

85-906-06 课题组

国家科技攻关 85-906 项目  
台风、暴雨灾害性天气  
监测、预报技术研究

# 暴雨业务 预报方法和 技术研究

4479  
59  
13

气象出版社

国家科技攻关85-906项目

——台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究

# 暴雨业务预报方法和技术研究

85-906-06课题组

气象出版社

1991-08-15

(京)新登字046号

### 内 容 简 介

本书系国家“八五”重点科技攻关项目“台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究”(85-906)中“暴雨业务预报方法和技术研究”(85-906-06)课题的研究成果汇编。本课题着重研究了长江中上游、黄淮流域2天以内的暴雨业务预报方法和技术。全书共有30篇论文。内容包括探测、暴雨数值预报、暴雨人工智能预报、致洪暴雨预报、暴雨监测和预报人机交互工作站等五个方面的成果。

本书可供气象、水利、农林等部门的科技、业务人员和领导者阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

国家科技攻关85-906项目:台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究. —北京:气象出版社, 1996. 1

ISBN 7-5029-2064-1

I. 中… II. Ⅲ. ①中国气象局-科学研究-计划-项目  
②台风-天气预报③暴雨-天气预报 IV. ①G322.1②P457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第18635号

### 暴雨业务预报方法和技术研究

85-906-06课题组

责任编辑:顾仁俭 终审:纪乃晋

封面设计:严 晨 责任技编:席大光 责任校对:古 时

\* \* \*

气象出版社 出版

(北京海淀白石桥路46号 邮政编码:100081)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

\* \* \*

开本:787×1092 1/16 印张:12.875 字数:315千字

1996年1月第一版 1996年1月第一次印刷

印数:1~600 定价:20.00元

ISBN 7-5029-2064-1/P·0775

# 前 言

台风和暴雨是影响我国的两类主要重大灾害性天气,几乎每年都给我国国民经济建设和人民生命财产造成严重损失。据有关部门统计,随着我国经济的高速发展,自然灾害带来的损失也呈迅速上升的趋势,平均每年直接经济损失超过1000亿元人民币,死亡数千人。近几年中,洪涝灾害严重的1991年和1994年经济损失分别达1215亿元和1876亿元,其中台风和暴雨带来的洪涝等灾害损失最为严重。因此,加强对台风、暴雨灾害性天气监测、预报以及服务手段的研究,减轻台风、暴雨等气象灾害造成的损失,已成为各级政府和广大人民群众의迫切需求,成为气象科技发展的当务之急。

为此,1989年初,中国气象局、中国科学院和国家教委联合提出在“八五”期间开展台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究的申请,得到了国家科委和国家计委的高度重视和积极支持。经过两年多的组织准备,于1991年7月26~27日,由国家科委主持,对“项目可行性研究报告”进行了可行性论证。1991年10月16日,国家科委正式批准同意台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究项目列入“八五”国家科技攻关计划,编号为85-906。从此,代表国家水平的台风、暴雨攻关研究正式实施。

## 一、项目攻关的研究目标和内容

### 1. 攻关最终目标

研制东海、南海和长江、黄河流域防汛重要地域台风、暴雨灾害性天气的监测、预报技术,使我国台风、暴雨灾害性天气的预报水平在现有基础上有明显提高,达到或接近80年代中后期的国际先进水平。

### 2. 研究内容

(1)研究台风、暴雨的位置、强度和动向等关键监测技术和方法;

(2)研究台风、暴雨重大灾害性天气的监测资料、预报信息的快速、可靠的通信传输及数据处理技术和方法;

(3)研究台风发生发展、加强、运动和台风暴雨的物理成因、演变规律和定量预报方法,特别是研究台风在近海突然加强和路径突变、台风暴雨突然增幅的物理机制和诊断预报方法;

(4)研究我国黄河、长江流域防汛重要地域的暴雨发生发展规律、物理机制和客观预报方法;

(5)研究和完善全国、东海、南海和长江、黄河防汛重要地域的台风、暴雨的警报和服务系统,开展台风、暴雨灾情评估方法的研究。

根据上述研究内容,共设置10个课题,构成较为完整的系统。它们分别是:

01——台风、暴雨灾害性天气探测、数据采集技术的研究;

02——台风、暴雨灾害性天气信息通信传输技术和数据处理技术的研究;

03——台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究;

04——台风、暴雨数值预报新技术的研究;

05——台风及其灾害性天气业务预报方法的研究;

06——暴雨业务预报方法和技术研究;

- 07——台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究；
- 08——暴雨科学、业务试验和天气动力学理论的研究；
- 09——台风、暴雨预报、警报系统和灾害诊断评估预测技术方法及防灾对策研究；
- 10——台风、暴雨灾害性天气监测和服务系统的研制。

这10个课题分别根据其研究内容和研究任务，共分解为55个专题。

### 3. 项目(课题)“八五”考核目标

(1)完成以数字化气象雷达和气象卫星为主，配合其它遥感设备的台风、暴雨监测系统和通信传输系统所必需的一整套技术的研制，并在试验区对台风和暴雨进行有效监测，实现监测资料的快速和可靠传输，为台风、暴雨重大灾害性天气的预报提供及时和准确的信息。

(2)完成国家级和区域级以数值预报产品为基础的台风客观预报系统的研制，在具备业务运行条件时，使台风的预报时效提高到2~3天。

(3)上述系统的24小时和48小时台风预报、警报位置误差达到国际先进水平，使一般台风的24和48小时平均位置误差分别小于200和400公里。对台风路径突变，台风的突然加强和台风暴雨突然增幅具有一定的诊断和预警能力。

(4)完成国家级和区域级以数值预报产品为基础的暴雨客观预报系统的研制，在具备业务运行条件时，有能力发布24小时大范围暴雨概率警报和48小时暴雨概率预报，以及72小时大范围雨带的趋势预报。

(5)上述系统的24小时和48小时区域性暴雨预报的准确率(TS评分)，比目前提高10%~15%。

## 二、项目组织实施的主要经验

### 1. 明确指导思想，保证攻关研究与业务发展需求的紧密结合

科技攻关的根本宗旨是研究、攻克国民经济和社会发展中的重大或关键技术问题，促进科技成果转化现实的生产力。对本项目而言，就是攻克监测预测技术中的关键技术问题，建立和完善台风暴雨监测预报系统，提高业务监测、预报和服务能力，这是一项系统性工程，有着明确的应用目的。因此，从项目设立一开始就明确了以下攻关指导思想：

(1)注重项目的攻关目标、任务和进程与气象业务建设计划的协调，使本项目在促进气象业务发展的同时也能与其互为支持，互为依托。

(2)中央和地方科技攻关任务紧密结合，通过设立对台风、暴雨灾害影响较大的东南沿海和长江、黄河流域四个试验示范区域，争取地方政府的支持，推动攻关成果在重点地区的应用。

(3)重视台风、暴雨应用基础研究和技术开发研究相结合，确保在有一批攻关成果迅速投入业务应用的同时，为下一代业务系统的发展提供技术储备。

(4)积极发挥业务、科研、教育等部门的作用，充分调动中央和地方的积极性，大力组织协同攻关，在出成果的同时，出人才。

五年来，906攻关项目的全体科技人员正是按照这一指导思想进行攻关研究的，这是906攻关项目能够取得今天这样的成绩，能获得国家有关主管部门充分肯定的一个根本保证。

### 2. 加强组织管理，确保攻关任务顺利进行

为了保证科技攻关宗旨的实现，使攻关成果真正能转化为业务能力，906项目采用按科技内容分类为主，即课题、专题为主的组织方式，避免了研究内容和类似专题的重复设置，考虑了课题分解的科学性和系统性。为克服研究与需求脱节，实行了“双向合同制”，即专题既要开课

题负责,也要对主要应用的业务实体负责。在专题合同的签订中,规定必须明确成果应用单位,比较可靠地提供了研制成果向业务能力转化的途径。

为了使上述组织管理工作得到保证,确保攻关研究工作的整体性和系统性,中国气象局、中国科学院、国家教委三个组织部门联合采取了强化的组织措施。

(1)成立项目领导小组。由项目组织部门的领导和管理专家组成,负责与项目有关的重大问题的审批、监督、检查、成果验收、协调和决策,由中国气象局任组长,中科院和教委分别任副组长。设立项目攻关办公室负责与项目有关的日常管理,挂靠在中国气象局科教司,以便于与上级主管部门、地方以及攻关实施单位及时取得联系。

(2)设立项目技术组与项目攻关办公室。由课题负责人、国家和区域业务化实体的主持人和三大主持部门的专家组成技术组,以中国气象局科教司为主,中科院和教委派员参加组成攻关办公室。技术组与攻关办分别负责项目有关的技术工作和学术活动的计划、组织、检查、评估、鉴定、验收和协调等。

(3)根据国家计委、国家科委、财政部的《“八五”国家重点科技项目(攻关)计划管理办法》,国家科委的《“八五”国家科技攻关计划实施管理细则》并结合该项目的特点,制定了本项目的实施管理规定,从制度上给予保证。

### 3. 重视攻关研究成果的集成,形成攻关研究对业务发展的系统性贡献

加强攻关成果的集成,一直是906攻关项目领导小组十分重视的问题。为此,在攻关项目的课题设计中创造性地设立了10个课题,要求参与攻关的各有关业务单位,充分发挥现有现代化装备的作用,将攻关技术成果组装,适时投入业务试用,并在试用中进一步优化,以便尽快形成业务能力。在实施过程中,项目领导小组、技术组注意跟踪有重大潜力的攻关研究课题和专题的动态,认真分析和解决影响攻关成果集成和总装的难点,并在技术环境、资金调度和组织管理上给予重点支持,确保了重大攻关成果组装集成工作的顺利进行。通过五年的攻关,形成了以下五方面的集成性成果:

(1)形成比较现代化的探测与通信传输能力,并在1995年汛期进行业务性试验。

(2)形成不同层次,可以业务运行的台风、暴雨数值天气预报业务方案。该方案具有相当水平的预报能力。

(3)新一代的台风、暴雨预报系统与方法,其时间、空间与强度的预报结果均达到攻关规定标准。

(4)形成了一批经过现场试验、计算机模拟和分析归纳得到的新认识、新理论、新技术与新方法。

(5)建立了台风、暴雨灾害评价系统和资料库、对策方案及快速方便的现代化警报、预报服务手段。

### 4. 狠抓攻关成果的转化,努力提高业务应用能力

在906攻关项目实施的全过程中,项目组织部门和领导管理机构通过狠抓攻关研究与业务发展的结合,确保了重大攻关成果转化工作的顺利进行。从项目立项开始,中国气象局多次召开局长办公会,协调并研究解决如何加强攻关研究与业务发展的结合问题,较好地解决了多普勒天气雷达研制和台站使用、地基遥感系统的业务试用、分布式数据库在大中型工程项目中的采用,以及 VSAT 气象通信可行性试验与9210工程的结合等一系列问题,推动了攻关成果在“八五”业务建设和发展中的系统性应用。

除此之外,906攻关项目还在积极吸引地方经费配套支持攻关研究等方面也取得了很大的

成绩。通过这五年的攻关研究,一批攻关成果已经或将在国家和区域的台风、暴雨的监测、预报和服务业务中发挥作用,部分已经构成业务系统。

为便于成果的交流应用和相互借鉴,项目领导小组决定将这些成果汇编成册,分批出版。第一批成果按10个课题,分成10册出版。

在总结经验,肯定成绩的同时,我们也清醒地看到,在诸如台风疑难路径和暴雨的定量、定时、定点的预报等方面仍然有大量工作要做,国民经济建设和社会越发展,对减轻这类灾害造成的损失的需求就越迫切,要求将越高,还有更为艰巨的科技难关需要我们去攻坚。

展望未来,任重道远。希望各有关部门和单位以及广大气象科技人员发扬我国大气科学界团结协作的优良传统,在各级政府的大力支持下,在台风、暴雨等重大灾害性天气的监测、预报和服务工作中再创佳绩,为我国国民经济建设作出新贡献。

85-906项目领导小组组长

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '马鹤立' (Ma Heli) in a cursive style.

1995年9月19日

# 目 录

## 前言

联合雷达网和卫星监测长江流域大范围降水 .....	金鸿祥等(1)
暴雨云雨场的概念模型 .....	徐双柱(19)
江西暴雨预报的客观天气学模型和物理诊断模型研究 .....	曹晓岗等(25)
利用数值预报的输出产品改进暴雨的客观预报技术研究 .....	夏建国等(31)
区域性、持续性暴雨数值预报产品动力释用技术研究 .....	夏建国等(37)
暴雨数值预报产品库的研究 .....	陈爱琴(45)
数值预报产品在人机交互系统中的应用研究 .....	周家斌等(48)
暴雨数值预报产品的客观订正及 EPP 暴雨预报方法研究 .....	周全瑞等(51)
动力统计模型应用于三峡荆江暴雨落区的试验研究 .....	谢齐强等(58)
利用 ECMWF 数值产品作 24~72 小时暴雨预报的动力相似方法 .....	陈焱等(66)
安徽暴雨落区的动力统计模型研究 .....	张明玉等(72)
各类数值预报产品用于暴雨预报的性能之客观评估技术研究 .....	朱金元等(79)
长江上游人工智能预报暴雨自动化系统及其综合集成的研究 .....	汪之义等(84)
用“太极图”思想指导多输出神经网络的收敛 .....	何险峰等(91)
气象动态知识语言的设计与模拟 .....	赵昭忻等(96)
短期降水客观集成预报试验研究 .....	彭春华等(102)
暴雨预报客观评估技术研究 .....	林明智等(108)
暴雨预报方法的客观评估技术 .....	郑梨云等(114)
暴雨监测、预报人机交互工作站的研制和建立 .....	冯斌贤等(120)
DEC Station 5000/200 工作站软件的开发和应用 .....	周凤仙等(126)
致洪暴雨预报研究综述 .....	符长锋(129)
长江上游致洪暴雨综合预报方法 .....	郁淑华等(137)
长江上游致洪暴雨系统的概念模式 .....	郁淑华(141)
长江上游致洪暴雨环流形势的定量分析 .....	郁淑华(147)
荆江致洪暴雨预报服务系统 .....	郑启松等(153)
黄河三花间面雨量的计算和预报 .....	符长锋等(158)
淮河致洪暴雨业务化系统 .....	李国杰等(165)
淮河洪峰与致洪暴雨 .....	李国杰等(172)
淮河上游暴雨致洪的探讨 .....	郑永泉等(179)
信风与高原共同作用下的异常事件——副热带高压提早北跳 .....	林必元等(183)
后记	



# 联合雷达网和卫星监测长江流域大范围降水

金鸿祥 万玉发 张家国 罗建国 杨洪平 甘少明

赵军 袁誉常 沈欣 徐火平

(武汉中心气象台)

## 提 要

在吸取欧洲国际雷达网 COST-73 以及英国于 90 年代中期正在研制的 NIMROD 系统先进经验的基础上,根据我国实情,联合应用雷达网和卫星遥感资料为主要技术手段,初步研制成功长江中游大范围降水实时监测自动化系统 LARORAS。实现了鄂、湘、赣三省共 6 部数字化天气雷达实时拼图及其质量控制,结合 GMS 卫星定量估算 UDB 区域外的降水,以及由雷达网和卫星联合测估长江流域大范围降水累积量。可以预期,LARORAS 系统的出现将为改进长江中游水文气象服务、暴雨短时-短期天气预报,以及为迈向监测和数值预报两种系统的结合,创造了有利条件。

## 一、引 论

K. A. Browning (1994) 最近指出,近代天气预报技术的重大改进除得益于数值天气预报的进展外,某些改进则应归功于较新的和基于遥感技术观测系统的进步,主要为卫星、雷达(网)、风和温度廓线仪以及闪电定位系统。其应用可分为二类:一类用于改进数值天气预报的初始条件;另一类是综合各种探测数据组成显示工作站,成为预报员直接制作临近预报的工作平台。以较著名的系统而言,以预报降水为目标综合雷达、卫星的有英国的 FRONTIERS、加拿大的 RAINSAT 以及由其发展而来的西班牙的 SIRAM。

降水尤其是暴雨的时空变率极大,在分布上既有局地性又有广域性的显著特点。而广域的大雨和暴雨连绵横亘可达数十万至百万平方公里。我国夏季长江流域的梅雨和欧洲的锋面降水即为典型例子。暴雨是在大或次天气尺度背景场上生成中尺度天气系统的产物,常规天气测站的点测量是不能正确和详细描绘其时空分布和变化的。静止卫星纵然可一览天下,但云雨二者也存在巨大差别。用单部天气雷达可跟踪在约 20 万  $\text{km}^2$  内的强对流系统,预见期 3h 内。若要追踪其源地和探索其全部生命史,以及若更需要探测如梅雨那种大范围降水系统的整体,那么,实时雷达网就具有重大价值,其预见期可延伸至 12h (Wessels, 1991)。然而,再大的天气雷达网如欧洲 COST 73 (Collier, 1992) 也有范围限制,其西部大西洋的降水依然未知。因此,用雷达网和卫星结合的技术对于了解更大范围的降水具有重要价值,其预见期可延长至 24h 内。

雷达网是探测大范围降水的主要基石。日本是最早组成全国数字化天气雷达网的国家 (Collier, 1993)。美国则由于忙于建立新一代天气雷达,故全国大范围组网需等待至 90 年代中后期 (Walton, 1988)。英国是热衷于雷达组网的国家 (Ryder, 1987),随之而起还有法国 (Cheze, 1991) 等欧洲各国。由于利益一致,欧共体自 90 年代初开始共花 10 年时间依次执行了 COST-72 和 COST-73 科技合作项目 (Collier, 1992)。至 90 年代中期欧洲国际雷达网已拥有雷达百部之多,其成果和经验之丰富当为世界之首。我国武汉和上海区域气象中心在“七五”期间,也开始研究和初步建成了长江中游和下游区域的数字化天气雷达网络 (Jin, 1991; Gu, 1993),

从而填补了国内空白。

在 80 年代由英国以 Browning 为首的 FRONTIERS 系统和以 Golding 为首的中尺度数值预报系统,是独立分支的。但在 90 年代中期走上监测和数值预报相结合的道路,将发展成为一个新系统,称 NIMROD(Collier,1991),预期到 1997 完成。这将为短时天气预报的发展指明了一个前进方向。武汉中心气象台在“七五”研制成功的 MYWMS(Jin,1991,1993),是以 FRONTIERS(Conway,1988)的思路为借鉴。在“八五”期内,再吸收了 NIMROD 的思想,发展成为 LARORAS(Large Area Rainfall Observation in Real-time Automatic System)。它不仅扩大了雷达网的探测范围(从 2~6 部)和更新了系统结构,而且在联合雷达网和卫星测(量)和估(算)降水处理技术的定量和自动化,特别是在新产品的生成上有质的变化和较大发展,并向与数值预报相结合的道路迈出了第一步。

## 二、系统结构及特点

### (一)系统结构

图 1 为 LARORAS 系统结构框图。上方表示长江中游数字化天气雷达网(MYRAN)、静止气象卫星及常规气象观测三大数据源。中间为武汉区域中心已有的通信网络、天气工作站和分发服务系统。下方即为 LARORAS 中央站系统。它分为二部分,左侧为拼图前置处理机,称 LAROCC;右侧为云雨专用图象工作站,称 LAROWORK。两者都是双备份系统,全采用 WINDOWS 操作系统。

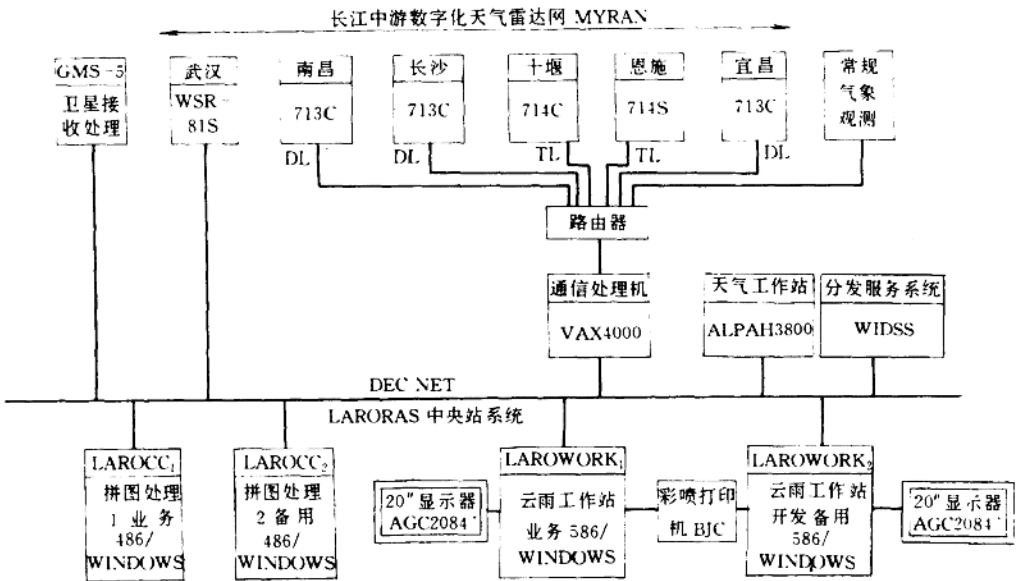


图 1 大范围降水实时监测自动化系统 LARORAS 结构图

(图中,DL 为专线;TL 为程控拨号线)

### (二)雷达网络组成及分布

#MYRAN 由武汉(WSR-81S)、宜昌(713C)、恩施(714S)、十堰(714C)、长沙(713C)和南昌(713C)共 6 部数字化天气雷达组成,见图 1。MYRAN 的天气监测范围约为长江中游流域的

1000000km<sup>2</sup>。为满足 24h 以内短时-短期天气预报的要求,卫星覆盖范围取长江上、中、下游区间(100°~125°E)流域约 3000000km<sup>2</sup> 之多的面积,可满足长江中游汛期暴雨洪水监测和预报的需要,也可为上、下游提供参考。

### (三)组网雷达的兼容性

目前世界上组网拼图的雷达可多至百部(COTS-73, Newsome, 1992; Wessels, 1991),自然会产生探测网中雷达数据的兼容性问题。其处理方法应区别二类问题而异:一是雷达常有不同的型号、性能和标定方法;二是存在不同的运行规程,涉及到诸如探测时间、高度、数据处理、产品及其格式等。

#### 1. 多型号雷达混合组网

MYRAN 是由 S 和 C 二种波段并由三个不同厂家(美国 EEC、成都和桂林厂)生产的多型号雷达组成。严格言之,各雷达的性能自有差别。理想的条件当然是最好用同一型号。但是,理论和实践表明,在一般情况下用多型号雷达组网拼图是能满足实用要求的。

(1)由雷达气象方程(如常用的 Probert-Jones 方程)易知,当雨滴直径不大于厘米级,即满足于雷莱小球散射的条件下,当将雷达所测的 Pr(回波平均功率)换算为反射率因子 Z 表示时,则它与波长  $\lambda$  无关(庄荫模, 1984)。因此,当不在发生冰雹这种特殊天气时,混用 C 和 S 波段组网在理论上是允许的。

(2)世界上还有很多国家未能使用统一型号的雷达,欧洲是个典型的例子。如自 1984 年起开始业务化的法国雷达网 ARAMIS(Cheze, 1991),是由 3 部 S 波段的 OMER 和 7 部 C 波段的 TOMSON,以及 PLESSY 和 GEMATRONIK 各 1 部的 C 波段雷达共 12 部组成的。欧洲国际雷达网至 90 年代中期已发展到约有 25 个国家参加的共百余部雷达联网,其各种型号雷达组成数为 C:47,DC:29,S:11,DS:13(D 为多普勒)(Newsome, 1992; Collier, 1992)。我国现在也是一个雷达型号尚未统一的国家,混合多型号雷达组网不仅是可能而且是必要的。长江中游网 C 和 S 波段合用(Jin, 1991),以及长江下游网甚至还辅助以多部 X 波段混用(Gu, 1993),便是又一证明。

#### (3)雷达系统的标定和维护

Joss(1991)曾明确指出,在应用雨量计作定量校准前,雷达系统从天线起直到终端为止各项技术参数的定标和维护是一项十分重要的工作。但是,其中最重要的是必须保持系统运行的稳定性,而不是参数的绝对精度。实际上,一个标准的现代化数字雷达系统的总体误差是不难保持在  $\pm 2\text{dB}$  内的,如瑞士雷达月校准的标准误差可保持低于 0.5dB 的水平。所以,在长江中游雷达网中要求各雷达站必须按规定经常对雷达系统进行标定和维护,应视为一项重要的基础工作。

#### 2. 网络雷达运行规程的统一

MYRAN 经过三省多次共同研讨,制定了长江中游 6 部雷达运行的统一规程。主要为:(1)扫描时间。分定时每日 6 次和指定加密(每 1 或半 h)二种,考虑到与卫星的结合应用,故以半点探测为主。(2)高度及产品。用 1.0°PPI 或 ZPPI,16 级 DBZ,以探测近地面降水。图象用本地直角坐标,2km 分辨率,256×256 幅面。(3)传输图象和数据格式及压缩编码。

#### (四)网络通信技术

在 MYRAN 中,各雷达站在规定时刻向武汉区域气象中心通信网络主动远程发送经规格化的雷达图象数据,存入 VAX 机中相应的雷达数据库。由图 1 可见,三个站使用专线(DL),二个站使用拨号电话线(TL),一个站为局域网通信,传输速率除长沙为 4800bps 外均达到

9600bps。LAROCC 拼图前置处理机则按规定时刻在 8min 时段内通过 DECNET 网不断查询和检拾。TL 通信方式在欧洲网络中也有少数站使用,国内外经验证明,在一定条件下其有效率还是比较高的,可达 90%以上。

(五)雷达图象数据传输格式和压缩编码

1. 图象数据传输格式

尽管各异型雷达数据处理的制式和格式不尽相同,但在传输图象之前必须把它们变换到统一的数据格式和编码,以便中央处理系统处理。欧洲 COST-73 是一个多国雷达网络,所以首要考虑便于国际交换。决定采取 WMO 制定的 FM94BUFR 为基础而进行改造,使之也适应于传输雷达图象,现已采纳为 WMO 标准(Newsome,1992)。其缺点为过于繁琐和冗长。在吸取其精华基础上,LARORAS 特制定了长江中游雷达网各单站雷达图象输出的数据格式和编码法(详略),具有简明紧凑特点。

2. 压缩编码

每个雷达站形成统一格式的图象数据 RANC 后,还必须对其进行压缩编码成为 RANP 才向中心传送,以达到节约通信时效和资源为目的。在 MYRAN 中研究了一种零拼装和变长码相结合的雷达图象压缩编码技术,使不失真的压缩比达到 1/8(冯斌贤,罗建国,1994),优于 COST-73BUFR 码的压缩比(1/4~5)(Newsome,1992)。RANC 的原容量为 40KB,经压缩后的 RANP 约 5KB,用 9600bps 传输,费时仅 5 秒。

(六)系统功能及层次结构

LARORAS 系统从功能上也分为二部分。

1. LAROCC 的功能

拼图前置处理机的功能有三:(1)网络通信。定时查询和自动调用 VAX 通信机雷达图象数据库中的实时信息。(2)自动拼图。按坐标转换和重叠区回波处理程序自动完成长江中游雷达拼图。显见,此时图中含有多种非降水杂波,但却保持了雷达测量的本质特色。(3)监控管理。自动监控各雷达站和中央站网络系统运行情况和统计多种网络管理报表,可随时显示和打印。

2. LAROWORK 的功能

这是面向预报员的一种云雨专用工作站,可藉此作出各种大范围降水云雨图象产品的显示、分析、计算、预报和分发。其功能分为 7 个层次,详见表 1。其中在 2 层中有用人机交互法消除地物杂波,在 4 层中也可用人机交互法识别雨团,还有在 5 层中有交互线性外推这三方面尚有少量和简易的人机交互外,其它功能均为全自动进行。

表 1 LARORAS 层次结构及其功能

层次	名称	主要功能
1	图象显示	单站雷达,雷达拼图,卫星云图,云雨叠套,四分屏,实测雨量
2	质量控制	雷达拼图,杂波消除及定量订正,VIS 云图太阳天顶角及暗影订正
3	降水测估	实时测估(5种),CRU 逐级订正,模式测估(4种),模式建立
4	降水累积	UDB 内实测降水累积,UDB 内外测估降水累积
5	降水预报	交互线性预报,数值风场平流预报,交互与数值结合预报
6	误差分析	累积降水量误差比较,预报降水量误差比较
7	系统管理	参数修改,网络传输,调色板制作,产品打印,用户指南

### 三、雷达图象合成处理及质量控制

(一)雷达图象合成(拼图)技术

按 Wessels(1991)的观点,雷达拼图数据处理可分为二大类内容:一是空间转换,包括投影坐标转换和象素尺度改变;二是量值转换,即如何处理相邻雷达重叠覆盖区域内多数据的取值。在下介绍在 LAROCC 中所使用的拼图处理技术。

### 1. 空间转换

(1)坐标变换。规定各站雷达系统的回波数据以本地直角坐标  $(x, y)$  表示。而拼图新坐标采用麦卡托投影方式,用  $(X, Y)$  表示如下:

$$\bar{X} = R \cdot \cos\varphi_1(\lambda - \lambda_0), Y = \rho - \rho_0 \quad (1)$$

其中

$$\rho_0 = R \cdot \cos\varphi_1 \text{Intg}(45^\circ + \varphi_0/2)$$

$$\rho = R \cdot \cos\varphi_1 \text{Intg}(45^\circ + \varphi/2)$$

式中,  $\varphi_1$  为标准纬度,  $\rho$  为雷达任意点  $(\varphi, \lambda)$  到赤道的投影距离,  $\rho_0$  为坐标原点  $(\varphi_0, \lambda_0)$  到赤道的投影距离,  $R$  为地球半径,  $(\varphi, \lambda)$  由下式得到:

$$\varphi = \arcsin\left[\cos\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}\right) \cdot \sin\varphi + \sin\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}\right) \cdot \cos\varphi \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right] \quad (2)$$

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{x \cdot \sin(\sqrt{x^2 + y^2}/R)}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\varphi}\right) + \lambda$$

式中,  $(\varphi, \lambda)$  为雷达站纬度和经度。

根据(2)式求得  $(\varphi, \lambda)$  代入(1)式,以完成雷达坐标到底图坐标的变换,实现多部雷达平面坐标的统一。

在 LAROCC 系统中,坐标转换实际采用查表法。转换表制作采用特殊的压缩处理,这不仅使表容量仅为原始表的 1/20,同时实时应用更显方便和简洁。对坐标变换出现的盲点则采用逆转换填充技术,精度很高(万玉发,1990)。

(2)象素尺度转换。在 LAROCC 系统中单站雷达图象与拼图的象素尺度都为 2km。但在用雷达网和卫星联合测估降水及求算累积量时,象素尺度增大为 8km,并用平均法取值,这是因为便于大范围降水显示和暴雨洪水预报应用的实际需要。

### 2. 量值转换

Wessels(1991)认为存在下列二种方法。

(1)固定边界法(Larke,1981)。根据地物杂波、雷达远近和性能等特点在覆盖重叠区划定一边界,其两侧决定了取值于何部雷达,因此某点取值对于雷达是固定不变的。此法虽可能出现边界两侧不连续现象,但雷达性能不致相混为其特点。由于网中的  $N$  部雷达因可能发生各种缺测情况而导致覆盖重叠区的变化,为此就存在固定边界划分有多达  $N$  全组合的可能,随着网中雷达数增加而呈几何级数递增(如 6 部雷达有 63 种固定边界),给雷达覆盖文件数据库的开发工作带来沉重负担。

(2)点的多值取法。即对重叠于一点的多个雷达数据如何取值。方法可有定点、(或加权)平均和最大强度等,但以后者居多。在欧洲各国雷达网中(Newsome,1992),有 57% 的国家用固定边界法,而 43% 则用最大强度法。根据在 MYWMS 中同时使用过固定边界法的经验(Jin,1991),又考虑到长江汛期多对流性降水的特性,故在 LARORAS 中只保留了最大强度法。此法有简便和在重叠覆盖区两侧雷达图象较为连续的优点。

### (二)拼图的质量控制

本文所言及的雷达网图象质量控制亦包含雷达测量的误差订正,作广义解。

Browning(1988)曾指出,造成降水回波测量误差的原因有二大类。一类是由雷达系统硬

(软)件本身性能造成的,本文在二(三)中已有论及;另一类是雷达在测量大气降水时所产生的气象误差。对一部已校准的雷达,气象误差却是最重要的。经过对欧洲锋面降水的研究,Browning总结了6种气象误差,即地曲距离、蒸发减雨、地形增雨、亮带增强、细雨低估、超折射等。非气象回波即地物杂波未列于其中。

在英国,雷达误差订正分设在雷达站和网络中央站两个层次进行(Kitchen,1994),而后者常称为拼图质量控制。全国13部自动化雷达都已实现定量化测雨,其中包括有硬(软)件消除地物杂波、遮挡影响和亮带订正、Z-R转换和自动雨量计校正等(Collier,1989)。而在中央的FRONTIERS系统中则对雷达拼图结合天气条件再进行精度更高的订正,包括人机交互方式(现正向自动化过渡)。

我国目前单站雷达探测业务尚属定性阶段,缺乏订正设备(如自动雨量站等)和好的技术方法,可应付临近预报业务但尚无能力开展定量测雨。在这种条件下,如何对拼图集中实施质量控制求得较为正确的瞬时雨强,显然是一个必须解决的难题。根据长江中游雷达的特点,探测误差主要来自于地物杂波、同频干扰、超折射和地曲距离即Z垂直廓线等因素,有时也有因雷达标定和系统性能不稳定引起的误差。LARORAS为此作出如下的拼图质量控制步骤。

### 1. 异常回波消除

指对地物杂波、同频干扰和超折射非降水回波的消除,开发了三种实用方法。

(1)卫星过滤法。利用雷达某点所对应的卫星(IR,VIS)值是否低于事先确定的阈值,以消除在晴空或高云状态下的非降水回波。卫星的阈值可随时修改,以消除人为判断的超折射等异常回波并尽量不损失降水信息为基准。

(2)Mouse法。这是一种人机交互的经验判别法,Mouse对判别为非降水的回波在显示屏上进行勾划后,敲一键即可除去。同时对Mouse所勾划的回波强度可作加值或减值得处理,这对于处理杂波和降水回波相混,以及因个别雷达性能突变或标定不当而引起回波偏弱和偏强十分有用。

(3)杂波文件法。类似于一种应用于单部雷达软件消除杂波的方法。

### 2. 新Z-R关系的综合定量订正

实际上不难看出,由Browning指出的锋面降水下6种气象误差,其主因起自于因地曲引起波束上抬而大气中又存在Z的垂直分布之故,常称为距离因子(订正)。近年来许多学者都提出研究Z的垂直廓线及求取地面雨量的订正方法并应用于业务中,其中有固定的Z廓线气候学方法,也有最新研究试验的随每个象素变异的实时订正法(Kitchen,1994)。

但是,另一种建立在新概念基础上的Z-R关系的研究(Rosenfeld,1991)在近年来也颇兴起。它把雷达测量的Z直接与其地面实测雨量R在ATI(Area-Time Integrals)原理的基础上,用概率配对法求取两者在条件概率下对应的关系,而不是经典的Z-R函数。此法的优点,一是能综合订正所有的雷达误差(从Z廓线、Z-R的偏差、大气垂直方向发生影响降水的一切物理过程、甚至到不完善的雷达校准)于一个简单的计算过程(Kitchen,1994;Rosenfeld,1991);另一个优点是不需要用自动雨量计,正避免了国内条件的不足。汤达章(1995)利用武汉雷达对长江中游梅雨期的新Z-R关系作过研究,求出5个距离段( $r = 20 \sim 49, 50 \sim 79, 80 \sim 109, 110 \sim 139, 140 \sim 170$ )的气候Z-R关系式:

$$Z = K(r)R^{\alpha(r)} \quad (3)$$

在实践中发现各距离段有明显的非连续现象。因此,在LARORAS中予以改进,采用拉格朗日多项式插值法,在0~250km内求出以2km为间距的K和 $\alpha$ 值。另外,考虑由K和 $\alpha$ 随r

变化而引起  $Z$  值的变化,又从(3)式导出  $Z$  的订正公式为:

$$\Delta dBZ = 10 \lg \frac{K(r_0)}{K(r)} + 10[a(r_0) - a(r)] \lg R \quad (4)$$

在(4)式中令  $r_0 = 35$ ,取 20~50km 的中值,而  $R$  应通过在  $r_0$  处的(3)式中求出。

通过对不同回波强度级别在不同距离(2km 为步长)的订正计算,包括反射因子订正值  $\Delta dBZ$ ,订正后的雨强值  $R$  (mm)、雨强订正值  $R_1 = R - R_0$  ( $R_0$  为未经距离订正并由经典  $Z = 200R^{1.6}$  计算的),订正比值  $R/R_0$  等归纳成图2。从中可得出如下要点:

(1)  $\Delta dBZ$  基本呈线性分布,随距离而增加。在 35km 处为 0, < 35km 呈负值。

(2) 订正后雨强  $R$  值随距离明显增强,从图中  $R/R_0$  一组曲线分布可清楚发现。另外,在 35km 处仍存在  $R/R_0 < 1$  的情况,这是由于  $R$  和  $R_0$  是通过不同的  $Z-R$  关系式计算所致。以 250km 处回波强度为 40dBZ 来看,原雨强为 11.53mm,订正后为 44.60mm,比值达 3.9。

(3) 综观计算结果可表明,相对弱的回波雨强订正效果不明显,而相对强的回波并远到一定距离时其增幅很高。由此看来,这种订正方法必须有一定的距离范围予以限制。

新  $Z-R$  关系订正程序在 LARORAS 中自动运行,对雷达拼图实现量化订正。

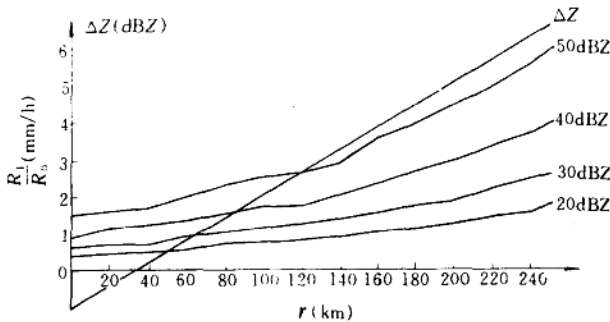


图2 订正降水强度 ( $R_1$ ) 与未订正强度  $R_0$  (用  $Z = 200R^{1.6}$ ) 比值以及  $\Delta dBZ$  随距离的变化

## 四、利用雷达网和卫星联合测估降水

Collier 等人(1989)在论述利用卫星估算降水时归纳有三类方法。其一是云的指数法,从云的特征(亮度、高度、结构等)求取与地面降水的回归方程。其二是云的生命史法,如计算云的面积及随时间的变化率与对流性降水的关系。这些方法都具有只应用单谱卫星资料(IR 或 VIS)或需要长时间连续资料的特点。第三类是应用双谱资料并结合雷达测雨来求云雨之间的关系,由 Lovejoy & Austin(1979)首创(下称 LA 法),具有实时快速和在层状和对流性降水条件下都可应用之优点,长期为英国 FRONTIERS 直至 NIMROD 系统中采用。长江中游的 MYWMS(Jin, 1991; 万玉发, 1994)在 1990 年也开始采用此法,但在 LARORAS 中则有全面和大幅度改进。

### (一) 估算降水强度的基本算法

在 LA 法中,只在雷达可探测区 UDB 以外的云层中估算有可能降水的范围,只限于区分雨的有无。这种限制一直为英国沿用(Cheng 等, 1993),在 MYWMS 中曾用嵌套定义域法在有雨区域内再分出小、中、大的三级强度(Jin, 1991),但效果欠佳。在 LARORAS 中,对算法又作了较大改进。

### 1. 基本算法的改进

把卫星观测云的强度和雷达网观测的降水强度视为两个随机事件。用  $L$  表示卫星强度事件, 用  $R$  表示雷达降水事件,  $R$  是由  $R_0, R_1, \dots, R_n$  等事件构成的完备事件组。在 UDB 内, 可求出任一卫星强度等级发生时对应不同降水强度出现的条件概率式为:

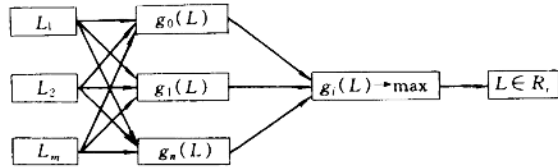


图3 卫星云图强度等级  $L$  概率分类图

$$P(R_i | L) = N_i(L) / \sum_{i=0}^n N_i(L) \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中  $N_i(L)$  和  $P(R_i | L)$  各表示强度等级为  $L$  (单谱或双谱) 时, 降水强度  $R_i$  出现的频数以及  $R_i$  的条件概率。根据贝叶斯分类法则, 设有判别函数为  $g(L)$ , 则第  $i$  类判别函数为  $g_i(L) = P(R_i | L)$ 。如果  $g_i(L) \geq g_j(L)$ , 对于一切  $i \neq j$  的条件下, 判别函数把卫星强度等级  $L$  归为  $R_i$  类的降水强度, 如图3所示。

### 2. 分析讨论

(1) 对于二类问题, 即有雨 ( $R_1$ ) 和无雨 ( $R_0$ ) 情况, 则由(5)式可得:

$$P(R_1 | L) = \frac{N_1(L)}{N_0(L) + N_1(L)} \quad (6)$$

上式  $N_1(L)$  和  $N_0(L)$  各表示卫星强度为  $L$  时  $R_1$  和  $R_0$  出现的频数, 而  $P(R_1 | L)$  表示有雨的条件概率。显然, 此即为 LA 算法。

(2) 若不考虑  $R_0$ , 则由(5)式可得:

$$P(R_i | L) = N_i(L) / \sum_{i=1}^n N_i(L) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

显然当有雨的概率门限确定之后, 利用(7)式可以判别卫星强度  $L$  对应的降水强度类别。在 LARORAS 中, 现取  $n = 4$ , 即估算降水强度区分为小、中、大和暴雨4级。

#### (二) 影响降水估算的几个因子

影响(5)式计算精度的因子有多种, 基本有雷达和卫星本身的测量值和雷达网 UDB 区域划定的精度, 强度分级的合理性以及天气和地形条件等。现重点研究和改进如下三个因子。

##### 1. UDB 边界的计算

显见, UDB 边界的确定对于估算降水的正确率具有重要作用。因地物阻挡和探测仰角及降水类型的影响, 在 UDB 范围内才有雷达探测。假定在标准大气折射下, 在某方位角  $\beta$  上雷达有效数据距离用  $r$  表示, 则 UDB 边界线可用下式求取

$$S = \int_0^{2\pi} r d\beta = \int_0^{2\pi} \left[ R_e \left( \frac{\pi}{2} - \alpha - \arcsin \frac{(R_e + h_0) \cos \alpha}{R_e + h} \right) \right] d\beta \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad \alpha = \begin{cases} \theta_1 = f(\beta) & \theta_1 \geq \theta_2 \\ \theta_2 & \theta_1 < \theta_2 \end{cases}$$

式中  $R_e$  为等效地球半径,  $h$  为确定的降水基本高度, 取4km,  $h_0$  为雷达站天线海拔高度,  $\theta_1$  为地物阻挡仰角,  $\theta_2$  为雷达观测仰角取  $1.0^\circ$ 。由(8)式和各雷达的方位-阻挡仰角图即可求得各雷达站的 UDB 边界, 并由此求得6部雷达不同组合的 UDB 边界共63种, 存入 LARORAS 的有关数据库中, 可根据探测时各雷达出现的实际情况而自动选取。

##### 2. VIS 云图的太阳天顶角订正



为获得较高的估算精度,在 LARORAS 中对可见光云图实施太阳天顶角和暗影订正。订正时间为从世界时 0 时至 10 时。还有,平滑滤波方法可消除可见光云图上的暗影和噪声。

### 3. 强度分级

(1) 利用卫星单谱估算时,按非线性方法将 IR 和 VIS 划分为 32 级,而在双谱估算时,则在单谱基础上重新定义为 16 级。

(2) LARORAS 中的雷达拼图原为 16 级强度,在作卫星降水估算时,为取得一致,需将其归并为 4 级如下,而原 MYWMS 为 3 级。

1:20~29dBZ, 2:30~39dBZ, 3:40~44dBZ, 4:≥45dBZ。

### (三) 降水估算的多种方法和最佳选取

#### 1. 五种估算方法

在 LARORAS 中,运用卫星单、双谱资料和随时间的变化趋势等卫星资料,共构成了不同功能的 5 种估算方法(参见图 4)如表 2,可视条件选用,也可由 LAROWORK 自动选取最佳者。

#### 2. 估算方法的最佳选取

在 LARORAS 中,采用最小分类平均总错误概率  $E_k$  来研究如何选取多种估算方法的最佳者,定义  $E_k$  为:

$$E_k = \frac{1}{m} \left[ \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n P(R_i | L_j) \right] \quad (i \neq g) \quad (L \in R_k) \quad (9)$$

其中  $m$  是在雨区范围估算最佳概率门限之上所有卫星等级  $L$  的个数。五种方法的雨强估算均可求得各自的平均总错误概率,而最佳的估算方法应由最小的  $E_k$  来决定。

表 2 五种降水估算方法的功能比较

序号	估算方法	维数	使用限制	性能
1	IR	1	全天可用	次好
2	VIS	1	白天可用	较好
3	VIS-IR	2	白天可用	最好
4	IR-ΔIR	2	全天可用	适合强对流降水
5	VIS-ΔVIS	2	白天可用	适合强对流降水

若将卫星估算方法同样实施于 UDB 之内而产生一个估算雨区,则它与雷达实测雨区面积之间可存在一个相对误差  $PER$ ,而在(9)式中的  $m$  值应由最小的  $PER$  来确定。在 UDB 内  $PER$  定义为:

$$PER = \frac{B - C}{A + B} \times 100\% \quad (10)$$

式中  $A$  为正确估计为降水点的数目,  $B$  为错误估计为不降水点的数目,用  $C$  表示错误估计降水点的数目。 $PER$  越小,反映了 UDB 内卫星观测雨区和雷达观测雨区的面积差越小。因此最小的相对误差  $PER$  所对应的概率门限就是最佳概率门限。

在 LARORAS 中,在白天按常规自动作出 IR、VIS 和 IR-VIS 三种降水估算图,以及自动按上述方法选取其中最佳者。

### (四) 估算云雨概率矩阵(表)和 CRU 逐级订正

#### 1. 云雨概率矩阵(表)

现将某种降水估算方法按(5)式求得的降水强度出现概率以矩阵或表的形式表示。对于一维和二维估算,分别可得下列二组矩阵式(11)和(12)

$$|P(R_i | L_1), P(R_i | L_2), \dots, P(R_i | L_n)|_{i=1,2,\dots,N} \quad (11)$$