

长江流域山洪致灾临界 雨强拟定及预警技术研究

CHANGJIANGLIUYUSHANHONGZHIZAILINJIE
YUQIANGNIDINGJIYUJINGJISHUYANJIU

程海云 熊明 杨文发 主编

 长江出版社

长江流域山洪致灾临界 雨强拟定及预警技术研究

CHANGJIANGLIUYUSHANHONGZHIZAILINJIE
YUQIANGNIDINGJIYUJINGJISHUYANJIU

程海云 熊明 杨文发 主编



 长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

长江流域山洪致灾临界雨强拟定及预警技术研究/
程海云,熊明,杨文发主编.—武汉:长江出版社,2015.9
ISBN 978-7-5492-3774-6

I. ①长… II. ①程…②熊…③杨… III. ①长江流域—
暴雨洪水—降雨强度—降水预报 IV. ①P331.1②P457.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 230615 号

长江流域山洪致灾临界雨强拟定及预警技术研究

程海云 熊明 杨文发 主编

责任编辑:郭利娜

装帧设计:刘斯佳

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

网 址:<http://www.cjpress.com.cn>

电 话:(027)82926557(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉美盈风谷印刷有限公司

规 格:787mm×1092mm

1/16

19.25 印张

450 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-3774-6

定 价:79.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

前 言

长江流域大部地区处于亚热带东南季风和西南季风影响区域,受季风气候影响,汛期4—10月降雨量丰沛,但因流域内不同地区地理、地貌及局地气候特征等迥异,往往造成降雨时空分布不均,尤其是山丘地区,因降雨引发的山洪灾害事件也日趋严重。近年来,长江流域因强降雨引发的山洪灾害事件日渐增多。例如,2010年8月7日22时许,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县突发强降雨诱发特大山洪泥石流,致使舟曲县城沿河房屋被冲毁,泥石流阻断白龙江形成堰塞湖;本次特大山洪泥石流事件造成1557人遇难、284人失踪(截至2010年9月7日统计)等的重大人员伤亡,财产损失惨重,难以统计。2011年6月9日晚11时至10日凌晨,湖南省岳阳市境内出现特大暴雨,临湘市詹桥镇云山、观山村发生山洪泥石流灾害,造成28人死亡、6人失踪。山洪灾害不仅对当地人民群众生命和财产安全造成损害,同时还严重阻碍山洪灾害防治区的经济社会发展。为了进一步指导解决山洪防治工作中存在的致灾临界雨强拟定方法及山洪灾害预警技术应用问题,长江水利委员会水文局联合长江科学院、南京信息工程大学和中国气象局武汉暴雨研究所等单位共同承担水利部公益性行业科研专项经费项目“长江流域山洪致灾临界雨强拟定及预警技术”(201201063)的研究。本书就是在此项目资助下出版的。

全书共分为11章。

第1章主要介绍山洪灾害研究的必要性和研究内容,山洪灾害预警技术、数值降雨预报技术及雷达预估降水等领域的研究进展,以及长江流域近几年发生的典型山洪灾害案例及典型山洪灾害示范区的选取原则和概况。

第2章阐述了山洪灾害临界(雨强临界雨量)拟定的统计分析法和水文水力学法,动态临界雨量和暴雨临界曲线以及临界雨量不确定性分析的研究进展。

第3章介绍了临界雨量与降雨、地质地貌、人类活动因素的关系以及致灾雨量与前期降雨量的关系等,采用经验分析法和经典判别分析法分别构建了临界雨量—前期降雨量关系模型。

第4章详细介绍了不同概率条件下临界雨量推求方法,并将该方法应用于湖南省临湘、陕西宁强、贵州望漠和四川都江堰等地区进行验证。

第5章介绍了拟定临界雨量的统计分析方法及应用示范情况,示范区临湘市境内的19个预警站点和10个预警分区临界雨量阈值拟定成果,并对马氏距离识别法和针对基本无资料地区的其他几种临界雨量拟定方法等进行试验探讨。

第6章重点提出了一种基于API模型拟定山洪动态临界雨量方法并进行了试验应用。

第7章重点针对基于雷达预估技术的短时(0~2h)预警技术应用研究,主要介绍在复杂地形下的致灾强降雨雷达定量估测降水的 $Z-I$ 最优分型动态技术法,雷达强对流识别算术技术,面面临湘山洪灾害防治区短时预警系统工作流程,并提出面向山洪灾害防治区短时(0~2h)降水预估技术应用方案。

第8章阐述基于数值预报技术的短期(1~2d)预警技术的应用研究,主要介绍了适用于山洪灾害预警的WRF中尺度数值模式,并研究WRF模式的资料同化、不同物理参数化方案选取及降水预报的偏差订正技术,提出面向山洪灾害防治区短期(1~2d)降水预报技术应用方案。

第9章主要介绍了所开发的临湘市山洪灾害监测预警原型系统的结构、功能设计等内容,并介绍了该系统于2014年开展山洪预警实时试验应用情况。

第10章主要提出面向山洪灾害防治区山洪预警综合应用技术看案,重点介绍了山洪预警三级响应机制和考虑数值天气模式短期降雨预报和天气雷达短时降雨预估信息的山洪预警综合技术应用方案等。

第11章总结了本项研究的主要成果与结论。

本书所取得的研究成果已在长江流域典型山洪示范区临湘市进行了应用示范,特别是实施了临湘市示范区2014年山洪灾害预警技术的实时应用试验,因2014年汛期临湘地区发生的强降雨过程偏少,对所拟定的临界雨量阈值及基于此开展的山洪预警方案的试验效果,因验证样本个例偏少,还难以得到较充分的检验。本项研究侧重解决生产实际中存在的技术问题,所提出的临界雨量拟定及预警技术应用方案实用可行,易于推广应用。本书所提出的主要研究结论可为长江流域开展山洪灾害防治实践提供有效的应用借鉴和技术指导,对于促进当前山洪灾害防治非工程措施水平等具有重要的指导意义,经济效益和社会效益显著。

本书由程海云、熊明、杨文发主编。具体参与本书编写工作的还有:第1章绪论由长江水利委员会(以下简称长江委)水文局的熊明、李春龙、袁雅鸣、周厚芳主笔;第2、3、4、5、6章有关临界雨量拟定方法内容由长江委长江科学院程卫帅、长江委水文局的袁雅鸣、陈瑜彬、许银山主笔;第7章有关雷达估测降水内容由南京信息工程大学的周北平、赵光平主笔;第8章及附录有关数值预报内容由中国气象局武汉暴雨研究所的李俊、陈超君、赖安伟、长江委水文局的邱辉、张方伟主笔;第9、10章有关山洪灾害监测预警系统、预警试验检验及山洪灾

害综合预警方案内容由长江委水文局的訾丽、陈新国、杨文发、高珺主笔；第 11 章结论由长江委水文局的杨文发、訾丽主笔。沈浒英、万汉生、高珺、欧阳骏、匡奕煜、段红、欧应钧、郑静、许继军、尹正杰、桑连海、姚立强、汪朝晖、董玲燕、魏鸣、杜爱军、管理、李红莉、王丽娟、周生辉、刘红艳、陈威霖、姜旭、张蒙蒙、王威等参与了本书的研究工作。本书由长江委水文局杨文发教授级高级工程师统稿，长江委水文局的熊明教授级高级工程师、周新春教授级高级工程师对本书进行校审，长江委水文局程海云教授级高级工程师进行审定。

本书在编写过程中，得到长江委长江科学院、中国气象局武汉暴雨研究所、南京信息工程大学、长江委防汛抗旱办公室、湖南省岳阳市气象局、岳阳市防汛抗旱办公室等单位有关专家的大力支持，在此一并致以衷心的感谢！另外，由于时间仓促、水平有限，本书难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和必要性	1
1.2 山洪灾害预警技术应用研究进展	2
1.3 研究目标和内容	8
1.4 长江流域典型山洪灾害案例概况	9
1.5 典型山洪灾害示范区选择及概况	16
第2章 山洪灾害临界雨强(临界雨量)拟定技术研究综述	29
2.1 山洪灾害临界雨强(临界雨量)界定	29
2.2 统计分析法拟定临界雨量	30
2.3 水文水力学法拟定临界雨量	32
2.4 临界雨量指标的拓展	34
2.5 临界雨量不确定性探讨分析	35
2.6 小结	36
第3章 临界雨量与其主要影响因素关系分析	38
3.1 临界雨量主要影响因素	38
3.2 致灾雨量与前期降雨量之间关系分析	39
3.3 临界雨量与前期降雨量关系模型构建	49
3.4 小结	63

第4章 不同概率条件下临界雨量分析方法 64

4.1 不同概率条件下临界雨量推求方法	64
4.2 临界雨量概率分析方法在临湘市示范区的应用	65
4.3 临界雨量概率分析方法在其他地区的应用	69
4.4 分析讨论	76
4.5 小结	77

第5章 基于统计分析法的临界雨量拟定技术 78

5.1 资料处理和方法	78
5.2 临湘市示范区山洪致灾降雨时段特征统计	81
5.3 基于统计分析法拟定临界雨量阈值方案	84
5.4 临湘市示范区单站临界雨量预警阈值拟定及成果	84
5.5 临湘市示范区分区临界雨量预警阈值拟定及成果	96
5.6 其他几种临界雨量拟定方法分析应用	99
5.7 基于马氏距离识别法的临界雨量拟定方法试验	105
5.8 无资料条件下基于流量反推法拟定临界雨量方法试验	112
5.9 小结	115

第6章 基于 API 模型拟定山洪动态临界雨量方法探讨 117

6.1 概述	117
6.2 动态临界雨量拟定技术	117
6.3 应用试验	122
6.4 小结	127

第7章 基于雷达预估技术的短时(0~2h)预警技术 128

7.1	概述	128
7.2	雷达定量估测降水及动态订正技术	128
7.3	雷达强对流识别算术技术	134
7.4	综合应用试验	142
7.5	面向临湘市示范区基于雷达监测信息山洪灾害防治区短时(0~2h)降水预警系统研制	150
7.6	面向山洪灾害防治区短时 0~2h 预警技术方案	157
7.7	小结	162

第8章 基于数值预报技术的短期(1~2d)预警技术 163

8.1	概述	163
8.2	不同中尺度模型面向山洪预警适用性比较分析	163
8.3	面向示范区数值预报模式不同参数化方案试验研究	169
8.4	面向示范区数值预报模式资料同化试验研究	176
8.5	不同山洪致灾降雨过程批量数值模拟	180
8.6	数值预报模式产品释用——降水偏差订正技术研究	205
8.7	面向山洪灾害防治区短期(1~2d)预警预报技术方案	209
8.8	小结	215

第9章 面向山洪防治典型示范区山洪灾害监测预警原型系统 216

9.1	概述	216
9.2	山洪预警系统总体结构与设计	217
9.3	山洪灾害监测预警系统功能	219
9.4	山洪灾害监测预警系统预警功能设计	223
9.5	临湘市示范区山洪灾害监测预警平台应用试验	227
9.6	小结	249

第 10 章	面向山洪灾害防治区山洪预警综合应用技术方案	250
10.1	基于临界雨量的山洪预警指标确定	250
10.2	面向山洪预警的定量降雨预报技术应用	251
10.3	山洪预警机制确定	251
10.4	面向山洪防治区的山洪预警综合应用技术方案	252
10.5	小结	255
第 11 章	结论与建议	256
11.1	主要研究成果与结论	256
11.2	创新点	258
11.3	建议	259
	参考文献	261
附录	面向山洪预警的中尺度数值模式 WRF 应用指南	267

第1章 绪论

1.1 研究背景和必要性

1.1.1 长江流域山洪灾害概况

长江流域主要处于亚热带东南季风和西南季风影响区域,受季风气候影响,流域降雨季节特征明显,汛期降雨丰沛,且因流域地理、地貌及局地气候特征迥异,往往导致降雨空间分布不均,尤其是山丘地区,因降雨引发的山洪地质灾害发生频繁。山洪灾害破坏性强、危害大、致灾快,不仅对山丘区的基础设施造成毁灭性破坏,而且对人民群众的生命和财产造成损害,已经成为当前防灾减灾中的突出问题,是山丘区经济社会可持续发展的重要制约因素之一。

2006年7月14—16日,受强热带风暴“碧利斯”影响,位于湖南省东南部的郴州、永州和衡阳等地普降暴雨和大暴雨,郴州市资兴、永兴、汝城等县出现了历史罕见的特大暴雨,东江水库以上平均降雨301mm,东江到耒阳区间平均降雨286mm,耒水全流域平均降雨293mm,致使湘江一级支流耒水发生了百年一遇超历史特大洪水,湘江干流全线超警告急。“碧利斯”引发的暴雨山洪灾害造成417人死亡、109人失踪。

2010年8月7日22时许,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县突发强降雨,诱发特大山洪泥石流灾害,县城北面的罗家峪、三眼峪泥石流下泄,由北向南冲向县城,造成沿河房屋被冲毁,泥石流阻断白龙江,形成堰塞湖。截至9月7日,舟曲特大山洪泥石流灾害造成1557人遇难、284人失踪。

2011年6月9日晚11时至10日凌晨,湖南省岳阳市境内发生特大暴雨,临湘市詹桥镇观山村10日零时至3时出现超强降雨,詹桥镇(贺坝监测点)降水量达到301mm。因短时间降雨量特大,6月10日凌晨,临湘市詹桥镇云山、观山村发生山洪泥石流灾害,造成28人死亡、6人失踪。

以上仅为几个较典型的山洪灾害个例。近几年长江流域山洪灾害事件频繁发生,山洪灾害防治工作日趋紧迫,作为山洪防治中一项非常重要的非工程措施,有关山洪致灾临界雨强拟定及预警技术成为山洪灾害防治工作中急需解决的关键技术问题。

1.1.2 研究的必要性

近年来,长江流域因强降雨引发的山洪灾害事件增多且频繁,造成社会和经济损失巨大,山洪灾害不仅对当地人民群众生命和财产安全造成损害,同时还严重阻碍山洪灾害防治区的经济和社会的发展。因此,开展山洪灾害防治预警技术等应用研究,是完善山洪防治非工程措施中的一个有效举措,也是当前长江流域防洪减灾工作中亟待解决的突出问题。

早在2002年,遵照温家宝总理指示,水利部会同国土资源部、中国气象局、建设部和国家环保总局,针对由降雨在山丘区引发的山洪及山洪诱发的泥石流、滑坡等灾害,组织开展了全国山洪灾害规划编写的前期科研专项工作,编制了《全国山洪灾害防治规划》;2003年以后全国山洪灾害防治工作开始逐步推进;2009年国家防汛抗旱总指挥部安排在全国103个县进行了山洪灾害防治非工程措施的试点建设,取得了明显的防灾减灾效益;2010年继续增加安排500个县试点建设工作,这些工作为进一步开展山洪灾害防治工作奠定了重要基础,也迫切需要解决实际山洪防治工作中临界雨量如何有效拟定并应用于山洪灾害的预警技术问题。

2011年发布的“中央1号文件”明确提出“山洪地质灾害防治要坚持工程措施和非工程措施相结合,抓紧完善专群结合的监测预警体系,加快实施防灾避让和重点治理”,为贯彻落实“中央1号文件”指示,更加迫切需要解决实际山洪防治工作中面临的致灾临界雨强阈值科学分析及开展有效山洪灾害预警技术问题,本书以实际山洪防治工作中所需要解决的关键技术问题为研究目标,选择长江流域的山洪防治典型示范区,开展示范区临界雨量拟定应用分析,提出典型示范区的山洪灾害致灾临界雨强阈值成果,并结合应用当前先进的天气雷达和中尺度数值天气模式技术为基础,提高山洪灾害临近和短期降水预报预警技术能力,改进和完善长江流域现有山洪灾害防治非工程措施水平,以保障人民群众生命安全,减少财产损失,为进一步服务民生水利提供技术支撑。

1.2 山洪灾害预警技术应用研究进展

近年来,山洪灾害已成为国内外防灾减灾领域中关注的焦点,面对越来越严重的山洪灾害,很多国家已经或正在研发有效的山洪监测与预警预报系统和中小河流洪水防御方法,力求使灾害程度达到最小。山洪灾害的发生与降雨密切相关,为了有效延长山洪灾害预警时间,尽可能充分考虑应用预报雨量信息开展山洪预警是本书的重要研究内容之一。因此,山洪灾害预警技术的应用研究较大程度上与数值降雨预报技术和雷达预估降雨技术等密不可分。

1.2.1 山洪灾害预警技术研究进展

目前,国内外已经在山洪灾害预警预报方面取得了一系列成果。例如,美国水文研究中

心(HRC)研发了山洪预警指南系统(Flash Flood Guidance System, FFGS),已广泛应用于中美洲、韩国、湄公河流域四国与南非、罗马尼亚及美国加利福尼亚州等地;马里兰大学与美国国家河流预报中心研制了分布式水文模型山洪预报系统(HEC—DHM);日本国际合作社(JICA)开发了在加勒比海地区以社区为基础的山洪早期警报系统等;世界气象组织(WHO)也在积极推进一体化的洪水管理理念,并在南亚地区的孟加拉国、印度和尼泊尔三国成功地开展了“社区加盟洪水预警与管理”的示范区项目。

山洪预报可以采用常规的水文气象模型,但由于山洪具有流速快、预见期短及资料短缺等特点,所以山洪预警与常规水文预报的技术思路有所不同。目前,国外常用的山洪预报预警大致有两种途径:其一为高分辨率分布式水文模拟法,如意大利 ProGEA 公司开发的基于 TOPKAPI 分布水文模型的中小河流洪水预报系统、马里兰大学与美国国家河流预报中心共同研发的分布式水文模型山洪预报系统;其二为动态临界雨量值法,如美国水文研究中心研制的山洪预警指南系统。

此外,对具有一定水文系列资料的小流域多采用经验方法,根据历史上本地区内中小流域特大暴雨条件下的流域面积—量—峰关系的整理与应用,或依据本流域观测资料建立降雨总量与洪峰相关的预报预警方案。

(1) 高分辨率分布式水文模拟法

基于高分辨率分布式水文模型的山洪预警预报方法基本思路是利用高精度数字高程模型(DEM)生成数字流域,在每个小子流域(或 DEM 网格)上应用现有的水文模型(萨克拉门托模型、新安江模型等)来推求径流,再进行汇流演算(瞬时地貌单位线法、等流时线法等),最后求得每个子流域(或网格)出口断面的流量过程、峰值流量及其出现时间等洪水预报数据,然后根据实时监测的水文数据,结合计算所得的各小流域(或网格)的降雨径流情况,一旦达到预警限值,将通过网络系统和防汛短消息平台向相关责任人员发送预警信息。例如,河南省水利厅 2005 年起通过对美国陆军工程师团 HEC—HMS 流域预报模型的深入研究,采用新型地貌单位线等水文分析最新成果,从技术手段上为无水文资料地区进行洪水预报预警开辟了新途径^[1]。

基于分布式水文模型的山洪预警预报方法的难点可概括如下:

1) 由于山洪易发地一般水文资料较少,分布式水文模型对资料也有较高要求,同样面临模型参数的率定和检验。因此,必须尽可能收集流域内水文资料,否则很难进行有效的实际应用。

2) 通常流域出口断面的预警流量(水位)值是可被测知的,但是每个子流域(或网格)的预警流量(水位)值是很难确定的,而发生山洪灾害的地点往往是流域中的某个小支流而非流域出口。因此,必须建立流域中每个子流域(或网格)的预警流量值或建立获取预警流量值的方法。

3) 山洪发生时间较短,也就是按照现有常规水文 6h 报讯条件是很难有效预报山洪的。

因此,必须建立适用于山洪预报的报讯机制,加密报讯频次。

4)分布式水文模型在制作小尺度山洪预报时对雨量的空间分布要求很高,而目前雨量站网的布设很难满足山洪预报站网密度的要求。因此,必须在山洪易发区适当加密雨量站网布设。

5)由于山洪的突发性,即使在水文模型能有效预报出山洪的情况下,也很难对发生山洪的区域进行预警。因此,基于气象卫星、天气雷达、地面自动雨量站监测手段相结合的多源信息融合应用,并应用气象模式预测山洪易发区小尺度空间上的未来几个小时降雨,考虑未来降雨进行水文模拟计算,可以提高山洪预警的预见期。

(2)信息动态临界雨量值法

美国水文研究中心研发的动态临界雨量值法(或山洪预警指南法),其思路是以小流域上已发生的降雨量,通过水文模型计算分析,得到流域实时土壤湿度信息,反推出流域出口断面洪峰流量要达到预先设定的预警值所需要的降雨量,这个降雨量称之为“山洪预警指南值”(Flash Flood Guidance, FFG)或动态的“临界雨量值”。当实时或预报雨量达到山洪预警指南值时,即发布山洪预警或警示。概言之,在分析当前的土壤湿度时,若时间允许,运用水文模型得到山洪预警指南值;在发布未来预报或预警时,若时间仓促,不运行水文模型,可对比该站点(或小范围的面平均)雨量是否达到或超过山洪预警指南值,来决定是否发布预警。

美国国家海洋与大气管理局(NOAA)中的河流预报中心(RFC)采用美国水文研究中心研发的山洪预警指南系统,实时提供山洪预警指南值分布图,天气预报机构结合山洪预警指南值发布洪水预警,另外在中北美洲有的地区也应用山洪预警指南系统进行山洪预警,为山洪灾害防御提供技术支撑。

动态临界雨量值法在实际运用中的难点:

1)对于无资料或资料短缺的流域,水文模型参数的获取也非常困难。因此,采用该方法必须尽可能地收集水文资料。

2)如何通过区域相关分析确定河道断面参数是一个关键问题。

3)必须建立、健全山洪历史数据库以便对山洪预警进行验证。

4)该方法主要适用有一定监测条件下的中小河流区域,而对于水系特征不明显的山丘区,较难以采用动态临界雨量值法开展山洪预警。

1.2.2 数值降雨预报技术研究进展

数值天气预报已成为现代天气预报业务的基础和天气预报业务发展的主流方向^[2,3],改进和提高数值预报精度是提高天气预报准确率的关键。影响数值预报精度的主要因素有:模式初始场的误差、大气运动各种物理过程以及相互作用在数值模式中的描述、分辨率带来的计算误差等。而前两种误差比因分辨率较低造成的计算误差要大,且技术改进难度也比

后者大得多,所以在数值预报领域里,资料同化技术和模式物理过程方案的研究是繁重而艰巨的工作。

我国数值天气预报业务经过多年发展,逐步从引进吸收与自主研发并重转入了自主研发、持续发展的新格局。在国家级初步构建了包括全球和区域模式预报系统、集合预报系统 & 专业数值预报系统在内的较为完整的数值预报体系^[3]。与前期业务预报模式相比,国家级全球和区域中尺度数值模式预报业务系统有了明显变化^[3-5]:一是模式的分辨率明显提高;二是半隐式—半拉格朗日积分方案和将快、慢波分离的积分方案是当前业务模式中主要使用的积分方案;三是随着模式分辨率的提高,模式物理过程也同步得到改进,特别是改进了模式格点尺度凝结方程;四是资料同化系统实现了从最优插值向三维变分的技术升级,实现了对卫星辐射率资料的直接同化;五是我国自行研制的具有“一体化”特征的业务系统已经开始运行。

目前,我国全球模式 T639 的预报性能有了较明显的改善,预报产品在业务中得到广泛应用;GRAPES 中尺度数值预报系统于 2004 年实现业务化;GRAPES 全球中期数值天气预报系统于 2009 年 3 月实现准业务运行;全球台风路径预报能力^[8]逐步提高。在全国各个省(自治区、直辖市)都建立了不同程度满足业务与科研需要的区域中尺度数值预报系统,其中 WRF、MM5、GRAPES 等中尺度模式得到了较为广泛的应用。欧洲中期数值预报中心(EC-MWF)、英国气象局、法国气象局、加拿大气象局、日本气象厅、澳大利亚气象局等发达国家都已经建立了气象资料四维变分同化系统^[6]。在未来几年里,世界数值预报先进国家的全球模式分辨率都将提高到全球中尺度模式的水平,尤其是 ECMWF 的确定性预报业务模式已于 2009 年底升级为 TL1279 L91,水平分辨率约 16km,垂直分层达 91 层,全球中期集合预报业务模式也相应升级为 TL639 L91,水平分辨率约 30km。另外,为期 10 年的国际“观测系统研究与可预报性试验”计划(THORPEX)正在世界气象组织框架内组织实施,将有力地推进观测—预报交互系统技术、资料同化技术、多模式多中心超级集合预报技术的发展^[7],加速提高 1~14d 数值预报准确率。

现有业务运行的区域模式^[4],德国气象局的分辨率较高,为水平 7km,垂直达 35 层,而美国国家气象中心的为业务模式水平 12km,垂直达 50 层;未来,加拿大气象局、德国气象局和英国气象局的业务区域模式,水平将达 2km,垂直为 50~60 层。

数值天气预报的未来发展与遥感技术和高性能计算机技术的发展关系非常密切^[1]。未来数值天气预报的发展必然向局地千米尺度甚至百米尺度分辨率的精细化预报系统以及可用预报时效超过两周的全球天气预报方向发展。因此,我国数值预报的未来主要科学目标是:深入研究高分辨率数值预报模式所应包含的大气运动谱及其精细化表述^[8];与高分辨率数值预报模式相适应的观测资料四维同化技术和理论;高分辨率数值预报模式中的各种物理、化学过程以及观测系统设计;大气模式与其他圈层模式的耦合对精细天气预报的影响以

及数值预报的不确定性与集合预报理论的研究。

根据我国数值预报业务的发展现状,未来几年的业务数值预报将集中精力改进完善的工作包括:

(1)提高模式分辨率^[8],完善模式动力框架的协调性能

与世界上较为先进的数值预报中心相比,我国业务预报模式的分辨率明显较粗,还远远不能满足我国现代化天气预报的“精细化”、“定点”、“定量”、“无缝隙”等要求,根据我国的实际条件,合理地提高预报模式的分辨率,同时进一步完善模式动力框架的协调性能,提高模式程序的计算效率是十分必要的。

(2)模式物理过程参数化方案更加精细化^[8]

物理过程的深层次问题随着模式的发展变得更加重要,需要进一步结合有关观测资料,发展切实可行的诊断方法,弥补这方面的不足。同时,具有中国地理特征、天气气候特点的物理过程参数化方案仍有欠缺或空白,需要通过组织一系列中国区域的针对性观测试验,开展深入研究。此外,对于影响降水过程的物理方案,如云预报方案,次网格尺度积云对流参数化方案,云与辐射的相互影响,影响水分循环的陆面过程、边界层过程等在诊断评估的基础上进一步改进、完善。业务数值预报模式正在朝着不断完善的方向发展。随着模式分辨率的提高,云微物理过程、陆面过程和湍流过程、考虑坡度坡向因子的辐射过程等在模式中的参数化方案,以及模式垂直坐标的选择越来越受重视,这些物理过程的描述成为业务数值模式改进的关键^[4]。

(3)加强资料质量控制,改进资料同化技术,提高非常规资料的应用能力^[6]

要提高预报模式的预报水平,改进模式的初始条件是十分重要的环节。要尽快改进同化方案的技术水平^[5],并在此基础上提高对多种卫星遥感资料、雷达、风廓线仪、GPS、自动站加密观测等资料的应用水平^[3],特别是有云区卫星遥感资料在数值预报中的有效应用,逐步改进卫星、雷达等遥感资料和近地面稠密资料的同化应用效果。全球同化系统的重点是卫星辐射率资料,区域同化系统的重点是与降水相关的高时空分辨率的观测资料(包括雷达径向风和反射率、地基GPS可降水量和地面自动站观测资料等)。以四维变分同化为基础的集合—变分同化或混合资料同化技术将成为未来资料同化技术的主流发展方向。未来资料同化的重点任务是:优化改进变分同化框架,优化同化过程中的模式物理过程计算方案,提高并行计算效率和四维变分同化的海量数据快速处理能力;提高卫星、雷达、地面自动站等多种资料的精细质量控制水平;优化各种资料的同化技术,提高资料使用率和使用效果^[4];改进快速同化分析与预报循环方案,实现多源稠密资料的有效同化应用。

(4)建立模式诊断平台,提高对预报模式的改进能力

在预报模式的改进过程中,有针对性地建立模式诊断平台,充分利用现有的常规、非常规观测资料,对模式各方面的合理性做出诊断,为预报模式的改进指明方向,逐步提高对预报模式的改进能力^[3]。

(5)加强数值预报开发人员与预报员之间的交流,增强模式预报产品检验和应用情况的反馈模式的深入发展与不断在应用中发现模式存在的问题并逐步改进密切相关。除了系统的预报结果检验外,在预报应用中发现模式中存在的问题也是一种有效的途径。预报员通过对天气系统的预报效果的追踪,可指出模式对某些天气系统预报上存在的系统性缺陷,从而为模式开发人员深层次的诊断改进提供依据和方向。

(6)业务应用软硬件支撑能力的提高

数值预报支持系统的支撑能力和应用拓展会逐步得到完善和加强^[9]。随着数值预报业务的深入发展和全面展开,计算机硬件资源问题,图形图像软件、模式系统版本管理、诊断分析工具及庞大的业务数值预报系统的开发和稳定、可靠、有效运行将得到进一步的保障。

(7)发展集合预报技术

集合预报^[7,10]作为解决单一性预报不确定性问题的途径,正在越来越多地被预报部门所重视。应用集合预报发展灾害性天气的概率预报将是今后灾害天气预报的发展方向^[3]。集合预报也将为预报员的天气系统分析预报和面向用户需要的针对性预报提供更加广阔的参考空间。

1.2.3 雷达预估降水研究进展

天气雷达以其高时空分辨率弥补了地面站网观测资料不足的缺点,在定量估测降水方面具有独到的优势。Bent 等^[11]首先提出雷达降水估计的概念,并说明了雷达定量估测降水的不确定因子。Marshall 和 Palmer^[12]提出 $Z=200I^{1.6}$ 的关系式并解释 DSD 与回波因子以及降水强度之间的关系,在数学上建立了回波因子与降水强度的相关。Twomey 等^[13]开始注意到 $Z-I$ 关系随着不同的地理位置以及降水系统存在很大差异。Joss 等^[14]利用波长为 4.6cm 的垂直扫描雷达所得到的回波资料转换成雨量,与 4 个雨量站的平均雨量以及雨滴谱仪计算的雨滴直接分布相比较,得出 $Z=300I^{1.4}$ 的关系式。Ninomiya^[15]运用变分法原理,使用雷达和雨量计观测资料做暴雨的客观分析。Ahnert 等^[16]应用卡尔曼(Kalman)滤波, Tanguay^[17]采用最优化校准法进行降水估测。戴铁丕等^[18]初步研究了雷达探测区域性降水的可能性。林柄干等^[19]将最优化方法与变分校准法结合起来,改进了天气雷达测定区域降水量的方法,提高了估测的精度。李建通等^[20]将最优插值法用于天气雷达测定区域降水量并进一步探讨了其估测精度,丰富了我国在雷达—雨量计估测降水上的客观分析方法。郑媛媛等^[21]利用卡尔曼滤波校准法、最优化法、概率配对法在淮河流域雨季不同气候区进行降水估测。结果表明:卡尔曼滤波校准法估算结果最好,概率配对法次之,最优化法估算误差最大。李建通等^[22]利用时间权重法提高雷达资料对实际降水强中心、降水范围等空间分布特征的预报能力,更好地满足联合估测对雷达初值场的要求,可以有效提高估测区域降水量的精度。黄小玉等^[23]用漂移克里金方法来改进定量估测降水的精度和提高处理速度,在业务研究上进行新的探索和尝试。黄勇等^[24]以淮河流域为对象,在假设 $Z-I$ 关系法、平均校准法、最优插值法、卡尔曼滤波法和最优插值法联合校准及卡尔曼滤波校准法等 6 种降