

中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化^{*}

康杜娟^{①②**} 王会军^①

(^① 中国科学院大气物理研究所 NZC/LASG, 北京 100029; ^② Environmental Fluid Mechanics Laboratory, Stanford University, Stanford CA 94305, USA)

摘要 分析了中国北方沙尘气候的时间变化特征, 重点研究与沙尘气候的年代际变化相应的冬、春季气候和大气环流异常特征. 文章揭示: 在沙尘活动频繁年代(1956~1970)和稀少年代(1985~1999)冬、春季的气候和大气环流有显著差别. 与前一个年代相比, 在后一个年代里冬季极涡异常加深, 50°N 附近的西风增强, 东亚极锋锋区位置偏北, 东亚大槽偏弱; 西伯利亚高压北部及中心强度变弱, 阿留申低压明显升压; 东亚季风强度变弱, 影响中国的冷空气势力减弱, 冬、春季大风天气变少. 同时中国北方广大地区冬季温度显著升高, 西北和内蒙古的沙源地区春季降水明显增多. 研究还发现, 在年际尺度上, 中国北方的沙尘活动频次与前冬的西风指数、北极涛动指数呈显著的负相关, 与冬、春季东亚季风指数呈显著的正相关.

关键词 北方沙尘暴 气候形势 年代际变化

1 引言

沙尘天气是一种严重破坏生态环境的灾害性天气. 频繁的沙尘天气不但会造成源区土壤和养分的过度流失, 加剧土地的沙漠化; 而且会对广大下游地区造成严重的环境污染, 给工农业生产、交通运输和人民的日常生活都带来极大危害^[1~4]. 沙尘天气还会影响到辐射能的收支平衡, 从而导致中尺度到大尺度的气候调整^[5~7]. 中国的沙尘天气主要分布在西北和华北地区, 北方的广大地区都是其主要影响区, 但沙尘的影响并不局限于此, 中国沿海地区乃至东亚

及太平洋地区都受到一定影响^[8~11].

近年来中国北方地区频繁发生强沙尘暴灾害, 影响范围大、影响程度剧烈^[12,13], 例如 2002 年 3 月 18~22 日出现的沙尘天气过程影响了中国北部和东部的绝大部分地区, 对人民生活造成了极大的负面影响. 沙尘暴问题已引起了政府和科学界的高度重视, 也受到了国内外公众的广泛关注. 这个问题已成为中国西北华北生态环境建设及中国广大地区环境污染治理必需面对的重大问题.

20 世纪 50~90 年代, 中国北方地区沙尘天气的

2003-06-20 收稿, 2005-07-18 收修改稿

^{*} 中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX3-SW-221)、国家自然科学基金项目(批准号: 40125014 和 40475037)资助

^{**} E-mail: kangdj@stanford.edu

发生频数呈波动减少之势, 尤其 70 年代中后期开始, 沙尘天气发生频率明显降低^[14,15]. 从宏观上看, 沙尘气候的这种变化与冬、春季的气候和大气环流异常状况密切相关. 20 世纪 70 年代末期, 全球大气环流发生了明显的年代际变化^[16,17], 东亚季风环流在此次转变之后减弱了, 温度和降水也都发生了明显的变化. 而这些因素都对沙尘天气的发生、发展有着直接的影响, 因此正确的认识与沙尘气候变化相伴随的气候和大气环流异常将具有重要的意义. 如果能对后者有一个提前的预测, 就会对沙尘气候演变趋势有一个基本的把握, 给社会和经济以及人民的生活带来重大的益处. 本文的目的正在于揭示中国北方沙尘气候的年代际变化特征, 并分析和研究与之相应的冬、春季气候和大气环流异常, 认识气候和大气环流的年代际变化对沙尘气候变化的影响.

本文所采用的分析资料主要包括以下几个部分:

(1) 北京、天津等站 1954~1999 年的沙尘天气频次(日数)资料. 本文的研究中将浮尘、扬沙和沙尘暴统称为沙尘天气.

(2) 美国国家大气科学研究中心和环境预报中心(NCEP/NCAR)的全球大气再分析月平均网格资料(1948~1999 年), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向有 17 层, 从 1000~10 hPa.

(3) 中国气象局的全国 160 个台站 1951~1999 年月平均降水资料.

2 中国北方沙尘气候的时间分布特征

中国北方沙尘气候的季节分布基本上是春多秋少. 这主要是因为春季气温回暖解冻后地表土质疏松, 易起沙; 大气层结不稳定度增大; 北部地区冷锋活动频繁, 多大风等. 图 1(a)是北京 46 年(1954~1999 年)平均的沙尘天气日数的逐月变化曲线, 可见沙尘暴、扬沙及浮尘天气都是主要发生在春季(3~5 月), 冬季次之, 秋季最少. 天津站的结果与北京基本一致(图略), 周自江研究的其他 5 个代表站扬沙和沙尘暴的季节分布也有类似结果^[9]. 基于沙尘气候的这种季节分布特征, 我们将主要对春季和前冬的气候和大气环流变异特征进行研究分析.

图 1(b)给出了北京地区 1954~1999 年沙尘天气日

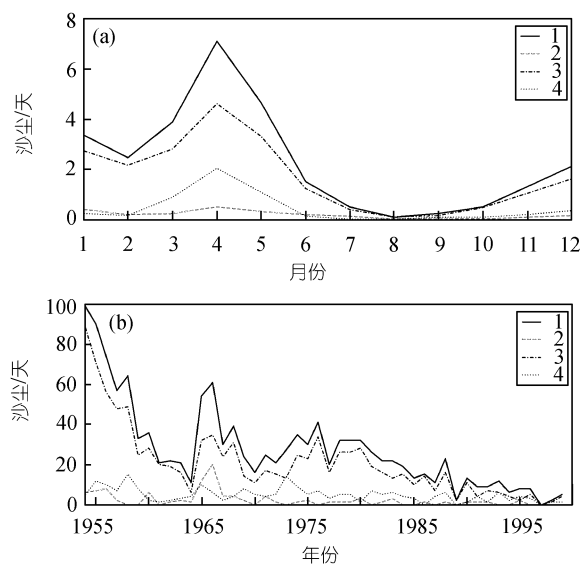


图 1 北京 1954~1999 年沙尘天气日数的逐月分布(a)和年代际变化(b)

1. 沙尘天气; 2. 沙尘暴; 3. 扬沙; 4. 浮尘

数的年际变化曲线, 曲线显示沙尘天气日数的总体趋势为减少, 70 年代中期以前, 沙尘天气很频繁, 70 年代中后期开始, 沙尘天气发生频率明显降低, 80 年代后期和 90 年代沙尘天气日数达到相当低的值. 这一趋势与中国北方平均沙尘天气日数的变化趋势十分一致^[18].

通过功率谱分析, 结果如图 2 所示, 北京沙尘天气的发生频次有三个超过 95%信度的谱峰: 1 年, 10 年左右和 20 年左右. 这进一步说明了沙尘天气发生频率有显著的年代际变化特征. 同时小波分析的结果显示, 在年代际变化的时间尺度上有两个通过 95%信度检验的时间段: 1954 年到 70 年代初; 80 年代中期到 1999 年.

根据以上分析, 本文选取 1956~1970 年和 1985~1999 年这两个时间段分别作为沙尘天气活动频繁和稀少年代的代表. 下面将通过研究这两个时段冬、春季气候和大气环流场的主要差异来探讨影响沙尘天气频次变化的因子及其变动规律. 以下文中提到的冬季均指当年的 1, 2 月与前一年 12 月这三个月的平均, 春季指当年 3~5 三个月的平均. 各变量的气候态为 1948~1999 年 52 年的平均.

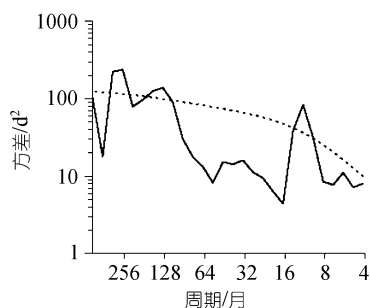


图2 北京沙尘天气日数的功率谱密度
虚线是 95% 信度曲线(红噪音背景谱)

3 极涡、西风以及东亚大槽的变化

图 3, 4 给出了两个时段(1956~1970 年平均与 1985

~1999 年平均)北半球冬季 500 hPa 位势高度及平均海平面气压距平的分布情况. 可以明显的看到前一个时段极涡强度异常偏弱, 环绕极涡的中纬地区为负距平; 后一个时段则恰好相反, 极涡加深, 环绕极涡的中纬地区为正距平. 空间分布都呈现出一种大致的纬向对称结构. 在全球的分布图上(图略)可以看到前一个时段正距平区主要在两个半球的高纬地区, 中纬乃至热带地区均为负距平; 后一个时段则与此相反. 从两个时段冬季平均的位势高度差异图(图 5(a))上可以看到, 北半球变化最显著的区域是东亚及西、北太平洋地区, 东亚大陆的高纬地区 500 hPa 高度明显降低, 而 50°N 以南的东亚及西、北太平洋地区则明显增高, 这表明后一个时段比前一个时段冬季 50°N 附近

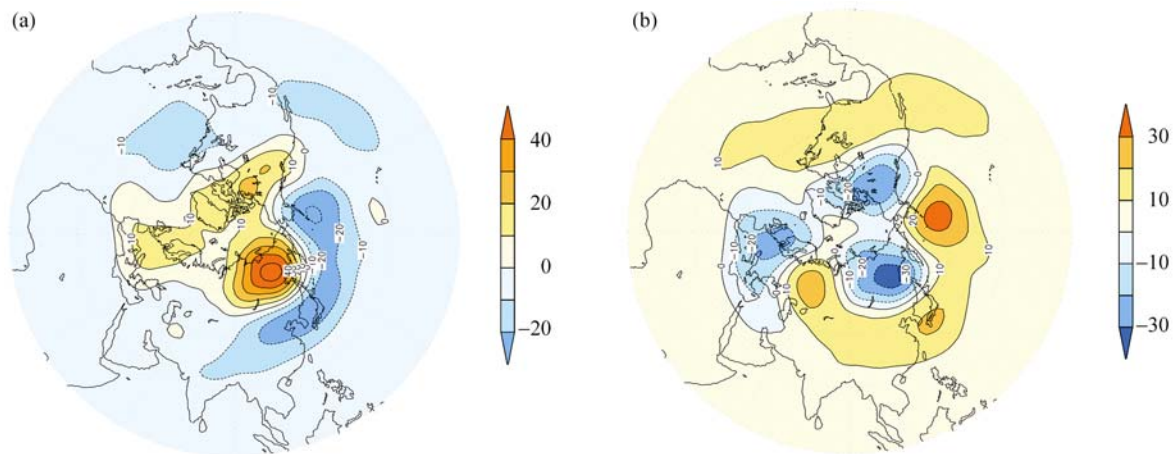


图3 1956~1970 年(a)和 1985~1999 年(b)北半球冬季 500 hPa 平均位势高度距平的分布(gpm)

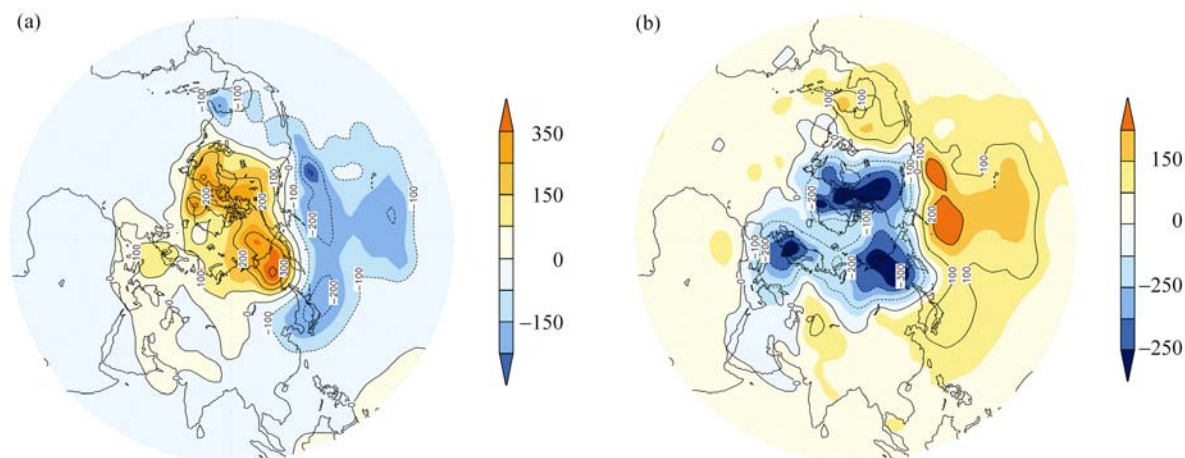


图4 1956~1970 年(a)和 1985~1999 年(b)北半球冬季平均海平面气压距平的分布(Pa)

的西风增强, 东亚极锋锋区位置偏北, 东亚大槽偏弱。

两个时段的冬季海平面气压距平分布情况也有明显不同, 见图 4, 前一个时段北极地区为正距平, 中纬为负距平; 后一个时段则与此相反。在差异图上可以看到(图 5(b)), 冬季两个时段的差异在两极、东亚、太平洋、以及赤道附近显著。后一个时段, 冬季东亚大陆的近极地区降压明显, 西伯利亚高压中心强度减弱, 南部稍有增强, 使得进入中国的冷空气偏弱, 龚道溢等人^[19]的研究表明近 20 多年, 西伯利亚

高压中心强度确有显著的减弱。阿留申低压有较明显升压, 其西侧的西北气流对中国影响减弱。这些因素都不利于中国北方地区沙尘天气的发生。

由以上的分析可见沙尘天气活动频繁年代与稀少年代, 前冬的大气环流(500 hPa 和地面)有很大差异, 极涡、东亚大槽和西风强度的差异尤为显著, 西伯利亚高压和阿留申低压也有很大不同, 这些都使得冬季影响中国的冷空气活动有明显差异。

另外值得注意的是这两个年代的大气环流差异

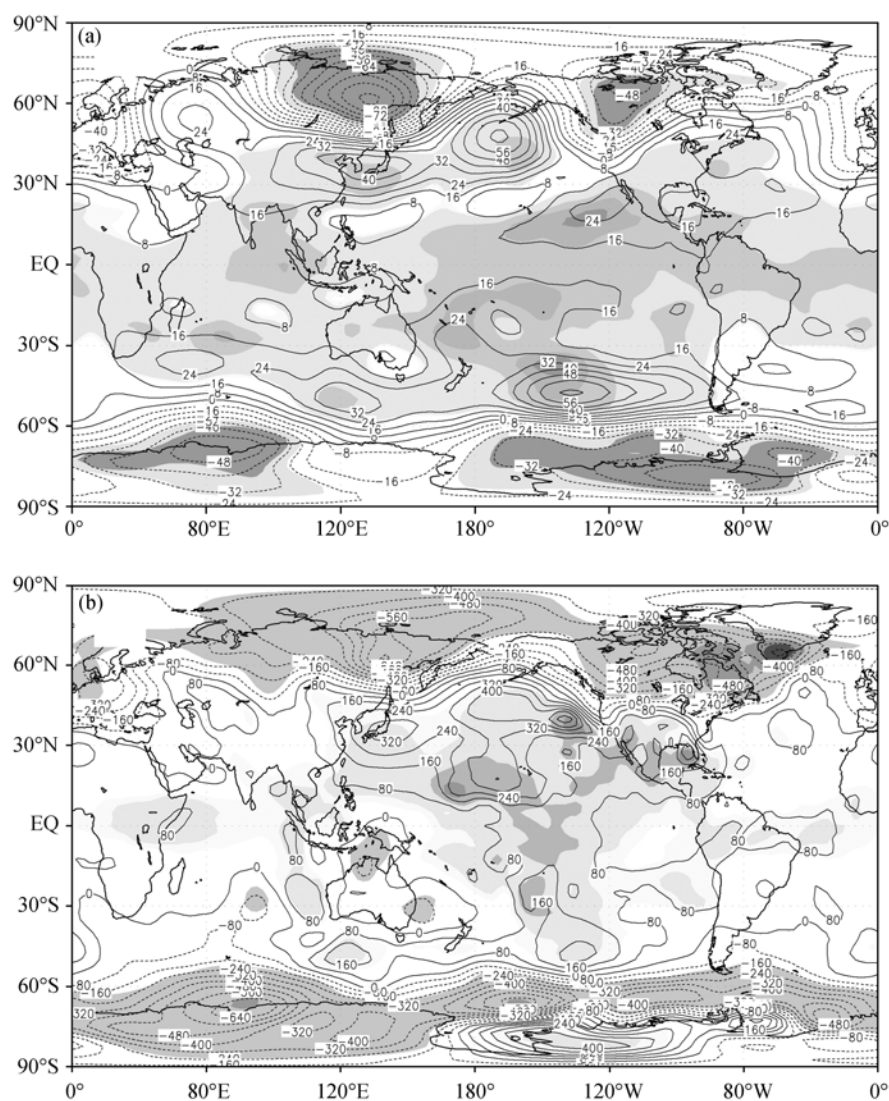


图 5 1985~1999 年平均与 1956~1970 年平均的冬季环流场的差值分布

(a) 500 hPa 位势高度(gpm); (b) 海平面气压(Pa). 阴影区表示信度超过 95% 的显著区, 检验方法为 t 分布检验

具有全球性. 从图 5 我们可以看到, 在沙尘天气稀少年代, 南半球南极 500 hPa 高度明显降低, 中纬地区明显增高, 带状分布比北半球明显. 热带地区的高度均增大, 尤其是中东太平洋地区变化显著. 海平面气压在南极和澳大利亚地区有十分显著的负差异, 而整个太平洋地区、热带印度洋有十分显著的正差异. 这说明中国北方沙尘暴的年代际减弱趋势是与全球范围的大气环流异常同时出现的.

图 6 还进一步给出了北京沙尘天气频次、西风指数以及北极涛动(AO)指数的年际变化曲线. 此处西风指数根据龚道溢等人^[20]的定义, 用 40°N 和 65°N 纬圈平均位势高度(500 hPa)的差来表示, 即 $H_{40^{\circ}\text{N}} - H_{65^{\circ}\text{N}}$, 高指数时西风强且位置偏北. AO 指数根据 Thompson 等人^[21]的定义, 为冬季海平面气压的经验正交函数分析(EOF)所对应的时间系数, 高指数时北极海平面气压异常偏低. 从图上可以看出沙尘天气频次与西风指数和 AO 指数均有很好的反向变化关系, 与二者的相关系数达 -0.36 和 -0.43, 分别超过 95% 和 99% 信度水平. 这表明沙尘天气的活动与西风和极涡强度在年际变化的时间尺度上也有着很好的负相关关系.

4 流场和东亚季风的变化

Iwasaka 等^[22]指出沙尘的移动轨迹与 850 hPa 的风向基本一致. 中国北方春季的沙尘暴主要沿着冷空气影响中国的路径向南和东南移动. 图 7 显示了两个时段春季风场的主要差异, 可以看到中国北方和

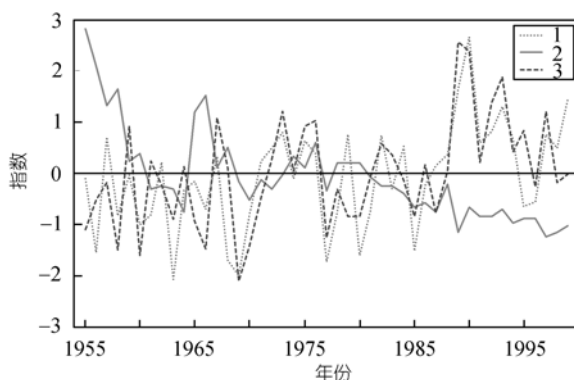


图 6 标准化的西风指数(1)、沙尘天气日数(2)和 AO 指数(3)的年际变化分布

东部沿海地区在沙尘天气稀少年代西风和西北风减弱了, 这不利于沙尘天气的发生和沙尘的输送.

在图 7 三个层次的分布图上, 我们都可以注意到东北亚地区有一个明显的反气旋异常, 说明这是一个具有准正压结构的深厚影响系统, 其西侧的偏南和东南异常气流加强了中国东部西风和西北风的减弱. 另外, 在 500 hPa 和 200 hPa 的风场差异图上还发现这个异常反气旋的南部, 即菲律宾以东的西太平洋地区, 还有一个异常气旋, 二者共同作用于其西侧的中国, 使得中国东部西风和西北风的减弱更加明显. 特别值得注意的是, 200 hPa 风场差异图上, 东亚沿岸的经度上有一个异常波列, 即澳大利亚北部反气旋-菲律宾以东气旋-东北亚反气旋, 这一波列与

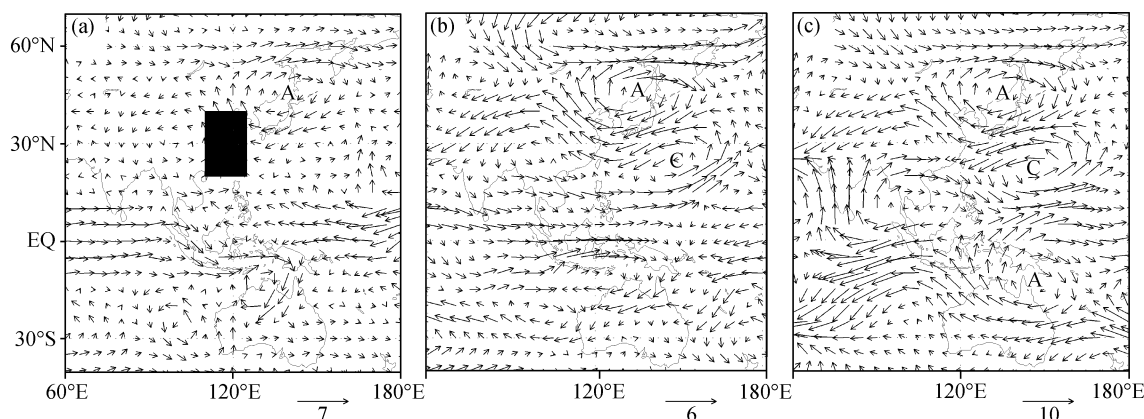


图 7 1985~1999 年平均与 1956~1970 年平均的春季风场的差值分布(m/s)

(a) 850 hPa; (b) 500 hPa; (c) 200 hPa. A 代表反气旋异常; C 代表气旋异常. 阴影部分为东亚季风区(110°~125°E, 20°~40°N)

南半球绕极低压带的变化(南极涛动)相关联。这再次说明与中国北方沙尘暴年代际变化相应的大气环流变化具有全球性。

图 7(a)中阴影部分为东亚季风区($110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$), 可以看到在这个范围内 850 hPa 东南风异常十分明显。王会军^[23]将此范围内 850 hPa 风速异常的平均值定义为东亚季风指数(EAMI), 下面就采用这个指数来研究沙尘天气发生频次与东亚季风的关系。

图 8 是春季的 EAMI 与北京沙尘天气频次的年际变化曲线, 二者的相关系数为 0.47, 达到了 99% 的信度。冬季的 EAMI 与沙尘天气频次也有很好的正相关关系(图略), 二者的相关系数为 0.40, 也达到了 99% 的信度。

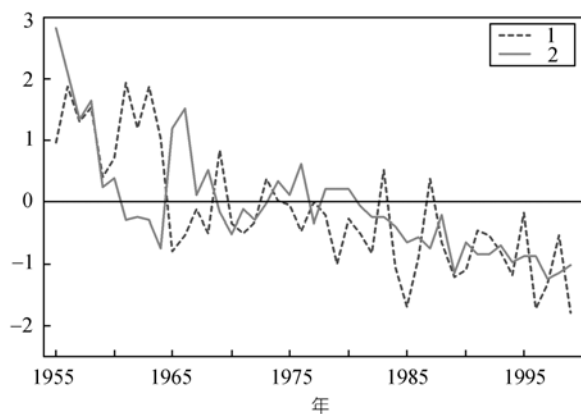


图 8 标准化的东亚季风指数(1)和沙尘天气日数(2)的年际变化分布

东亚季风指数(EAMI) 定义为图 7 阴影区内 850 hPa 风速异常的平均值

5 温度和降水的变化

以往的一些研究表明沙尘天气的发生频次与前冬温度呈较好的负相关^[24,25]。在冬季地面温度差异的分布图(图 9(a))上可以看出这种负相关, 中国除东北北部和青藏高原西北小部分, 其余地区均为明显的正距平。这说明沙尘天气稀少的年代中国冬季变暖, 尤其是西北、华北地区增温显著, 但东北北部却有明显的降温。

降水是另一个影响沙尘天气发生的重要因子。从降水场的差异分布来看, 春季降水的影响较大, 如

图 9(b)所示, 在沙尘天气稀少年代, 中国北方大部分地区的春季降水增多, 尤其是西北和内蒙的沙源地区降水明显增多。适宜的降水可湿润地表, 抑制沙尘的飞扬, 不利于沙尘天气的发生。

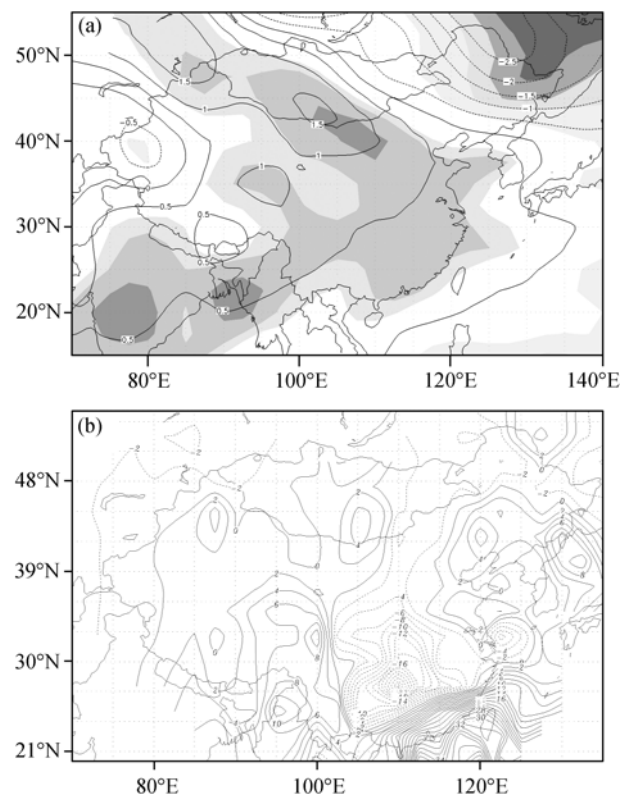


图 9 1985~1999 年平均与 1956~1970 年平均的(a)冬季气温($^{\circ}\text{C}$)和(b)春季降水场(mm)的差值分布

图(a)中的阴影区表示信度超过 95% 的显著区, 检验方法为 t 分布检验

6 小结与讨论

中国北方沙尘天气活动具有明显的年代际变化特征, 而这种变化有着强烈的年代际大气环流异常背景。通过以上分析, 可以看到沙尘天气活动频繁年代与稀少年代主要存在以下几个方面的显著差别:

(1) 前冬的位势高度和气压场分布都有很大差异。500 hPa 高度场上极涡、东亚大槽和西风强度的差异尤为显著, 在沙尘天气稀少的年代, 极涡异常加深, 50°N 附近的西风增强, 东亚极锋锋区位置偏北, 东亚大槽偏弱。海平面气压场分布也有很大不同, 西伯

利亚高压北部及中心强度减弱,阿留申低压有较明显升压,其西侧的西北气流对中国影响减弱。

(2) 流场差异也很明显,在沙尘天气稀少的年代,中国北方和东部沿海地区冬、春季均出现了明显的西风和西北风减弱,东亚季风环流变弱,影响中国的冷空气势力减弱。东北亚的异常反气旋系统对沙尘暴活动的减弱至关重要,该系统具有准正压结构。

(3) 这两个年代的大气环流差异具有全球性。

(4) 温度和降水的分布也有明显不同。沙尘天气稀少年代中国冬季变暖,尤其是西北、华北地区增温显著,但东北北部却有明显的降温;中国北方大部分地区的春季降水增多,尤其是西北和内蒙古的沙源地区降水明显增多。

本研究还发现,在年际变化的尺度上,沙尘天气频次与前冬的西风指数和北极涛动指数呈显著的负相关,与前冬和春季东亚季风指数呈显著的正相关。可见冬、春季气候和大气环流异常对中国北方沙尘气候的变化趋势和年际变化均有很大影响,如果能根据这些变化规律找到一个描述沙尘暴季节气候和大气环流异常的综合指数,将对相应的跨季度数值预测具有重要的意义,这是我们今后研究的一个方向。

参 考 文 献

- Goudie A, Middleton N J. The changing frequency of dust storms through time. *Climatic Change*, 1992, 20: 197~225[DOI]
- 王式功, 杨 民, 祁 斌, 等. 甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 354~358
- 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远. 关于中国华北沙尘天气的成因与治理对策. *地理学报*, 2000, 55(5): 513~521
- 高庆先, 苏福庆, 任阵海, 等. 北京地区沙尘天气及其影响. *中国环境科学*, 2002, 22(5): 468~471
- Idso S, Brazel A. Planetary radiation balance as a function of atmospheric dust: Climatological consequences. *Science*, 1977, 198: 731~733
- Littmann T. Dust storm frequency in Asia: climate control and variability. *Inter J Climatology*, 1991, 11: 393~412
- 沈志宝, 魏 丽. 中国西北大气沙尘对地气系统和大气辐射加热的影响. *高原气象*, 1999, 18(3): 425~435
- Shaw G E. Transport of Asian desert to the Hawaian islands. *J Appl Meteor*, 1980, 19: 1254~1259[DOI]
- 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 9~17
- 邱新法, 曾 燕, 缪启龙. 中国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径. *地理学报*, 2001, 56(3): 316~322
- 庄国顺, 郭敬华, 袁 惠, 等. 2000 年中国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响. *科学通报*, 2001, 46(3): 191~197
- 张晓龙. 近年来中国沙尘暴发生特点、成因及其防治对策. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(3): 31~36
- 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. *第四纪研究*, 2002, 22(4): 374~380
- 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106~111
- 全林生, 时少英, 朱亚芬, 等. 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因. *地理学报*, 2001, 56(4): 477~485
- Wang H J. The Weakening of the Asia Monsoon Circulation after the End of 1970's. *Adv Atmos Sci*, 2000, 18(3): 376~386
- 曾红玲, 高新全, 戴新刚. 近 20 年全球冬、夏季海平面气压场和 500hPa 高度场年代际变化特征分析. *高原气象*, 2002, 21(1): 66~73
- Weihong Qian, Lingshen Quan, Shaoyin Shi. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *J Climate*, 2002, 15: 1216~1229[DOI]
- 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. *地理学报*, 1999, 54(2): 125~133
- 龚道溢, 王绍武. 北半球冬季纬向平均环流的结构及对中国气候的影响. *地理学报*, 2001, 21(2): 108~112
- Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Res Lett*, 1998, 25: 1297~1300[DOI]
- 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
- Wang H J. Instability of the East Asian Summer Monsoon-ENSO Relations. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19(1): 1~11
- 张德二. 中国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. *中国科学, B 辑*, 1984, 3: 278~288
- 邹旭恺, 王守荣, 陆均天. 气候异常对中国北方地区沙尘暴的影响及其对策. *地理学报*, 2000, 55(增刊): 169~176