

曹丽霞, 赵亮, 徐怀刚, 等. 2013. 2007 年 7 月 9—10 日江淮大暴雨的水汽图像解译研究. 气象, 39(5): 608-615.

2007 年 7 月 9—10 日江淮大暴雨的水汽图像解译研究^{*1}

曹丽霞¹ 赵亮^{1,2} 徐怀刚³ 吴晓京² 夏明¹

1 61741 部队, 北京 100094

2 国家卫星气象中心, 北京 100081

3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 为了充分发挥卫星水汽图像在区域性暴雨预报中的重要作用和发展相应的云图解译技术, 采用风云 2C(FY2C) 卫星水汽图像与常规动力场和位涡场联合分析的方法, 解译了 2007 年 7 月 9—10 日江淮大暴雨不同时段水汽图像的典型特征及其对应的物理涵义, 探索了适用于我国区域性暴雨的云图解译技术。这一典型个例验证了卫星水汽图像与对流层中高层大气环流场和位涡场之间良好的对应关系, 利用这些对应关系, 总结和提炼了 4 个对预报江淮暴雨有指示意义的云图指标: 风切变陡增引起的“干三角”结构、干冷空气大规模南下引起的大尺度“漏斗”状水汽结构、冷空气干侵入引起的斜压叶状云、新的急流核生成(气旋生)引起的白色狭长带状云线等。这些特征和指标具有明确的物理意义, 对暴雨有良好的预示作用, 并且比较容易识别和应用。

关键词: 水汽图像, 风云 2C 卫星(FY2C), 暴雨, 位涡, 解译

中图分类号: P407

文献标识码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 05. 009

Interpretation of Water Vapor Image for the Rainstorm over Changjiang and Huaihe River Valley in 9—10 July 2007

CAO Lixia¹ ZHAO Liang^{1,2} XU Huaigang³ WU Xiaojing² XIA Ming¹

1 61741 Troops of PLA, Beijing 100094

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: To develop the satellite cloud image interpretation skills and adequately exert the role of satellite cloud image in the forecast for regional rainstorm, some typical features of water vapor images during different phases of the rainstorm and their physical meaning are interpreted preliminarily, and satellite cloud image interpretation skills suitable for regional rainstorm in China are explored by analyzing FY2C water vapor images integrated with conventional dynamics fields and potential vorticity field for the rainstorm over Changjiang and Huaihe River Valley in 9—10 July 2007. The typical rainstorm event validates the good corresponding relations between satellite water vapor images and circulation and potential vorticity fields in the mid-upper troposphere. According to these relations, 4 water vapor image indicators with certain forecasting meanings are summarized and abstracted: a “dry triangle structure” induced by jet breaking and wind shear, a large-scale tundish-like shape cloud system resulting from southward intrusion of dry

* 全球变化研究重大科学计划(2012CB957804), 国家重点基础研究发展计划(2012CB417205)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906001)共同资助

2012 年 4 月 14 日收稿; 2012 年 12 月 2 日收修定稿

第一作者: 曹丽霞, 主要从事强对流天气和数值预报工作. Email: clx1999clx@sohu.com

通信作者: 赵亮, 主要从事灾害性天气气候研究. Email: zhaol@cma.gov.cn

and cold air, a leaf-like cloud induced by dry intrusion of cold air, a white slender strip cloud line symbolizing the generation of a new jet core, etc. These features and indicators have definite physical meanings and good indicating roles for rainstorm forecast, and are easy to be identified and applied.

Key words: water vapor image, FY2C satellite, rainstorm, potential vorticity, interpretation

引言

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(许健民等,2008)。卫星图像能够为天气分析和预报提供细致的信息,尤其在受常规观测资料时空条件限制时,卫星资料更有参考价值(方宗义等,2006)。这主要是因为卫星观测具有较大的空间覆盖率和较高的时间分辨率,可以快速对大范围天气分布做出全面的监测,目前已经成为监测和预报暴雨等强对流天气的重要手段之一。国际上,在使用数值天气预报模式确定背景环流形势后,对短时临近预报,常常选用卫星资料作为首选资料,这与卫星资料的高时空分辨率和很好的时间连续性是分不开的。卫星水汽通道测得的水汽灰度值与对流层中上层大气湿度相联系,在没有高云的情况下,水汽图像越亮,反映了中高对流层空气很可能越湿,反之越干。由于高空水汽来自地面或洋面,故这些特征大多与大气的垂直运动和切变有关。因此,卫星水汽图像代表着对流层中上层的大气动力和热力特征,对天气过程的演变有重要的参考意义。

但另一方面,缺乏动力场时,水汽图像很难解释它自己(许健民等,2008),所以,结合动力场对水汽图像特征进行解译,将对业务预报产生积极影响。国外在水汽图像的解译及其业务预报的应用方面已有一定的认识,已总结了许多利用卫星云图信息对当地天气进行预报的方法(方翔等,2008),但比较而言,欧美地区云系的上游多在海洋,而中国区域云系的上游多在陆面,且中国所处区域陆面地形很复杂,因此,发展适用于我国的云图解译和判识技术应是我国现代卫星气象学中重要的研究方向之一。我国学者借助卫星资料,将其与常规动力场结合起来联合分析和预报高影响天气过程,已探索和总结了一些解译技术和云图特征,取得了良好效果(卢乃锰等,1997;方宗义等,2006;寿亦萱等,2007;胡波等,2009;许爱华等,2011;吴蓁等,2011;王令等,2012)。

近些年来,随着位势涡度(位涡)思想和相应理

论的日臻完善,越来越多的气象工作者借助位涡工具来分析、诊断和预报天气,将位涡场和常规动力场与水汽图像联合使用,也逐渐成为解译卫星云图的重要方法之一(方翔等,2008)。位涡对表征中高纬的冷空气活动有良好的示踪效果(赵亮等,2008;2009;陶祖钰等,2012),因此,高位涡区常常对应水汽图像中干冷的暗区,不过并非所有暗区都对应高位涡,这种对应关系有一定的适用条件,比如,在急流附近(尤其向极一侧)这种对应关系就非常有效(方翔等,2008),因为平流层干侵入一般发生在急流附近。与常规的动力场相比,位涡与水汽图像的匹配关系更为直观,对对流层高层大气的监测更为迅速,并可以示踪冷空气的源头。位涡与水汽图像配合使用,已经被应用到业务预报中,尤其在中高纬地区(Mansfield,1996)。

为了充分发挥水汽图像信息在区域性暴雨预报中的重要作用,发展相应的卫星水汽图像解译技术,本文针对一次典型的中国梅雨季暴雨事件,利用FY2C水汽图像和NCEP FNL业务化全球分析数据(Operational Global Analysis data, $1^\circ \times 1^\circ$, 6小时一次),检验和解释暴雨发生前和期间水汽图像与大气环流场和位涡场的配置关系,总结水汽图像明暗变化的规律性特征,捕捉在暴雨发生前水汽图像中的先兆信号。

1 暴雨实况和天气形势背景

2007年7月9日14时至10日14时(北京时,下同),沿长江地区至贵州中北部和四川东南部出现了区域性大到暴雨(图1),最大降雨区出现在安徽南部,其中安徽九华山(323 mm)和太平(322 mm)为特大暴雨,8日20时至10日07时四川隆昌县城降雨量达378 mm,造成该地区严重内涝。此外,内蒙古东部和东北地区西部出现了中到大雨、局部暴雨。

图2给出2007年7月9日12时至10日18时卫星水汽和天气形势的平均背景。从500 hPa位势高度和300 hPa风场上看,这次暴雨发生时,亚洲中

高纬地区是两槽两脊型,内蒙古东北上空的高空槽位于两脊之间,其东侧的阻塞高压非常强大,阻碍低槽东移,使大规模的强冷空气沿槽后南下,并形成切断低压。从图 2a 的位涡场上看,高位涡空气的侵入路径十分清晰,沿槽后急流的向极一侧由高纬地区向华北南部侵入,并在中低纬呈扇面铺开,这与中梅雨期冷空气的侵入路径和方式相似(赵亮等,2008),是典型的梅雨期冷空气活动路径。从它们与水汽图像的配置来看,急流上游和高位涡异常与暗区有良好的对应关系,水汽图像中形成的中间暗、周围亮的大尺度“漏斗状”明暗结构对应了引起此次暴雨过程的主要天气系统,它可能是一种有用的云图信息(后文将有阐述)。虽然位涡场对冷空气的表征较清晰,但它对上升运动和暖湿空气的表征效果不好,因此,图 2b 给出同期的垂直速度场,可以看出,下沉运动与高位涡值区后部和水汽暗区对应较好,而上升运动与亮区有良好对应关系。

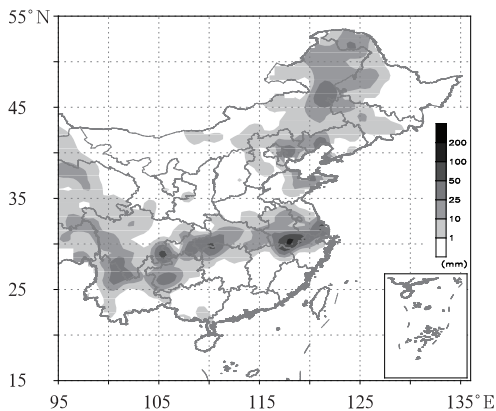


图 1 2007 年 7 月 9 日 14 时至 10 日 14 时
降水量(单位:mm)实况图

Fig. 1 The accumulated rainfall (unit: mm)
from 14:00 BT 9 July to 14:00 BT 10 July 2007

2 水汽图像实况

2007 年 7 月 8 日 00 时到 11 日 06 时的风云 2C 水汽图像(图 3a)提供了许多关于此次暴雨的重要云图信息。7 月 8 日 00 时,存在许多分散的暗区,其中一些呈狭缝状,例如图 3a 中“C”的箭头所指区域和“D”处圆弧状暗区,它们与下沉运动、急流和位涡异常有关,此时还不能明确分辨哪些是活跃的动力异常区。8 日 18 时,圆弧状暗区变成锐角,“干三角”结构形成(“D”所示),同时北侧暗区加深扩张与

南侧暗区合并,同时暗区周围出现大面积亮带(蓝色线条外侧),明暗对比显著加强,从而形成大尺度的近似“漏斗”状的结构(蓝色线条标出),在蒙古国上空贝加尔湖南侧开口最窄,底部向南延伸至华中地区,暗区东侧螺旋状水汽结构也开始形成。9 日 06 时,“漏斗”中部出现暗区明显加深(“E”处),“漏斗”底部叶状云生成(“L”处)。9 日 18 时,“漏斗”开口明显缩窄,暗区更暗,其南侧形成细长的亮带,螺旋状水汽结构基本形成,此时,暴雨开始进入盛期。10 日 06 时,暗区迅速南移,叶状云凹处边界异常分明。10 日 18 时,暗区东移,细长亮带消失。11 日 06 时,漏斗状水汽型遭破坏,暗区移出我国上空。

3 云图解译

云图信息是大气动力、热力、水汽和物理过程等的综合结果,反映了大气的状态,对于暴雨的预报,云图解译的目标和焦点主要是从复杂多变的云图信息中识别与暴雨相关的信息。对于江淮地区梅雨季的暴雨而言,梅雨锋与其外围不同性质云系之间的相互作用是导致梅雨锋云系强烈发展,继而产生暴雨天气的重要原因之一(覃丹宇等,2006),其云系的演变特征有一定的自身规律。要想从复杂的卫星云图中提炼有预报意义的信息,往往需要借助各种物理量场,来解译它们,从而筛选出有预报价值的指标。所以,把图像和代表环流的相关物理量场联合显示是很有必要的。

3.1 暴雨发生前到发生时

3.1.1 常规动力场

从常规的 300 hPa 位势高度和高空急流的演变(如图 3b)来分析和解译这次天气过程。总体上看,参与这次过程的急流有两支,与低位势高度相对应的北支急流曲率发生快速改变(形成北风与西南风的强切变)后,这个对流层顶高度异常区迅速与南支急流发生相互作用,是此次暴雨过程前的重要动力特征。具体来看,暴雨发生前可分为两个阶段。

第一阶段——高空急流带曲率变化:

8 日 18 时,贝加尔湖附近上空开始出现急流带曲率变化,这种变化发生在高空槽南侧,水汽图像上最明显的特征是出现如 Weldon 等(1991)提出的“干三角”结构,并由钝角变为锐角。可见,“干三角”结构是中高纬高空急流的“标志”,其变为锐角可能

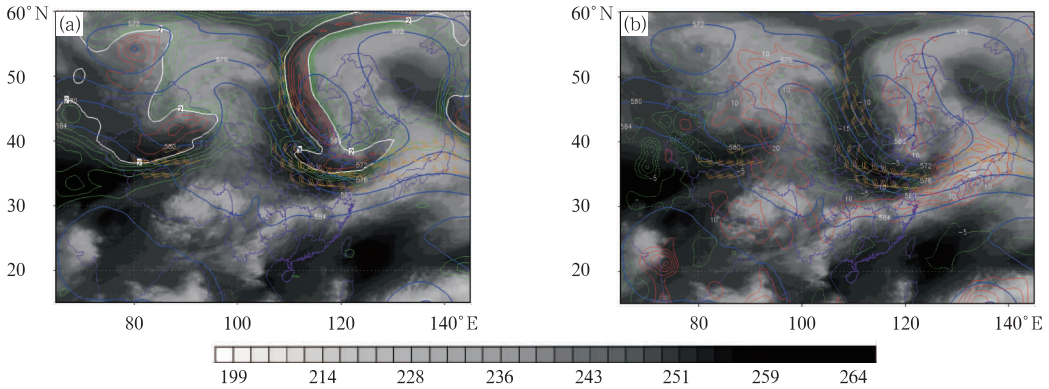


图 2 2007 年 7 月 9 日 12 时至 10 日 18 时平均的 FY2C 水汽亮温(阴影,单位:K)、500 hPa 位势高度(蓝色等值线,单位:dagpm)、300 hPa 风矢量(只显示 $>25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 矢羽)以及 250 hPa 位涡($>/=/<2$ PVU 分别为红/白/绿色等值线,单位:PVU)(a)和 500 hPa 垂直速度(红/绿等值线分别代表上升/下降,单位: $-10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)(b)

Fig. 2 FY2C water vapor brightness temperature (shaded, unit: K), 500 hPa geopotential height (blue contours, unit: dagpm), 300 hPa wind vectors (the vectors with wind speed $>25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ shown), and 250 hPa potential vorticity (red/white/green contours denote $>/=/<2$ PVU, unit: PVU) (a) and 500 hPa vertical velocity (red/green contours denote ascending/descending velocity, unit: $-10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)(b) averaged between 12:00 BT 9 July and 18:00 BT 10 July 2007

标志着高空急流带曲率的陡变。同时,大尺度“漏斗”状水汽明暗结构形成,从常规动力场可以看出,这种结构对应高空槽加深。

第二阶段——急流与对流层顶动力异常相互作用:

9 日 06 时,北支急流出现“干三角”结构并变为锐角后,动力异常区(“D”处)南移,南支急流转竖(暗区“E”处),两者迅速靠近,18 时开始相互作用,使暗区风速明显增大,等高线更密集。这种相互作用在水汽图像的特征表现在:漏斗状结构的开口收窄;动力异常区(D)及其西南侧和急流附近,变得更暗;更为典型的是这种相互作用使新的急流核形成(“J”处),即在最暗区南侧(最大风速轴附近),宁夏至山西南部形成一条白色狭长带状云线。这些结果表明对流层顶异常与急流的相互作用能够促进高空涡旋发展。

3.1.2 位涡场

位涡(即位势涡度)是绝对涡度与静力稳定度的乘积。它有多种特性(赵亮等,2008,2009;陶祖钰等,2012),其中,位涡的守恒性使其能够很好地示踪中高纬异常气团和描述高空扰动,并解释地面气旋的发生机制(方翔等,2008)。在热带以外的气旋性环流场中,位涡场和卫星水汽图像之间有着很好的对应关系,这种对应关系使得图像解释变得相对容易(方翔等,2008)。结合位涡场(如图 3c)分析这次

暴雨过程,总体上看,在 250 hPa 等压面上,高位涡区基本对应暗区,而这些暗区往往比较活跃,常与高纬活跃的冷空气有密切关系,对于暴雨而言,这些暗区常常具有重要的天气学意义。

8 日 18 时,高空急流带曲率陡变和相应的“干三角”结构出现时,贝加尔湖附近 250 hPa 高位涡明显南伸形成较细长的“高位涡舌”,反映了冷空气来自高纬对流层顶和平流层底,并已经开始侵入中高纬的对流层高层。9 日 06 时,随着暗区和高位涡舌的向南扩展,高位涡舌(暗区)与其东侧的亮结构明暗对比明显,并且槽前和位涡舌南侧的叶状云系开始出现明显波浪状起伏,呈现出典型的“S”状。箭头所指为叶状云 L 的北边界,红和蓝色箭头标出其凸区和凹区。叶状云的形成往往与后期气旋的发展有一定联系(方翔等,2008)。水汽图像有助于较早地发现这种云型。9 日 18 时,漏斗状水汽型开口进一步收紧,两个高位涡区正式贯通,狭长的带状云线出现在高位涡前沿,表明新的急流核生成。这对应着江淮地区的降雨开始进入鼎盛时期。

沿图 3a 中 8 日 18 时的 A-B 连线做垂直剖面可以对此次干侵入过程和叶状云下部的动力热力结构进行分析(如图 4)。从图 4 中可以发现,从暴雨发生前到发生时,一直有干冷高位涡空气的侵入,它来自云系北侧的暗区,可追溯到中高纬的对流层顶,期间的动力对流层顶一直处于倾斜状态。暴雨后期,

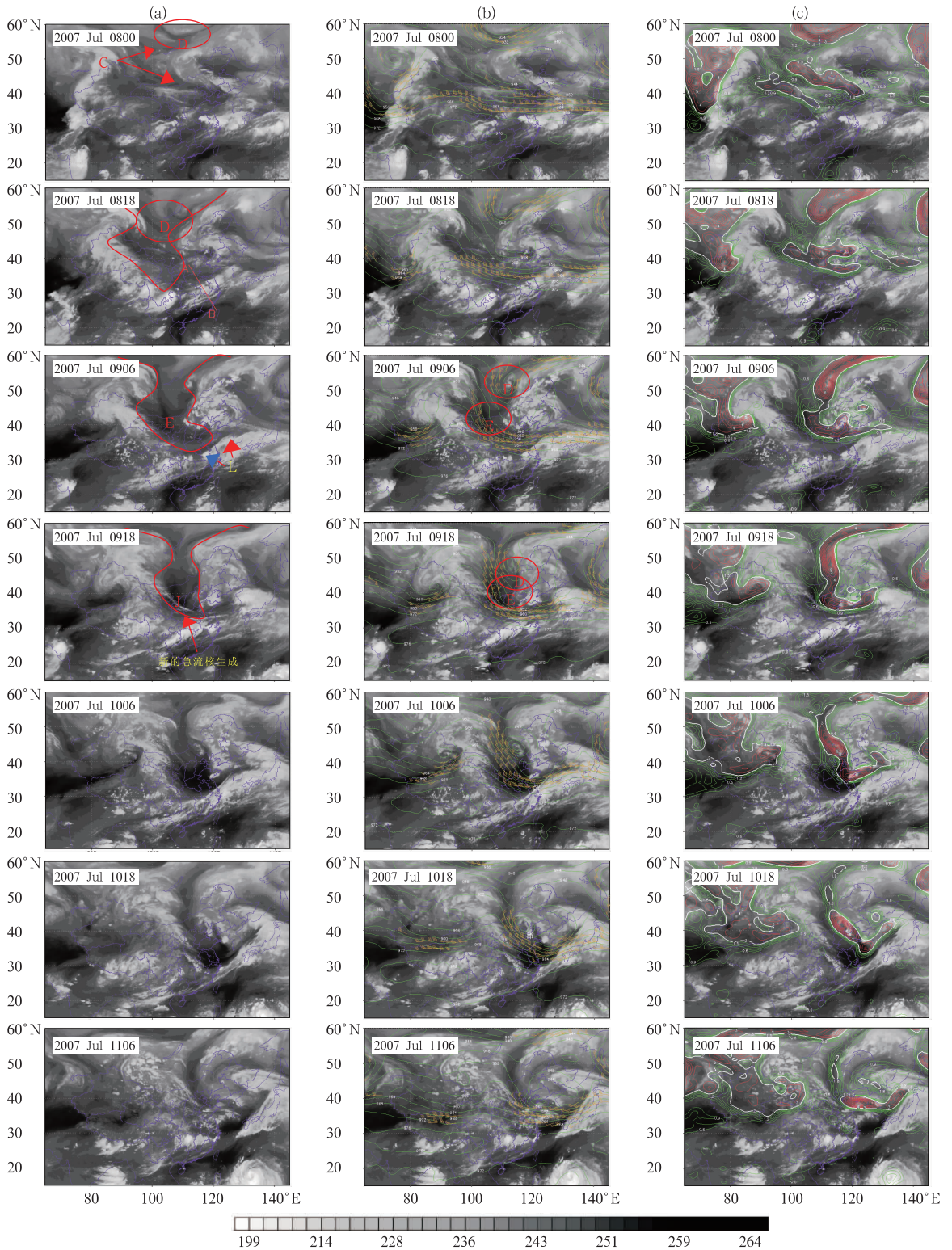


图 3 (a)FY2C 水汽图像亮温(单位:K);(b)和(c)FY2C 水汽图像(阴影,单位:K)与 NCEP FNL 业务化全球分析数据叠加图;(b)叠加 300 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)和风矢量(只显示 $>25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 矢羽), (c)叠加 250 hPa 位涡($>/=/< 2 \text{ PVU}$ 分别为红/白/绿色等值线,单位:PVU)

Fig. 3 (a) FY2C water vapor brightness temperature (unit: K); (b) and (c) FY2C water vapor brightness temperature (shaded, unit: K) overlaid with NCEP FNL operational global analysis data: (b) 300 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm) and wind vectors (the vectors with wind speed $>25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ shown), (c) 250 hPa potential vorticity (red/white/green contours denote $>/=/< 2 \text{ PVU}$, unit: PVU)

干冷空气与高层主体分离,动力对流层顶变得平直。可以看出,此次过程中干冷的高位涡异常对低层气旋的发展可能起到重要的促进作用,加强了暖湿空气的上升运动,使其东南侧 30°N 附近 200 hPa 高层出现 >90% 的高湿度区,叶状云就出现在这一区域,

这种干侵入过程大大加快了降水条件的形成。可见,此次叶状云的形成与干侵入有关。需要注意的是,高位涡区并非一定对应干区,尤其在对流层中低层,湿区也常有高位涡出现,但在中高层,这种对应关系常常是有效的(如图 4)。

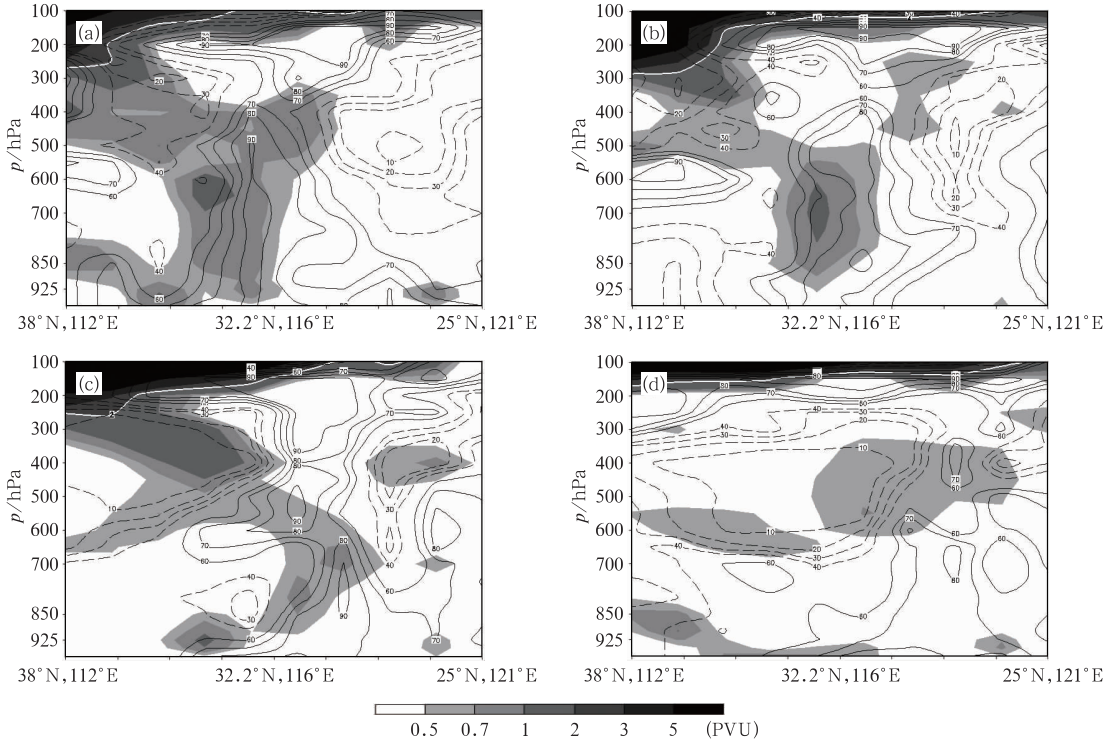


图 4 沿图 3a 中 8 日 18 时的 A-B 连线做位涡(阴影,单位:PVU)和相对湿度(等值线,单位:%, 10,20,30,40/60,70,80,90 使用虚/实线)垂直剖面(白色实线为 2 PVU 线,代表动力对流层顶)

Fig. 4 The vertical cross-sections of potential vorticity (shaded, unit: PVU) and relative humidity (contours, unit: %, 10, 20, 30, 40/60, 70, 80, 90 with dashed/solid lines) along the Line AB at 18:00 BT 8 July in Fig. 3a (2 PVU with white solid contours denotes the dynamical tropopause)

3.2 暴雨中后期

从图 3 可以看出,10 日 06 时,水汽图像上大尺度漏斗状水汽型的开口(贝加尔湖东南侧)显著收窄,同期高位涡舌与高纬主体断开,说明高纬高层的冷空气已经不再注入;暗区明显南移加深并扩大,对应南北支急流合并,反映冷空气已南下至较低纬度(30°N 附近),并开始起主导作用,随着暗区的加深和扩展,斜压叶的凹区边界更加分明。11 日 06 时,暗区减弱并移出中国大陆,漏斗状水汽型已被破坏,急流和高位涡区都减弱并变得平直。

4 特征指标讨论和总结

通过将卫星水汽图像和代表环流特征的相关动

力场(如位涡、风场和位势高度等)联合分析,可以较好地解释重要天气过程的发生和演变原理,分析在天气系统关键区域图像特征(如干区)与动力场的匹配关系,从中提炼定性的和可量化的云图特征指标,并辨别和归纳其适用条件。对 2007 年 7 月 9—10 日的暴雨过程进行云图—动力场解译,我们发现和提炼了江淮暴雨发生前可能的水汽图像信息和指标(如表 1)。

这些通过动力场解译得到的云图指标与以往的一般预报指标相比,有很大区别和优势:

(1) 通过动力场解译得到的云图指标赋有明确的物理涵义,这在此次暴雨分析中已经有详细说明。

(2) 对各指标的出现时间先后、出现地点及其与天气系统的配置关系更加明确。如这次暴雨过程,“干三角”结构出现在暴雨盛期的前 24 h 左右,斜压叶状云

出现在前 12 h、白色狭长云线出现在前 6 h 左右。

(3) 各指标可以联合发挥作用,如果一次天气过程出现了 4 个指标中的 3 个甚至 4 个,那么后期暴雨发生的概率很可能就较高,同时这样也可使检测联合指标的预报准确率。

(4) 未来一些云图指标和动力场指标可以尝

实现量化。如“干三角”的出现反映高空急流带的水平风切变陡增,“干三角”成锐角时,容易导致冷空气南下,所以,“干三角”的角度可以作为量化指标;又如,急流轴附近的白色狭长云线的长度、干侵入的位涡值大小、动力异常区及其周围的亮温对比值等,未来都可以尝试作为量化的预报指标。

表 1 2007 年 7 月 9—10 日江淮暴雨水汽图像解译和指标提炼总结

Table 1 Water vapor images interpretation and indicator abstraction for the rainstorm from 9 to 10 July 2007 over Changjiang and Huaihe River Valley

水汽图像特征和指标	动力场特征和指标	动力场解译	发生时间	发生地区
“干三角”结构出现并呈锐角(如图 3a 8 日 18 时“D”区)	风切变陡增; 250 hPa > 2 PVU 的位涡“舌”出现	北支急流带曲率陡变; 干侵入, 冷空气开始南下	暴雨发生前 24 h	贝加尔湖附近(对流层顶附近位涡“舌”南侧)
大尺度“漏斗状”明暗结构(如图 3a 8 日 18 时至 10 日 18 时)	高纬和中纬地区两个高位涡区,且北侧位涡区加强南伸;北、南两支急流(分别对应“漏斗”口部和底部)	高空槽加深,干冷空气南下呈扇状铺开	暴雨发生前 24 h	西伯利亚和华北西北地区
斜压叶状云生成(“S”状)(如图 3a 9 日 06 时“L”处);动力异常区附近暗区明显加深(如图 3a 9 日 06 时“E”处)	叶状云区强上升运动;其前沿有强的经向位涡梯度	干侵入促进地面气旋发展,叶状云形成	暴雨发生前 12 h	江淮地区和黄海海区(强的经向位涡梯度南侧)
在最暗区南侧(最大风速轴附近),形成一条横向(斜向)白色狭长带状云线(如图 3a 9 日 18 时“J”处)	北侧有位涡高值区南下并与南侧高值区打通;南北支急流迅速靠近;急流相互作用	急流相互作用形成新的最大风速轴	暴雨发生前 6 h 至暴雨发生时	宁夏至山西南部(最大风速轴附近)
漏斗状结构显著收窄(暗区闭合);暗区南移明显;斜压叶的凹区边界更加分明(如图 3a 10 日 06 时)	位涡“舌”区与极区主体分离,南下东移;风切变减弱	冷空气不再有后援,天气系统衰减	暴雨发生后 12 h 内	江淮地区及北侧
狭长带状云线消失,漏斗状结构被破坏,暗区减弱移出中国大陆	北风减弱,高空槽变浅;急流和高位涡区减弱并趋于平直	锋面过境,天气系统衰减	暴雨发生后 24 h	江淮地区及其北侧和东侧

5 结 论

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,减少预报中的不确定性(许健民等,2008)。基于这样的理念,本文通过分析一次江淮暴雨的水汽图像与常规动力场和位涡场的匹配关系,初步解译了暴雨过程的不同时段水汽图像的典型特征及其对应的物理涵义,探索了适用于我国的云图解译技术,从中总结和提炼了多种具有预报意义的云图指标:高空急流带曲率变化和风切变陡增引起的“干三角”结构、干冷空气大规模南下引起的大尺度漏斗状明暗结构、冷空气侵入引起的斜

压叶状云、新的急流核生成(气旋生)引起的白色狭长带状云线等。这些通过动力场解译得到的典型云图特征和指标与以往的指标相比,具有诸多优势,具有明确的物理意义。今后需对更多的梅雨锋暴雨个例和其他区域的暴雨个例进行云图解译分析,进一步检验这些指标的可靠性及其与天气系统的配置关系,并尝试实现云图指标的应用。

参考文献

- 方翔,许健民,等. 2008. 卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用. 北京: 科学出版社, 156pp.
- 方宗义,覃丹宇. 2006. 暴雨云团的卫星监测和研究进展. 应用气象学报, 17(5): 583-593.
- 胡波,杜惠良,滕卫平,等. 2009. 基于云团特征的短时临近强降水预报技术. 气象, 35(9): 104-111.

- 卢乃锰,吴蓉璋.1997.强对流降水云团的云图特征分析.应用气象学报,8(3):269-275.
- 覃丹宇,方宗义,江吉喜.2006.典型梅雨暴雨系统的云系及其相互作用.大气科学,30(4):578-586.
- 寿亦萱,许健民.2007.“05.6”东北暴雨中尺度对流系统研究I:常规资料和卫星资料分析.气象学报,65(2):160-171.
- 陶祖钰,郑永光.2012.位温、等熵位涡与锋和对流层顶的分析方法.气象,38(1):17-27.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等.2012.应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水.气象,38(3):281-290.
- 吴秦,俞小鼎,席世平,等.2011.基于配料法的“08.6.3”河南强对流天气分析和短时预报.气象,37(1):48-58.
- 许爱华,马中元,叶小峰.2011.江西8种强对流天气形势与云型特征分析.气象,37(10):1185-1195.
- 许健民,方宗义.2008.《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.气象,34(5):3-8.
- 赵亮,丁一汇.2008.梅雨期高位涡源区及其传播过程研究.应用气象学报,2008,19(6):697-709.
- 赵亮,丁一汇.2009.东亚夏季风时期冷空气活动的位涡分析.大气科学,33(2):359-374.
- Mansfield D A.1996.The use of potential vorticity as an operational forecast tool. Meteorol Appl, 3: 195-210, doi: 10. 1002/met. 5060030301.
- Santurette P, Georgiev C G.2005. Weather analysis and forecasting: applying satellite water vapor imagery and potential vorticity analysis. Academic Press(Elsevier), 200.
- Weldon R B, Holmes S J.1991. Water vapor imagery: Interpretation and application to weather analysis and forecasting, NOAA Technical Report. NESDIS 57, US Department of Commerce, Washington D. C., 213.