

文章编号: 1000-0534(2007)05-1023-08

华北春季沙尘暴频次与环流年际 变率的相关分析

毛 睿, 龚道溢

(北京师范大学 资源学院地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 分析了近 40 年来华北春季沙尘暴频次与前秋、前冬和当年春季大尺度大气环流因子的关系, 重点是检查年际尺度上的相关。结果表明, 年际尺度上与沙尘暴频次有密切关系的环流因子包括: 春季太平洋/北美遥相关型(PNA)、春季北太平洋指数(NP)、冬季亚洲区极涡面积。前者为正相关, 后二者为负相关。这与用包含低频变率的原始序列进行分析的结果有很大的不同。原始序列分析的结果表明, 与华北沙尘暴频次有关的环流因子主要是春季太平洋准 10 年振荡(PDO, 为负相关)、春季北半球极涡面积和亚洲区极涡面积(正相关)、前冬西大西洋型(WA, 为正相关), 以及前秋亚洲区极涡面积(正相关)。说明在不同时间尺度上, 大气环流因子有不同的作用。此外, 除了 PNA、NP 和亚洲区极涡面积外, 年际尺度上 ENSO 及 WA 也可能对沙尘暴频次存在适度的影响。年际尺度上春季 12 个环流因子对春季沙尘暴频次的方差贡献率为 65.3%。

关键词: 华北; 年际变率; 春季沙尘暴; 环流因子

中图分类号: P445^{+.4} **文献标识码:** A

1 引言

沙尘暴作为我国北方常见的一种自然灾害, 对区域气候、辐射、降水分布和生态环境等有重要影响^[1]。我国沙尘暴的分布范围很广并存在明显的区域性, 主要集中区包括 3 个区域: 1 区包括西北地区东部、华北和东北; 2 区主要是指新疆塔克拉玛干沙漠及周边地区; 3 区为青藏高原^[2]。其中 1 区沙尘暴频次变化具有代表性, 而且该区的西部和中部是沙尘暴的高发地带和最大源区, 它们常常对人口稠密、工农业和畜牧业发达的南部和东部产生很大的影响, 所以对该区沙尘暴的研究引起了人们极大的关注。

沙尘暴频次变化与环流背景异常有密切关系^[3~6], 环流背景场的调整是随后发生沙尘暴过程的驱动力。研究指出, 当冬、春季 500 hPa 高度场从欧洲北部、乌拉尔地区、到以贝加尔湖为中心至我国北方大部分地区出现“十、一、十”距平形势时, 纬向环流占优势, 同时东亚大槽偏弱, 我国北

方春季气旋活动偏少而且强度偏弱, 导致华北地区沙尘天气次数偏少^[7~10]。而环流背景异常往往受一些环流因子的影响, 与环流因子的年际变化和年代际变化有一定关系。因此分析环流因子与沙尘暴频次的关系对于加深理解沙尘暴频次变率是有意义的。

前人已经在环流因子与沙尘暴频次的关系方面做了许多研究。如文献[11]指出, 近 10 年来在 PNA 增强 WA 减弱的背景下, 亚洲(亚欧)地区一直维持经向环流减弱和纬向环流加强的趋势。经向环流减弱和纬向环流增强, 很可能使得沙尘暴不易发生。北极涛动(AO)的强弱和位相变化对地面天气变率有显著影响, 当北极涛动为强的正位相时, 中高纬度西风环流平直, 东亚大槽偏弱, 相应的环流异常就不利于华北沙尘暴活动^[12~14]。Zhao 等^[15]指出, 北半球极涡面积指数、亚洲极涡强度指数是影响内蒙古沙尘暴频次的主要因子。ENSO 事件也能通过影响环流异常, 进而影响沙尘暴频次^[1, 16]。此外, 大气环流系统对区域或大陆尺度的温度、降

收稿日期: 2006-07-10; 改回日期: 2007-04-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB400505); 国家自然科学基金项目(40675035)共同资助

作者简介: 毛睿(1980—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 主要从事全球变化及气候系统诊断分析研究。E-mail: mr@ires.ac.cn

水以及区域植被指数(NDVI)有直接的控制和影响^[17-18], 这些因素的变化都有可能影响沙尘暴的发生。

我们注意到, 以往大量关于大气环流因子与沙尘暴关系的工作均很少区分年际、年代际尺度上的差异。在很多情况下年际与年代际尺度上很多因子与沙尘暴频次的关系是不一致的。这可能与几方面的原因有关, 一是在年际、年代际尺度上二者联系机制可能不同; 二是一些与沙尘暴没有联系的因子(不管是气候的还是非气候的)由于本身存在长期趋势, 所以导致其与沙尘暴频次之间出现高的统计相关, 而这种相关可能是虚假的。区分年际、年代际尺度上的差异, 对合理解释沙尘暴频次的长期变化及气候因子对其长期变化的影响是有帮助的。因此, 我们设想重新检查一些主要环流因子年际尺度上与我国北方沙尘暴频次的关系。年际尺度上的关系对于理解气候变化如何影响华北沙尘暴能提供更多的依据。

本文主要考虑了 12 个重要的大气环流因子, 即北极涛动(AO)、东大西洋遥相关型(EA)、欧亚—太平洋型(EUP)、北大西洋涛动(NAO)、北太平洋指数(NP)、太平洋准 10 年振荡(PDO)、太平洋—北美遥相关型(PNA)、北半球极涡面积(PVA)、亚洲区极涡面积(PVA1)、南方涛动(SO)、西大西洋遥相关型(WA)和西太平洋遥相关型(WP)。

2 资料选取和方法

本文研究区是中国华北地区, 大体范围为 95°~120°E, 35°~45°N, 与引言中的 1 区范围基本一致。该研究区包含 59 个气象站, 其沙尘暴资料时段为 1962—1998 年, 总计 37 年(图 1)。将所有这些站每年春季沙尘暴发生天数求算术平均, 得到我国华北春季沙尘暴频次时间序列(图 2a), 文中沙尘暴频次的季节若不特指, 均指春季。

本文所用资料包括: 欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)再分析资料 500 hPa 格点高度计算的 5 个遥相关指数(PNA、EA、WP、WA、EUP), 计算公式参见文献[19], 选用每天 00UTC 时刻的资料; 极涡面积指数是国家气候中心气候系统诊断预测室再处理资料, 选取北半球极涡面积指数(PVA)和亚洲区极涡面积指数(PVA1, 即北半球 60°~150°E 区极涡面积); AO 序列根据 Thompson 等^[20]的定义, 取自“<http://jisao.washington.edu/>

analyses0302/”。PDO 根据 Mantua 等^[21]的定义, 取自“<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>”; NAO 根据 Hurrell^[22]的定义, 取自“<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm>”; SO 根据 Ropelewski and Jones^[23]的定义, 取自“<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/soi.htm>”; NP 是根据 Trenberth and Hurrell^[24]的定义, 取自“<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/np.html>”。

我们对环流因子和沙尘暴频次的原序列进行滤波, 去除 10 年以上年代际尺度分量, 保留 10 年以下年际尺度分量, 这样就得到了各序列的年际变化, 时间均为 1962—1998 年。

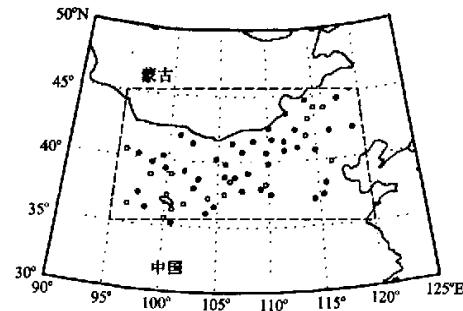


图 1 研究区沙尘暴观测站位置
“○”: 沙尘暴观测站点

Fig. 1 Distribution of dust storm stations in the study region. “○”: Observation stations of dust storm

3 结果分析

3.1 沙尘暴频次变化

沙尘暴在 20 世纪 60 到 70 年代频次明显偏高, 其中 1966 年发生次数最多。从 70 年代末期以来沙尘暴频次呈急剧下降趋势(图 2a), 这种趋势与以往的研究结果基本一致^[25, 31]。计算整个时间序列的线性趋势, 为 $-1.33 \text{d}/10\text{a}$, 超过 99% 信度。从年代际分量可以很明显地看出这种趋势变化(图 2c)。图 2b 为沙尘暴频次的年际变化分量。为了比较不同尺度的相对重要性, 我们分别计算了沙尘暴频次原序列、年际分量序列以及年代际分量序列的方差。其中年际分量方差占原始序列方差的 33%, 而年代际分量方差占原始序列方差的 67%。说明年代际分量占原始序列方差的比重很高, 同时年际尺度波动也占到全部方差的近三分之一, 也是一个很高的量, 故不能忽视。

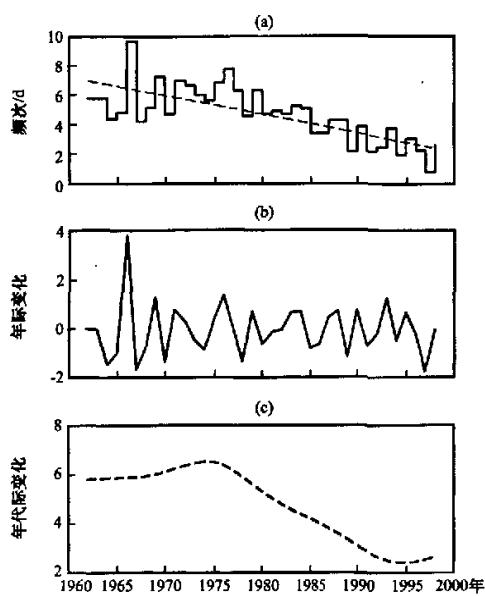


图 2 华北春季沙尘暴频次

(a) 原始序列, 虚线为线性趋势, (b) 年际变化分量,
(c) 年代际变化分量

Fig. 2 Dust storm frequency in North China.
(a) observation, dashed line is the linear trend,
(b) interannual change components,
(c) interdecadal change components

3.2 年际尺度上环流因子与沙尘暴频次的关系

很多环流因子有显著的年代际低频变化, 如 PDO 作为准 10 年周期振荡, 存在明显低频波动和长期变化趋势^[26], 近 50 年来冬季 AO 有显著的增强趋势^[27]。同时我国沙尘暴频次也存在逐渐减少的长期趋势(1962—1998 年), 因此环流因子与沙尘暴频次的统计关系可能会受到这些年代际变化的影响。有时这种影响可能会对 2 个变量的关系带来虚假的统计上的高关联。而如果仅仅检查年际尺度上的关系, 就可以避免这种问题。因此这里我们重点检查沙尘暴频次和环流因子在年际尺度上的关系。首先对环流因子和沙尘暴频次都进行了滤波, 得到年际变化分量, 再对二者的年际分量进行相关分析。

此外, 考虑到气候变量的一个突出特点是具有红噪声谱, 即不同时间的数据之间不是完全独立的, 气候变量某一时刻的状况对后面的状况存在影响。因此对原始序列及滤波后的序列统计关系进行显著性检验时, 还需要对时间序列的有效自由度进行严谨的估计。本文采用 Leith^[28]的方法来判定有

效自由度, 序列的有效自由度取两个序列有效自由度的平均值, 因此有效自由度一般要比样本个数少 6~8 个左右。

图 3b 给出了利用年际尺度序列计算的结果。这里我们考虑了大气环流因子与沙尘暴频次之间的可能时间滞后关系, 每一种环流因子都包括当年春季以及上一年秋季(前秋)和上一年冬季(前冬)3 个季节。年际尺度上前秋环流因子与沙尘暴频次的相关普遍较低, 所有环流因子中没有一个达到显著水平。而前冬的环流因子中只有 PVA1 与沙尘暴频次相关较高, 达到 -0.41, 通过 95% 信度。春季同期的相关总的来看高于前秋与前冬, 其中突出的高相关因子有 NP、PNA 和 PVA1, 相关系数分别达到 -0.39, 0.60 和 0.42, 均通过 95% 信度。当然这些因子之间可能相互有一定的联系, 为了排除因子之间的相互影响和突出起主要作用的影响因子, 我们还计算了沙尘暴频次与各季各个显著因子的偏相关系数, 排除其他要素的影响后, 最重要的因子是春季的 PNA 指数(偏相关系数为 0.48)。这说明年际尺度上春季 PNA 可能对华北沙尘暴频次有显著影响, 不过其具体机制需要更深入的研究。

为进行比较和检查气候低频信号对沙尘暴/环流因子关系的影响, 这里我们对没有经过滤波处理的原始资料重复了上面的分析(图 3a)。相关分析的自由度判定也采用 Leith^[28]的方法, 有效自由度一般比样本个数少 10~15 个左右。计算结果表明, 春季 PDO、PVA 和 PVA1 指数与沙尘暴频次有较高的相关, 依次为 -0.48, 0.40 和 0.37; 前冬 WA 与沙尘暴频次的相关系数为 0.35; 前秋 PVA1 与沙尘暴频次的相关系数为 0.38, 这些相关系数均通过 90% 信度。同样我们也计算了春季 PDO、PVA、PVA1 和前冬 WA, 以及前秋 PVA1 与沙尘暴频次的偏相关系数, 发现只有春季 PDO 的偏相关较高(-0.56), 通过 95% 信度。

通过以上分析可以看出, 用原始序列和用年际分量进行相关分析结果确实存在较大差异。有些年际尺度上显著相关的因子在低频尺度上关系不明显。如前冬 PVA1 与沙尘暴频次在年际尺度上有很高的显著相关(-0.41), 而用原始序列分析所得的相关系数则明显减弱, 只有 0.10。有些年代际尺度上显著的因子, 在年际尺度上关系消失。最明显的例子是 PDO, 前秋到同期春季, 与沙尘暴频次都有强相关, 但是去掉低频变化后, 从前秋到春季的相关都接近零(图 3)。这说明原始资料中得到的

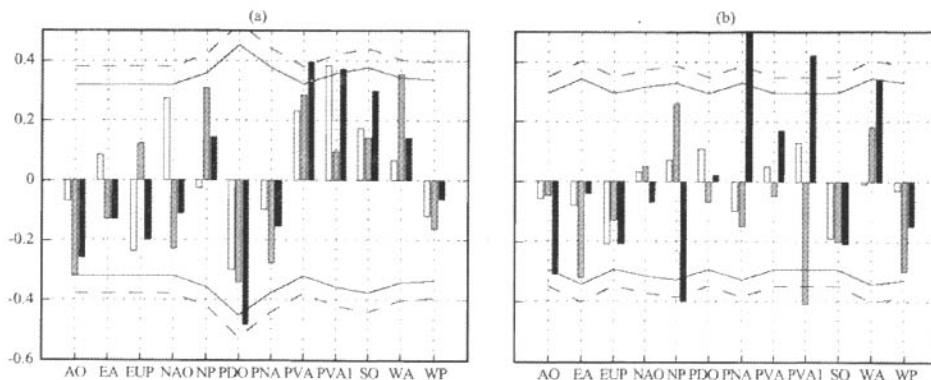


图3 环流因子与沙尘暴频次的相关系数

(a) 原始序列计算, (b) 年际变化分量计算, 白柱、灰柱和黑柱依次表示前秋、前冬和春季环流因子与春季沙尘暴频次的相关系数, 实线表示春季相关的 90% 信度, 虚线表示春季相关的 95% 信度

Fig. 3 Correlation between dust storm frequency and circulation factors. (a) original data, (b) interannual change components. The white, gray and black bars are correlation coefficients of the spring dust storm frequency with previous autumn, previous winter and present spring circulation-factors, respectively. Solid line means the confidence level of 90% in spring correlation, but dashed line is for confidence level of 95%

PDO 强相关是由长期趋势造成的, 这种相关不能得到年际变化资料的支持。因此, 低频信号造成的影响, 可能使我们对环流因子的作用估计带来明显偏差。而基于年际尺度的资料, 分析环流因子与沙尘暴年际变率的关系则要更加稳定和可靠。年际尺度与年代尺度上, 与沙尘暴的关系存在明显变化的因子主要有 PDO、PVA1、PNA 和 NP 等, 用这

些因子来解释沙尘暴的变化时应该要格外谨慎。

为了进一步检查年际尺度上前期或同期大气环流因子变化与沙尘暴天气的关系, 我们对前冬、春季北半球 500 hPa 高度场分别进行了滤波, 然后分别与沙尘暴频次年际分量进行了相关分析。这也可从另一个侧面补充和验证。图 4a 是年际尺度上春季 500 hPa 高度场与沙尘暴频

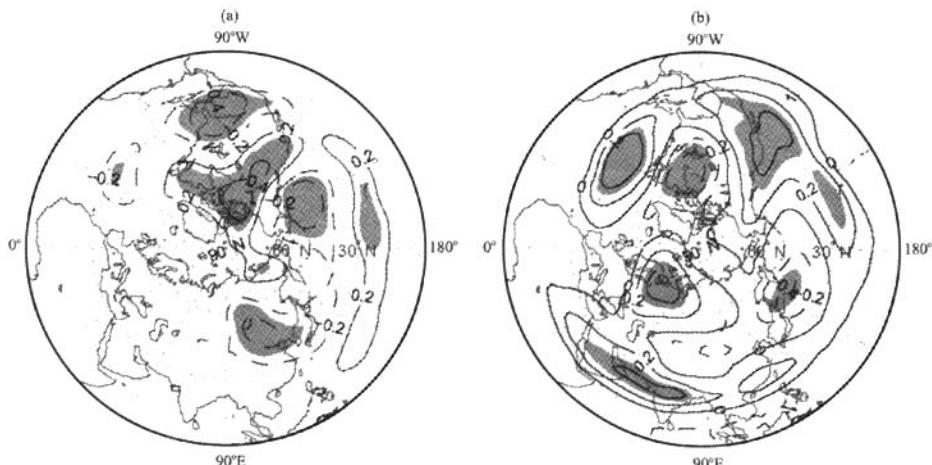
图4 年际尺度上沙尘暴频次与当年春季(a)及前冬(b)500 hPa 高度场相关
阴影区表示通过 95% 信度

Fig. 4 Interannual correlations between spring dust storm frequency and (a) spring, (b) previous winter 500 hPa heights. Shaded areas have passed the confidence level of 95%

次的相关分布, 正相关区主要分布在北太平洋中部和北美北部, 负相关区主要分布在我国北方和蒙古、阿留申群岛附近。东亚地区高度场的负相关, 说明沙尘暴频次多时东亚大槽气压下降(即强度偏强), 而东亚大陆高度场下降, 也意味着东亚极涡面积指数增加, 这也与前面得到的 PVA1 的显著正相关相吻合。太平洋与北美地区呈波列形式的正负相关中心, 与 PNA 型相吻合。当然这也可能部分说明了 ENSO 对沙尘暴频次的影响。此外, 我们还分析了年际尺度上前冬 500 hPa 高度场与春季沙尘暴频次的相关(图 4b), 东亚地区的负相关仍然存在, 不过相关中心的位置偏东, 位于日本北部及相邻的北太平洋。而在乌拉尔山脉地区, 为显著正相关, 说明该地区前冬频繁的阻塞活动可导致春季沙尘暴频次的偏多。此外, 与春季同期相关明显不同的是北大西洋地区突出的偶极子型, 与 WA 遥相关型比较相似但位置稍偏东。前面我们分析各个前冬环流因子与春季沙尘暴的关系时发现, 只有 PAV1 有显著的负相关, 而同期的 PAV1 则是显著的正相关。从图 4b 来看, 这种明显的季节变化很可能是由于前冬乌拉尔地区阻塞高压活动增强, 东亚大槽位置东移, 造成东亚大部分地区 500 hPa 高度上升而引起的。

3.3 环流因子年际变化的综合影响

为了定量说明年际尺度上所有环流因子对沙尘暴频次的综合影响效果, 以及各个环流因子的单独贡献, 我们尝试用文献[17]的多元回归方法进行分析。这里用沙尘暴频次年际分量作为因变量, 相应季节的环流因子年际分量为自变量, 来拟合年际尺度上所有环流因子对沙尘暴频次变化的方差贡献率, 以及单个因子的方差贡献率。分析前对所有的时间序列指标都进行了标准化处理, 以方便计算。

年际尺度上前秋、前冬和当年春季各自 12 个环流因子的总方差贡献率依次为 14.6%、45.8% 和 65.3%, 总的来看, 春季同期的环流因子解释率最高, 说明同期的环流因子要比前期的环流因子重要得多。单独检查每个环流因子的方差贡献率。春季回归方程中 PNA、PVA1 和 WA 的贡献率依次为 48.7%、8.2% 和 5.5%, 冬季回归方程中 NP、PVA1、SO 和 WA 的贡献率依次为 18.2%、15.7%、6.9% 和 6.1%, 秋季回归方程中只有 EUP 的贡献率最大, 仅为 4.8%(以上只列出方差贡献率超过 5% 的因子)。

为进行比较, 我们也用环流因子和沙尘暴频次

的原始序列来拟合所有环流因子对沙尘暴频次变化的方差贡献率。前秋、前冬和春季的方差贡献率依次为 44.9%、49.3% 和 61.4%。总的来看, 还是春季同期的环流因子解释率最高。春季回归方程中有 PDO、PVA、PVA1 和 WA, 方差贡献率依次为 32.4%、13.4%、6.2% 和 5.1%; 冬季回归方程中 EUP、NP、PDO、PVA、WA 和 WP 的贡献率依次为 6.4%、9.4%、16.4%、5.3%、7.5% 和 7.1%; 秋季回归方程中 NAO、PDO 和 PVA1 的贡献率依次为 9.4、11.4% 和 10.2%(只列出方差贡献率超过 5% 的因子)。

除了上述方法, 我们也尝试用逐步回归方法来确定影响沙尘暴频次的显著因子, 并计算方差解释率。为进行比较, 也用年际分量和原始序列分别进行回归分析。我们认为, 前冬、春季环流因子对沙尘暴频次的影响要重要一些, 而且其中与沙尘暴频次存在高相关关系的环流因子其影响机制可能更明确一些, 所以我们挑选前冬、春季环流因子中与沙尘暴频次相关系数高的因子作为自变量(超过 90% 信度)。用沙尘暴频次年际分量作为因变量, 前冬、春季环流因子中高相关因子的年际分量作为自变量, 进行逐步回归。回归结果如下:

$$Y = 0.003 + 1.448X_1 - 0.656X_2, \quad (1)$$

其中 Y 是沙尘暴频次, X_1 是指春季 PNA, X_2 是指冬季 EA, 方程通过了 0.01 显著性水平检验($R^2 = 0.436, n=37$)。标准偏回归系数依次为 0.578 和 -0.309。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次的影响愈大。由此可见, 年际尺度上春季 PNA 和冬季 EA 对春季沙尘暴频次有显著作用。

同样, 我们也用沙尘暴频次的原始序列作为因变量, 前冬、春季环流因子中高相关因子的原始序列作为自变量, 进行逐步回归。回归结果如下:

$$Y = -18.073 - 1.010X_1 + 0.132X_2 - 0.462X_3, \quad (2)$$

其中 Y 是沙尘暴频次, X_1 是指春季 PDO 指数, X_2 是指春季 PVA1 指数, X_3 是指冬季 AO 指数, 方程通过了 0.01 显著性水平检验($R^2 = 0.516, n=37$)。由此可见, 春季 PDO、PVA1 和冬季 AO 对春季沙尘暴频次长期变化有很大的贡献率。而 PNA 的贡献则不显著。

通过以上分析可看出, 用逐步回归方法和用求方差贡献率确定重要因子的方法, 二者结果存在较

大差异。年际尺度上逐步回归分析所得的重要因子，其方差贡献率并不一定都高，如前冬 EA(方差贡献率<5%)。用原始序列进行逐步回归分析所得的重要因子中，除了 AO 以外(方差贡献率<5%)，其他所选因子都与用求方差贡献率的方法结果一致。以上分析说明，气候因子对沙尘暴频次的影响很可能是非线性的。用简单的多元线性分析方法是不能完全解释的。

3.4 ENSO 与 WA 的影响

年际尺度上对全球大气环流和气候异常影响最强的信号是 ENSO，有研究指出，ENSO 事件有可能通过影响环流异常，进而影响沙尘暴频次^[1, 11]。上节的分析中我们检查了沙尘暴年际变化与 SO 的相关为-0.21，并不显著。这可能与 ENSO 不能直接影响华北气候与天气有关。因为很多研究说明热带太平洋海温对北半球中高纬度纬向环流有明显的影响，为进一步说明 ENSO 发生对沙尘暴频次的可能影响途径，我们做了 ENSO 发生后春季纬向风的合成分析(图 5, El Niño—La Niña, 110°~120°E 合成)。依据文献[29]挑选 1965, 1968, 1982, 1986, 1991 和 1997 年为 El Niño 年，1970 和 1988 年为 La Niña 年，对上述年份随后 1 年的春季纬向风进行合成。图 5 说明，当发生 El Niño 事件后，春季东亚副热带西风急流强度偏弱，而偏弱的急流对于天气系统的发生和强度是不利的。因此，可以

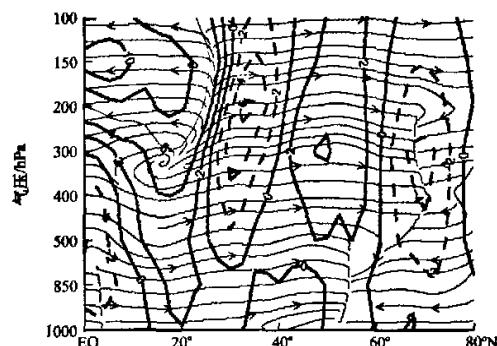


图 5 ENSO 发生时春季风场合成(El Niño—La Niña, 110°~120°E 经线合成)

Fig. 5 Composition of spring wind field averaged between 110°~120°E in ENSO years (El Niño—La Niña). The contour line is for zonal wind (unit: $m \cdot s^{-1}$) and the streamlines are for meridional circulation

减少沙尘暴天气频次。

因为 ENSO 对环流的影响是行星尺度的，而行星尺度纬向环流可以用 AO 很好描述^[30]，已有研究发现，春季 AO 能通过影响东亚地区天气变率和具体天气活动频次，进而影响沙尘暴频次^[12~14]。因此这里我们也检查了它们与沙尘暴频次的关系。结果表明，年际尺度上冬季 Nino3.4 区 SST 与同期

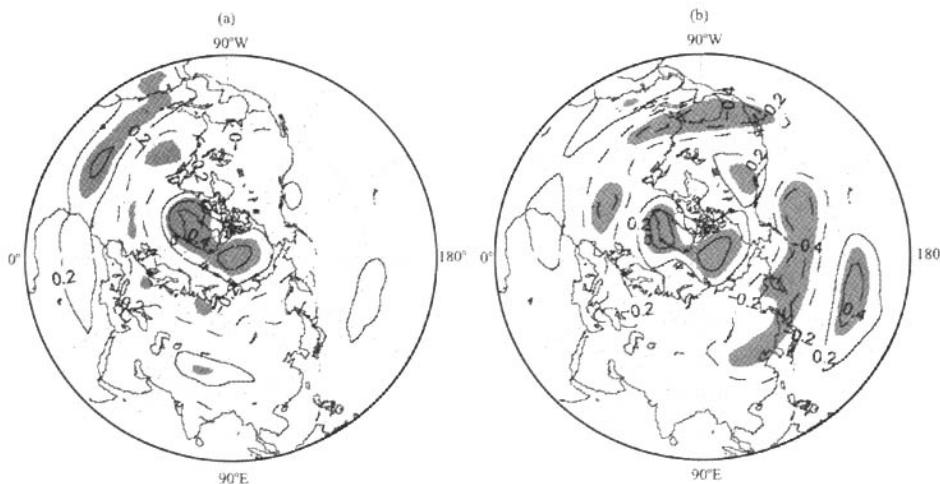


图 6 前年冬季 WA 指数与春季 500 hPa 高度场相关

(a) 原始序列, (b) 年际尺度, 实线和虚线分别表示正、负相关, 阴影区为通过 95% 信度

Fig. 6 Correlation between the last winter WA index and 500 hPa geopotential height in spring.

(a) original data, (b) interannual components. Shaded areas have passed the confidence level of 95%. Solid (dashed) line is for positive(negative) correlation

AO 的相关系数为 0.41, 通过 95% 的信度。因此 ENSO 很可能通过影响西风带以及西风急流的强弱和位置进而影响到沙尘暴频次。此外, PNA 与沙尘暴频次的高相关也可能反映了 ENSO 的信号, 因为 ENSO 对大气的强迫可以通过 PNA 向中高纬度传播。

此外, 我们发现前冬 WA 与春季沙尘暴频次的原始序列有较高相关。文献[11]指出, 自 1951 年以来, 冬季 WA 明显减弱。在 WA 减弱的背景下, 亚洲(亚欧)地区经向环流继续减弱、纬向环流加强的趋势也在维持, 这可能导致我国沙尘暴频次减少。为了分析 WA 与春季经纬向环流的关系, 我们计算了年际尺度上前冬 WA 与春季 500 hPa 高度场的滞后相关, 为比较也做了原始序列的滞后相关(图 6)。图 6b 表明, 年际尺度上当前冬 WA 增强(减弱)时, 春季东亚 500 hPa 高度为负(正)异常, 东亚大槽偏强(弱), 使得经向环流偏强(弱), 所以沙尘暴频次偏多(少)。而原始序列的滞后相关图则没有反映出东亚地区高度场的显著异常(图 6a)。这说明前冬 WA 的年际变化可能对沙尘暴频次的影响更显著一些, 而包含低频变率的长期变化其影响机制还需进一步分析。从年际尺度与年代际尺度上来看, 冬季 WA 与沙尘暴频次的关系都比较明显且稳定, 也说明冬季 WA 对沙尘暴频次还是存在适度的影响。

4 结论与讨论

根据上述分析, 得出以下结论:

环流因子、非气候因子以及沙尘暴频次的年代际变化使得它们在统计上容易产生高相关, 有些高相关并不能反映它们之间真正的关系, 而很可能是虚假信号。通过对环流因子和沙尘暴频次年际变化分量的分析, 可以对这种可能的偏差进行验证, 对更好地理解环流因子影响沙尘暴频次的机制提供有益的证据。

同时我们也认识到, 对于华北不同区域大尺度环流因子对沙尘暴频次的影响机制及其作用强度存在差异。对于部分地区, 环流因子在年际尺度上可能通过影响地表气候要素、下垫面状况及天气系统^[17~18], 进而对沙尘暴频次施加影响。但对于部分地区, 春季当地环流作用可能更显著, 如中蒙地区^[31~32]。因此, 具体差异和机制还需要进一步讨论。

参考文献

- [1] 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[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513~521
- [2] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 193~200
- [3] 王丽丽, 江灏, 吴虹. 2001 年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 303~308
- [4] 钟海玲, 李栋梁. 中国北方 4 月沙尘暴与西风环流的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 104~111
- [5] 陈楠, 陈晓光, 赵光平. 宁夏不同强度沙尘暴环流差异特征的对比分析[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 680~686
- [6] 彭维秋, 陈楠. 宁夏多、少沙尘暴年 4 月平均环流特征的对比分析[J]. 高原气象, 2002, 21(6): 599~603
- [7] 郑新江, 杨义文, 李云. 北京地区沙尘天气的某些特征分析[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 14~23
- [8] Qian W H, Quan L S, Shi S Y. Variations of the dust storm in China and its climatic control[J]. J Climate, 2002, 15: 1216~1229
- [9] 林朝晖, 陈红, 张时煌, 等. 2003 年春季中国沙尘天气异常的气候及环流背景[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 191~202
- [10] 尤凤春, 史印山, 付桂琴, 等. 河北省沙尘暴天气成因分析[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 642~647
- [11] 林振敏, 施能. 北半球冬季大气环流遥相关型特征与我国区域气候[J]. 气象科技, 2004, 32(5): 333~342
- [12] Gong D Y, Mao R, Fan Y D. East Asian dust storm and weather disturbance: possible links to the Arctic Oscillation[J]. J Geophys Res-Atmos, 2006, 126: 1379~1396
- [13] 毛睿, 龚道溢, 范一大. 春季天气变率长期变化对华北沙尘暴频次的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 12~20
- [14] 宋连春, 俞亚勋, 孙旭映, 等. 北极涛动与我国北方强沙尘暴的关系[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 835~839
- [15] Zhao C S, Dabu X, Li Y. Relationship between climatic factors and dust storm frequency in Inner Mongolian of China[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31(1): L01103, doi: 10.1029/2003GL018351
- [16] Gao Tao, Su L J, Ma Q X, et al. Climatic analyses on increasing dust storm frequency in the springs of 2000 and 2001 in Inner Mongolia[J]. International J Climatology, 2003, 23: 1743~1755
- [17] 龚道溢, 王绍武. 大气环流因子对北半球气温变化影响的研究[J]. 地理研究, 1999, 18(1): 31~38
- [18] Gong D Y, Ho C H. Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere[J]. J Geophys Res Atmos, 2003, 108(D16), 4498, doi: 10.1029/2002JD002300
- [19] Wallace J M, D S Gutzler. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. Mon Wea Rev, 1981, 109: 784~812
- [20] Thompson D W J, J M Wallace. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature

fields[J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297-1300

[21] Mantua N J, S R Hare, Y Zhang, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 1069-1079

[22] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation[J]. *Science*, 1995, 269: 676-679

[23] Ropelewski C F, P D Jones. An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 2161-2165

[24] Trenberth K E, J W Hurrell. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 1994, 9: 303-319

[25] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 9-16

[26] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 2003, 61(6): 641-653

[27] 龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 559-568

[28] Leith C E. The standard error of time-average estimates of climatic means[J]. *J Appl Meteor*, 1973, 12: 1066-1069

[29] 王绍武, 龚道溢. 近百年来的 ENSO 事件及其强度[J]. 气象, 1999, 25(1): 9-13

[30] Wallace J M. North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms - one phenomenon[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, Part A, 126(564): 791-805

[31] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 83-92

[32] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 540-547

Correlation Analysis of Interannual Variability between Spring Dust Storm Frequency and Atmospheric Circulation Factors

MAO Rui, GONG Dao-yi

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (Beijing Normal University), College of Resources Science Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The relationship of spring dust storm frequency in Northern China with the previous autumn, the previous winter and the spring atmospheric circulation over the periods of 40 years are analyzed. The point is mainly to examine the correlation between dust storms frequency and atmospheric circulation on the interannual time scale. The results show that the atmospheric circulation factors have close relationship with dust storm frequency in interannual scale, including: Pacific North American pattern (PNA), spring North Pacific (NP) and the area of Asian polar vortex (PVA1) in winter. There is significant positive correlation between PNA and dust storm frequency, and negative correlation of NP and PVA1 with dust storm frequency. These results are not the same with that computed by the original dataset including low frequency variability. The results computed by the original dataset show that the atmospheric circulation factors influencing on dust storm frequency in Northern China mainly are the spring Pacific Decadal Oscillation (PDO, negative correlation), the area of Northern Hemispheric polar vortex (PVA, positive correlation) in spring, PVA1 in spring (positive correlation) and PVA1 in previous autumn (positive correlation). These results imply that the influence of circulation factors on different time scales is different. In addition, besides PNA, NP and PVA1, it seems that ENSO and western Atlantic pattern (WA) maybe have some moderate influence on the dust storm frequency. Interannually the variance of spring dust storm frequency explained by 12 atmospheric circulation factors is 65.3%.

Key words: North China; Interannual variability; Spring dust storm; Atmospheric circulation factor