

文章编号: 1000-694X(2004)01-0083-05

# 螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用

陶健红<sup>1</sup>, 王劲松<sup>2</sup>, 冯建英<sup>2</sup>

(1. 南京气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 利用 NCEP/NCAR 每日 4 次全球再分析网格点资料, 对发生在中国西北的一次强沙尘暴进行了螺旋度的诊断分析. 结果表明: 螺旋度作为强对流天气分析预报中的一个重要物理量, 在沙尘暴的预报中同样具有很好的指示意义. 沙尘暴区上空螺旋度垂直分布为高层负值, 低层正值. 高层螺旋度负值的演变与沙尘暴的出现有一定的对应关系.

**关键词:** 螺旋度; 西北地区; 沙尘暴

**中图分类号:** P445.4

**文献标识码:** A

与历史同期相比, 2000 年是我国春季沙尘暴天气发生时间早、频率高、范围广、强度大的一年. 沙尘暴天气是一种严重的灾害性天气现象, 它的发生不仅给工农业生产、交通运输带来危害, 而且还造成严重的大气污染, 威胁到人们的生存环境. 因而迫切需要对沙尘暴天气进行研究, 搞清影响其发生发展的因子, 从而可为预报沙尘暴提供一定的参考依据, 尽可能最大限度的降低其危害. 国外在 20 世纪 20 年代就开始了沙尘暴的研究, 1925 年 Sutton 报道了北非沙尘暴的若干特征, 之后 Idso 又报道了美国亚利桑那州西南部强沙尘暴的特征, Brazel 进一步总结了该州多年来发生的沙尘暴的天气类型<sup>[1]</sup>. 我国对沙尘暴的研究从 20 世纪 70 年代后期开始, 徐国昌等<sup>[2]</sup>对 1977 年 4 月 22 日张掖地区的西风型强沙尘暴天气进行了分析, 着重研究了热力因子在黑风过程中的重要作用, 并提出了黑风预报的着眼点; 80 年代, 高凤荣等<sup>[3]</sup>对甘肃河西地区东风气流中产生的典型沙尘暴个例作过研究, 得出了一些有别于西风型沙尘暴天气过程的分析结果; 90 年代, 王式功<sup>[4]</sup>、陈伟民<sup>[5]</sup>、徐建芬<sup>[6]</sup>、张玉林<sup>[7]</sup>等先后对西北地区沙尘暴天气个例作了分析. 这些研究结果普遍强调了中尺度天气系统在沙尘暴形成中的重要作用, 指出了沙尘暴天气的发生往往与强对流相伴随. 因而, 对强对流天气的分析是沙尘暴预报中的一个着眼点. 螺旋度作为强对流天气分析预报中的一个重要物理量, 虽然在暴雨的研究中已有了广泛的应用<sup>[8~12]</sup>, 但在沙尘暴的研究中却应用得很少, 对有关螺旋度的特征分析, 至今尚未有过详细研究. 赵光

平等<sup>[13]</sup>指出螺旋度在沙尘暴预报中的重要作用在于刻画激发中- $\alpha$  尺度干胞线典型物理量的空间结构, 从而对沙尘暴发生发展的落区有很好的指示性. 可见, 通过对螺旋度特征的细致分析, 可以对预报沙尘暴的发生发展起重要作用, 因而对螺旋度的研究就显得十分必要. 本文选取 2000 年春季发生的一次最强沙尘暴, 即“4. 12”沙尘暴, 通过对这次强沙尘暴螺旋度结构特征的分析, 试图找出螺旋度在沙尘暴发生中所起到的关键作用.

## 1 强沙尘暴概况

4 月 12 日下午到夜间, 张掖、金昌、武威、乌鞘岭、白银等地市先后出现了 7 级以上大风, 最大风速  $28 \text{ m s}^{-1}$ . 沙尘暴发生的具体情况为: 4 月 12 日 13 时 42 分(北京时, 下同)到 21 时 02 分, 甘肃省河西走廊、白银市先后出现大风和沙尘暴天气. 16 时 43 分到 19 时 18 分, 永昌、金昌、武威、民勤、古浪和乌鞘岭出现了强沙尘暴, 其中, 金昌瞬间最大风速达  $25 \text{ m s}^{-1}$ , 乌鞘岭  $28 \text{ m s}^{-1}$ , 能见度 0 m, 达到了黑风标准<sup>[14]</sup>. 这是 2000 年最强的一次沙尘暴天气. 另外, 在甘肃中部、陇东地区出现了扬沙和浮尘天气(表 1).

4 月 11 日 20 时, 东欧至亚洲大陆 500 hPa 高空环流呈两脊一槽型, 乌拉尔山为阻塞高压, 新疆处于长波槽中, 我国的东北地区为一较弱的脊控制. 沙尘暴过程发生前后, 由于阻高和长波槽的调整, 引导了脊前西西伯利亚强冷空气的南下, 并导致了长波槽的加深东移. 地面冷锋在 4 月 12 日 14 时位于老东

收稿日期: 2003-05-08; 改回日期: 2003-06-11

基金项目: 中国科技部项目“西北干旱区沙尘暴预警、服务系统研究”之子专题“沙尘暴短期综合预报方法及业务化研究”

作者简介: 陶健红(1968—), 男(汉族), 甘肃临夏人, 高级工程师, 主要从事中尺度天气和干旱气候研究. E-mail: taojh@gsma.gov.cn

庙、酒泉、格尔木附近. 沙尘暴发生在脊前长波槽底部、地面冷锋前部的区域.

表 1 一次强沙尘暴天气概况

Tab. 1 Survey about a strong sandstorm weather

强沙尘暴 发生时间	强沙尘暴 发生地	风速 /(m s <sup>-1</sup> )	能见度 /m
13: 42	肃南(38. 5°N, 99. 4°E)	20	400
14: 26	张掖(38. 6°N, 100. 3°E)	21	400
15: 01	民乐(38. 3°N, 100. 4°E)	21	—
15: 52	山丹(38. 5°N, 101. 1°E)	—	400
16: 43	永昌(38. 2°N, 102. 1°E)	19	0
16: 49	金昌(38. 3°N, 102. 2°E)	25	0
17: 50	武威(37. 6°N, 102. 4°E)	17	0
18: 08	民勤(38. 4°N, 103. 1°E)	22	0
18: 31	古浪(37. 3°N, 103. 0°E)	20	0
19: 18	乌鞘岭(37. 1°N, 103. 1°E)	28	0
20: 09	景泰(37. 1°N, 104. 1°E)	18	300
20: 55 ~ 21: 02	白银(36. 4°N, 104. 1°E)	23	100

前期西北地区降水稀少, 土质干燥疏松, 为沙尘暴的发生提供了沙源, 这是有利于此次沙尘暴爆发的主要气候背景. 在具备沙源的情况下, 当有冷锋经过时, 冷锋后强劲的风力有利于将地面沙尘卷入空中.

2 螺旋度

螺旋度是强对流天气分析预报中的一个重要物理量, 是一个用于衡量环境风场具有多少沿气流方向的水平涡度及其贡献的参数<sup>[15]</sup>, 是一个反映动力条件的物理参数. 即是用来描述大气运动在其旋转轴方向的运动强弱或运动方向的程度的参数.

螺旋度严格的定义式为风速与涡度点积的体积分<sup>[8]</sup>:

$$H = \iiint \vec{V} \cdot (\nabla \times \vec{V}) d\tau$$

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. 其单位为 m s<sup>-2</sup>.

Z 坐标系下的局地螺旋度可表示为:

$$\begin{aligned} H &= \vec{V} \cdot (\nabla \times \vec{V}) \\ &= \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)u + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)w \end{aligned}$$

上式右端三项分别与 x, y, z 方向的涡度分量和风速相联系, 可称之为 x-螺旋度, y-螺旋度, z-螺旋度. 文献[8]的研究指出, z-螺旋度较之 x-螺旋度和 y-螺旋度有更为清楚和重要的意义, 本文中仅讨论 z-螺旋度, 重新定义局地螺旋度为:

$$H_k = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)w = \xi w$$

3 螺旋度分布特征分析

根据表 1 中强沙尘暴发生的区域, 选取范围 34. 5° ~ 43°N, 99. 5° ~ 105. 5°E, 在这一区域中计算螺旋度. 由表 1 可知强沙尘暴发生的时间约在 14 时到 21 时, 所采用的资料的 4 个时次分别是 02 时、08 时、14 时和 20 时. 根据以上所描述的强沙尘暴发生的时间, 并结合资料的 4 个时次来考虑, 下面选取 12 日 08 时、14 时、20 时和 13 日 02 时的资料来进行计算分析, 其中 12 日 08 时代表了沙尘暴发生前、14 时和 20 时代表了沙尘暴发生时、13 日 02 时代表了沙尘暴减弱时的情况.

3.1 沙尘暴区上空螺旋度的垂直分布

图 1 是沿强沙尘暴区中心所在经度(103° E)作的螺旋度的经向垂直剖面图. 图 1 中 a 至图 1 中 d 分别是 12 日 08 时、14 时、20 时和 13 日 02 时的螺旋度垂直分布情况, 从图中可看出, 20 时(图 1 中 c), 在沙尘暴爆发区上空螺旋度的绝对值达到最大, 这与最强沙尘暴发生的时间(19: 18)是基本一致的. 14 时(图 1 中 b)和 20 时两个时次螺旋度的垂直分布均呈明显的上负下正的形式. 14 时, 在 600 hPa 以上为负值区, 最大负值中心位于 400 hPa, 600 hPa 以下为正值区. 20 时, 上下层正负值区的分界层有所抬高, 位于 550 hPa, 最大负值中心位于约 300 hPa. 从沙尘暴发生前的 08 时(图 1 中 a)来看, 螺旋度的垂直分布值则较小. 而从沙尘暴减弱时的 13 日 02 时(图 1 中 d)来看, 尽管螺旋度的垂直分布值, 尤其是低层的正螺旋度值较大, 但在沙尘暴发生区上空螺旋度上负下正的分布形式则不明显. 可见, 在沙尘暴发生前和减弱时, 或者螺旋度的垂直分布值较小, 或者没有形成螺旋度明显的上负下正的分布形式.

由沿强沙尘暴区中心所在纬度作的螺旋度的纬向垂直剖面图(图略), 也可看出在沙尘暴发生时, 上述强沙尘暴区上空螺旋度呈上负下正的分布特点.

配合 20 时强沙尘暴区上空垂直速度和涡度的垂直廓线(图 2)可以看出在沙尘暴区的上空基本为整层的上升运动(w > 0, 除 200 hPa 以上高度 w 在 0 线附近外), 因此与正的螺旋度(H<sub>k</sub> > 0)对应的将是正涡度(ξ > 0); 与负的螺旋度(H<sub>k</sub> < 0)对应的将是负涡度(ξ < 0).

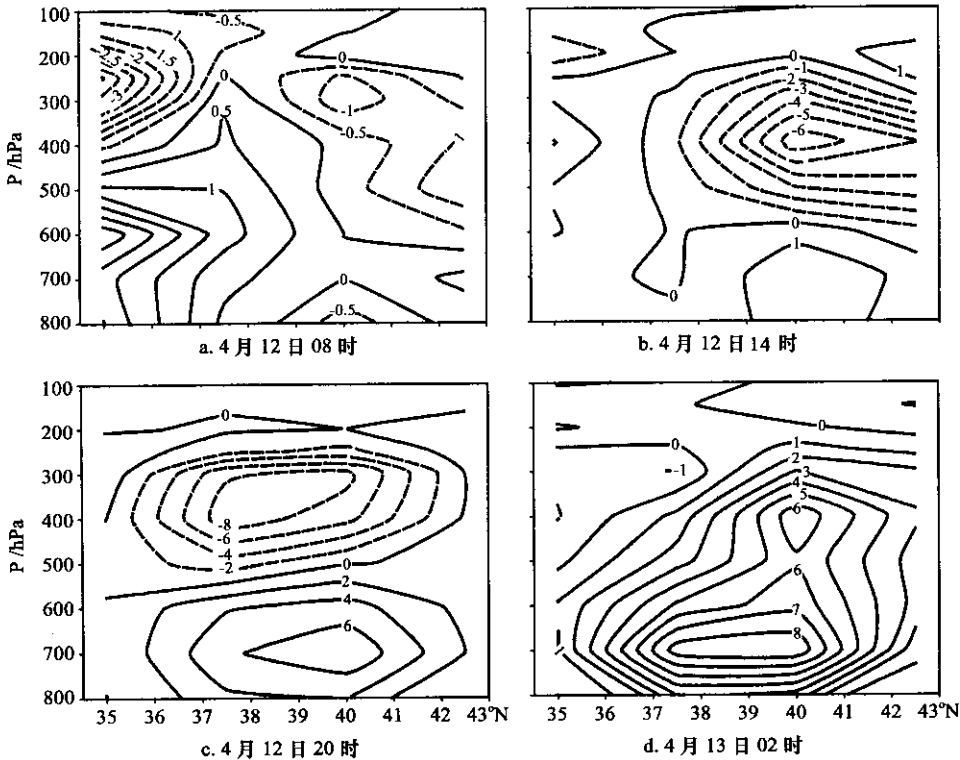


图1 沿强沙尘暴区中心所在经度(103°E)螺旋度(  $\times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$  )的经向垂直剖面图  
Fig. 1 The meridional vertical section of Helicity(  $\times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$  ) along 103° E through the center of strong sandstorm area

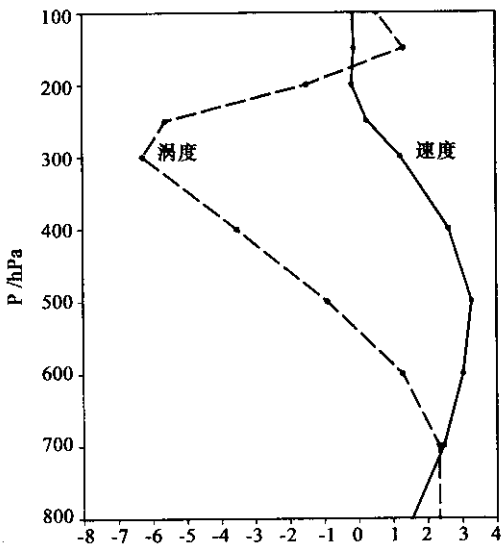


图2 4月12日20时强沙尘暴区上空垂直速度(  $\times 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$  )和涡度(  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  )的垂直廓线  
Fig. 2 The outline of vertical velocity (  $\times 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$  ) and vorticity(  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  ) over the center of strong sandstorm area for 20:00 in 12th April

以上分析表明, 沙尘暴发生区上空螺旋度的垂直分布特征是在对流层下层为正值区(对应气旋式涡度区), 对流层中上层为负值区(对应反气旋式涡度区), 这种垂直结构十分有利于对流系统的发展,

对形成沙尘暴这样的中尺度天气系统而言, 构成了低空强辐合、高空强辐散的深厚上升运动区, 因而图1中b和图1中c所示的这种螺旋度垂直分布是十分有利于沙尘暴发展的一种形式.

3.2 沙尘暴区附近螺旋度的水平分布

图3中a至图3中d分别给出了12日08时、14时、20时和13日02时沙尘暴区上空300 hPa螺旋度的分布情况. 从图中看出, 14时(图3中b), 螺旋度的最大负值中心(40.0°N, 102.5°E)位于强沙尘暴区的西北侧, 强度为  $-3.8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ ; 而到了20时(图3中c), 螺旋度的绝对值为最大, 中心值为  $-8.4 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ , 中心移到了沙尘暴区上空附近, 沙尘暴区上空的螺旋度数值达  $-7.8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ . 高空螺旋度的较大负值区反映了高层的强烈辐散. 但从图3中a和图3中d可以看出, 在沙尘暴发生前和沙尘暴减弱时, 沙尘暴发生区附近的高空螺旋度值则很小, 还不足  $-1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ .

700 hPa螺旋度的分布情况是: 14时, 与实况分析的地面气压场中的中尺度低压(文献14中图1)相配合的是一螺旋度的正值区, 其值为  $5.5 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ , 但主体位于沙尘暴区的西北侧; 20时, 强的

螺旋度正值中心  $7.2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$  移近沙尘暴区, 这一螺旋度正值中心恰好与 20 时 700 hPa 低涡和地

面气旋中心<sup>[14]</sup>相对应, 反映了低层的强烈辐合.

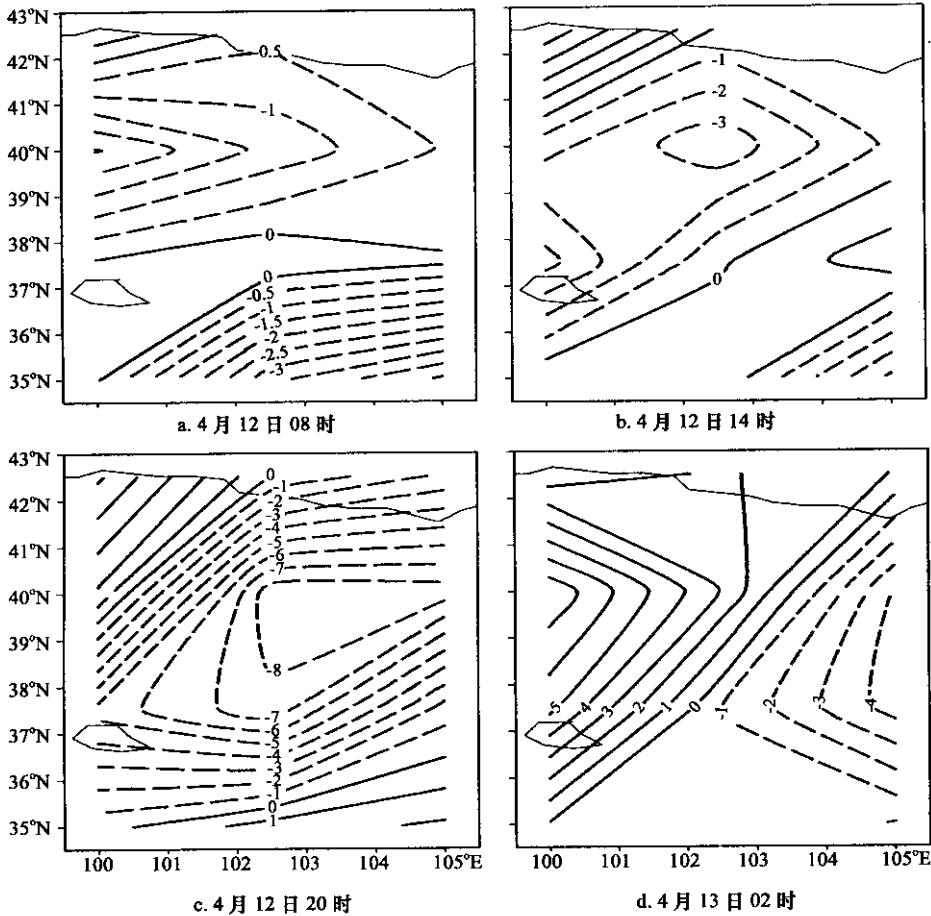


图3 沙尘暴区上空 300 hPa 螺旋度(  $\times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$  )分布

Fig. 3 Distribution of Helicity(  $\times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$  ) at 300 hPa over the sandstorm area

可见, 随着高低层螺旋度自西北向东南的发展、加强和移动, 强沙尘暴的发生、发展亦是与之相配合的, 显示了螺旋度作为一个反映动力参数的物理量, 在强沙尘暴预报中有一定的指示意义.

4 结论

(1) 沙尘暴区上空螺旋度的垂直分布为中高层负值, 低层正值. 随着正螺旋度的加强且高度抬高, 沙尘暴发展愈强烈. 高层螺旋度负值的演变与最强沙尘暴发生的时间基本一致.

(2) 螺旋度的水平分布特征则反映了强对流天气的位置, 同时与天气系统关系密切. 300 hPa 螺旋度的分布与沙尘暴的位置有很好的一致性, 且其绝对值的大小与沙尘暴发生前、发生时和减弱时的对应关系也很好, 经历了螺旋度绝对值由弱到强再到弱的过程; 700 hPa 的分布与引起沙尘暴的地面中尺度低压亦有很好的对应关系.

(3) 螺旋度反映了沙尘暴附近的动力场特征, 对其诊断计算的结果分析, 可为沙尘暴预报提供参考依据.

5 存在问题

由于资料的限制, 未能对大量沙尘暴个例的螺旋度进行分析. 作者认为对于受不同类型天气系统影响的沙尘暴个例, 在其螺旋度的垂直分布上, 高层负螺旋度区和低层正螺旋度区的分界层(本例约为 550 hPa)会不一样, 搞清这种关系, 对不同类型沙尘暴的预报十分有意义. 有关这一点, 在暴雨螺旋度的分析中已经有研究<sup>[10]</sup>, 但本文未能在沙尘暴的螺旋度分析中讨论到这一点, 这是下一步再收集资料后应做的工作.

参考文献(References):

[1] 丁一汇,王守荣.中国西北地区气候与生态环境概论[M].北京:气象出版社,2001.145-146.

[2] 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.

[3] 高凤荣,李云.甘肃河西“5.19”黑风分析[J].甘肃气象,1989,7(1):13-17.

[4] 王式功,杨德保,周玉素,等.我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨[J].中国沙漠,1995,15(4):332-338.

[5] 陈伟民,王强,牛志敏,等.中国西北部“4.5”沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟[J].中国沙漠,1996,16(2):140-144.

[6] 徐建芬,牛志敏,陈伟民,等.我国西北地区“4.5”沙尘暴天气研究[J].中国沙漠,1996,16(3):281-286.

[7] 张玉林,赵光平,杨淑萍.宁夏强沙尘暴形成机制的探索和研究[J].中国沙漠,1996,16(4):351-355.

[8] 杨越奎,刘玉玲,万振拴,等.“91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析[J].气象学报,1994,52(3):379-383.

[9] 吴宝俊,许晨海,刘延英,等.螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用[J].应用气象学报,1996,7(1):108-112.

[10] 杨晓霞,华岩,黎清才,等.螺旋度在暴雨天气分析与预报中的应用[J].南京气象学院学报,1997,20(4):499-504.

[11] 李耀辉,寿绍文.旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用[J].南京气象学院学报,1999,22(1):95-102.

[12] 谭志华,杨晓霞.“99.8”山东特大暴雨的螺旋度分析[J].气象,2000,26(9):7-11.

[13] 赵光平,王连喜,杨淑萍.宁夏区域性强沙尘暴短期预报系统[J].中国沙漠,2001,21(2):175-181.

[14] 王锡稳,李宗义,王宝鉴.4.12强沙尘暴中小尺度分析[J].甘肃气象,2001,19(2):27-30.

[15] 章东华.螺旋度—预报强风暴的风场参数[J].气象,1993,19(8):46-48.

Applying of Helicity in Analysis of a Severe Sandstorm

TAO Jian-hong<sup>1</sup>, WANG Jin-song<sup>2</sup>, FENG Jian-ying<sup>2</sup>

(1. Nanjing College of Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorology Administration, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** The helicity of a severe sandstorm happened in Northwest China was analyzed by using global reanalysis grid data of NCEP/NCAR for 4 times a day. As an important physical parameter in analyzing and predicting strong convective weather, the helicity also has good indication in the forecasting of sandstorm. The distribution of helicity over the sandstorm area was negative at higher levels and positive at lower levels. There was definite relationship between the evolvement of helicity’s negative value at higher levels and the occurrence of sandstorm.

**Key words:** helicity; Northwest China; sandstorm