

文章编号: 2095 - 6835 (2017) 02 - 0020 - 04

# 蒙古气旋引发的一次山西沙尘天气分析

赵建峰, 王思懿

(山西省气象台, 山西 太原 030006)

**摘要:** 利用常规气象观测资料和 NECP 再分析资料, 对 2013-03-09 出现在山西的沙尘天气进行了分析。结果表明: 前期降水偏少、气温偏高是此次沙尘天气发生的有利背景, 蒙古气旋、冷锋、副冷锋是此次沙尘天气的主要影响系统。地面 3 h 变压的正的大值区和强的阵风发生区域有很好的对应关系。500 hPa 的水平螺旋度正值对地面气旋的移动有指示意义; 沙尘天气出现在 500 hPa 水平螺旋度正值范围偏西、偏西南区域。300 hPa 以上的高空急流为双急流型, 急流中心风速相对较小、垂直运动相对较弱以及混合层高度相对较低是没有发生大范围沙尘暴的主要原因。

**关键词:** 蒙古气旋; 冷锋; 正 3 h 变压; 沙尘天气

中图分类号: P445+.4

文献标识码: A

DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2017.02.020

春季是沙尘天气的高发期, 一般的沙尘天气过程可以造成环境污染, 影响工农业生产, 更为严重的沙尘暴可以造成重大的经济损失和人民生命财产损失。随着气象业务现代化和观测手段的不断改进, 气象科技人员对沙尘暴的天气气候特征进行了研究, 取得了许多有意义的成果。刘景涛等分析了 1957—2002 年发生在我国北方的 33 次特强沙尘暴过程指出, 影响我国北方的特强沙尘暴的环流形势可以分为纯干冷锋型、蒙古气旋与干冷锋型、蒙古冷高压南部倒槽型和干飚线与冷锋混合型 4 种类型; 宋阳等分析了中国北方 5 种下垫面对沙尘暴的影响认为, 沙地和沙化草地为沙尘暴的发生提供了大量的沙源; 钱正安等通过研究指出我国北方以民勤、和田、拐子胡、伊克乌素镇和朱日和为中心的五大沙尘暴多发区域; 范俊红等研究了河北省中南部一次沙尘暴的动力条件, 分析得出副冷锋后部的 3 h 变压中心沿 500 hPa 急流快速南下, 造成局地大风, 产生了较强的沙尘天气; 韩经纬等分析了一次强沙尘暴天气的多普勒雷达回波特征, 指出低层强烈的风切变, 使 - 中尺度系统的辐合旋转加强, 造成局地的强沙尘暴天气; 程海霞等则认为与沙尘暴相伴的高空急流可分为单急流型和双急流型。这些研究对认识沙尘天气特征, 做好沙尘天气预报具有重要意义。山西地处黄土高原东侧, 春季降水稀少、气温回升较快, 较易出现风沙天气, 但由于距离沙源地较远及特殊的地形作用, 大范围沙尘天气发生的概率较小, 给预报带来一定的难度。2013-03-08—09, 山西出现较大范围的沙尘天气, 且伴随有强降温, 给工农业生产造成较大影响。本文利用常规气象观测资料和 NCPE 再分析资料, 对此次沙尘天气进行了综合分析, 为做好沙尘天气预报提供一些参考。

## 1 沙尘天气概况和环流形势分析

### 1.1 天气概况

2013-03-08—09, 受蒙古气旋、冷锋、副冷锋影响, 山西大部出现了大风沙尘天气。2013-03-09T05:56 (北京时间, 下同) 开始, 五台山出现了 19 m/s 的瞬时大风; 2013-03-09T08:00, 山西西北部 3 个县市出现了大于等于 18 m/s 的瞬时大风, 6 个县市出现了扬沙天气; 2013-03-09T11:00—17:00, 受副冷锋影响, 山西全省共有 45 个县市阵风风速大于等于 17 m/s, 最大阵风风速为 25 m/s, 22 个县市出现扬沙天气, 应县出现了能见度小于 500 m 的沙尘暴; 2013-03-09T17:00—20:00, 随着

副冷锋东移南压, 山西南部有 5 个县市出现扬沙天气。这次沙尘天气过程从 9 日凌晨开始, 由北向南, 自西向东影响了山西全省, 并伴有大风、强寒潮等灾害性天气。表 1 为 2013-03-09 扬沙天气分布情况。

表 1 2013-03-09 扬沙天气分布情况

发生时间	站名	主要发生区域
08:00—11:00	天真、大同、岢岚、怀仁、保德、阳高	山西北部
11:00—17:00	离石、吉县、原平、大同、太原、介休、垣曲、临汾、永济、长治县、左权、翼城、永和、应县、绛县、洪洞、石楼、繁峙、屯留、芮城、稷山、闻喜	山西中西部
17:00—23:00	隰县、永济、襄垣、阳城、侯马	山西西南部

### 1.2 高空形势分析

2013-03-08T20:00, 欧亚中高纬度 500 hPa 环流形势为多短波槽的纬向环流型, 影响山西的西风槽分别位于乌拉尔山以西地区和贝加尔湖地区, 500 hPa 上温度槽落后于高空槽, 说明未来高空槽将发展加深, 同时高空锋区位于 40°~55°N 之间。2013-03-09T08:00, 500 hPa 高空图 (图略) 上, 位于贝加尔湖的西风槽东移发展加深, 与华西地区的南支槽同位相叠加, 形成深厚的西风大槽, 同时次的温度场上, 温度槽依然落后于高空槽, 说明西风槽依然会发展加强, 且环流形势由纬向型调整为经向型。在贝加尔湖北部形成了一个 -44 闭合冷中心, 槽后的偏西北气流引导冷空气南下影响东北和华北地区。位于北部的西风槽为疏散槽, 南支槽为汇合槽, 北部的西风槽移速要比南支槽移速快。2013-03-09T14:00, 500 hPa 高空图上, 高空西风槽整体东移, 且为疏散槽, 说明高空系统将快速移动, 带动冷空气南下, 而贝加尔湖附近的高空冷中心 (-44) 有所北抽。500 hPa 高度场和温度场如图 1(a) 所示, 地面气压场如图 1(b) 所示。

### 1.3 地面形势分析

2013-03-08T20:00, 蒙古气旋位于蒙古东部地区, 中心 (110°E, 45°N) 气压值为 990 hPa。与此同时, 在新疆北部和蒙古西部有 2 个地面高压系统维持。2013-03-09T08:00, 蒙古气旋东移至华北北部, 中心 (116°E, 40°N) 气压值为 997.5 hPa, 新疆北部和蒙古西部的地面高压合并加强形成一个强大的地面高压系统, 冷高压中心 (97°E, 48°N) 气压值为 1 037.5 hPa, 整个东亚地区形成了典型的西高东低的地面气压场形势。

2013-03-09T14:00,地面气旋东移至山东半岛,大陆冷高压位于蒙古中部,强度都明显减弱。2013-03-09T20:00,山西位于高压底部。分析 2013-03-08T20:00 地面形势,冷锋位于河套西部—宁夏东部—青海一线;2013-03-09T08:00,冷锋快速东移南下,移至渤海—河北南部—山西南部一线。对应 2013-03-09T08:00 地面填图资料可以看出,在山西西部地区,气旋锋面过境之后未能出现明显的气温下降,冷锋后部的较暖空气与地面冷高前部分裂冷空气之间形成次天气尺度的副冷锋,副冷锋位于雁门关南部及吕梁山一线;11:00—14:00,副冷锋移动缓慢,且副冷锋前部增温迅速变暖与高压前部更冷空气之间形成较强的温度及变压梯度,均有利于大风及沙尘天气的发生,沙尘天气就发生在副冷锋附近。2013-03-09T20:00—2013-03-10T08:00,随着地面冷高逐步控制山西地区,大风和沙尘天气趋于结束,强冷平流和夜间晴空辐射降温使冷高控制区域出现强降温,造成一次强寒潮天气过程。

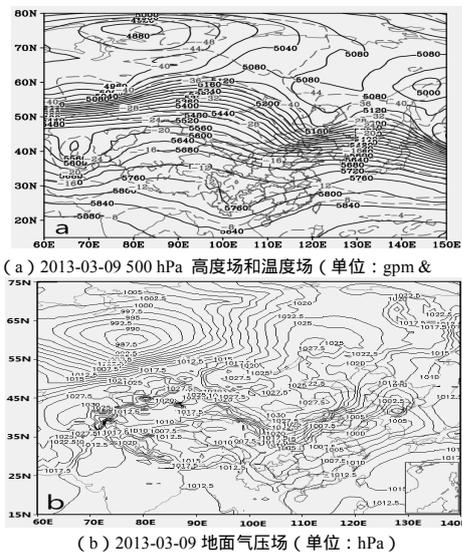


图1 高度场和温度场、地面气压场图

## 2 沙尘天气形成原因分析

### 2.1 前期热力和水汽条件分析

苗爱梅等通过分析近 51 年山西大风与沙尘的统计,得出山西每年的 3—5 月是沙尘天气的高发时段,约占总沙尘暴日数的 62.5%,发生区域上山西西部多于东部,北部多于南部,西北部为沙尘多发区。利用实况资料计算了 2013 年 2 月到 3 月上旬山西省各地市平均降水距平百分率和气温距平(图略)。结果显示,平均降水距平百分率为 -80%,平均温度距平为 1~3。说明 2013 年 2 月至 3 月上旬山西省降水偏少,气温偏高,从而造成地表干燥、疏松,为沙尘天气的产生提供了有利条件。

### 2.2 垂直运动和起风条件分析

在沙尘天气过程中,冷锋前部的上升运动有利于边界层沙源漂浮于近地面层中;冷锋后部强下沉运动导致冷空气的堆积,有利于大风的发生,因此垂直运动在沙尘天气分析中起着重要作用。大气中表示垂直运动的方程可以简单表示为:

$$(\nabla^2 + \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2}) \omega = \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} [\vec{V}_g \cdot \nabla (\frac{\nabla^2 \Phi}{f_0} + f)] + \frac{1}{\sigma} \nabla^2 (-\vec{V}_g \cdot \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial p}) \quad (1)$$

可以将  $\omega$  方程分为 3 部分:

$$f \frac{\partial}{\partial p} [\vec{V}_g \cdot \nabla (f + \xi_g)] = -f \frac{\partial}{\partial p} [-\vec{V}_g \cdot \nabla (f + \xi_g)] \propto -\omega \quad (2)$$

$$-\nabla^2 (\vec{V}_g \cdot \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial p}) \propto \vec{V}_g \cdot \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial p} \propto -\omega \quad (3)$$

$$-\frac{R}{C_p P} \nabla^2 \frac{d\theta}{dt} \propto \frac{d\theta}{dt} \propto -\omega \quad (4)$$

式(2)为绝对涡度平流随高度变化项,其物理意义有 2 点:地面低压中心。一般位于高空的槽前脊后,低层涡度平流很小,高层为正涡度平流,所以在这个地区涡度平流随高度增加,有上升运动。地面高压中心。一般位于高空的槽后脊前,低层涡度平流很小,高层为负涡度平流,所以在这个地区涡度平流随高度减弱,有下沉运动。式(3)为厚度平流的拉普拉斯项,表示高空槽附近(地面高压前部和低压后部)为冷平流区,有下沉运动;高空脊附近(地面低压前部和高压后部)为暖平流区,有上升运动。式(4)为非绝热加热(凝结潜热、下垫面加热)的拉普拉斯项,可以理解为下垫面加热和凝结潜热释放,有上升运动;反之,有下沉运动。

计算分析 2013-03-09T08:00 的 500 hPa 涡度平流,在东北地区有正涡度平流中心,中心值为  $3.47 \times 10^{-9}/s^2$ ;在贝加尔湖南部有负涡度平流中心,中心值为  $-5.33 \times 10^{-9}/s^2$ 。正负涡度平流中心分别对应于地面气旋和地面冷高,由方程可知,正涡度平流区为上升运动区,而在 08:00 的高空 500 hPa 图上,正负涡度的零线位于蒙古国和内蒙交界,山西正好处于弱的正涡度平流区域,有弱上升运动。在地面冷锋前部有暖平流,由方程可知,暖平流区为上升运动区。结合午后至前半夜期间,太阳加热边界层,下垫面受热,使混合层高度升高,有利于近地面的沙尘粒子卷入混合层中,并进行充分的混合,有利于起沙。

另外,实际大气中把实际风和地转风之差定义为“地转偏差”。在水平运动中,地转偏差可分解为 3 项来判断:由变高梯度或变压梯度表示的地转偏差,定义为“变压风”,用 3 h 变压来判断;横向地转偏差,用等压线的辐散、辐合来判断;

纵向地转偏差,用等压线的曲率来判断。因此在实际分析大风中要考虑变压风、梯度风、低压和高压的位置等。一般而言,实际大风出现在 3 h 变压梯度大的区域、气压梯度大的区域,以及低压中心附近和高压的边缘区域。

利用常规地面气象资料和自动站资料,通过分析大同、朔州等 7 站 2013-03-08T23:00—2013-03-10T02:00 逐 3 h 变压和同时段风速极大值以及地面气压场、高低压中心的相对位置来揭示大风的发生及发展。申建华等指出当地面图上正变压中心值超过 4 hPa 时,则会出现大风,且大风强度和正变压中心值的大小成正比。以大同站为例,大同站从 2013-03-09T05:00—17:00,阵风风速均超过 13.9 m/s,最大阵风风速为 22.9 m/s,对应于地面 3 h 变压可知,05:00—08:00 和 08:00—11:00 2 个时间段内 3 h 变压超过了 4 hPa,11:00—14:00 和 14:00—17:00 2 个时段内 3 h 变压均小于 4 hPa。分析 05:00 地面气压场可知,大同站位于地面低压附近,因此 05:00—08:00 时段内实际风是由地转风、变压风以及较强的纵向地转偏差组成;08:00—11:00 时段内 3 h 变压值达到了 9 hPa,变压风是实际风增强的主要原因;11:00—14:00 和 14:00—17:00 2 个时段内,虽然 3 h 变压值相对较小,但分析 14:00 地面气压场发现,由于冷锋后部晴空辐射增温和高压前部较强冷平流形成较强的气压梯度,有 9 根间隔 2.5 hPa 的等压线穿过山西,大同站位于地面气压梯度较大的区域,因此实际风增强是由较强的气压梯度引起的。结合自动站风速资料,分析地面气压场、3 h 变压和高低压中心的相对位置,得出大风落区基本上由北至南、由东及西推进,随着地面气压场的变化,不同时段内实际风增强由不同的地转偏差造成。表 2 为山西 7 地市 3 h 变压变化情况,表 3 为山西 7 地市 3 h 间隔极大风速变化情况。

表2 山西7地市3h变压变化(单位:hPa)

	大同	朔州	太原	离石	介休	襄垣	侯马
23:00—02:00	-2.6	-1.8	-1.9	-1.6	-1.4	-1.2	-0.8
02:00—05:00	0.8	1.6	-0.8	-0.1	-0.2	-1.2	-1.2
05:00—08:00	7.4	5.9	1.5	4.2	0.9	0.6	1.3
08:00—11:00	9.5	7.3	4.6	5.4	5.4	0.3	4
11:00—14:00	2.9	3	4.3	4.3	2.8	2.9	3.4
14:00—17:00	0.4	0.6	5	2	3.6	4.9	3.1
17:00—20:00	3	4	4.2	4.2	5	6	5
20:00—23:00	2.1	2.3	3.4	3.5	2	3.7	3
23:00—02:00	-0.3	-0.6	0.4	-0.4	0.6	1	1.5

表3 山西7地市3h间隔极大风速变化(单位:m/s)

时间	大同	朔州	太原	离石	介休	襄垣	侯马
23:00—02:00	3.4	4.6	5.2	3.6	4.3	2.8	3
02:00—05:00	9.8	4.8	7.9	6.6	8.9	2.3	3.1
05:00—08:00	22.5	11.8	5.2	8.9	7.9	2.4	3.9
08:00—11:00	22.9	15.8	13.4	13.2	15.3	1.9	12.5
11:00—14:00	22.5	18.1	12.8	15.6	14.4	14.6	13
14:00—17:00	16.6	12.5	13.3	13.5	13	15.3	12.8
17:00—20:00	11.5	8	10.3	8.5	12.7	13.9	8.9
20:00—23:00	7.1	8.4	7.4	6.2	12.3	9.4	6
23:00—02:00	3	2.9	7.7	4.7	9.1	7.4	9.3

2.3 高空急流的作用

急流是指一股强而窄的气流带,急流中心最大风速在对流层的上部大于或等于 30 m/s。程海霞等指出,影响沙尘天气发生的高空急流可分为单急流和双急流两大类。双急流占沙尘暴天数的 63%,双急流中的西北+西南风型发生的频次最高。分析 2013-03-08T20:00 和 2013-03-09T08:00 的 200 hPa 的风速场可以看到,在 40°~50°N 存在一条西北急流,急流中心最大风速为 30 m/s;20°~30°N 存在一条副热带西风急流,急流中心最大风速超过了 40 m/s。沙尘天气发生的区域分别位于高空西北急流的右后方和西风急流的左后方。程海霞等指出,无论是单急流型,还是双急流型,均有高空急流的向下延伸。高空急流的下沉支产生强烈的高空动量下传,在低空和近地面层形成低空急流,促使地面风速加大,从而有利于沙尘天气的发生和发展。此次没有发生大范围的沙尘暴的一个原因可能就是高空急流中心的最大风速相对较小(一般发生强沙尘暴时空急流中心最大风速超过 60 m/s)。图 2(a)(b)分别为 2 个时刻的 200 hPa 风场。

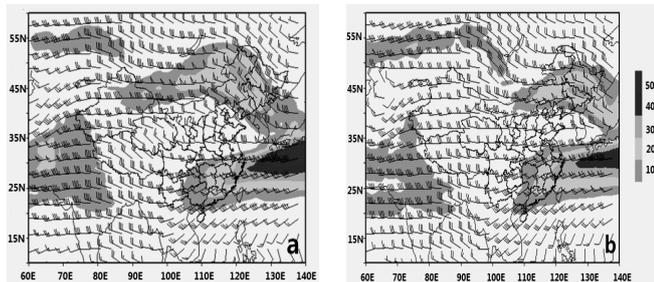


图2 200 hPa 风场

2.4 混合层高度特征

边界层中的空气明显受地面摩擦或热力作用的影响,因此在某个高度的稳定层下会出现显著的垂直混合,造成混合层。廖国莲研究了计算混合层厚度的 7 种方法;姜学恭等研究认为,混合层比热力不稳定层结更能准确反映有利于沙尘暴的大气层结构。分析太原站温度对数压力图可知,沙尘天气发生前期,2013-03-08T20:00 太原站中低层(500 hPa-地面)风随高度顺转,存在明显暖平流,而且整层温度路点差(T-Td)都超过了 20,空气非常干燥,为沙尘天气的发生提供了有利背景

条件;同时,暖平流有利于地面气旋的发展。姜学恭等分析了气旋冷锋型沙尘暴天气的混合层特征,指出混合层具有明显的日变化,即早晨为夜间地面辐射冷却形成的逆温层,傍晚则由于日间地面加热变为混合层。图 3(b)显示,在 2013-03-09T08:00 地面至 850 hPa 存在逆温层,符合气旋冷锋型沙尘暴天气的混合层特征。利用位温和干静力温度相交的点来确定混合层的高度(图略),在 2013-03-09T08:00 混合层高度在 925 hPa 附近;在 2013-03-09T20:00,混合层高度升高,位于 800 hPa 附近。研究表明,沙尘暴强度和混合层高度有明显的相关关系,即混合层高度较高时,沙尘暴强度较强;反之,强度则较弱。分析沙尘天气发生前和发生后的探空资料可知,在沙尘天气期间,整层大气都维持一个相对干的环境,即 T-Td 值基本都超过了 15;沙尘天气发生前期,对流层低层有明显的干暖平流,干暖平流有利于气旋的发展,同时也有利于形成中性混合层;在沙尘天气发生的后期,对流层低层以冷平流为主,有利于大风及强降温;混合层高度相对较低是没有形成强沙尘暴过程的不利条件之一。图 3(a)(b)(c)分别为 2013-03-08T20:00、2013-03-09T08:00 和 2013-03-09T20:00 太原站(53772)温度对数压力。

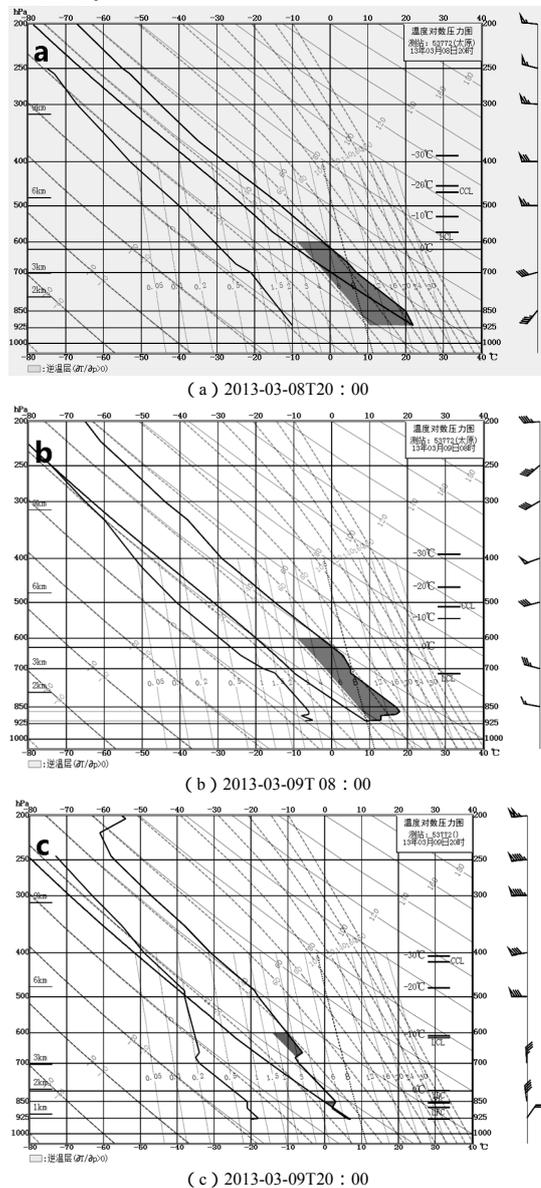


图3 太原站(53772)温度对数压力图

## 2.5 螺旋度分布特点及对气旋发展的作用

螺旋度是用来描述大气运动在其旋转轴方向运动强弱程度的物理量参数。程鹏等通过研究水平螺旋度和总螺旋度指出,沙尘区位于总螺旋度负值区或零线附近;水平螺旋度的分布特征是高层为负螺旋度控制,低层为正螺旋度控制。李岩瑛等分析水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用时指出,低层负值螺旋度越大,越有利于水平方向上起沙。与Z坐标系下正负螺旋度表征的意义相反,在P坐标系下,一般高层正值螺旋度的大小有利于蒙古气旋的发展和移动。利用NECP再分析资料计算500 hPa的水平螺旋度,2013-03-09T02:00,正值螺旋度中心值位于蒙古国地区,对应于地面蒙古气旋的位置略偏东;2013-03-09T08:00,与前一时刻相比,螺旋度正值中心大小无明显变化,位置略东移南压;2013-03-09T14:00,螺旋度正值中心明显增大,对应于同时次的地面气压场,地面气旋呈带状,与正值螺旋度范围形状一致;2013-03-09T20:00,螺旋度强度减弱,并东移至东北偏东地区。通过分析地面气旋的发展及螺旋度的强度和移动方向,得出500 hPa的水平螺旋度正值对地面气旋的移动有指示意义,位置落后于地面气旋一两个经度。同时,沙尘天气出现在500 hPa水平螺旋度正值范围偏西、偏西南区域。图4(a)(b)(c)(d)分别为4个时刻的500 hPa水平螺旋度。

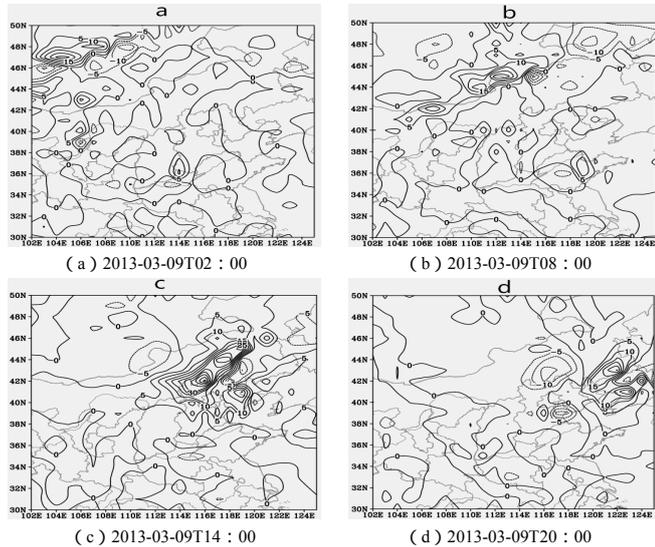


图4 500 hPa水平螺旋度(单位:  $10^2 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

## 3 总结

通过以上分析,可以得出以下几个结论:沙尘天气发生的前期,温度偏高和降水偏少是沙尘天气发生的有利气候背景条件。500 hPa环流形势由纬向型向经向型调整,有利于引导强冷空气南下影响华北地区;蒙古气旋是造成此次沙尘天气过程的主要影响系统,冷锋锋面次级环流产生的垂直环流有利于形成混合层,午后随着地面长波辐射加热大气与冷锋后部的更冷空气形成的副冷锋是这次沙尘天气的直接影响系统。冷锋后部密集的等压线有利于梯度风风速的增大,同时正3 h变压大值区造成的变压风也有利于实际大风的增强,实际风的增强有利于沙尘天气的发生。此次沙尘天气发生发展的过程中都有高空急流与之对应,且在垂直方向上有风的切变存在,有利于上下层之间的动量交换,把高层较大动量的空气下传到地面,使地面风速增大,而300 hPa以上的高空急流中心值(40 m/s)相对较低是没有发生强沙尘天气的因素之一。沙尘天气发生在午后,随着气温的升高,地面湍流运动增强,有利于边界层沙尘粒子飘浮于空中,但弱的垂直运动和相对较低的混合层高度不利于大范围强沙尘暴天气的发生。螺旋度诊断揭示,500 hPa的水平螺旋度正值对地面气旋的移动有指示意义;沙尘天气出现

在500 hPa水平螺旋度正值范围偏西、偏西南区域。

## 参考文献

- [1] 方宗义,王炜.2002年我国沙尘暴的若干特征分析[J].应用气象学报,2003,14(5):513-521.
- [2] 尹晓惠,时少英,张明英,等.北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析[J].高原气象,2006,26(5):1039-1044.
- [3] 孙建中,盛学斌,刘云霞.河北坝上地区人类活动与生态环境变化研究[J].环境科学进展,1998,7(4):104-110.
- [4] 范俊红,郭树军,李宗涛.河北省中南部一次沙尘暴的动力条件分析[J].高原气象,2009,28(4):795-802.
- [5] 石广义,赵思雄.沙尘暴研究中的若干科学问题[J].大气科学,2003,27(4):591-603.
- [6] 李宁,杜子璇,刘忠阳,等.沙尘暴发生过程中的风速和土壤湿度的变化[J].自然灾害学报,2006,15(6):28-32.
- [7] 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J].气象学报,1979,37(4):26-35.
- [8] 尤凤春,史印山,付桂琴,等.河北省沙尘暴天气成因分析[J].气象学报,2005,24(4):642-647.
- [9] 孙军,姚秀萍.一次沙尘暴过程锋生函数和地表热通量的数值诊断[J].高原气象,2002,21(5):488-496.
- [10] 刘景涛,钱正安,姜学恭,等.中国北方特强沙尘暴天气系统分型研究[J].高原气象,2004,23(4):540-547.
- [11] 宋阳,刘连友,严平,等.中国北方5种下垫面对沙尘暴的影响研究[J].水土保持学报,2005,19(6):15-18.
- [12] 钱正安,蔡英,刘景涛,等.中国北方沙尘暴研究的若干进展[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):1-8.
- [13] 范俊红,郭树军,李宗涛.河北省中南部一次沙尘暴的动力条件分析[J].高原气象,2009,28(4):795-802.
- [14] 韩经纬,孟雪峰,宋桂英.一次伴随强沙尘暴天气飚线的多普勒雷达回波特征[J].气象,2006,32(10):57-63.
- [15] 程海霞,丁治英,帅克杰,等.沙尘暴高空急流的统计特征及动力学分析[J].南京气象学院学报,2006,29(6):807-814.
- [16] 苗爱梅,贾利冬,武捷.近51 a山西大风与沙尘日数的时空分布及变化趋势[J].中国沙漠,2010,30(2):452-460.
- [17] 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,2007:117-122,52-60.
- [18] 申建华,李丽平,张国勇,等.山西一次罕见大风成因分析[J].安徽农业科学,2011,39(34):21287-21289,21403.
- [19] 廖国莲.大气混合层厚度的计算方法及影响因子[J].中山大学研究生学刊,2005,26(4):66-73.
- [20] 姜学恭,沈建国,刘景涛,等.导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究[J].气象学报,2003,61(5):606-620.
- [21] 姜学恭,沈建国,胡英华,等.沙尘暴过程中的混合层特征[J].干旱区资源与环境,2004,18(S1):65-71.
- [22] 程鹏,王宝鉴,孔祥伟,等.河西走廊一次强沙尘暴天气的螺旋度诊断[J].干旱气象,2013,31(1):144-149.
- [23] 李岩瑛,张强.水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用[J].气象学报,2012,70(1):144-154.

作者简介:赵建峰,男,山西寿阳人,2011年毕业于南京信息工程大学生态学专业,工程师。

[编辑:刘晓芳]