨信息在水文模型中的应用研究进行了探讨和分析,并就未来雷达技术应用于水文水资源学的研究进行了展望。

关键词:雷达测雨;降水估算方法;临近降水预报;水文模型

中图分类号:P332.1 **文献标识码:**D

1 引言

降雨是径流模拟和洪水预报中最重要的信息之一,其时空变化严重影响洪峰流量和洪峰出现时间^[1]。通常情况下传统洪水监测预报依靠的降雨数据是通过分散布设在关键河道和集水区的雨量计站网获得的,而雨量计只能在点上精确测量降水,所代表的区域非常有限,不能反映降雨空间分布,要准确测量一个流域上的降水分布必须布设非常稠密的雨量站网,目前我国还不现实。雷达作为一种主动遥感手段可得到具有一定精度的、大范围高时空分辨率的实时降水信息,应用雷达进行降雨监测和面雨量计算,可以提高洪水预报的精度和时效性,在洪灾监测预报中有很好的应用前景,因此雷达在水文水资源学中的应用研究日益受到关注^[2-3]。本文在回顾国内外雷达网建设和在水文水资源学中发挥重要作用的基础上,着重对国内外的雷达降水的估测算法和雷达测雨信息在水文模型中的应用研究进行了探讨和分析,并就未来雷达技术应用于水文水资源学的研究进行了展望。

2 国内外雷达网建设历程

多普勒雷达自从 20 世纪 40 年代开始设计与发展起,有关其在水文气象中的应用也随之展开。英国天气雷达网自 20 世纪 70 年代开始兴建,在 80 年代迅速发展,1993 年基本达到目前的状态,由 13 部天气雷达组成的雷达监测网,以 5 min 间隔实时提供 2 km×2 km 分辨率的降水资料以及 30 min 一次基于雷达观测资料外推制作的 6 h 内逐时和累计降水预

报资料^[4]。20 世纪 60 年代前后,美国先后试验了多种多普勒天气雷达,如 JAL、AFGL、NSSL 等,20 世纪 80 年代后期开始建设新一代天气雷达网(NEXRAD),至 1997 年底已在全国安装了 165 部新雷达,覆盖了全美国。NEXRAD 以其先进的雷达技术,强有力的探测能力,丰富的雷达产品,快速的数据传输,友好的用户界面和从业务应用中获得巨大经济效益和社会效益而享誉世界^[5]。1993 年欧盟制定了一个发展高级天气雷达网的 5 年联合研究计划,即 COST75 行动,未来几年欧洲天气雷达仍然以发展 C 波段多普勒雷达为主,双 PRF 技术可能用脉冲压缩技术来代替^[6]。

我国从 20 世纪 60 年代开始布设天气雷达,经历了从信息模拟显示到信息数字化处理两个发展阶段,目前已经形成了由 S 波段、C 波段天气雷达为骨干,X 波段天气雷达为局部监测的天气雷达布局^[7]。从 2000 年起开始布设的中国新一代天气雷达网(CINRAD Network),将在全国范围内建设 158 部由 S 波段和 C 波段多普勒天气雷达,预计在 2008 年全部建成^[8]。届时将能够综合利用新一代天气雷达、气象卫星等多种遥感探测资料,开展水文气象学的研究,极大地增强洪涝灾害的监测预报能力。

3 国内外雷达降水的估测算法

天气雷达问世以来,估测降水一直是其主要目标。根据不同的研究目的和方向,雷达估测降水方法大致可分为两类:一是直接利用 Z-R 关系确定降水强度,估计降水分布;二是基于雨量计在点上的精确测量联合雷达估测降水强度。这些不同算法具有不同特

收稿日期:2008-02-28;定稿日期:2008-04-16

基金项目:国家自然科学基金(40675070)、科技部公益研究项目(2005DBI3J101)、湖北省科技攻关计划(2007AA301B57)、中国气象局武汉暴雨研究所开放基金共同资助

作者简介:张利平,男,1971 年生,副教授,主要从事水文气象学的研究与教学。E-mail:zlpwhu@sina.com

点,适合于不同天气系统和地域。主要包括:Z-R 关系法、平均校准法、卡尔曼滤波校准法、最优插值法、卡尔曼滤波、变分校准法和最优插值联合校准法等。

3.1 Z-R 关系法

这类方法是利用雷达回波的统计特征和降水直接建立关系。Marshall 和 Palmer^[6]用雷达研究降水,首次推得 Z-I 关系,并拟合获得了雨滴谱 M-P 分布。邢本清等^[7]应用染色滤纸法,采集不同降水类型雨滴谱资料,经统计得出 3 种不同雨型下的 Z-I 关系式,3 种 Z-I 关系式估算的郑州地区的雨强与实测雨量接近。王令等^[8]使用南昌 713-C 数字化雷达探测资料,经过大量雷达数据统计得出 Z-R 关系,对江西柘林水库库区降水的定量测量进行了研究。事实上,影响雷达定量测量降水的因素很多,许多学者除研究雨滴谱分布及 Z-R 关系外,还不断探索其他新技术。如 Doneaud 等^[9]的面积时间积分 ATI(Area Time Integral)求取降水总量的方法。Atlas^[10]和 Rosenfeld^[11]在 ATI 技术基础上利用概率配对方法 PMM(Probability Matching Method)求取随距离分布的气候 Z-R 关系,以及使用最优化函数确定参数。张家国等^[12]在三峡地区降水条件气候均匀区域划分的基础上,用 Atlas 一阶矩概率匹配法,分别在每一个区域建立了对流型、雷雨混合型、阵雨混合型 3 种雨型随测距变化的气候 Z-R 关系,这些关系能综合订正由波束平均作用、雨区对电磁波的衰减等因素所造成的雷达测量降水的误差。迟竹萍等^[13]运用最优化方法,按天气系统、降水过程计算层状云降水过程 Z-I 关系序列,并对泰山地区的雷达降水资料进行处理,然后用每组关系得到降雨雷达估计值,与雨量计实测值比较,结果表明降雨量的标准差和相对误差随分类详细而减小,提高了估计精度。刘娟等^[14]用最优化处理方法,按 dBz 值大小分组统计得到了淮河正阳关以上流域的 Z-R 关系的序列,然后利用该组关系对该区进行了定量测量降雨的试验。

3.2 平均校准法

Wilson^[15]早在上世纪 70 年代初就提出了利用平均校准方法校准雷达估测降水,结果比较理想,但遗憾的是降水分布场被平滑了。戴铁丕等^[16]在此基础上又提出了“平均订正因子校准法”的新思路,其基本思想

是在整个分析区域内只用一个校准因子 $F = \left(\sum_{i=1}^N G_i / Z_i \right) / N$,

其中 G_i 是地面雨量计测得的降水量通过 $Z=200R$ ^[16] 转化的 dBz 值,是未经订正的相应雷达回波的 dBz 值, N 是地面雨量计的个数。这种方法具有简便、校准后区域总降水量较准确等优点,但会使强弱降水中心平滑,导致降水分布场失真。

3.3 卡尔曼滤波校准法

20 世纪 90 年代初 Daley 明确指出伴随变分和卡尔曼滤波是大气数据同化的未来发展方向。1976 年 Cain 等^[17]在雨量计标定雷达估计区域降水量中,首次用统计方法分析 G/R 序列,认为其对数序列服从正态分布,并用模拟的方法进行了测试。Ahnert 等^[18]在为美国下一代天气雷达(NEXRAD)设计降水处理系统(PPS)时认为,用雷达数据定量测量降水时,不管怎样努力去保持高水准的数据精度,仍会存在误差,其产生误差的原因很多,在雷达估测降水中有时会产生均匀的倍乘偏差,假定该偏差服从“随机行走过程”,就可用离散的卡尔曼滤波来消除。Hudlow 等^[19]也有类似论述。Ahnert 等^[20-21]用数值模拟方法首次验证了卡尔曼滤波法测量降水的有效性和稳定性,认为与简单计算 G/R 相比,卡尔曼滤波法有以下优势:当更新平均偏差场时卡尔曼滤波考虑了测量噪声;在计算偏差时可提供估算误差;可避免 G/R 的不稳定性;可对未来 1 h 作降水预报。O'Bannon 等^[22]用 Oklahoma 冬季实际降水资料对美国 NEXRAD 降水子系统进行测试,了解卡尔曼滤波某些参数值设置对降水测量精度的影响。Smith 等^[23]和 Dah-Syang 等^[24]在上述工作基础上对卡尔曼滤波测量降水进行了改进和完善,其特点是既能保证一定的精度又能满足实时处理的要求。尹忠海等^[25]根据卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量的原理,利用野外观测资料对 2002 年 6 月 22 日的一次降水过程进行试验研究,结果表明卡尔曼滤波校准方法能提高雷达定量估算区域降水量的精度,并能较好地反映雷达探测到的精细降水场结构,验证了随着观测次数的增加卡尔曼滤波校准方法估算降水量的精度越来越高。该研究不足之处是卡尔曼滤波校准法试验过程中如何对参数进行实时计算没有考虑。赵坤等^[26]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,结合新安江水文模型和 GAME/HUBEX 项目 1998 年在史灌河流域观测的水文资料,对灌河流域的一次洪水过程进行预报,取得较好的结果。李致家等^[27]利用卡尔曼滤波方法对雷达估测降雨数据进行处理,并将处理的数据作为水文模型的输入数据。

3.4 最优插值法

1968 年 Gandin 提出了最优插值法,它是一种用统计方法在均方差最小意义下的最优线性插值,避免了一般加权方案的任意性。依照最优插值的基本原理,以回波为初值场,在有站点的地方对真值场进行取样,以此作为地面雨量站测得的降水量,将之对初值场订正,得到最优订正场。李建通等^[28]最先将该法引

进雷达测雨领域,并通过数值模拟和实测资料分析证明了该方法在测定区域降水量方面的较好效果,此法对雨量计站的密度和分布要求较低,计算处理也比较简单。随后,李建通^[29]提出采用一种自适应的相关函数模型来提高该方法的测量精度,并用厦门1996—1997年收集的113个时次的雷达和雨量计资料进行了计算检验。刘晓阳等^[30]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。

3.5 卡尔曼滤波-最优插值联合校准法

该校准法是卡尔曼滤波和最优插值联合应用的一种方法。何宇翔等^[31]将黄河、淮河洪水暴雨监测预报系统降水估测模式得出的规则网格点上的降水与雨量计实测值进行比较,结果表明将地面雨量计值作为真值,用联合校准法得出的降水量计算精度最高。

3.6 变分校准法

该方法是求出每个网格点上的校准因子,是一种比线性加权内插更好的方法。Ninomiya等运用变分法原理,使用雷达和雨量计观测资料做暴雨客观分析,结果令人满意。之后,变分法被我国气象学者广泛应用于校准雷达定量估测降水,取得了大量研究成果。

4 雷达临近降雨预报研究

由于不能有效地预报对流云的演变,降水的短期预报技术和精度还远远满足不了洪水预报作业的要求,因此世界许多国家和地区都开发了雷达临近预报系统,用于预报未来几个小时的降水。

美国NCAR的AUTO-NOWCAST系统利用雷达资料联合SCIT和TITAN两种方法,通过零度层亮带识别降低融雪和软雹的影响,预报风暴的增长,用TERC技术计算边界层风,用TITAN识别和外推风暴,并根据权重融合多种方法的结果得到最终的1h降水预报^[32]。由NSSL和Oklahoma大学合作开发的警报预测支持系统(WDSSII),采用K-means和多尺度分离技术识别不规则形状的回波块,以回波块作为模版,根据最小绝对平均误差进行回波匹配计算回波中心移动,用Cressman插值格点移速,利用数值预报分析结合卡尔曼滤波平滑回波移速,再用回波块平均值估计回波的增长/衰亡率,根据不同尺度的回波进行不同时段的外推预报^[5]。加拿大McGill大学开发的MAPLE系统根据一个由小波分析得到的最优预报滤波器,从雷达反射率因子拼图数据中跟踪回波变化,采用半拉格朗日平流方案预报降水率和降水区域,并对不同尺度的降水进行滤波处理^[33]。英国的自动化临近预报系统(NIMROD)先由雷达、卫星、地面资料和数值预报产品分析处理得到降水率,然后采用平流计算预报降水

量^[34-35]。法国利用雷达CAPPI拼图制作降水临近预报。考虑地物杂波的影响,在每个格点上设置可信度标记,取10、20、30dBz三个反射率阈值采用交叉相关动态计算雨团移速,然后通过时间连续性检查平滑雨团移速,在移速不变的假定下进行外推预报^[5]。澳大利亚的SPROG利用雷达资料探测的降水信息,根据不同天气系统的尺度特征估算降水区的变化,制作降水的临近预报。其不同尺度的降水场特征是由一个简单的自回归模型统计得到的^[36-37]。香港的小涡旋临近预报系统(SWIRLS)在TERC技术基础上,对移速作适当的平滑处理,进行回波块跟踪,由此计算回波的增长/衰亡率。基于平滑后的回波移速,采用半拉格朗日方案进行时间积分,制作每6min的回波预报。考虑粒子的下落速度,利用雷达和自动雨量计的同步观测进行配对估计降水率,根据降水率的时间变化理想模型进行降水的3h临近预报^[5]。

在国内,张沛源^[38]进行了多普勒雷达资料在强天气短时预报中的应用研究,提出了利用外推预报和相似预报两种短时预报方法的具体步骤。万玉发等^[39]利用数字化雷达拼图联合GMS-5卫星资料估算长江中游大范围降水,建立大范围降水实时监测自动化系统(LARORAS),进行6h的大范围降水短时预报。王改利等^[40]以天气雷达体积扫描的资料为基础,采用交叉相关法建立了一种对暴雨的临近预报方法。张亚萍、程明虎等^[41]在TREC技术基础上发展了一种利用雷达反射率差分图像的相关追踪回波运动方法,并用700hPa风场引导外推雷达回波强度,预报1h降水。

5 雷达测雨信息在水文模型中的应用

多年来许多学者在水文水资源研究中应用雷达降雨信息做了大量的研究工作^[42-46]。美国天气局在20世纪80年代建成了国家河流预报系统,同时将雨量站探测资料,卫星云图资料与雷达测雨资料相结合,产生用于水文预报的最优降水估算场的水文降水分析项目HRAP也开始实施,将天气预报与洪水预报相结合,发出警报预报,目前美国天气雷达估算降雨并用于水文预报的工作达到了全面业务化水平。英国国家河流管理局组织了天气雷达资料在洪水预报中应用的实验研究工作,认为雷达与雨量计结合估算降水对水文预报各预见期表现较好,稳定地达到或超过雨量计实测雨量的结果,尤其对小区域的改进更为突出。英国水文研究所建立了河流预报系统(RFFS)和水文雷达系统(HYRAD),其中HYRAD用实时雷达和雨量计资料计算流域面雨量,并进行未来2h的流域面平均雨量预报,将计算和预报数据存入RFFS数据库用于

河流预报。RFFS 与 HYRAD 共同组成了实时降水与河流预报系统,目前已经在泰晤士流域等几个洪水预报警报中心进行日常业务应用。

欧盟从 1999 年开始到 2004 年完成的 Cost-717 计划,具体任务是在时空范围内识别不同雷达测量结果的误差特点,检验其对水文模型的影响;提供在不同水文模型中对雷达测雨数据精度的不同需求;评价雷达数据和校正技术在水文模型中提供定量降雨预报的作用;研究什么样的降雨率预报适合水文模型输入;研究雷达资料如何才能提供与大气模型耦合的最佳方式等。这项计划为提高水文预报精度提供了许多有借鉴意义的建设性思路。

我国从 20 世纪 80 年代起开始研究雷达测雨,并取得很大进展,如北京大学和南京大学开展数字天气雷达用于淮河水系重点防洪地区的降水量定量测量和预报研究;长江水利委员会在国家“八五”科技攻关项目“长江防洪系统研究”中,也开展了类似的研究;黄河水利委员会把雷达测雨和中尺度数值天气预报用于黄河三花间的洪水预报中;刘晓阳等^[30,41]运用雷达和雨量计联合估测结果和概念性降水径流模型,对 1998、1999 年梅山水库入库流量进行了模拟,通过 1 500 h 时间序列的模拟实验表明,该模型可以用来模拟梅山水库的入库流量,其结果是合理可用的,与其单独采用雨量计测量面雨量的模拟方法相比,其模拟效果更好。此外运用雷达联合少量雨量计方法估测流域面雨量,结合 GAME/HUBEX 国际合作项目,1998 年加强观测期在史灌河流域获取的水文观测资料和 TOPMODEL 进行降水径流模拟,并与稠密雨量计站网测量的面雨量进行流域出口流量模拟的对比试验。在 1 500 h 时间序列的比较试验表明,雷达估测面雨量和雨量计测量的面雨量都能较好地模拟每小时流域出口蒋家集的出流量,数值试验还表明,雷达估测面雨量在某一时段上的均值误差作为一个指标可以较好地反映其应用于降水径流模拟时的精度;总雨量和强降水的估测精度是雷达估测面雨量能否用于径流模拟的关键。刘金涛等^[45]将雷达测雨技术、BP 神经网络技术引入流域洪水预报中,并建立基于分布式水文模型的洪水预报模型。将该实时预报模型应用于史灌河流域。从预报结果来看,该实时预报模型很好地解决了雷达遥感数据与水文模型的耦合,为在流域洪水预报中采用雷达测雨提供了先行的研究基础。李致家等^[27]尝试将雷达降雨数据作为水文模型的输入用于洪水预报中。流域面上的降雨分布是不均匀的,比较雨量计和雷达两种方式估测的降雨场分布,后者更接近于实际情况。从流域地形分布来看也证实了这一点。从

实时洪水预报的角度出发,选择进行校准雷达降雨的雨量站个数与水情部门采用的报讯站的个数接近。由于雷达估测的降雨数据为分布式的降雨数据,需要采用分布式的水文模型,结合淮河水系灌河流域蒋家集站进行洪水预报,预报结果表明,雷达测雨在洪水预报中具有广泛的应用前景。

6 展望

到目前为止,雷达测雨信息的水文水资源应用尽管还不能完全令人满意,但其应用技术已显示出巨大潜力,尤其是在中小流域和无资料地区,雷达测雨在水文应用中的优越性尤为明显。雷达测雨在水文学上的应用前景广阔,其测雨和预报精度的提高仍是其用于水文模拟的关键问题。为了更有效地解决雷达测雨中存在的问题,目前不少新的探测和资料处理技术正在研究和试验中。

相信未来在雷达测雨技术的支持下,联合地理信息系统,水文水资源学的研究将会不断深入,进入一个新的发展阶段,将能有效地提高灾害性洪水的监测预警能力,更好地为社会经济发展服务。

参考文献:

- [1] 魏林宏,郝振纯,邱绍伟.雷达测雨在水文学中的应用—影响预报精度的因素分析[J].水利水电技术,2004,35(5):1-4.
- [2] 杨扬,张建云,戚建国,等.雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J].水科学进展,2000,11(1):92-98.
- [3] 程明虎,刘黎平,张沛源,等.暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法[M].北京:气象出版社,2004.
- [4] 赵恒轩.九十年代天气雷达监测网建设与发展[J].成都气象学院学报,1999,14(3):252-260.
- [5] Marshall J S,Palmer W.The distribution of Raindrops with size[J].Meteor, 1948 (5):165-166.
- [6] 杨洪平,张沛源,程明虎,等.多普勒天气雷达短时预报技术研究进展[J].暴雨灾害,2007,26(2):184-190.
- [7] 邢本清,张素芬,牛淑贞.利用雨滴谱资料估算郑州地区雨强[J].河南气象,1998(3):8-9.
- [8] 王令,郭艳.数字化雷达定量测量柘林库区降水研究[J].江西气象科技,1999,22(3):21-22.
- [9] Doneaud A A,Stefano Ionescu-Niscov, Priegnitz D L. The area-time integral as an indicator for convective rain volumes [J]. J Appl Meteor,1984,23(4):555-561.
- [10] Atlas D, Rosenfeld D,Wolff D B. Climatologically turned reflectivity rain relations and links to area-time integrals [J].J Appl Meteor, 1990,29(11):1120-1135.
- [11] Rosenfeld D.Method to relate observed radar reflectivity to surface rainfall based on intensity distributions[C]. 25th Conference on Radar Met, 1991: 836-839.
- [12] 张家国,王佐兵,力梅,等.三峡地区气候 Z-R 关系[J].气象,1999, 25(3):44-48.
- [13] 迟竹萍,刘欣,陈金敏.春秋季节层状云降水过程 Z-I 关系计算与讨论

- [J].气象, 2000, 26(1): 35-37.
- [14] 刘娟,宋子忠,刘东风,等.分组 Z-I 关系及其在淮河流域雷达测雨中应用[J].气象科学, 1999, 19(2):213-220.
- [15] Wilson J W. Radar Measurement of rainfall summary[J].Bull Amer Soc,1979, 60(9): 1048-1058.
- [16] 戴铁丕,傅德胜. 天气雷达-雨量计网联合探测区域降水量的精度[J].南京气象学院学报,1990,13(4):592-597.
- [17] Cain D E, Smith P L. Operational Adjustment of Radar Estimated Rainfall with Gage Data: A Statistical Evaluation [C] . Preprints of 17th Radar Meteor Conf, Boston: AMS, 1976:533-538.
- [18] Ahnert P, Hudlow M, Johnson E, et al. Proposed on-site Precipitation Processing System for NEXRAD[C]. Preprints of 21st Radar Meteor Conf, Boston: AMS, 1983:378-385.
- [19] Hudlow M D, Greene D R, Ahnert P R, et al. Proposed Off-site Precipitation Processing System for NEXRAD[C]. Preprints of 21st Radar Meteor Conf, Boston: AMS, 1983:394-403.
- [20] Ahnert P R, Hudlow M D, Johnson E R. Validation of the on-site Precipitation Process system for NEXRAD [C]. Preprints of 22nd Radar Meteor Conf, Boston: AMS, 1984:192-201.
- [21] Ahnert P R, Krajewski W F, Johnson E R. Kalman Filter Estimation of Radar-rainfall Field Bias [C]. Preprints of 23rd Radar Meteor Conf, Snowmass: AMS, 1986:33-37.
- [22] O'Bannon T, Ahnert P. A Study of the Precipitation Processing System on a Winter-type Oklahoma Rainstorm[C].Preprints of 23rd Radar Meteorology Conf, Boston: AMS, 1986:99-102.
- [23] Smith J A, Krajewski W F. Estimation of the mean field bias of radar-rainfall estimates [J]. Journal of Applied Meteorology,1991,30: 397-412.
- [24] Dah-Syang Lin, Krajewski W F. Recursive Methods of Estimating Radar-rainfall Field Bias[C]. Preprints of 24th Radar Meteor Conf, Boston: AMS, 1987: 648-651.
- [25] 尹忠海,张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量[J].应用气象学报, 2005, 16(2):213-219.
- [26] 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[J].高原气象, 2005, 24(6):956-965.
- [27] 李致家,刘金涛,葛文忠. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(6):601-606.
- [28] 李建通,张培昌.最优插值法用于天气雷达测定区域降水量[J].台湾海峡,1996,15(3):255-259.
- [29] 李建通,杨维生.提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[J].大气科学,2000,24(2):263-270.
- [30] 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[J].水利学报, 2002,(4):51-55.
- [31] 何宇翔,张亚萍,刘术艳.天气雷达定量估测降水量不同方法效果评估[J].南京气象学院学报, 2004,27(6):743-752.
- [32] Muller C, Saxen T,Roberts R, et al. NCAR Auto-Nowcast system [J]. Weather and Forecasting, 2003,18:545-561.
- [33] Turner B J, Zawadzki I, Germann U. Predictability of precipitation from continental radar images part III: operational nowcasting implementation (MAPLE)[J]. Journal of Applied Meteorology,2004,43: 231-248.
- [34] Pierce E, Hardaker P J, Collier C G, et al. A system for generating automated nowcasts of convective precipitation [J]. Meteor Appl, 2000,7:341-360.
- [35] Golding W. Nimrod.A system for generating automated very short range forecasts[J]. Meteor Appl, 1998,5:1-16.
- [36] James W, Wilson, Elizabeth E Ebert, et al. Sydney 2000 forecast demonstration project: convective storm nowcasting[J]. Weather and Forecasting, 2004,19:131-150.
- [37] Pierce C E, Ebert E, Seed A W, et al, The nowcasting of precipitation during Sydney 2000: an appraisal of the QPF algorithms[J]. Weather and Forecasting, 2004,19:7-21.
- [38] 张沛源. 多普勒雷达资料在强天气短时预报中的应用 [C]. 第十一届亚运会气象保障研究论文集. 北京:气象出版社,1991:68-73.
- [39] 万玉发,张家国,杨洪平,等. 联合雷达网和卫星定量监测与长江流域大范围降水[J].应用气象学报,1998,9(1):94-103.
- [40] 王改利,刘黎平.多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J].气象, 2004,31(10):12-16.
- [41] 张亚萍,程明虎,夏文梅,等.天气雷达回波运动场估测及其在降水临近预报中的应用[J].气象学报,2006,64(5):631-646.
- [42] James W P,Robinson C G,Bell J F. Radar-assisted real-time flood forecasting[J]. J water Resour Plan Mgt,1993,119(1):32-44.
- [43] Bell V A,Moore R J. A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar date 2 Case studies[J].Hydro Earth Syst Sci,1998,2(2):278-283.
- [44] 刘晓阳,毛节泰,李纪人,等. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(03):342-349.
- [45] 刘金涛,李致家. 基于雷达测雨的实时洪水预报模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(5):488-491.
- [46] 魏林宏.时空尺度对洪水模拟的影响研究[D].南京:河海大学,2004.

An Overview of Precipitation Measured by Radar and Its Application on Hydrology and Water Resources

ZHAND Li-ping^{1,2}, ZHAO Zhi-peng¹, HU Zhi-fang¹, YIN Zhi-yuan²

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072;

2.Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074)

Abstract: In this article, the principle of precipitation measured by the weather radar was introduced briefly, the error in the measuring process and its causing factors were analyzed. The prospects and development of the application of precipitation measured by the weather radar in hydrology models were discussed on the basis of introducing the technology of the precipitation measuring by radar and the estimation methods.

Key words: Precipitation measured by radar; Estimation methods; Hydrology models