

文章编号:1005-8656(2008)02-0003-08

内蒙古沙尘暴的调查事实、气候预测因子分析和春季沙尘暴预测研究(上)

高 涛

(内蒙古气象科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:介绍了近 46 年(1961—2006 年)内蒙古沙尘暴系统地调查和分析工作,给出了内蒙古春季沙尘暴发生日数频数和天气过程频数的统计定义,并在此定义的基础上,通过统计和分析给出了春季内蒙古沙尘暴的时空分布特征;介绍了影响下游京津地区的内蒙古沙尘暴的天气特征的一些分析结果;分析并筛选了对内蒙古春季沙尘暴具有预测意义的前期气候影响因子,并利用相关分析、多元逐步回归分析和 EOF 分解等方法对部分前期因子做了特征提取;采用特征值方法、模糊数学及群体评价方法设计了内蒙古春季沙尘暴预测模型和计算方法,并做了编程计算;给出了内蒙古春季沙尘暴的预测标准和预测正误的判别标准;将筛选出的具有较强预测信号的因子作为模型中使用的预测因子,设计了 11 组不同预测因子组合的回报试验,分析试验结果以确定较佳的组合,利用确定的较佳因子组合对 1975—2007 年逐年做了回报试验,并对逐年回报试验结果进行了 POD 和 SS 预报技巧评分,评分结果显示模型的预测效果良好,有望成为内蒙古春季沙尘暴预测的一个预测工具。

关键词:沙尘暴分布特征;预测因子;预测模型;回报试验;预报评分

中图分类号:P445·4 文献标识码:A

1 引言

沙尘暴的产生是由多方面因素引起的。强风是沙尘暴的动力条件,也是决定因素,而地表大量的沙和尘是产生沙尘暴必不可少的物质条件。天气的变化取决于气候背景的变化,而气候变化对沙尘暴的发生又产生直接或间接的影响。内蒙古中西部地区是我国西北沙尘暴主要源地之一。我们研究结果显示 1961—2006 年内蒙古的沙尘暴发生频率具有显著的年际和年代际变化特征,这种变化又是在不同的大气环流背景下产生的。春季 3—5 月是该地区沙尘暴的频发期,影响半径在 60km 以上的较大范围的沙尘暴发生频数占全年频数的 75.1%^[1]。发生在内蒙古的沙尘暴主要通过西路和北路两条路径影响下游京津地区,这里的强沙尘暴约有三分之一影响到京津地区,约有三分之二的特强沙尘暴对该地区构成严重威胁,会引起扬沙、浮尘甚至沙尘暴天气^[2]。因此,内蒙古中西部地区又是京津风沙天气一个十分重要的关键区。研究气候变化对内蒙古春季沙尘暴的影响并对春季沙尘暴进行预测对当地及其下游广大地区作好防灾、减灾和抗灾工作,对生态环境建设和人民生活都具有实际意义。沙尘暴的危害引起广大科技工作者和政府部门的高度重视。我国的沙尘暴研究始于 20 世纪 70 年代,大量的沙尘暴研究工作是在 1993 年 5 月 5 日特强沙尘暴发生之后开

展的。近年来国内外在沙尘暴领域的研究成果主要涉及沙尘暴个例的天气成因分析、大气环流特征和天气学诊断分析;采用卫星手段或数值模拟手段对沙尘暴和沙尘移动路径、沙尘沉降等进行分析或模拟;对大气中沙尘气溶胶的物理、化学和光学特性进行分析;气候变化和人类活动对沙尘暴的影响以及沙尘暴灾害评估等方面的研究。在国内,钱正安等^[3]对 1993 年 5 月 5 日发生在中国西北地区的特强沙尘暴(黑风暴)事件作了调查报告并进行了成因分析;周秀骥等^[4]综合分析研究了 2000 年春季影响北京地区沙尘暴天气过程,揭示了沙尘暴天气在起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中的关键动力学问题;叶笃正等^[5]分析了我国华北沙尘天气成因并提出了治理对策;郑新江等^[6]作了有关沙尘暴卫星云图特征的分析研究;邱新法等^[7]对我国沙尘暴时空分布规律及沙尘源地和移动路径作了研究;黄美元等^[8]设计了东亚地区黄沙长距离输送模式;邵亚平等^[9]在东亚沙尘暴数值预报模式方面做了大量的研究工作并取得了一些成果;张仁健等^[10]对 2000 年 4 月 6 日发生在北京的强沙尘暴,采用单孔分级式撞击采样仪对沙尘气溶胶进行采样分析,结果表明沙尘暴期间来自远方的土壤和沙尘粒子占了很大比重,并给出了沙尘气溶胶数浓度随时间的变化特点;江吉喜等^[11]以卫星资料为主探讨了强沙尘暴的超短期预

报方法;杨东贞等^[12]分析了1988—2000年发生在北京的7次沙尘天气期间及沙尘天气发生前、后的沙尘气溶胶样品,发现TSP浓度在沙尘暴发生期间比沙尘天气发生前、结束后高出数倍;王自发等^[13]在诸多沙尘模式中作了比较发现不同的沙尘模式对沙尘的扩散、输送和沉降数量的结果相当不同;史培军等^[14]阐述了我国沙尘暴灾害的现状及动态演变,综合分析了沙尘暴发生发展的成因,评述了国内沙尘暴研究的历史、进展及存在的问题;纪飞等^[15]设计了东亚沙尘暴数值模拟模式并详细地模拟了一个发生在东亚地区的沙尘暴天气过程,得到了沙尘暴起动、传输和沉降的具体特征等。国外也有许多人在做沙尘暴研究,如:Niimura,N.等^[16]作了沙尘成份的分析研究;Chung,Y.S.等^[17]作了沙尘粒子沉降的分析研究;McGinnis,G.H.等^[18]作了气候变化的风蚀作用对东澳大利亚沙尘暴影响的研究;Y.Iwasaka等^[19]在敦煌采用球载观测仪器,地面激光雷达和电子显微镜监测和分析来自塔克拉马干沙漠沙尘气溶胶的化学物理特性等。

沙尘暴短期气候预测属于气候预测范畴,气候的变化与预测是目前气象科学的研究的前沿领域。短期气候预测的核心问题是采用什么方法和算法做出预测。当今气候学研究大致分为两类,一类是以概率论为基础的统计学方法,是以观测资料为出发点用统计方法去描述和认知现象之间的联系。人们已经认识到单纯采用统计学方法作气候预测是靠不住的。另一类是以数值模拟为代表的的动力学方法,具有严格的物理背景,从理论上揭示隐含在现象中的物理规律。尽管现在的数值模式可以成功地模拟大气的某些大尺度特征,但是,那只是在对许多不清楚的参数进行人为调整后得到的最佳模拟效果,而在诸多的气候模拟中,很少有人提及这些参数的任意性对模拟效果的影响。人们已经开始认识到用耦合环流模式做气候预报也存在不少问题^[20]。对于一个极其复杂的气候系统,预报问题是否仅仅就是一个初值问题值得怀疑。因此,面对具有多变量、非线性、随时间变化的复杂的气候大系统,要想描述复杂天气现象和气候系统的任何现实的物理状态,事实上是办不到的,为了对整个沙尘暴预测问题的描述有意义,我们必须在精确和简明之间取得平衡,而这种平衡的取得是建立在模糊数学基础上的。虽然目前国内外在沙尘暴研究领域的多个方面已有了大量的研究成果,但是,涉及沙尘暴气候预测方法的研究却不多见。涉及沙尘暴天气的气候预测(季节预测/年景预测)方面的研究在《千里黄云—东亚沙尘暴研究》一书介绍了基于数值模式预报技术的沙尘天气中期

数值天气预告系统MDWP.0,有较好的预报效果,此方法尚未加入“集合预告”方法,仍有待进一步完善^[21]。

当今,气候统计方法和以气候模式为基础的动力学方法是我们做气候预测的主要手段。然而,在杨培才和周秀骥^[22]的文章指出,在大气的运动中,气候系统正是一个典型的非平稳系统。我们现有的气候时间序列预测理论都是事先假定了气候过程是平稳的,这显然有悖于气候过程的基本性质,并提出气候系统的层次结构正是产生气候非平稳行为的原因,而气候系统的非平稳特性正是其层次结构的集中表现。气候系统的非平稳特性不仅表现在时间上,而且也表现在系统的空间结构上。在赵平^[23]的文章中指出气候系统的平稳性问题是气候统计预测方法无法回避的,这种时间序列的非平稳特性使得建立在统计基础上的气候预测方法面临严峻的挑战。严华生^[24]在他的《气候变化分析预测》一书中指出在天气气候学预测方法中纯数学的处理手段较少,所需资料数量也不必很多,但并不意味着天气气候学预测方法不需要数据分析,除气候学专业知识和预测经验外仍然需要一定的数理统计分析和统计处理,使得预测更科学、更可靠。统计预测是假定了气候系统在预测期间保持稳定状态,然而,一旦气候系统出现异常甚至突变或影响气候系统的因素有所改变时,往往容易导致预测的失败。尽管如此,在目前还没有成熟的针对非平稳气候系统预测理论和应用技术的状况下,我们所做的研究是对沙尘暴短期气候预测方法的一个探索性研究,它有别于传统的统计回归预测模型和动力方程描述的数值模拟预测方法。对回报试验的预报结果评分表明模型具有较好的预测效果,有望为今后内蒙古春季沙尘暴天气预测的提供一个预测手段,但是,仍需要在预测实践中不断地对模型进行改进和完善。

2 内蒙古沙尘暴的基本调查事实

2.1 内蒙古沙尘暴发生频数定义

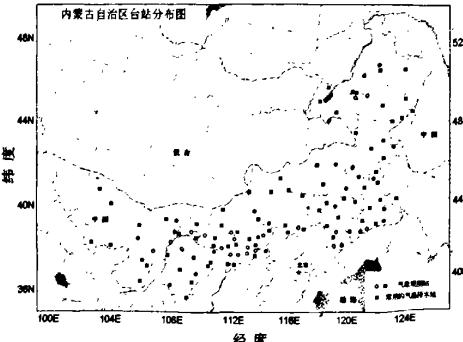


图1 内蒙古自治区气象站分布图

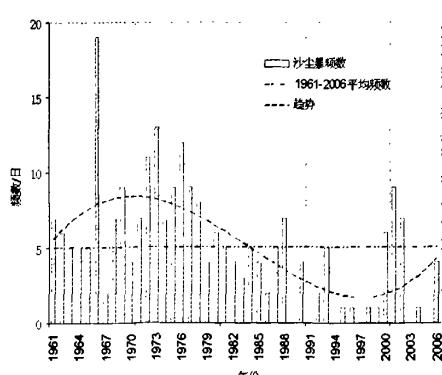


图2 1961—2006年内蒙古春季(3—5月)
20站特强沙尘暴日数频数及趋势

用于统计沙尘暴天气过程发生频数的数据源自内蒙古境内118个观测站(见图1)1961—2006年春季(3—5月)的观测资料。单站沙尘暴的统计是从每日4次(02、08、14和20时,北京时)的定时记录中按照水平能见度 $\leq 1000m$ 为依据统计的,在每日4次记录中只要有一次出现能见度 $\leq 1000m$,则记为该站有一个沙尘暴发生日。当然,这种统计可能会把其他能够造成低能见度的天气现象也统计在内,如大雾天气。但是在目前没有其他关于沙尘暴的长时间序列观测记录的情况下,这种统计方法仍不失为一种目前看来比较有效的对沙尘暴的统计方法。又由于我们后面更多的讨论集中在内蒙古的中西部地区,那里是干旱和半干旱地区,大范围的大雾天气极少发生,特别在春季,对于当地是“春雨贵如油”,由此可见,春季是极其干旱的季节。因此,在春季观测到的能见度记录基本上反映的是沙尘天气对大气能见度所造成的真实影响。对于单个气象观测站,我们根据气象观测规范和内蒙古自治区自然灾害的地方标准按照表1定义单站的沙尘暴。当然,依照每日4次的定时能见度观测记录去统计沙尘暴的发生频率,存在着的问题是可能遗漏一日当中的最差能见度记录,例如,在14—18时之间的能见度,一般认为,此时段是沙尘暴发生的最强时段。但是,由于现有资料的观测记录的限制和记录时间序列长度的限制,目前只能依据每日4次的定时记录去统计沙尘暴发生频数及其尺度。在我们的统计中更多的注重于观测记录的水平能见度,而不是风速,风速只是为一个参考指标,风速在研究沙尘暴个例及起沙机制等方面更有参考价值。

表1 单站沙尘暴定义

天气现象	水平能见度/m	平均风速/ $m \cdot s^{-1}$	风力等级/级
浮尘天气	≤ 1000		
扬沙天气	1000—10000		
沙尘暴	500—1000	12—19	6—8
强沙尘暴	50—500	19—23	8—9
特强沙尘暴(黑风暴)	≤ 50	≥ 23	> 9

目前,就沙尘暴的发生日数和天气过程有多种不同的定义;由于在不同的研究中所考虑的区域的不同和观测台站分布密度的不同,给出的沙尘暴日数和过程定义也有所不同。无论采用何种定义,如果一个定义能够较客观地描述沙尘暴的范围和强度则可认为是一个合理的定义。我们的研究聚焦于内蒙古地区的沙尘暴,因此,根据我区的台站分布情况,并根据历史上内蒙古沙尘暴发生频数的实际情况,我们采用表2中的规则对在内蒙古观测到的不同尺度沙尘暴发生日数给出了一个统计定义,后面的分析大多是在这种定义的统计结果之上进行的。

表2 内蒙古春季沙尘暴发生日数统计定义

沙尘暴尺度	统计规则	影响范围
5站沙尘暴	有5个以上站日记录中能见度 $\leq 1000m$	局地,对下游地区影响不大
10站沙尘暴	有10个以上站日记录中能见度 $\leq 1000m$	影响范围约在60km以上
20站沙尘暴	有20个以上站日记录中能见度 $\leq 1000m$	影响范围约在100km以上

内蒙古春季沙尘暴发生过程定义:

以单站一日内4次(02、08、14和20时,北京时)观测记录中若有一次水平能见度 $< 1000m$ 作为该站的一个沙尘暴记录。共统计了两种尺度的沙尘暴天气过程(一次天气过程可能持续1~2天,3~5天甚至更长):

10站以上过程:在一次沙尘暴天气过程中最强发生日中在118个站中有10个以上站水平能见度观测记录 $< 1000m$ 。

20站以上过程:在一次沙尘暴天气过程中最强发生日中在118个站中有20个以上站水平能见度观测记录 $< 1000m$ 。

2.2 内蒙古沙尘暴时空分布特征

这里我们对表2中列出的三种尺度的沙尘暴做了统计,不同尺度的沙尘暴的年代际变化有所不同。5站和10站沙尘暴发生日数的年代际变化趋势一

致,即从20世纪60年代到世纪末,整体呈现下降趋势,但是,从21世纪开始又呈一定的上升趋势(图略)。20站沙尘暴的变化趋势与其他两个尺度的变化有所不同,在20世纪60年代,除了1966年这个沙尘暴特别频发年外,其他年份的发生频数大多低于70年代各年的发生频数(见图2)。沙尘暴发生日数平均频数在20世纪60年代最高,90年代最低,进入21世纪又有所增加。对于内蒙古春季沙尘暴发生过程频数的变化趋势(见图3),总体呈下降趋势。各年代内蒙古沙尘暴平均发生日数和发生过程的统计见表3和表4。

从图4中可以看到10站和20站沙尘暴发生频数的月季变化曲线的变化趋势基本一致。每年的7—10月为内蒙古沙尘暴的不频发期,8—9月几乎没有沙尘暴发生。每年的春季(3—5月)为内蒙古沙尘暴的最高发期,最频发月是4月,其次为5月和3月。冬季(11月—次年2月)和6月是两个沙尘暴的次频发期,沙尘暴的发生频数不是很高,但也时有发生。

表3 20—21世纪各年代各个尺度内蒙古沙尘暴平均发生日数/天

沙尘暴	60年代	70年代	80年代	90年代	2001—2006年
5站	33	30.5	19.9	10.5	12.2
10站	19.3	16.5	10.3	5.4	6.3
20站	6.9	8.6	3.9	1.7	3.5

表4 20—21世纪各年代各个尺度内蒙古沙尘暴天气过程平均发生频数/次

沙尘暴	60年代	70年代	80年代	90年代	2001—2006年
10站	10.3	9.2	7	3.3	3.4
20站	5	5.8	2.7	1.5	1.9

在分析了46年的春季(3—5月)内蒙古沙尘暴空间分布图后我们发现:沙尘暴的空间分布每一年均有所不同,其中一些年的空间分布是相似的,一些年又是不同的,总的空间分布是中西部发生频数高,东部沙尘暴发生频数低。而中西部又以阿拉善盟的额济纳旗及其附近地区为最频发区域,另一个较频发区域是锡林郭勒盟的浑善达克沙地及其周边区域,据我们的分析此区域的沙尘暴对京津地区所造成的威胁更加严重(见封3,图5-1)。值得注意的现象是各个年代沙尘暴的空间分布有所不同,20世纪60年代的沙尘暴的分布范围较大,除了阿拉善盟,巴彦淖尔市,鄂尔多斯市和锡林郭勒盟为频发区域外,赤峰市和科尔沁沙地亦为沙尘暴的频发区域。从

70年代到90年代沙尘暴的发生区域逐渐向西缩小,发生频数也逐渐减少,频发区主要以阿拉善盟的额济纳及其附近地区为主,次频发区域为锡林郭勒盟的浑善达克沙地及周边地区(见封3,图5-2~图5-6)。另一个值得关注的事实是进入21世纪,内蒙古沙尘暴相对频发区域的变化,最频发区域变成了锡林郭勒盟的浑善达克沙地及周边地区,次频发区为阿拉善盟的额济纳及其附近地区(见封3,图5-7~图5-8)

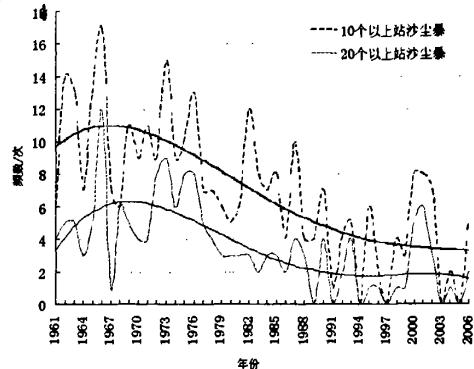


图3 1961—2006年内蒙古春季(3—5月)沙尘暴发生过程频数(次)及趋势

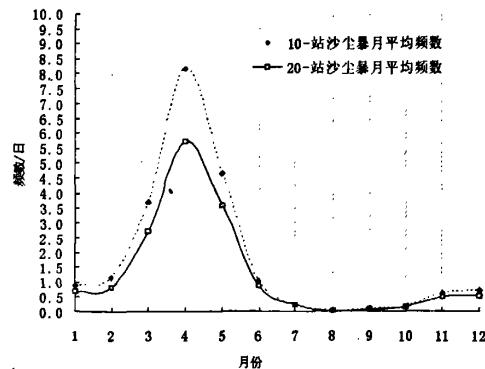


图4 内蒙古春季沙尘暴月际变化曲线

3 内蒙古沙尘暴对下游京津地区的影响

内蒙古的中西部地区位于京津地区的上风区域,通过天气图和卫星监测图的分析可以确定,在内蒙古境内影响下游地区的沙尘源地有两个,称作阿拉善和浑善达克沙尘源地(见图6)。源自蒙古国西南部的沙尘暴随着冷空气的移动进入内蒙古,并伴随着风速的不断加强而得到加强,这种强沙尘暴大多数会抵达京津地区、日本和南北韩,有时甚至会到达台湾地区。如在2003年3月22—23日的强沙尘暴对上述地区造成了严重影响,坐落在韩国中部的韩一中搭起科学合作研究中心的观测记录显示PM₁₀的最大浓度达到199 μg/m³超过了平时PM₁₀浓度的两倍。

在部分研究中我们对1971—2000年气象观测资料和卫星监测资料进行了统计和分析，并统计了内蒙古和京津地区的沙尘暴和沙尘天气发生频数，比较了内蒙古强沙尘暴和京津地区沙尘暴及沙尘天气的发生情况，目的是为了更好的了解对下游京津地区的在内蒙古观测到的沙尘暴的天气学特征，从而对这种有严重影响的沙尘暴的预报提供参考背景。我们对历史上58个特强沙尘暴个例的各层(500、700、850 hPa和地面)天气形势逐一进行了详细分析，发现这种对京津地区构成影响的沙尘暴的天气形势主要有三种类型：槽型(包括冷槽、横槽和浅槽型)、西北气流型和蒙古冷涡型。它们分别占63.8%、34.5%和1.7%。它们对应的冷空气路径有西北路、西路和北路，分别占58.6%，13.8%和27.6%。通过对不同尺度的内蒙古沙尘暴的分析还发现大约有三分之一的发生在内蒙古中西部地区的沙尘暴(影响半径约在60km以上)会影响到下游的京津地

区，约有三分之二的强沙尘暴(影响半径约在100km以上)会引起京津地区的扬沙、浮尘甚至沙尘暴天气。根据对大风天气($12m\cdot s^{-1}$ 以上大风)的分析发现在春季一半以上的大风天气发生在内蒙古的中西部地区。随着全球变暖，内蒙古中西部的两个主要沙尘源区(阿拉善和浑善达克沙尘源区)的气温在不断上升，阿拉善沙尘源区在上个世纪90年代的气温比70年代上升了 $1.01^{\circ}C$ ，浑善达克源区上升了 $0.96^{\circ}C$ 。源区气温的不断增高使得蒸发量加大，气候变得更加干燥，再加上不适宜的人类活动，如果遇上没有有效降水的年份势必对产生沙尘暴形成的有利条件。

我们把影响京津地区的沙尘暴分成强沙尘暴(10站沙尘暴)和特强沙尘暴(20站沙尘暴)两种尺度去分析。表5给出了上述两种尺度的沙尘暴在过去30年(1971—2000年)发生在内蒙古和京津地区的频数，其中可以看出沙尘暴越强，对下游地区影响的频数就越大。

表5 内蒙古沙尘暴和京津地区扬沙或沙尘暴天气发生频数

观测区域	3月		4月		5月		3-5月	
	10站	20站	10站	20站	10站	20站	10站	20站
内蒙古/次	17	25	46	49	43	21	106	95
京津地区/次	8	15	16	31	10	12	34	58
影响百分率/%	47.1	60.0	34.8	63.3	23.3	57.1	32.1	61.1

注：京津地区只要有一个站出现沙尘暴就记录为一个沙尘暴发生日。

由于受到内蒙古及其周边地形的影响，通常极地冷空气暴发南下是经过三条路径入侵内蒙古的，在分析了过去30年(1971—2000年)58个影响京津地区的内蒙古特强沙尘暴个例的高空和地面天气图(包括地面、500、700和850hPa天气图)，我们将其冷空气的入侵路径划分为3个类型：来自内蒙古西方的冷空气称为西路冷空气型，它在内蒙古沙尘暴中扮演着重要的角色，冷空气首先在我国的新疆北部聚集，增强后向东移动途径甘肃省北部入侵内蒙古地区。西北路冷空气来自内蒙古西北方向，有其特殊的环流特征，极地冷空气在暴发后从西伯利亚向

东南方向移动，横穿蒙古高原的西部地区，然后入侵内蒙古。当冷空气从内蒙古的北方入侵时，我们称作北路冷空气入侵型，大多数情况下，在高空有横槽活动，起初向南移动，之后向东摆动，槽后的冷空气随着第二个脊的移动向东南方向移动，给内蒙古的中西部地区带来大风天气。有很多的情况下横槽会一直南压，向南方移动。表6给出了上述58个特强沙尘暴个例中各路冷空气入侵频数的统计结果；发生频数最高的西北路冷空气，说明大多数对京津地区构成影响的在内蒙古观测到的特强沙尘暴是由西北路冷空气入侵引起的。

表6 引起京津沙尘天气内蒙古特强沙尘暴各天气类型频数

天气类型/次	3月		4月		5月	
	频数	%	频数	%	频数	%
冷槽	5	33.3	11	35.5	3	25.0
槽型	1	6.7	1	3.2	0	0.0
横槽	5	33.3	8	25.8	3	25.0
浅槽	3	20.0	11	35.5	6	50.0
西北气流型	1	6.7	0	0.0	0	0.0
蒙古冷涡型						

在春季由于冷空气的移动所带来的大风很容易在北半球的沙漠和沙地引起沙尘暴或沙尘天气,如新疆、内蒙古中西部和蒙古的西南部地区。在我们对2000和2001年春季内蒙古地区沙尘暴的分析中发现大风发生频数和范围($12m\cdot s^{-1}$ 以上大风)与强沙尘暴频数存在很好的关系,每一次沙尘暴都伴随着较大范围的大风天气。因此,分析内蒙古沙尘暴发生时的冷空气活动和产生大风天气的天气形势对下游京津地区的沙尘天气预报有一定帮助。为此,我们分析了上述58个特强沙尘暴个例发生过程中的500、700、850hPa和地面天气图,主要考虑和分析影响内蒙古中西部地区的主要天气影响系统。表5列出了

58个特强沙尘暴个例中各种天气形势类型的发生频数,90%以上个例的天气形势类型为槽型和西北气流型,其中槽型占63.8%,西北气流型占34.5%。对于每一种天气类型都选择了一个代表样本对其天气特征的分析。由于文章篇幅所限各类型天气形势图略去(请参看参考文献^[5])。

4 内蒙古沙尘暴预测因子分析和选择

此部分的工作是为了确定内蒙古春季沙尘暴预测模型的预测因子集而做的。在我们现有的、可以实时获得的气候指数或观测资料范围内,我们做了下面的计算和分析。

表7 选出的环流指数(前一年)与次年沙尘暴过程频数相关系数

因子名称	10站沙尘暴过程	20站沙尘暴过程
北半球副高面积指数	-0.60	-0.70
北半球副高强度指数	-0.56	-0.65
北非、大西洋、北美副高面积指数	-0.57	-0.65
北非、大西洋、北美副高强度指数	-0.52	-0.61
太平洋副高面积指数	-0.57	-0.64
太平洋副高强度指数	-0.53	-0.61
西太平洋副高面积指数	-0.58	-0.68
西太平洋副高强度指数	-0.52	-0.59
西太平洋副高西伸脊点指数	0.47	0.64
北半球极涡面积指数	0.43	0.38
北半球极涡强度指数	0.43	0.46
西藏高原位势高度指数	-0.38	-0.33(!)
印缅槽强度指数	-0.55	-0.61

注:带“!”号达到了0.05显著性水平,其他的均达到了0.01的显著性水平。

4.1 环流场因子

利用中国国家气候中心发布的74个环流场指数,采用相关分析和多元逐步回归方法对其进行筛选,确定若干个与内蒙古中西部地区春季沙尘暴发生过程频数相关性显著的前期因子作为入选预测模型环流场的代表因子。表7列出了这些因子与各个不同尺度沙尘暴发生频数之间的相关系数及其统计显著性水平。

4.2 降水因子

我们对影响内蒙古春季沙尘暴可能有影响的因素进行了统计分析,结果发现在1980—2006年间内

蒙古中西部地区前一年的降水对次年春季沙尘暴发生频数有较显著的影响。82%的不发生沙尘暴频发年,其前一年的降水为正距平值,与之相反,有75%沙尘暴的频发年前一年的降水为负距平值(见表8)。查看近些年沙尘暴频发年和不频发年的沙尘暴日数分布图和与之对应的前一年年降水分布图可以推断,前一年的降水分布对次年春季的沙尘暴分布具有影响(见下一期封3,图7-1~图7-8)。我们仅用该地区前一年的降水量为预测因子所做的预报试验表明降水因子具有一定的预测效果,因此,可以确定前一年该地区的降水量可以作为一个预测因子使用。

表8

内蒙古中西部地区前一年降水R%与次年春季20站沙尘暴频数

年份	沙尘暴分级	降水 R%	年份	沙尘暴分级	降水 R%
1982	N	6.6	1989	BN	5.6
1985	N	3.8	1991	BN	16.5
1990	N	-17.6	1994	BN	-12.9
2006	N	-36.3	1997	BN	17.9
1981	AN	-27.7	2003	BN	1.8
1984	AN	-4.9	2005	BN	2.0
1987	AN	-21.9	1995	BN	9.2
1993	AN	19.6	1996	BN	17.9
2000	AN	-11.7	1998	BN	-16.3
1988	AN	-16.3	1999	BN	24.0
2002	AN	-17.0	2004	BN	29.4
2001	AN	-21.8			

注:表中沙尘暴分级代码:N和AN表示沙尘暴发生频数为正常偏多和频发, BN表示沙尘暴不频发。分级标准见表15。

此外,通过我们对该地区有限的土壤水分观测资料的分析还发现前一年的降水对次年春季深层的土壤湿度有较显著的影响, 降水多、土壤湿度大, 沙尘暴相对少(这部分的分析结果请参见参考文献^[2])。这可能是因为该地区的地表植被对降水非常敏感, 前一年降水好, 植被长势好, 对抑制次年春季的沙尘暴有积极作用。

前期降水对内蒙古春季沙尘天气过程发生频率有一定影响, 作为预测因子具有一定的指示意义。此外, 从图8中的气候趋势变化可以看出前期降水和沙尘暴呈相反趋势。在后面谈及的预测模型不同的回报试验中我们采用了两种降水资料作为预测因子进行试验, 一是选择内蒙古中西部阿拉善和浑善达克两个沙尘源区(见图6)共27个气象站头一年各月降水距平百分率经过EOF分解后的第一特征量。另一种考虑是在过去46年(1961—2006)对内蒙古沙尘暴的观测中发现其发生区域主要在内蒙古中西部地区, 因此, 考虑使用内蒙古中西部地区42个测站的降水资料。表9给出了内蒙古中西部42个站前一年降水量与次年春季沙尘暴之间的关系表。

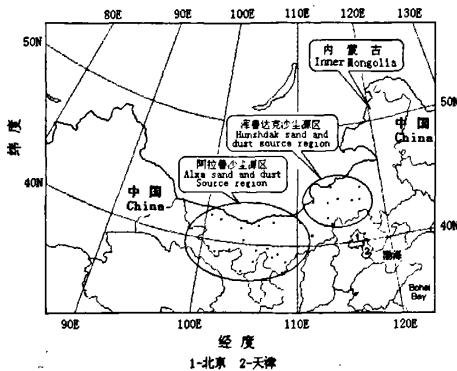


图6 内蒙古中西部沙尘源区示意图

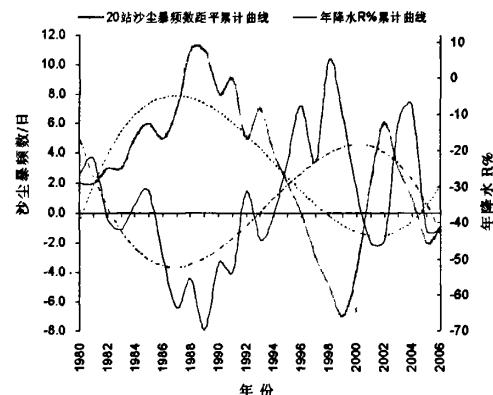


图8 内蒙古前一年降水R%与次年春季沙尘暴距平累积曲线

表9 内蒙古中西部R%与各个尺度沙尘暴天气日期频数的相关系数

	5站沙尘暴	10站沙尘暴	20站沙尘暴
前一年降水 (1961—2005)	-0.29	-0.37	-0.36
前一年降水 (1980—2005)	-0.56	-0.53	-0.55

注:表中的相关系数全部达到了0.01信度水平。

由于我们试图使用的因子是用于春季(3—5月)沙尘暴预测的, 而6月至次年2月的降水数据由于当地收集时效的限制不宜用于预测模型, 因此, 我们选用前一年的降水量(包括降雨和降雪的降水量)作为一个预测因子。

4.3 温度因子

通过对气温的分析我们发现尽管在过去40多年中, 随着全球气候变暖, 该地区的气温总体呈上升趋势, 而沙尘暴的发生频数总体呈下降的趋势, 从有

限长的年代际尺度看,它们恰好呈相反趋势。但是,当我们将温度和沙尘暴序列的时间趋势去掉后,他们之间的关系并不显著,因此,可以认为两个序列的趋势相关在相关关系中占了很大成分。为此,我们分析了更大范围的气温,如更大范围的格点地面温度。

在预测模型中使用的 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 网格点地面温度距平数据是 Climate Research Unit(CRU)的资料,经过

表 10 格点地面一年温度 EOF 分解的前三个特征量的方差贡献及与沙尘暴天气过程频数之间的相关系数

EOF 分解	方差贡献/%	10 站沙尘暴	20 站沙尘暴
PC1	41.1	0.44	0.40
PC2	14.2	-0.34 [*]	-0.27 [*]
PC3	8.6	0.50	0.48

注: 表中带有*号的表示未达到 0.05 的显著性水平检验,!号表示通过了 0.05 显著性水平检验,其余均达到了 0.01 显著性水平检验。

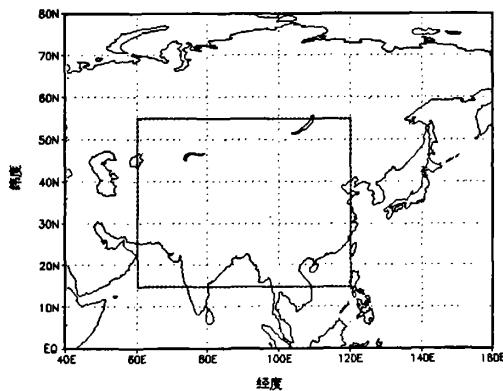


图 9 选定的格点地面温度区域图

EOF 分解,并用第一、二、三特征量与沙尘暴天气过程频数做相关分析后选择使用第三特征量作为预测因子进行预测试验(见表 10),格点温度选择区域(见图 9)。

4.4 格点海温场数据

在预测模型中使用的 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 网格点海表温度距平数据(SSTA)是 Climate Research Unit(CRU)的资料,经过 EOF 分解,用第一、二、三特征量与沙尘暴天气过程频数做相关分析后确定使用第一特征量。第一特征量与沙尘暴过程频数的相关关系见表 11。在模型的回报试验中选定了 7 块海域(见图 10)进行预测试验,7 块海区的相关信息见表 12。

对所有被选定区域中的网格点,缺数据的格点均利用其周边格点上数据做了插值处理(插值方法略)。

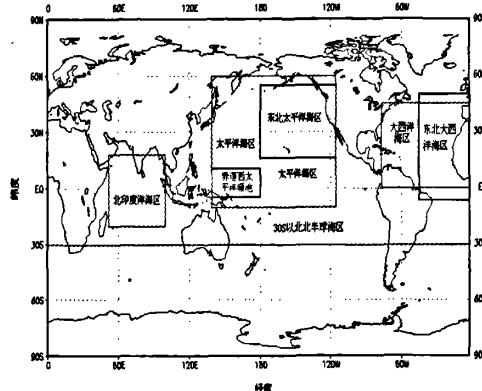


图 10 选定的海温场区域图

表 11 各个不同区域的海温场经过 EOF 分解后的第一特征量 PC1 与各个不同尺度沙尘暴天气过程频数之间的相关系数

海 域	SSTA 经 EOF 分解后 PC1 方差贡献率/%	10 站沙尘暴	20 站沙尘暴
太平洋海 SSTA	20.4	0.52	0.38
东北太平洋 SSTA	25.8	0.58	0.63
赤道西太平洋暖池 SSTA	31.3	0.59	0.62
大西洋 SSTA	25.2	0.58	0.61
东大西洋 SSTA	32.2	0.58	0.60
北印度洋 SSTA	30.6	0.63	0.61
南纬 30 度以北北半球 SSTA	12.8	0.49	0.51

注: 相关系数均达到了 0.01 显著水平。