

# 《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》导读

许健民 方宗义

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**提 要:** 最近科学出版社出版了译著《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》一书。此书的作者是法国的帕特里克·桑特里特和保加利亚的克里斯托·G·乔治夫。该书的特点是把动力气象的位势涡度理论、数值预报模式输出的物理量场和卫星遥感的水汽图像有机地结合起来,向天气预报人员介绍了一种可操作的预报思路,也为数值预报模式开发者提出了利用卫星水汽图像改进模式的潜在途径。在评述这本卫星气象新书的同时,简要地介绍了本书的结构,各章的主要内容和特点,希望能帮助中国的预报员更好地阅读和理解此书。

**关键词:** 水汽图像 位势涡度 合成水汽图像

## Book Comment and Introduction to 《Weather Analysis and Forecasting, Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis》

Xu Jianmin Fang Zongyi

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Chinese translation of the book 《Weather Analysis and Forecasting, Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis》 written by Santurette and Georgiev is introduced. Santurette and Georgiev bring satellite water vapor imagery and numerical model products together in a logical way. The close relationship between satellite water vapor imagery and potential vorticity fields shown by their book helps not only on the interpretation of satellite imagery, but also on the potential improvement of numerical model performance. This introduction paper analyzed the structure of the book and is favorable for Chinese forecasters to understand the book.

**Key Words:** water vapor imagery potential vorticity composite water vapor imagery

2005年由法国气象局预报研究所 Patrick Santurette 和保加利亚科学院 Christo G. Georgiev 合著、ELSVIER 出版社出版的《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》中译本,已于 2008 年 2 月由科学出版社出版。我们愿意向中国从事天气预报、数值天气预报和卫星气象工作的同事们介绍这本书,并对这本书进行导读。

自从卫星云图出现以来,对卫星云图的解释和使用,立即成为天气预报工作不可分割的组成部分。1960 年美国的 TIROS-1 卫星拍摄了第一幅可见光图像,1970 年美国的 ITOS-1 卫星提供了红外图像。可见光和红外通道的卫星图像,为天气预报人员监视大气中的云系和地表特征提供了有力的工具。但是这些窗区图像对于大气内部的物理状态,却没有观测能力。1977 年,欧洲空间局首先实现了水汽通道图像的观测,为预报人员提供了洞察对流层中上部物理状态的手段。1989 年日本 GMS-4 卫星发射以后,我国的天气预报人员开始使用水汽通道的卫星图像。大家觉得,对像水汽通道这样半透明通道卫星图像的解释,比窗区通道图像难得多。借鉴和学习好国际上的先进成果,提高我们对卫星图像的判读能力是很有必要。

关于卫星图像的解释和应用,我们向预报员推荐 4 本参考书。除了本书,其它 3 本书也都已经翻译成中文出版。Weldon and Holmes (1991, 中译本 1994) 的《水汽图像在天气分析和天气预报中的解释与应用》从辐射传输的基本原理出发,深入浅出地介绍了卫星水汽图像,提供了关于大气三度空间结构的信息,以及各种天气系统在水汽图像上的表现。Dvorak 和 Smigielski (1993, 中译本 1996) 的《卫星观测的热带云和云系》详细介绍了热带天气系统的卫星图像特征。Bader 等 (1995, 中译本 1998) 的《卫星与雷达图像在天气预报中的应用》详细介绍了发生在中高纬度各种天气系统的卫星图像特征。

如果说前面 3 本书的著者以卫星云图制作者的视点,向预报员介绍了卫星图像观测和应用的基本概念;那么《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》这本书的视点则完全不同。著者站在数值天气预报制作者的视点上看问题;在水汽图像上叠合各种数值天气预报的物理量场,然后对水汽图像进行解释,水汽图像上的特征显得更为自然、合理;用卫星观测水汽图像作为依据,修正数值预报初始场,从而获得了更准确的预报结果。本书的创新在于,它为数值天气预报和卫星图像应用的结合,提供了一条可以操作的途径。在本书中,动力气象的位势涡度理论、数值预报输出产品的应用和卫星水汽图像的解释有机地结合起来,取长补短,勾划出天气系统三度空间结构和发展趋势的合理诊断和预期,形成了一种既逻辑严谨,又可以操作的预报思路。他们对云图、天气观测报告和数值模式物理量场的细致观察,从动力气象和大气物理学基本原理出发思考问题的途径,以及所获得的有说服力的科学成果,都值得中国的预报员学习和借鉴。

本书的第一篇介绍了两方面的基础知识。其中第一章是位势涡度的基本概念,属于大气动力学的范畴,它告诉我们,位于平流层下部、对流层上部的高空短波槽,如果叠合到对流层下部原来存在的一条温度梯度密集区上空,那么就可以促使对流层下部和上部的气旋性涡旋同时发展。第二章是水汽图像解释的基本概念,属于大气物理学的范畴,它告诉我们,水汽图像上不同的灰度特征代表了什么。卫星水汽图像上所观测到的灰度,是多个层面的水汽对辐射响应的总效果,水汽图像的亮温当量,常常不代表湿层所在地方的气温。如果大气中的湿层主要出现在对流层下部、在水汽层的上界以上大气相对干燥,对流层内部没有特别低的气温和逆温,并且没有云,那么水汽图像上的灰度分布可以用“湿层等高线法”解释,白亮的地方湿层向上伸展得更高。在大气中存在多个湿层的情

况下,同样的水汽图像灰度可能由多种水汽垂直分布条件造成,可以根据不同的天气形势条件进一步识别。总的来讲,水汽通道的权重函数在400hPa上下,但是在特别低的气温和逆温条件下,水汽图像上可能观察到更低层的信息。云顶高的云一般能在水汽图像上看到,中云位于湿层以下时,也能隐隐约约地被看到。第一篇的内容十分简练。更多的基础知识可以从Hoskins(1985)的文章和Weldon等(1991)的书中查到。

本书的第二篇介绍水汽图像和大气动力场相结合的实际应用。第二篇也分成两章。第三章的内容涉及对水汽图像的解释。第三章在一系列连续的水汽图像上叠加各种数值模式物理量图,以便在解释水汽图像时深入理解其动力特征。第四章的内容涉及如何根据水汽图像诊断数值天气模式的能力,并改善数值模式的初始场。

第三章第3.1节是本书中预报员最应该精读的一节。第3.1节告诉预报员水汽图像上的亮区和暗区如何与大气动力场联系起来。水汽图像上的亮(暗)区代表对流层顶高度高(低),并伴有上升(下沉)运动的区域。与急流相伴的暗区是动力活跃的。动力活跃的干区也称为干闯入,其生命期由三个阶段组成:第一阶段干区与急流相伴;第二阶段干区的前端变得更暗,并与白亮的逗点状亮区相邻;第三阶段干区分成两支,其中北侧的一支在暖输送带和冷输送带相联的地方爬升,在那里形成剧烈的对流天气,而南侧的一支则在冷锋的下面插入,那里如果在对流层上部没有副热带急流、高空反气旋脊、以及它们之间的强辐散区与之耦合(候青,许健民,2006),对流天气不明显。在读本书的第3.1节以前,读者最好先阅读《卫星与雷达图像在天气预报中的应用》第三章第3.1.3节。那本书介绍了组成中纬度气旋三条输送带的概念,即暖输送带、冷输送带和干带。

缺乏运动场时,很难仅依靠水汽图像解释它自己。第3.2节将对流层中上部的风场

与水汽图像叠合在一起进行解释,指出动力活跃的干区是如何形成的。第3.2.1节分析了水汽图像上的干区与急流合并形成对流层顶动力异常的过程;第3.2.2节分析了高空槽振幅加大的过程中,在槽的底部冷空气被切断,急流分裂为两支。每支急流分别对应一条暗带。这两条暗带组成一个像阿拉伯字7那样的三角形暗区,Welden等(1991)将其称之为干三角。后面的第3.5.3节则进一步指出,干三角所对应的对流层顶动力异常,叠合到其前面与叶状云对应的低层暖平流区上空,可以激发出恶劣天气。

那么如果在卫星水汽图像上看到有一个暗区向湿区平流,预报员是否可以判断,马上将会激发出恶劣天气呢?回答是:必须对具体情况进行具体分析。只有当暗区与对流层顶卷折和动力异常相联系时,才是活跃的干区,才能激发出恶劣天气。如果这个暗区只是一股暖干气流,这里对流层顶比较高,不与位涡异常区配合,那么它是不活跃的。第3.3节讨论了两种基本类型的阻塞形势下,暗区与亮区之间的边界,并且指出在某些形势下,暗区只代表一股暖干气流,不是对流层顶动力异常。第3.3.1节指出,在由反气旋发生形成的阻塞形势下,东风气流在对流层中部基本上是干的,水汽图像上的暗区基本上对应槽的极地一侧的动力形势。在这种情况下,要仔细对比。有时候1.5单位位涡面上的位涡异常与暗区的配合,还不如300hPa等压面上的位涡异常与暗区配合得好。只要对流层上部在某个层面上有位涡异常与暗区配合得好,就意味着这个暗区属于对流层顶动力异常的表现,是活跃的。第3.3.2节指出,在由气旋发生形成的阻塞形势下,东风气流在对流层中部基本上是湿的,在这个潮湿东风区的上游的干区,只是从撒哈拉沙漠平流过来极其干燥的暖空气,没有与位涡异常区匹配,因此它是不活跃的。尽管这个干区的下游指向一个湿区,它没有激发出剧烈天气。

第 3.4 节仔细分析了与水汽图像上斜压叶状云初始发展阶段相联系的云和水汽型特征。第 3.4.1 节将数值模式物理量场与水汽图像叠合显示,并配合制作一些剖面图,著者解剖分析了气旋初始发展阶段大气的三度空间结构。斜压叶状云的外观形态可以有不同,与对流层顶动力异常相联系的高空短波槽叠合到低层暖平流区上空,是激发气旋初始发展的标志。第 3.4.2 节用一个例子强调,对流层顶动力异常在水汽图像上表现为一个暗区,这个暗区与 1.5 单位位涡面上的低位势高度区配合;在它的前面,水汽图像上有一个相对白亮的上升运动区,代表动力异常区下游的上升运动;继续向前看,还有一条水汽边界,这条水汽边界与急流轴、1.5 单位位涡面的强梯度区和强湿度梯度区相配合,表明这里是大气中原来存在的斜压带。与对流层顶动力异常相联系的水汽图像上的暗区,逼近其前面原来存在的斜压带,激发了气旋发展。

第 3.5 节是一个过程更加曲折的例子。这个例子向预报员展示,在东风带由反气旋生形成的阻塞形势下,动力干带如何形成,并激发出剧烈的对流天气。如果说第 3.4 节解剖了动力干带本身的结构;那么第 3.5 节则分析了动力干带存在于其中的,更大尺度的大气环流环境条件。对于预报员来讲,不仅要熟悉一个一个天气系统,它们的生命史和三度空间结构,而且要熟悉天气系统存在于其中的尺度更大的背景环流。正是这些尺度更大的背景环流,和下垫面条件、不均匀加热一起,赋予天气系统各种各样的行为和多样性。第 3.5.1 节描述东风带由反气旋生形成的阻塞形势的形成过程。第 3.5.2 节提醒预报员,除了注意高空槽前的水汽边界以外,也要注意高空槽后的边界。前者可以直接演变出叶状云,后者可以演变出干三角区。第 3.5.3 节分析了急流断裂形成干三角区的过程。所谓干三角区,是第 3.2.2 节已经分析过的,在高空槽振幅加大的过程中,槽的底部

冷空气被切断,急流分成两支以后所形成的像阿拉伯数字 7 那样的三角形暗区。干三角区可以激发出重要的气旋生。第 3.5.4 节分析了干三角区前面叶状系统的发展过程。第 3.5.5 节解剖了干三角区的大气三度空间结构特征。在第 3.5.4 节和第 3.5.5 节的解剖分析中,大量的数值模式物理量场与水汽图像叠合在一起使用给出了细致而令人信服的结果。

第 3.6 节归纳了解释水汽图像的要点。第 3.6.1 节指出解释水汽图像的基本原则;第 3.6.2 节和第 3.6.3 节分别表示亮、暗水汽图型特征的动力意义;第 3.6.4 节和第 3.6.5 节分别描述水汽图像上边界的动力意义,以及边界与边界之间相互作用对应的动力过程;第 3.6.6 节指出在水汽图像上叠加数值模式物理量场的用途。

第四章的篇幅大约是全书的一半,它是本书区别于其它关于卫星云图解释应用教科书的精华之处。第四章是为数值天气模式研发人员写的,天气预报人员也能从中受益。在第三章中,水汽图像上的动力干区和数值模式中的位涡异常之间的关系已经讲清楚了。第四章就是要利用这种关系评估数值模式的能力,检测数值模式的误差,用卫星水汽图像作为依据调整模式初始场,以改善数值模式的能力。在阅读第四章以前,建议数值模式人员先阅读附录。附录 A 提供了卫星水汽图像观测的基本信息;附录 B 和 C 介绍了法国气象局为了将卫星水汽图像用于改善数值模式能力所制作的工具。如果要在我们的业务工作中实践本书的方法,这些工具必须高质量地做好。

第 4.1 节概括地说明水汽图像和位涡之间的关系在实践中如何使用。第 4.1.1 节指出水汽图像和位涡之间关系的性质和用途。水汽图像代表了高层的(垂直)运动场;动力对流层顶所表现的位涡异常,则直观地洞察了高层的动力特征。水汽图像和位涡之间的关系所表现出来的动力活跃区有四个要点:

与急流相伴;在水汽图像上有巨大的反差,极地一侧干,赤道一侧湿;与源自平流层入侵对流层的干闯入相联系(而不是与其它因素造成的干区相联系)的辐合下沉运动,在水汽图像上对应暗区;与上升运动相联系的辐散使对流层上部变湿,在水汽图像上对应亮区。随系统发展,动力作用变强,这四个要点变得越来越清楚。因此将水汽图像和位涡进行比较时,可以从两方面入手:比较干特征,以监视和识别与气旋生相关的暗带;比较湿特征,以监视和识别与气旋生相关的湿舌。但是在实践中,这样的比较并不那么容易判断。对于干特征而言,虽然水汽图像上的暗色调与干闯入有关,这并不等同于图像上的暗区在观测的瞬间一定联系着下沉运动。图像上的灰度反映了运动中的气块在一段较长历史过程中总的物理状态。湿特征分析也有它自己的难点。如第2.1节所述,湿特征把观测目标物与环境区分开来的灵敏度与水汽层所在的高度有关,而且灵敏度最大的高度随水汽含量多少而变化。受这些因素的影响,湿特征的比较关系并不总是有效。第4.1.2节指出有必要在一定的垂直范围里考察涡度场与水汽图像之间的关系。400/500hPa的位涡异常对于暗特征比较有效;动力对流层顶的高度或绝对涡度的比较,对于干、湿特征都比较有效。第4.1.3节分析了干闯入、位涡异常、水汽图像之间关系的复杂性。列举了多种情况,说明水汽图像上的干区与位涡异常之间并不存在简单的一一对应关系。预报员必须熟知这些情况,并且会进行分析。

第4.2节介绍合成水汽图像的制作和使用。合成水汽图像实际上是在数值模式算出的物理量分布状况下,卫星应该看到的水汽图像。第4.3节介绍位涡场、水汽图像、合成水汽图像之间比较的用途。由于水汽图像和位涡之间关系的复杂性,在某地特定的天气形势下,干区与位涡异常之间本来就是不匹配的。如果仅仅将数值预报位涡场与水汽图像进行比较,即便它们之间存在不匹配,仍旧

不能判断数值模式的结果是否有问题。引入合成水汽图像,将数值预报位涡场、水汽图像、合成水汽图像三种资料相互之间进行比较,则有助于解开这种不确定性。第4.3.1节介绍将三种资料相互比较的流程。因为合成水汽图像代表了数值模式输出的物理状态分布。最快速地检验数值模式输出场是否正确,只要将水汽图像与合成水汽图像进行比较。当检测到有误差时,将位涡场与水汽图像进行比较,可以提供位涡分布误差的信息和调整数值模式初始场的可能性。比较同一数值模式产生的位涡场与合成水汽图像则用来指出,水汽图像与合成水汽图像之间的误差是否真是由数值预报的误差造成的。第4.3.2节罗列比较可能出现的五种情况。这五种情况在以后的第4.4节至第4.6节逐一进行分析。

第4.4节是水汽图像、合成水汽图像、位涡场三者都一致的情况。在这种情况下,数值预报模式总的来说是正确的,无需进行位涡修正。第4.5节是合成水汽图像与位涡场不匹配的情况。合成水汽图像与位涡场是同一数值模式的产品。它们之间如果存在差异,需要进一步分析。分下面三种情况。第4.5.1节表示虽然合成水汽图像与位涡场不匹配,水汽图像与位涡场还是匹配的。这种情况对于业务工作并不重要。因为水汽图像与位涡场匹配这个事实已经指示位涡诊断是正确的。第4.5.2节表示不但合成水汽图像与位涡场不匹配,而且水汽图像与位涡场之间、水汽图像与合成水汽图像之间也都不匹配。这种情况表明数值预报模式存在误差,或者位涡与水汽图像之间缺乏良好的关系。在这种情况下我们无能为力,不应进行位涡修正。第4.5.3节表示虽然合成水汽图像与位涡场不匹配,水汽图像和合成水汽图像之间还是匹配的。这种情况很可能是系统正在消亡,位涡与水汽图像之间的关系没有意义。用位涡与水汽图像之间的关系评价数值预报的表现没有用。第4.6节的情况是:位涡场

与合成水汽图像是一致的,但是水汽图像与位涡场不匹配。它提供了数值预报模式出现差错的警告信号,也提供了位涡分布错在哪里的知识。因此提供了依据位涡分布差错修正数值模式初始场,以改进预报的机遇。第 4.6 节提供了四个典型个例。用这些个例表示如何作出诊断。第 4.6.1 节是一个次级气旋发展的例子。这个气旋的迅速发展没有预报出来,可能是由于水汽同化的不足使对流层中部的高湿水汽分布没有分析出来造成的。第 4.6.2 节是气旋迅速发生的初始阶段湿上升的例子,模式没有捕捉到与钩状云/水汽型相关联的上升运动。第 4.6.3 节是一个切断低压系统中涡旋再次加强发展的例子,模式低估了气旋波的速度。第 4.6.4 节是大西洋上强纬向气流中气旋迅速斜压发生的例子,模式低估了急流核的加强。

第 4.7 节用两个例子说明如何通过修改局地位置调整数值预报的初始条件。第 4.7.1 节是大西洋上空纬向气流中气旋生的例子,第 4.7.2 节是高层强迫作用引发对流的例子。第 4.8 节是第四章的小结。第 4.9 节是全书的总结。

本书实际上只阐述了动力气象学中经典的预报气旋发生的一条思路,即位于平流层下部、对流层上部的高空短波槽,如果叠合到对流层下部原来存在的一条温度梯度密集区上空,那么就可以促使对流层下部和上部的气旋性涡旋同时发展。水汽图像和数值预报模式的各种物理量场为用好这条经典的预报思路提供了信息和依据,赋予这条预报思路新的内容和活力。本书用大量的实例说明如何把卫星水汽图像、数值模式物理量场结合起来使用。从本书的字里行间,读者可以领悟到天气预报这门学科的复杂性。预报员的工作面临太多的不确定性,没有一条简单的规则可以让预报员放心地使用而不出错误。而对大气三度空间结构、天气系统行为、背景

环流作用的深入理解和仔细分析,可以帮助预报员识别各种不同的形势和过程,减少预期中的不确定性。从这样的理念出发,预报员对本书中提供的例子要一一细读,把它们弄懂。本书所介绍的基础工作,我们也要一一去做。这样才能逐步地提高我们的天气预报准确率。本书也是为数值天气预报模式研发人员写的。著者在改善数值天气预报的途径中,对每一个不成功的预报个例进行分析,找到原因,用改进后措施试验,证实有效,以后再在业务中使用。

西方人和东方人的思维习惯有差别。西方人看问题习惯于解析,东方人看问题习惯于综合。这种思维习惯的差异,使我们在阅读他们的文章和书籍的时候觉得难懂。实际上他们的逻辑是很严谨的,只是没有足够的证据,不轻易归纳。在这篇导读文章中,我们把本书各个章节之间的关系,根据我们的理解联系起来,这就难免不够严谨,也可能我们的理解不准确,甚至不对。希望这篇导读文章能有助于我国的预报员理解和使用本书提出的预报思路。

## 参考文献

- [1] Hoskins etc., On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1985, 111, 877-946.
- [2] Weldon, Holmes. 水汽图像在天气分析和天气预报中的解释与应用[M]. 北京:气象出版社, 1994.
- [3] Dvorak, Smigielski. 卫星观测的热带云和云系[M]. 北京:气象出版社, 1996.
- [4] 巴德等, 卫星与雷达图像在天气预报中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [5] 侯青, 许健民. 卫星导风资料所揭示的对流层上部环流形势与我国夏季主要雨带之间的关系[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 138-144.
- [6] Santurette, Georgiev. 卫星水汽图像和数值预报位势涡度场在天气分析和预报中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2008.