

强降水过程中垂直螺旋度和散度通量 及其拓展形式的诊断分析^{*}

冉令坤^{1)†} 楚艳丽²⁾

1) 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

2) 中国气象局北京市城市气象研究所, 北京 100089)

(2009 年 2 月 1 日收到, 2009 年 2 月 24 日收到修改稿)

在垂直螺旋度的基础上, 定义了散度通量、水汽垂直螺旋度和水汽散度通量三个宏观物理量. 针对两次强降水过程, 利用 NCEP/NCAR 实时分析资料对这些物理量进行诊断分析, 结果表明, 这些物理量能够比较准确地综合表征强降水系统所共有的典型动力场垂直结构, 进而与降水系统的发展演变密切相关. 这些物理量垂直积分的异常值区与观测的 6 h 累积地面降水具有良好的对应关系, 表明它们对强降水的落区和降水系统的发展移动具有良好的指示预测意义. NCEP-GFS 每日四次 6 h 预报场资料的计算表明, 垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式(水汽垂直螺旋度和水汽散度通量)对强降水系统的发展演变具有一定的预报能力, 并且水汽散度通量是比较突出的对暴雨具有指示预报意义的动力预报因子.

关键词: 垂直螺旋度, 散度通量, 水汽垂直螺旋度, 水汽散度通量

PACC: 9260, 9260D, 9260X

1. 引 言

长期以来对暴雨过程中暴雨落区和雨带移动方向的预报一直是气象工作者所关注的焦点. 气象学家在这方面开展了大量卓有成效的研究工作, 取得了丰硕的研究成果, 先后建立多个对地面降水具有指示意义的宏观物理量^[1-5], 表征流体旋转与沿旋转方向运动强度的螺旋度就是其中之一^[6]. 伍荣生等研究指出在等熵流体中螺旋度具有守恒性^[7]. 很多研究表明, 螺旋度对雷暴、龙卷和大范围暴雨以及沙尘暴等灾害性天气具有一定的指示预报作用, 并逐渐成为现代天气预报中一个重要的参考量^[8-13]. 在与暴雨系统关系方面, 螺旋度不同于 CAPE 和理查逊数等动力学参数, 这些代表潜在不稳定的参数只有在存在相应触发机理的条件下才能与暴雨系统建立联系, 而螺旋度把垂直速度和垂直涡度耦合起

来, 可以有效地表征潜在不稳定能量的释放, 因此螺旋度与暴雨系统的关系更为密切和直接.

水汽不但是大气的重要组成成分, 而且水汽的持续供应也是暴雨系统发生发展的必要条件, 然而水汽因素在以往的螺旋度相关研究中很少被考虑. 另外, 散度是人们用来诊断分析暴雨系统发展演变的另一个重要物理量, 低层大气辐合和高层大气辐散是雨区上空典型的垂直动力结构, 但散度与雨区的关系并不是一一对应的, 在很多情况下, 雨区以外的区域也存在散度, 因此如何用散度更准确地描述暴雨系统的发展演变是一个值得研究的问题. 基于这些认识, 在螺旋度概念的基础上, 本文把散度与垂直速度结合起来建立一个新的参数——散度通量, 并把螺旋度和散度通量拓展到含有水汽的情况, 定义另外两个参数——水汽垂直螺旋度和水汽散度通量. 利用 NCEP/NCAR 实时分析资料, 本文进一步诊断分析垂直螺旋度和散度通量以及包含水汽效应的

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2009CB421505), 国家自然科学基金面上项目(批准号: 40875032 和 40875002), 国家科技部项目(批准号: GYH200706042)和 IAP 领域前沿项目(批准号: IAP07201)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: rlk@mail.iap.ac.cn

水汽垂直螺旋度和水汽散度通量在暴雨过程中的空间分布和时间演变特征,并研究这些宏观物理量与地面观测降水之间的关系。

高守亭等从暴雨触发机理的角度出发,研究并建立了暴雨短期临近集合动力因子预报方法,本文定义的这些物理量已被该方法所采用。

2. 垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式

在等压坐标系中,垂直螺旋度可以写为

$$H = \frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (1)$$

其中, u , v 和 ω 分别为等压坐标系中 x 方向, y 方向和垂直方向的速度, ρ 为密度。不同于传统垂直螺旋度的定义($\omega \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$) (1) 式引入了权重因子——密度,其作用在本质上是弱化对流层低层的传统垂直螺旋度,而强化对流层高层的传统垂直螺旋度。(1) 式的物理意义很明确,代表相对垂直涡度的垂直通量;在等压坐标系中,气旋区的上升(下沉)运动和反气旋区的下沉(上升)运动分别意味着正垂直涡度的向上(下)输送和负垂直涡度的向下(上)输送,此时垂直螺旋度为负(正)值。

低层大气辐合和高层大气辐散是降水过程的一个典型动力学特征,因此水平散度在强降水过程中的重要性是不言而喻的。与(1)式类似,我们把垂直速度与水平散度的乘积称为散度通量,即

$$\Gamma = \frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (2)$$

上式代表水平散度的垂直通量,在等压坐标系中,辐合区的上升(下沉)运动和辐散区的下沉(上升)运动分别意味着负水平散度的向上(下)输送和正水平散度的向下(上)输送,此时的散度通量为正(负)值。

垂直螺旋度和散度通量表征的是大气动力学过程,没有体现大气中水汽的效应。若考虑水汽效应,垂直螺旋度和散度通量与水汽相结合,那么它们与暴雨的联系可能更紧密,对暴雨发生发展的指示作用可能更显著,为此我们对垂直螺旋度和散度通量进行拓展,引入水汽垂直螺旋度(垂直速度与水汽通量涡度的乘积)和水汽散度通量(垂直速度与水汽通量散度的乘积)两个参数,即

$$H_m = \frac{\omega}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (v q_v) - \frac{\partial}{\partial y} (u q_v) \right], \quad (3)$$

$$\Gamma_m = \frac{\omega}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u q_v) + \frac{\partial}{\partial y} (v q_v) \right], \quad (4)$$

其中, q_v 为水汽比湿。由(3)和(4)式可见,水汽垂直螺旋度和水汽散度通量的物理意义在于它们分别代表水汽通量涡度和水汽通量散度的垂直输送状况。

为了研究垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式与地面降水的关系,本文利用 NCEP/NCAR 实时分析资料对两次强降水过程中的这些物理量进行诊断分析。

3. 诊断分析

针对 2007 年 7 月 17 日—21 日发生在我国华北地区的暴雨过程和 2008 年 1 月 29 日—2 月 3 日发生在我国华南地区的冰雪凝冻天气,本文利用 NCEP/NCAR 实时分析资料(水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直层数为 26 层,时间间隔为 6 h)诊断分析垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式与 6 h 累积地面观测降水之间的联系,并利用 NCEP-GFS 的 6 h 预报场资料验证 6 h 预报的垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式与实际观测降水之间的对应关系。

3.1. 个例 A

2007 年 7 月 17 日—21 日亚洲中高纬度地区的环流形势调整为一槽一脊型(图略),脊区位于乌拉尔山地区,低槽出现在贝加尔湖地区,随着高压脊的减弱东移,贝加尔湖冷涡也随之东移南下,受其影响,我国华北及东北地区出现强降水过程。

2007 年 7 月 18 日 18 UTC 纬向平均(116° — 119° E) 的 6 h 累积地面观测降水主要集中在 34° — 38° N 纬度带内(如图 1(a)所示);在该雨区的上空,垂直上升运动非常强烈,上升区从地面一直垂直延伸到 100 hPa,最大上升垂直速度位于雨区上空 500 hPa 高度左右,雨区的南北两侧为下沉区,其中北侧对流层中高层的下沉运动较强,南侧对流层低层的下沉运动较弱,雨区上空对流层中低层为气旋性涡度区(如图 1(b)所示),中心位于 900 hPa 高度附近,雨区上空对流层高层为反气旋性涡度区,中心位于 150

hPa 高度左右 ;雨区北侧的对流层中高层存在深厚的反气旋性涡度区 ;雨区南侧的垂直涡度配置情况与雨区上空相反 ,并且强度较弱 .考虑水汽效应后 (如图 1(c)所示) ,由于水汽主要集中在对流层中低层 ,对流层高层的水汽含量很少 ,所以水汽通量涡度在 500 hPa 以下的对流层中低层比较显著 ,而在对

流层高层不明显 ;气旋性水汽通量涡度区主要位于雨区的上空 ;虽然雨区南侧水汽充沛 ,但由于动力场上反气旋性涡度较弱 ,因此雨区南侧的反气旋性水汽通量涡度并不显著 ;雨区北侧的对流层中高层是深厚的气旋性涡度区 ,但那里的水汽含量太少 ,以至于气旋性水汽通量涡度基本上可以忽略 .

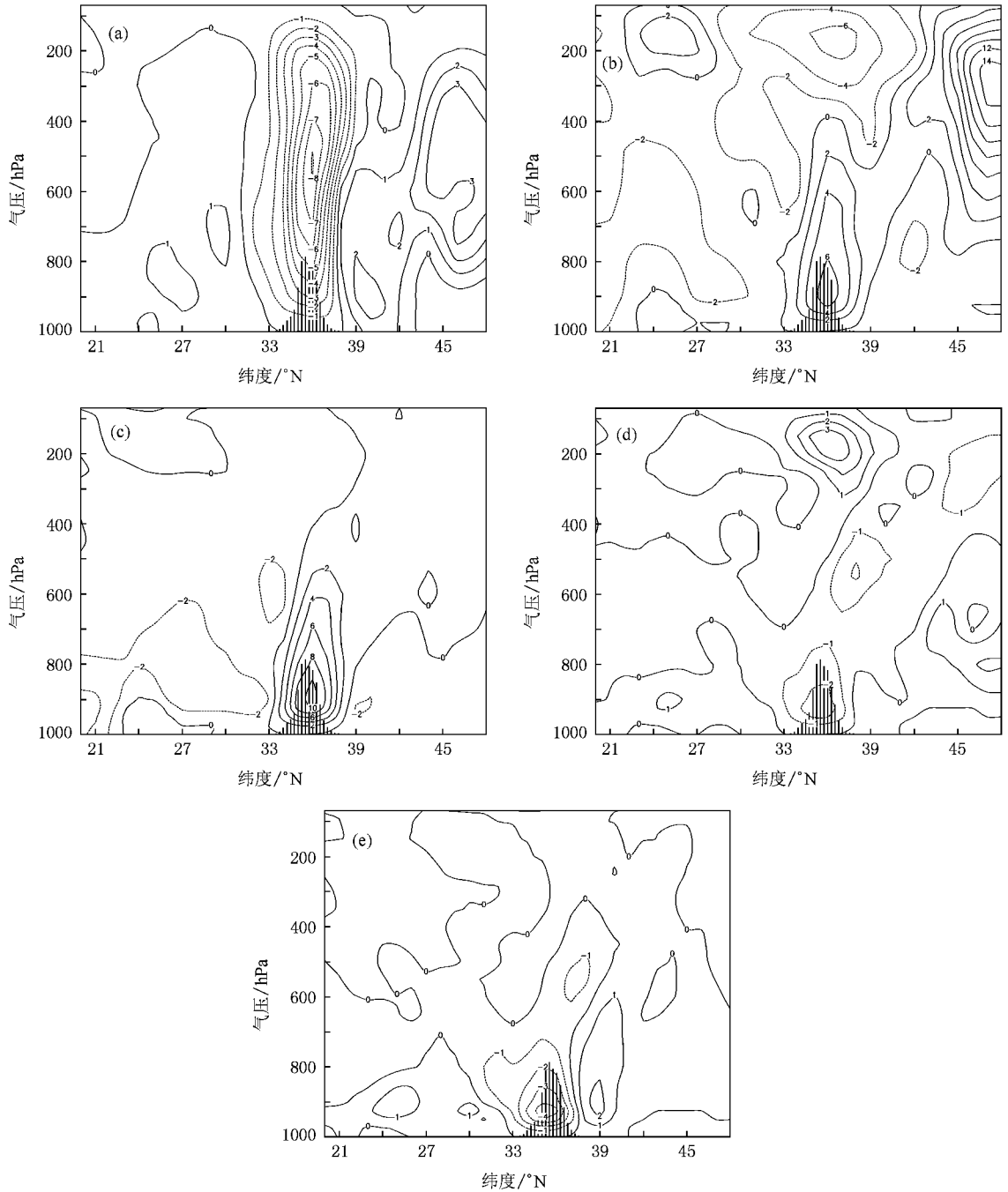


图 1 2007 年 7 月 18 日 18 UTC 纬向平均 (116—119°E) 的垂直速度 ((a) $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), 垂直涡度 ((b) 10^{-5} s^{-1}), 水汽通量涡度 ((c) 10^{-7} s^{-1}), 水平散度 ((d) 10^{-5} s^{-1}) 和水汽通量散度 ((e) 10^{-7} s^{-1}) 的经向-垂直分布 , 其中细直方图代表观测的 6 h 累积地面降水 (单位 : mm)

从水平散度的垂直分布可以看出(如图 1(d)所示)雨区上空低层大气辐合,高层大气辐散,辐合与辐散的中心分别位于 900 hPa 和 150 hPa 高度附近;雨区北侧对流层中高层大气辐合,低层大气辐散,这里的水平散度垂直分布情况与雨区相反,并且强度偏弱.考虑水汽作用后(如图 1(e)所示),强烈的水汽辐合区主要出现雨区上空对流层中低层,雨区南北两侧的对流层低层为较弱的水汽辐散区;由于对流层高层的水汽含量很少,所以那里的水汽辐散非常弱.通过水汽通量涡度和水汽通量散度的分析可以看出,水汽在本质上对垂直涡度和水平散度具有权重调节的作用,弱化对流层高层和非雨区的动力场结构,突出雨区对流层中低层的动力学特征.

以上讨论的这些动力场垂直结构特征是很多降水系统所共有的典型特征,这种垂直结构与地面降

水联系紧密;当大气动力场呈现这种垂直分布时,地面常常伴随出现降水.大气中这种动力垂直结构与地面降水之间的对应关系给我们一个很好的启示:我们可以定义一些宏观物理量来综合地表征这种动力场典型的垂直结构特征,并通过计算这些物理量来诊断分析地面降水的发生发展情况.为此,本文计算了垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式.如图 2(a)所示,2007 年 7 月 18 日 18 UTC 雨区上空的垂直螺旋度很显著,400 hPa 高度以下垂直螺旋度的负值区综合地表征了气旋性涡度的垂直向上输送,雨区上空对流层高层垂直螺旋度的正值区代表反气旋性涡度的垂直向上输送,雨区北侧对流层中高层垂直螺旋度的正值区主要是由弱下沉运动和强烈气旋性涡度共同作用造成的,该正值区与雨区没有明显的联系.由于水汽的权重调节作用,水汽垂直螺旋度主要表现为负值(如图 2(b)所示),位于雨区上空 400

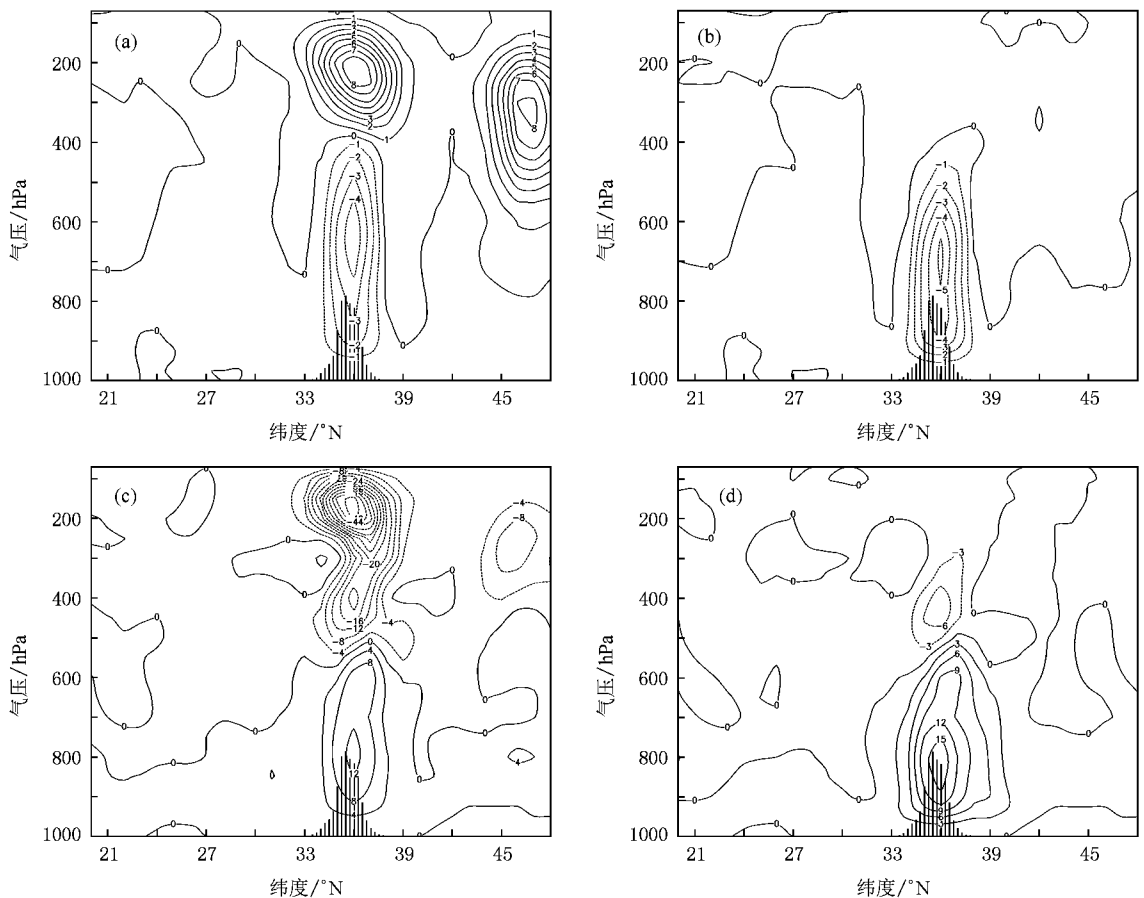


图 2 2007 年 7 月 18 日 18 UTC 纬向平均(116—119°E)的垂直螺旋度((a) $10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)、水汽垂直螺旋度((b) $10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)、散度通量((c) $10^{-6} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)和水汽散度通量((d) $10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)的经向-垂直分布,其中细直方图代表观测的 6 h 累积地面降水(单位: mm)

hPa 以下高度,负高值中心大约位于 700 hPa 附近,代表气旋性水汽通量涡度的垂直向上输送;对比垂直螺旋度的垂直分布可知,水汽垂直螺旋度体现了对流层中低层垂直螺旋度的主要特征,并且排除了与雨区没有直接关系的雨区北侧垂直螺旋度正值区.散度通量的高值区主要集中在雨区上空(如图 2(c)所示),500 hPa 高度以下的正值区和其上的负值区,分别表示对流层低层动力辐合效应和高层动力辐散效应的垂直向上输送;另外,雨区北侧对流层高层散度通量的弱负值区主要是由弱下沉运动和弱动力辐合效应共同作用引起的.考虑水汽效应后(如图 2(d)所示),水汽散度通量的正值区主要出现在雨区上空 500 hPa 以下高度,综合地表征了垂直上升运动和水汽通量的辐合效应,500—300 hPa 高度层内的弱负值区主要与强烈的上升运动和微弱的水汽通量辐散有关.对比散度通量的分布可以看出,水汽散

度通量在很大程度上反映了散度通量在对流层中低层的特征.以上分析表明,垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式可以有效地综合表征雨区上空的动力学特征,它们的不同点在于垂直螺旋度和散度通量能够综合地表现雨区上空对流层整层的动力学结构,考虑水汽后,雨区上空对流层低层的动力学结构被强化,而对流层高层和雨区两侧的动力学特征被弱化,这相当于对垂直螺旋度和散度通量取了一个权重,由此可见水汽的作用在于重点突出与雨区密切相关的对流层中低层动力场结构特征.

本文接下来分析垂直积分的垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式与实际观测的 6 h 累积地面降水之间的关系.如图 3 所示,2007 年 7 月 18 日 18 UTC 观测的 6 h 累积地面降水主要出现在我国北方地区,雨区基本上呈现东北—西南走向的带状分布,从陕西省西南部向东北方向伸展到吉林省中南部,雨

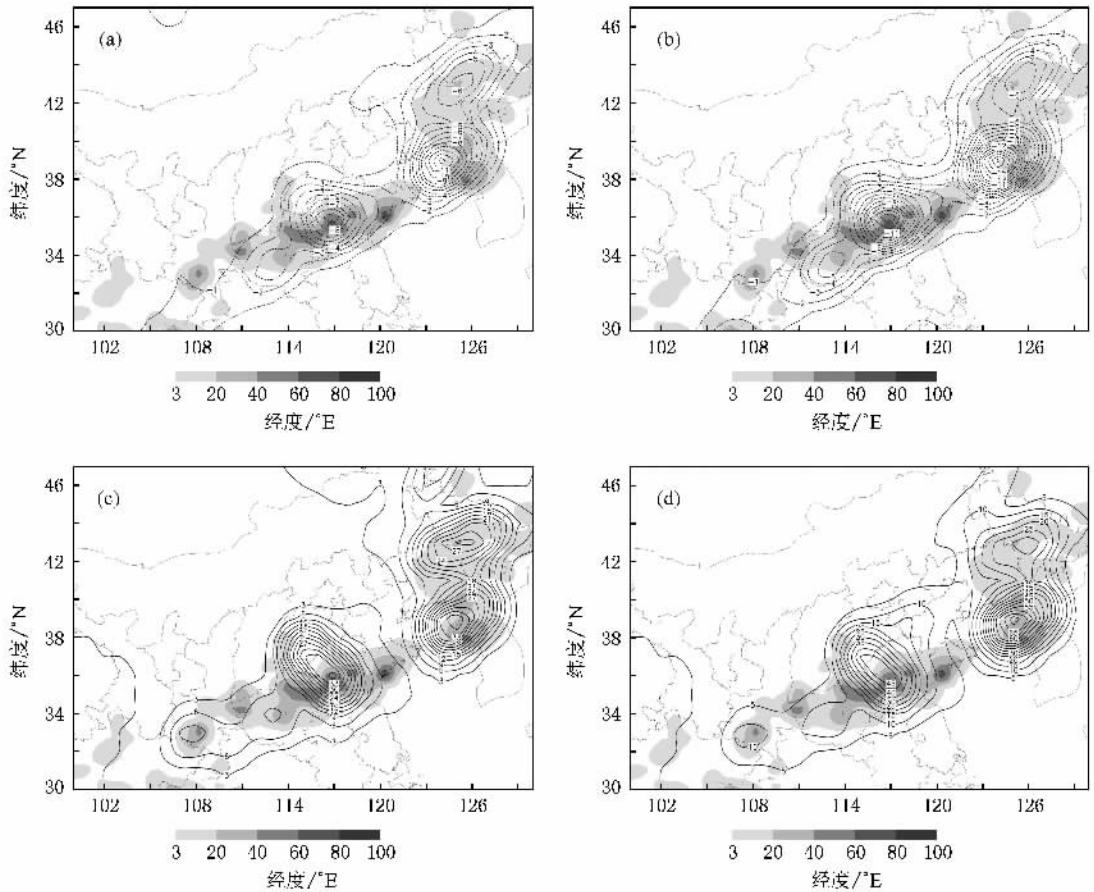


图 3 2007 年 7 月 18 日 18 UTC 垂直螺旋度负值区((a) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),水汽垂直螺旋度负值区((b) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),散度通量正值区((c) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和水汽散度通量正值区((d) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)从 1000 hPa 至 100 hPa 垂直积分的水平分布,其中灰度图代表观测的 6 h 累积地面降水(单位: mm)

带内的两个强降水中心分别位于山东省中西部 (35.5°N , 117°E) 和山东半岛南部 (36°N , 121°E)。垂直螺旋度、散度通量、水汽垂直螺旋度和水汽散度通量也都呈带状分布,内含三个高值中心,其中山东省中西部垂直螺旋度和水汽垂直螺旋度的高值中心与强降水中心相对应;对比可以看出,垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式高值区的水平分布与雨带的落区和走向基本一致,并且覆盖绝大部分雨带,说明这些物理量与地面降水联系紧密,存在一定的对应关系。由于 NCEP/NCAR 实时分析资料的时间间隔较大(6 h 间隔),而实际降水量是 6 h 累积的,所以垂直螺旋

度和散度通量及其拓展形式的高值区与地面雨带在空间位置上不是严格对应的,还存在一些差异,例如在 $108^{\circ}\text{—}111^{\circ}\text{E}$ 经度带内,垂直螺旋度和水汽垂直螺旋度的负值带略偏南于实际降水区。

如图 4 所示,垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式与实际观测的 6 h 累积地面降水在时间演变趋势上非常一致,二者的发展演变具有良好的对应关系,并且在 18 日 18 UTC 和 20 日 00 UTC,这些物理量的高值区与强降水区相重叠,表明这些物理量能够充分表征强降水过程中典型的动力垂直结构特征,对强降水过程的发展演变具有一定的指示意义。

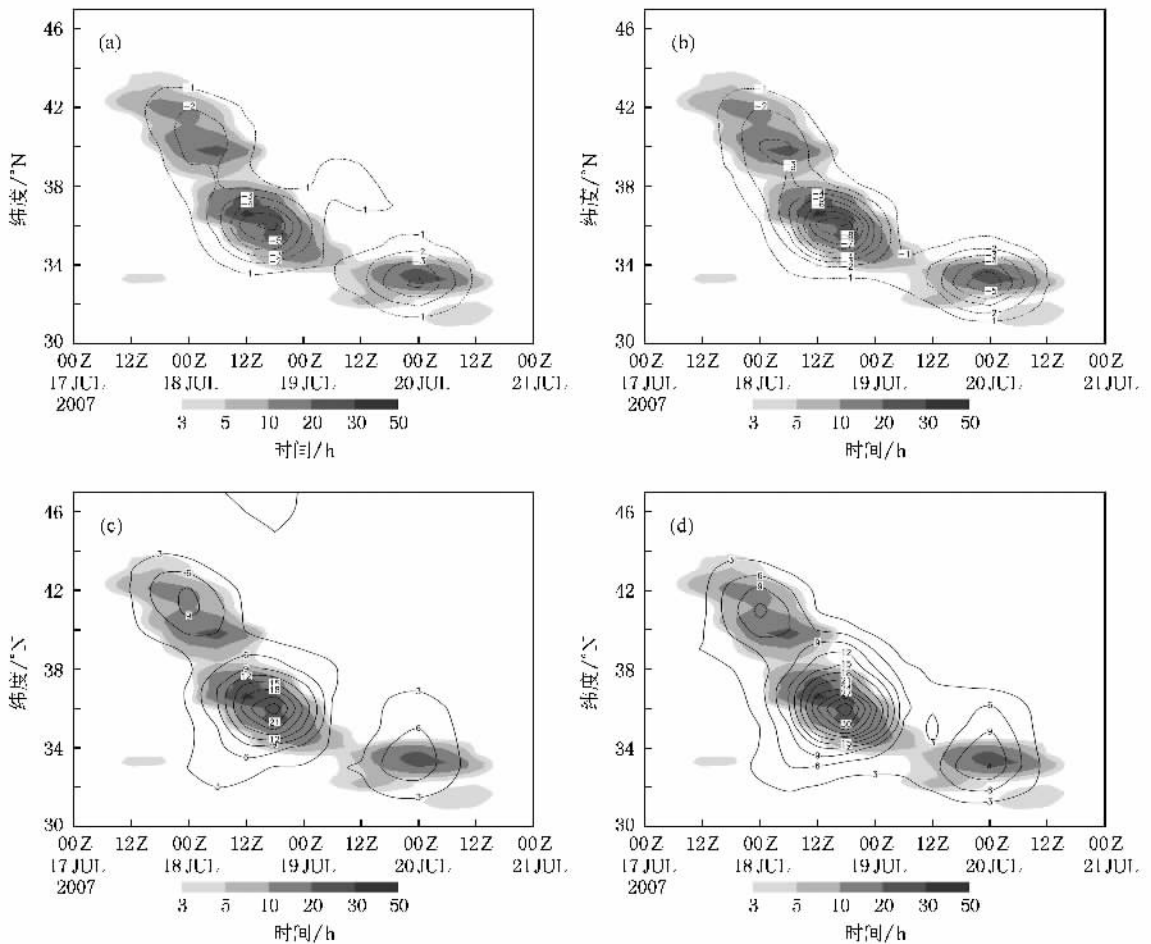


图 4 2007 年 7 月 17 日 00 UTC—21 日 00 UTC 纬向平均 ($116^{\circ}\text{—}119^{\circ}\text{E}$) 的垂直螺旋度负值区((a) $10\text{ kg}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa}^2\cdot\text{s}^{-2}$)、水汽垂直螺旋度负值区((b) $10^{-3}\text{ kg}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa}^2\cdot\text{s}^{-2}$)、散度通量正值区((c) $10\text{ kg}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa}^2\cdot\text{s}^{-2}$) 和水汽散度通量正值区((d) $10^{-3}\text{ kg}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa}^2\cdot\text{s}^{-2}$) 从 1000 hPa 至 100 hPa 垂直积分的时间演变,其中灰度图代表观测的 6 h 累积地面降水(单位: mm)

本个例的研究表明,垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式因为能够准确地表征强降水过程中雨区上空典型的动力垂直结构特征而与实际观测的 6 h

累积地面降水建立良好的对应关系。为了进一步验证这种对应关系在其他强降水过程中也存在,本文对 2008 年 1 月 29 日—2 月 3 日发生在我国南方的

冰雪凝冻天气进行诊断分析.

3.2. 个例 B

2008 年 1 月末至 2 月初我国南方地区发生大范围的冰雪凝冻天气. 本文利用 NCEP/NCAR 实时分析资料诊断分析该强降水过程中垂直螺旋度和散度通

量及其拓展形式与实际观测的 6 h 累积地面降水之间的关系.

如图 5 所示 2008 年 2 月 1 日 12 UTC 强降水区主要位于 24—30°N 纬度带内, 其上空的垂直上升区呈倾斜分布, 从地面向北倾斜伸展到对流层顶, 最大上升速度位于雨区上空 450 hPa 高度附近. 雨区上空

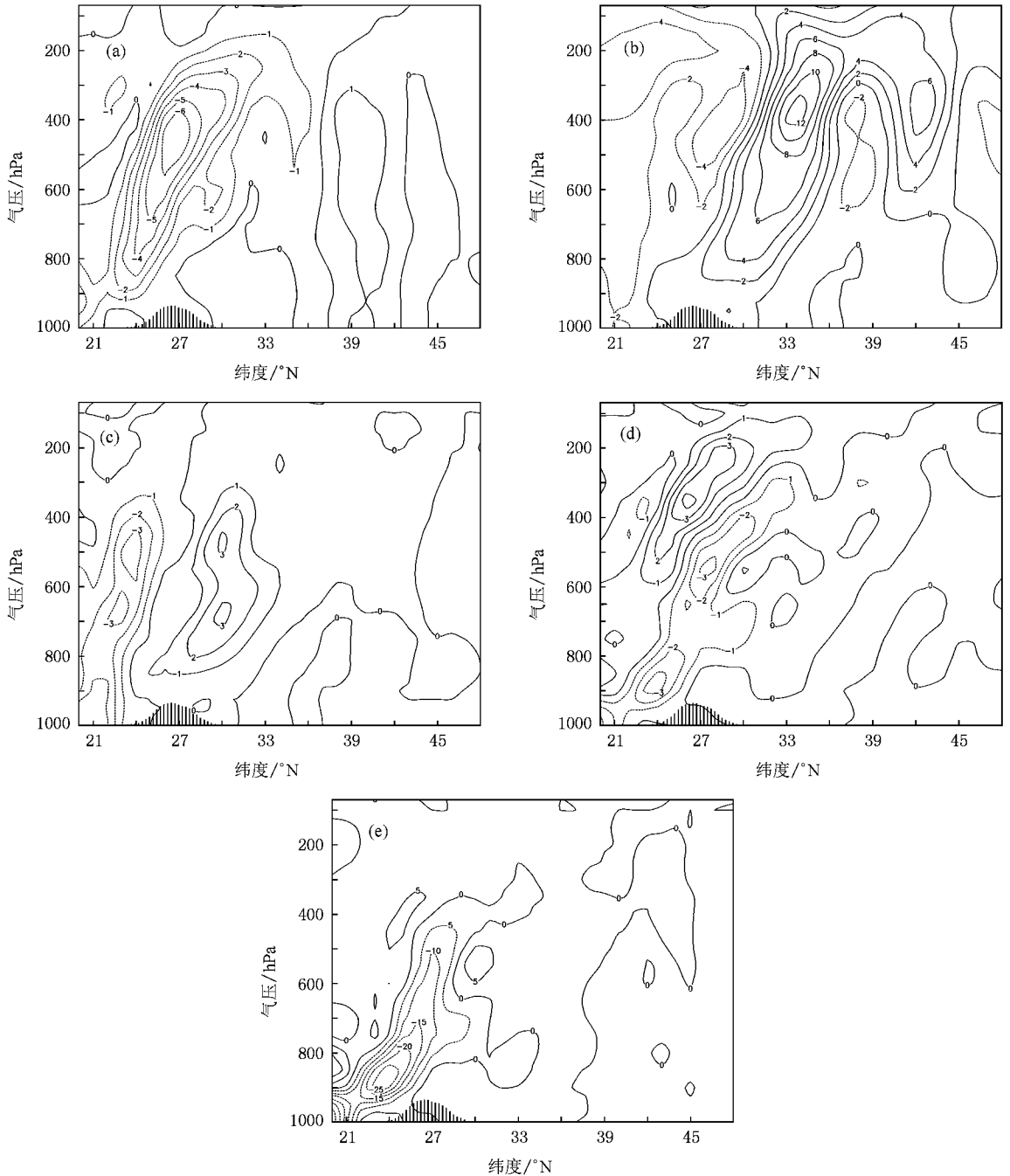


图 5 2008 年 2 月 1 日 12 UTC 纬向平均 (112—115°E) 的垂直速度((a) $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), 垂直涡度((b) 10^{-5} s^{-1}), 水汽通量涡度((c) 10^{-7} s^{-1}), 水平散度((d) 10^{-5} s^{-1}) 和水汽通量散度((e) 10^{-7} s^{-1}) 的经向-垂直分布, 其中细直方图代表观测的 6 h 累积地面降水 (单位: mm)

的垂直涡度相对来说比较弱,对流层低层为垂直涡度弱正值区,800 hPa 以上高度为垂直涡度弱负值区,雨区北侧对流层中高层的气旋性涡度比较显著,其正高值区随高度向北倾斜.水汽通量涡度主要位于雨区周围上空的对流层中低层,临近雨区的南侧为水汽通量涡度的负值区,临近雨区的北侧为水汽通量涡度的正值区,而雨区的上空并没有显著的水汽通量涡度.雨区上空的低层大气辐合,高层大气辐散,倾斜的水平辐合带与水平辐散带相邻,从近地面层向北倾斜伸展到 150 hPa 高度附近.水汽通量散度主要表现为负值,水汽通量辐合区从雨区南侧的近地面层向北倾斜垂直伸展到雨区上空 450 hPa 高度附近.

个例 A 中雨区上空动力场的结构基本上呈垂直分布,而在个例 B 中,雨区上空的动力场主要呈倾斜分布,并且在 850 hPa 高度以下的近地面层没有明显的气旋性涡度,水平辐合,气旋性水汽通量涡

度和水汽通量辐合.这种动力场垂直分布的差异导致了个例 B 中垂直螺旋度,散度通量,水汽垂直螺旋度和水汽散度通量的垂直分布结构不同于个例 A.如图 6 所示,2008 年 2 月 1 日 12 UTC 垂直螺旋度的正高值区主要出现在 26—32°N 纬度带的对流层中高层,略偏北于雨区,该正值区的北侧紧邻弱负值区.水汽垂直螺旋度的正负值区相邻,主要位于雨区周围上空 750—250 hPa 高度范围内,并且随高度倾斜伸展;雨区上空 550 hPa 以下高度主要为水汽垂直螺旋度的负值区,其上为正值区.雨区上空散度通量的正负高值区由南向北随高度倾斜分布,在 550 hPa 以上的对流层中高层,水平辐合和水平辐散的垂直向上输送最强烈.水汽散度通量的正值区与散度通量正值区的分布比较相似,都是在雨区上空倾斜向上伸展到 400 hPa 高度附近,但由于对流层中高层的水汽含量较少,所以水汽散度通量的负值区

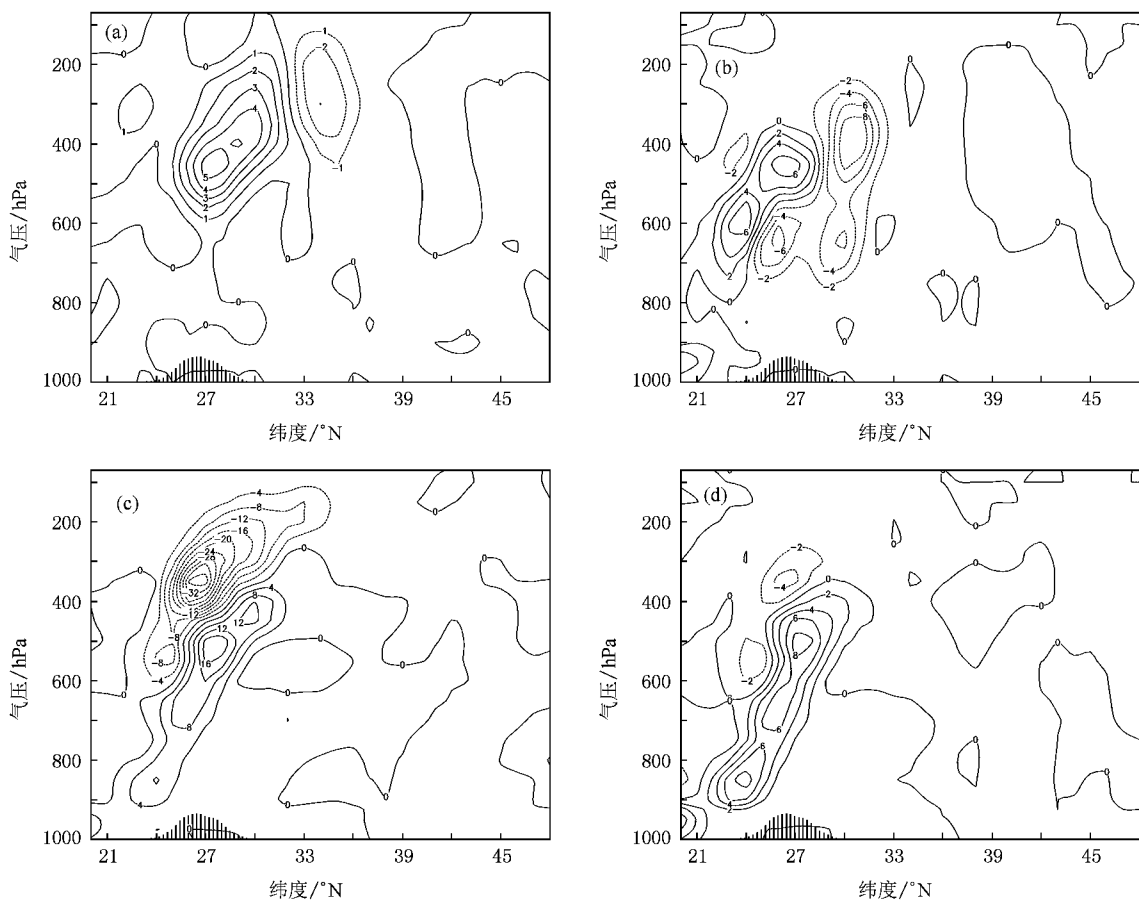


图 6 2008 年 2 月 1 日 12 UTC 纬向平均 (112—115°E) 的垂直螺旋度 (a) $10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$, 水汽垂直螺旋度 (b) $10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$, 散度通量 (c) $10^{-6} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ 和水汽散度通量 (d) $10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的经向-垂直分布, 其中细直方图代表观测的 6 h 累积地面降水 (单位: mm)

比较弱,由此可见水汽散度通量主要体现了散度通量的正值区,水汽的权重作用削弱了对流层高层散度通量的负值区.

从垂直积分的垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的水平分布来看(如图7所示),2008年2月1日12 UTC位于广西、湖南、江西、福建和浙江境内的降水区大体上成东北—西南走向的带状分布,垂直螺旋度和

散度通量及其拓展形式的异常值区也呈现为带状,在位置和走向上与雨带基本上相对应,覆盖着雨区,但宽度比雨带略宽,这些物理量本身的分布也略有差异,垂直螺旋度正高值区的位置比强降水区略偏北,而水汽垂直螺旋度正高值区在位置上比强降水区略偏南,散度通量和水汽散度通量的负值区完全覆盖雨区,并且它们的负高值中心与强降水中心基本上相对应.

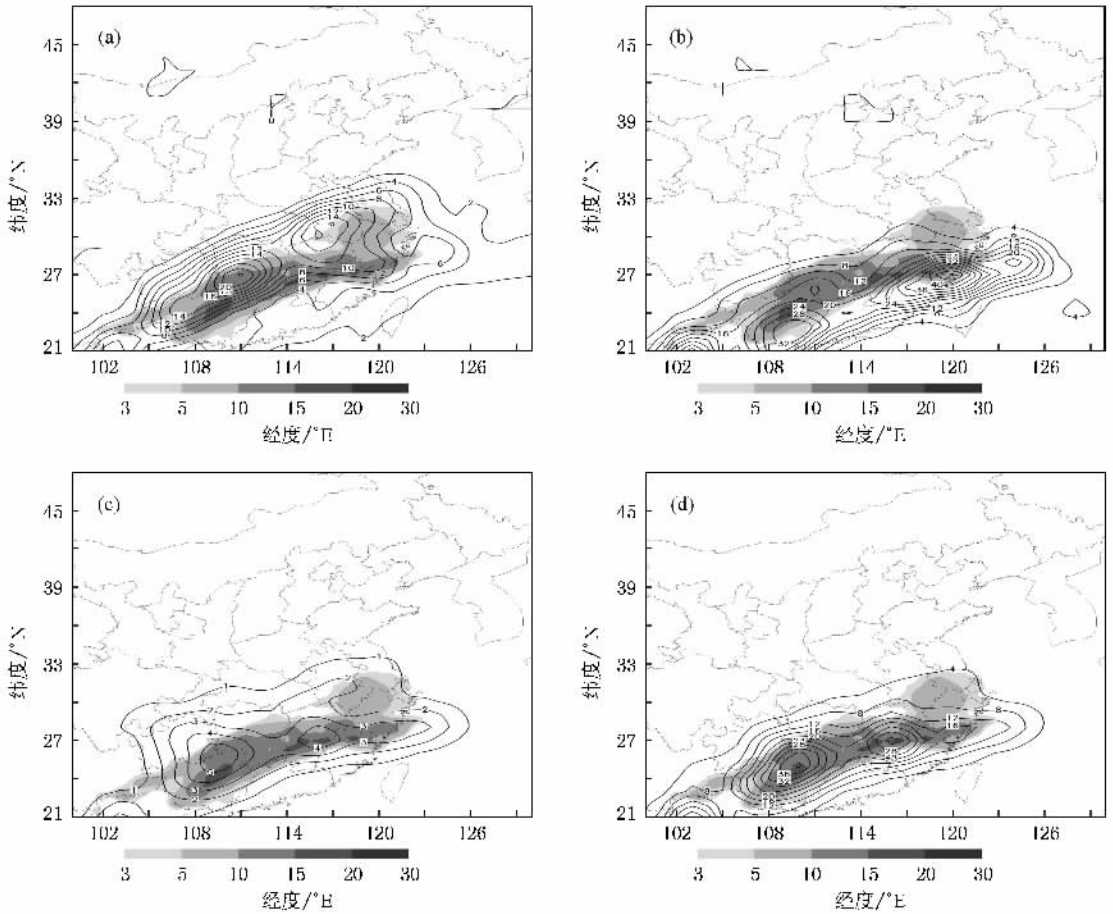


图7 2008年2月1日12 UTC垂直螺旋度正值区((a) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)、水汽垂直螺旋度正值区((b) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)、散度通量正值区((c) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和水汽散度通量正值区((d) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)从850 hPa至100 hPa垂直积分的水平分布,其中灰度图代表观测的6 h累积地面降水(单位: mm)

在时间演变趋势上,如图8所示,纬向平均(112—115°E)的雨带主要位于23—28°N纬度带内,并且2008年2月1日12 UTC的降水最强,垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的异常值区覆盖强降水区,其时间演变趋势与地面降水基本相似,但经向范围略宽于雨带,2月1日12 UTC垂直螺旋度和水汽垂直螺旋度的正高值中心都超前于强降水中心,前者略偏北于雨带,而后者略偏南于雨带,散度通量的

正高值中心与强降水中心对应较好,但是散度通量的覆盖范围较广,并且1月29日12 UTC 41°N附近和2月2日18 UTC 33°N附近的正高值区与雨区没有任何关系,相对来说,水汽散度通量与观测降水对应比较好,正值区的范围和2月1日12 UTC的正高值中心与雨带和强降水中心基本一致.

以上两个强降水过程的诊断分析表明,垂直螺旋度、散度通量、水汽垂直螺旋度和水汽散度通量能

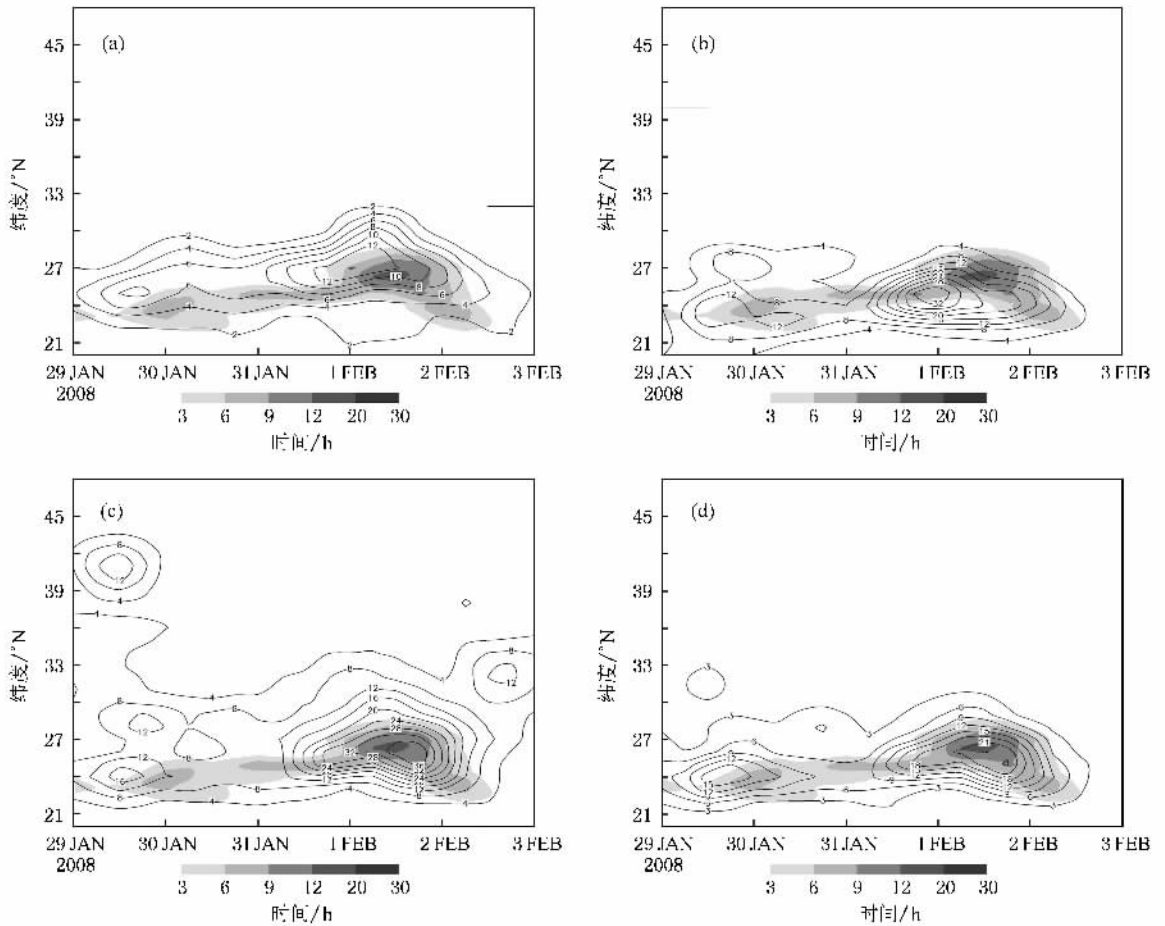


图8 2008年1月29日00 UTC—2月3日00 UTC 纬向平均(112—115°E)的垂直螺旋度正值区((a) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),水汽垂直螺旋度正值区((b) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),散度通量正值区((c) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和水汽散度通量正值区((d) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)从850 hPa至100 hPa垂直积分的时间演变,其中灰度图代表观测的6 h累积地面降水(单位: mm)

够比较准确地刻画强降水系统动力场的典型垂直结构,可以有效地表征强降水系统的发展和移动,因而这些量是与降水过程密切相关的物理量,与地面降水之间存在良好的对应关系。

4. 预报应用

本文分析强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的最终目的是为暴雨预报服务。为了检验这些物理量的预报能力,本文利用 NCEP-GFS 每日四次 6 h 预报场资料对这些物理量进行计算。如图 9 所示,在个例 A 中,6 h 预报的垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式与观测的 6 h 累积地面降水的时间演变趋势基本一致,三个观测强降水区与这些物理量的高值区相重叠,2007 年 7 月 18 日 06

UTC 和 20 日 00 UTC 的强降水中心基本上对应着垂直螺旋度和水汽垂直螺旋度的负高值中心以及散度通量和水汽散度通量的正高值中心。

如图 10 所示,个例 B 的垂直螺旋度,水汽垂直螺旋度和散度通量的正高值区覆盖着雨区,2008 年 2 月 1 日 12 UTC 的强降水区与垂直螺旋度和散度通量的正高值中心相对应,但它们的经向范围大于雨区,并且有些正值区并不对应雨区;另外,2008 年 1 月 31 日 18 UTC 水汽垂直螺旋度正高值中心超前并偏南于强降水中心。相对而言,水汽散度通量与实际雨区的匹配非常好,二者的区域范围相当一致,并且 2008 年 2 月 1 日 12 UTC 二者的强中心互相对应。

以上分析表明垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式对强降水系统具有一定预报能力,可以作为对暴雨具有指示预报意义的动力预报因子。在个例 A

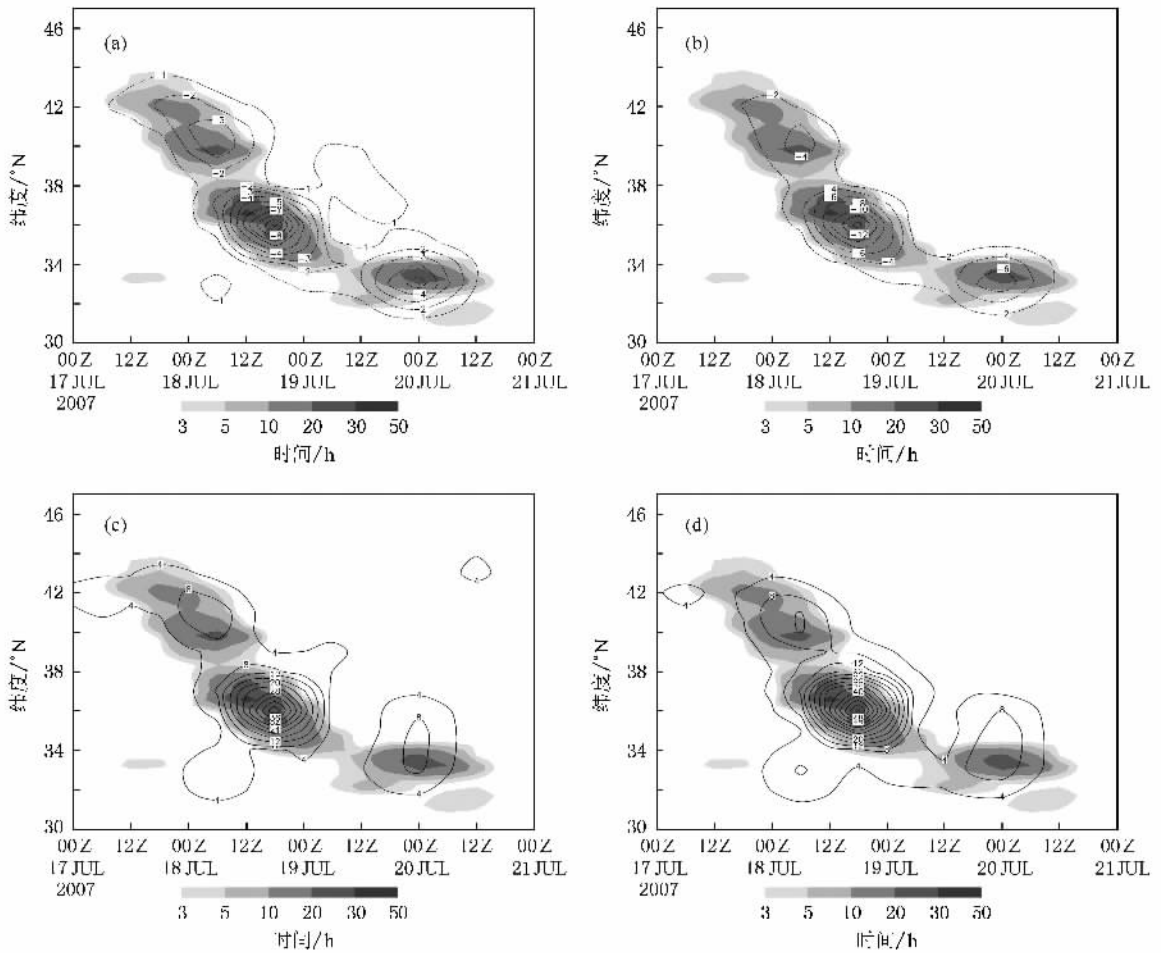


图9 利用 NCEP-GFS 每日四次 6 h 预报场资料计算的 2007 年 7 月 17 日 00 UTC—21 日 00 UTC 纬向平均 (116—119°E) 的垂直螺旋度负值区((a) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 水汽垂直螺旋度负值区((b) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 散度通量正值区((c) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 和水汽散度通量正值区((d) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 从 1000 hPa 至 100 hPa 垂直积分的时间演变, 其中灰度图代表观测的 6 h 累积地面降水(单位: mm)

中这四个物理量对降水都有很好的表征,在个例 B 中水汽散度通量对降水的表征比较准确,因此从这两次强降水过程综合来看,水汽散度通量是最突出的动力预报因子。

5. 讨 论

在垂直螺旋度的基础上,本文引入宏观物理量——散度通量,考虑到水汽在强降水过程中的重要作用,进一步把垂直螺旋度和散度通量拓展到水汽情况,定义了水汽垂直螺旋度和水汽散度通量两个物理量。

利用 NCEP/NCAR 实时分析资料,本文对两次强

降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的空间分布和时间演变进行诊断分析。结果表明,这些物理量能够综合地刻画强降水系统所共有的典型动力场垂直结构,而这种典型的垂直结构与地面降水联系紧密,因此这些物理量与降水系统的发展演变密切相关,垂直积分的垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的异常值区与观测的 6 h 累积地面降水区相对应,它们的移动方向基本上一致,这说明垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式可以有效地表征强降水系统的发展和移动,对强降水落区和降水系统的发展移动具有良好的指示预测意义,是与强降水过程密切相关的重要宏观物理量。

本文利用 NCEP-GFS 每日四次的 6 h 预报场资

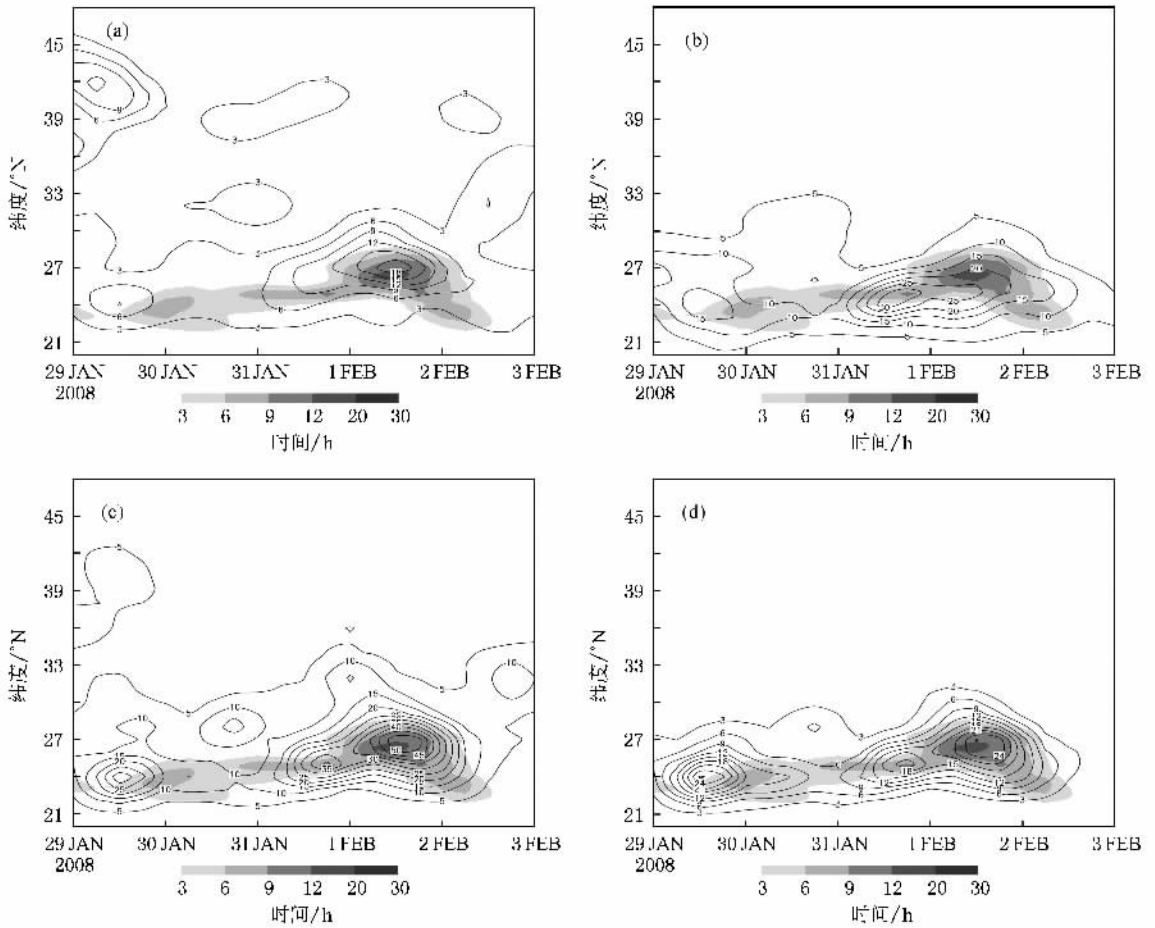


图 10 利用 NCEP-GFS 每日四次 6 h 预报场资料计算的 2008 年 1 月 29 日 00 UTC—2 月 3 日 00 UTC 纬向平均 (112—115°E) 的垂直螺旋度正值区((a) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)水汽垂直螺旋度正值区((b) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)散度通量正值区((c) $10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和水汽散度通量正值区((d) $10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)从 850 hPa 至 100 hPa 垂直积分的时间演变,其中灰度图代表观测的 6 h 累积地面降水(单位: mm)

料计算垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式来检验这些物理量的预报能力.结果表明,垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式对强降水系统都有一定的预报

能力.综合地来看,水汽散度通量是最突出的对暴雨具有指示预测意义的动力预报因子.

[1] Wu G X, Cai Y P, Tang X J 1995 *Acta Meteorologica Sinica* **53** 387 (in Chinese)[吴国雄、蔡雅萍、唐晓箭 1995 气象学报 **53** 387]
 [2] Gao S T, Lei T, Zhou Y S, Dong M 2002 *Quarterly Journal of Applied Meteorology* **13** 662 (in Chinese)[高守亭、雷霆、周玉淑、董敏 2002 应用气象学报 **13** 662]
 [3] Bi B G, Liu Y W, Li Z C 2005 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **29** 814 (in Chinese)[毕宝贵、刘月巍、李泽椿 2005 大气科学 **29** 814]
 [4] Chen Z M, Gao W L, Min W B, He G B 2006 *Plateau Meteorology* **25** 983 (in Chinese)[陈志明、高文良、闵文彬、何光碧 2006 高原气象 **25** 983]

[5] Yue C J, Shou Y X, Yao X P 2005 *Plateau Meteorology* **24** 450 (in Chinese)[岳彩军、寿亦萱、姚秀萍 2005 高原气象 **24** 450]
 [6] Li Y D, Liu J W, Gao S T 2005 *Meteorological Science and Technology* **33** 7 (in Chinese)[李耀东、刘健文、高守亭 2005 气象科技 **33** 7]
 [7] Wu R S, Tan Z M 1989 *Acta Meteorologica Sinica* **47** 436 (in Chinese)[伍荣生、谈哲敏 1989 气象学报 **47** 436]
 [8] Yang Y K, Liu Y L, Wan Z S 1994 *Acta Meteorologica Sinica* **52** 379 (in Chinese)[杨越奎、刘玉玲、万振拴 1994 气象学报 **52** 379]

- [9] Wu B J , Xu C H , Liu Y Y 1996 *Quarterly Journal of Applied Meteorology* **7** 108 (in Chinese) [吴宝俊、许晨海、刘延英 1996 应用气象学报 **7** 108]
- [10] Li Y H , Shou S W 1999 *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* **22** 95 (in Chinese) [李耀辉、寿绍文 1999 南京气象学院学报 **22** 95]
- [11] Gao S T , Zhou F F 2006 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **30** 854 (in Chinese) [高守亭、周非凡 2006 大气科学 **30** 854]
- [12] Lu H J , Gao S T 2003 *Acta Meteorologica Sinica* **61** 684 (in Chinese) [陆慧娟、高守亭 2003 气象学报 **61** 684]
- [13] Zheng F , Xu H M , Ding Y H 2008 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **32** 175 (in Chinese) [郑峰、徐海明、丁一汇 2008 大气科学 **32** 175]

Diagnosis of vertical helicity , divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events *

Ran Ling-Kun^{1)†} Chu Yan-Li²⁾

¹⁾ *Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China*

²⁾ *Institute of Urban Meteorology , CMA , Beijing 100089 , China*

(Received 1 February 2009 ; revised manuscript received 24 February 2009)

Abstract

On the basis of vertical helicity , we define three parameters , namely , the divergence flux , moisture vertical helicity and moisture divergence flux . The parameters are calculated with NCEP/NCAR real analysis data in the two heavy-rainfall events occurring in China . The result shows that the parameters are closely related to the precipitation systems since they are capable of describing the typical vertical structure of dynamical and moisture fields . The anomalies of the parameters vertically integrated well correspond with the observed 6h-accumulated surface rainfall . This suggests that the parameters are capable of predicting and indicating the development and propagation of precipitation systems . The calculation with the 6-hour forecasting data of NCEP-GFS shows that the parameters have the ability of predicting precipitation and the moisture divergence flux is significantly better than the other parameters in predicting precipitation .

Keywords : vertical helicity , divergence flux , moisture vertical helicity , moisture divergence flux

PACC : 9260 , 9260D , 9260X

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grants No. 2009CB421505) , the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 40875032 and 40875002) , the Technology Project (Grants No. GYH200706042) , and the Major Foreland Project of IAP (Grants No. IAP07201) .

† Corresponding author. E-mail : rlk@mail.iap.ac.cn