

中国北方春季沙尘暴周期变化特征及其 对最大风速的响应

王春学^{1,2}, 秦宁生^{1,2}

(1. 四川省气候中心/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;

2. 中国科学院 地球环境研究所, 西安 710061)

摘要:利用1971—2013年中国北方沙尘暴资料,分析了近43年中国北方春季沙尘暴的时空变化规律及其对最大风速变化的响应。结果表明:1971—2013年中国北方春季沙尘暴日数基本呈现出一致的逐渐减少趋势,其中1970年代初到20世纪末出现明显的减少趋势,进入21世纪以来沙尘暴日数略有增加,但仍维持在较低水平。中国北方春季的最大风速与沙尘暴日数呈显著正相关,并且其总体和阶段变化趋势都与沙尘暴日数变化有很好的对应关系。近43年中国北方春季沙尘暴日数最显著的变化特征为线性减少趋势,通过去趋势处理后发现其有明显的年际和年代际波动,在年际尺度存在明显的准7年周期,年代际尺度的准18年周期达到了99%的置信度水平。通过典型周期循环重建表明,中国北方地区沙尘暴准7年周期主要表现出整体一致的变化特征,河西走廊到陕北地区为大值中心,并且在位相转换过程中有一定的先兆性;准18年周期主要表现为东西反向和南北反向的交替异常循环。另外在典型循环演变过程中,最大风速与沙尘暴日数都有很好的协同变化关系,即风速偏大(小)时,对应沙尘暴日数也偏多(少)。

关键词:春季; 沙尘暴; 最大风速; MTM-SVD; 周期

中图分类号: P445.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0133-09

Periodic Variation Characteristics of Spring Sandstorm in Northern China and the Response to Maximum Wind Speed

WANG Chunxue^{1,2}, QIN Ningsheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin of Sichuan Province, Climate Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the dataset of sandstorm during 1971—2013, we analyzed the temporal and spatial variations of spring dust storms in northern China and the response to maximum wind speed variation. The results indicated that the frequency of spring sandstorm in northern China presented a gradual decreasing trend during 1971—2013 as a whole; the frequency of spring sandstorm decreased significantly from the early 1970s to the end of twentieth century, and then increased slightly since twenty-first century, but remained at a low level. The maximum wind speed of spring was significantly correlated with the frequency of sandstorm, and there was a good correspondence both in the total trend and stage trend. In the past 43 years, the most significant characteristic of the sandstorm was a linear decreasing trend. After removing the trend, it was found that there were obvious interannual and interdecadal fluctuations. By using the method of MTM-SVD, a significant 7.1-year cycle on the interannual scale was found, and the 18.3-year cycle on the decadal scale also reached the 99% confidence level. The typical circulation reconstruction indicated that the primary evolution characteristics of the quasi 7-year period was consistent change, with an abnormally large value center from Hexi Corridor to the northern Shaanxi, which switched firstly in the phase transition process. The quasi 18-year cycle was mainly characterized by the pattern alternation of the north-south opposite and the east-west opposite. In the typical cycle, the maximum wind speed and sandstorm had a good synergistic relationship, higher or lower wind speed corresponded to more or less sandstorms.

Keywords: spring; sandstorm; maximum wind speed; MTM-SVD; cycle

中国的沙尘天气主要出现在北方地区,是中亚沙尘暴区的一部分,多发生在春季。20世纪70年代以来,随着对沙尘暴危害的认识和沙尘资料的丰富,有关沙尘暴现象^[1-3]、变化规律^[4-5]和形成原因以及影响因子^[6-11]的研究越来越多,取得了丰硕的研究成果。在沙尘暴时空变化特征分析中,由于研究区域、资料时段以及使用方法的的不同,研究结论略有差异,但是总体结论基本一致,即我国河西走廊、阿拉善高原、南疆盆地和内蒙古中部地区是沙尘暴高发区,我国沙尘暴日数在1960年、1970年代最多,随后开始逐渐减少^[4-5,12]。

目前有关沙尘暴周期变化规律的研究相对较少,而且结论差异较大,王存忠等^[13]采用小波分析方法的研究指出,中国强沙尘暴主要受6~8 a和2~3 a波动的叠加影响;而丁瑞强等^[14]利用奇异谱分析方法的研究表明,中国沙尘暴日数除西藏地区有7.7 a周期外,其余沙尘暴多发区的周期都集中在准2 a和5~6 a。郭慧等^[15]指出甘肃省的沙尘暴有3~6 a和32 a的周期。李红军等^[16]的研究表明新疆存在准3 a周期。王勇等^[17]认为西北地区2~3 a和4~8 a周期最为明显。孙然好等^[18]发现河西走廊地区沙尘暴具有多尺度振荡的特点,存在7 a、13 a、以及23 a左右的周期。万的军等^[19]的分析表明,塔里木盆地南缘沙尘暴存在6~8 a,15~18 a和32 a的周期。

以往的周期规律研究中主要使用小波、功率谱、奇异谱等方法,只能针对单一时间序列,所以在对大范围的区域进行分析时就要先把研究区域内的多站点资料处理成一个时间序列,然后再进行分析,这个过程很可能损失掉部分真实周期信号,同时也可能产生某些虚假信号。另外观测事实表明1980—2000年沙尘暴迅速减少,这使得沙尘暴时间序列的线性减少趋势最为突出,这可能也会掩盖部分周期信息。以往沙尘暴周期特征的分析只给出了其可能存在的某些周期,而其显著时段及典型循环的演变过程仍然不清楚。

本文将采用一种可以分析空间资料场周期特征的方法,研究我国沙尘暴典型循环的时空演变规律,并进一步分析其对最大风速变化的响应情况,以期深入了解我国沙尘暴的时空变化特征,为沙尘暴的预测、防御和水土保持等提供科学的参考依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

沙尘暴资料是由国家气象信息中心基于地面气象观测数据文件和地面气象要素数据文件整理的1954—2013年全国2 474个国家气象站的逐日资料,由每天的天气现象观测记录得到沙尘暴是否发生,发

生记为1,否则记为0。本文沙尘暴日数资料是用每年春季(3—5月)逐日资料累加而得。本文主要选取沙尘暴频发区的站点,即年平均沙尘暴发生次数在1次以上,由于前期观测站点较少、缺测率较高,通过筛选最后确定使用1971—2013年中国北方165个站点(图1)沙尘暴资料。另外,使用同期春季(3—5月)中国北方165个国家气象站的逐月最大风速资料(10 min平均风速的最大值)。

1.2 研究方法

经验正交函数(Empirical Orthography Function, EOF)展开可以把原变量场分解为正交函数的线性组合,构成为数很少的不相关典型模态,代替原始变量场,每个典型模态都含有尽量多的原始场的信息,在气象领域得到了广泛的应用^[20]。

线性回归:用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程, $y_i = a + bt_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$),其中 a 为回归常数, b 为回归系数。去趋势波动分析(Detrended Fluctuation Analysis, DFA):对某一气候变量序列 x_i ,减去其线性回归值 y_i ,得到其去趋势序列 $z_i = x_i - y_i$ 。

MTM-SVD方法是由Mann and Park^[21]提出的一种多变量频域分解技术。这是一种将谱分析的多锥度方法(Multi-Taper Method, MTM)和变量场的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法结合在一起的气候信号检测技术,详细内容参阅相关文献^[21-23]。MTM-SVD方法的主要特点是:(1)分析对象不仅可以是一维时间序列,也可以是多维或多站点的气候变量场,它可以非常便利地分析气候变量场整体所具有的谱特征。(2)包含了MTM方法,通过变量场时间序列与多个锥度相乘,使得在谱解析度和谱的变异之间达到了一个最佳的平衡,有效防止谱泄漏现象。(3)通过MTM-SVD方法得到的LFV(Local Fractional Variance)谱在频域中为信号检测提供了一个有效的参数,它以频率函数的形式表明了由“每个频率波段”中的主要振动解释的方差百分比。LFV谱中,在一个给定频率处的波峰预示着数据在此频率处振荡的一个潜在重要的时空信号。这样更加直观、简便地显示出变量场不同时间尺度的变化特征。原始区域 F 的 N 个对应关系在保持空间结构不变的情况下在时间上改变序列。数域 F 中的1 000个排列就是这样产生的,它们破坏了数域 F 的时间结构而不是空间结构。整个MTM-SVD过程就是在数域 F 的每个“随机化”形式中完成的,并且每次都计算出一个新的LFV谱。由重复采样时间序列计算出的全部1 000个LFV谱,在没有信号的

情况下为空间上相关联的有色噪声构造了一个 LFV 参数的零分布估计值。这个零分布事实上是独立于频率的,而且与相同基本空间关联的白噪声序列的零分布是无差别的。经验的显著性水平就是分别取这个零分布的 50%,90%,95%和 99%而得到的。(4) 可以为所有时间和区域重建时空信号。这种信号的重建可以更直观地分析和描述不同时间尺度振动的时间—空间演变特征和过程。(5) MTM-SVD 技术在其应用上可扩展到耦合的区域,即在同一时刻多于一个的区域的耦合。近年来 MTM-SVD 被广泛使用在气象科研领域中^[24-28]。

2 结果与分析

2.1 EOF 主模态分析

1971—2013 年中国北方地区春季沙尘暴日数 EOF 分析表明,前 5 个模态的累计方差贡献率为 64.4%,其中第一模态的方差贡献率达 41.8%,并通过了显著性检验。图 1 为第一模态沙尘暴空间分布,可以发现研究区域均为正值,即中国春季沙尘暴 EOF 分析的主模态为全区一致变化型,并且从新疆北部、内蒙古西部到甘肃和陕西北部地区出现异常大值带。这与以往研究^[29]中我国春季沙尘暴多发区的地理分布基本吻合。图 2 给出了第一模态对应的时间系数,可以发现从 1971—2013 年中国春季沙尘暴呈现逐渐减少的趋势,其线性减少趋势通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。从 1970 年代中期到 1990 年代后期,出现明显的减少趋势,进入 21 世纪以来沙尘暴日数有所增加,但仍然维持在较少的水平。

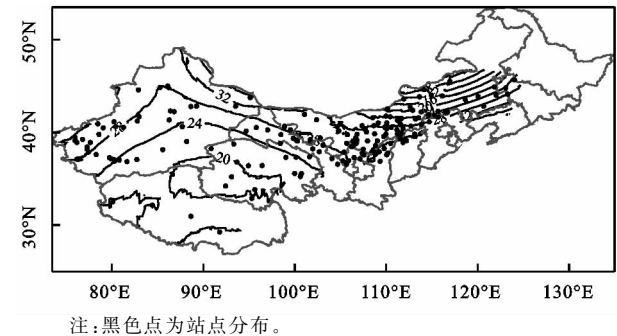


图 1 1971—2013 年中国春季沙尘暴日数 EOF 分析第一模态空间分布

2.2 趋势分析

图 3 给出了 1971—2013 年中国北方沙尘暴日数线性变化趋势分布图(阴影区通过了显著性检验),可以看到大部分地区都为明显的减少趋势,其中新疆东北部、内蒙古中西部、甘肃和陕西北部平均每 10 a 减少 2~3 d,这与上文 EOF 分析结果一致,说明线性减少趋势是近 43 a 中国春季沙尘暴最显著的变化信号。研究表明,

中国北方地区春季最大风速也存在减弱的趋势,而大风是沙尘暴发生最重要的激发因素^[30]。

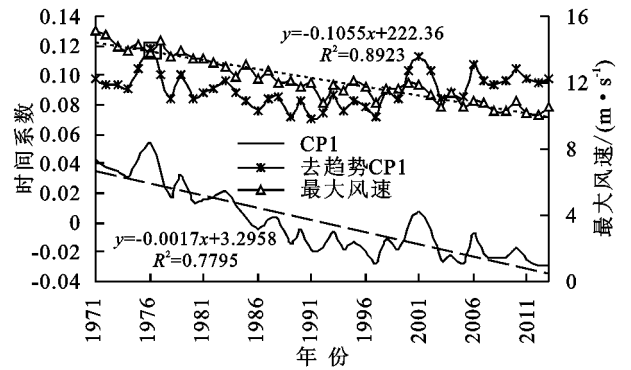
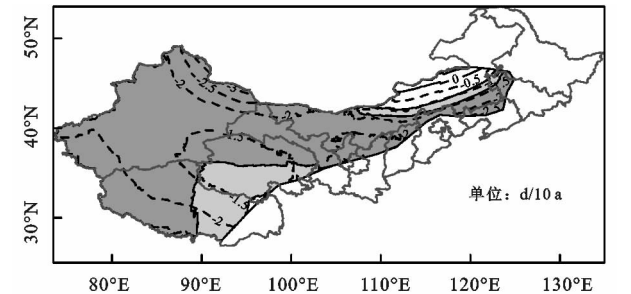


图 2 1971—2013 年中国春季沙尘暴日数 EOF 分析

中国北方沙尘暴多发区近 43 a 春季最大风速资料(图 2)显示,春季最大风速也出现了明显的减弱趋势(通过了 $\alpha=0.01$ 显著性检验),并且显著减弱时段也出现在 1970 年代中期到 20 世纪末期,21 世纪以来仍然逐渐减弱,但减弱幅度明显减小。图 2 中的最大风速与 CP1 的相关系数达到 0.93(通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验),即长期变化趋势上,春季沙尘暴日数对春季最大风速的响应非常敏感,春季最大风速的大小变化可直接影响到春季沙尘暴日数的多少。



注:浅色阴影区通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,深色阴影区通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

图 3 1971—2013 年中国北方春季沙尘暴日数线性变化趋势系数分布

2.3 年际年代际波动

分析表明,近 43 a 来中国北方春季沙尘暴日数有明显的减少趋势,并对最大风速有很好的响应,那么其年际和年代际变化有什么特征?采用 MTM-SVD 方法对沙尘暴日数进行周期分析。图 4 给出了 LFV 谱分析结果,可以看到在年际尺度上 3.6 a 和 6.8 a 周期出现峰值,在年代际尺度上 10 a 周期也有峰值出现,但是相应峰值都没有通 50%的置信度水平。这可能是由于趋势信号异常明显,掩盖了年际和年代际变化信号,所以应当对沙尘暴日数原始序列进行去趋势处理,即去除了趋势信号保留年际和年代际信号。

通过去趋势的沙尘暴日数资料再进行周期分析发

现,LFV 谱分析结果(图 5)与原始资料分析结果(图 4)有较大差异,年际尺度的 7.1 a 峰值达到了 95% 的置信度水平,年代际尺度上出现 18.3 年峰值,并且达到了 99% 的置信度水平。下面对年际尺度的准 7 a 周期和年代际尺度的准 18 a 周期进行深入分析。

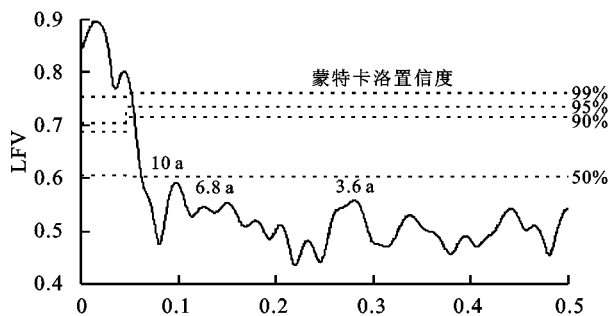


图 4 1971—2013 年中国春季沙尘暴日数 LFV 谱分析

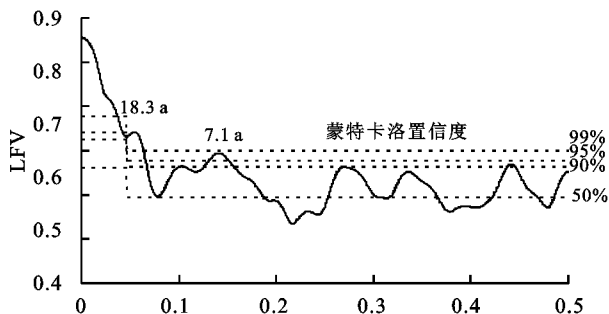


图 5 1971—2013 年中国春季沙尘暴日数(去趋势)
LFV 谱分析

2.4 典型周期循环重建

2.4.1 准 7 a 周期 图 6 给出准 7 a 周期的典型循环重建,0°位相(第 1 年)时,除河西走廊到陕北地区 and 新疆西部地区沙尘暴略偏多外,其余大部分地区沙尘暴日数偏少,在内蒙古西部的阿拉善高原和东部的浑善达克沙地附近出现负异常中心。51°位相(第 2 年)时,河西走廊到陕北地区 and 新疆西部的正异常范围迅速扩展,我国北方大部地区沙尘暴日数以偏多为主,在河西走廊到陕北地区 and 新疆北部出现两个正异常大值中心,而青藏高原大部沙尘暴日数仍然保持偏少。103°位相(第 3 年)时,正异常范围进一步扩大,强度进一步加强,青藏高原沙尘暴偏少区向南退缩。154°位相(第 4 年)时,沙尘暴偏多范围少变,但强度明显减弱,沙尘暴偏少范围则明显减少。206°位相(第 5 年)时,新疆大部沙尘暴日数正异常南移到青藏高原地区,河西走廊到陕北地区转变为负异常。257°位相(第 6 年)时,河西走廊到陕北地区 and 新疆北部的负异常迅速扩展,青藏高原地区正异常强度加强。309°位相(第 7 年)时,异常分布情况变化不大,但强度有所减弱。360°位相(第 8 年)异常分布与 0°位相相同,开始下一个 7 a 周期循环。

中国北方春季沙尘暴日数的准 7 a 典型循环总

体表现为全区一致的变化,但是不同地区也存在一定差异,其中河西走廊到陕北地区异常幅度最大,并且在逐年演变过程中该地区异常转换也出现的最早,然后向其他地区扩展。为了考察沙尘暴准 7 a 周期是否一直存在,我们选择了异常大值中心的定边站进行时间重建。从图 7 中可以看到,定边站的沙尘暴日数准 7 a 周期在 1970—1985 年最为明显,1980 年代中期到 1990 年代前期准 7 a 周期信号迅速变弱,随后一直到 2013 年准 7 a 周期信号又恢复,但是振幅较 1970—1985 年偏小,这可能与该时段沙尘暴日数维持在较低水平有关。

2.4.2 准 18 a 周期 图 8 给出了沙尘暴日数准 18 a 周期的典型循环过程,0°位相(第 1 年)时,我国北方沙尘暴呈现为西多东少的分布状况。40°位相(第 3 年)时,西部正异常向南退缩到青藏高原地区,东部负异常区向西扩展到新疆地区,并在新疆东北部出现负异常大值中心,形成南多北少的分布态势。80°位相(第 5 年)时,异常分布变化不大,但北部负异常强度进一步增强,而南部正异常强度则有所减弱。随后北部负异常逐步向西退缩,而南部的正异常则逐渐东移。到 160°位相(第 9 年)时,异常分布与第 1 a 呈相反的分布,即沙尘暴日数异常为东多西少。从 200°位相(第 11 年)开始进入后半周期循环,异常演变过程与前半个周期类似,只是异常分布情况相反。到 360°位相(第 19 年),又恢复到 0°位相的情况,开始下一个周期循环。

从准 18 a 典型循环重建可以发现,沙尘暴年代际变化主要体现了东西反向和南北反向异常的交替演变,异常变化大值中心与准 7 a 循环有所差异。为了进一步分析该差异,选择异常大值中心的新疆东部的淖毛湖站和阿里地区的狮泉河站进行时间重建。从图 9 中可以看到,近 43 a 沙尘暴年代际尺度上的准 18 a 周期一直存在,并且在 1970—1980 年代最为明显。对比淖毛湖站和狮泉河站的循环过程,可以发现二者呈现出相反的波动变化,这与上文循环演变的过程是一致的。

2.5 最大风速协同变化

由于风速变化对沙尘暴趋势变化的影响较大^[27],那么在沙尘暴典型循环过程中是否也存在一定的响应? 利用 MTM-SVD 方法对最大风速资料和沙尘暴日数资料的耦合场进行分析,研究二者的协同变化关系。图 10 给出了最大风速在准 7 a 典型循环的耦合重建,可以看到 0°位相(第 1 年)时,北部地区最大风速都为负异常,南部为弱的正异常,与沙尘暴异常空间分布基本吻合(图 6A);51°位相(第 2 年)时,河西走廊地区最大风速正异常迅速增强,范围扩

展到内蒙古西部地区,新疆北部也出现风速正异常区,对应沙尘暴开始转变为偏多(图 6B);103°位相(第 3 年)时,新疆和内蒙大部的最大风速正异常连成一片,只在青藏高原西北出现弱的负异常区,对应我国沙尘暴明显偏多(图 6C);154°位相(第 4 年)时,大

风异常分布与第 1 a 基本相反,北部正异常范围大,南部出现弱的负异常。从 206°位相(第 5 年)开始进入后半周期,异常演变过程与上半周期类似,异常符号相反。360°位相(第 8 年)时,恢复到第 1 a 的状态,开始下一个准 7 a 周期循环。

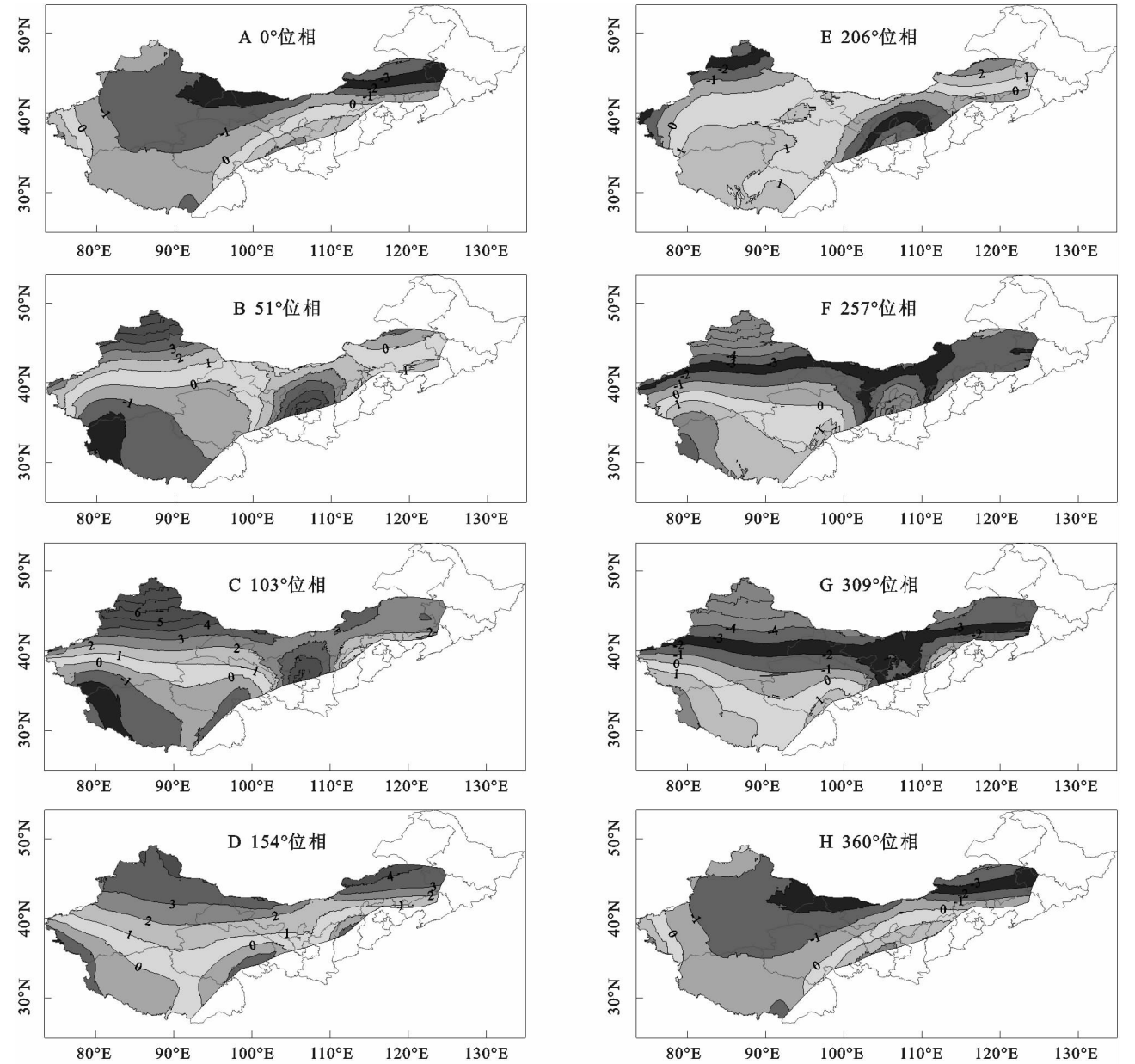


图 6 中国北方春季沙尘暴日数在准 7 a 周期的典型循环重建

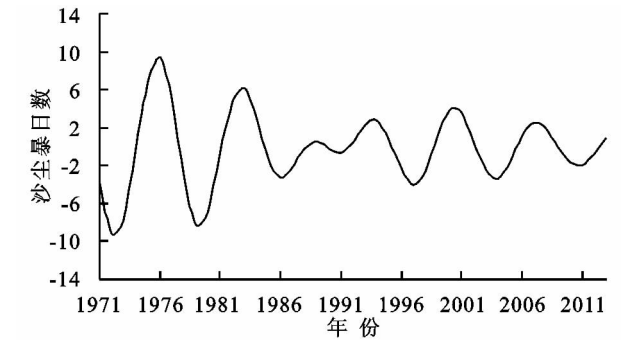


图 7 定边站在准 3 a 周期上的时间重建(1971—2013 年)

同样,对最大风速和沙尘暴日数耦合场在准 18 a 进行循环重建(图 11),0°位相(第 1 年)时,大部分地区最大风速为负异常,尤其在内蒙古中部地区,而新疆北部则以风速正异常为主,对应同期沙尘暴西多东少(图 8A)。40°位相(第 3 年)时,大部分地区最大风速都为负异常,新疆北部到内蒙古中西部出现负异常大值带,青藏高原南部风速偏小,这与沙尘暴北少南多的分布形势基本一致(图 8C)。随后大风负异常区向西退缩,而高原南部的大风正异常则向东扩

展,到 160°位相(第 9 年)时,最大风速异常分布为西北小,东南大,与沙尘暴东多西少的分布基本对应(图 8E)。从 200°位相(第 11 年)开始进入后半周期,

最大风速的演变也都与沙尘暴有较好的对应关系。360°位相(第 19 年)时,恢复到 0°位相,开始下一个循环周期。

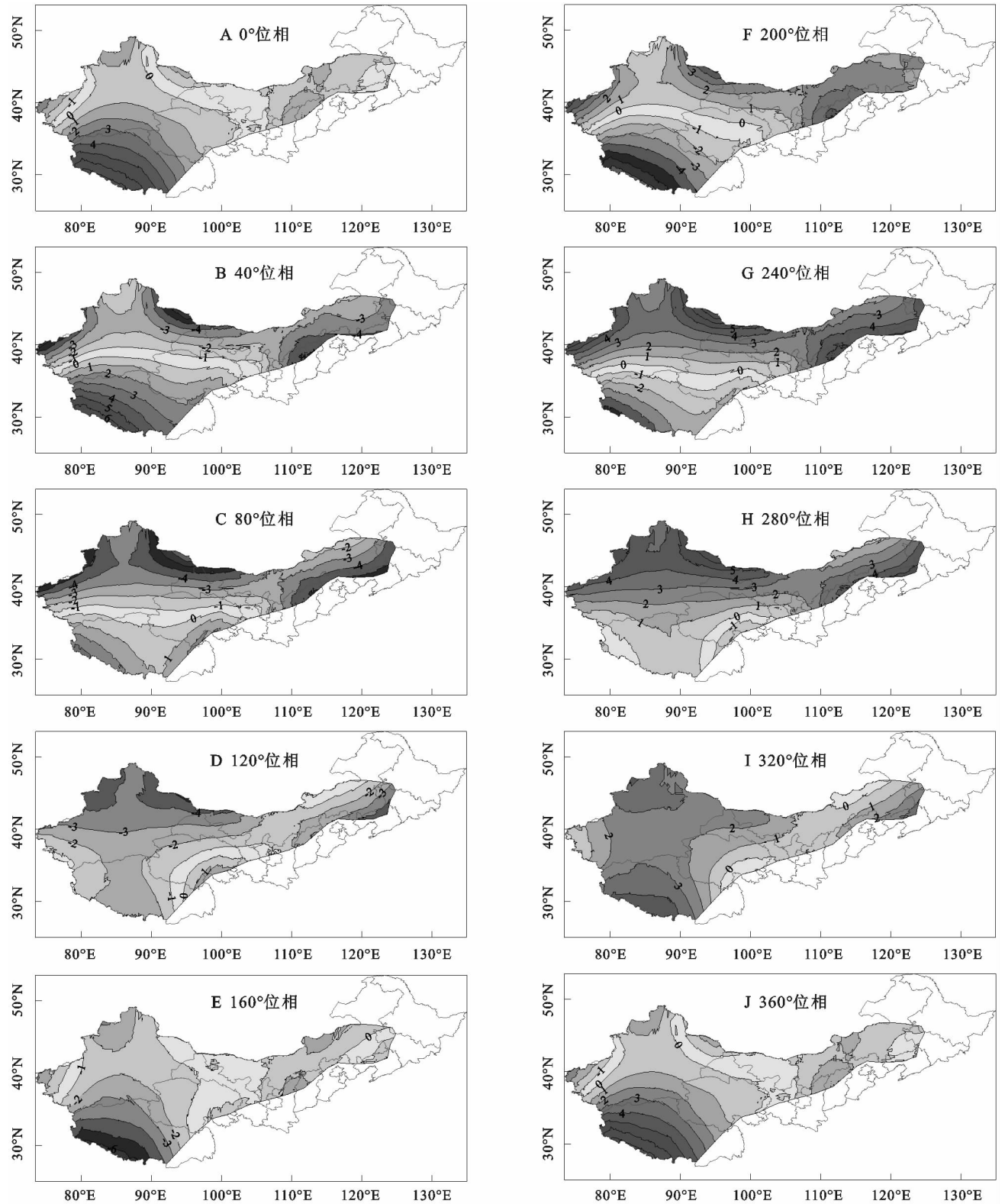


图 8 中国北方春季沙尘暴日数在准 18 a 周期的典型循环重建

进一步对比年际波动和年代际波动中沙尘暴日数对最大风速的响应,可以发现在准 7 a 循环中,沙尘暴日数异常对最大风速异常的空间响应更敏感,空

间异常分布的配合情况更吻合;而在准 18 a 循环中,沙尘暴日数异常对最大风速异常的空间配合情况还有些偏差,但是从异常幅度上看,准 18 a 循环中最大

风速异常幅度可达 2~3 m/s,而准 7 a 周期的最大风速异常则在 1 m/s 左右;可见最大风速在这两个时间尺度上的波动对沙尘暴的多寡都有较大作用。

3 结论和讨论

1971—2013 年中国春季沙尘暴日数呈现逐渐减少的趋势,从 1970 年代到 20 世纪末的减少趋势最明显,进入 21 世纪以来沙尘暴日数略有增加,但仍维持在较低水平。在趋势变化过程中春季沙尘暴日数对春季最大风速的响应非常敏感,总体趋势和阶段性趋势有较好的对应关系。

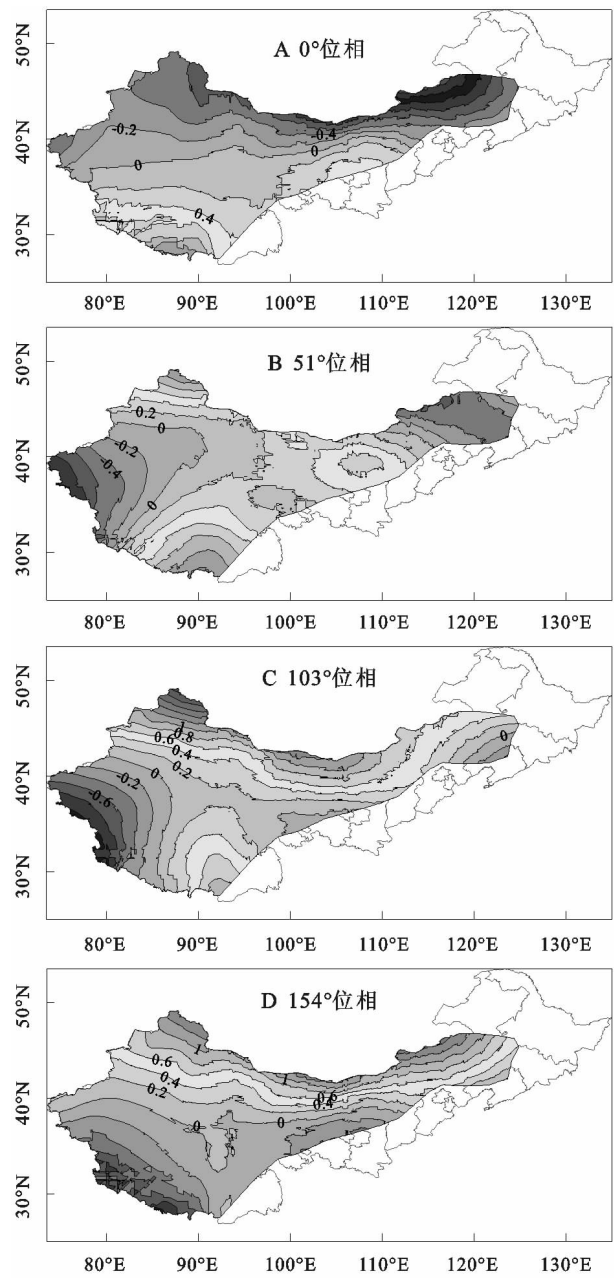


图 10 最大风速与沙尘暴日数在准 7 a 周期上的耦合重建

通过去趋势处理后,发现我国北方春季沙尘暴日数在年际尺度的准 7 a 周期和年代际尺度的准 18 a 周期都通过了显著性检验。典型循环重建表明,准 7 a

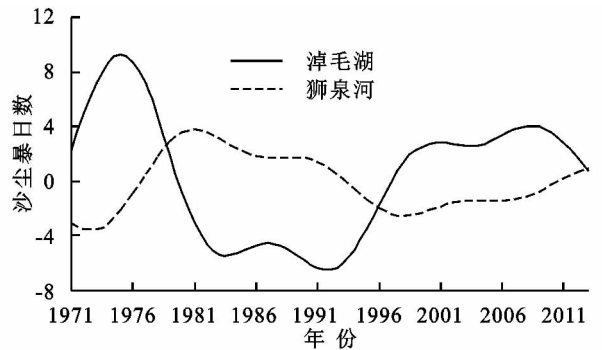
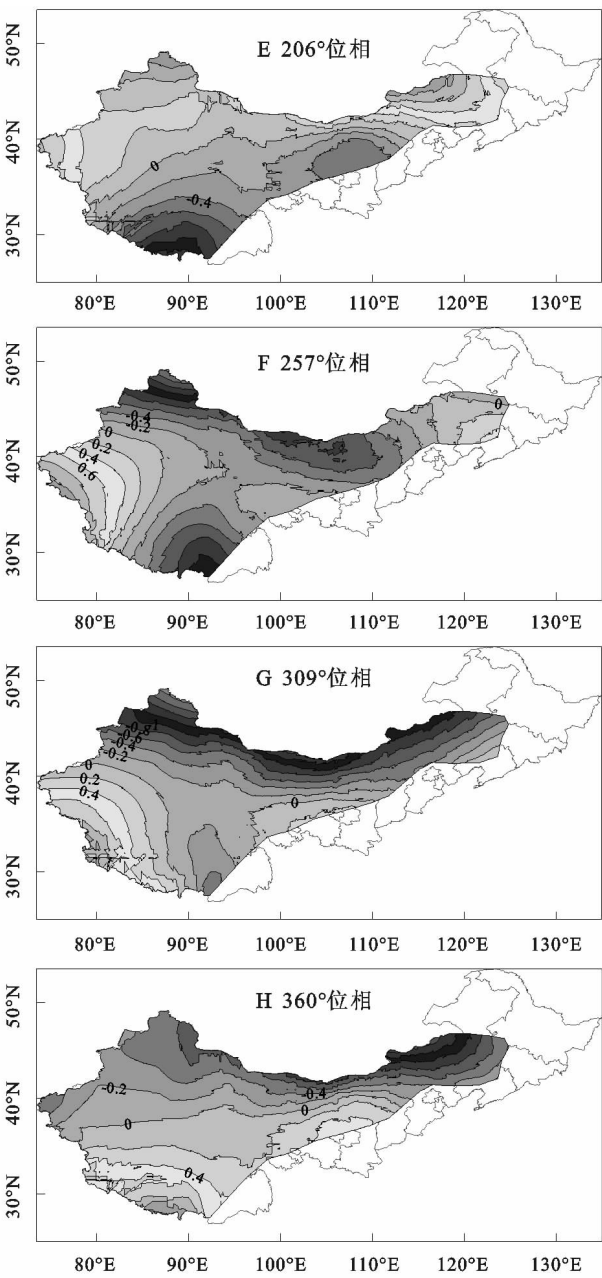


图 9 淖毛湖站和狮泉河站在准 18 a 周期上的时间重建(1971—2013 年)



周期和准 18 a 周期都在 1970—1980 年代最为显著,其中准 7 a 周期表现为整体一致的演变过程,河西走廊到陕北地区为异常大值中心;准 18 a 周期主要体

现东西反向异常和南北反向异常的循环演变过程。最大风速与沙尘暴日数有很好的协同变化关系,最大风速偏大时,沙尘暴日数偏少,反之亦然。在年际尺

度波动上最大风速异常与沙尘暴日数异常的空间配合更吻合,年代际波动上空间配合稍有偏差,但是最大风速的异常幅度更大。

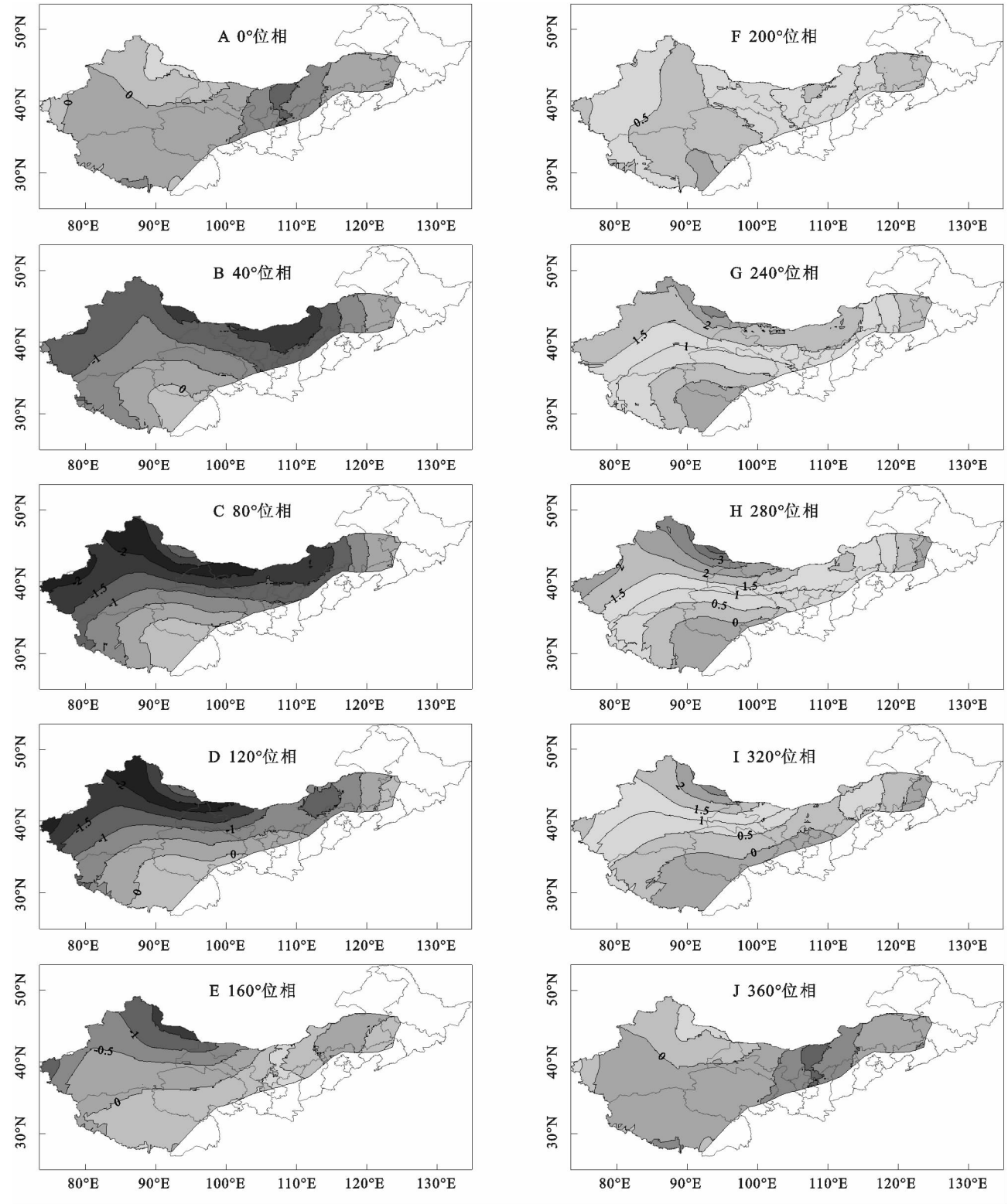


图 11 最大风速与沙尘暴日数在准 18 a 周期上的耦合重建

本文主要利用较新的资料研究了中国北方春季沙尘暴日数的一些变化事实和其对最大风速的响应,并没有对其形成机理进行深入探讨。沙尘暴形成的 3 个基本条件是大风、沙尘物质和局地热力条件^[30],

而后两个条件主要受地理条件制约,相对稳定,所以沙尘暴的长期变化规律应该主要受到大风的影响。本文从趋势和周期变化上指出了春季沙尘暴日数对最大风速的响应,但是这种响应是否一直稳定存在还

需要进一步验证。在全球气候变暖的背景下,气象因素对沙尘暴长期变化规律和形成机理的作用还需深入研究,这对气象防灾减灾以及水土保持等工作都有重要的科学意义。

参考文献:

- [1] 徐国昌. 甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35.
- [2] 王式功, 杨德保, 周玉素, 等. 我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠, 1995, 15(4): 332-338.
- [3] 徐建芬, 牛志敏, 陈伟民, 等. 我国西北地区4.5沙尘暴天气研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(3): 281-286.
- [4] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106-111.
- [5] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954—2002年)[J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1224-1228.
- [6] 毛睿, 龚道溢. 华北春季沙尘暴频次与环流年际变率的相关分析[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1023-1030.
- [7] 刘生元, 王金艳, 王式功, 等. 春季东亚副热带西风急流的变化特征及其与中国沙尘天气的关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 431-437.
- [8] 李雪, 刘晓东. 中国北方春季沙尘暴活动与高空西风急流变化的联系[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1292-1300.
- [9] 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 744-750.
- [10] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学: D辑, 2002, 32(4): 327-334.
- [11] 达布希拉图, 赵春生. 气候因子对内蒙古沙尘暴频率的影响[J]. 大气科学, 2004, 28(6): 828-834.
- [12] 元天刚, 陈思宇, 康丽泰, 等. 1961—2010年中国北方沙尘源区沙尘强度时空分布特征及变化趋势[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 927-935.
- [13] 王存忠, 牛生杰, 王兰宁. 50年来中国沙尘暴的多时间尺度变化特征[J]. 大气科学学报, 2009, 32(4): 507-512.
- [14] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 中国春季沙尘暴的趋势变化及年代际变化[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 660-666.
- [15] 郭慧, 王式功, 李栋梁, 等. 甘肃春季(3—5月)沙尘暴成因[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 412-416.
- [16] 李红军, 李军, 何清. 新疆沙尘暴的趋势和突变研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 915-919.
- [17] 王勇, 缪启龙, 丁园圆. 西北地区春季沙尘暴的区域性时间变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 30-37.
- [18] 孙然好, 刘清丽, 陈利顶, 等. 河西走廊沙尘暴及其影响因子的多尺度研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 648-653.
- [19] 万的军, 穆桂金, 雷加强, 等. 塔里木盆地南缘近54年沙尘天气的变化特征及其未来趋势预测[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 78-84.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [21] Mann M E, Park J. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(D12): 25819-25833.
- [22] Mann M E, Park J. Joint spatiotemporal modes of surface temperature and sea level pressure variability in the Northern Hemisphere during the last century[J]. Journal of Climate, 1996, 9(9): 2137-2162.
- [23] Mann M E, Park J. Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: A multiple-taper spectral domain approach[J]. Advances in Geophysics, 1999, 41: 1-131.
- [24] Apipattanavis S, McCabe G J, Rajagopalan B, et al. Joint spatiotemporal variability of global sea surface temperatures and global palmer drought severity index values[J]. Journal of Climate, 2009, 22(23): 6251-6267.
- [25] Small D, Islam S. Low frequency variability in fall precipitation across the United States[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4): 135-157.
- [26] 王春学, 李栋梁. 基于MTM-SVD方法的黄河流域夏季降水年际变化及其主要影响因素分析[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 823-834.
- [27] 王春学, 马振峰, 王佳津, 等. 华西秋雨准4年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 643-652.
- [28] 李潇, 李栋梁, 王颖. 中国西北东部汛期降水对青藏高原东部春季感热在准3a周期上的响应[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 737-748.
- [29] 钟海玲, 高荣, 李栋梁. 地面风速的气候特征及其对沙尘暴的影响研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 321-326.
- [30] 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[C]//中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 1-10.