

李岩瑛, 张 强, 李耀辉等. 水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系研究. 地球物理学报, 2008, 51(3): 692~703

Li Y Y, Zhang Q, Li Y H, et al. Dynamic relationships between the horizontal helicity and the sandstorm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 692~703

水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系研究

李岩瑛^{1,2,3}, 张 强^{2,1}, 李耀辉², 孙爱芝⁴, 尚宝玉¹, 陈龙泉³

1 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000

2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020

3 甘肃省武威市气象局, 武威 733000

4 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

摘 要 应用 2002~2006 年高空流场和地面观测资料, 计算近地面至 500 hPa 水平螺旋度的大小. 结果表明: 水平螺旋度负值中心值越大, 500 hPa 到近地面风速越大, 西风增强, 风速垂直切变越大, 辐合上升运动越强, 形成沙尘暴的强度就越强. 水平螺旋度负值中心常常在河西走廊附近最强, 导致其下游东南方发生沙尘暴. 水平螺旋度负值中心与其下游沙尘暴发生强度有一致的对应关系: 当水平螺旋度负值中心 $\leq -200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时, 未来 24 小时内该区下游将有沙尘天气出现, 当 $\leq -600 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时, 6 小时内该区下游将有能见度小于 500 m 的强沙尘暴天气出现, 当 $\leq -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时, 6 小时内该区下游将有能见度小于 50 m 的特强沙尘暴天气出现.

关键词 水平螺旋度, 近地面风场, 沙尘暴, 强度, 动力学关系

文章编号 0001-5733(2008)03-0692-12

中图分类号 P445

收稿日期 2006-12-27, 2008-01-18 收修定稿

Dynamic relationships between the horizontal helicity and the sandstorm

LI Yan-Ying^{1,2,3}, ZHANG Qiang^{2,1}, LI Yao-Hui², SUN Ai-Zhi⁴,
SHANG Bao-Yu¹, CHEN Long-Quan³

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730000, China

2 Lanzhou Arid Institute of Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

3 Wuwei City Meteorological Bureau in Gansu Province, Wuwei 733000, China

4 School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract We calculated the average horizontal helicities from the surface to 500 hPa based on daily 08h and 20h upper wind and surface wind data obtained in 2002~2006. The calculated results show that the more negative the horizontal helicity is, the higher the wind velocities from the surface to 500 hPa are and the stronger the westerly wind is. Consequently, the shear strength of the vertical air flow increases and the convergent vertical air flow is thus enhanced, resulting in the formation of extremely severe dust storms. The negative core (or center) of the aforementioned horizontal helicity is often strongest near the Hexi Corridor, leading to the frequent occurrence of sandstorms in its downstream areas towards the southeast. Our calculated results demonstrate a strong relationship between the negativity of the helicities and the intensity of the resulted sandstorms. For example, if the horizontal helicity in its core is $\leq -200 \text{ m}^2/\text{s}^2$,

基金项目 国家自然科学基金项目“西北沙尘暴关键区近地面起沙特征的观测与数值研究”(40645027)和国家重点基础研究项目(G2000048703)共同资助.

作者简介 李岩瑛, 女, 1970 年生, 理学硕士, 副高级高工, 兰州大学在读博士, 主要从事天气预报和研究工作. E-mail: lyyqxj@163.com

sand-dust will probably occur within 24 hours with a better (> 500 m) visibility. When the horizontal helicity in its core is $\leq -600 \text{ m}^2/\text{s}^2$, strong sandstorms are likely to occur within 6 hours with a visibility of less than 500 m. When the horizontal helicity in its core (or center) is $\leq -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$, extremely strong sandstorms are most likely to occur within 6 hours with a visibility of less than 50 m.

Keywords Horizontal helicity, Near surface wind field, Sandstorm, Intensity, Dynamic relationship

1 引言

20 世纪 90 年代后期以来,随着全球气候的变暖,沙尘暴影响明显增强,如何做好沙尘暴的预报,有效地减轻沙尘暴的危害,已成为当前全球气候变化的重点工作之一。在通常的沙尘暴预报中集中考虑冷空气的强度、高低空风速、变高场、地面气压场的变化^[1~5],而在实际预报中,发现上述这些因素还远不能满足定量的沙尘暴预报需要。沙尘暴动力学研究表明,沙尘暴的起沙过程主要由中小尺度风暴系统引起,而在中小尺度系统中,螺旋度是一个用来衡量风暴入流气流强弱以及沿入流方向上涡度分布状况的参数。它不仅表达了风场旋转的强弱,而且反映了对旋转性的输送,是一个反映动力条件的物理参数。许多研究发现,螺旋度能够较好地刻画强对流天气的空间物理结构,对雷暴、龙卷、大范围暴雨等强对流天气的发生发展和分析预报有一定的指示作用^[6~8]。螺旋度是一个十分重要的动力学指标,重要性还在于它比涡度包含了更多的辐散风效应,更能体现大气的运动状况,其值的正负情况反映了涡度和速度的配合程度。自 20 世纪 80 年代以来,气象学者将螺旋度应用到强对流风暴的旋转发展维持机制和其他相关的大气现象研究中,并对其在强对流天气分析预报中的应用进行了数值试验诊断分析^[9,10]。赵光平等^[11~16]通过强沙尘暴典型个例将垂直螺旋度应用到沙尘暴研究中,得出沙尘暴区上空垂直螺旋度分布的特征是高层为负值,低层为正值,对流层中低层螺旋度正的大值区与沙尘暴发生区具有较好的一致性,可以进一步判断沙尘暴的爆发时间、持续过程和移动路径,为准确预报沙尘暴提供参考依据。从量级上看(至少在风暴初期),水平螺旋度的量级远大于垂直螺旋度,较大程度上决定了总螺旋度的情况,其预示性和重要性充分体现在预报中^[17]。岳平等^[18]通过民勤沙尘暴典型个例分析,水平相对风暴螺旋度与沙尘暴的强度在时间上依然

具有很好的对应关系,但应用水平螺旋度长期计算,来追踪沙尘暴天气并做详细分析预报尚不多见。本文使用的水平螺旋度值是在近地面 925 hPa、850 hPa、700 hPa 三层高低空相对风暴水平螺旋度值的叠加和,既有水平方向上相对风暴水平螺旋度值的范围,又有垂直方向上相对风暴水平螺旋度值的强度,因而在沙尘暴的范围和强度预报上比垂直螺旋度更直观简洁。沙尘暴初期发生的范围和强度主要取决于相对风暴水平螺旋度,本文主要讨论相对风暴水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系,侧重沙尘暴范围和强度的预报。

甘肃省河西走廊东部是我国乃至中亚地区沙尘暴天气的高发区之一,这里北临巴丹吉林沙漠,东接腾格里沙漠,境内戈壁、沙地广为分布。该区北部东与腾格里沙漠接壤,境内多新月形沙丘和沙丘链,常年降水稀少,气候干燥,多年平均气温达 8°C 左右,降雨量仅 110~160 mm,蒸发量高达 2600~3000 mm,大风沙尘暴日数较多,盛行风向为西北风至西北西风,年均八级以上大风达 25 天左右,民勤年最多沙尘暴日数达 59 天(1953 年),武威 34 天(1953 年),为沙尘暴天气的发生提供了较为丰富的沙源、动力和热力条件,其中民勤县是中国沙尘暴出现最多的地方^[19~21](图 1)。该区出现的区域性强沙尘暴常常向下游移动,是影响中国北方乃至日本等地大气环境的重要沙尘源地^[22~24]。

本文旨在应用高空流场资料和地面观测资料,计算近地面层水平螺旋度,探讨我国沙尘暴发生中心之一的甘肃河西走廊东部水平螺旋度与沙尘暴的关系,及其在沙尘暴预报中的意义。

2 资料

(1)计算分析资料:2002~2006 年逐日 08 时和 20 时 925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa 四层流场客观分析资料,在 $12^\circ\text{N}\sim 80^\circ\text{N}$, $32^\circ\text{E}\sim 160^\circ\text{E}$ 范围内,对 33×18 个格距为 4° 的格点资料进行计算分析。

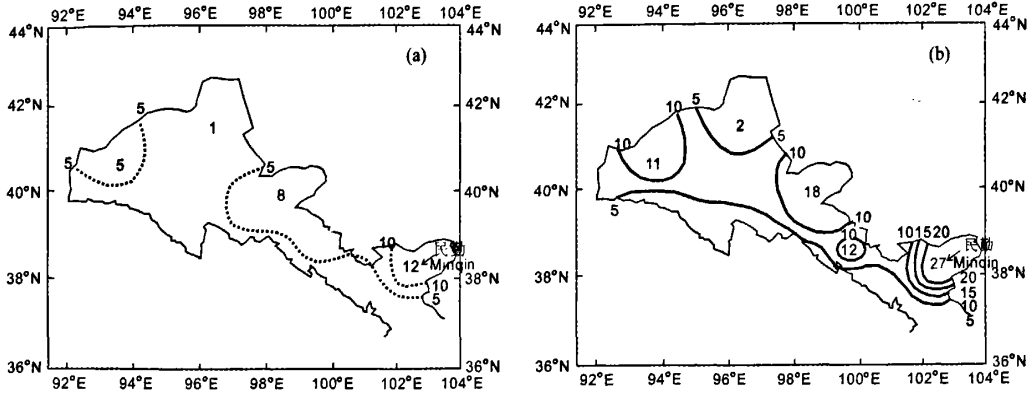


图1 1971~2000年河西走廊东部春季(a)和年均沙尘暴日数(b)分布图

Fig. 1 Spring (a, dashed line) and annual (b, solid line) mean sandstorm days of Hexi Corridor in 1971~2000

一个格距的水平距离在中纬度大约为 400 km. 此资料在气象信息综合分析处理系统(MICAPS)中每天 08 时和 20 时分发,数据稳定可靠. 由于沙尘暴发生范围在数百公里到上千公里,应用本资料有利于监测大范围强沙尘暴的发生发展,在计算水平螺旋度与沙尘暴动力尺度特征资料分析中是可行的.

(2) 沙尘暴实况资料:2002~2006 年(12°N~80°N,32°E~160°E)范围内高空 08 时和 20 时,地面每隔 3 小时或每隔 1 小时加密实况观测资料;1 小时内的详细资料来自甘肃省武威市五个气象观测站点 2002~2006 年地面气象观测月报表及天气实况图表,这五个站为:民勤、凉州区、永昌、古浪和乌鞘岭.

3 计算方法及理论依据

螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力特性的物理量,最早用来研究流体力学中的湍流问题,在等熵流体中具有守恒性质.其严格定义为

$$he = \iiint \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

通常人们所说的螺旋度是局地螺旋度 he , 定义为

$$he = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}). \quad (2)$$

根据向量分析的定义,螺旋度属于假标量:

$$he = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) - v \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (3)$$

(3)式右端项各有不同的意义,它们分别与 x, y, z 方向的风速和涡度的分量联系在一起,其值相同时也可能会有不同的运动形式.可分别称为 x -螺旋度, y -螺旋度(合称为水平螺旋度), z -螺旋度,分

别记为 he_1, he_2, he_3 .

水平螺旋度,确切地说,是忽略垂直运动水平分布不均下的相对风暴水平螺旋度.计算公式如下:

$$he = \int_0^h (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{V} = (U, V)$ 为环境风场, $\mathbf{C} = (C_x, C_y)$ 为风暴移动速度, h 为气层厚度, he 的单位为 m^2/s^2 . 由于垂直速度的水平切变小于水平速度的垂直切变,所以 $\boldsymbol{\omega}$ 主要决定于风的垂直切变. $\boldsymbol{\omega}$ 为水平涡度矢量,可化简为 $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_H}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{j} - \frac{\partial v}{\partial z} \mathbf{i}$. (4)式变为

$$he = \int_0^h ((V - C_y) \times \frac{\partial u}{\partial z} - (U - C_x) \times \frac{\partial v}{\partial z}) dz. \quad (5)$$

在实际中, h 通常取 3 km, 将(5)式用求和近似代替,计算公式如下:

$$he = \sum_{k=1}^n \left[(v_k(i, j) - C_y(i, j)) (u_k(i, j) - u_{k-1}(i, j)) - (u_k(i, j) - C_x(i, j)) (v_k(i, j) - v_{k-1}(i, j)) \right], \quad (6)$$

式中: (u_k, v_k) 为各高度层上的水平风. 在甘肃河西地区, $k=1, 2, 3$ 分别取近地面层 925 hPa、850 hPa、700 hPa 三层.

水平螺旋度取决于水平涡度和风暴相对风的大小,通常在计算中,风暴移速采用 Maddox^[25] 1976 年的计算方法,他在研究中以平均风速的 75%, 风向向右偏转 30°估算风暴移速,其中平均风向、风速是取 850 hPa 至 300 hPa 气层中的平均风计算出的. 由于我国沙尘暴主要出现在中纬度 35°N~50°N 之间,沙暴出现在近地面层 850 hPa 左右,因而在本

文中风暴移速以平均风速乘以 850 hPa 与 500 hPa 的实际风速比值,风向右移 850 hPa 与 500 hPa 的偏转角度来确定,平均风向、风速取近地面 925 hPa、850 hPa 和 700 hPa 三层中的平均风计算. 计算公式如下,其中 $k=1,2,3,4$ 分别为 925 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa:

$$\begin{aligned} CC_x(i,j) &= \sum_{k=1}^3 u(i,j,k)/3, \\ CC_y(i,j) &= \sum_{k=1}^3 v(i,j,k)/3, \\ \alpha(i,j) &= \arctg\left(\frac{CC_y(i,j)}{CC_x(i,j)}\right), \\ \alpha(i,j) &= 180/3.14 \times \alpha(i,j), \\ \beta(i,j,2) &= \arctg\left(\frac{V(i,j,2)}{U(i,j,2)}\right), \\ \beta(i,j,2) &= 180/3.14 \times \beta(i,j,2), \\ \beta(i,j,4) &= \arctg\left(\frac{V(i,j,4)}{U(i,j,4)}\right), \\ \beta(i,j,4) &= 180/3.14 \times \beta(i,j,4), \\ \delta(i,j) &= \beta(i,j,2) - \beta(i,j,4), \\ \lambda(i,j) &= \frac{\sqrt{U^2(i,j,2) + V^2(i,j,2)}}{\sqrt{U^2(i,j,4) + V^2(i,j,4)}}, \\ (CC_x(i,j) \geq 0, CC_y(i,j) \geq 0) \text{ 时}, \\ \theta(i,j) &= \alpha(i,j) - \delta(i,j), \\ (CC_x(i,j) \geq 0, CC_y(i,j) \leq 0) \text{ 时}, \\ \theta(i,j) &= 180 - \alpha(i,j) - \delta(i,j), \\ (CC_x(i,j) \leq 0, CC_y(i,j) \leq 0) \text{ 时}, \\ \theta(i,j) &= 180 + \alpha(i,j) - \delta(i,j), \\ (CC_x(i,j) < 0, CC_y(i,j) \geq 0) \text{ 时}, \\ \theta(i,j) &= 270 + \alpha(i,j) - \delta(i,j), \\ C_x(i,j) &= \sqrt{(CC_x^2(i,j) + CC_y^2(i,j))} \\ &\quad \times \cos(\theta(i,j) \times \pi/180) \times \lambda(i,j), \\ C_y(i,j) &= \sqrt{(CC_x^2(i,j) + CC_y^2(i,j))} \\ &\quad \times \sin(\theta(i,j) \times \pi/180) \times \lambda(i,j), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\beta(i,j,2)$, $\beta(i,j,4)$ 分别代表 850 hPa 和 500 hPa 的风向, $\delta(i,j)$ 为风向差值, $\lambda(i,j)$ 为 850 hPa 与 500 hPa 的风速比值,当风速比值 ≥ 1 时按 1 计算, $\theta(i,j)$ 为风暴风向, $C_x(i,j)$ 和 $C_y(i,j)$ 为风暴的水平移速. 格点资料中,所应用的风向与风速的关系如图 2 所示,其中 $U>0$ 为西风, $V>0$ 为南风.

当每天的高空天气报文收齐后,利用(7)、(6)式,可计算出(12°N~80°N, 32°E~160°E)范围内的相对风暴水平螺旋度.

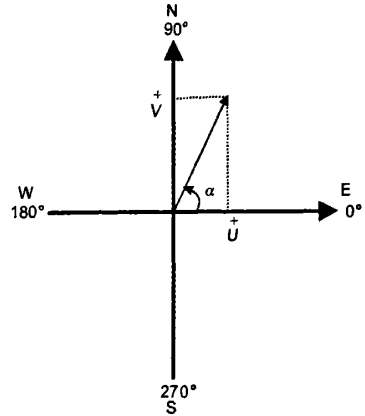


图 2 风向与风速的关系

α 为风向, U 为纬向风, V 为经向风.

Fig. 2 Relation between wind direction and velocity

α is wind direction, U is wind along latitude,

V is wind along longitude.

$$\begin{aligned} he(i,j) &= \sum_{k=1}^3 (u(i,j,k+1) - C_x(i,j)) \times (v(i,j,k) \\ &\quad - C_y(i,j)) - (v(i,j,k+1) - C_y(i,j)) \\ &\quad \times (u(i,j,k) - C_x(i,j)), \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $he(i,j)$ 表示近地面 925 hPa、850 hPa、700 hPa 三层高低空的垂直水平螺旋度和.

水平螺旋度主要与水平方向的力管、涡度与气压梯度相联系,较强的负水平螺旋度中心常常与正的 3 小时变压中心相伴. 水平螺旋度的负值中心越大说明高层经向风与低层风暴的经向风垂直切变大,低层中纬向风与风暴的纬向风水平切变大,形成逆时针螺旋式的辐合上升运动. 经向风垂直切变和纬向风水平切变越大,风速越大旋转速度越快,辐合上升运动越强;同样高空风速越大,风暴的东移速度越快(图 3). 而沙尘暴的大小除沙源外主要取决于高低空风速的大小和强烈的辐合上升运动,因而水平螺旋度的负中心值越大,沙尘暴越强. 相反,当水平螺旋度为正值时,高层纬向风与低层风暴的纬向风垂直切变大,低层中经向风与风暴的经向风水平切变大,形成顺时针螺旋式的辐散下沉运动,不利于沙尘暴的发生.

4 螺旋度与近地面风场的关系

春季是沙尘暴发生的主要季节,区域性强沙尘暴和沙暴灾情均出现在春季,所以重点选取 2002~2006 年春季 08 时和 20 时 1469 个典型个例,水平螺旋度值按每隔 50 m^2/s^2 计算不同水平螺旋度值范

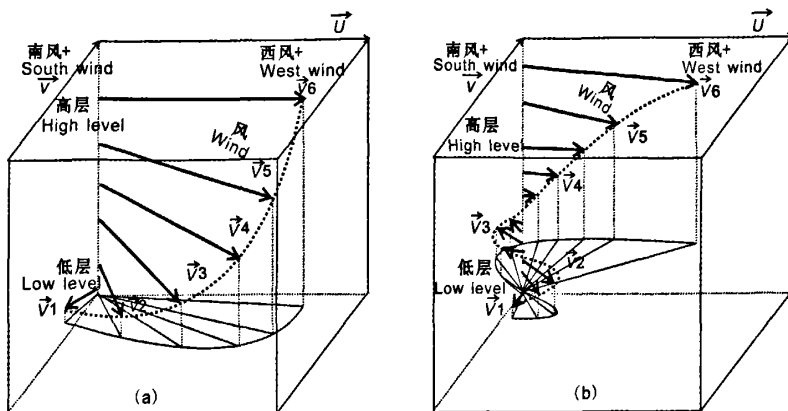


图3 负值螺旋度时近地面至500 hPa 风暴的垂直风场结构图

(a)一致辐合;(b)低层辐合,高层辐散.

Fig. 3 Windstorm's vertical wind structures of negative helicity value from the surface to 500 hPa

(a) Whole convergence; (b) Convergence in low, divergence in upper air.

围内各要素的平均值,得出水平螺旋度值与高低空各气象要素之间的关系.由于沙尘暴是风暴的直接产物,以下风暴用沙暴表示.

4.1 水平风速和风向

如图4,分别计算不同水平螺旋度强度 ≤ -1000 、 $(-1000, -600]$ 、 $(-600, -200]$ 、 $(-200, 200]$ 和 $\geq 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的风场垂直结构,水平螺旋度强度平均值分别为 -1416 、 -797.8 、 -401.3 、 $0.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $1206.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$,得出不同水平螺旋度强度下的风场垂直结构特征: $\leq -200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时在850 hPa以下逆转,以上顺转; $(-200, 200] \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时在850 hPa以下顺转,以上逆转; $\geq 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时在700 hPa以下顺转,以上逆转.螺旋度负值越大,沙暴的风速越大,其近地面层风速越大,尤其是当螺旋度值 $\leq -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时沙暴,925、850、700 hPa和500 hPa的风速值分别在10、14、21、29 m/s和47 m/s左右;相反,当螺旋度值 $\geq 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时沙暴,925、850、700 hPa和500 hPa的风速值分别在11、15、22、25 m/s和29 m/s左右.相同条件下,负值螺旋度的风速、旋转角度和垂直风切变要大于正值螺旋度的.

如图5,随着螺旋度绝对值的增大,高低层风速也在增大,其中与700 hPa和500 hPa的风速较为密切:

$$V7 = 6 \times 10^{-6} X^2 + 2 \times 10^{-5} X + 16.964, \quad R^2 = 0.65, \quad (9)$$

$$V5 = 8 \times 10^{-6} X^2 - 0.0049 X + 24.212, \quad R^2 = 0.65, \quad (10)$$

(9)和(10)两式中 X 为螺旋度值, R 为相关系数,下同.

风向中,螺旋度值除与沙暴和500 hPa呈线性

正相关外,其他呈负相关,与850 hPa的风向关系较为密切,其次是500 hPa的风向:

$$\alpha 8 = -5 \times 10^{-6} X^2 - 0.0913 X + 174.32, \quad R^2 = 0.76, \quad (11)$$

$$\alpha 5 = -3 \times 10^{-6} X^2 + 0.0785 X + 155.93, \quad R^2 = 0.71. \quad (12)$$

纬向风 U 分量中,螺旋度与沙暴风速呈线性增加(正相关),西风增强,但925~850 hPa呈线性减小(负相关),西风减小,而在700~500 hPa中随着螺旋度绝对值的增大,风速也在增大;而经向风 V 分量中与沙暴和500 hPa呈线性减小,即螺旋度值越大南风减弱,而在925~700 hPa中呈线性增加,即螺旋度值越大南风加强.其中螺旋度与850 hPa中的 U 和 V 分量关系较为密切:

$$U8 = 2 \times 10^{-6} X^2 - 0.0063 X + 5.11, \quad R^2 = 0.67, \quad (13)$$

$$V8 = 3 \times 10^{-6} X^2 + 0.0111 X + 0.4076, \quad R^2 = 0.85, \quad (14)$$

与500 hPa中的 V 分量关系也较为密切:

$$V5 = 6 \times 10^{-6} X^2 - 0.0092 X + 1.8843, \quad R^2 = 0.78. \quad (15)$$

4.2 垂直风切变

如图6,螺旋度负值越大,近地面层的高低空垂直风速切变越大,尤其是当螺旋度负值 $\leq -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时700 hPa以下经向风切变均为负值,即低层北风较强,500~700 hPa的纬向风垂直切变在18 m/s,经向风垂直切变接近30 m/s.相反,当螺旋度值 $\geq 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时,850 hPa以下经向风垂直切变值在12 m/s左右,

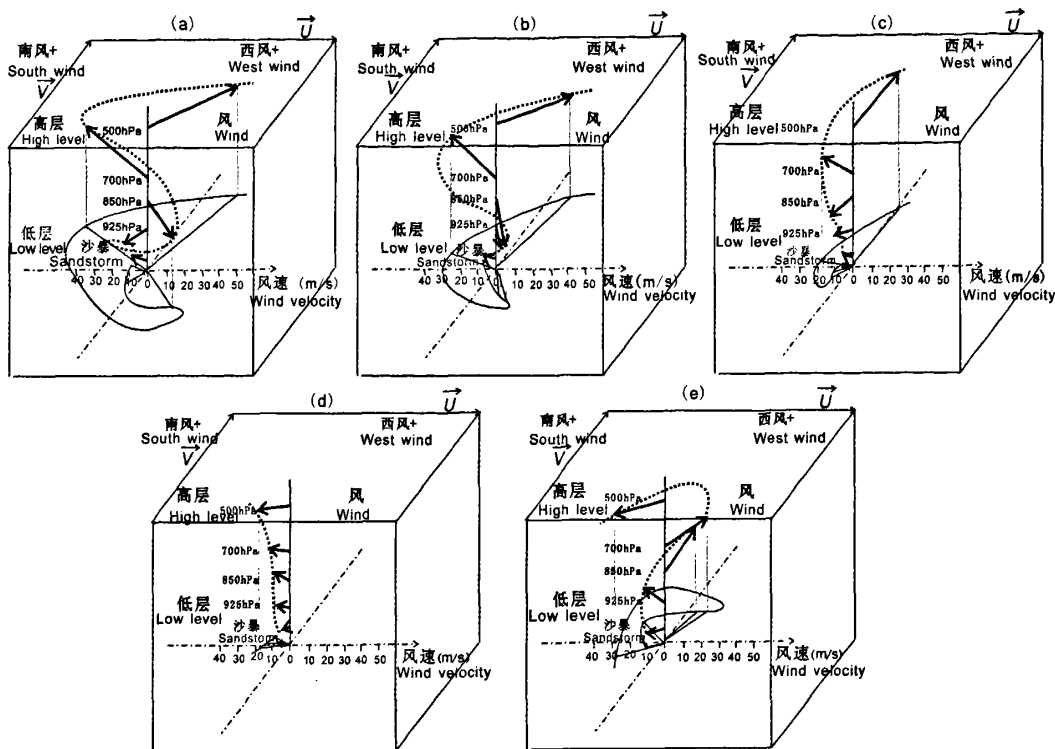


图4 不同水平螺旋度强度下风场的垂直结构剖面图

(a),(b),(c),(d) 和 (e) 的水平螺旋度强度值分别为 -1416 、 -797.8 、 -401.3 、 0.0 和 $1206.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

Fig. 4 Vertical wind structure sections of different horizontal helicity intensities

The horizontal helicity intensities of (a),(b),(c),(d) and (e) are -1416 , -797.8 , -401.3 , $0.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and $1206.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$, respectively.

850 hPa 以上经向风垂直切变值为负, 经向风减小, 高层北风较强。螺旋度绝对值较大时, 850 hPa 以上负螺旋度值的风速切变显著大于正螺旋度值的风速切变。

U 分量垂直切变中螺旋度与 925 hPa-沙尘暴呈线性减小, 其他高层随着螺旋度绝对值的增大, 风速垂直切变值也在增大, 其中与 925 hPa-沙尘暴关系较密切:

$$U9-沙 = -0.0102X + 3.9463, R^2 = 0.67. \quad (16)$$

V 分量垂直切变中 850 hPa 以下略呈线性增加, 850 hPa 以上呈显著线性减小, 其中螺旋度与 500~700 hPa 关系较为密切:

$$V5-7 = 2 \times 10^{-6} X^2 - 0.0158X + 1.3949, \\ R^2 = 0.85. \quad (17)$$

4.3 垂直旋转角度和西风指数强度

如图 7, 螺旋度绝对值越大, 近地面层的高低空旋转角度越大, 贴地层较小, 但 500~700 hPa 最大, 尤其是当螺旋度负值 $\leq -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时, 各层的左

右旋转角度较大。螺旋度值为负时, 850 hPa 以下逆转, 850 hPa 以上顺转; 螺旋度值为正时, 700 hPa 以下顺转, 以上逆转。

螺旋度与 500~700 hPa 的角度关系密切:

$$\alpha_5-7 = 5 \times 10^{-5} X^2 + 0.1282X - 1.0511, \\ R^2 = 0.59, \quad (18)$$

其次是与 700~850 hPa 的角度:

$$\alpha_7-8 = -4 \times 10^{-5} X^2 + 0.0416X - 17.341, \\ R^2 = 0.43. \quad (19)$$

我们用地面到高空的纬向风 U 的矢量和来表征近地面层西风指数强度^[26], 通过对比分析得出: 螺旋度与地面到 500 hPa 的纬向风 U 的矢量和呈线性减少关系, 尤其与 925 hPa 和 850 hPa 纬向风 U 的矢量和较为密切:

$$U9+8 = -0.0128X + 9.0034, R^2 = 0.67. \quad (20)$$

这说明近地面层西风指数越强, 螺旋度负值越大。

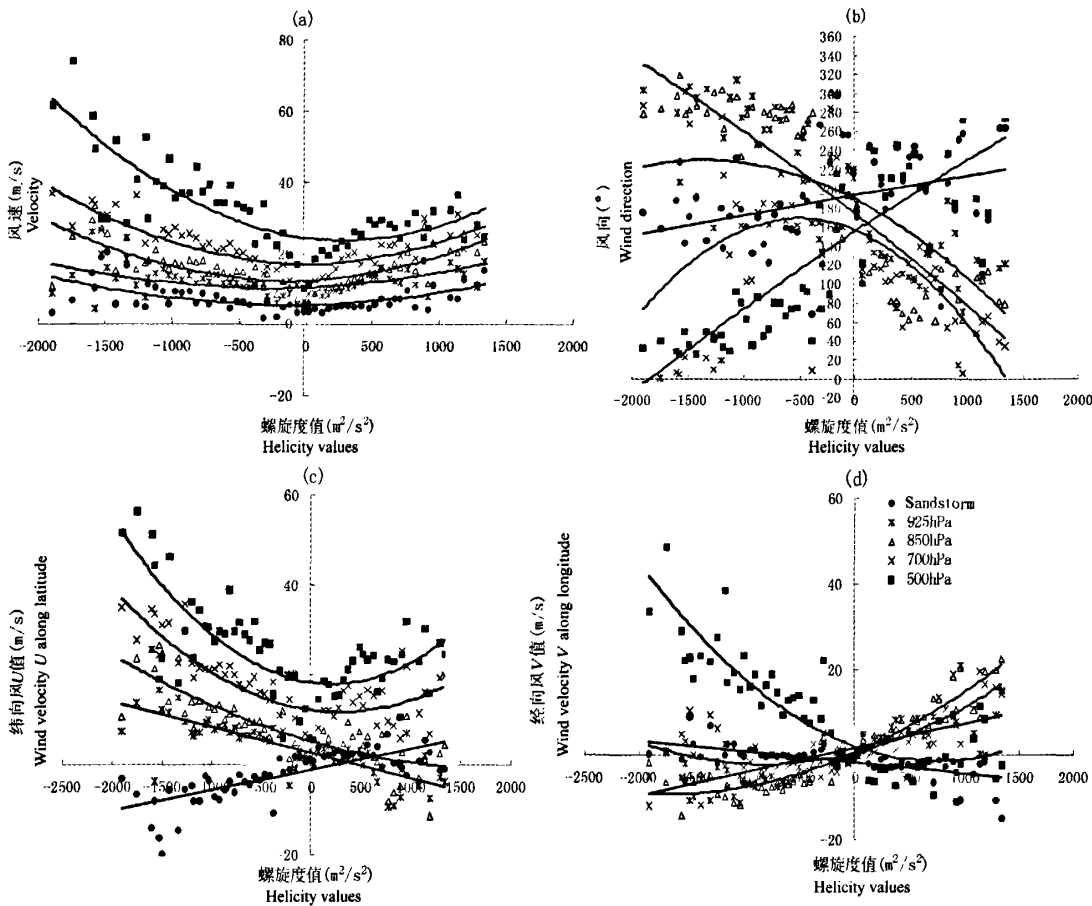


图 5 近地面层至 500 hPa 中水平风速、风向、以及纬向风速 U 和经向风速 V 与水平螺旋度值的关系
Fig. 5 Correlation between horizontal wind velocity, direction, velocity U along latitude as well as velocity V along longitude and horizontal helicities from the surface to 500 hPa

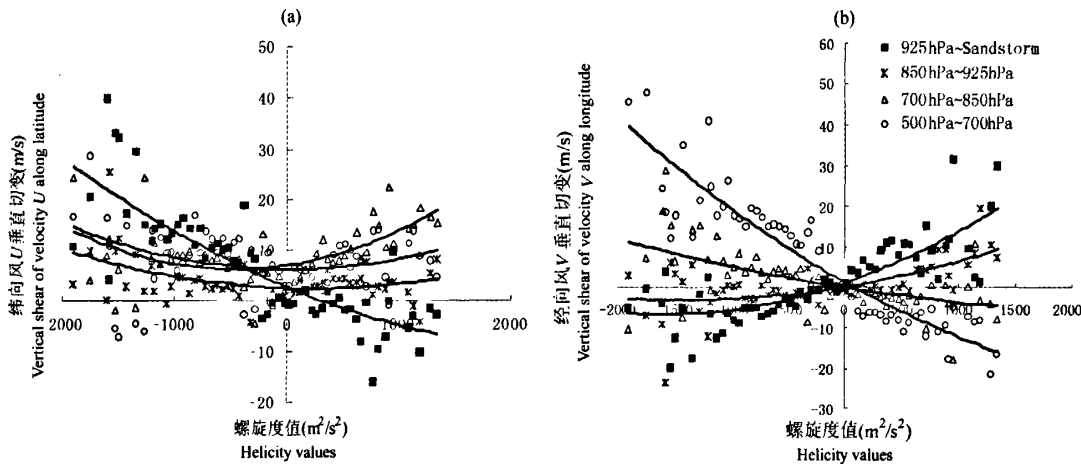


图 6 近地面层至 500 hPa 中水平风速 U 分量和 V 分量垂直切变值与水平螺旋度值的关系
Fig. 6 Correlations between horizontal wind velocity U as well as V vertical shear values and horizontal helicities from the surface to 500 hPa

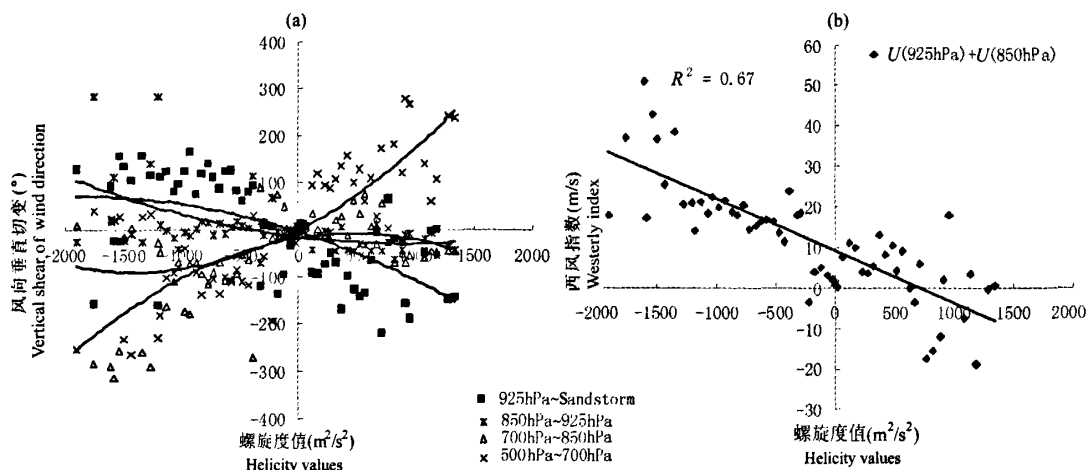


图7 近地面层至500 hPa中垂直旋转角度值(正值为逆时针旋转)、西风指数与水平螺旋度值的关系

Fig. 7 Correlations between wind vertical rotate angles (anticlockwise rotation is positive value),

westerly indexes and horizontal helicities from the surface to 500 hPa

综合上述分析,负值螺旋度越大,相应近地面层风速越大,西风增强,垂直风切变越强,逆时针旋转辐合上升运动越强,因而沙尘暴发生的可能性越大,强度越强.螺旋度值综合体现了近地面层到500 hPa的水平风速、垂直风切变和辐合上升运动,在预报沙尘暴方面,比风速有更大的优越性.

5 螺旋度与沙尘暴的关系

5.1 空间分布对比

2002年3月18~22日在我国北方发生的沙尘暴是20世纪90年代以来范围最大、强度最强、持续时间最长和影响最严重的沙尘暴过程,西北、华北及东北部分地区出现了强沙尘暴.如北京3月20日发生了有历史记录以来最大的沙尘暴,总悬浮颗粒物浓度达 10.9 mg/m^3 ,高出国家颗粒物污染标准54倍,其他金属元素是平日的10倍以上;而青岛总悬浮颗粒物浓度比平时增加了4.1倍^[27~29].我们对这一发生在中国北方区域的沙尘暴强度与螺旋度最小负值中心等值线进行对比发现,强沙尘暴中心出现在最大螺旋度负值中心下游的东南方向,与其螺旋度的负中心等值线相对应,负中心值越大,对应沙尘暴强度越强,螺旋度负值中心 $-1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 与强沙尘暴中心相对应(图8).

进一步对2002年3月18~21日的沙尘暴过程进行螺旋度间隔为12小时,地面图间隔为3小时的移动跟踪分析,发现大风沙尘暴天气区域常出现在

螺旋度负值中心的右前方.螺旋度负值中心从新疆西北部进入(18日08时达 $-467.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$,中心在 $52^\circ\text{N}, 76^\circ\text{E}$),向东南方逐渐增强(18日20时达 $-856.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$,中心在 $48^\circ\text{N}, 88^\circ\text{E}$),到河西走廊北部一带达最强(19日08时达 $-1576.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$,中心在 $44^\circ\text{N}, 100^\circ\text{E}$),然后移向宁夏附近减弱(19日20时达 $-383.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$,中心在 $44^\circ\text{N}, 104^\circ\text{E}$),向东南再度增强(20日08时达 $-492.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$,中心在 $40^\circ\text{N}, 112^\circ\text{E}$);20日20时继续东移增强达 $-748.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$,中心在 $(40^\circ\text{N}, 120^\circ\text{E})$;21日后逐渐减弱东移入海.相应地,沙尘暴首先于18日20时在新疆北部国境线以北生成,于19日08时影响甘肃河西中北部,然后迅速横扫中国北方大部于19日20时到达东北,20~21日整个华北、东北处于大风沙尘暴中,21日08时沙尘南下到达韩国,22日05时沙尘完全移出我国,如图9.

2003年7月20日上午南疆盆地出现扬沙,其东部及青藏高原北部出现8~9级大风,下午至夜间河西走廊六站出现了近10年来少见的区域性夏季大风沙尘暴天气过程, $(30^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}, 80^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{E})$ 最小水平螺旋度值由08时的 $-389.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 中心在 $(40^\circ\text{N}, 88^\circ\text{E})$ 减弱东移为20时的 $-211.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 中心在 $(40^\circ\text{N}, 92^\circ\text{E})$ (图略).

5.2 水平螺旋度与沙尘暴强度的对应关系

通过计算2002~2006年春季3~5月共448个个例逐日08时 $40^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}, 90^\circ\text{E} \sim 105^\circ\text{E}$ 范围内的最小水平螺旋度值,与河西走廊东部沙尘天气实

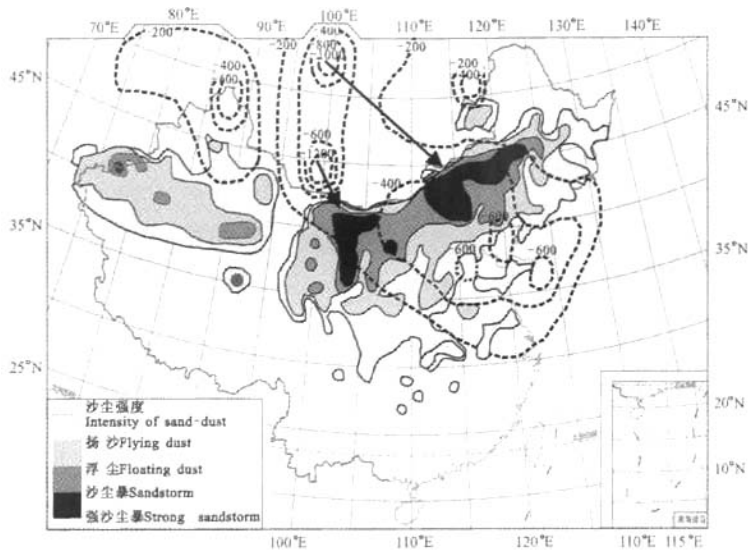


图 8 中国北方区域 2002 年 3 月 18~22 日强沙尘暴天气过程沙尘暴强度
与其对应水平螺旋度的负值中心等值线对比图

箭头表示 $< -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 水平螺旋度负值中心对应的强沙尘暴区域。

Fig. 8 Comparison between sandstorm occurring intensity of one strong sandstorm weather process and its minimum horizontal helicity values during Mar. 18~22, 2002 in northern China
Arrow shows horizontal helicity negative value centers of less than $-1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ point at strong sandstorm occurring areas.

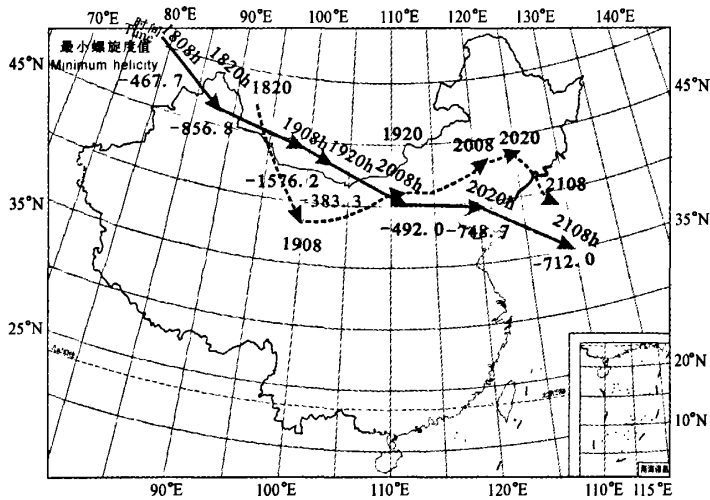


图 9 2002 年 3 月 18~21 日我国北方的一次强沙尘暴天气过程
间隔为 12 小时的最大负值水平螺旋度中心(实线, h 为北京时间)和沙尘暴锋移动路径(虚线)。

Fig. 9 Maximum negative horizontal helicity value centers (solid line, h is time of Beijing) and sandstorm front (dashed line) moving tracks of one strong sandstorm weather process every 12 hours during Mar. 18~21, 2002 in northern China

况进行对应分析,找出沙尘暴强度与水平螺旋度负值中心的关系,见图 10.

从图 10 分析知,当水平螺旋度负值中心 $\leq -1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时,其下游出现强沙尘暴的概率是

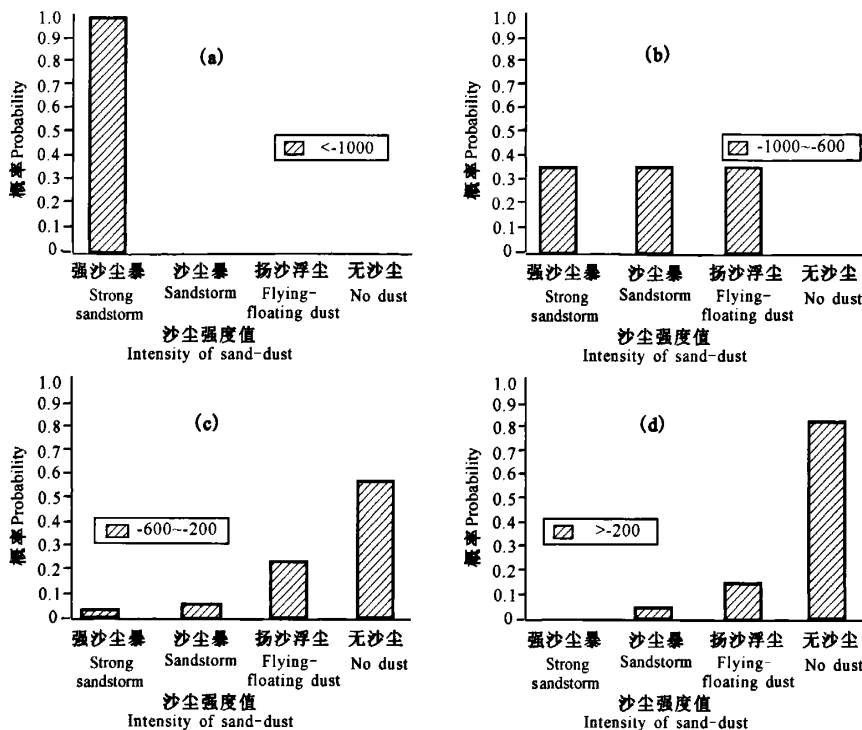


图 10 河西走廊东部($40^{\circ}N \sim 50^{\circ}N, 90^{\circ}E \sim 105^{\circ}E$)2002~2006 年春季 3~5 月逐日 08 时不同沙尘强度天气在最小水平螺旋度范围值中出现的概率分布图

Fig. 10 Occurring probabilities of sand-dust intensities in various minimum helicity values at daily 08h in spring of 2002~2006 over east of Hexi Corridor($40^{\circ}N \sim 50^{\circ}N, 90^{\circ}E \sim 105^{\circ}E$)

100%;在 $-1000 \sim -600 m^2/s^2$ 之间时,强沙尘暴、一般沙尘暴和沙尘出现在下游处的概率各占 33.3%;在 $-600 \sim -200 m^2/s^2$ 之间时,强沙尘暴、一般沙尘暴发生的概率分别是 5.3%和 7.9%,无沙尘概率接近 65%;在 $-200 m^2/s^2$ 以上时沙尘暴发生的概率不足 4%,无沙尘概率接近 84%。以上说明水平螺旋度负值中心越大,沙尘暴出现的可能性越大,强度越强,但在实际预报中需要与高空冷温槽中冷空气和大风的强度、地面冷锋前后 3 小时变压差、地表干旱和植被状况配合综合判断。在 2001~2006 年长期的预报中发现当水平螺旋度负值中心 $\leq -1000 m^2/s^2$ 时,其下游有三站以上区域性特强沙尘暴(黑风)发生,概率为 100%。

6 结 论

水平螺旋度值与高低层风速呈指数分布,随着水平螺旋度绝对值的增大,风速增大,旋转角度加大,高低空垂直风速切变越大,辐合辐散加强。负值水平螺旋度越大,相应的近地面层风速越大,西风增

强,垂直风切变越强,逆时针旋转辐合上升运动越强。

负值水平螺旋度与沙尘暴的关系较为密切,水平螺旋度负值中心越大,表明该区近地面层风速越大,高低空垂直风切变大,辐合上升运动越强,因而沙尘暴越强。而其负值中心常常在河西走廊附近最强,而河西走廊东部的民勤县是我国沙尘暴天气发生最多、强度最强的地方,这在天气意义上揭示了河西走廊东部是我国四大沙尘暴策源地之一的重要原因。

沙尘暴多发生在水平螺旋度负值中心的下游东南方,当有 $\leq -200 m^2/s^2$ 水平螺旋度中心时,未来 24 小时内该区下游将有沙尘天气出现;当有 $\leq -600 m^2/s^2$ 水平螺旋度中心时,6 小时内该区下游将有能见度小于 500 m 的强沙尘暴天气出现;当有 $\leq -1000 m^2/s^2$ 水平螺旋度中心时,700 hPa 风速达 30 m/s 左右,6 小时内该区下游将有能见度小于 50 m 的特强沙尘暴(黑风)天气出现。

审图号 GS(2006)2125 号。

参考文献(References)

- [1] 李岩瑛,李耀辉,罗晓玲等.河西走廊东部沙尘暴预报方法研究.中国沙漠,2004,24(5):607~610
Li Y Y, Li Y H, Luo X L, et al. Study on forecasting methods of sand-dust storm in east of Hexi Corridor. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2004, 24(5):607~610
- [2] 钱正安,蔡英,刘景涛等.中蒙地区沙尘暴研究的若干进展.地球物理学报,2006,49(1):83~92
Qian Z A, Cai Y, Liu J T, et al. Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2006, 49(1):83~92
- [3] 岳虎,王锡稳,李耀辉.甘肃强沙尘暴个例分析研究(1955—2002).北京:气象出版社,2003年9月
Yue H, Wang X W, Li Y H. Gansu Strong Sandstorm Typical Process Analysis and Research(1955~2002) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003, 9
- [4] 周秀骥,徐祥德,颜鹏等.2000年春季沙尘暴动力学特征.中国科学(D辑),2002,32(4):327~334
Zhou X J, Xu X D, Yan P, et al. Dynamical properties of sandstorm in spring of 2000. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2002, 32(4):327~334
- [5] 范可,王会军.北京沙尘频次的年际变化及其全球环流背景分析.地球物理学报,2006,49(4):1006~1014
Fan K, Wang H J. Interannual variability of dust weather frequency in Beijing and its global atmospheric circulation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4):1006~1014
- [6] Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43:126~140
- [7] Woodall G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm-relative environmental helicity. In: Preprint, 16th Conference on Severe Local Storm. 1990. 311~315
- [8] Davies-Jones R, Donald Burgess. Test of helicity as tornado forecasting parameter. In: Preprint, 16th Conference on Severe Local Storm. 1990. 588~593
- [9] 黄勇,张晓芳,陆汉城.平均螺旋度在强降水过程中的诊断分析.气象科学,2006,26(2):171~176
Huang Y, Zhang X F, Lu H C. Diagnosis of a heavy rain by use of average storm-relative helicity. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, 26(2):171~176
- [10] 杨越奎,刘玉玲,万振奎等.“91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析.气象学报,1994,52(3):379~384
Yang Y K, Liu Y L, Wan Z S, et al. Analysis on helicity of “91.7” MeiYu front rainstorm. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, 52(3):379~384
- [11] 赵光平,王连喜,杨淑萍.宁夏区域性沙尘暴短期预报系统.中国沙漠,2001,21(2):178~183
Zhao G P, Wang L X, Yang S P. Ningxia regional sandstorm short-term forecast system. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2001, 21(2):178~183
- [12] 陶健红,王劲松,冯建英.螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用.中国沙漠,2004,24(1):83~87
Tao J H, Wang J S, Feng J Y. Applying of helicity in analysis of a severe sandstorm. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2004, 24(1):83~87
- [13] 王劲松,李耀辉,康凤琴等.“4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析.高原气象,2004,23(1):89~96
Wang J S, Li Y H, Kang F Q, et al. Numerical simulation and diagnose analysis on “4.12” sandstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, 23(1):89~96
- [14] 申红喜,李秀连,石步鸠.北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析.气象,2004,30(2):12~16
Shen H X, Li X L, Shi B J. Comparison with two sandstorm weather processes in Beijing. *Meteorology* (in Chinese), 2004, 30(2):12~16
- [15] 张海霞,尤凤春,周伟灿等.强沙尘暴天气形成机制个例分析.气象科技,2007,35(1):101~106
Zhang H X, You F C, Zhou W C, et al. Dynamical and thermodynamic mechanisms of a severe dust storm. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2007, 35(1):101~106
- [16] 王建鹏,沈桐立,刘小英等.西北地区一次沙尘暴过程的诊断及地形影响的模拟试验.高原气象,2006,25(2):259~267
Wang J P, Shen T L, Liu X Y, et al. Diagnosing analyses and topography simulation of a sand-dust storm event in northwest China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, 25(2):259~267
- [17] 陆慧娟,高守亭.螺旋度及螺旋度方程的讨论.气象学报,2003,61(6):684~691
Lu H J, Gao S T. On the helicity and the helicity equation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 61(6):684~691
- [18] 岳平,牛生杰,张强.民勤一次沙尘暴天气过程的稳定度分析.中国沙漠,2007,27(4):668~671
Yue P, Niu S J, Zhang Q. Analysis on stability of a sand-dust storm weather in Minqin station. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2007, 27(4):668~671
- [19] 李岩瑛,杨晓玲,王式功.河西走廊东部近50a沙尘暴成因、危害及防御对策.中国沙漠,2002,22(3):283~286
Li Y Y, Yang X L, Wang S G. The cause, disaster and countermeasure of sandstorm in the east of Hexi Corridor during the later 50 years. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2002, 22(3):283~286
- [20] 王式功,王金艳,周自江等.中国沙尘天气的区域特征.地理学报,2003,58(2):193~200
Wang S G, Wang J Y, Zhou Z J, et al. Regional characteristics of dust events in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, 58(2):193~200
- [21] 赵兴梁.甘肃特大沙尘暴的危害与对策.中国沙漠,1993,13(3):1~5
Zhao X L. The disaster and countermeasure of super sandstorm in Gansu Province. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1993, 13(3):1~5
- [22] 张小曳,沈志宝,张光宇等.青藏高原远源西风粉尘与黄土堆

- 积. 中国科学(D辑), 1996, **26**(2): 147~153
- Zhang X Y, Shen Z B, Zhang G Z, et al. Remote source westerly powder and loess deposit over Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 1996, **26**(2): 147~153
- [23] Iwasaka Y, Minoura H, Nagaya K. The transport and special scale of Asian dust-storm clouds; a case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, 1983, **35B**: 189~196
- [24] 刘红年, 蒋维楣. 沙尘表面非均相化学过程的气候效应的初步模拟研究. 地球物理学报, 2004, **47**(3): 417~422
- Liu H N, Jiang W M. A preliminary study on the heterogeneous chemical processes on the dust surface and their effect on climate. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(3): 417~422
- [25] Maddox. An evaluation of tornado proximity wind and stability data. *Mon. Wea. Rev.*, 1976, **104**: 133~142
- [26] 刘 飞, 何金海, 姜爱军. 亚洲夏季西风指数与中国夏季降水的关系. 南京气象学院学报, 2006, **29**(4): 517~525
- Liu F, He J H, Jiang A J. Relationship between Asian summer westerly wind index and summer rainfall in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2006, **29**(4): 517~525
- [27] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2002 年 3 月 20 日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟. 干旱区资源与环境, 2004, **18**(1): 72~79
- Zhao L N, Sun J H, Zhao S X. Numerical simulation of synoptic background, sources emissions and transport of dust storms during 20 March, 2002 in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 2004, **18**(1): 72~79
- [28] 孙业乐, 庄国顺, 袁 惠等. 2002 年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析. 科学通报, 2004, **49**(4): 340~346
- Sun Y L, Zhuang G S, Yuan H, et al. Analysis on one very strong sandstorm's physic-chemical characteristics and its components resources of Beijing in 2002. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49**(4): 340~346
- [29] 盛立芳, 耿 敏, 王园香等. 2002 年春季沙尘暴对青岛大气气溶胶的影响. 环境科学研究, 2003, **16**(5): 11~13
- Sheng L F, Gen M, Wang Y X, et al. Effects of dust storms on atmospheric aerosols in Qingdao in Spring 2002. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2003, **16**(5): 11~13

(本文编辑 何 燕)