

中国北方春季沙尘天气气候趋势的多因子客观预测

杨明珠, 竺夏英*, 艾婉秀, 宋文玲

中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘要 分析了我国北方春季沙尘天气日数的时间演变特征及不同阶段大气环流的分布特征, 探寻前期关键区海表温度和海冰密集度等外强迫信号, 并研究了敏感沙源区夏季降水对次年春季中国北方沙尘天气趋势的影响。在此基础上, 建立了春季沙尘天气气候趋势多因子客观预测模型, 从近5年在国家气候中心的实际应用看, 对华北区的预测效果最好。经过改善, 对西北区的预测技巧也有明显的提高。

关键词 沙尘天气; 气候趋势; 多因子预测模型

春季是中国北方沙尘暴天气多发期, 由于这个阶段沙尘暴的频发性和危害性, 受到不同领域学者、业务工作者乃至社会公众的广泛关注。尽管一些研究指出, 沙尘天气的发生呈明显的减少趋势^[1-3], 但在某些年份局域强沙尘暴和特强沙尘暴发生日数有增多的现象^[4], 并且仍有强沙尘暴灾害发生并造成严重影响及巨大损失, 如2010年3月19—22日出现的强沙尘暴过程, 影响了中国21个省(市、自治区)^[5], 同年4月24—26日西北和华北南部等地大范围的沙尘暴天气, 民勤县19.5万人受灾, 直接经济损失达2.5亿元^[6]。因此在沙尘天气趋于减少的气候背景下, 对沙尘灾害性天气仍然不能掉以轻心, 强沙尘天气仍会造成巨大灾害损失, 扬

沙、浮尘天气对环境、交通、生产生活 and 人体健康也会造成影响和危害。

大量的研究揭示出, 下垫面状况和大气动力条件是沙尘天气发生的两个重要因素。地表物理特征的变化对起沙量的大小具有重要影响^[7]。中国西部地区为干旱、半干旱区, 地表覆盖类型以沙漠、半沙漠为主, 植被生长所需水的主要来源是自然降水。一方面, 前期主要生长季的降水量与这些区域植被储量密切相关, 尤其是生态环境较为脆弱的荒漠草原和沙地草原区, 降水多寡直接影响地表覆盖密度; 另一方面, 同期沙源区降水引起的沙土湿润度或积雪覆盖发生变化, 也会对起沙量产生影响^[8-9]。除了下垫面条件外, 大气环流活动是起沙

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2019-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1501706); 2016年荒漠化监测专项

作者简介: 杨明珠, 副研究员, 研究方向为短期气候预测, 电子信箱: yangmz@cma.gov.cn; 竺夏英(通信作者), 高级工程师, 研究方向为短期气候预测, 电子信箱: zhuxy@cma.gov.cn

引用格式: 杨明珠, 竺夏英, 艾婉秀, 等. 中国北方春季沙尘天气气候趋势的多因子客观预测[J]. 科技导报, 2019, 37(20): 19-29; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.20.003

和沙尘输送的重要动力条件,其中乌拉尔山高压脊及西伯利亚—蒙古气旋等环流系统活动造成的冷锋后大风对沙尘天气的发生起到最为直接和重要的作用^[10-14];此外,通过大气环流的遥相关作用,西风急流^[15]、青藏高原季风^[16]等一些重要的大气环流系统也间接影响着沙尘天气的多寡。分析研究指出,在环流相似的情况下,下垫面植被覆盖度的变化对沙尘天气多寡具有重要的影响^[17],但仅局限于个例分析,缺乏定量的评估。中国北方春季沙尘年际变化的前期外强迫信号的研究也大多仅考虑某一单因子的影响,或逐一考虑,但对于实际的气候预测,需要综合考虑各因子的影响。采用合理的方法获得多因子综合的影响对于提高预测准确率是一条重要的途径。

本文首先分析中国春季沙尘天气的气候特点及其与同期环流的关系;在此基础上,寻找海表温度(SST)、海冰密集度(SIC)等外源强迫因子的关键区,并进一步研究它们对春季沙尘天气动力输送条件的影响;最后,分析前期关键沙源区降水量对次年沙尘起沙条件的影响;综合上述研究,建立了中国北方春季沙尘趋势预测的多因子影响物理框架和多因子预测模型,并对该模型的预测能力进行了评估。

1 资料和方法

本研究中的沙尘日数资料是基于中国气象局国家气象信息中心 1951—2018 年中国 746 站地面气象台站的天气现象观测资料,按照中华人民共和国国家标准 GB/T 20480—2006《沙尘暴天气等级》的分类标准,出现浮尘级别以上沙尘天气记为 1 个沙尘日数。根据对台站资料的分析,1960 年之前台站观测缺测较为严重,尤其 20 世纪 50 年代初缺测率高达 79.9%,但 1960 年之后缺测率明显降低(低于 4.5%),故本文选取了 1961 年以来的台站资料对中国北方沙尘天气进行分析。

此外,本文还采用了 1961—2017 年美国 NCEP/NCAR V.1 逐月再分析资料位势高度场和风

场^[18],空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 1981—2017 年 ERSST v3b 逐月海表温度(格距为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$)^[19]、1982—2017 年 OISST v2 逐月海冰密集度资料(格距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)^[20]和 1981—2017 年 PREC/L 陆地降水重建资料(格距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)^[21]。另外,还采用了国家气候中心整编的 130 项气候系统监测指数。

采用的分析方法有线性倾向估计方法、Pearson 相关分析方法、Mann-Kendall 突变检验方法,多元回归分析方法^[22]。

2 春季各分区沙尘日数变化特征及其影响环流分析

2.1 中国北方春季沙尘日数分布特征及分区

中国春季沙尘天气日数分布(图 1(a))显示出北多南少、西多东少的特点,长江以南的区域极少发生。河套及其以西的大部分区域沙尘日数在 10 天以上,其中新疆中部和南部区域大部超过 20 天,局部超过了 30 天;西北地区中北部、内蒙古西部地区为 15 天以上,部分地区在 20 天以上;河套以东的区域沙尘日数较西部地区明显偏少,大多为 5~10 天,淮河流域少于 5 天,其中内蒙古东北部、东北地区的北部和东部也较少,不超过 3 天。可以看到,中国北方沙尘日数的区域性特征十分明显,有必要对其进行分区。Wang 等^[23]利用聚类分析法,结合地理分界线和干旱分区,将全国沙尘易发区分为 7 个亚区,但划分过细,不利于国家级气候预测业务工作的应用。本文根据沙尘日数的气候分布特征,结合中国自然地理气候区划分区^[24],综合考虑了气候分布和行政区划、地理位置等特征,选取黄河流域及其以北地区,对 1961 年以来无缺测的站点,由西向东分为新疆区(39 站)、西北区(67 站)和华北区(53 站)(图 1(b))。图 2 中各区春季沙尘日数气候平均值(1981—2010 年,下同)显示,新疆区最多,平均 19.2 天,其次是西北区,平均 11.2 天,华北区 5.5 天。本划分结果与吴占华等^[25]的分区接近。近几年,国家气候中心对这 3 个区域的沙尘预报技

术进行了较好的开发。以下对各区的沙尘日数特征,主要影响因子及多因子预报方法的思路及模型

的建立过程进行详细阐述。

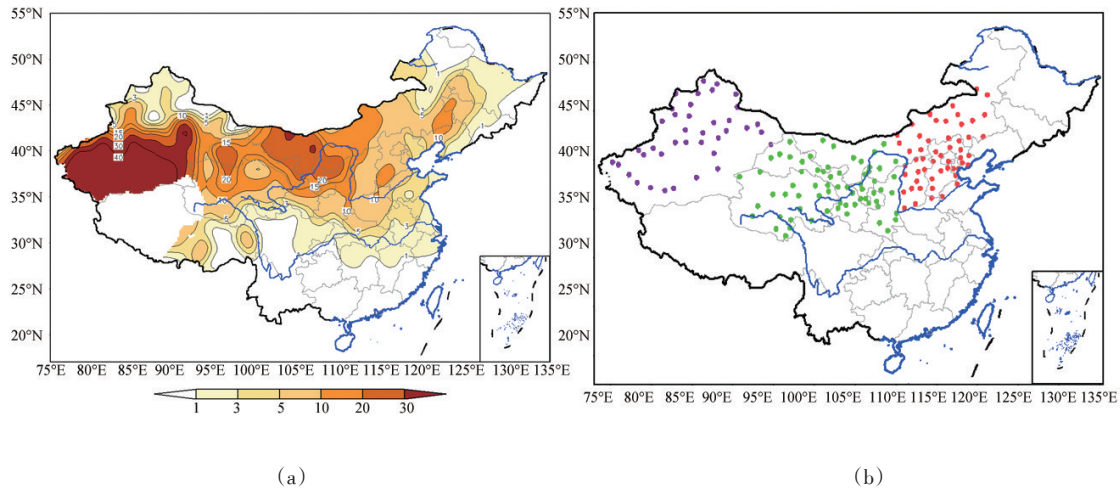


图1 1961—2016年中国春季浮尘及以上沙尘平均日数分布(a)及所选取的沙尘天气多发区各区站点分布(b)(紫色为新疆区,绿色为西北区,红色为华北区)

Fig. 1 (a) Distribution of the number of spring sand-dust days in China, the averaged data in 1961—2016 and (b) the selected stations in each region prone to sand-dust weather (purple for the Xinjiang area, green for Northwest China, red for North China)

2.2 各分区沙尘日数时间演变特征分析

由沙尘天气日数的逐年变化曲线(图2)可见,各分区沙尘天气在20世纪90年代之前偏多,尤其20世纪60年代末至20世纪70年代最多,20世纪80年代开始减少,20世纪90年代大幅度减少,21世纪10年代以来是最少的阶段。值得注意的是,在21世纪初,各区沙尘天气都出现多发的现象,尤其是华北区在2000—2002年、2006年均异常增多,表明在偏少背景下,对于特定的年份,沙尘暴灾害性天气仍有突发的可能性。

由图2可看出,各区沙尘日数均存在明显的线性减少趋势,但减少程度各不相同。表1列出了它们的线性倾向系数 b 及其与线性趋势的相关系数 R 。可以看到,3个区的线性倾向系数均为负值,与之对应的 R 均超过0.7,信度在99.9%以上,表明1961年以来各区沙尘天气均具有显著的线性减少趋势。从倾向系数的绝对值看,西北区减少幅度最大,达0.4,相当于每10年减少4天;新疆区和华北区的减少幅度相近,每10年分别减少2.8天和2.4天。表1中还给出了利用Mann-Kendall方法计算

的各区沙尘日数的突变年份,华北区出现在1987年,新疆区出现在1994年,西北区为1995年。尽管西北区突变点没有通过显著性检验,但突变分析基本显示出中国北方春季沙尘出现突变的时间东部早,西部晚。

上述分析显示,各区沙尘日数的演变既具有显著的线性减少趋势的共同特征,它们在具体时段又呈现出明显差异。

2.3 同期动力输送条件分析

上述分析表明,在不同的气候阶段沙尘天气日数的年际变化特征具有较大差异,而大气环流作为沙尘输送的重要动力条件,它与沙尘日数的关系在不同气候阶段也可能发生了明显的变化。

以华北区为例,比较了1961—1990年、1971—2000年和1981—2010年3个不同气候阶段沙尘日数与对流层低层高度场和风场的关系(图3)。可以看到,大气环流与沙尘天气日数的关系在不同的气候阶段具有明显的差异。其中,1971—2000年这一阶段大气环流对华北沙尘日数的影响最为显著。

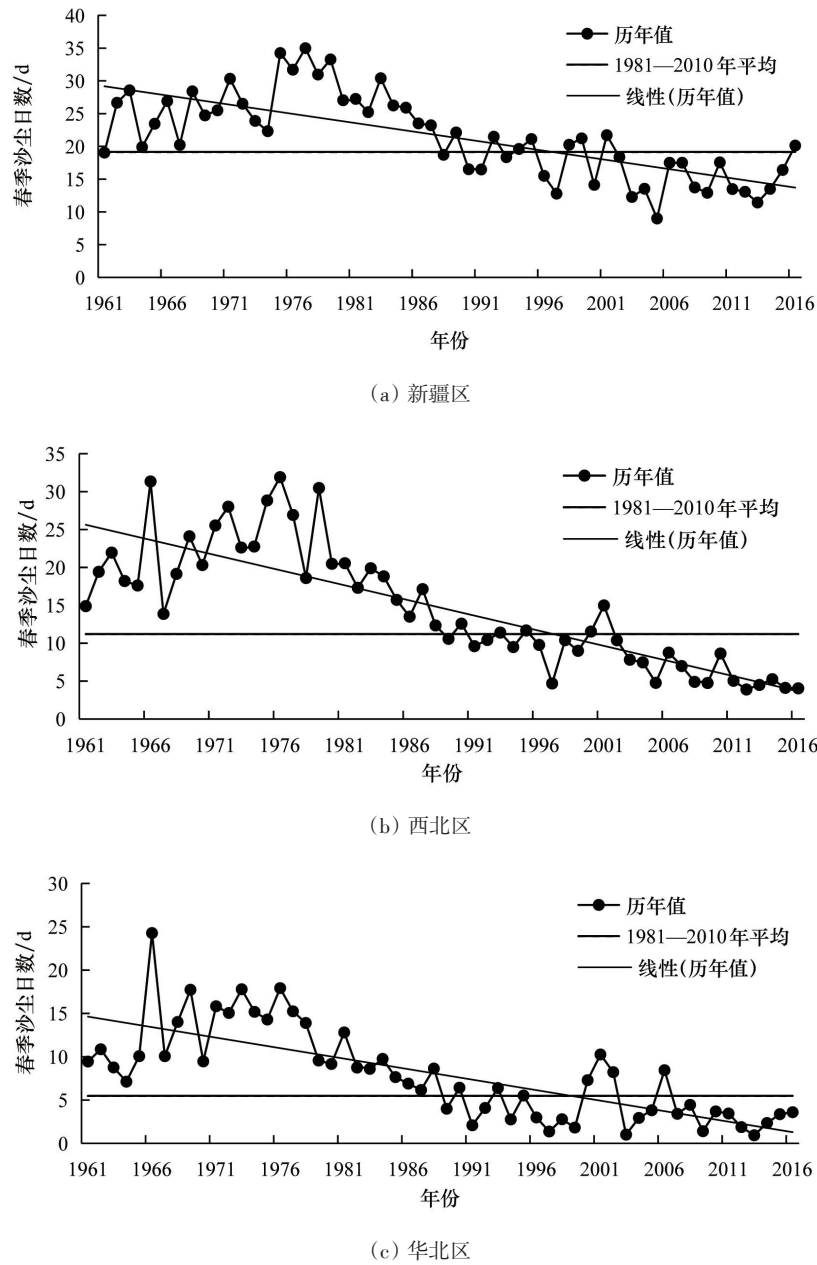


图2 各分区区域春季沙尘平均日数序列

Fig. 2 Time sequences of the regional average sand dust frequency (SDWF) in spring

表1 各区沙尘日数的线性倾向估计分析和Mann-Kendall突变分析

Table 1 Analysis of the linear tendency estimates and Mann-Kendall abrupt change of the spring SDWF for each region

区域	线性倾向系数/ b	与线性趋势的相关/ R	MK突变年份
华北区	-0.242	0.745	1987
西北区	-0.400	0.823	1995*
新疆区	-0.281	0.717	1994

注:*突变点未通过显著性检验。

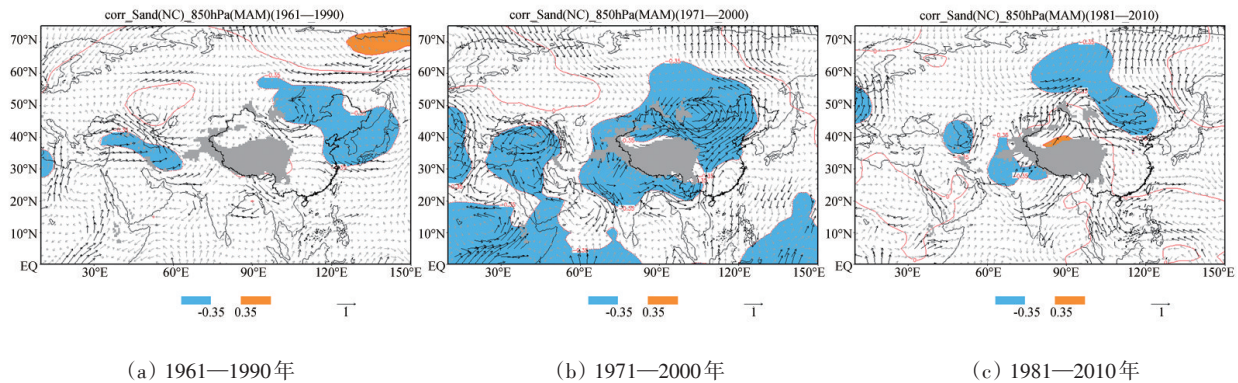


图3 不同阶段华北区春季沙尘日数与同期850 hPa位势高度场和风场相关

Fig. 3 Maps of correlations between the spring SDWF in North China and 500 hPa geopotential height as well as winds for three periods

在贝加尔湖—中国长江以北地区为大范围显著负相关区(阴影区为相关通过0.05显著性水平的区域,下同),气旋式环流中心在蒙古国上空(黑色箭头表明通过0.05显著性水平的风场矢量相关,下同),表明这个阶段华北区沙尘天气的发生与蒙古气旋活动及其带来的冷锋后大风具有密切联系,而这个阶段沙尘天气的迅速减少也正与蒙古气旋的减弱和减少有关^[2]。1961—1990年,在蒙古国上空存在一个范围较小的气旋式环流,表明蒙古气旋活动对于华北区沙尘天气的作用是重要的;而高度场上的显著负相关区范围较大,从贝加尔湖至日本海地区,呈西北东南走向,表明该地区的气压场偏低有利于华北沙尘天气偏多,值得注意的是,高度场上的显著相关区和风场的显著相关区在地理分布上存在较大差异。1981—2010年,气旋式环流相关区较之前两个时期明显东移,在阿尔泰山脉附近出现显著的反气旋式环流相关区;高度场上,从内蒙古东部往西北一直延伸到西西伯利亚平原存在大范围的显著负相关区。

以上分析表明,尽管在不同气候阶段,天气尺度上蒙古气旋活动所带来的西北或偏西气流对于华北春季沙尘天气的发生均是最重要的环流系统,但在季节平均尺度上,环流型的分布发生了明显差异。类似的,对西北区、新疆区不同气候阶段的沙尘日数与同期环流的关系同样进行了对比分析,其结果也是具有不同的分布特征。

3 前期外强迫及下垫面关键区因子分析

海温、海冰等外源强迫因子可通过作用于大气环流从而影响沙尘天气的多寡。另外,自1978年三北防护林工程启动以来,国家对于防沙治沙工作也卓见成效,沙源区下垫面状况的抑沙能力也发生了变化。对近30多年各区沙尘日数与海洋、海冰状况及陆地降水的关系进行分析,以期找出对沙尘预测具有指示意义的前期信号。由于海冰历史序列从1981年12月份开始,因此,对海冰的分析从这个时间节点之后进行。

3.1 前期外强迫因子分析

计算了各分区春季沙尘日数与上一年逐季、逐月的海表温度和海冰密集度的相关系数,结果显示,各区沙尘日数与上一年11月份的海温和与上一年10月份的北极海冰密集度的相关关系最为显著。

海温相关图中(图4),西北区和新疆区比较相似,在北大西洋呈现类似三极子模态,即,北部和南部为显著负相关区,中西部为弱的正相关区;此外,在北太平洋西部、赤道西太平洋、南太平洋中部、热带印度洋东部、副热带南印度洋均存在显著的大范围负相关区,而赤道中东太平洋区没有明显的相关关系。对于华北区,主要的负相关区在鄂霍次克海及以东的白令海海区,北大西洋上也有类似的三极

子相关分布,但强度明显偏弱。由各区沙尘日数与
北极海冰密集度的关系分布(图5)显示出,各区在

楚科奇海域附近均存在显著的大范围正相关区,尤
其西北区的最为显著。

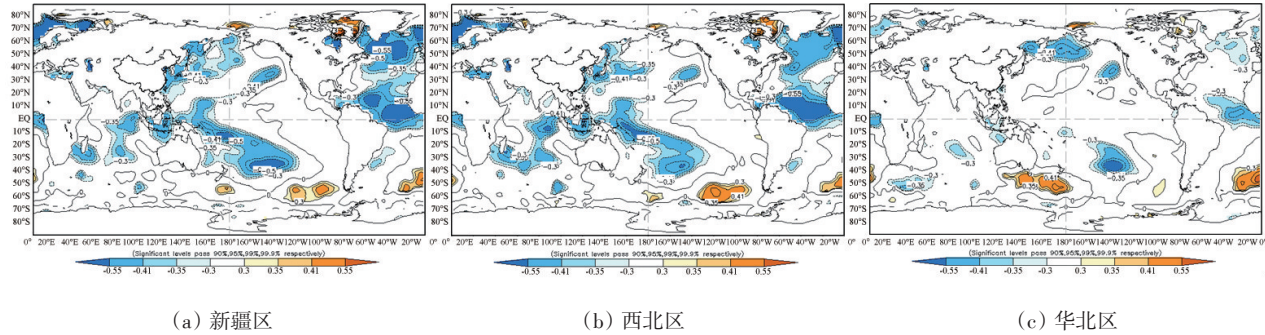


图4 各区春季沙尘日数与上一年11月全球海表温度的相关分布

Fig. 4 Correlation distributions of November sea surface temperature (SST) in previous year with the regional SDWFs

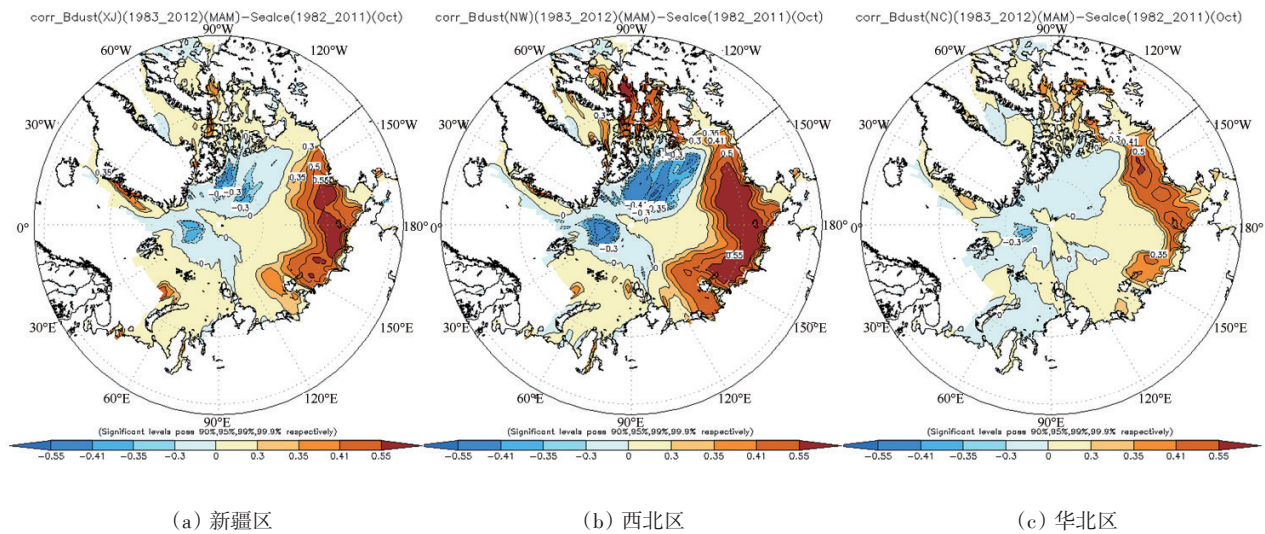


图5 各区春季沙尘日数与上一年10月北极海冰密集度的相关分布

Fig. 5 Correlation distributions of October sea ice concentration (SIC) over north pole in previous year with the regional SDWFs

根据以上分析,用国家气候中心130项气候指
数中的北大西洋三极子指数(NAT)代替北大西洋
海温关键区信号;另外根据显著相关区,选取上一
年11月份热带印度洋区域(TPIO, 10°S—10°N,
60°—100°E),中高纬度西北太平洋区(NWP, 50°—
60°N, 140°—180°E)区域平均的海温,作为影响春
季沙尘天气的海温关键区前期因子;选取上一年
10月份楚科奇海域附近(66.5°—75.5°N, 170°E—
160°W)区域平均的海表密集度距平(CSIC)作为海
冰关键区前期因子,并对上述因子进行标准化处

理。

将各区春季沙尘日数与各上一年的关键区因
子进行相关分析(表2),显示TPIO、NAT海温对西
北区和新疆区沙尘日数均有显著的影响;而NWP
对华北区的影响最大,对西北区的作用次之;相比
而言,CSIC与3个区沙尘日数的相关关系最好,均
在0.5以上。

为便于更好地理解上述外强迫因子影响中国
春季沙尘的物理机制,进一步分析了这些前期信号
与次年春季大气环流的相关关系,发现TPIO海温

表2 各区春季沙尘日数与上一年关键区海温及海冰指数的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between regional SDWFs and indices of SST and SIC over key areas in previous year

区域	TPIO	NAT	NWP	CSIC
华北区	-0.24	0.29	-0.47**	0.53**
西北区	-0.45*	0.59**	-0.39*	0.73**
新疆区	-0.47*	0.48**	-0.22	0.68**

注:*表示通过95%显著性检验,**表示通过99%显著性检验; TPIO、NAT和NWP为上一年11月份,CSIC为上一年10月份。

异常影响最显著的区域在低纬度地区,当该地区海温偏暖时,会激发出从印度、中亚、乌拉尔山到欧洲平原“气旋—反气旋—气旋”的异常环流,从而削弱乌拉尔山高压脊及前沿的偏北气流;NAT(图6(a))对欧亚中高纬度环流具有显著的影响,当出现正位

相时容易激发出从欧洲到西北太平洋上空正—负—正—负的位势高度距平波列,中国大部地区及蒙古国为气旋式距平环流,表明此时蒙古气旋往往偏强,但位势高度负距平中心在中国西北地区,因此它对西北区沙尘的影响最大。NWP海温与次年春季风场最显著的相关分布在东北亚地区,从贝加尔湖至鄂霍次克海西南部为显著的偏西相关矢量,高度场上从东北亚上空为负相关区,而中国大部地区上空为显著正相关区,表明该地区海温主要通过东路冷空气影响中国。CSIC与次年春季北半球环流的关系显示出在乌拉尔山地区为显著的正相关区,而中国大部为显著负相关区,其中心在中国西北地区(图6(b)),也就是说当楚科奇海域海冰偏多有利于增强乌拉尔山高压,而中国中西部高度场偏低,这种经向型环流有利于中国北方沙尘偏多;反之亦然。

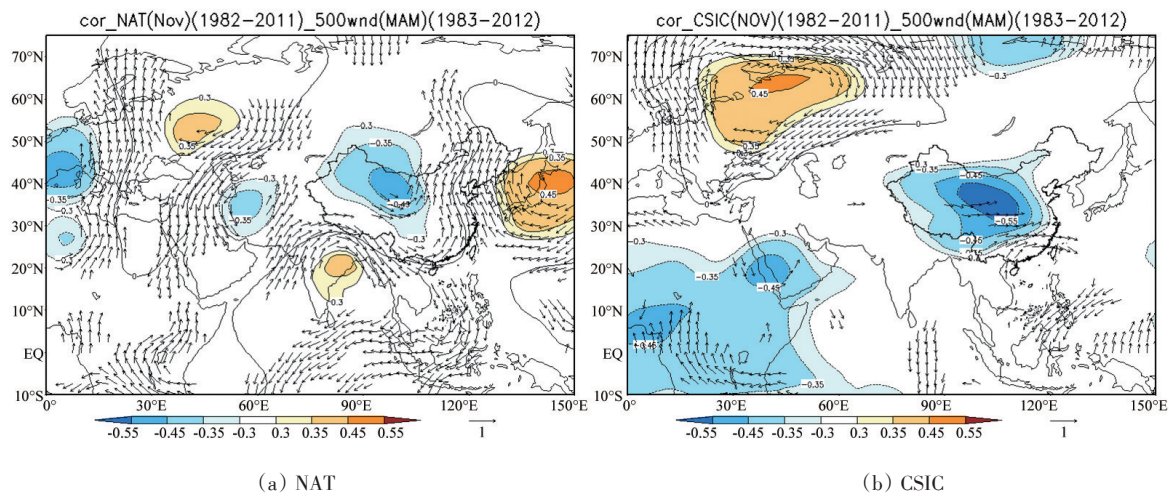


图6 前期外强迫因子与春季500 hPa高度场(阴影区和等值线)及风场(箭头)的相关分布

Fig. 6 Correlations of 500 hPa geopotential height (contours and shades) and winds (arrows) in spring with external forcing factors of previous year

3.2 前期下垫面因子分析

研究表明,在生态环境较为脆弱的荒漠草原和沙地草原区,植被储量对于沙尘天气发生与否具有重要作用,而这些区域植被生长所需水主要来源是自然降水,降水多寡将直接影响地表覆盖密度^[26]。各沙尘多发区春季沙尘日数与前一年夏季降水的

相关图显示(图7),对于华北区,内蒙古中东部至蒙古国南部为显著的负相关区,最大相关系数达-0.6,该区域正是华北沙尘天气的主要沙源地之一。西北区和新疆区沙尘也与这个地区的降水有一定的负相关关系,但范围明显缩小、位置略偏西。此外,我们还发现在青藏高原南部,也存在大

范围显著负相关区,其中心值甚至超过-0.6,但考虑到该地区站点稀疏,资料的可靠性值得商榷,还有待于进一步细致分析。

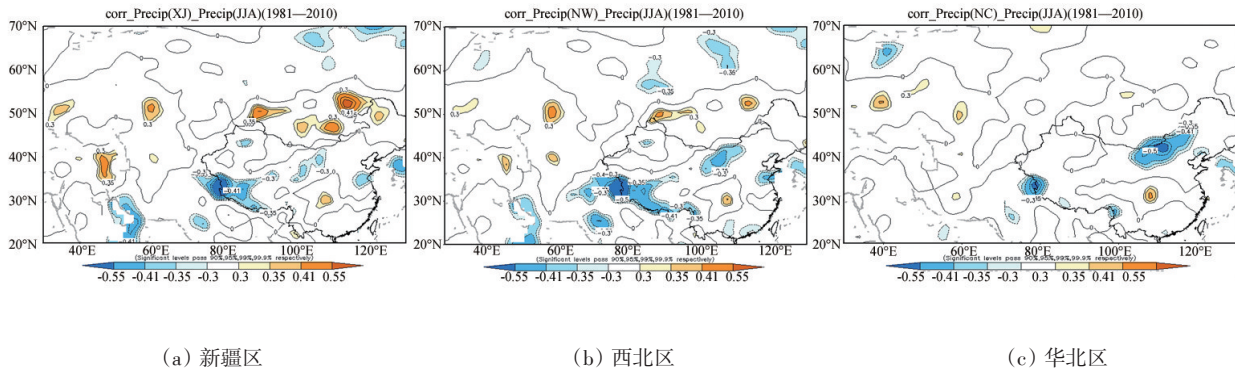
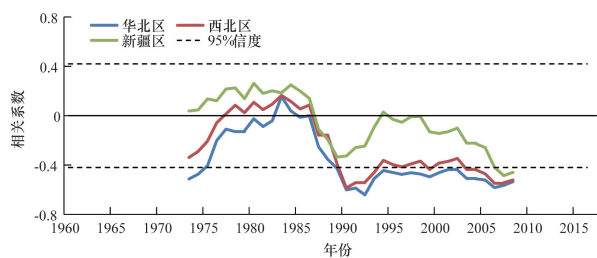


图7 各区春季沙尘日数与上一年夏季降水的关系
Fig. 7 Correlations of summer precipitations in previous year with regional SDWFs

选取前期夏季蒙古国南部—内蒙古中东部(36.5°—42.5°N, 100°—120°E)降水(MMP)作为关键区因子,计算它与各区沙尘日数20年滑动相关系数(图8)。由图8可见,关键区降水与沙尘日数的关系经历了波浪式的变化,由前期弱的正相关为主反转为近30年显著的负相关,表明在沙尘多发的气候阶段,前期夏季内蒙古中东部的降水对中国春季沙尘的影响较小,但在沙尘少发的近30年,关键区上一年生长季降水的多寡对来年中国春季沙尘日数具有重要的作用,即前期降水充沛,不利于沙尘的发生;反之亦然。



虚线为95%显著性阈值

图8 各区沙尘日数与前期夏季降水的20年滑动相关
Fig. 8 The 20-year sliding correlation coefficients of regional SDWFs with summer precipitation indices of previous year

4 春季沙尘的多因子预测模型的建立及预报拟合效果分析

上述分析显示,中国北方春季沙尘天气的多寡既受到动力输送因子的影响,也与下垫面因子的变化有关系。为综合考虑各因子的作用,选用多元逐步回归方法建立多因子预测模型。

4.1 多因子物理统计预测模型

对上述各因子进行标准化处理,采用1983—2012年30年的资料建立春季沙尘日数的多元逐步回归预测模型:

$$SDWF = \beta_0 + \beta_1 I_{TP10} + \beta_2 I_{NAT} + \beta_3 I_{NWP} + \beta_4 I_{CSIC} + \beta_5 I_{MMP}$$

式中, $SDWF$ 为各区沙尘日数拟合预测值; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_5$ 为各因子的回归系数。

该多因子统计模型对3个区的预报拟合率均达到0.7以上,其中西北区最高,达0.89,拟合效果远远高于单因子模型。前文中滑动相关分析表明各因子的影响权重会随时间发生较大的变化,因此,在实际每一年的预测中采用最新30年的资料重新拟合计算,做滚动预测,实践也表明滚动预报效果要明显高于非滚动预报模型。

4.2 预测效果及分析

该多因子预测模型在2013年建立,2014年春

季开始在国家气候中心进行业务应用,至今已有5年。图9给出了实况和历史拟合曲线及近5年的预测结果。总体看,不管是线性趋势,还是年际变化,拟合值与实况比较接近。2014—2018年华北区、西北区和新疆区的预测与实况的平均误差分别为0.84、2.54和4.06天,从标准化情况看(图9(d)),也是华北区误差最小。西北区(图9(b))的预测在2015年和2016年与实况相差较大,误差达到了4

天;新疆区(图9(a))在2014—2017年预测与实况非常接近,但2018年预报效果较差,误差达11.4 d。

针对西北区2015年和2016年预报误差较大,进行了细致分析,发现上一年初秋的降水对来年沙尘也有明显的抑制作用,因此,在2017和2018年预测中,又增加了这一因子,结果误差大幅减小(图9(b))。

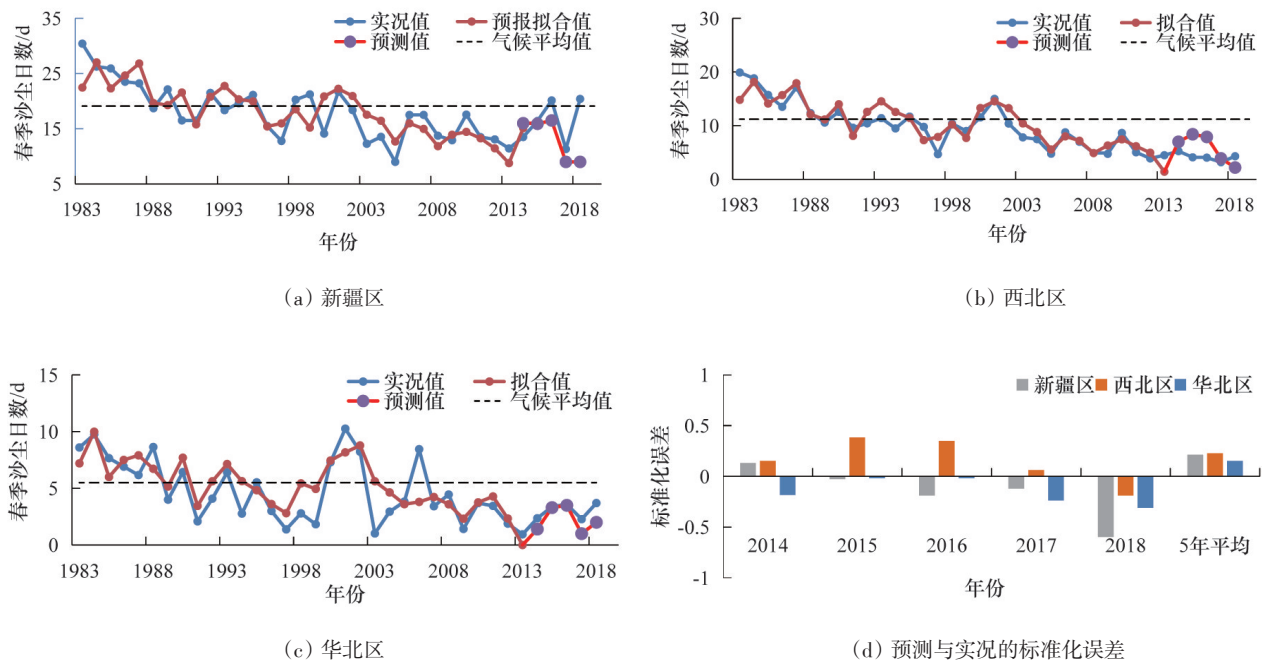


图9 春季沙尘多因子物理统计模型预报与实况对比以及2014—2018年预测与实况的标准化误差

Fig. 9 Time series of observation and prediction of the regional SDWF and their standardized errors for 2014—2018

5 结论

根据中国春季沙尘北多南少、西多东少的气候分布特征,将中国北方沙尘多发区分为华北区、西北区和新疆区。对各分区沙尘日数变化特征及其与同期大气环流的关系进行分析,筛选了有预测意义的前期外源强迫因子和前期夏季降水影响关键区。在此基础上,建立了多因子预测模型,主要结论如下。

1) 各分区春季沙尘日数均具有显著的线性减少趋势,并且在1990年代先后进入了偏少的阶

段。不同时期影响沙尘的大气环流分布也存在明显差异。

2) 秋季热带印度洋、北大西洋和西北太平洋海温及楚科奇海域海冰异常对来年中国北方春季沙尘日数均具有较好的指示意义,蒙古国南部及内蒙古中东部前一年植被生长季降水量的大小对华北区春季沙尘的多寡具有重要的影响。

3) 在上述分析的基础上,综合考虑外源强迫和下垫面因子,建立了多因子预测模型并在实际业务中进行应用,从近5年的预测情况看,对华北区的预测效果最好。

本项工作完善了中国北方春季沙尘气候趋势预测的物理框架,同时有效提高了沙尘气候预测的准确率。但上述分析也显示,气候因子随着时间演变一直在发生着的变化,不同的气候阶段,不同的因子发挥着不同的作用。因此在进行预测的实际应用时,需要对预测思路、模型不断调整。

参考文献(References)

- [1] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽, 等. 中国北方沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应[J]. 高原气象, 2003, 2(4): 337-345.
Li Dongliang, Zhong Hailing, Wei Li, et al. Climatic characteristics of annual sand-dust storm days in northern China and its response to surface sensible heat in spring of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2003, 2(4): 337-345.
- [2] Zhu C W, Wang B, Qian W H. Why do dust storms decrease in northern China concurrently with the recent global warming[J]. Geophysical Research Letters, doi: 10.1029/2008GL034886.
- [3] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63.
Zhai Panmao, Liu Jing. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(9): 55-63.
- [4] 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[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 55-58.
Niu Shengjie, Sun Jiming, Sang Jianren. Trend of sandstorm occurrence in Helan Mountain area[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 55-58.
- [5] 中国气象局. 沙尘年鉴 2010 年[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 15.
China Meteorological Administration. Sand-dust weather almanac[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 15.
- [6] 赵璇, 李耀辉, 康富贵, 等. “4.24”民勤特强沙尘暴过程初步分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 40-46.
Zhao Xuan, Li Yaohui, Kang Fugui, et al. Analysis on the strong sandstorm in minqin on April 24, 2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 40-46.
- [7] Thomas L T. Dust storm frequency in Asia: Climatic control and variability[J]. International Journal of Climatology, 1991, 11(4): 393-412.
- [8] 李彰俊, 郝璐. 地面冻结状况与春季沙尘暴发生的关系[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 203-209.
Li Zhangjun, Hao Lu. Relationship between soil freezing and thawing condition and sandstorm occurrence[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 203-209.
- [9] 徐兴奎, 王小桃, 周广庆. 中国区域降雪量和降雪频率对沙尘天气的影响分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1293-1301.
Xu Xingkui, Wang Xiaotao, Zhou Guangqing. Impact of snowfall amount and snowfall frequency on sand-dust events in China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5): 1293-1301.
- [10] Li W, Zhai P M. Variability in occurrence of China's spring sand/dust storm and its relationship with atmospheric general circulation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(4): 396-405.
- [11] 陈豫英, 赵光平. 两次典型强沙尘暴过程的对比分析[J]. 气象, 2003, 29(9): 18-22.
Chen Yuying, Zhao Guangping. Comparative analysis of two typical severe sandstorm events[J]. Meteorological Monthly, 2003, 29(9): 18-22.
- [12] 矫梅燕, 牛若芸, 赵琳娜, 等. 沙尘天气影响因子的对比分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 696-700.
Jiao Meiyun, Niu Ruoyun, Zhao Linna, et al. Comparative analysis on causing factors of dust events[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(6): 696-700.
- [13] 杜杰, 徐卫丽, 贾晓霞, 等. 蒙古气旋影响的北方沙尘暴天气气象条件分析[J]. 山西科技, 2012, 27(5): 13-19.
Du Jie, Xu Weili, Jia Xiaoxia, et al. Analysis on the meteorological conditions of sandstorms in the North affected by Mongolian cyclones[J]. Shanxi Science and Technology, 2012, 27(5): 13-19.
- [14] 汤绪, 俞亚勋, 李耀辉, 等. 甘肃河西走廊春季强沙尘暴与低空急流[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 840-846.
Tang Xu, Yu Yaxun, Li Yaohui, et al. Relationship of low level jet and severe dust storm over Hexi Corridor of Gansu in spring[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 840-846.
- [15] 张胜才, 杨先荣, 张锦泉, 等. 春季西风急流异常对甘肃极端天气的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1089-1094.
Zhang Shengcai, Yang Xianrong, Zhang Jinqian, et al. Influence of abnormal westerly jet on extreme weather in spring in Gansu Province[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1089-1094.
- [16] 唐红玉, 马振峰, 史津梅. 青藏高原季风变化及其与中国北方春季沙尘暴的关联[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 112-116.
Tang Hongyu, Ma Zhenfen, Shi Jingmei. Change of monsoon in Qinghai-Xizang Plateau and its correlation with spring's duststorm in northern China[J]. Journal of Natu-

- ral Disasters, 2008, 17(3): 112–116.
- [17] 陈亿, 尚可政, 王式功, 等. 21世纪初中国北方沙尘天气特征及其与地面风速和植被的关系研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1702–1709.
Chen Yi, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. Characteristics of sand-dust weather in northern China from 2002 to 2010 and its relationship with surface wind speed and NDVI[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1702–1709.
- [18] Kalney E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437–471.
- [19] Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006)[J]. Journal of Climate, 2008, 21(10): 2283–2296.
- [20] Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate[J]. Journal of Climate, 2002, 15(13), 1609–1625.
- [21] Chen M, Xie P, Janowiak J E, et al. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2002(3), 249–266.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计与预测技术: 第2版[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
Wei Fengying. Modern climate statistics diagnostics and forecast technology: 2nd Edition[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [23] Wang S, Wang J, Zhou Z, et al. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(3), 509–520.
- [24] 中国气象局预测减灾司, 中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 1–5.
Department of Forecasting and Disaster Mitigation, National Meteorological Center, China Meteorological Administration. Handbook of China meteorological geographical regionalization[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 1–5.
- [25] 吴占华, 任国玉. 我国北方区域沙尘天气的时间特征分析[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 96–100.
Wu Zhanhua, Ren Guoyu. Regional characteristics of climatic variability of dust storm frequency in northern China[J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 35(1): 96–100.
- [26] Xu Xingkui, Chen Hong. Influence of vegetations and snow cover on sand-dust events in the west of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(3): 331–340.

Multi-factor prediction of spring dust weather frequency in northern China

YANG Mingzhu, ZHU Xiaying*, AI Wanxiu, SONG Wenling

National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract The evolution characteristics of the spring sand-dust weather frequency (SDWF) in northern China and its associated atmospheric circulations are analyzed. The signals for the prediction of the SDWF are explored by using the sea surface temperature and the sea ice concentration in the previous autumn as the external forcing factors. Besides, the influence of the rainfall over the dust-storm source regions in the previous summer is also studied. A multi-factor prediction model for the SDWF in northern China is established and applied in the operational forecasting in the National Climate Center of China. The results show that this model performs best for North China and fairly well for Northwest China by involving the precipitation in the previous autumn.

Keywords sand-dust weather; climate trend; a multi-factor prediction model ●



(责任编辑 傅雪)