

气候因子对内蒙古沙尘暴频率的影响^{*}

达布希拉图^{1,2)} 赵春生¹⁾

1) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

2) (内蒙古气象科学研究所, 呼和浩特 010051)

摘 要 利用内蒙古中西部地区 40 年 (1961~2000 年) 的气象资料、沙尘暴资料和气候资料, 讨论了内蒙古中西部地区沙尘暴频率变化趋势和气候动力因子对沙尘暴频率的影响。结果显示: 近 40 年期间, 内蒙古中西部地区沙尘暴日数有明显的减少趋势, 沙尘暴频率总体上减少的主要原因是影响沙尘暴频率趋势的气候动力因子, 也就是代表冷空气活动的气候因子周期变化所致。影响内蒙古中西部地区沙尘暴频率时间分布变化的气候主导因子是: 大风日数、北半球极涡面积指数、亚洲北半球极涡强度指数等代表冷空气活动的气候动力因子。

关键词: 内蒙古地区; 沙尘暴频率; 气候动力因子; 北极涡

文章编号 1006-9895 (2004) 06-0828-07 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

1 引言

内蒙古中西部地区地处中亚中高纬度的干旱、半干旱地区, 它与蒙古国西南部大片荒漠地区是中亚沙尘暴多发区域。内蒙古中西部地区自西向东分布着 6 个沙漠和沙地, 它们是巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布齐、毛乌素沙漠和浑善达克沙地。大部分区域地表干旱, 植被稀少, 当大风过境时, 很容易引起沙尘暴。因此, 内蒙古中西部地区是中国西北沙尘暴高发区之一, 亦是主要沙尘暴源地之一^[1]。内蒙古中西部地区沙尘暴的研究对于我国沙尘暴研究有着重要的科学意义。

近年来, 尤其是 2000 年以来, 国内外对于我国沙尘暴开展了广泛的研究。这些研究主要集中在沙尘暴天气动力学特征分析^[2], 天气气候特征^[3,4,5]、天气学诊断分析^[6], 卫星云图监测分析^[7], 沙尘数值模式研究^[8,9]、沙尘暴路径分析^[10]、以及沙尘暴灾害评估^[11]等方面。但是, 对于沙尘暴频率变化原因的研究开展得不多, 尤其是形成沙尘暴的气候动力原因。

过去 40 年中, 内蒙古中西部地区各大沙漠、沙地面积逐渐扩大, 通过对卫星遥感监测资料和图像的分析计算, 得知内蒙古西部地区的乌兰布和、腾格里和巴丹吉林沙漠 20 世纪 90 年代比 20 世纪 60 年代面积扩大了约 $7.42 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[12]; 整个中西部地区 20 世纪 90 年代比 20 世纪 70 年代沙漠、沙地面积增加了约 $5.564 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[12]。下垫面条件的逐渐恶化, 更有利于沙尘暴的形成。然而, 近 40 年该地区沙尘暴频率呈减少趋势。这一方面说明了下垫面条件仅仅是沙尘暴发生不可缺少的物质条件, 不是影响沙

沙尘暴频率的主导因素；另一方面说明了沙尘暴发生的决定因素是天气气候条件。在一定的下垫面条件下，天气气候的变化决定了沙尘暴频率的变化。未来沙尘暴频率的变化趋势预测对于环境保护、环境治理和相应的政策制定有非常重要的意义。探讨与沙尘暴频率最为相关的气候动力因子是预测未来沙尘暴频率变化趋势的方法之一。

周秀骥等^[2]提出了沙尘暴形成物理机制中的动力学特征，并指出 2000 年北京沙尘暴频率的剧增与冷空气的活动有很大关系。从气候动力学角度，探讨与沙尘暴频率最为相关的气候动力因子对于未来沙尘暴频率的预测有着非常重要的意义。大风是沙尘暴起因中最为直接的因子，但大风是时空变化很大的气象要素，寻找一种与沙尘暴频率相关较好、且空间变化不大的大尺度气候动力因子，对于预测未来该地区沙尘暴频率有着重大的实际应用价值。出于这样一个目的，本文利用内蒙古中西部地区 40 年的气象资料、沙尘暴资料和气候资料讨论了 40 年内蒙古中西部地区沙尘暴频率变化趋势和气候动力因子对沙尘暴频率的影响。这里，我们从影响天气气候变化的各主要因子出发，如大风、北半球极涡、亚洲西风环流指数、副热带高压、南方涛动指数等，对它们作统计分析，研究它们的变化对沙尘暴频率变化趋势的影响。

2 数据资料

春季（3~5 月）是该地区沙尘暴高发季节，此期间沙尘暴发生频率约占全年的 80% 左右^[12]。本文采用内蒙古中西部 37 个站 3~5 月的沙尘暴观测数据。另外，从沙尘暴频率观测的范围来看单站沙尘暴局地性较强，20 个以上站同时发生沙尘暴的个例少，容易遗漏沙尘天气过程，所以我们统计分析了同时有 10 个以上站发生沙尘暴的过程。沙尘暴发生频率的统计采用该 37 个站 40 年（1961~2000 年）水平能见度的实测数据。对能见度小于 1000 m 出现的测站记为该站的一个沙尘暴发生日。我们统计了 10 个以上测站的沙尘暴发生频率。

由于大风和寒潮天气是较大范围的天气现象，我们选取了 4 个代表站，巴彦诺尔贡、额济纳、锡林浩特、呼和浩特站代表内蒙古中西部地区，对这 4 个代表站的大风（瞬时风速 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ ）天气作了统计分析。其他气候因子，如北半球极涡指数、亚洲北极涡指数、亚洲西风环流指数、亚洲经向环流指数、纬向环流指数、西太平洋副热带高压指数、南方涛动指数等，采用的是中国气象局的常规气候要素数据进行统计计算得到。

3 气候动力因子与内蒙古沙尘暴频率的相关分析

图 1a 是内蒙古中西部地区 40 年（1961~2000 年）沙尘暴频率和大风日数的变化趋势。可以看到近 40 年来内蒙古中西部地区沙尘暴频率和大风日数都有明显的下降趋势，而且大风日数小波动与沙尘暴频率小波动具有很好的一致性。大风日数与沙尘暴日数具有相当好的相关，相关系数达 0.5308。大风日数因子是影响沙尘暴频率的主要因子。

西风环流指数是纬向环流距平与经向环流距平的比值，从图 1b 可以看出 1960~

1980年期间西风指数是正值，纬向环流占主导地位，1980~2000年处于负值区，经向环流占主导地位，这与沙尘暴20世纪60、70年代强盛，20世纪70年代末期开始减弱具有很好的一致性。说明西风指数因子也是影响沙尘频率的主要因子。虽然数值间的相关不显著，但距平的符号相关非常好。从图2b分别分析经向环流和纬向环流的指数与沙尘暴频率的关系发现，亚洲经向环流与纬向环流与沙尘暴频率的相关并不好，相关系数分别是0.0141和0.1758（见图4）。

在极地上空，极涡是最强大的环流系统，其变化对中高纬乃至整个北半球天气系统的活动和天气气候有着直接的影响。极涡的扩张和收缩反映了极地冷空气的活动，它不仅会影响北半球气候带的南北推移，而且由于绕极环流的变化和异常，同时还会影响大气环流及天气气候的变化，因而研究极涡的活动规律有一定的实际意义。

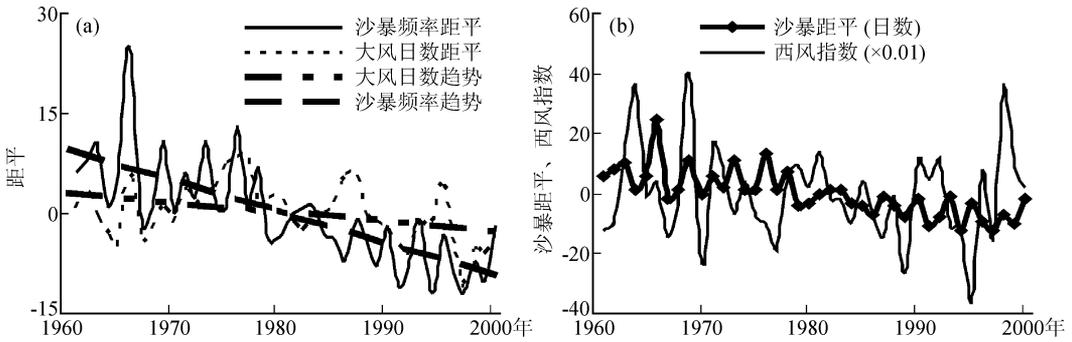


图1 内蒙古中西部地区春季沙尘暴频率距平与大风日数频率距平关系 (a) 和西风指数关系 (b)
(b) 中西风指数是实际值的100倍

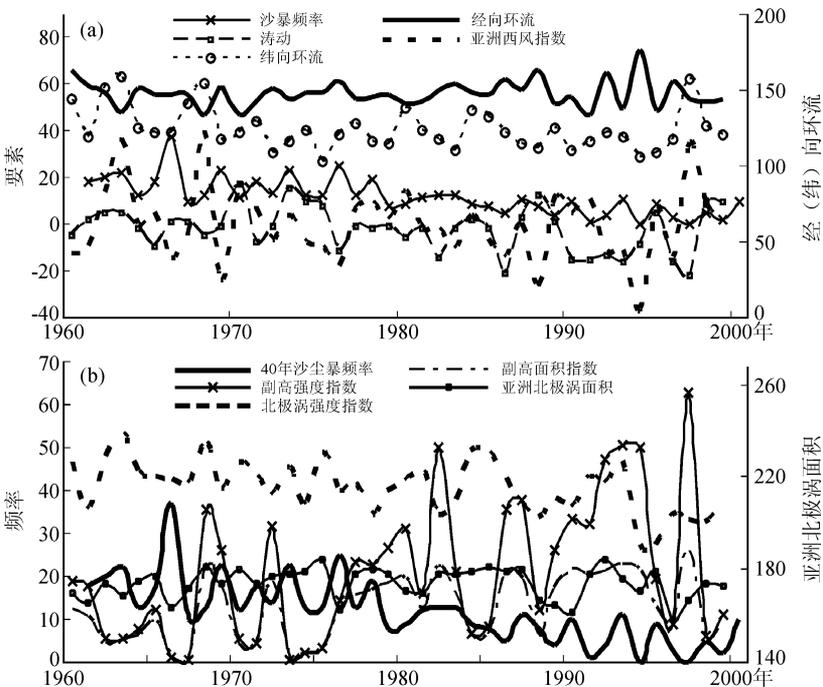


图2 内蒙古中西部地区春季沙尘暴频率与各个气候动力因子的年际变化趋势图

亚洲极涡指数的变化趋势与北半球极涡指数变化趋势基本一致^[13]。从图3和图2a可以看出,20世纪60~80年代北极涡活动处于强盛期,对应着沙尘暴多发期,80~90年代北极涡活动处于偏弱期,冷空气活动偏弱,对应着沙尘暴低发期,王会军^[14]指出,全球大气环流自20世纪70年代末之后的转变可以很清楚地在大气温度、风场等的变化上得到发现。更重要的是,在这次转变之后亚洲和非洲的季风环流变弱了,同时热带东太平洋区的信风环流也变弱了。这一事实与自20世纪70年代末之后亚洲北极涡活动偏弱及沙尘暴频率减少趋势非常吻合。二者的相关性很一致,说明北半球极涡指数是影响沙尘暴频率的主要因子。其中北极涡面积指数和强度指数与沙尘暴频率的相关系数分别达到0.4290和0.4091(见图4)。同样,亚洲地区北极涡面积指数和强度指数与沙尘暴频率之间的相关系数分别是:0.2596和0.4334(见图4)。因此,北半球北极涡面积指数、强度指数和亚洲地区北极涡强度指数与内蒙古中西部地区沙尘暴频率具有显著相关,分别通过0.01的信度检验(检验值为0.4016)。

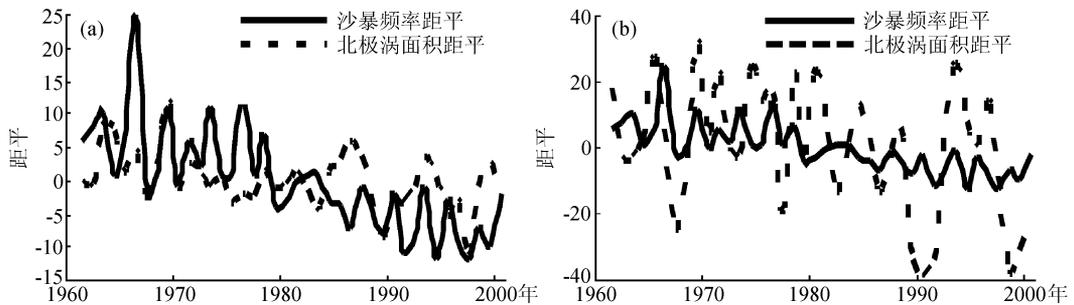


图3 内蒙古中西部地区春季沙尘暴频率与北极涡指数距平
(a) 亚洲北极涡强度指数距平; (b) 北半球北极涡面积指数距平

西太平洋副热带高压的强弱变化及其南北和东西位置的进退摆动是副热带环流调整的主要表现,同时它受西风带槽脊和东风带系统的制约和影响。从图2b看出,西太平洋副热带高压面积指数和强度指数(3~5月)与内蒙古中西部地区沙尘暴频率之间相关性不显著,相关系数分别是0.2147和0.2337。另外,40年(3~5月)南方涛动指数与内蒙古中西部地区沙尘暴频率之间的相关不亦显著,相关系数是0.1865(见图4)。

图4是内蒙古中西部地区沙尘暴频率与11个气候动力因子相关系数从大到小的排列。大风日数、亚洲北极涡强度指数、北半球极涡面积指数、北半球极涡强度指数四个因子是与沙尘暴频率相关性最好的因子,它们与沙尘暴频率的单相关都通过0.01检验(单相关通过0.01检验值是

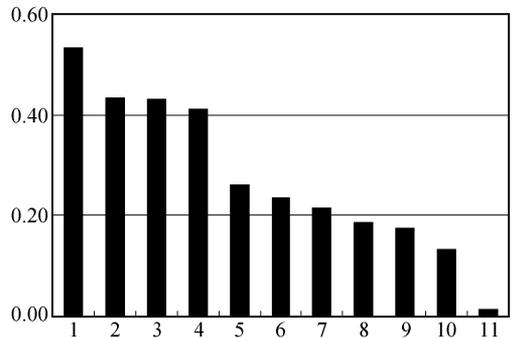


图4 沙尘暴频率与11个气候动力因子相关系数,单相关通过0.01检验值是0.4016

- 1: 大风日数; 2: 亚洲北极涡强度指数; 3: 北半球极涡面积指数; 4: 北半球极涡强度指数; 5: 亚洲北极涡面积指数; 6: 西太平洋副热带高压强度指数; 7: 西太平洋副热带高压面积指数; 8: 南方涛动指数; 9: 亚洲纬向环流指数; 10: 亚洲西风环流指数; 11: 亚洲经向环流指数

0.01检验(单相关通过0.01检验值是

0.4016 值)。下面我们将就这几个因子对于内蒙古中西部地区沙尘暴频率综合影响进行分析。

4 气候因子对沙尘暴频率综合影响分析

根据内蒙古中西部地区 37 个站 40 年 (1961~2000 年) 地面气象资料, 选取 10 个站以上出现的沙尘暴 (序列) 作为因变量, 其他气候因子作为自变量, 采用数理统计方法, 利用单相关与逐步回归进行统计分析, 研究这些气候因子对沙尘暴频率时间分布的影响程度 (图 4)。

为探讨各气候因子对沙尘暴的综合影响, 采用逐步回归方法进行统计分析。结果表明, 沙尘暴频率与各气候因子的关系中, 最终方程中含有三个自变量: 大风日数、亚洲北极涡强度指数和北半球北极涡面积指数。亚洲北极涡强度指数和北半球北极涡强度指数与沙尘暴频率相关很好, 但它们之间的相关又很好 (相关系数 0.6744), 同时进入方程会降低整个方程的相关系数, 本文选取了相关系数较高的前者。含有三个因子的回归方程:

$$Y = -85.2727 + 0.7164 X_1 + 0.4804 X_2 + 0.8159 X_3, \quad (1)$$

其中, X_1 为大风日数, X_2 为亚洲北极涡强度指数, X_3 为北半球北极涡面积指数。

采用复相关系数的检验对方程进行检验 ($R=0.6481 > R_a=0.5491$, $n=40$), 方程通过了 0.01 的信度检验。说明这 3 个因子对沙尘暴的形成有较大的影响。

为了比较各因子对方程贡献的大小, 进一步计算了标准偏回归系数, 其公式为

$$b_i' = b_i \times \left(\frac{I_{ii}}{I_{yy}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

表 1 各因子的标准偏回归系数

气候因子	偏回归系数
大风日数	0.4101
亚洲北极涡强度指数	0.2653
北半球极涡面积指数	0.2045

式中, b_i' 为方程中各因子的偏回归系数 ($i=1, 2, 3$); I_{ii} 为各因子的离差平方和; I_{yy} 为沙尘暴频率的离差平方和。显然, 标准偏回归系数的绝对值愈大, 其所对应的因子对沙尘暴频率的影响愈大 (见表 1)。

综上所述, 代表动力影响的大风日数、亚洲北极涡强度指数、北半球极涡面积指数等气候因子是影响内蒙古中西部地区沙尘暴频率的主导因子。

近 40 年来, 内蒙古中西部地区虽然植被覆盖度减少、沙化严重, 但沙尘暴频率一直减少, 其主要原因是因为影响沙尘暴频率时间分布变化的主导因子的周期变化所致。北半球北极涡面积指数和亚洲地区北极涡强度指数与内蒙古中西部地区沙尘暴频率具有显著相关。北半球北极涡面积指数和亚洲地区北极涡强度指数是代表大范围冷空气强度的气候因子。北半球极涡面积指数从 20 世纪 60 年代、70 年代以正距平值为主, 到 80 年代、90 年代以负距平值为主; 亚洲北极涡强度指数也从 60 年代、70 年代以正距平值为主到 80 年代、90 年代以负距平值为主。也就是说, 近 40 年来, 大风日数在减少; 北极涡从 70 年代中期以前的扩张、强盛期到 70 年代中期以后的收缩、偏弱期。这是内蒙古近 40 年来沙尘暴频率减少的气候方面的原因。

5 结论

本文详细研究了内蒙古中西部地区 37 个观测站的 40 年 (1961~2000) 10 个站以上沙尘暴实测数据的结果显示: 40 年期间, 内蒙古中西部地区沙尘暴日数有明显的减少趋势, 尤其是 20 世纪 60 年代到 70 年代末变化不明显, 自 70 年代末到 90 年代末有明显的减少趋势。北极涡活动的强弱及亚洲季风环流的强弱与沙尘暴频率变化趋势非常吻合。近 40 年来内蒙古中西部地区春季沙尘暴频率总体上减少的主要原因是影响沙尘暴频率趋势的气候动力因子, 也就是代表冷空气活动的气候因子周期变化所致。

影响内蒙古中西部地区沙尘暴频率时间分布变化的气候主导因子是: 大风日数、北半球极涡面积指数、亚洲北半球极涡强度指数等代表冷空气活动的气候动力因子。近 40 年来沙尘暴频率减少的主要原因: (1) 40 年来大风日数明显减少; (2) 北半球极涡面积指数从 20 世纪 70 年代中期以前的正距平值为主时期到 70 年代中期以后的负距平值为主时期, 北半球极涡从扩张期到收缩期; (3) 亚洲北半球极涡强度指数, 从 20 世纪 70 年代中期以前的正距平为主时期到 20 世纪 70 年代中期以后的负距平为主时期。北极涡从 20 世纪 70 年代中期以前的强盛期到 20 世纪 70 年代中期后的偏弱期。

参 考 文 献

- 1 周自江、王锡稳、牛若芸, 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究, 应用气象学报, 2002, **13** (2), 193~200.
- 2 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, 2002, **32** (4), 327~334.
- 3 刘景涛、郑明倩, 华北北部黑风暴的气候特征, 气象, 2000, **24** (2), 39~44.
- 4 王革丽、吕达仁、尤莉, 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析, 气候与环境研究, 2002, **7** (4), 433~439.
- 5 Gao Tao, Xiao Yu, Qingxia Ma et al., Climatology and trends of the temporal and spatial distribution of sandstorms in Inner Mongolia, *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **3**, 51~66.
- 6 徐国昌、陈敏连、吴国雄, 甘肃省“4. 22”特大沙尘暴分析, 气象学报, 1979, **37** (4), 26~357.
- 7 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), 513~521.
- 8 孙建华、赵琳娜、赵思雄, 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验, 气候与环境研究, 2003, **8** (2), 125~142.
- 9 赵琳娜、孙建华、赵思雄, 一次引发华北和北京沙尘暴天气起沙机制的数值模拟研究, 气候与环境研究, 2002, **7** (3), 279~294.
- 10 周自江、王锡稳, 西北地区东部群发性强沙尘暴序列的建立与分析, 地理学报, 2002, **57** (4), 437~442.
- 11 刘传凤, 2000 年全球气象灾害评价, 灾害学, 2001, **16** (2), 59~60.
- 12 白美兰、沈建国、裴浩等, 气候变化对沙漠化影响的评估, 气候与环境研究, 2002, **7** (4), 457~464.
- 13 赵振国, 中国夏季旱涝及环流场, 北京: 气象出版社, 1999, 68~72.
- 14 Wang Huijun, The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 376~386.

Impacts of Climatic Factors on Dust Storm Frequency in the Inner Mongolia of China

Dabu Xilatu^{1,2)} and Zhao Chunsheng¹⁾

1) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2) (*Meteorology Research Institute of the Inner Mongolia, Hohhot 010051*)

Abstract Meteorological dust storm frequency data from 37 stations of 40 years (1961—2000) throughout the west-central Inner Mongolia of China are analyzed together with climatic factors of 40 years in this region. The results show that dust storm frequency in this region has taken on a decline trend during the period of 1961—2000 and the trend of dust storm frequency is determined by the dynamical parameters rather than the factor of land cover condition. The main climatic factors controlling dust storm frequency in this region are the number of days with gale, intensity index of the northern hemispheric polar vortex, and intensity index of Asian polar vortex which are good representatives for large-scale cold air activities. The explanation for the decreasing trend is that it is mainly due to the variation in climatic factors determining dust storm frequency in the Inner Mongolia of China.

Key words: Inner Mongolia; dust storm frequency; climatic factors; polar vortex