

中国科学技术部

863空间信息获取与处理前沿技术(2002AA135360)

气象资料共享系统建设(2001DEA30029) 研究专著

大气遥感再分析场 构造技术与原理

徐祥德 许健民 王继志 等著

气象出版社

9

中国科学技术部

863 空间信息获取与处理前沿技术 (2002AA135360)

气象资料共享系统建设 (2001DEA30029)

研究专著

大气遥感再分析场构造技术与原理

徐祥德 许健民 王继志 翁永辉 张佳华 著

气象出版社

内容提要

随着信息技术的迅猛发展,围绕大气上空气象卫星数量和探测项目剧增,卫星地球大气探测数据亿万倍增加,传统地面、高空大气探测及其数据的有限分布,以及基于有限数据的大气结构理论模型将在本世纪面临新的挑战。空基与地基大气探测的点面结合,形成大气遥感“再生分析场”的构造对大气探测事实的揭示及大气运动规律的理论研究将产生重大影响。《大气遥感再分析场构造技术与原理》讨论了当前地球大气遥感信息技术在气象领域开拓发展的理论与技术热点问题。

本书综合阐述了应用大气遥感信息结合常规大气观测构造“再生分析”的技术和原理。书中对遥感信息在气象观测、研究、分析、预测等方面技术发展进行了系统论述。既重视理论的论述,也给出构造“再生分析场”的实际应用研究。全书共有九章,第一章:大气遥感构造“再生分析场”技术,第二章:遥感数字图像技术,第三章:云导风分析原理,第四章:陆-气遥感场结构变分模型,第五章:大气遥感场点-面相关结构综合模型,第六章:大气遥感场统计-动力再分析模型,第七章:模式大气场遥感结构变分与同化技术方法,第八章:气候-生态陆面过程参数化遥感模型及其分析技术以及第九章:大气遥感场分析技术预报系统流程设计等。

本书可供气象研究人员、预报人员及卫星气象工程技术人员阅读参考。也可供气象、地理、地球物理、生态环境专业大专院校及师范院校师生及研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气遥感再分析场构造技术与原理/徐祥德等著

北京:气象出版社,2002.10

ISBN 7-5029-3456-1

I. 大… II. 徐… III. 气象-大气遥感 IV.P407

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第079021号

Daqi Yaogan Zaifenxichang Gouzao Jishu yu Yuanli

大气遥感再分析场构造技术与原理

徐祥德 许健民 王继志 翁永辉 张佳华 著

责任编辑:俞卫平 张婉佩 终审:周诗健

封面设计:王伟 责任技编:吴庭芳 责任校对:李峰

气象出版社 出版

(北京市海淀区中关村南大街46号 邮编:100081)

北京金瀑印刷有限责任公司印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:15.0 字数:390千字

2003年1月第一版 2003年1月第一次印刷

印数1~1000

ISBN 7-5029-3456-1/P·1228

定价:48.00元

序一

1960年4月1日美国成功地将第一颗试验气象卫星——电视和红外观测卫星(Television and Infrared Observation Satellite, TIROS)送入轨道,开创了人类从空间探测地球大气的新纪元。此后气象卫星探测原理和气象卫星信息的应用方法研究的一个新学科——卫星气象学诞生。

1970年我国气象工作者在这一崭新的领域作了开创性的研究。当时我与中科院大气物理所、中国气象局一批年青人开始从事我国的卫星气象领域的研究工作,对中纬度天气系统的卫星云团特征、台风系统的监测分析、热带天气系统、中国的暴雨天气系统、强对流天气系统等采用卫星资料进行分析,从卫星遥感图像重新认识大气环流与结构、认识天气系统的发生发展有了很大启发。

然而,最近10年来,随着卫星技术的发展,围绕大气上空气象卫星数量和探测项目剧增,卫星地球大气探测数据的增加,特别是数字化探测数据的增加,大气结构的一些理论模型概念等研究揭示了许多新的事实。一个由空基与地基大气探测的点面结合,形成大气遥感“再生分析场”的构造对大气探测事实的揭示,以及大气运动规律的理论研究的新学科领域,在本世纪必将有更大发展。徐祥德、许健民、王继志等《大气遥感再分析场构造技术与原理》论著是当前地球大气遥感信息技术在气象领域理论应用的探索。

当前我们十分需要一套分析技术,把空基-地基大气探测信息融合起来,以重新认识大气观测事实、探讨大气运动的规律,以提高和改善对大气结构、发展、演变的认识。发展遥感信息的气象综合应用技术,以提高对灾害天气的预测水平也是当前国家社会、经济发展和技术进步的迫切需要。

这本书阐述了遥感数字图像应用技术,卫星云导风技术、陆气遥感场结构变分模型、遥感场点面相关结构同化技术、气候-生态陆面过程参数化技术以及遥感场分析预报系统流程设计等技术。本书作者总结了他们多年积累的研究成果,我相信这本书的出版,将有益于推进现代探测与卫星遥感信息应用技术的发展,并对此领域的理论深化具有重要学术价值。

陶埏言

2002年12月

序二

随着信息技术的迅猛发展,围绕大气上空气象卫星数量和探测项目剧增,卫星地球大气探测数据亿万倍增加,传统地面、高空大气探测及其数据的有限分布,以及基于有限数据的大气结构的一些理论模型概念等将在本世纪面临新的挑战。利用空基与地基大气探测的点面结合途径,构造大气遥感“再生分析场”的新思路”显著地反映了高新技术发展的趋势。《大气遥感再分析场构造技术与原理》讨论了当前地球大气遥感信息技术在气象领域开拓发展的理论与技术热点问题。本书的出版发行,将会在大气探测新技术及其遥感理论研究的新发展起到推进作用。

如何叩开卫星遥感信息应用的之门?多年来,本书作者已做了有益的尝试,本书作者从领域开拓与积极推进现代探测技术应用的角度,初步探讨了卫星气象遥感信息应用问题,并总结了作者近年来有关遥感应用的研究成果。该书的出版为我们开拓空基-地基大气综合探测及其点-面结合新技术途径实施作一示范,为探讨近代大气观测综合信息的融合新途径,发展气象遥感综合应用技术迈出了一步。

本书首次阐述了大气遥感信息结合常规探测构造“再生分析场”技术方案的可行性,尤其对遥感信息在分析与预测等方面应用技术发展作了探索性的研究。本书既重视理论与算法的结合论述,也给出构造“再生分析场”的统计-动力或变分数学模型。本书涵盖了遥感数字图像应用技术,卫星云导风技术、陆气遥感场结构变分模型、遥感场点面相关结构综合模型,大气遥感场统计-动力再分析模型,遥感大气场结构同化技术、气候-生态陆面过程参数化技术以及遥感场分析预报系统流程设计等技术。书中大气遥感再生分析技术颇有新意,表现了信息时代的特征。我们也热切地期望,在本书出版后,将有更广泛、更有效的遥感应用新技术方法如雨后春笋般的涌现。

相信该书的问世将会受到广大读者欢迎。

李黄

2003年1月

前言

从 60 年代第一颗人造气象卫星升空和第一张卫星遥感云图问世至今不过 40 个年头,人类对地球大气层的结构与演变的认识已发生了深刻的变化。从 80 年代至今仅仅 20 年时间,从把卫星云图当作类似“天气图”的工具,转变为卫星数字化信息体系,采用科学运算和物理分析。人们对卫星信息的认识能力也从“看图识字”到物理理解,又向前跨越了一大步。本世纪内卫星遥感信息从品质到数量,从多种产品到多领域应用都将会出现一个划时代的进展。本书仅在跨入本世纪之初,为读者介绍了近年来这一交叉领域新技术发展—大气遥感“再生分析场”的技术与原理。毫无疑问,在本世纪大气科学研究与发展过程中,对大气的结构、运动的机理的认识,通过大气遥感“再分析场”研究,将会给人们一些新的想法和数值分析“解读”技术。这将是一项新的遥感大气系统工程学技术。

本书仅仅为读者提供了探索大气遥感新技术这一领域的尝试性工作。徐祥德、许健民和王继志负责本书总撰写,各章内容及主要撰写人如下:第一章:大气遥感构造“再生分析场”技术,徐祥德、王继志;第二章:遥感数字图像技术,王继志、徐祥德;第三章:云导风分析原理,许健民;第四章:陆-气遥感场结构变分模型,徐祥德、翁永辉;第五章:大气遥感场点-面相关结构综合模型,徐祥德、王继志;第六章:大气遥感场统计-动力再分析模型,徐祥德;第七章:模式大气场遥感结构变分与同化技术方法,徐祥德、翁永辉;第八章:气候-生态陆面过程参数化遥感模型及其分析技术,张佳华;第九章:大气遥感场分析技术预报系统流程设计,王继志。

本书撰写过程中,我们从曾庆存、周秀骥、陶诗言、陈联寿等先生有关研究成果与学术思路获得了重要的启迪,另外,本书作者得到了毛节泰、葛润生、田国良、肖乾广、方宗义、张光智、张文建、董超华、刘玉洁、丁国安、刘瑞云等专家、学者及国家卫星中心、中科院遥感所技术人员的合作和支持,还要指出的,周秀骥、陈联寿等先生为本书有关章节作出了贡献,还有孟志勇、柏晶瑜、杨元琴、张胜军、林枚、解以扬、何平以及甄新蓉等分别参加了本书有关章节部分工作;于淑秋、滑桃等参加了本书编辑的有关技术工作;张其松、苗秋菊、林建、徐晶、杨玉华、姚文清等也为本书的出版做出了贡献。作者在此深表谢意。

限于时间仓促,书中错漏在所难免,敬请指正并深致谢意。

作者

2002 年 10 月

目 录

序一

序二

前言

第一章 大气遥感构造“再生分析场”技术	(1)
第二章 遥感数字图像技术	(8)
2.1 暴雨云轨迹 TBB 特征分析	(8)
2.2 卫星遥感 TBB 水汽特征合成分析	(12)
2.3 边界层风场结构再分析	(18)
2.4 大气廓线仪观测锋面及气旋系统特征	(24)
2.5 数字云图 Hovmoller 分析技术	(29)
2.6 卫星数字化 Bogus 分析技术	(35)
第三章 云导风分析原理	(47)
3.1 气象卫星风产品的定义及其物理原理	(47)
3.2 气象卫星风产品推导的算法	(47)
3.3 气象卫星风质量检查方法	(51)
3.4 卫星导风关于描述对流层上部环流形势的应用分析	(53)
第四章 陆-气遥感场结构变分模型	(58)
4.1 中尺度暴雨锋面结构物理图像遥感变分分析	(58)
4.2 高原大气结构遥感变分分析	(68)
4.3 高原下垫面热力结构遥感变分分析	(79)
4.4 城市热岛遥感变分分析	(86)
4.5 雷达回波降水场变分技术	(87)
第五章 大气遥感场点-面相关结构综合模型	(92)
5.1 卫星遥感 TBB 场台风螺旋波相关模型	(92)
5.2 大气气溶胶点-面结合遥感监测分析模型	(99)
5.3 TRMM-PR 测雨雷达与暴雨强度综合分析	(108)
5.4 雷达、卫星探测资料对台风结构的综合分析	(112)
第六章 大气遥感场统计-动力再分析模型	(120)
6.1 暴雨试验卫星-雷达-地面雨量站综合分析技术方案	(120)
6.2 云图资料统计模型的降水估算方法	(124)
6.3 GMS 卫星云图云型结构滤波技术	(130)
第七章 模式大气场遥感结构变分与同化技术方法	(135)
7.1 遥感变分模式初估场分析与高原区域降水模拟	(135)
7.2 暴雨预测的遥感 TBB-nudging 四维同化技术	(147)
7.3 卫星遥感 TBB-nudging 与台风 BOGUS 综合技术	(158)
7.4 沙尘暴预报的 TOVS 变分技术分析	(160)

第八章 气候-生态陆面过程参数化遥感模型及其分析技术	(171)
8.1 卫星遥感陆面过程参数化分析技术	(171)
8.2 卫星遥感陆面植被光合生产力模型	(178)
8.3 卫星遥感陆面生态过程气孔导度参数化技术	(185)
8.4 卫星遥感全球生态-气候响应分析技术	(190)
8.5 卫星遥感区域生态过程对东亚季风响应评估技术	(195)
8.6 卫星遥感生态陆面土壤湿度场变分分析技术	(198)
第九章 大气遥感场分析技术预报系统流程设计	(207)
9.1 信息收集和处理	(207)
9.2 卫星通讯与资料分发	(215)
9.3 预报系统流程设计	(221)

第一章 大气遥感构造“再生分析场”技术

人类对大气的探索和研究付出了艰辛的努力，从地面观测到放飞风筝和热气球探测、气球探空仪观测，人们对大气的观测和预测水平不断提高。目前，常规的地面和高空探测网，和基于常规观测网的大气观测和预测系统正经历着一个变化的时代。人们对已形成的目前的常规观测资料水平是不满足的。气象探测技术经历了飞速发展的时期。其中之一是气象火箭探测。美国对高层大气探测始于第二次世界大战之后。美国第一枚气象火箭安装了一个称为专门的“工作间”(workhouse)，主要探测温度、气压、大气密度和风速分量，探测高度可达 100 km。火箭探测的一个重要技术进步是不仅它的探测高度远超过了常规气球观测所能达到的高度，更重要的是，火箭探测资料改变了人们长期以来对大气垂直廓线结构的误解。例如，在中纬度地区标准大气的温度廓线中，逆温层在 0℃ 附近(图 1.1)，而不是一直沿用到 1951 年的标准大气模式^[1]中的 70℃ 为逆温层(图 1.2)。由此可见，遥感大气探测的每一项技术进步对气象科学的影响都是深远的。气象学家们努力探索新的探测资料、手段和技术发展，花费了巨大努力，包括人力和物力上的经费。图 1.3 给出了自上世纪 50 年代以来气象火箭大气探测技术的发展历程。由图 1.3 可见，20 世纪 50 年代初，一枚气象火箭耗资 40 万美元，到了 50 年代末，火箭技术水平提高，由于发展小型火箭的趋势，使耗材有所降低。但是用气象火箭探测大气仍然是布点有限，且业务化耗资巨大，因此，技术发展受到限制。

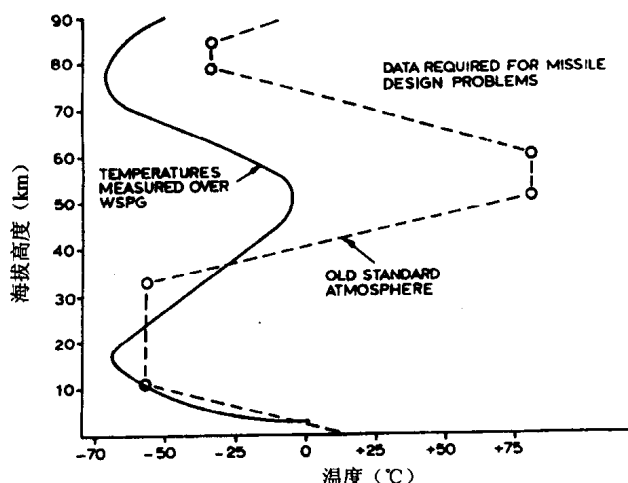


图 1.1 火箭观测的大气垂直结构

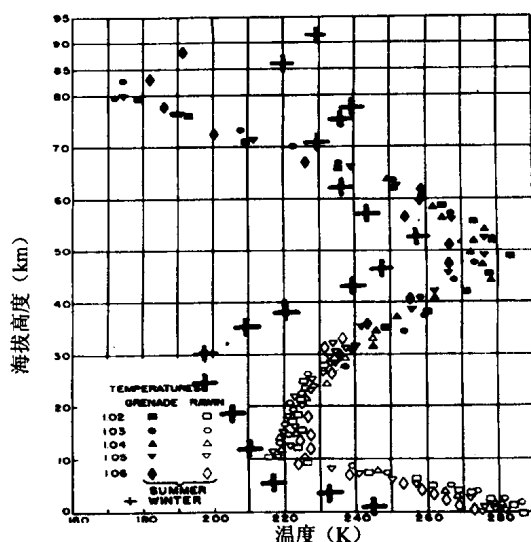


图 1.2 火箭观测与常规观测大气平均结构的对比

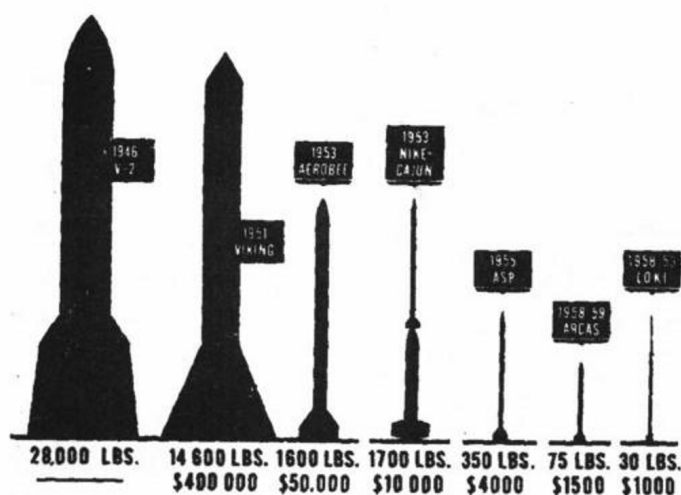


图 1.3 气象火箭探测技术的发展

大气探测技术的一个划时代的发展是气象卫星探测。1960 年 4 月美国发射了第一颗气象卫星 TIROS (Television and Infrared Observation Satellite), 从此改变了人类对大气的认识, 从通过离散探测资料描述大气活动进入到可以给出大气中云系活动的全貌。由此, 已往从常规离散资料所推测的大气结构和现象, 有的得到物理解释, 有的得到了证实。时隔一年, 1961 年 7 月, 美国第一颗可以用于气象业务观测的 TIROS-III 卫星发射成功。该卫星于 1961 年 7 月 12 日发射升空, 9 天以后, 它恰好通过加勒比海上空。1961 年第一个加勒比海飓风安娜 (Anna) 的面孔第一次展示在人们的面前。W.R.Bandeen 和 B.J.Conrath 等^[2]收集了 5 条通道的探测资料研究飓风安娜的活动。图 1.4 和图 1.5 分别是第一幅 TIROS 卫星的电视图像和 TBB 分析, 这是人类第一次由气象卫星遥感信息给出的热带气旋的移动轨迹。W.R.Bandeen 等在研究结论中预示^[2], 卫星资料在未来天气研究中, 在跟踪和诊断强天气系统的发生、发展和移动方面前景看好, 并首次提出热带气旋的云顶相当黑体温度 TBB 分析的意义。上世纪 60 年代, 卫星大气探测时代的开始, 预示着大气科学研究进入了新的时代。

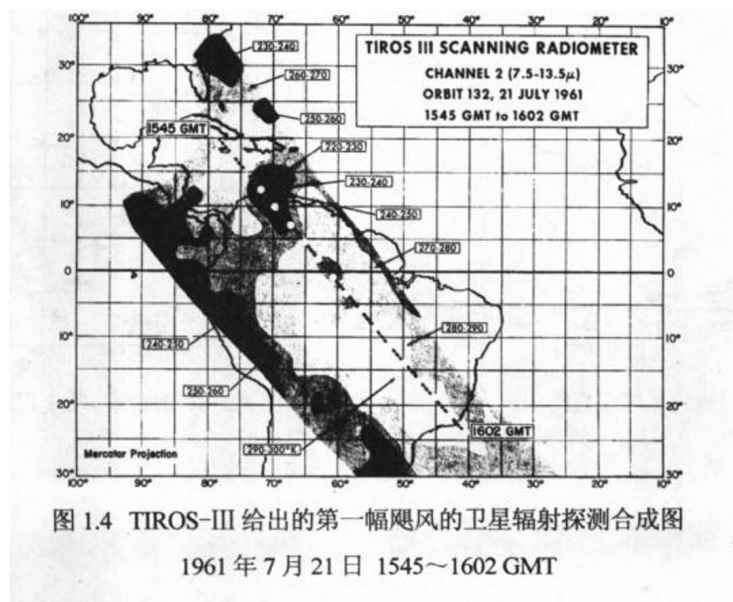


图 1.4 TIROS-III 给出的第一幅飓风的卫星辐射探测合成图

1961 年 7 月 21 日 1545~1602 GMT

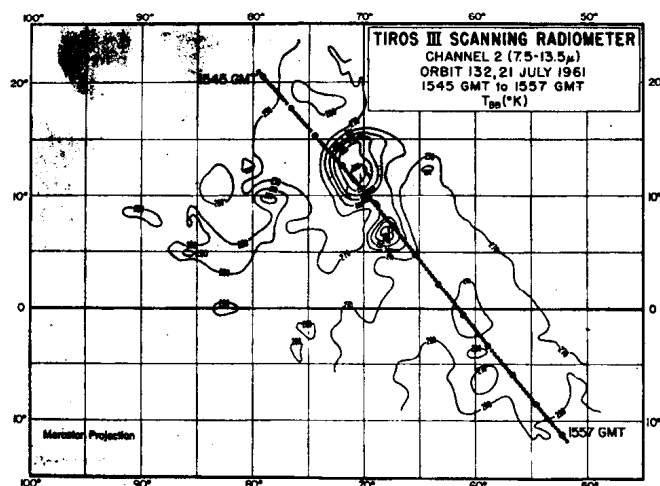


图 1.5 TIROS-III 给出的第一幅对飓风的卫星 TBB 分析图
1961 年 7 月 21 日 1545~1557 GMT

陶诗言是我国卫星气象、以及气象卫星资料在天气分析和预报中的应用这一领域的开拓者。自 20 世纪 70 年代以来,在卫星气象领域进行了多方面的研究。卫星资料广泛地应用于大尺度天气系统的特征分析、热带气旋的监测和分析研究、热带天气系统和热带环流分析研究、降水分析和预报研究、中尺度强对流天气系统分析以及数值预报中的应用研究等诸多领域。

在世界上第一颗气象卫星发射成功后的 10 年间,我国气象工作者在气象卫星云图用于天气分析和预报方面开展了大量工作,并取得进展:(1)云图定位和云的分类识别;(2)不同天气系统的云型特征及其与天气系统的配置关系;(3)一些主要天气系统发展过程中的云型特征演变及概念模式。在陶诗言等(1974)^[3]撰写的《卫星云图使用手册》一书中,对影响我国主要天气系统的云型特征及其演变作了全面的总结和论述。书中分别阐述了电视云图和扫描辐射仪云图的特点、云图识别的方法、中纬度系统的云图特征、高原的云图分析、低纬度的云图分析以及其他各种云图应用的介绍。

曾庆存研究指出^[4],利用气象卫星获得的全球的气象资料,是监视和预报天气变化以及进行大气科学研究强有力的工具。气象卫星能在大气之外对大气状态进行间接的遥感探测(简称遥感),曾庆存还从理论上阐述了遥感信息的测值即是对被遥感量发出的信号沿空间的积分的原理。论证了两类典型问题——气温遥感和大气成分的垂直分布遥感以及两类最基本的遥感方式——频谱法和扫描法所对应的遥感方程的适定性问题;提出了“最佳信息层”概念,在此基础上给出选择遥感通道的可靠方法及一些有效的反演求解方法,由此还推导出在卫星上利用红外法不能测准的近地面层大气的水汽分布。

方宗义、许健民、蒋尚诚等通过卫星信息与常规资料对比研究指出,用急流的特征云系可确定急流轴的位置^[5, 6, 7],采用数字化云图可反演降水分布,数字化云图综合应用于数值预报初始场,这对改进模式的天气过程的描述能力是有益的。陈联寿等应用卫星资料探讨了台风发生发展的云型特征^[6],及西太平洋台风活动的特征^[8],丁一汇、谢安等分析了卫星 OLR 与大气活动的低频振荡关系^[7]。利用 GMS-5 的水汽图像研究了西风带南支气流及青藏高原地区对流层

上部水汽分布特征^[9, 10]。王继志研究表明, 50 年代天气学研究发现的高空急流可以通过卫星观测加以证实^[11]。图 1.6 是根据 1973 年 7 月 2 日 08 时高空 200hPa 上实测风绘出的高空经向急流轴和流线分析。图 1.7 为 1973 年 7 月 2 日的卫星云图照片, 从照片上可看到, 7 月 2 日这支急流特别明显, 照片上有一条 SSW-NNE 的细长的卷云线(图 1.7), 进一步证实了用常规资料分析得到的高空急流的存在^[11]。

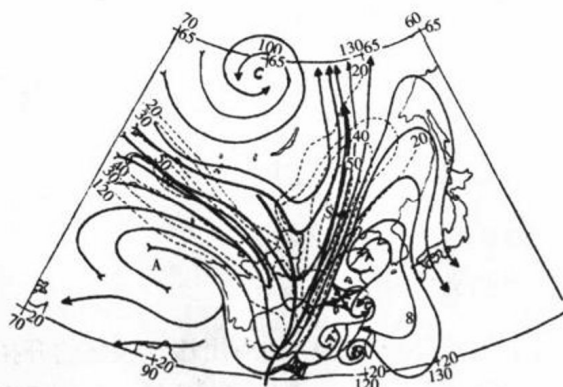


图 1.6 1973 年 7 月 2 日 08 时 200 hPa 上空经向急流轴, 和流线分析(细线为流线点线, 为实测风绘制的等风速线, 粗线为西风急流与南风急流分界线, 图中的数字为风速)



图 1.7 1973 年 7 月 2 日卫星云图照片

上述是在人类第一颗人造气象卫星发射后的仅 10 年间, 我们已通过卫星云图与常规资料结合开展综合分析取得的十分有成果。这表明, 40 年来, 卫星探测技术已经对大气诊断和预测产生了重要影响。

然而, 最近 10 年来, 卫星遥感信息在大气研究中的应用已有了新的发展。如在从观测研究向数字化研究方面, 从传统概念天气模型验证和分析向数值模拟的动力学研究方面, 以及从卫星气象电视图像研究向卫星遥感信息同化形成大气结构综合再分析, 由点到面的研究等。21 世纪卫星遥感信息在数值预报初始场技术更新以及大气结构和观测系统更新方面将会有更广泛的发展前景。正如曾庆存指出的, 卫星遥感信息反演技术是十分有意义的新信息层, 卫星信息同化为未来数值天气预报系统的信息更新提供了新的途径。另外, 随着人造卫星、无人驾驶飞行器、定高气球探测、地面雷达探测、大气廓线仪、GPS 等技术的高速发展, 针对某区域大气变化上游区域或关键相关区(称为强信号遥相关区), 可采用空基或地基遥测系统实施机动阶段性探测。强信号遥相关区的选择, 可通过数值模拟或四维同化数值试验来判别某区域是受上游天气系统影响的“敏感信息源区”。例如, 此类最佳“敏感信息源区”的机动监测探测手段曾在 SPECTRUM TCM-90 西太平洋台风联合试验等大型国际科学试验计划中实施。这些机动探测所获取的相关敏感信息源, 为各类大气科学领域不同研究目标提供了丰富的再分析信息, 取得了成功的科学试验成果。热带气旋结构的分析往往依赖于资料的获取程度。这方面研究工

作进展缓慢, 主要障碍在于缺乏热带气旋内部及其临近影响域的探测信息。1990 年 7~9 月在西北太平洋海域举行了台风现场试验。该试验包括三个独立部分, 即亚太台风委员会的台风特别试验(SPECTRUM-90), 美国的热带气旋现场试验(TCM-90)和前苏联的台风试验(TYPHOON-90)。试验的机动探测系统手段是用飞机、船舶、卫星探测、雷达探测、机载多普勒雷达、垂直风廓线测风仪、漂浮站以及加密的常规地面观测和探空, 对选定台风的内部和外围连续观测。选用 1990 年 9 月 16~18 日美国热带气旋现场试验(TCM-90)资料, 此资料包括有关台风 Flo 的 T42 客观分析、加密探空、飞机下投探测等部分, 绘制测点分布。图 1.8 为加密探空点(三角形)与飞机下投探测(实心原点)在飞行路径周围的探测位置。

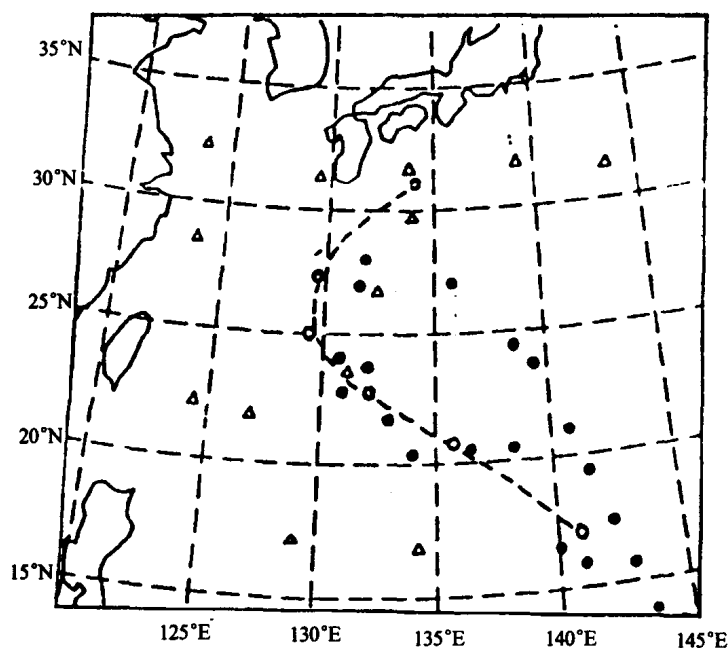


图 1.8 TCM-90 试验(台风 Flo)加密探空点与飞机下投探测点分布(1990 年 9 月 17 日 00 时(GMT))

(△: 加密探空点; ●: 飞机下投探测点)

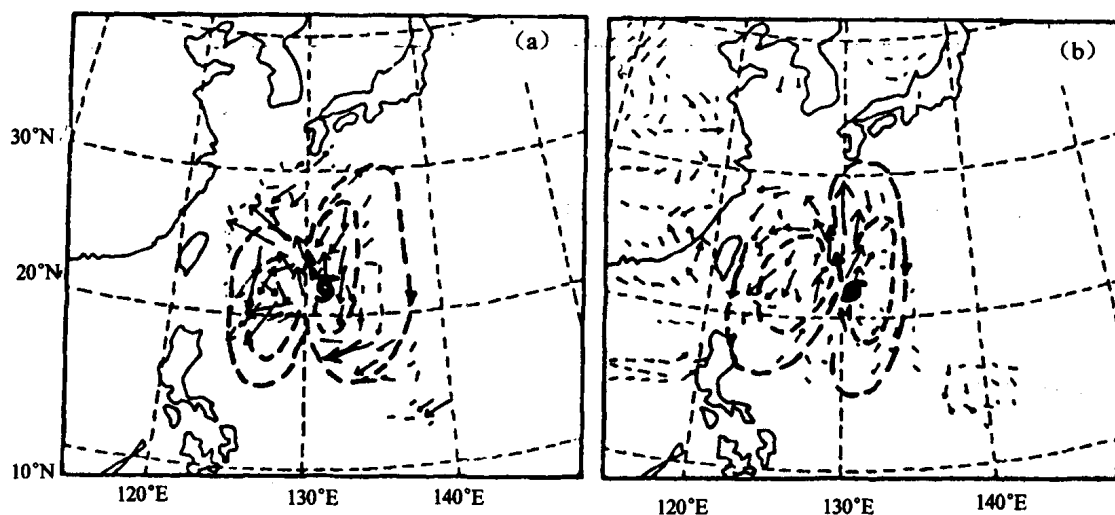


图 1.9 偏差场风矢分布(1990 年 9 月 16 日 00 时(GMT)) (a) 850 hPa, (b) 500 hPa (其中虚线为偶极子环流)

徐祥德、陈联寿等对 TCM-90 现场科学试验资料分析研究表明^[12], 采用数值分析场 T42 资料与 TCM 加密探空, 飞机下投探测三者合成分析场与 T42 常规分析场两者的偏差矢量场, 以描述飞机下投探测等机动探测的再分析能力。由图 1.9 (a)、(b) 偏差矢量场(1990 年 9 月 16 日 00 时(GMT))分别表明, 在不同层次描述出 Gray^[13]提出的非对称偶极子环流特征理论模型, 即 850hPa、500hPa 偏差场的“再分析场”清晰表明了 TCM-90 现场试验给出的有关加密探空与飞机下投探测合成分析对台风非对称动力结构有很好的描述能力。风矢偏差场台风区域东西两侧为一对气旋与反气旋环流的非对称偶极子, 且这对偶极子系统间气流特征呈“通风流”特征。这说明采用遥感技术在敏感区域实施机动型探测手段, 获取关键敏感区新信息源, 建立与信息源有关的“再生分析场”能够描述出常规资料所无法表现的大气精细结构系统特征。

20 世纪 50 年代以来, 随着计算机技术、卫星遥感空间技术, 地面单点探测、遥测技术的迅速发展, 大气科学领域广泛采用空-基结合、遥感-遥测结合的高新技术途径, 使大气结构成分分析在空间高分辨率信息的特点下取得了突破性进展。换言之, 尤其对大气结构的卫星遥感与地面观测“点-面”信息层有机联系构成了逼近于客观的数学反演模型, 以求解大气结构和成分的高分辨率时空变化人造“再分析场”。这类新一代的广义“再分析场”已显示出逐渐逼近真实地对大气结构与成分的描述能力, 意味着这是一项意义深远的革命性技术进步。本书作者徐祥德、许健民等从卫星遥感信息在大气结构与天气过程物理分析入手, 强调构造“再生分析场”反演数学模型原理, 其中人造再生分析场各类反演函数称为广义反演模型, 即包含统计模型、变分泛函模型、动力模型、统计-动力模型和“四维同化模型”等。若假设高分辨率人造“再生分析场”是由卫星遥感与各类地面、探空与遥测或观测信息场通过广义反演数学模型的融合或同化加工处理而获取的, 即可写为如下形式:

$$\tilde{T} = \mathfrak{R}(T^*, T'_0)$$

或

$$\tilde{T} = \mathfrak{R}_N(T_0 T_1 T_2 \cdots T_N)$$

其中 $\tilde{T}$ 为三维人造再生分析场, T^* 为三维高分辨卫星或其它遥感信息场, T'_0 为各类探空与地面遥测或观测三维实测信息场, $\mathfrak{R}(T^*, T'_0)$ 为广义反演数学模型, 若采用四维同化技术, 则广义反演数学模型为另一类 $\mathfrak{R}_N(T_0, T_1, T_2, \cdots, T_N)$, 其中 $T_0, T_1, T_2, \cdots, T_N$ 为多时刻四维信息场。

上式中, $\mathfrak{R}_N$ 广义函数不仅包括变分泛函模型、统计模型与动力模型、统计-动力模型等, 且可将四维同化方法中有关多时刻模式同化变形方程组亦作为广义反演数学模型之一。上述广义反演模型可采用各类卫星遥感、雷达与地面探空常规与非常规观测信息进行融合加工处理。形成点-面结合或多时刻四维同化等各类新技术途径(如图 1.10 所示), 实现建模构造人造“再生分析场”。这将是本世纪大气结构研究与天气预测技术发展的一项新的具有开拓性的领域。

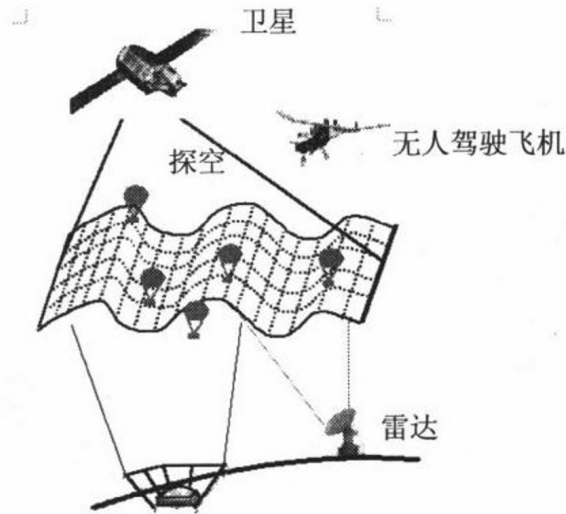


图 1.10 卫星遥感与探空、雷达、无人驾驶飞机点-面三维立体综合探测系统示意图

参考文献

1. H. J. Aufm Kampe and M. Lowenthal, Review of U. S. Meteorological Rocket Network Activities and Results Washington, D. C. First International Symposium on Rocket. 1962, p.5-33.
2. W. R. Bandeen, B. J. Conrath, A Radiation View of Hurricane Anna from the TIROS III Meteorological Satellite, First International Symposium on Rocket, 1962, 224-223.
3. 陶诗言等. 卫星云图使用手册, 农业出版社, 1974 年.
4. 曾庆存. 大气红外遥感探测的一些理论问题, 中国科学, 1978, 第 5 期, 3~5.
5. 蒋尚诚. 利用卫星云图分析中低纬度(西风槽与热带低涡)的相互作用. 气象卫星资料分析文集, 北京: 气象出版社, 1985, 36-42.
6. 方宗义. 台风发生发展的云型特征与高空环境场的关系. 大气科学, 1982, 6: 274-282.
7. 许健民、郑新江、徐欢. GMS-5 水汽图像所揭示的青藏高原地区对流层上部水汽分布特征. 应用气象学报, 1996, 7: 246-251.
8. 陈联寿. 关于台风路径趋势与大形势环流关系的初步探讨. 台风会议文集, 上海: 上海人民出版社, 1972, 28-56.
9. 丁一汇、范惠君等. 南支槽与台风高空气流的相互作用及其对天气的影响. 全国气象卫星云图接收应用会议文集. 北京: 科学出版社, 1974, 127-142.
10. 谢安、叶谦, OLR 低频振荡与西太平洋台风的发生, 应用气象学报, 1994, 5, 143-158.
11. 王继志. 1973 年 7 月 2 日北京特大暴雨分析. 气象科技(创刊号) No.1, 1974, 1-9.
12. 徐祥德、陈联寿、解以扬、亢迪. TCM-90 现场科学试验台风 FLO “ β 陀螺” “通风流” 非对称动力结构特征. 气象学报, 1996, 54 (5).
13. Gray, W. M., Tropical cyclone propagation. Preprints of 19th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Amer. Meteor. Soc. Boston. MA. 1991. 02108. 305-390.

第二章 遥感数字图像技术

2.1 暴雨云轨迹 TBB 特征分析

曾庆存研究指出^[1], 利用气象卫星可以获得全球的气象资料, 它是监视和预报天气变化以及进行大气科学研究强有力工具。气象卫星在大气之外对大气状态进行间接的遥感探测 (简称遥感), 曾庆存还从理论上阐述了遥感信息的测值即是对被探测量发出的信号沿空间积分的原理。因此, 引入“最佳信息层”概念可以鲜明地表达各种具体问题的特点或特征。卫星遥感由不同通道采集的各种具有显明物理特征的信息对所表达的如云顶温度、黑体温度 TBB、水汽通道给出的“水汽云图”等, 在讨论灾害性天气发生、发展及其形成机理中获得广泛应用, 取得很好的成果。

1998 年我国长江流域发生了全流域罕见特大洪水。人们对此百年来罕见暴雨洪水过程十分关注, 已开展了许多研究。廖清海、陶诗言^[2]的研究指出, 青藏高原上空的非均匀加热对中国东部降水有显著影响。郑新江、陶诗言^[3]的研究表明, 1998 年 7 月在武汉的特大暴雨与 β 中尺度系统的发展有关。徐祥德、陶诗言、王继志等^[4]研究指出, 来自高原的水汽通道对支持 1998 年和 1991 年长江下游暴雨起了重要作用。高原对东亚乃至全球天气气候的影响问题的研究是当今人们注意的焦点^{[4][5]}。本节采用 1998 年第二次青藏高原大气科学试验 (TIPEX) 现场观测最新资料, 包括加密探空观测、系留气球资料和遥感信息, 以及高原试验期间中日合作研究 (GAME/Tibet) 基地那曲的 Doppler 雷达资料, 对青藏高原上空发展的积云对流系统及其生成和移动与 1998 年长江流域暴雨的关系进行了综合跟踪观测分析研究, 试图了解高原云系的发展东移及其影响 1998 年长江中下游暴雨过程的观测事实和系统演变发展的机理。这些工作和结果的取得毫无例外地使用了大量遥感信息, 以此来研究重大灾害性天气的发展和机理。因此, 遥感观测资料及开展科学试验中采用的新探测信息的综合应用是十分重要的^{[5][6]}。

2.1.1 高原云系分析

我国气象工作者多年来对高原上空积云发展状况早有论述。叶笃正曾研究指出^[7], 我国青藏高原是一个大气的热源, 叶笃正, 周明煜等通过转盘试验, 提出高原上的热对流可频繁发展。乔全明^[8]指出, 与同高度同纬度其它地区自由大气相比, 青藏高原上空夏季是高湿区, 其比湿比高原南侧的印度、巴基斯坦的比湿还大。冬季高原西部是干区, 但东部仍是高湿区, 其比湿与我国东部平原上空相当。徐祥德、张光智等研究表明^{[9][10]}, 高原上空的高湿与西南季风气流可爬上高原。分析 1998 年 7 月 19 日卫星云图可见, 高原上空对流系统发展十分活跃。但高原云系具有生消快, 发展和移动频繁等特点。高原上气象测站稀少, 过去研究高原大气环流和中尺度气象问题十分困难。1998 年 TIPEX 试验期间, 有许多新的探测仪器架设在高原, 包括系留气艇、声雷达、Doppler 雷达、加密探测等。在综合应用上述探测资料的同时, 采用卫星遥感信息可以得到分辨率高、时间尺度比较小的信息资料。因此, 使用卫星、雷达及加密观测资料可跟踪系统发生、发展和移动轨迹。王继志、杨元琴研究表明^[11], 在高原腹地地区, 这种

云系发展具有初生（如 1998 年 7 月 19 日 04 时）、发展（19 日 07 时）、成熟（19 日 10 时）（见图 2.1）、组织及东移（19 日 13~16 时）和移出高原形成强暴雨系统（10 日 18 时）等阶段^[1]。1998 年 6~7 月间，这种云系在高原腹地地区频繁、快速发展和移动，称为“爆米花”云系。这种中尺度积云群在数字化卫星 TBB 资料的时空剖面分析中可追踪其轨迹的移动。

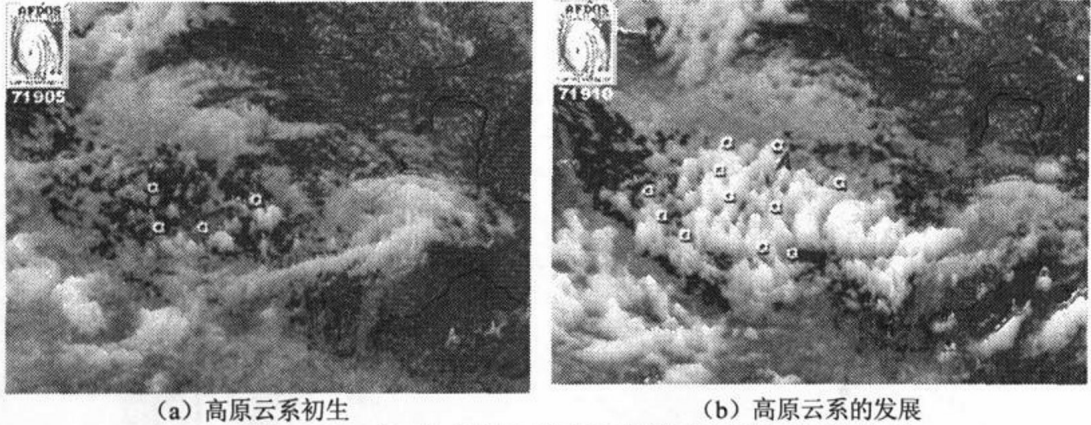


图 2.1 1998 年 7 月 19 日 05 时和 10 时高原地区的卫星云图分析

2.1.2 高原云轨迹 TBB 特征时空剖面分析

图 2.2 是用卫星反演的 TBB 资料制作的 Hovmoller 时空剖面分析，取 $<-30^{\circ}\text{C}$ 亮温描述有组织的云团，从 7 月 11 日到 31 日的 20 天中，在青藏高原上空观测到有 20 次中尺度云团活动。其发展和移动与长江中下游暴雨的关系是十分密切的。TBB 的时空剖面图可反映云系轨迹的时间变化，如图 2.2 是以纵坐标为时间轴，从上至下给出 7 月 11 日至 7 月 31 日（采用每日 24 次或 8 次）的卫星 TBB 信息，横坐标为经度，这样可以描述出云团随时间在经度方向的移动变化，图 2.2 的纬度定在 30°N ，因此反映的是云系沿 30°N 的时间变化。图 2.2 可以看到以下事实：

(1) 高原上空尺度对流活动十分频繁和强盛，从 7 月 11 日到 31 日的 20 天中，在青藏高原上空观测到有 20 次中尺度云团活动。在图 2.2 云团中编号为 1~20。

(2) 从时段上分析，1998 年中下旬长江暴雨洪水期间，高原云系移动有 4 个特征时段。Hovmoller 剖面分析表明，1998 年 7 月中下旬的长江暴雨洪水系统可追溯到高原。

(a) 第 1 号云团：是 7 月 11 日从高原中部发展的云系，东移影响到长江。从 11~15 日，长江上、中游暴雨持续，长江水位上涨。

(b) 第 2~5 号云团：是 7 月 13~16 日从高原西部发展的云系，其出生时期云顶温度未达到 -50°C ，云团移动仅到昌都以西，系统影响未及高原以东地区。

(c) 第 6~8 号云团：是 7 月 17~19 日从高原西部发展的云系，7 月 19 日，其云系在高原上空加强和组织（见图 2.2）云顶温度达到 -70°C ，云团自西向东先后移经昌都-重庆-宜昌-武汉-九江，由于该系统发展、组织和东移影响，20 日在武汉、21~23 日在九江使暴雨洪水灾害更加严重。