

中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析^{*}

张 莉 任国玉

(中国气象局国家气候中心, 北京, 100081)

摘 要

利用地面气象观测资料, 分析了中国北方 1954~2001 年年、季沙尘暴发生日数的演变规律及其与风速、相对湿度、降水、气温和干燥度的相关关系。结果表明, 中国北方沙尘暴发生日数在 1954~2001 年呈波动下降的趋势, 春季下降趋势最明显。沙尘源区的气候要素对北方沙尘暴发生日数具有比较明显的影响, 其中风是影响较大的因子。平均风速和大风频率增加(减少) 均有(不) 利于沙尘暴天气的形成。气温与沙尘暴日数呈显著的反相关关系, 反映了北方温度升高可能通过大气环流间接地抑制了沙尘暴的发生。降水增加对沙尘暴发生也有一定抑制作用, 尤其春季和前冬沙尘源区降水多寡对沙尘暴的发生有着重要的影响。北方沙尘暴频数与沙尘源区的相对湿度或干燥指数也存在较明显的相关关系。在过去的近 50 a 内, 造成中国北方沙尘暴频率显著下降趋势的直接自然原因是: 沙尘源区和发生区平均风速和大风日数的减少、主要沙尘源区降水量特别是春季和前冬降水量的增加、以及由于源区降水增加引起的大气和土壤湿润程度的改善。

关键词: 沙尘暴, 风速, 降水, 气温, 气候变化, 中国北方。

1 引 言

20 世纪 20 年代起国际上就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策等方面的研究, 中国从 70 年代也开始了沙尘暴的研究^[1]。特别是 20 世纪 90 年代以来, 中国学者对沙尘暴的源区、时空特征和天气气候成因等方面颇为关注^[2~10]。这些研究发现, 沙尘暴的形成需要有大风、沙尘物质和不稳定的空气状态等 3 个基本条件^[9, 10]; 沙尘暴是多种因素共同作用的产物, 尤其是特强沙尘暴的发展, 在具备宏观的气候和下垫面条件的前提下, 还需有利的环流形势和天气系统相配合^[3]; 中国的沙尘暴区属于中亚沙尘暴区的一部分, 主要发生在北方, 总的特点是西北多于东北地区, 平原(或盆地) 多于山区, 沙漠及其边缘多于其他地区; 中国沙尘暴春季最多, 约占全年总数的 50%, 夏季次之, 秋季(新疆地区为冬季) 最少^[3], 并有工作系统地分析了这种季节变化的原因^[4]。

近年来对沙尘暴的气候学分析表明, 过去的半个世纪中国北方大部分地区的沙尘暴日数趋于减

少^[5~7]。已有研究对沙尘暴的发生与天气气候条件的关系进行了一些分析^[7, 8]。但是, 对于中国北方沙尘暴发生及其频数变化的主要成因, 目前仍是一个需要继续研究的科学问题。本文利用中国地面观测资料, 重点对沙尘暴的演变趋势及其与平均风速、平均气温、降水量、平均相对湿度以及干燥度的关系进行了分析。另外, 狭义的沙尘暴则分为沙暴和尘暴, 沙暴的起沙风速是 5 m/s, 尘暴则更小^[11]。因此, 本文分析了风速大于 5 m/s 天数与沙尘暴发生日数的关系。以期对进一步了解北方沙尘暴演变规律、变化原因有所帮助, 并希望为沙尘暴未来演变趋势的预测奠定基础。

2 研究区域

中国北方是沙尘暴的主要发生和影响区, 因此本文重点分析 32.5~50°N 范围内沙尘暴的演变趋势及其原因。在这个区域内, 以 2.5°×2.5°的经纬度网格为基础, 计算获得了北方区域平均的年、季沙尘暴发生日数时间序列。考虑到沙尘源区的气候要素对沙尘暴的发生可能有关键作用, 且国内沙尘暴

^{*} 初稿时间: 2003 年 7 月 25 日; 修改稿时间: 2003 年 10 月 15 日。
资助课题: 国家“十五”科技攻关项目“全球与中国气候变化的检测和预测(2001BA611B-01)”, 科技部公益项目“我国西北地区生态环境环境监测、预测方法研究(WY-2001-02)”及 IPCC 专项。

天气的沙尘源区主要分布在北方的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地及其周围地区^①。尤其是塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠可能是中国沙尘暴的主要沙尘源区。

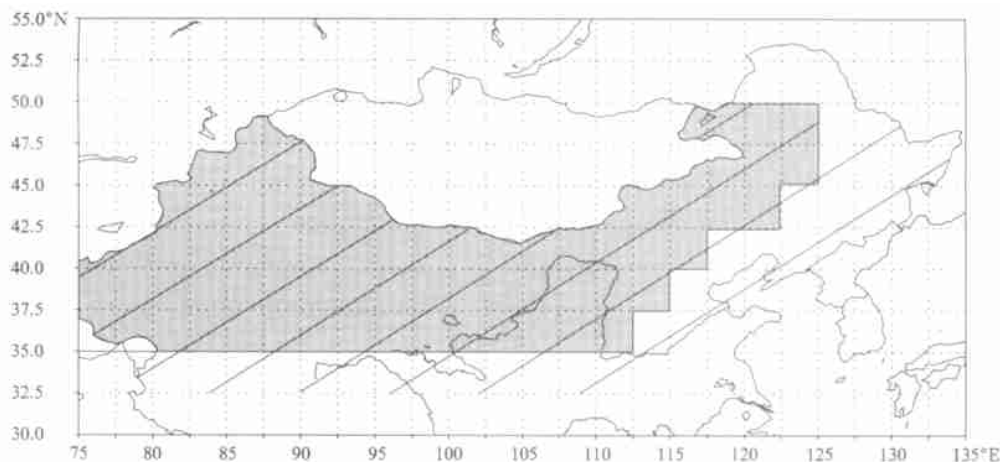


图 1 研究区域

(斜线区是沙尘暴发生次数的计算区域,阴影区为区域平均气候要素的计算区域)

3 资料和方法

所用资料来自国家气象中心气候资料室。这些资料包括 1954~2001 年中国北方 399 站的沙尘暴日数和相对湿度的月资料,风速、降水和气温的日资料。由月资料计算季节平均,由风速日资料统计大于 5 m/s 有效起沙风速天数,利用降水和温度的日资料计算年干燥度。四季划分按气象季节划分方法,即前一年 12 月~当年 2 月为冬季,3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季。对于序列中存在缺测的部分,资料处理中进行了剔除。

计算了 1954~2001 年各台站的干燥度序列,并计算了其线性趋势倾向。分析了年平均气温、年平均相对湿度、年降水量、年平均风速、年大于 5 m/s 有效起沙风速天数和春季大于 5 m/s 有效起沙风速天数等与北方区域平均沙尘暴年发生日数之间的相关关系,并进行了信度检验。其中,干燥度采用了张宝的计算方法。其定义为:日平均气温大于等于 10℃期间的积温与同期降水量之比乘以经验系数 0.16,即:

$$K = 0.16 \times \sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}} / R$$

因此,本文选择了如图 1 所示的阴影区域,作为沙尘源区的主要分布范围,并计算该区内对应气候要素的区域平均时间序列,以分析北方沙尘暴发生与源区各气候要素的关系。

式中 R 为降水量。

气候要素区域平均时间序列的建立采用经纬度网格面积加权平均方法^[12]。本文采用 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的经纬度网格点,将每个格点内某气候要素值求算术平均,再根据网格面积做加权平均,得到逐年区域平均值。假设共有 n 个 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格,其中第 i 个网格内有 k_i 个参与计算的数据 x_j ($j = 1, 2 \dots k_i$),网格中心点纬度为 a_i ,考虑网格面积大小进行加权平均,则某要素 x 的区域平均 $\bar{x}$ 为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (\cos a_i \times \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} x_j)}{\sum_{i=1}^n \cos a_i}$$

本文计算了气候要素时间序列的线性趋势。将时间序列看成时间的一元线性回归函数—— $X = a + bT$,其中 b 为倾向值, b 的符号表示序列的趋势倾向, $b > 0$ 时,说明随时间 T 的增加, X 呈上升趋势; $b < 0$ 时,说明随时间 T 的增加, X 呈下降趋势。 b 值的绝对值大小则反映了上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向程度;相关系数 r 用来判断变化趋势的程度是否显著;确定显著水平 α ,若 $|r| > r_{\alpha}$,表明 X 随时间 T 的变化趋势是显著的,否则

① 中国沙尘暴网, <http://www.duststorm.com.cn>

表明变化趋势不显著。

4 结果及分析

4.1 中国北方沙尘暴年、季发生日数时间变化

1954~2001 年中国北方沙尘暴的年发生日数呈波动下降的趋势,并于 1997 年重又开始上升(图 2)。这一结果与前人研究结果完全相似^[5~7]。就北方整体而言,沙尘暴年发生日数的减少趋势非常明显,从 50 年代中期的平均 10 d 左右减少到目前的 3 d 左右,下降 2 倍还多;春、冬和夏季的沙尘暴发生日数序列与年序列变化趋势基本相似;其中春

季减少趋势最明显,近 50 a 沙尘暴日数减少约 2 倍,从平均每年 6 d 左右降至不足 2 d;秋季沙尘暴发生日数很少,其长期变化趋势亦不明显。从图 2 还可以看出,春季是沙尘暴的高发期,1954~2001 年春季沙尘暴日数在全年沙尘暴总日数中所占比例达 51%;夏季次之,占 27%;冬季约 13%;秋季最少,不及年沙尘暴总日数的 8%。因此,从整体上看,中国北方的沙尘暴天气日数近 80% 发生在春和夏季,而冬、秋季很少。这一季节特点的形成主要和大气层结的年变化、大气环流形势的季节变化有关^[4]。

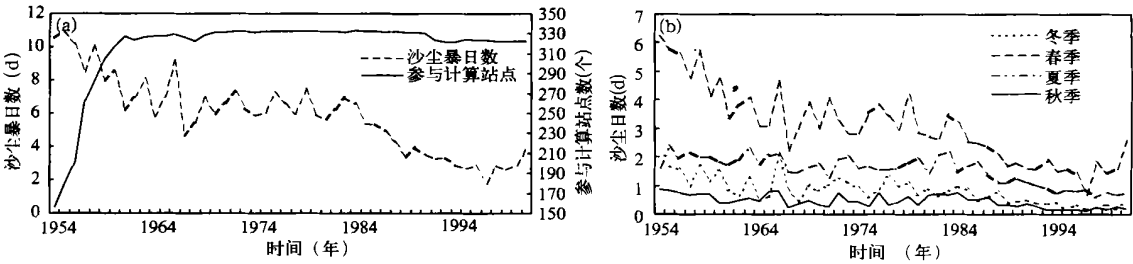


图 2 1954~2001 年沙尘暴年、季发生日数演变趋势
(a. 1954~2001 年中国北方地区平均年沙尘暴日数及参与计算站数,
b. 1954~2001 年中国北方平均季沙尘暴日数)

4.2 中国北方沙尘暴年发生日数与气候要素的关系

相关分析表明(表 1),沙尘暴年发生日数与沙尘源区平均风速之间存在显著正相关,通过了显著水平为 0.01 的相关检验。从沙尘暴发生日数和平均风速时间序列对比来看(图 3),二者演变趋势相当一致。因此,风速大小、尤其是大风天气对沙尘暴的发生和传播起着重要作用。沙尘暴发生日数与平均温度之间存在较明显的负相关,可通过 0.05 的相关性检验。从图 4 沙尘暴发生日数与平均气温序列比较也可以看出,沙尘暴日数与平均气温的变化趋

势基本相反,尽管年际波动在有些年份出现例外。这种比较显著的负相关可能反映了温度的一种间接影响,即北方较明显的升温导致地面气压梯度减小,从而使平均风速和大风日数减少,沙尘暴发生频率也降低。沙尘暴日数与干燥度之间呈正相关,相关系数为 0.24,即源区相对干旱的年份更易于发生沙尘暴,但这个关系不是很显著。而多数年份的沙尘暴发生日数与前一年的干燥度之间有着更好的对应关系,相关系数可达到 0.31,通过了 0.05 显著水平检验,说明沙尘源区前期的干湿状况对沙尘暴的产生有一定影响。

表 1 中国北方沙尘暴年发生日数与气候要素相关关系表

相关系数	平均相对湿度	降水量	平均风速	大于 5 m/s 风速天数	平均温度	干燥度
年序列	0.14	0.24	0.73	0.65	-0.49	0.24
距平百分率序列	0.005	-0.04	0.59	0.79	-0.45	-
当年沙尘暴日数与 前一年气候要素滞后相关	0.14	0.05	0.68	0.59	-0.46	-

沙尘暴年发生日数与同年和前一年源区平均降水量和相对湿度之间尽管也呈现负相关,但相关系数均较小,没有通过显著性检验。这可能与文中定义的源区范围偏东有关,使得东南部降水量明显减

少区域包括在源区气候要素统计范围内,在一定程度上弱化了源区平均降水量波动和趋势变化信号。实际上,在过去的 50 a,作为沙尘暴主要源区的西北地区地区和蒙古国降水量均呈较明显增加趋势^[13],这和

中国北方沙尘暴日数整体减少趋势是对应的。

分析北方各台站沙尘暴发生日数与本站年降水量、平均相对湿度的相关关系(图 4a, b)发现,北方大部分地区,特别是沙尘源区内沙尘暴发生日数与降水量和相对湿度之间存在负相关,即各地沙尘暴发生日数随本地降水和相对湿度的增加而减少。其中部分站的这种负相关在统计上是显著的,尤其与相对湿度相关显著性更好。这说明北方大部分地区降水的增加对本地沙尘暴的发生起到了较明显的抑制作用。然而,由于华北中部和东北东中部的少

部分台站处于国内外主要沙尘源区的下游,其当地的沙尘天气主要源自沙尘的动力输送,当地降水和相对湿度变化对当地沙尘天气的影响并不明显,因此上述负相关不复存在,甚至转变为正相关。沙尘暴发生日数与干燥度的单站相关分布型式(图 4c)同降水量的大体相似,但符号相反。西北广大地区和内蒙古中西部地区干燥度与沙尘暴发生日数之间存在正相关,而这些地区也正是主要的沙尘源区,说明源区干燥度的降低对本地沙尘暴的发生也有一定的抑制作用。

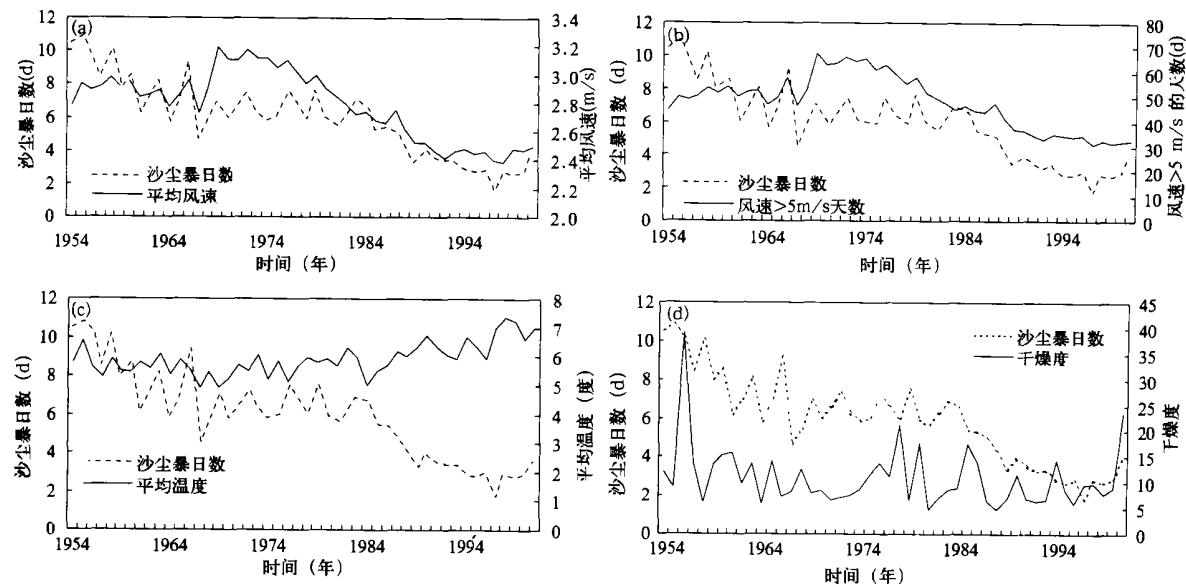


图3 中国北方平均沙尘暴日数与沙源区平均风速(a)、风速大于5 m/s 天数(b)、平均温度(c)和干燥(d)的相关关系

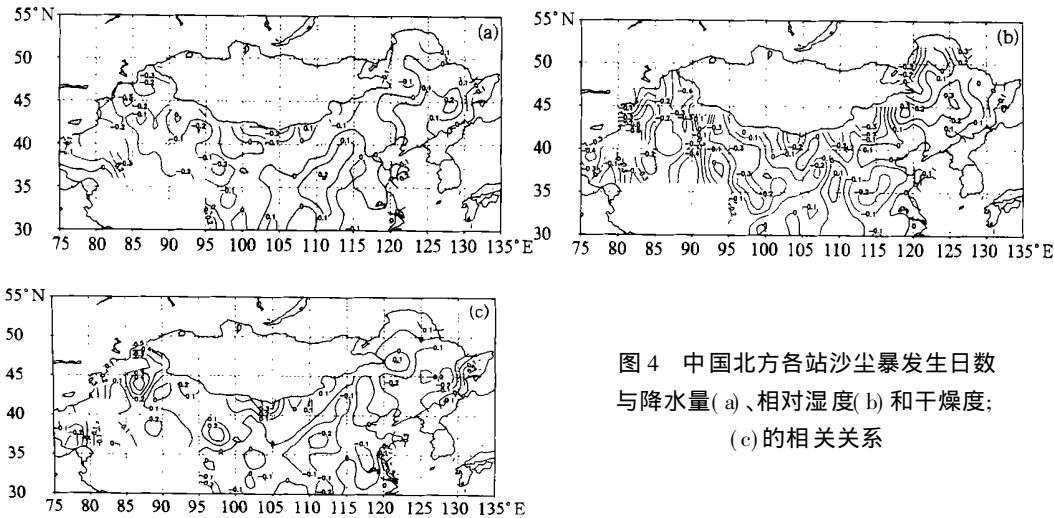


图4 中国北方各站沙尘暴发生日数与降水量(a)、相对湿度(b)和干燥度;(c)的相关关系

4.3 北方沙尘暴季节发生日数与气候要素的关系

分析各季节沙尘源区平均相对湿度、降水量、平

均风速、大于5 m/s 有效起沙风速天数和平均气温与北方平均沙尘暴发生日数之间的相关关系(表2)

发现, 各季平均沙尘暴发生频数与源区平均风速之间存在正相关, 相关系数通过 0.01 显著水平; 春季沙尘暴与大于 5 m/s 有效起沙风速之间也存在较高正相关, 且该相关在 0.01 水平上是显著的。各季沙

尘暴发生日数与源区平均气温均呈较显著的负相关。但是, 与年沙尘暴日数相似, 北方平均的各季沙尘暴日数与源区平均降水量和相对湿度之间的关系并不好。

表 2 北方各季平均沙尘暴发生日数与气候要素相关关系

季节	平均温度	平均相对湿度	降水量	平均风速	春季大于 5 m/s 风速天数
冬季	- 0.38	- 0.03	0.24	0.86	-
春季	- 0.46	0.07	0.07	0.66	0.62
夏季	- 0.30	- 0.23	- 0.09	0.66	-
秋季	- 0.34	- 0.19	- 0.01	0.57	-

图 5 表示北方春季单站的沙尘暴发生日数与本站降水量和相对湿度的相关系数。春季的沙尘暴发生日数与当季降水之间存在负相关, 即春季降水的增加有助于抑制沙尘暴发生; 在主要沙源区, 与前季

(冬季) 的降水量之间也存在负相关。另外, 对春季单站沙尘暴日数和前季(冬)与当季(春)总降水量的相关分析发现, 二者有比较显著的负相关关系(图 6)。因此, 冬春季降水增加, 尤其是沙尘源区降水的

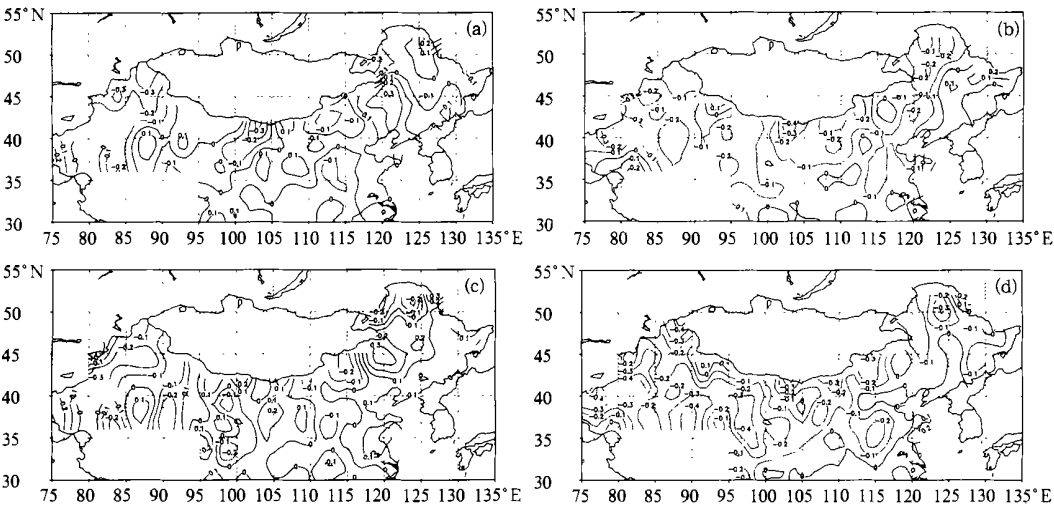


图 5 中国北方各站春季沙尘暴发生日数与前冬降水(a)、当季降水(b)、前冬相对湿度(c)及当季相对湿度(d)的相关关系

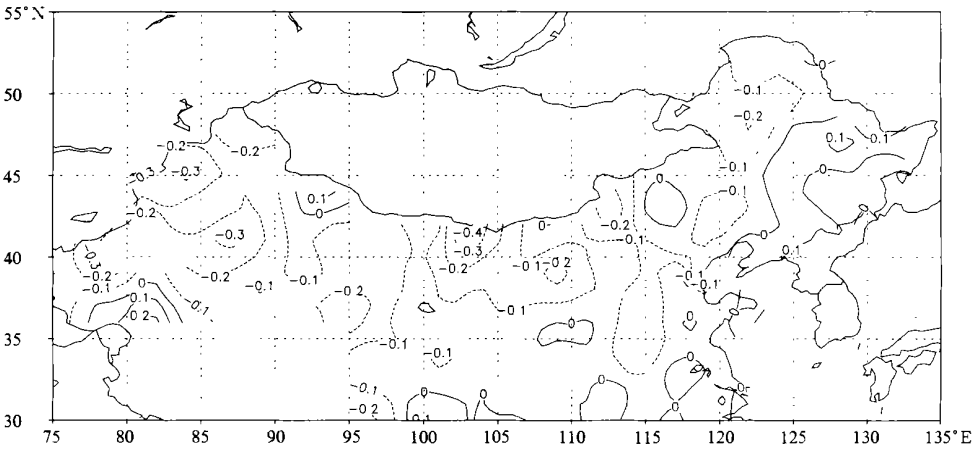


图 6 中国北方各站春季沙尘暴发生日数与前冬和当季降水量之和的相关关系

增加, 对当地沙尘暴的抑制作用比较明显。冬季沙尘源区降水多以降雪形式出现, 其春季融化对补充沙源区土壤水分、抑制沙尘暴发生有着重要作用。春季单站沙尘暴发生日数与相对湿度之间存在类似的相关关系和相关系数空间分布型式, 说明相对湿度和降水量有着相似的作用, 并且其相关程度多高于降水量。

5 讨论与结论

以上分析表明, 北方地区特别是沙尘源区的平均风速、大风频率、降水以及大气和土壤湿润程度对沙尘暴天气的形成和发展具有比较明显的影响。近 50 a 来, 中国北方的气候处于明显变暖过程中, 尤以西北、华北和东北地区变暖最为明显。与此同时, 华北地区出现了大范围的旱化趋势, 而西北则出现明显变湿迹象。近几年的其他研究工作也发现了这些明显的气候变化趋势空间分布特点^[13~18]。近半个世纪内, 包括中国北方在内的北半球中高纬度地区明显变暖是个事实, 且欧亚大陆高纬度比中低纬度增温明显也毫无疑问。这种差异变暖的后果之一就是改变中纬度大气的温压结构和对流层中上层平均西风环流特征, 减弱温带气旋锋生作用^[19]; 另一个明显的后果是冬春季寒潮势力减弱, 这和冬季地面西伯利亚高压平均强度减弱^[20]及春季温带气旋数量下降^[21]是对应的。北方特别是沙尘源区平均风速和大风日数的长期下降就是上述温压场和环流变化的直接反映, 并进而导致北方沙尘暴天气生成所必需的起沙动力条件的弱化。

同时, 尽管过去 50 a 中国华北大部分地区降水出现减少趋势, 但这些旱化地区可能并不是北方沙尘暴天气的主要物质源地。主要的沙尘源区当包括内蒙古西部、新疆、甘肃和青海西部以及蒙古国西南部等地区。这个划分同单站沙尘暴日数与干燥指数

相关系数 0 等值线位置大体相似(图 4c), 也同标准气候期(1971~2000 年)年平均降水量 350 mm 等值线位置基本一致。这样, 黄土高原的大部分地区都在沙尘源区以外。这个划分是合理的, 因为在过去的数百万年里黄土高原主要是粉尘的沉积区^[22], 即是“汇”而不是“源”。近半个世纪降水量的明显减少主要发生在包括黄土高原东南部在内的黄河流域, 而其西北的主要沙尘源区降水量有所增加, 气候也有变湿趋势。在蒙古国, 根据最新资料分析发现, 在过去的 61 a 内降水量也趋于增多^[23]。尽管在极端干燥沙漠地带降水的增加常常意义不大, 但在山麓洪积平原和风化作用强烈的基岩山地, 观测到的降水增加无疑将改善地表水分条件, 增加地表植被覆盖, 增加起沙风速或起沙难度, 有效抑制沙尘暴天气的发生。地表水分条件的改善不仅增大了起沙难度, 而且也通过下垫面温度和大气层结稳定性影响起沙的动力条件。因此, 过去半个世纪左右主要沙尘源区降水量的增加以及由此引起的干湿程度变化也是北方沙尘暴天气现象减少的重要原因。

强调北方特别是沙尘源区气候变化对沙尘暴频数年际到多年代尺度变化的影响, 并不排斥其他自然和人为因素的作用。在本文定义的沙尘源区以东南, 特别是在农牧交错地带, 在气候条件稳定的情况下, 人类活动强度的增加也将有助于提供额外的粉尘物质, 一定程度上增加沙尘暴天气的频率和危害。但据本文的分析, 过去近 50 a 沙尘暴发生频数的年际和长期变化在一定程度上可以用风和降水等气候要素的变化来解释。从自然原因角度讲, 造成中国北方沙尘暴频率长期显著下降的直接自然原因应是: 沙尘源区和发生区平均风速和大风日数的减少、主要沙尘源区降水量特别是春季和前冬降水量的增加、以及由于源区季节降水增加引起的关键时段大气和土壤湿润程度的改善。

参考文献

- 1 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, 4(1): 26~35
- 2 方宗义, 朱福康, 江吉喜等. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 158pp
- 3 胡金明, 崔海亭, 唐志尧. 中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响. 自然灾害学报, 1999, 8(4): 49~56
- 4 王式功, 董光荣, 陈惠忠等. 沙尘暴研究的进展. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349~356
- 5 牛生杰, 孙继明, 桑建人. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势. 中国沙漠, 2000, 20(1): 55~58
- 6 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我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
- 7 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
- 8 周秀骥, 徐祥德, 顾鹏等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学 D, 2002, 32(4): 327~334
- 9 夏训诚, 杨根生等. 中国西北地区沙尘暴灾害及防治. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 128pp

- 10 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
- 11 申元村, 杨勤业, 景可等. 我国的沙暴、尘暴灾害及其防治. 中国减灾, 2001, 11(2): 28~ 30
- 12 Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. J Climatol, 1996, 16: 361~ 377
- 13 陈隆勋, 朱文琴. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 56(3): 257~ 271
- 14 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322~ 330
- 15 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. 气象学报, 2001, 59(6): 737~ 746
- 16 王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变. 见: 秦大河主编. 中国西部环境演变评估(第一卷). 北京: 科学出版社, 2002. 20~ 70
- 17 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219~ 226
- 18 丁一汇, 张锦, 徐影等. 气候系统的演变及其预测. 北京: 气象出版社, 2003. 137pp
- 19 Qian Weihong, Quan Lingshen, Shi Shaoyin. Variation of the duststorm in China and its climatic control. J Climate, 2002, 15: 1216~ 1229
- 20 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~ 13
- 21 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
- 22 刘东生. 中国的黄土与风尘堆积. 中国第四纪研究, 1985, 6: 113~ 125
- 23 CHONG Yongseung, Dulam JUGDER. Observed climate variability and change in Mongolia. In: International Symposium on Climate Change, March 31~ April 2, 2003, Beijing

CHANGE IN DUST STORM FREQUENCY AND THE CLIMATIC CONTROLS IN NORTHERN CHINA

Zhang Li Ren Guoyu

(National Climate Center, CMA, Beijing 100081)

Abstract

Duststorm is one of serious environmental problems in northern China. Based on the surface observation data, tendency of days with duststorm and the relationship between annual and seasonal days with dust storm and the climatic factors, such as wind, relative humidity, air temperature, precipitation and dryness index, were analyzed. The results show that days with duststorm had been fluctuant decreasing during 1954—2001, especially in spring. Climatic factors in dust resource areas obviously affect the occurrence and development of duststorm. Relationship analysis shows that wind is a key factor to the occurrence of duststorm in the study area. Both average wind speed and days with strong wind are important for development of duststorm. Negative correlation between air temperature and days with duststorm was also found, indicating that a warming north will lead to a decrease in days with duststorm. Increase of precipitation over the source areas of dust during the past 50 years or so might have restrained the development of duststorm. The precipitation in winter such as snow, will melt in spring, and will be useful supply to wet the earth surface in the next spring. So the total precipitation in spring and the previous winter is much more important. Relative humidity generally plays a similar role with precipitation. Dryness index, which incorporates the effect of precipitation and temperature, was correlated as well with dust storm frequency, and it was found to be a good indicator for occurrence of dust weather phenomenon.

Key words: Duststorm, Wind speed, Precipitation, Temperature, Climate change, Northern China.