

中国北方强沙尘暴活动与亚洲地区对流层风场的联系

杨续超^{1,2} 刘晓东¹

1 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 利用1979~2002年中国北方春季典型强沙尘暴日数序列和亚洲地区等压面及地面以上10 m高度风场资料, 分析了北方春季强沙尘暴活动与同期各层风场的关系。研究结果表明, 近24年我国北方春季强沙尘暴日数与西西伯利亚地区(51~61°N, 67~97°E)各层春季风速之间存在很高的正相关, 其中与600 hPa风速相关最高, 但与强沙尘暴多发区(37~45°N, 81~118°E)局地风速相关却很低。将600 hPa距平风场与强沙尘暴序列做线性回归分析发现, 当我国北方春季沙尘暴活动较频繁时, 蒙古国东北部产生气旋式距平环流, 从而在其后部会产生大风, 横扫我国北方大部分地区。通过近24年西西伯利亚地区日距平风速与我国北方春季强沙尘暴事件的逐日对比发现, 78%的强沙尘暴发生3天前西西伯利亚地区有异常大风出现。因此, 该地区风速可以作为我国北方地区强沙尘暴天气短期预报的一个预警指标。

关键词 中国北方 强沙尘暴 西西伯利亚 风场 相关系数

文章编号 1006-9585 (2006) 01-0094-07 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

The Relationship Between Severe Dust Storms of Northern China and the Asian Tropospheric Wind Field

YANG Xu-Chao^{1,2} and LIU Xiao-Dong¹

1 *Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075*

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract Using gridded upper-air and surface wind data extracted from the NCEP/DOE reanalysis-2 project and the time series of severe dust storms occurred over northern China in spring from 1979 to 2002, the relationship between the severe dust storm frequency and the Asian tropospheric wind field is examined. Three major findings are as follow. 1) The western Siberia (51—61°N, 67—97°E) is found to be a key area, where the upper-level wind speeds are significantly and positively correlated with the spring severe dust storms of northern China, with the strongest correlation at 600 hPa. However, the correlation of the dust storm frequency with the local wind speed is low. 2) According to linear regression analyses between the time series of severe dust storms and anomaly wind fields at 600 hPa and 700 hPa levels, there is an anomalous cyclone in western Mongolia when severe dust storms occur in northern China. It is the strong wind behind the cyclone that sweeps northern China, eventually leading to severe dust storms. 3) Composite analyses of the daily anomaly percentage of wind speed in western Siberia on the basis of severe dust storm events shows that dust storm events of northern China are closely related the preceding strong wind in western Siberia. Therefore the wind speed in western Siberia can be used as an important predictor

收稿日期 2004-08-23 收到, 2005-08-02 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 G2000048703、2004CB720208 和科技部基础研究专项 2003CCC01500 以及国家自然科学基金金资助项目 40121303

作者简介 杨续超, 男, 1980 出生, 在读硕士研究生, 主要从事中国沙尘暴活动与环境变化关系的分析研究。

E-mail: yangxc@ieecas.cn

for short-term forecast of the Chinese dust storm events.

Key words Northern China, severe dust storms, western Siberia, wind field, correlation

1 引言

沙尘暴是沙漠及其邻近地区特有的一种灾害性天气，既是土地荒漠化发展到一定程度的体现，也是一种加速荒漠化的重要过程。同时满足瞬时风速 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、能见度 $\leq 200 \text{ m}$ 者为强沙尘暴^[1]。与一般的沙尘天气相比，强沙尘暴发展迅速，风力大，能见度低，含尘量高，破坏性强，能在很短时间内给生态环境和人类社会造成严重损失。因此，强沙尘暴的形成机理、天气气候背景及预警预报方法是沙尘暴研究的重点。尚可政等^[2]发现春、夏季河西走廊沙尘暴发生次数与前2年赤道中、东太平洋海温有较好相关。叶笃正等^[3]的研究表明亚洲冬季风与 El Niño 事件有紧密联系，La Niña 事件期间北方由寒潮大风引起的强沙尘天气出现频繁，而 El Niño 事件期间的强沙尘天气出现较少。Yoshino^[4]则认为全球变暖导致高纬地区冷锋入侵减弱，使得中国西北一些地区沙尘暴减少。最近，杨续超和刘晓东^[5]的研究发现，中国北方春季强沙尘暴活动与东亚中纬度地区前一年夏季降水有着紧密联系。

强风是沙尘暴产生最直接的动力条件。关于风对沙尘暴活动的影响，前人已经做过不少工作^[6~12]，但过去的研究多限于局域性分析。本文将利用周自江和章国材^[13]根据 1954~2002 年全国 681 个基本气象站的逐日观测资料整理的典型强沙尘暴事件资料，以及美国国家环境预报中心 (NCEP) 和美国能源部 (DOE) 提供的日平均等压面风场和地面以上 10 m 高度风场再分析资料^[14] (NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis-2) 讨论高空不同层次大尺度风场与中国北方春季强沙尘暴活动的关系。文中仅考虑了两种资料共有的 1979~2002 年这一时段。由于中国北方强沙尘暴多发生于春季 3~5 月，本文从中选取 1979~2002 年中国北方春季典型强沙尘暴事件，得到近 24 年春季强沙尘暴日数时间序列（以下简称沙尘暴序列）。日平均等压面风场水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，日平均地面以上 10 m 高度风场为高斯网

格，平均水平分辨率为 $1.9^\circ \times 1.9^\circ$ 。由于沙尘暴主要出现在对流层中下层^[15,16]，本文只讨论 300 hPa（约 9 000 m）以下风场与沙尘暴活动的关系。

2 春季风场与强沙尘暴活动的年际变化

2.1 与强沙尘暴活动高相关的风速关键区

从沙尘暴序列与不同层次 1979~2002 年春季每个网格点平均风速求相关获得的相关系数分布（图 1）可以看到，各层的高相关区都位于俄罗斯的西西伯利亚地区，从上至下各层风场的高相关区逐渐向东南方向移动至蒙古国境内。基于这一相关分析，我们发现西西伯利亚一带（ $51^\circ \sim 61^\circ \text{N}$ ， $67^\circ \sim 97^\circ \text{E}$ ）的高空风速是影响中国北方强沙尘暴活动的关键地区（以下简称关键区）。而中国强沙尘暴的多发地区（ $37^\circ \sim 45^\circ \text{N}$ ， $81^\circ \sim 118^\circ \text{E}$ ）（以下简称多发区）则位于远离关键区的下游地区。

将风速关键区和沙尘暴多发区逐年各层春季平均风速分别做区域平均，并求与沙尘暴序列之间的相关系数（表 1）可以发现，关键区相关系数比多发区相关系数高得多，这说明中国北方的沙尘暴活动主要受大尺度天气系统的影响，对沙尘暴活动的研究不能只着眼于局地风与沙尘暴的关系。由于关键区的对流层高层风向与低层不完全一致，且沙尘主要分布在中低层^[15,16]，而受摩擦力影响近地面风速又不及中层大，因此表现出 600 hPa 关键区春季平均风速与沙尘暴序列相关系数最高（相关系数为 0.841，通过 0.001 显著性水平检验）。对比 1979~2002 年春季 600 hPa 关键区区域平均风速与沙尘暴日数的逐年变化（图 2），两者有很好的对应关系。沙尘暴多发区相关系数均不高，但由上至下逐渐增大，相比而言以 850 hPa 等压面相关最高。

2.2 与春季强沙尘暴相对应的对流层中层风场

鉴于 600 hPa 和 700 hPa 风速与强沙尘暴活动关系最为密切，故我们选取这两层风场进行分析。从 600 hPa（图 3a）和 700 hPa（图 3b）春季平均风场形势看，亚洲大陆北部对流层中层春季盛行

表 1 1979~2002 年春季风速关键区和沙尘暴多发区区域平均各层风速与沙尘暴序列间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the time series of severe dust storm frequency and upper-level wind speeds averaged for the key area and the frequent occurrence area during 1979—2002

	300 hPa	400 hPa	500 hPa	600 hPa	700 hPa	850 hPa	地面上 10 m 10 m over the ground
关键区 The key area	0.629**	0.729**	0.807**	0.841**	0.818**	0.628**	0.538*
多发区 The frequent occurrence area	-0.07	-0.029	0.045	0.149	0.283	0.341	0.236

**、* 分别表示相关性通过了 $\alpha=99.9\%$ 、 99% 的显著性水平检验
** indicates a confidence interval greater than 99.9%, * indicates a confidence interval greater than 99%

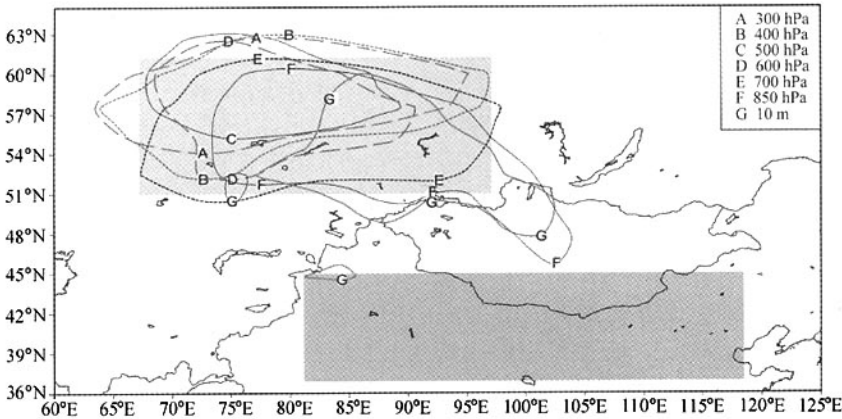


图 1 1979~2002 年各层春季平均风速与强沙尘暴序列相关系数分布 (图中只给出通过 99% 显著性水平检验的正相关区域, 上部阴影为关键区, 下部阴影为多发区)

Fig. 1 Spatial distribution of positive correlation coefficients between the time series of severe dust storm frequency and spring mean wind speeds at different layers for 1979—2002 (Only areas with positive correlation coefficients and confidence interval greater than 99% are shown. The upper shadow indicates the key area, the lower shadow indicates the frequent occurrence area)

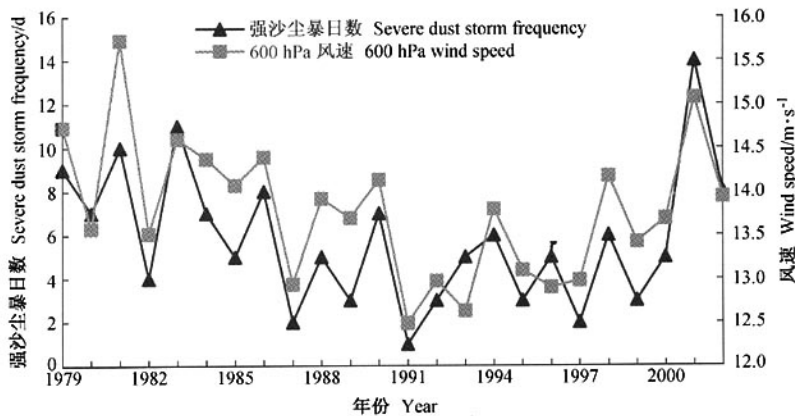


图 2 1979~2002 年春季 600 hPa 关键区区域平均风速与春季强沙尘暴日数的逐年变化

Fig. 2 Time series of the spring severe dust-storm frequency in northern China and the 600 hPa wind speed averaged for key area from 1979 to 2002

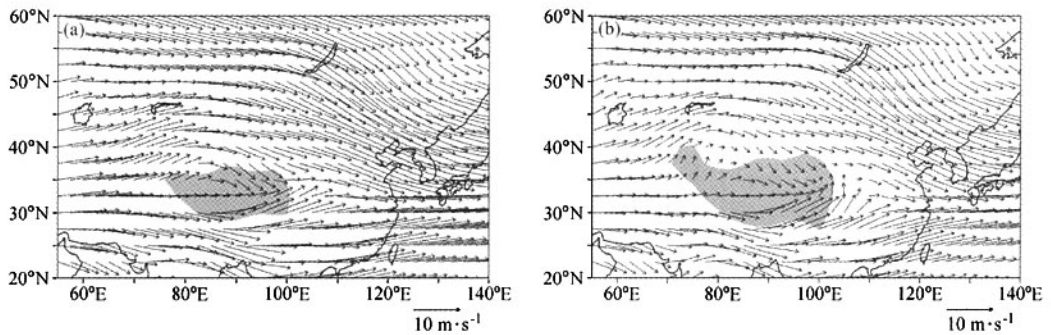


图 3 春季多年平均 600 hPa (a) 和 700 hPa (b) 风场 (图中阴影区表示地形高度超过等压面的青藏高原地区)

Fig. 3 Multi-year mean spring wind field at 600 hPa (a) and 700 hPa (b) (The shadow indicates the Tibetan Plateau higher than different height level)

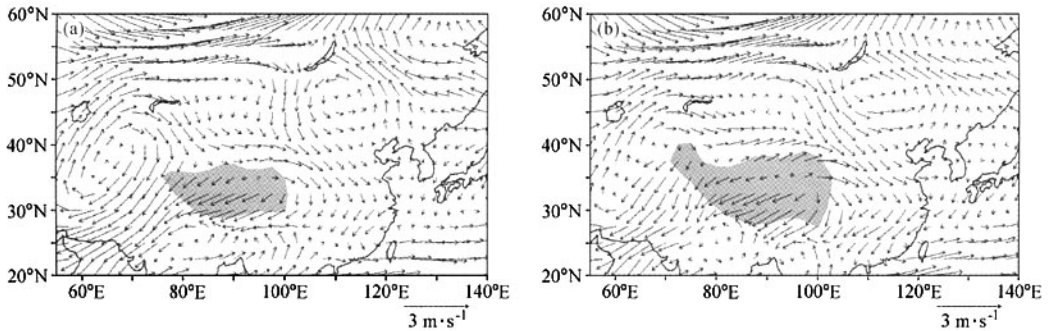


图 4 1979~2002 年春季 600 hPa (a) 和 700 hPa (b) 距平风矢量相对强沙尘暴日数的回归风场 (阴影区含义同图 3)

Fig. 4 Regressions of 600 hPa (a) and 700 hPa (b) wind anomalies with the number of severe dust storms during 1979–2002 springs (The shadow indicates the Tibetan Plateau higher than different height level)

西风, 但 600 hPa 风速一般比 700 hPa 大。图 4a、b 分别给出由 600 hPa 和 700 hPa 春季距平风场获得的在春季强沙尘暴日数为 12 天的情况下所对应的回归风场。具体作法是利用各格点距平风速 (包括经向风与纬向风速) 与强沙尘暴日数序列做线性回归, 得到各格点的回归系数, 然后取沙尘暴日数为 12, 计算得到对应的各格点距平风分量, 最后绘成图 4。由图 4 可见, 在与强沙尘暴活动相对应的春季距平风场上, 蒙古东北部有一个气旋式距平环流场出现, 在其后部会产生异常大风, 横扫中国北方大部分地区, 对强沙尘暴的产生极为有利。

3 风速与沙尘暴活动的年变化

由 1979~2002 年平均 600 hPa 关键区和沙

尘暴多发区风速与强沙尘暴日数的年变化 (图 5) 来看, 关键区 4 月平均风速为一个峰值, 与每年 4 月份强沙尘暴活动最活跃相吻合, 而沙尘暴多发区 4 月平均风速却没有相应的峰值, 这从多年平均年循环的角度也说明关键区强风活动与我国北方春季沙尘暴发生的可能联系。由图 5 还可以看到, 冬季 (11、12、1 月) 风速也很大, 但是冬季沙尘暴发生并不多, 这说明大风仅是引发沙尘暴的必要条件, 沙尘暴的发生还要受到地表状况等其他因素的影响。蒙古及中国北方降水集中于夏季, 降水异常增多可使土壤含水量增加, 由于土壤湿度的持续性可延续到春季, 从而使得下垫面状况不利于沙尘暴的产生^[17]; 另外蒙古及中国北方地区冬季温度较低, 地表冻结, 冰雪覆盖也是冬季沙尘暴活动较少的原因之一。

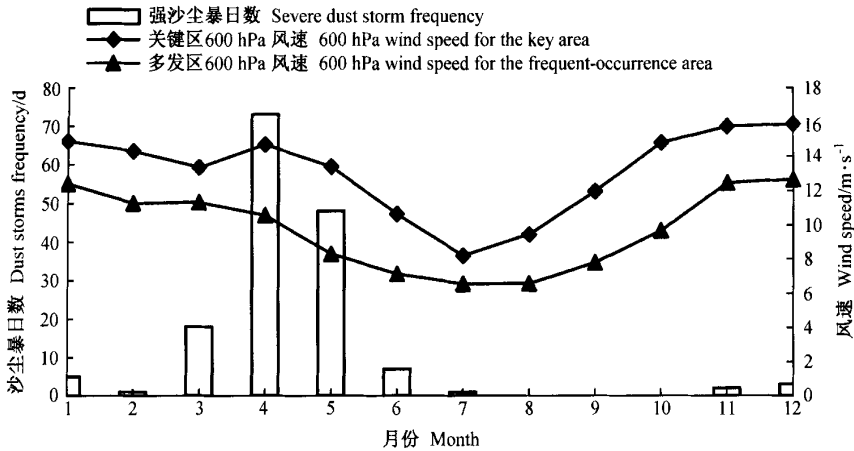


图 5 风速关键区和沙尘暴多发区区域平均 600 hPa 风速与强沙尘暴日数年变化

Fig. 5 Multi-year mean annual cycles of severe dust storm frequency and 600 hPa wind speeds averaged for the key area and the frequent-occurrence area

4 风速与沙尘暴逐日对比

将关键区 1979~2002 年 3~5 月中 92 天 600 hPa 逐日风速做区域平均, 求出逐年 92 天风速的距平百分率, 与周自江和章国材^[13]整理的近 24 年春季强沙尘暴事件作逐日对比后发现, 1979~2004 年春季有 86 次强沙尘暴发生, 其中 67 次沙尘暴发生当天, 或者前 1~3 天, 关键区会有异常大风出现 (距平百分率为正), 即中国北方春季 78% 的强沙尘暴发生前期, 关键区有大风出现。通过这 67 次沙尘暴事件前几日风速距平百分率的叠加分析 (图 6) 可以看到, 沙尘暴发生 3 天前关键区当日风速比当日多年平均风速大 26.4%, 这表明西西伯利亚地区的大风与我国北方地区的强沙尘暴天气有着较高的相关, 而且有着明显的先兆反映。因此, 西西伯利亚地区风速可以作为中国北方地区强沙尘暴天气短期预报的一个重要预警指标。

为了更直观地表现风速对我国北方强沙尘暴活动的影响, 我们选取了 7 次有代表性的强沙尘暴事件 (1981 年 5 月 30 日、1993 年 5 月 5 日、1998 年 3 月 17 日、1998 年 4 月 15 日、2001 年 3 月 21 日、2000 年 4 月 28 日、2001 年 4 月 2 日), 将这 7 次强沙尘暴事件前 3 天至当日这 4 天的距平风场求平均, 得到强沙尘暴发生前 600 hPa 距

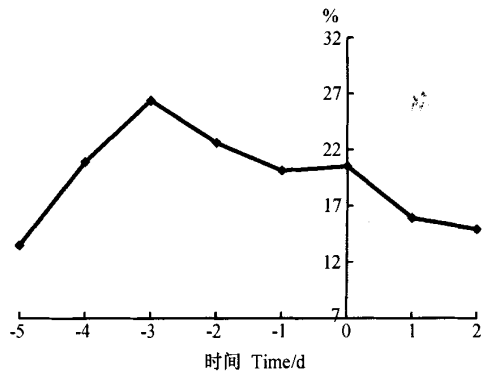


图 6 67 次强沙尘暴事件前后 7 日关键区风速平均距平百分率
Fig. 6 Composite percentages of wind speed anomalies for 67 severe dust storm events

平风场的合成分析图。由图可见, 在沙尘暴事件发生前 3 天, 西西伯利亚地区有气旋式距平大风出现 (图 7a), 并逐渐向东、向南 (图 7b、c) 移动, 经过蒙古西部到达我国境内, 最终引起了我国北方的强沙尘暴天气 (图 7d)。

5 结论与讨论

(1) 从中国北方 1979~2002 年春季沙尘暴序列与亚洲地区不同层次风速的相关系数分布看, 西西伯利亚地区的风速与沙尘暴序列年际变化之间存在着很高的正相关, 而沙尘暴多发区风速与

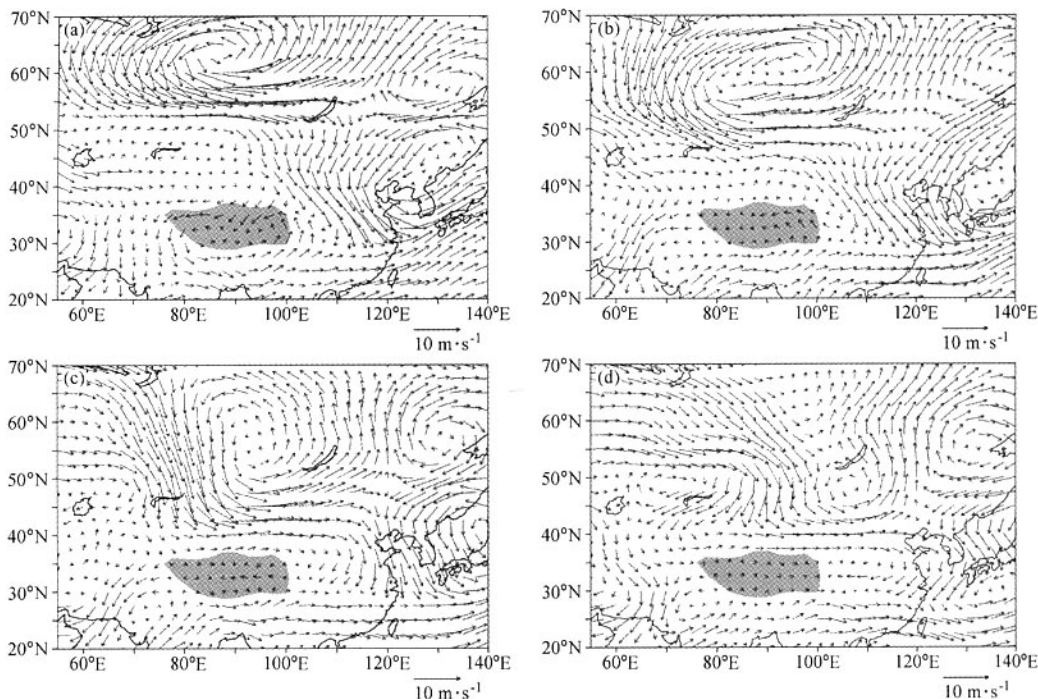


图 7 7 次强沙尘暴事件合成的前期 600 hPa 距平风场。(a) 前 3 天；(b) 前 2 天；(c) 前 1 天；(d) 当天 (阴影区含义同图 3)

Fig. 7 Composite 600 hPa wind anomaly for 7 severe dust storm events. (a) leading 3 days; (b) leading 2 days; (c) leading 1 day; (d) the same day (The shadow indicates the Tibetan Plateau higher than different height level)

当地沙尘暴活动相关却很低，因此西西伯利亚是影响我国北方沙尘暴活动的关键区。这也说明强沙尘暴活动的产生需要有大尺度的环流背景的配合，对沙尘暴活动的研究不能只着眼于研究局地风与局地沙尘暴的关系。

(2) 关键区各层春季平均风速中以 600 hPa 风速与沙尘暴序列年际变化相关最高 (相关系数为 0.841, 通过 0.001 显著性水平检验), 故对流层中低层风场与沙尘暴活动关系最为密切。600 hPa 和 700 hPa 的春季平均风场上盛行西风, 而与强沙尘暴活动对应的距平风场上蒙古东北部会有一个气旋式距平环流场出现, 其后部产生的异常大风横扫我国北方大部分地区, 对强沙尘暴的产生极为有利。

(3) 从关键区和沙尘暴多发区区域平均 600 hPa 风速的年变化看, 关键区 4 月风速有峰值出现, 正对应于强沙尘暴的多发期, 而多发区风速却没有相应的峰值, 这也说明沙尘暴活动的产生受更大尺度天气系统控制。两区冬季风速也很大,

但沙尘暴活动并不频繁, 这表明大风仅是引发沙尘暴的必要条件, 沙尘暴活动还要受到其他因素的影响。

(4) 我国北方春季 78% 的强沙尘暴事件发生前几日, 关键区有异常大风。通过对 67 次沙尘暴事件前几日风速距平百分率的叠加分析发现, 沙尘暴发生 3 天前关键区当日风速比当日多年平均风速大 26.4%。这些说明了西西伯利亚地区大风的逐日变化与我国北方地区的强沙尘暴天气存在较高的相关和明显的先兆反映。因此, 西西伯利亚地区风速也可以作为中国北方地区强沙尘暴天气短期预报的一个重要预警指标。

参考文献

- [1] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章, 等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征. 见: 方宗义等编. 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997. 1~10
Qian, Zhenan, He Huixia, Qu Zhang, et al. The classification standard and dust storm in northwestern China and

- its case spectra and statistic characteristics. In: *Research of Dust-storm in China* (in Chinese). Fang Zongyi et al. Eds. Beijing: China Megeorological press, 1997. 1~10
- [2] 尚可政, 孙黎辉, 王式功, 等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析. *中国沙漠*, 1998, **18** (3): 239~243
- Shang Kezheng, Sun Lihui, Wang Shigong, et al. The teleconnections of sand-dust storms over Hexi Corridor in Gansu Province and sea surface temperature in area of middle and eastern Pacific ocean near equator. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1998, **18** (3): 239~243
- [3] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. *地理学报*, 2000, **55** (5): 513~520
- Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyuan, et al. Causes of Sand-storm weather in northern China and Control Measures. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **55** (5): 512~520
- [4] Yoshino Masatoshi. Climatology of yellow sand (Asia sand, Asia dust or Kosa) in East Asia. *Science in China* (Ser. D), 2002, **45**: 59~70
- [5] 杨续超, 刘晓东. 东亚中纬度地区前期降水对中国北方春季强沙尘暴影响初探. *干旱区地理*, 2004, **27** (3): 293~299
- Yang Xuchao, Liu Xiaodong. A preliminary study on relationship of prior precipitation in Mid-latitude east Asia and spring severe dust storms in northern China. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2004, **27** (3): 293~299
- [6] McTainsh G H, Lynch A W, Tews E K. Climatic control upon dust storm occurrence in eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 1998, **39**: 457~466
- [7] Huang Fuxiang, Gao Qiong. Climate control on dust storm occurrence in Maowusu Desert, Inner Mongolia, North China. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, **13** (1): 14~21
- [8] Kurosaki Yasunori, Mikami Masao. Recent frequent dust events and their relation to surface wind in east Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (14): 1736, doi: 10. 1029/2003GL017261
- [9] 张平, 杨德保, 尚可政, 等. 2002年春季中国沙尘天气与物理量场的相关分析. *中国沙漠*, 2003, **23** (6): 675~680
- Zhang Ping, Yang Debao, Shang Kezheng, Wang Shigong. Correlative analyses between meteorological elements and dust-stormy weather occurred in China during the spring of 2002. *Journal of Desert Research*, 2003, **23** (6): 675~680
- [10] Gao Tao, Su Lijuan, Ma Qingxia, et al. Climatic analyses on increasing dust storm frequency in the spring of 2000 and 2001 in Inner Mongolia. *Int. J. Climatol.*, 2003, **23**: 1743~1755
- [11] 刘景涛, 郑新江, 康玲, 等. 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究. *气候与环境研究*, 2003, **8** (2): 218~229
- Liu Jingtiao, Zhen Xinjiang, Kang ling, et al. A case study of a severe dust storm resulted from a explosive Mongolia cyclone. *Climatic and Environmental Research*, 2003, **8** (2): 218~229
- [12] 陆均天, 邹旭旭, 王锦贵, 等. 近3年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析. *气候与环境研究*, 2003, **8** (1): 107~113
- Lu Juntian, Zou Xukai, Wang jingui, et al. Analyses of the causes for frequent dust weather occurred in China During the last three years. *Climatic and Environmental Research*, 2003, **8** (1): 107~113
- [13] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954~2002). *科学通报*, 2002, **48** (11): 1224~1228
- Zhou Zijiang, Zhang Guocai. Representative severe dust storm events in north China (1954-2002). *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, **48** (11): 1224~1228
- [14] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83** (11): 1631~1643
- [15] Sun Jimin, Zhang Mingying, Liu Tungsheng. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960~1999; Relation to source area and climate. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D10): 10325~10333
- [16] Iwasaka Y, Shibata T, Nagatani T, et al. Large depolarization ratio of free tropospheric aerosols over the Taklamakan Desert revealed by lidar measurements; Possible diffusion and transport of dust particles. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D23): 8652~8660
- [17] Liu Xiaodong, Yin ZhiYong, Zhang Xiaoye et al. Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109** (D16), D16210, doi: 10. 1029/2004JD004615