

用热成风螺旋度诊断强对流灾害天气

胡润山

(山西省大同市气象局, 大同 037004)

摘要 通过 2006 年 7 月 1~31 日逐日 08:00 探空资料计算 1000~100 hPa 各层的热成风螺旋度, 分析热成风螺旋度在各层等压面以及垂直剖面图上的分布与强对流灾害天气的关系。结果表明: 强对流灾害性天气出现前, 当地到邻近上游地区有正热成风螺旋度高值区(中心)存在, 当高值中心数值很大、正值区垂直方向层次较厚时, 出现的对流性灾害天气强度较大, 出现站点数较多。热成风螺旋度正值中心出现在强对流灾害天气产生以前, 且有 6 h 以上的提前量, 因此可以用热成风螺旋度诊断强对流灾害天气, 作为预报指标, 建立预报概念模型, 为强对流灾害天气预报提供依据。

关键词 热成风 螺旋度 强对流 灾害天气 诊断

引言

近年来, 许多学者用螺旋度来解释天气系统的发展变化, 并对螺旋度及其在气象学中的应用进行了深入研究, 将螺旋度用于龙卷、飚线、雷暴等强烈变化天气的诊断中, 取得了明显的研究进展^[1~3]。但螺旋度本身主要反映大气的动力特征, 而热力条件在天气系统的演变中同样有重要作用, 如果能将动力条件和热力条件相结合, 能更好地反映天气系统的演变情况。2004 年中国气象学会年会上伍荣生院士等人提出热成风螺旋度的概念, 热成风螺旋度既能反映大气动力特征又能反映大气热力特征, 其正负可以反映系统环流的增强或减弱趋势, 在一定程度上反映天气系统的演变情况^[4], 该成果在大气动力学方面研究较深入, 而本文将热成风螺旋度这一新概念用于诊断和预报强对流灾害性天气, 进行了尝试性研究, 收到了较好的效果。

1 热成风螺旋度计算与物理分析

1.1 热成风螺旋度计算

热成风螺旋度是水平风速取地转近似的切变风螺旋度^[4]:

$$H_T = \boldsymbol{\omega}_a \cdot \mathbf{V}_\tau \approx \boldsymbol{\omega}_{ah} \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial z} + (\zeta + f) \frac{\partial \omega}{\partial z}$$

$$= \boldsymbol{\omega}_{ah} \cdot \mathbf{V}_T + (\zeta + f) \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (1)$$

其中, H_T 、 $(\zeta + f)$ 、 z 、 ω 分别表示热成风螺旋度、绝对涡度垂直分量值、高度和垂直速度, 向量 $\boldsymbol{\omega}_a$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{ah}$ 、 \mathbf{V}_τ 、 \mathbf{V}_g 、 \mathbf{V}_T 分别为绝对涡度、水平绝对涡度、风的垂直切变、地转风、热成风, 利用热成风的关系式:

$$U_T = \frac{\partial U_g}{\partial z} = \frac{g}{f} = \frac{\partial \ln T}{\partial y}$$

$$V_T = \frac{\partial V_g}{\partial z} = \frac{g}{f} \frac{\partial \ln T}{\partial x}$$

可得:

$$H_T = - (g/f)(\nabla \ln T \cdot \nabla \omega) - (\zeta + f)(\nabla_h \cdot \mathbf{V}) \quad (2)$$

根据式(2)用差分代替微分进行离散化计算, 利用 08:00 探空实况资料计算出每个格点的 ζ 、 $\nabla_h \cdot \mathbf{V}$ 、 T 及 ω , 再用热成风螺旋度的差分式计算得到每个格点的 H_T 值, 单位为 10^{-7} s^{-2} 。

1.2 热成风螺旋度物理分析

1.2.1 热成风螺旋度与锋生函数

在自然坐标系中, 锋生函数^[5] $F = T_n V_n / n - (\gamma_d - \gamma) \partial \omega / \partial n + I / C_p \partial / \partial n (dQ / dt)$, 坐标轴与温度梯度方向相反, F 的第 2 项 $F_2 = -(\gamma_d - \gamma) \partial \omega / \partial n$ 与热成风螺旋度第 1 项 $H_{T1} = - (g/f)(\nabla \ln T \cdot \nabla \omega)$, 都反映在温度梯度方向上垂直速度的分布, 大尺度运动 $(\gamma_d - \gamma) > 0$, 当暖空气上升冷空气下沉

作者简介: 胡润山, 男, 1965 年生, 高级工程师, 主要从事天气分析与预报工作, Email: dtnyy112@sohu.com.

收稿日期: 2006 年 10 月 27 日; 定稿日期: 2007 年 1 月 25 日

时, $\partial\omega/\partial n > 0$, $F_2 < 0$, $H_{T1} < 0$ 锋消; 相反, $F_2 > 0$, $H_{T1} > 0$ 锋生。

1.2.2 热成风螺旋度与辐合辐散

H_T 的第2项 $H_{T2} = -(\zeta + f)(\nabla_h \cdot \mathbf{V})$, 大尺度运动 $(\zeta + f) > 0$, 当 $H_{T2} > 0$ 时, $\nabla_h \cdot \mathbf{V} < 0$, 有辐合作用。由位涡守恒, 辐合使得涡度随时间增加, 热成风螺旋度还能反映气旋和辐合系统生成和发展。

热成风螺旋度是在热成风关系成立的前提下得到的。虽然局地强对流系统中很难满足这种条件, 但局地强对流系统的尺度小、持续时间短, 在强对流出现前的 08:00, 由于前一夜的辐射冷却, 大气层结不稳定性还不很大, 强对流系统往往还没有明显地表现出来, 仍可近似用热成风关系式描述大尺度运动特征。白天随着低层大气辐射升温加强, 不稳定性大大加强, 在有利的大尺度天气背景下产生强对流, 多数强对流天气出现在中午到夜间^[6]。热成风螺旋度本身是个诊断量, 也不直接用于描述强对流系统, 但从其物理意义看, 正热成风螺旋度能反映锋生、辐合和气旋等一些重要天气系统的发生和发展, 夏季锋生、气旋和辐合作用很强时易于产生强对流灾害性天气^[6~8], 因此, 可以利用热成风螺旋度所反映温压场配置及大气运动现状和发展趋势, 了解未来大尺度环境是否有利于强对流系统出现, 来诊断和预报强对流灾害天气^[7,8]。

2 资料来源与处理

利用 2006 年 7 月 1~31 日 08:00 逐日常规探空资料, 在 $20^\circ \sim 48^\circ \text{N}$, $84^\circ \sim 128^\circ \text{E}$ 范围内内插到格距 $1^\circ \times 1^\circ$, 形成 65×81 个格点资料, 计算 1000~100 hPa 各层的热成风螺旋度, 取 $38.5^\circ \sim 40.5^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 114^\circ \text{E}$ 为灾害天气研究区域(下文同), 该区域内有大于等于 1 个站点记录冰雹、飏线、短时暴雨或雷雨大风(包括龙卷风和下击暴流)等天气现象大于等于 1 种为强对流性灾害天气, 否则, 无强对流天气, 其中短时暴雨以地面常规观测资料和加密单要素自动雨量站资料当日 14:00、20:00 和次日 02:00、08:00 等 4 个时次中任意一个时次记录 6 h 降水量大于等于 20 mm 为准, 其余灾害天气以地面常规观测资料 4 个时次中任意一个时次记录的过去 6 h 内的灾害天气现象为准。

3 用热成风螺旋度诊断和预报强对流灾害性天气

通过普查 2006 年 7 月 1~31 日逐日 08:00 各层热成风螺旋度分布与地面强对流性灾害天气出现情况, 分析热成风螺旋度与强对流性灾害天气的关系。在研究区域内出现强对流性灾害天气 11 天, 分别是 2 日、9 日、10 日、12 日、13 日、16 日、17 日、24 日、25 日、26 日、31 日。从分析结果来看有强对流性灾害天气的 11 天, 在 500~300 hPa 有正的热成风螺旋度高值中心存在, 下面以灾害天气强度大出现站点多的 12 日、13 日和 24 日这 3 次过程为典型案例进行分析。

个例 1: 2006 年 7 月 12 日 14:00~20:00 在研究区域内有 5 个县出现强对流灾害性天气, 其中阳高、天镇和右玉 3 个县分别出现 17、18、22 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷雨大风; 东胜和偏关出现大风伴冰雹, 最大冰雹直径 7 mm 和 3 mm, 最大风速 22 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。12 日 08:00 在 300 hPa 热成风螺旋度图上(图 1a), 河套地区为大片的正热成风螺旋度区域, 该区域内有一个数值为 $150 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$ 的高值中心位于 40°N 、 108°E , 研究区域中大部分地区已处于正热成风螺旋度区, 而且在 300 hPa 的西风气流作用下, 不断有正热成风螺旋度向该区域输送。该正值中心直到 500 hPa 上表现仍很明显, 表明其有较大的强度和厚度。在 12 日 08:00 地面图(略)上, 河套西部有一弱冷高压, 高压前部高空正热成风螺旋度中心使得底层锋生作用加强。14:00 冷锋逼近研究区域, 锋前气流辐合也大大加强, 以后随着弱冷空气东移, 加上底层的辐合作用, 在研究区域内产生了冰雹(图 1 中黑三角)和大风等强对流性灾害天气^[6]。

个例 2: 13 日 14:00~20:00 在研究区域内大同、阳源和丰镇分别出现了 18、20、19 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风, 右玉和神驰分别出现了最大直径 9 mm 和 7 mm 的冰雹。13 日 08:00 在 300 hPa 热成风螺旋度分布图上(图 1b), 内蒙中部为大片的正热成风螺旋度区域, 研究区域北侧完全处于该正热成风螺旋度区, 其北侧是一个数值为 $190 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$ 的高值中心, 而且在 300 hPa 槽后偏北气流作用下, 不断有正热成风螺旋度输送。该正值中心直到 400 hPa 上表现仍很明显。在 13 日 08:00 地面图上(图略), 内蒙北部有一条东西方向的冷锋, 冷锋前部高空正热成风螺旋度中心产生的底层锋生作用使得冷锋快速南移并加

强,14:00 冷锋移动到 40°N ,以后随着冷锋南移,在研究区域内产生了强对流性灾害天气,到 20:00 该区域完全被冷高压控制,强对流性灾害天气结束。

个例 3: 24 日 14:00~20:00 五台县、山阴、原平和阳原 4 个县出现冰雹,最大直径分别为 5 mm、8 mm、4 mm 和 3 mm,平鲁出现了 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风。24 日 08:00 在 300 hPa 热成风螺旋度分布图上(图 1c),河套地区为大片的正热成风螺旋度区域,该区域内有一个中心数值为 $63\times 10^{-7}\text{ s}^{-2}$ 的高

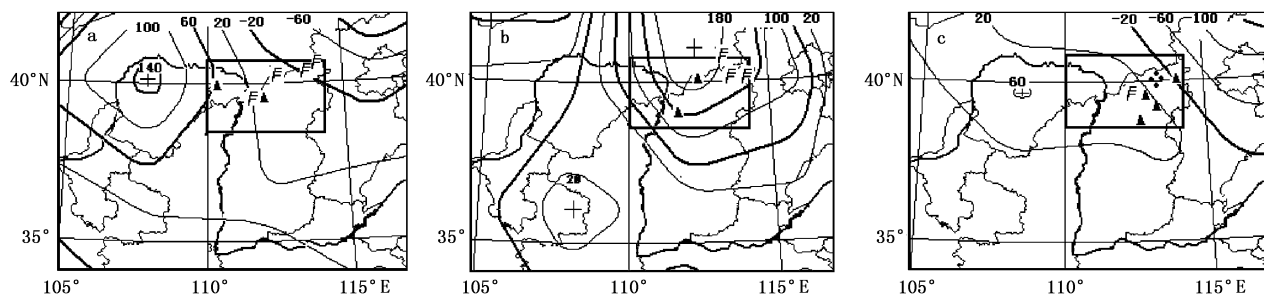


图 1 2006 年 7 月 08:00 300 hPa 热成风螺旋度(单位: 10^{-7} s^{-2})与研究区域内灾害性天气
(a. 12 日, b. 13 日, c. 24 日, 黑三角为冰雹)

上述分析结果表明,12 日和 13 日是正热成风螺旋度反映锋生作用为主,地面有弱冷空气或冷锋产生强对流天气,24 日是正热成风螺旋度反映气旋和辐合作用为主,虽然地面没有明显的冷空气活动,强烈的辐合作用产生垂直上升运动导致强对流性灾害天气产生。9 日、10 日、17 日和 31 日与 12 日相似。2 日、16 日、25 日和 26 日与 24 日相似不再详述。这 11 次灾害性天气出现前上游都有正的热成风螺旋度高值中心,但最强中心出现的层次、范围及厚度不完全相同,为进一步了解热成风螺旋度的三维分布与强对流天气的影响,取 40°N 、 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 对逐日热成风螺旋度作垂直剖面,在剖面图上分析当日 08:00 热成风螺旋度与未来 24 h(当日 08:00 至次日 08:00)的灾害性天气的关系,下面仍以上述 3 次强对流性灾害天气过程为典型个例分析热成风螺旋度在剖面图上的分布特征。

个例 1: 2006 年 7 月 12 日 08:00 热成风螺旋度剖面图上(图 2a), $101^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ 范围为深厚的热成风螺旋度的正值区,其厚度从地面附近一直延伸到 200 hPa 附近,该区内的最高值中心位于 108°E 上空,位置略高于 300 hPa,数值达到 $156\times 10^{-7}\text{ s}^{-2}$ 。

个例 2: 2006 年 7 月 13 日 08:00 热成风螺旋度剖面图上(图 2b), $108^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ 范围为热成风螺

旋度的正值区,其厚度 500 hPa 附近延伸到 200 hPa 附近,虽然厚度较薄但中心数值很大,达到了 $186\times 10^{-7}\text{ s}^{-2}$,中心位于 112°E 上空 300 hPa 附近。

个例 3: 2006 年 7 月 24 日 08:00 热成风螺旋度剖面图上(图 2c), $106^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 范围为深厚的热成风螺旋度正值区,该正值区随高度向后倾斜,其厚度从地面附近一直延伸到 100 hPa 附近,高层的高值中心位于 108°E 上空 200 hPa 附近,中心数值达到 $60\times 10^{-7}\text{ s}^{-2}$ 。低层 112°E 上空 700 hPa 附近也有一个高值中心强度较弱,个例 3 虽然中心数值比前两个个例小的多,但正热成风螺旋度厚度很大。

热成风螺旋度剖面上,上述 3 个个例在研究区及邻近上游都有正的热成风螺旋度中心,中心数值很大、厚度很厚,有灾害天气的另外 8 天也有类似的特点。为了验证这种方法的可靠性,找到预报指标以建立预报概念模型,在 2006 年 7 月 1~31 日逐日热成风螺旋度剖面图上,读取正值区内的高值中心的数值和 3 个不同级别层的厚度(下界与上界气压差表示),并与强对流天气对比分析(表 1),从表 1 可以看到,热成风螺旋度中心数值大于 $56\times 10^{-7}\text{ s}^{-2}$ 的共有 12 天,其中 11 天在研究区域内有强对流灾害天气。其余 19 天热成风螺旋度中心数值小于 $56\times 10^{-7}\text{ s}^{-2}$,均无强对流灾害天气。有强对流性灾

害天气时,08:00的热成风螺旋度大于等于0、大于等于 $16 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 、大于等于 $56 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 层的厚度都比较厚,大于等于 $16 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 厚度达300 hPa以

上共有13次,其中11天有强对流性灾害天气,小于300 hPa共18天均无强对流灾害天气。

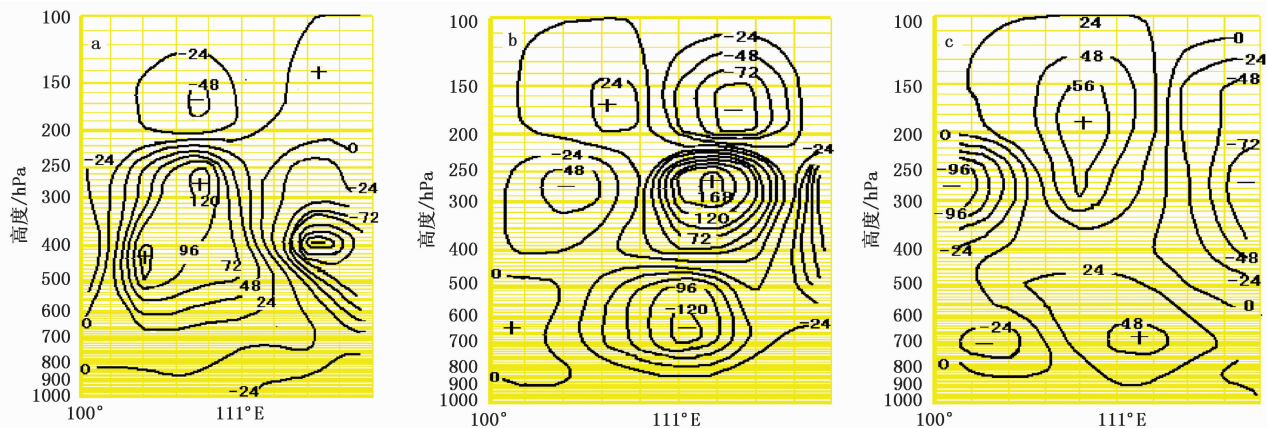


图2 2006年7月08:00热成风螺旋度(单位: 10^{-7} s^{-2})沿 40° N 垂直剖面(a.12日,b.13日,c.24日)

表1 2006年7月逐日热成风螺旋度(H_T)高值区与强对流天气对比

日期	H_T 正中心值 10^{-7} s^{-2}	$H_T \geq 0$ 厚度/hPa	$H_T \geq 16 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 厚度/hPa	$H_T \geq 56 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 厚度/hPa	强对流灾害天气实况		
					站数	类型,强度	时差/h
1日	64	500	300	100			
2日	72	900	300	100	2	W19	6
3日	40	500	200				
4日	8	300					
5日							
6日	40	250	150				
7日	16	250	70				
8日	8	150					
9日	178	600	380	180	3	R50	6
10日	89	700	400	150	1	W21	6
11日							
12日	156	800	500	350	5	H7,W22	6
13日	186	350	300	250	5	H9,W20	6
14日	24	350	200				
15日	16	400	150				
16日	136	500	480	400	3	R38	12
17日	120	600	500	350	3	R26	12
18日	32	600	350				
19日							
20日	8	400					
21日	24	300	50				
22日							
23日							
24日	60	850	648	50	6	H8,W22,R26	6
25日	84	700	547	200	3	W17,R44	6
26日	160	600	400	450	3	W22,R22	18
27日	42	600	250				
28日							
29日							
30日							
31日	160	550	430	400	2	W22	6

注:“强对流灾害天气实况”栏下的“类型,强度”分栏中大风用W标识,其后的数字表示最大风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);冰雹为H,其后数字为最大冰雹直径(mm);暴雨为R,其后数字为6h最大降水量(mm);时差表示灾害天气出现与08:00正热成风螺旋度出现的时间差。

在 40°N 作热成风螺旋度的垂直剖面,如果取 $100^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 之间的热成风螺旋度大于 $56\times 10^{-7}\text{s}^{-2}$ 且大于等于 $16\times 10^{-7}\text{s}^{-2}$ 厚度达到300 hPa以上作为预报指标^[6,8],研究区域强对流灾害性天气回报拟合率达到30/31,无漏报。

4 结论

热成风螺旋度是运动方程、状态方程和连续方程的综合,能反映锋生、辐合和气旋等一些与强对流性灾害天气有关的重要天气系统的发生和发展,因此,热成风螺旋度在强对流灾害性天气诊断中有重要的作用。

(1)强对流灾害性天气出现前,在500~300 hPa等压面上,本文研究区域到邻近上游地区有正热成风螺旋度高值区(中心)存在,当高值中心数值很大、高值区垂直厚度比较厚时,强对流灾害天气强度较大出现站点较多。

(2)热成风螺旋度正值中心出现在强对流灾害天气前,且有6 h以上的提前量,因此可以作为强对流灾害天气预报指标。

(3)在垂直剖面上,热成风螺旋度中心数值大于

$56\times 10^{-7}\text{s}^{-2}$,且大于等于 $16\times 10^{-7}\text{s}^{-2}$ 的厚度达到300 hPa以上时易于产生强对流灾害天气,2006年7月的研究区域强对流灾害性天气回报拟合率达到30/31。

参考文献

- [1] 伍荣生,谈哲敏. 广义涡度与位势涡度守恒定律及其应用[J]. 气象学报,1989,47:436-442.
- [2] 郑峰. 螺旋度应用研究综述[J]. 气象科技,2006,34(2):119-123.
- [3] 李耀东,刘建文,高守亭. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展[J]. 气象科技,2005,33(1):8-12.
- [4] 伍荣生,方娟,韩瑛. 热成风螺旋度及其在天气动力学中的应用[G]//中国气象学会年会论文集. 北京:中国气象学会,2004.
- [5] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,1981:70-76.
- [6] 胡润山,苏晓燕,阎冠华,等. 用尺度分离法诊断夏季中尺度系统[J]. 南京气象学院学报,2005,28(6):821-826.
- [7] 张迎新,胡欣,张守保. 湿位涡在“96.8”特大暴雨过程中的应用分析[J]. 气象科技,2004,32(增刊):25-28.
- [8] 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J]. 应用气象学报,2004,15(6):754-765.

Application of Thermal Wind Helicity to Diagnosis of Severe Weather

Hu Runshan

(Datong Meteorological Bureau, Shanxi Province, Datong 037004)

Abstract: The relationship between thermal wind helicity and severe convective weather is analyzed by calculating the helicity from 1000 hPa to 100 hPa, 1 to 31 July 2006 at Datong of Shanxi Province. The result shows that there was a high value center of thermal wind helicity before the severe weather occurred, and the higher the value was, the severer the weather was. This center appeared 6 hours before severe weather occurred. The thermal wind helicity can be used as an indicator in forecasting severe weather.

Key words: thermal wind helicity, severe convection, disastrous weather, diagnosis