

文章编号:1000-694X(2008)04-0762-08

位涡和 Q 矢量诊断在毛乌素沙地 沙尘天气预报中的应用

井喜¹, 屠妮妮², 井宇³

(1. 陕西榆林市气象局, 陕西 榆林 719000; 2. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610071; 3. 辽宁省气象局, 辽宁 沈阳 110001)

摘要:利用常规的天气图、卫星云图、湿位涡和 Q 矢量等,对 2007 年 4 月 30 日和 2007 年 5 月 2 日发生在毛乌素沙地的两次沙尘天气进行了综合分析。结果表明:对流层低层 $MPV_1 < 0$ 中尺度对流不稳定区的生成,为干对流的发生提供了不稳定能量条件;来自上游对流层中高层的干侵入和扰动干侵入在沙尘天气发生过程中起着重要作用;对流层低层由 Q 矢量辐散、辐合激发生成的次级环流为沙尘天气发生、发展和维持提供了动力机制。在对毛乌素沙地中 β 尺度沙尘暴的预报预警过程中,同时应考虑下沉对流有效位能的作用。

关键词:毛乌素沙地;位涡; Q 矢量;沙尘天气

中图分类号:P45

文献标识码:A

毛乌素沙地地处中纬度干旱、半干旱的内陆地区,位于河套西北部(内蒙、陕西、宁夏交界地带),是沙尘天气的多发地带,每年沙尘暴和扬沙给工农业生产、交通运输、人们的生活及生态环境造成了严重的危害。1983 年 3 月 15 日、1983 年 4 月 27—28 日,毛乌素沙地接连出现罕见的能见度为 0 的黑风天气。

最近 20 多年来,尤其是“93-05-05”甘肃金昌特强沙尘暴后,我国出现了气象、沙漠等多学科联合研究沙尘暴的局面^[1-6]。钱正安^[7]和胡隐樵^[8]指出:强风、沙源和热力因子是形成强沙尘暴的必要条件,而且三者密切配合,缺一不可;李栋梁^[9]、马力文^[10]等从气候特征沙尘暴成因方面进行了研究;郑新江等^[11]在 1995 年对沙尘暴天气的卫星云图进行了分析研究;王劲松^[12]讨论了沙尘暴的发生与下垫面条件之间的关系;康凤琴^[13]用数值模拟方法研究了沙尘暴天气个例,取得了很多有益的结论。

位涡是综合热力、动力的物理量,有湿位涡和干位涡,等压面和等熵位涡等多种形式,被广泛用于暴雨和其他天气系统的诊断^[14-16]。井喜等^[17]用位涡理论对黄土高原强对流风暴形成机理做了诊断分析,李英等^[18]用准地转 Q 矢量对昆明准静止锋锋生做了分析,表明低层 Q 矢量辐合带与昆明准静止锋雨区有较好的对应关系。把位涡和 Q 矢量诊断应用于毛乌素沙地沙尘天气的分析,以便对今后毛乌

素沙地沙尘天气的预报服务提供一些新的和有益的依据。

1 沙尘天气概况及研究资料和方法

2007 年 4 月 30 日,从 8:23 开始至 18:39,仅在毛乌素沙地出现大范围的沙尘天气(以下简称沙尘天气发生区),乌审旗、鄂托克旗、河南、盐池、榆林、横山和靖边出现扬沙,定边(13:28—15:08)出现沙尘暴,能见度仅为 800 m。同时,榆林、横山、定边和河南出现 $V \geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 瞬时大风,河南瞬时风速达到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。大风和沙尘天气给交通和人们的生活带来严重危害。

2007 年 5 月 2 日,以毛乌素沙地为中心,从 12:31 开始至 17:23,再次出现大范围的沙尘天气(以下简称沙尘天气发生区),盐池、河南、横山和靖边出现扬沙,定边(15:48—17:23)再次出现沙尘暴,能见度仅为 600 m。榆林、横山、定边和鄂托克旗再次出现 $V \geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 瞬时大风,定边瞬时风速达到 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。大风和沙尘天气再次给交通和人们的生活带来严重危害。

利用常规天气图、卫星云图、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的每 6 h 再分析资料,对上述两次沙尘天气采用湿位涡、 Q 矢量等物理量和天气学方法进行了分析。

在计算位涡时,采用了文献^[17]给出干、湿位涡的表达式。

收稿日期:2007-06-08; 改回日期:2007-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40675058)资助

作者简介:井喜(1957—),男,陕西米脂县人,高级工程师。主要从事短期天气预报工作。Email:jingxiaihua@126.com

在 p 坐标下忽略 ω 的水平变化, 等压面干位涡的表达式:

$$PV = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (1)$$

在绝热无摩擦的饱和大气中湿位涡守恒, 在 p 坐标下忽略 ω 的水平变化, 等压面湿位涡的表达式:

$$MPV = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) = \text{const} \quad (2)$$

将其写成分量形式, 有:

$$MPV_1 = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (3)$$

$$MPV_2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中: MPV_1 为湿正压项; MPV_2 是湿斜压项。

在计算 Q 矢量散度时, 采用了文献[19]给出 Q 矢量散度的表达式:

$$D = \nabla \cdot \mathbf{Q} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (5)$$

2 位涡诊断分析

2.1 对流层低层湿正压场特征

从图 1A 可见, 4月30日沙尘天气发生前, 700 hPa 等压面上在毛乌素沙地东部生成 $MPV_1 < 0$ 中尺度对流不稳定区; 5月2日沙尘天气发生前, 同样在 700 hPa 等压面上沙尘天气发生区生成 $MPV_1 < 0$ 中尺度对流不稳定区(图 1B)。 $MPV_1 < 0$ 中尺度对流不稳定区的生成, 为干对流的发生提供了不稳定

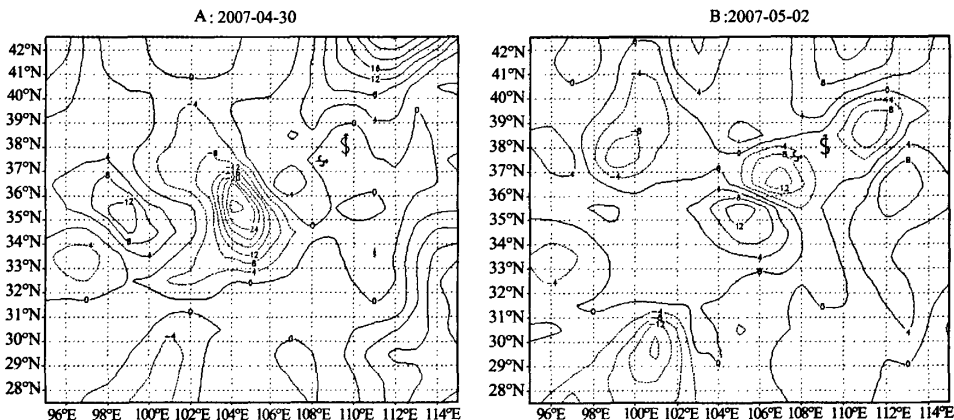


图1 2007年4月30日和5月2日08:00时700 hPa MPV_1

(单位: 10^{-1} PVU, 下同)

Fig. 1 700 hPa MPV_1 at 08:00 on April 30 and May 2, 2007

能量条件。

2.2 对流层中层湿斜压场特征

2007年4月30日08:00 500 hPa 等压面上(图 2A), 伴随北方冷槽的南压、北方冷槽前(在沙尘天气区东北方)生成 MPV_2 低值区, 在沙尘天气区西部西北急流区生成 MPV_2 高值区; MPV_2 高值区和 MPV_2 低值区的相互作用, 在毛乌素沙地生成一径向 MPV_2 梯度大值区。2007年5月2日08:00, 在哈密、民勤至延安分支西北急流右侧(兰州和平凉之间)生成一浅槽, 浅槽前(平凉和延安之间)生成一 MPV_2 高值区, 浅槽后西北急流区生成从老东庙经过民勤至宁夏中部的 MPV_2 低值舌(图 2B)。高值 MPV_2 区和低值 MPV_2 舌的相互作用, 在毛乌素沙

地也生成一东北西南向的 MPV_2 梯度大值区。可见, 沙尘天气发生前, 毛乌素沙地 MPV_2 梯度大值区的形成, 成为有利于沙尘天气发生、发展和维持的湿斜压场。

2.3 干侵入的作用

干侵入具有高位势涡度(PV)和低湿球位温(θ_w)两个特征^[8]。

2.3.1 水汽云图干侵入特征

从图3可见: 4月30日05:00, 有一来自北方蒙古的干侵入区已伸入毛乌素沙地西部。30日08:00, 来自北方的干侵入区穿过毛乌素沙地已达陕北南部; 伴随太阳的升起、地面升温、边界层乱流扰动增强, 毛乌素沙地出现大范围的扬沙天气; 同时看

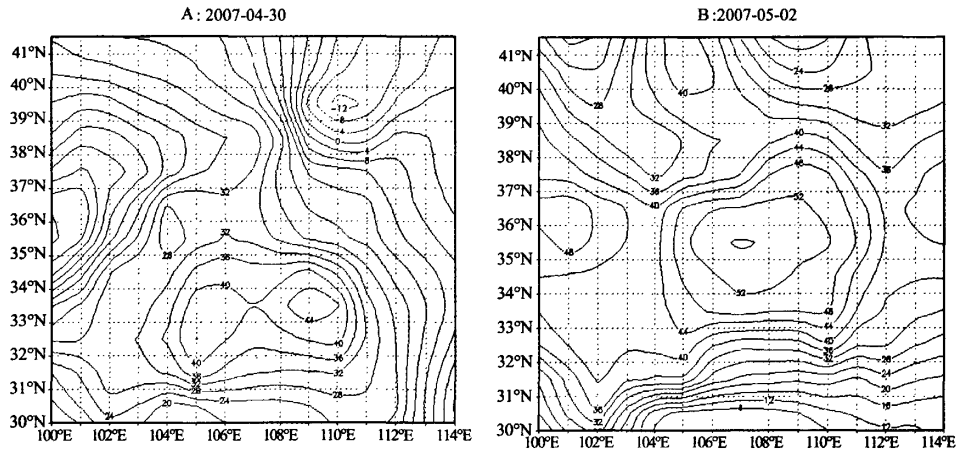


图 2 2007 年 4 月 30 日和 5 月 2 日 08:00 500 hPa MPV_2
(定边沙尘暴区:107.6°E, 37.6°N, 下同)
Fig. 2 500 hPa MPV_2 at 08:00 on April 30 and May 2, 2007

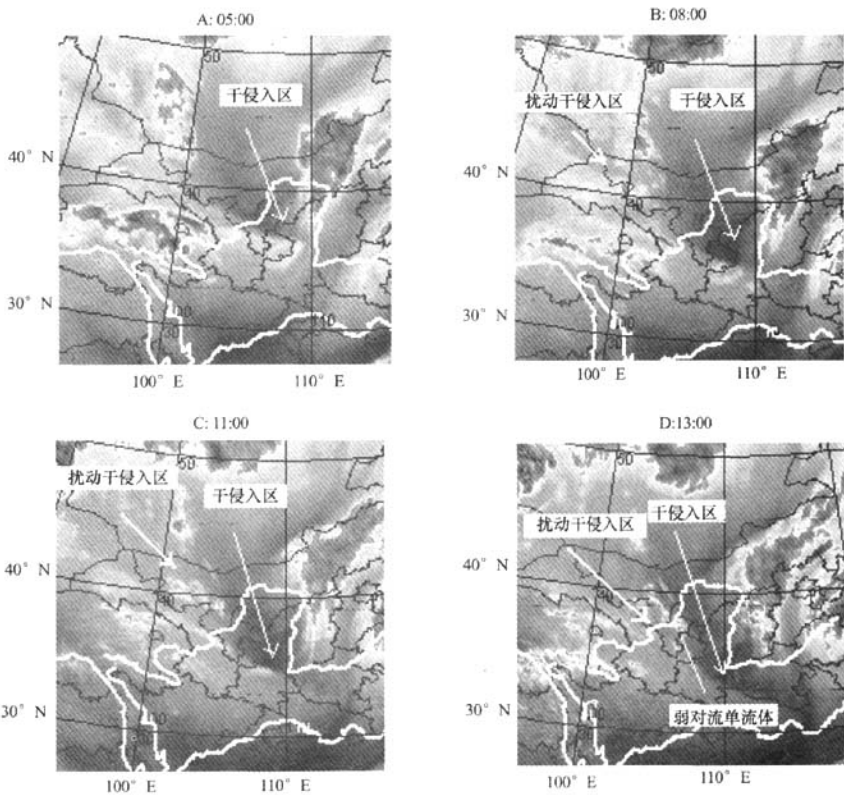


图 3 2007 年 4 月 30 日水汽云图
Fig. 3 Water vapor nephogram at 05:00, 08:00, 11:00 and 13:00 on April 30, 2007

到,在新疆与蒙古交界地带生成一小的干侵入区(简称扰动干侵入区)。30 日 11:00,干侵入区变窄、向南伸至关中北部,扰动干侵入区范围变大、向东南伸至民勤北部,同时在扰动干侵入区的前方生成一呈“弓形”带状、弱的水汽累积区。30 日 13:00,来自北方的干侵入区已向南伸至河南西部,扰动干侵入区

已向东南方向伸至银川西部,扰动干侵入区前方的水汽累积区已伸至盐池,同时在盐池生成一展示有弱对流发展、中 γ 尺度水汽累积大值区。伴随中 γ 尺度水汽累积大值区的东移,13:28在定边出现沙尘暴。可见,定边出现沙尘暴,与干侵入区与扰动干侵入区相互作用、扰动干侵入区向东南方向入侵、扰动干侵入区前沿有中 β 尺度或中 γ 尺度弱对流单体发展有直接关系。中 β 尺度或中 γ 尺度弱对流单体发展,为沙尘向上输送、沙尘暴的形成提供了动力机制。

从图4可见:2007年5月2日09:00,有一来自北疆的干区向东南方向入侵河套北部。2日11:00,干侵入区已向东南方向发展至山西中北部地

区,但在内蒙古西部发展起来一扰动干侵入区,扰动干侵入区底部(阴山山脉西部)有窄的纬向水汽累积带生成。2日13:00,随着扰动干侵入区呈“楔”状伸向阴山山脉北部,阴山山脉南侧有呈窄带状的水汽累积区发展,扰动干侵入区前方的干侵入区已向东南方向发展至河南北部。2日15:00,随着扰动干侵入区伴随南侧的水汽累积带略南压,在毛乌素沙地南部定边附近发展起来一表示有对流单体发展、中 γ 尺度水汽累积大值区,15:48定边出现沙尘暴。可见,向东南发展的干侵入区和向东发展的扰动干侵入区的相互作用、扰动干侵入区底部有中 β 尺度对流单体发展,为沙尘向上输送、沙尘暴的形成提供了动力机制。

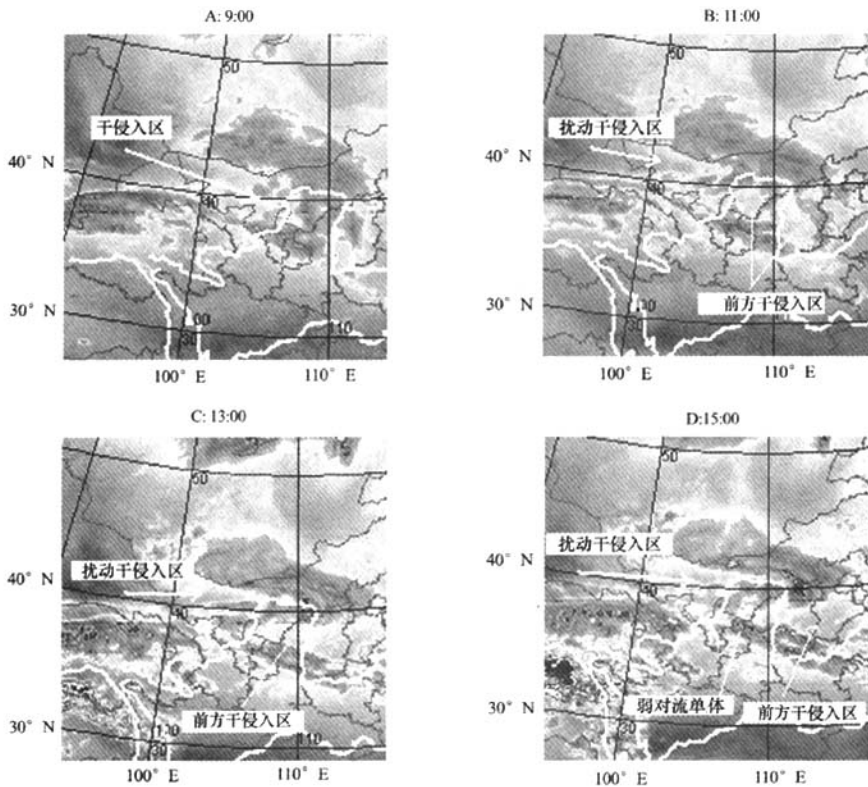


图4 2007年5月2日水汽云图

Fig.4 Water vapor nephogram at 09:00, 11:00, 13:00 and 15:00 on May 2, 2007

2.3.2 干位涡诊断分析

从图5A和图5B可见:2007年4月30日08:00 500 hPa等压面上,有来自贝加尔湖东部高值位涡区伸向河套北部,在阴山山脉北部生成一 $PV \geq 0.75$ PVU位涡高值中心,河套北部同时生成高值位涡平流。在高值位涡平流的作用下,30日20:00

在陕西和山西的交界地带生成 $PV \geq 0.7$ PVU高值位涡中心。分析图6A和图6B,4月30日08:00,对流层中高层在有高值位涡区向南发展的同时,45°N附近有高值位涡舌向对流层中低层发展;30日20:00,向对流层中低层发展的高值位涡舌向南移至35°—40°N,和对流层低层 $PV \leq 0.2$ PVU位涡低值

区形成垂直配置,使沙尘天气发生区形成并维持对 流不稳定。

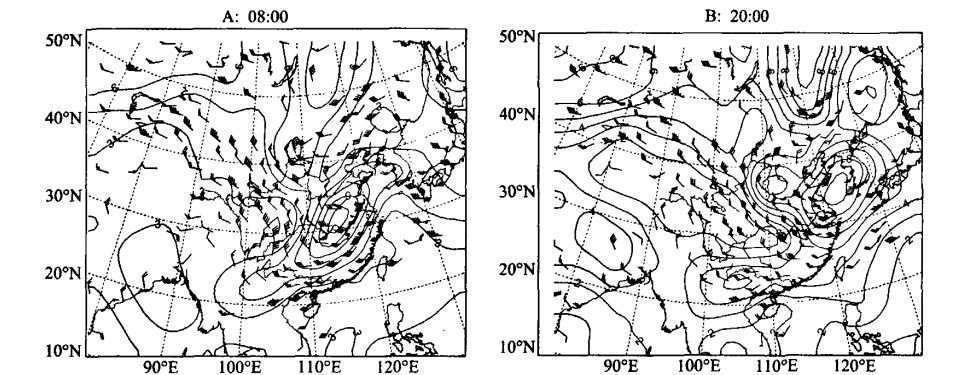


图 5 2007 年 4 月 30 日 08:00 和 20:00 时 500 hPa PV(单位: 10^{-1} PVU,下同)
Fig. 5 500 hPa PV at 08:00 and 20:00 on April 30, 2007

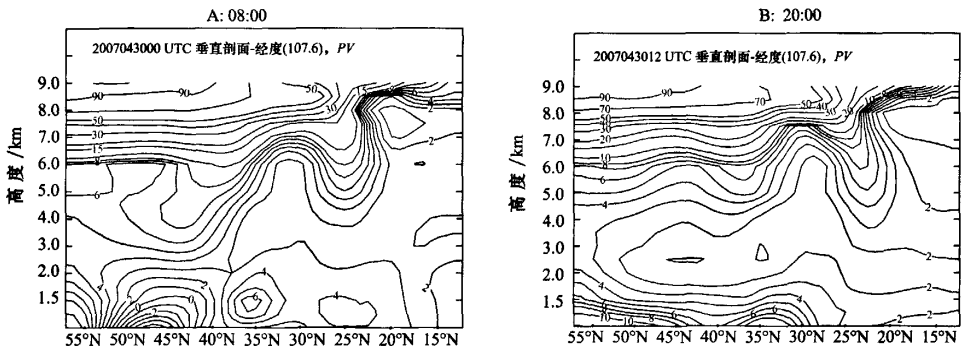


图 6 2007 年 4 月 30 日 08:00 和 20:00 时沿 107.6°E PV 剖面
Fig. 6 PV section along 107.6°E at 08:00 and 20:00 on April 30, 2007

从图 7A 和图 7B 可见:2007 年 5 月 2 日 08:00 500 hPa 等压面上,在内蒙古西部生成一 $PV \geq 0.5$ PVU 位涡高值中心,阴山山脉西部至民勤生成一高值位涡平流区。5 月 2 日 20:00,在高值位涡平流的

作用下,有 $PV \geq 0.4$ PVU 高值位涡中心移入河套北部。从图 8A 和图 8B 可见,也有高值位涡舌在向南发展的同时、向对流层低层发展,和 2 km 以下 $PV \leq 0.2$ PVU 位涡低值区形成垂直配置,使沙尘

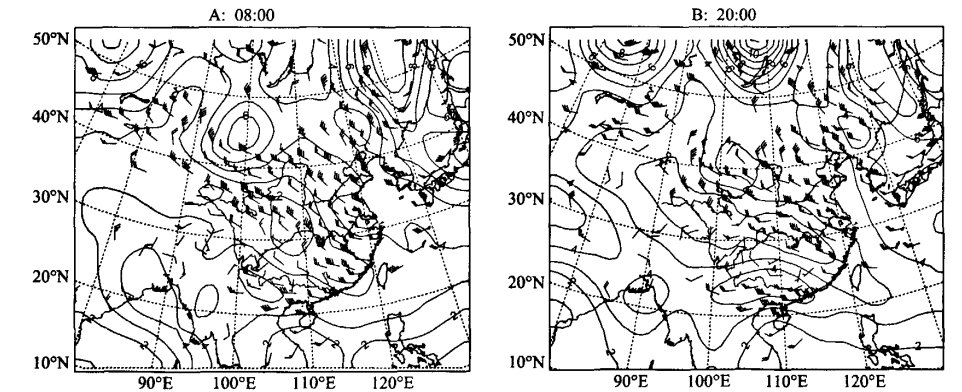


图 7 2007 年 5 月 2 日 08:00 和 20:00 时 500 hPa PV
Fig. 7 500 hPa PV at 08:00 and 20:00 on May 2, 2007

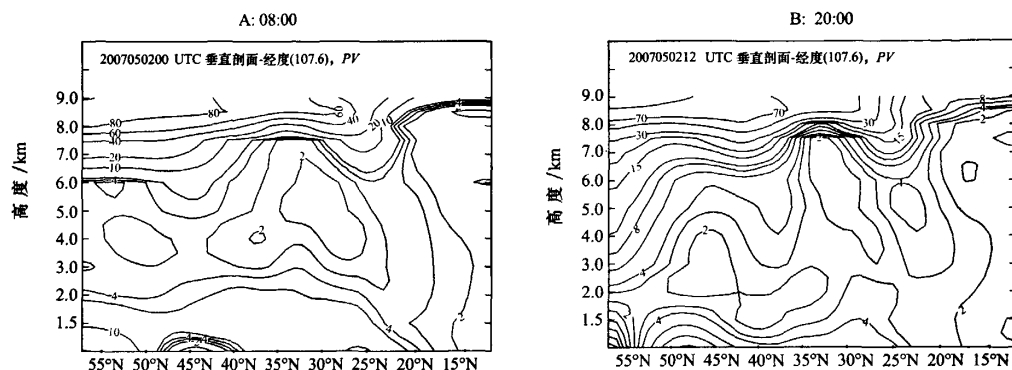


图8 2007年5月2日08:00和20:00时沿107.6°E PV剖面

Fig. 8 PV section along 107.6°E at 08:00 and 20:00 on May 2, 2007

天气发生区形成并维持对流不稳定。

3 Q 矢量诊断分析

分析图9A, 2007年4月30日08:00, 沙尘暴发生区左侧生成Q矢量辐散区和Q矢量散度大于 $40 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 中 β 尺度辐散中心; 沙尘暴发生区右侧生成Q矢量辐合区和Q矢量散度小于 $-20 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 中 β 尺度辐合中心; 从图

10A可见, 由Q矢量辐散、辐合激发生成的次级环流为沙尘天气的发生、发展和维持提供了动力机制。分析图9B, 2007年5月2日08:00, 沙尘暴发生区左侧生成Q矢量辐散区和Q矢量散度大于 $12 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 中 β 尺度辐散中心; 沙尘暴发生区右侧生成Q矢量辐合区和Q矢量散度小于 $-4 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 中 α 尺度东北西南向的辐合带; 从图10B可见, 由Q矢量辐散、辐合激发生成的次级

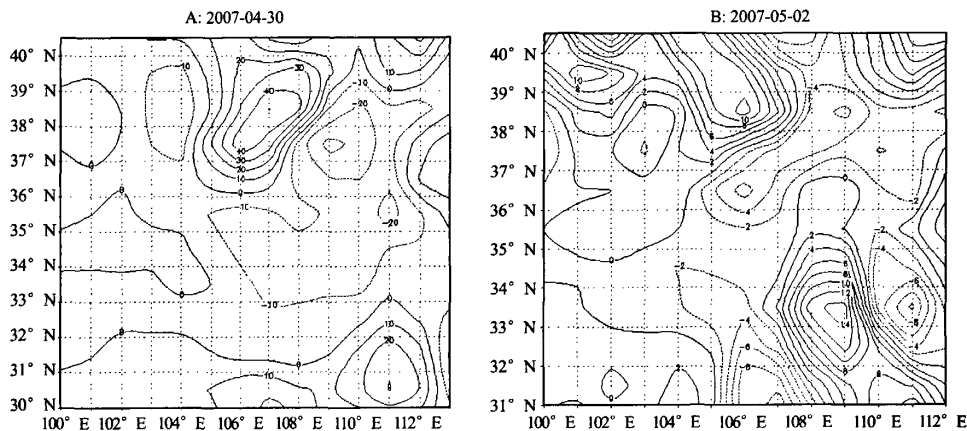
图9 2007年4月30日和5月2日08:00时850 hPa Q矢量散度(单位: $10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)

Fig. 9 850 hPa Q vector divergence at 08:00 on April 30 and May 2, 2007

环流也为沙尘天气发生发展和维持提供了动力机制。

4 下沉对流有效位能(DCAPE)

从水汽云图分析知道, 定边沙尘暴的发生伴随中 β 尺度对流单体生成发展的过程, 为此计算了下沉对流有效位能。从图11A可见, 4月30日定边沙尘暴发生时, 定边北部生成大于 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 中 β 尺度下沉对流有效位能中心; 从图11B可见, 5月2日定边沙尘暴临近发生时, 在定边东北部生成大于

$1200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 中 β 尺度下沉对流有效位能中心。可见, 中 β 尺度强下沉对流有效位能中心的生成, 对定边沙尘暴的发生也起着重要作用。

5 结论

1) 对流层低层 $MPV_1 < 0$ 中尺度对流不稳定区的生成, 为干对流的发生提供了不稳定能量条件。有利于沙尘天气发生的湿斜压场表现为, 500 hPa

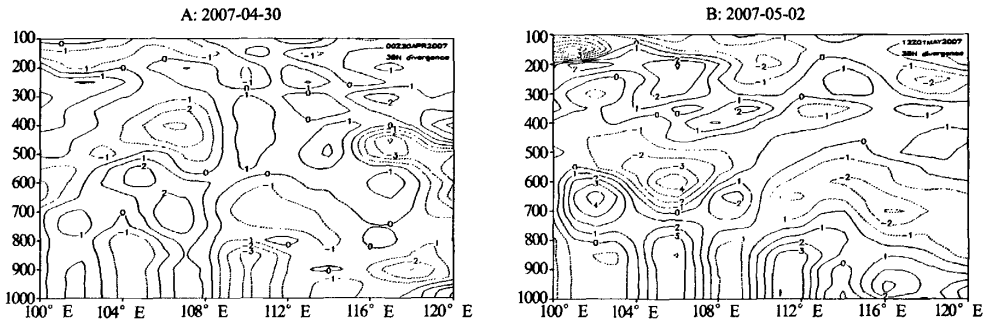


图10 2007年4月30日和5月2日08:00沿38°N散度剖面(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 10 Divergence section along 38°N at 08:00 on April 30 and May 2, 2007

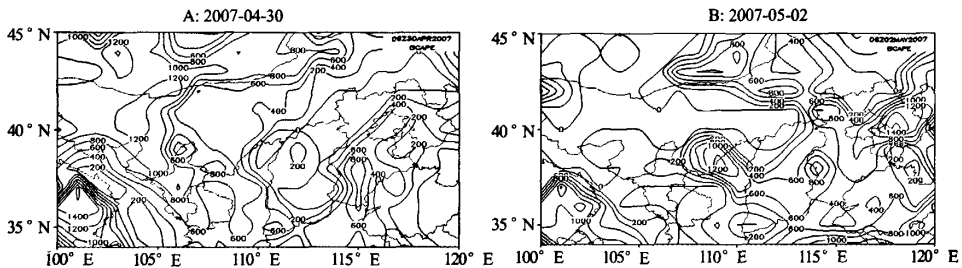


图11 2007年4月30日和5月2日14:00下沉对流有效位能(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 11 Capable potential energy of downward convection at 14:00 on April 30, 2007

等压面上沙尘天气发生区生成 MPV_2 梯度大值区。

2)水汽云图分析表明,除了干侵入外,扰动干侵入在沙尘天气发生过程中起着重要作用。干位涡分析表明,来自北方对流层中高层的干侵入,维持了沙尘天气发生区大气的对流不稳定性。

3)对流层低层由 Q 矢量辐散、辐合激发生成的次级环流为毛乌素沙地沙尘天气发生发展和维持提供了动力机制。

4)在对毛乌素沙地中 β 尺度沙尘暴预报预警过程中,同时应考虑下沉对流有效位能的作用。

参考文献(References):

- [1] 郭慧,王式功,李栋梁,等. 甘肃春季(3—5月)沙尘暴成因分析[J]. 中国沙漠,2005,25(3):412—416.
- [2] 张小玲,李青春,谢璞,等. 近年来北京沙尘天气特征及成因分析[J]. 中国沙漠,2005,25(3):417—421.
- [3] 杨晓玲,丁文魁,钱莉,等. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J]. 中国沙漠,2005,25(5):702—704.
- [4] 程海霞,丁治英,帅克杰. 近5a我国沙尘暴与高空急流关系的统计分析[J]. 中国沙漠,2005,25(6):891—896.
- [5] 叶燕华,王平鲁. 西北春季区域性沙尘暴天气 MOS 预报方法探讨[J]. 中国沙漠,2004,24(3):355—359.
- [6] 雷向杰,李亚丽,王小宁,等. 陕西强沙尘暴、特强沙尘暴天气气候特征[J]. 中国沙漠,2005,25(1):118—122.

- [7] 钱正安. 关于甘、宁部分地区“93.5.5”特强沙尘暴灾害的调查报告[J]. 大气情报,1993,30(4):1—13.
- [8] 胡隐樵,光国宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. 大气科学,1997,21(5):581—589.
- [9] 李栋梁,王涛,钟海玲. 中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J]. 中国沙漠,2004,24(3):376—379.
- [10] 马力文,赵光平,陈楠,等. 宁夏盐池地区沙尘暴发生特征的统计分析[J]. 中国沙漠,2004,24(2):218—222.
- [11] 郑新江,刘诚,崔小平,等. 沙尘暴天气的云图特征[J]. 气象,1995,21(2):27—31.
- [12] 王劲松,俞亚勋,赵建华. 中国北方典型强沙尘暴的地面加热场特征分析[J]. 中国沙漠,2004,24(5):599—602.
- [13] 康凤琴,李耀辉,吕世华. 2001年4月8日强沙尘暴天气的数值模拟研究[J]. 中国沙漠,2003,23(6):681—684.
- [14] 刘还珠,张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J]. 应用气象学报,1996,7(3):275—284.
- [15] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387—404.
- [16] 陆尔,丁一汇,李月洪. 1991年江淮特大暴雨的位涡分析与冷空气活动[J]. 应用气象学报,1994,6(3):266—274.
- [17] 井喜,胡春娟. 位涡诊断在黄土高原强对流风暴雨预报中的应用[J]. 气象科技,2007,35(1):20—25.
- [18] 李英,段旭,潘里娜. 昆明准静止锋的准地转 Q 矢量分析[J]. 气象,1999,25(8):6—10.
- [19] 省地气象台短期预报岗位培训教材[M]. 北京:气象出版社,1998:117—120.

Application of Potential Vortex and Q Vector in Dust Storm Weather Forecasting in Mu Us Desert

JING Xi¹, TU Ni-ni², JING Yu³

(1. Shaanxi Yulin Meteorological Bureau, Yulin 719000, Shanxi, China; 2. Chengdu Plateau Meteorological Institute of China Meteorological Administration, Chengdu 610071, China; 3. Liaoning Provincial Meteorological Bureau, Shenyang 110001, China)

Abstract: Based on the routine synoptic chart, satellite nephogram, wet potential vortex and Q vector and some other data, comprehensive analysis for the two cases of dust storms happened on April 30, 2007 and May 2, 2007 respectively over Mu Us Desert are presented in the paper. The results show: the generation of mesoscale convection instability in the low troposphere with $MPV_1 < 0$ provides the instability energy for the generation of the dry convection; the dry intrusion and turbulence intrusion which come from the upstream area in the middle and high layers of troposphere play a very important role in the formation of the dust storm weather; sub-circulation triggered by the divergence and convergence of Q vector in the low troposphere provides the dynamic mechanism for the generation, development and maintenance of the dust storm weather. The effect of downward convection capable potential energy should be considered in the β scale dust storm forecasting and warning in Mu Us Desert.

Keywords: Mu Us Desert; potential vortex; Q vector; dust storm weather