

2005 年 6 月广东特大暴雨垂直螺旋度分析

尤 红^{1,2} 姜丽萍³ 彭 端⁴ 夏冠聪³

(1. 云南大学大气科学系,昆明 650091; 2. 云南省玉溪市气象台;
3. 广东省中山市气象台; 4. 广东省肇庆市气象台)

提 要: 利用 NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点资料和常规观测资料对 2005 年 6 月广东发生的连续性特大暴雨过程进行垂直螺旋度诊断分析,结果表明:广东特大暴雨范围、强度与该地区上空中低层正、高层负垂直螺旋度中心迅速增大、减小密切相关,并和中心增大、减小区域也有很好的对应关系。当中低层正螺旋度迅速增大,高层负螺旋度迅速减小或中低层正、高层负螺旋度中心增大、减小区重叠在同一经度或纬度线附近时,对应地面雨强最强和强降水范围最大。过程中龙门连续两天特大暴雨和广东最多暴雨日出现期间,其上空垂直螺旋度对应中有中低层正、高层负螺旋度闭合中心向低层明显传送的特征。

关键词: 特大暴雨 垂直螺旋度 传送 分析

Analysis of Vertical Helicity for "05.6" Heavy Rainstorm Process over Guangdong

You Hong^{1,2} Jiang Liping³ Peng Duan⁴ Xia Guancong³

(1. Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091;
2. Yuxi Meteorological Observatory, Yunnan Province; 3. Zhongshan Meteorological Observatory, Guangdong Province;
4. Zhaoqing Meteorological Observatory, Guangdong Province)

Abstract: Using the NCEP grid $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ data and convection observational data, The vertical helicity was applied to analyze heavy rainstorm processe, which occurred in June, 2005 over Guangdong. The results of diagnostic analyses show that both the rapidly strengthening trend of the value in positive center of the vertical helicity at lower level and the rapidly lessening trend of the negative one at upper level during the rainstorm can reflect the position and intensity of the heavy rainstorm in Guangdong. When the value in negative center of hp at upper level rapidly reduced and the positive one at lower level rapidly increased, and when the region of both the positive helicity center turning strong and the negative one turning poor overlapped near the same longitude

or latitude, the rainfall over the corresponding region reached the maximum and the intensity of the rainstorm reached the strongest. During the heavy rainfall which is never suffered in a century in Longmen and the most heavy rainfall days in Guangdong, positive vertical helicity center at the lower-level troposphere and negative one at the upper troposphere tends downwards to the low-level.

Key Words: heavy rainstorm over vertical helicity propagation diagnostic analysis

引 言

螺旋度是一个描述环境风场气流沿运动方向的旋转程度和运动强弱的物理参数,它反映了大气的运动场特征,能够很好地描述大气运动的性质和特点^[1]。近年来螺旋度被广泛用于天气动力学研究,特别是强对流天气预报、中小尺度暴雨、台风暴雨、沙尘暴等研究中^[2-7],杨红宇等^[2]用风暴相对螺旋度对艾利台风暴雨进行了分析,指出低对流有效位能与高螺旋度相结合时暴雨中心与螺旋度高值区对应较好;张润琼等^[6]将螺旋度分析用于贵州大暴雨的分析中也取得了一些有意义的结果。

2005年6月18—25日广东省出现大范围大暴雨天气过程,过程强度高、持续时间长、强降水范围先集中后扩大,龙门、河源遭遇四百年一遇的特大暴雨袭击,广东最多的日暴雨站次44次出现在21日,导致广东多洪涝、泥石流、山体滑坡灾害发生,直接经济损失达42.9亿元。利用螺旋度理论对此次广东特大暴雨(简称“05.6暴雨”)过程进行诊断分析,发现过程中龙门百年不遇连续两天特大暴雨和广东最多暴雨日出现期间,中低层正、高层负螺旋度闭合中心有向低层明显传送的特征,拓展了广东特大暴雨的分析研究方法。

1 螺旋度表达式

螺旋度严格的定义式为风速与涡度点积的体积分

$$H = \int_{\tau} \mathbf{V} \cdot (\nabla \wedge \mathbf{V}) d\tau \quad (1)$$

从上式可见,螺旋度的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度。在 P -坐

标系中展开后,垂直方向上的螺旋度计算方法为:

$$H_p = -\xi \times \omega \quad (2)$$

式中 ξ 表示涡度, ω 表示垂直速度, H_p 表示垂直螺旋度,单位为 $10^{-8} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。垂直方向上的螺旋度在大雨以上重要天气产生期间和产生后量级相差很大,一般在 $10^3 \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右,较涡度和垂直速度变化更为敏感,因此垂直螺旋度在大雨以上强对流天气分析、预报中有很好的指示作用。

2 暴雨过程特征及环流形势分析

2005年6月中、下旬,副热带高压位置持续偏南,脊线维持在 $18 \sim 20^\circ \text{N}$,受强盛西南气流和频繁入侵弱冷空气以及西南低涡共同影响,华南遭受多次暴雨过程袭击,特别是6月17—25日广东省中部、南部地区(河源、龙门、佛岗、新丰、海丰等地)出现四百年一遇的特大暴雨。强降水集中在18—23日,其中广东龙门站18日20时—21日20时(北京时间,下同)72小时降985.5mm特大暴雨,17—25日过程总雨量达1339.6mm,1小时降72.7mm的最大雨强出现在21日5—6时,为历史罕见。通过对“05.6”暴雨降水过程各高度场环流形势以及卫星云图、雷达回波的分析发现:广东“05.6”特大暴雨是在大尺度环流背景下不断有新生中小尺度气旋影响造成的。

3 垂直螺旋度分析

3.1 垂直螺旋度的时空分布特征

图1为 $18 \sim 26^\circ \text{N}$ 、 $105 \sim 117^\circ \text{E}$ 区域的平

均垂直螺旋度和平均垂直速度时间垂直剖面图。由图 1a 可见:17—25 日特大暴雨过程中,400hPa 以下中低层一直为正螺旋度区控制,高层为负螺旋度,16—17 日和 21—24 日上空的正、负垂直螺旋度均为一个增强、减弱与向上伸展的过程,期间分别在 600hPa 和 850hPa 高度上出现三个闭合的大于 $5 \times 10^{-6} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 强正垂直螺旋度中心,与之相对应的 400hPa 以上层出现两个负螺旋度区,最小的负螺旋度中心出现在 21—22 日的 200~300hPa 间,值达 $-5 \times 10^{-6} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。可见,16 日 08 时—17 日 08 时、20 日 14 时—22 日 08 时和 22 日 20 时—23 日 08 时 400hPa 以下层中低层的正垂直螺旋度迅速增大,400hPa 以上层的负垂直螺旋度迅速变小,而 17 日 08 时—18 日 08 时、22 日 08 时—22 日 20 时和 23 日 08 时至 25 日则是中低层正螺旋度减小和高层负螺旋度增大过程,在此期间广东的强降水分布有明显特点(见图 2),即当 400hPa 以下层中低层的正垂直螺旋度迅速增大,400hPa 以上层的负垂直

螺旋度迅速变小时,广东出现暴雨站数、强度迅速增加、增大,相反则对应广东暴雨站数、强度迅速减少、减弱。这种垂直螺旋度中低层正、高层负中心的配置和值大小变化趋势与广东连续性大暴雨、局地特大暴雨出现时间和落区范围有很好对应关系。从暴雨发生期间的涡度(图略)和垂直速度时间剖面图(图 1b)上可见:暴雨发生期间的螺旋度的负值区对应负涡度,正值区对应正涡度,21 日—23 日低层辐合上升、高层辐散运动非常剧烈,当辐合、辐散加强时广东各地暴雨站次相应增加,21 日出现最多的 44 暴雨站次,这种上下耦合的结构对天气系统自身的发展及暴雨的维持是十分有利的;暴雨上空 200hPa 以下层为剧烈深厚的垂直上升运动区控制,17—23 日连续 5 日均对应大垂直上升运动中心,最强盛垂直上升运动出现在 21—23 日,强上升中心小于 $-24 \times 10^{-2} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,该强中心于 22 日 08 时伸展到 500~250hPa 层间,说明暴雨期间上升气柱高且上升运动剧烈,这均与暴雨中的垂直螺旋度分布特征紧

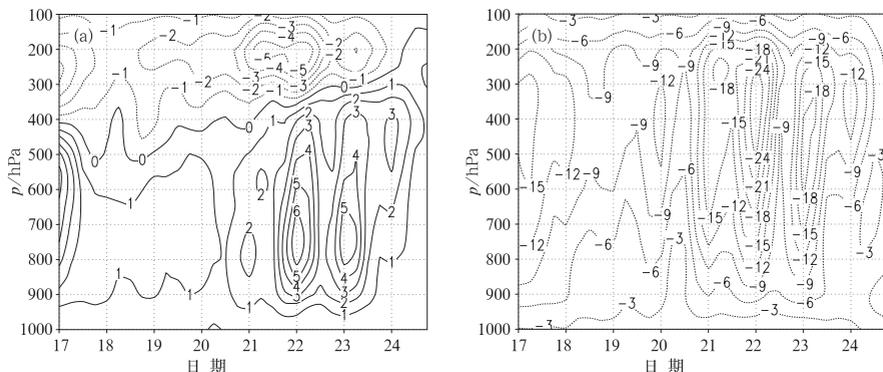


图 1 2005 年 6 月 17—24 日广东特大暴雨区域(18~26°N,105~117°E)的平均垂直螺旋度(a,单位: $10^{-6} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$)和平均垂直上升速度(b,单位: $10^{-2} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)时间垂直剖面

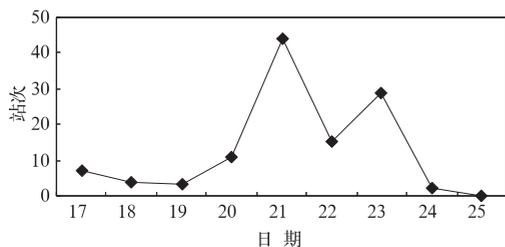


图 2 2005 年 6 月 17—25 日广东省日暴雨站次

密联系。以上分析表明此次广东特大暴雨过程有良好的动力条件支撑。

3.2 垂直螺旋度的水平分布特征和广东特大暴雨落区的关系

“05.6”特大暴雨过程中在广东河源、龙门有两个暴雨中心。从各等压面上逐日垂直

螺旋度的水平分布特征演变情况来看,700hPa 层上垂直螺旋度分布与天气系统有较好的对应关系,从特大暴雨(18~26°N、105~117°E)区域的 700hPa 垂直螺旋度和流场合成图(图略)可见,暴雨过程中 700hPa 垂直螺旋度正值区长轴始终与 700hPa 的切变辐合线走向一致。18 日 08 时垂直螺旋度正值区长轴位于广西,呈南北走向,略向东北—西南倾斜,随后逐渐移进广东,22 日 08 时后从广东东北角移出。19 日至 22 日 700hPa 垂直螺旋度正值区长轴和切变辐合线东移,造成广东大范围特大暴雨。由特大暴雨(18~26°N、105~117°E)区域的 200hPa 垂直螺旋度分布图(图略)可见,广东特大暴雨的上、下层负、正垂直螺旋度配置明显,整个特大暴雨过程中,影响系统生成、加强、东移、减弱与暴雨落区上空的上、下层螺旋度正、负极值中心位置、移向变化较为一致。17 至 18 日 20 时,中低层正垂直螺旋度中心值明显大于高层负螺旋度中心值。18 日 20 时起,200hPa 负螺旋度明显减小,而且不断有新生强负值区在广东上空维持,中低层正螺旋度中心值相应不断增大,对流层上层强辐散区明显大于中低层辐合,表明对流层上层的抽气作用在不断加强。20—21 日 700hPa 上垂直螺旋度最大值中心值均表现出明显小于 200hPa 上负螺旋度负中心最小值,此期间对应广东省暴雨站次、局地(龙门站)暴雨强度均为最多最大。当弱冷空气南下,切变线和西南急流中心南压影响广东时,导致其上空中低层正螺旋度、高层负螺旋度迅速增大、减小,产生强烈的辐合上升运动,为暴雨的产生、加强、维持创造了强有利的动力条件。因此垂直螺旋度作为一种动力触发机制,其值大小、分布特征的变化对天气系统的移动、发展及暴雨的落区、强度有很好指示意义。

3.3 垂直螺旋度的剖面特征与广东龙门特大暴雨的关系

“05.6”暴雨过程持续时间长、暴雨范围广、局地雨势猛,以广东龙门为例,该站 20 日、21 日两天日雨量超 400mm。从卫星云图、雷达回波图上发现:暴雨期间不断有中小尺度云团在该地区发生发展、加强、减弱。为了进一步了解该地区强对流产生原因,利用垂直螺旋度沿龙门(23.73°N、114.23°E)做逐日纬向剖面分析,图 3 是对应龙门站降水最大时段的沿 23.73°N 垂直螺旋度 19 日至 21 日 20 时和 08 时的纬向垂直剖面分布图,图中充分反映出龙门站连续性大强度降水出现时该地区垂直螺旋度变化情况,分析发现龙门站特大暴雨发生时高、低层螺旋度负、正中心配合非常好,龙门站上空涡旋上升运动非常剧烈。19 日 20 时—20 日 08 时和 20 日 20 时—21 日 08 时,中低层为强正螺旋度区控制,高层为负螺旋度控制,在两个时段中,中低层的正螺旋度迅速增大,高层负螺旋度值迅速变小,而且中低层正、高层负螺旋度中心具有明显向下移动特征。具体表现为,19 日 20 时—20 日 08 时,中低层位于 400hPa 的正螺旋度 $6 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 闭合中心迅速增至 $20 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 并向下移动到 600hPa,相应高层负螺旋度大闭合中心变化小但中心也向低层移动;20 日 20 时—21 日 08 时,中低层由正负螺旋度交替控制迅速转为强正螺旋度区控制并分别出现两个特强正中心,龙门上空强正螺旋度闭合中心速增至 $15 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 并下移到 600hPa,龙门以西的广东上空中低层垂直螺旋度变化剧烈,生成 $15 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的特强闭合中心并下移到 800hPa,高层负螺旋度中心减小下传,强负螺旋度闭合中心从 $-4 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 速减至 $-20 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,以上说明两个时段中的中低层正螺旋度增幅和高层负螺旋度减幅均

很大,平均增、减幅达 $15 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,即垂直螺旋度在 12 小时内变化非常剧烈,同时发现中低层正、高层负螺旋度中心有明显向下传送特征。相应龙门站 20、21 日出现四百年一遇的 420.5mm 和 413.7mm 特大暴雨,广东日暴雨站数 21 日达最多的 44 站次。以上分析可知暴雨强度、落区大小随中低层正螺旋度、

高层负螺旋度中心值迅速增大、减小而加强、扩大,中低层正、高层负螺旋度中心量级变化越大或两中心区重叠在同一经度或纬度线附近时,对应地面降水强和暴雨落区广,此期间若中低层正、高层负螺旋度闭合中心有明显向低层传送特征配合时,会导致地面雨量、落区成倍数地增加和扩大。

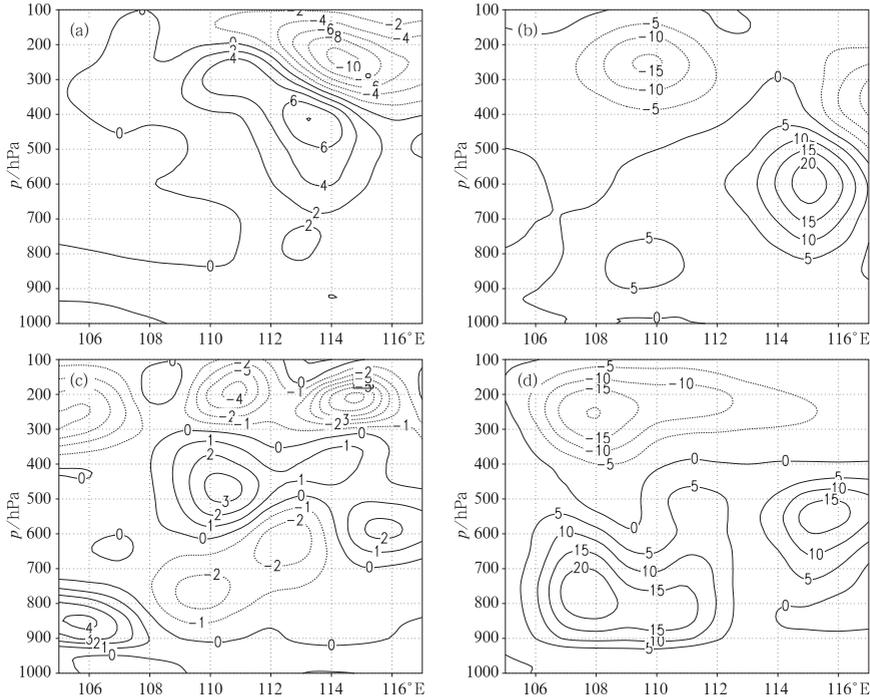


图 3 2005 年 6 月 19—21 日广东暴雨区沿 23.73°N 垂直螺旋度(单位: $\times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$)的逐日垂直剖面图(a,19 日 20 时;b,20 日 08 时;c,20 日 20 时;d,21 日 08 时)

4 大气层结稳定度和水汽条件

图 4a 是 2005 年 6 月 17—24 日广东特大暴雨区域(18~26°N、105~117°E)平均位势稳定度分布图,由图可见,17—24 日龙门地区上空的相当位温 θ_{se} 500hPa 与 850hPa 的差值一直为负值区控制,表明龙门地区上空存在较强的位势不稳定能量,相当位温 θ_{se} 500hPa 与 850hPa 的最大差值于 22 日达 -7K。其中 19—22 日位势不稳定能量中心区与中低层正螺旋度、高层负螺旋度迅速增

大、减小区域基本上重叠。强位势不稳定层结在垂直螺旋度中低层正螺旋度、高层负螺旋度迅速增大、减小的触发机制下,得以快速释放,这不仅加强该地区的辐合上升运动,而且极利于强降水雨强的迅速增强。

图 4b 是 2005 年 6 月 17—24 日广东特大暴雨区域(5~30°N、90~120°E)内的 850hPa 水汽通量散度分布图,由图可见,暴雨期间充沛的水汽供应在 850hPa 水汽通量散度场上有很好表现,特大暴雨期间水汽辐合带一直位于孟加拉湾东南部、中南半岛南部到我国华南一带,随着西南暖湿急流加强,

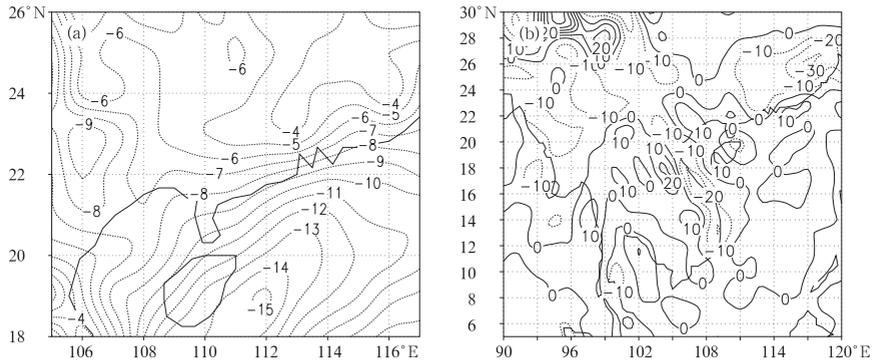


图 4 2005 年 6 月 17—24 日广东特大暴雨区域(18~26°N,105~117°E)平均位势稳定度(a,单位:K)和 5~30°N,90~120°E 区域内的 850hPa 水汽通量散度(b,单位: $10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)图

深厚剧烈的强水汽辐合中心长时间维持在广东上空,强水汽辐合中心区在 22~26°N、111~117°E 区间,中心区值均小于 $-40 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,最强水汽辐合中心位于 25~26°N、115.5~117°E 区域,对应有小于一 $100 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的闭合极强中心,广东龙门站正好处于极强闭合水汽辐合中心附近。说明广东特大暴雨期间中低层存在极强水汽辐合,为广东特大暴雨特别是龙门局地特大暴雨过程提供了丰富水汽。

5 结 论

(1) 广东特大暴雨区上空垂直螺旋度分布呈中低层正、高层负分布特征,其量级比常规的大 $10^2 \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。当中低层正垂直螺旋度、高层负垂直螺旋度中心迅速增大、减小时,对应地面强降水的雨强和落区是一个增强和扩大过程。当正、负螺旋度中心迅速增大、减小的幅度大或区域重叠在同一经度或纬度线附近时,地面对应雨量最大。

(2) 龙门连续两天特大暴雨发生和广东最多暴雨日出现期间,其上空垂直螺旋度具有中低层正、高层负螺旋度闭合中心向低层明显传送的特征。该传输特征出现时会导致

地面雨量、落区成倍数地增加、扩大。

(3) 700hPa 等压面上,垂直螺旋度分布和天气系统有较好的对应关系,特大暴雨过程中垂直螺旋度正值区长轴与 700hPa 的切变辐合线走向和移动方向一致。

(4) 广东龙门四百年一遇特大暴雨是在大尺度环流背景下,中低层正垂直螺旋度、高层负垂直螺旋度迅速增大、减小触发机制下,强位势不稳定能量快速释放,中低层强水汽辐合不断将由西南急流带来的孟加拉湾丰富水汽抬升凝结情况下不断产生的中小尺度气旋影响造成的。

参考文献

- [1] 吕克利,徐银梓,谈哲敏. 动力气象学[M]. 南京:南京大学出版社,1997:94-97.
- [2] 杨红宇,沈新勇,林两位,等. 0418 号台风艾利暴雨成因分析[J]. 气象,2006,32(7):81-87.
- [3] 张润琼,沈桐立. 贵州 02.6 大暴雨的模拟与诊断分析[J]. 气象,2006,32(1):95-101.
- [4] 张艳,寿绍文,宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J]. 气象,2005,31(10):56-61.
- [5] 申红喜,李秀连,石步鸣. 北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析[J]. 气象,2004,30(2):12-16.
- [6] 刘惠敏,郑兰芝. 螺旋度诊断分析与短时强降水雨量预报[J]. 气象,2002,28(10):37-40.
- [7] 翁文舜,连东英,吴德辉. 三明市 2002 年 6 月一次连续性大暴雨分析与预报[J]. 气象,2003,29(6):56-57.