

中国华北春季沙尘天气频次的气候预测模型

郎咸梅

中国科学院大气物理研究所灾害性气候预测与研究中心, 北京 100029

E-mail: langxm@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2007-11-01; 接收日期: 2008-01-17

国家自然科学基金(批准号: 40631005, 40620130113 和 40505017)资助

摘要 对中国北方沙尘天气发生频次进行气候预测具有重大社会价值和科学意义, 也是十分困难的一项课题. 以北京站和天津站的情况为代表, 首先分析了中国华北春季沙尘天气频次(DWF)与季节平均表面温度、降水、北极涛动、南极涛动、南方涛动、近地面经向风以及欧亚西风指数的相关性, 旨在利用这些气候要素或大气环流因子建立中国华北春季 DWF 的预测模型. 然后, 分别基于观测资料和中国科学院大气物理研究所九层全球大气环流格点模式(IAP9L-AGCM)的 32 a(1970~2001 年)跨年度集合回报试验结果, 建立了两个适合于预测中国华北春季沙尘天气发生频次的预测模型——模型 I 和模型 II. 其中, 模型 I 的试预报结果与实测间的相关系数达到 0.933, 因此有望提前一个季度进行较为准确的预测. 如果基于气候模式的跨年度预测结果, 在模型 I 的预测思想上引入春季沙尘天气发生的同期气候信号, 预测模型(模型 II)的试预报结果与实测间的相关系数可达 0.948, 不但表现出了更大的预测潜力, 还可将模型 I 实时气候预测的时间提前到半年. 最后, 检验了两个模型的实时气候预测能力. 结果表明, 这两个模型对中国华北春季 DWF 的年际变化和线性趋势都具有较强的预测能力, 并且各具优势. 其中, 模型 II 可在很大程度上提高 IAP9L-AGCM 原预测方法对春季 DWF 的实时预测准确度, 可以考虑将其预测思想在中国其它沙尘天气多发区的气候预测中推广应用.

关键词

春季沙尘天气频次
预测模型
IAP9L-AGCM
回报试验
实时预测

在以全球变暖为主要特征的气候变化背景下, 中国的气象灾害呈明显上升趋势, 对社会发展的影响日益加剧. 特别是近几年频繁发生的春季沙尘天气, 不但引起了气象工作者的高度重视, 而且已经成为中国跨年度实时气候预测会商的重要内容. 但由于沙尘天气的统计平均具有显著的季节、年际及年代际变化^[1~3], 加之影响因素具有多元性和复杂性, 目前对沙尘天气频次(DWF)的气候预测还处在初步探索阶段.

在众多与沙尘天气气候预测有关的工作中, 学者通常是从大气环流背景入手, 寻找出对沙尘天气

发生频次具有指示意义的气候因子, 以便为相应的气候预测提供依据. 诸多研究表明, 中国北方沙尘天气与风速、湿度以及表面温度等气候要素密切相关, 其中, 风力条件最为重要, 它和降水分别在沙尘天气的季节变化和年际变化中影响最大^[4~9]. 此外, 太平洋前期海洋表面温度(SST)、ENSO 循环、北半球中高纬气候系统(如 500 hPa 高度场, 极涡强度, 北极涛动以及高纬度西风)在中国沙尘天气过程中同样具有显著的指示意义^[10~15]. 最近, 已有研究将着眼点延伸到南半球大气环流系统, 发现南极涛动与中国北方春季 DWF 之间亦存在显著的反相关关系^[16], 这为中

国沙尘天气的气候预测提供了新的预测思路.

从现有的研究成果可以看出, 中国沙尘天气虽然具有高度复杂的大气环流背景, 但却存在一定程度的气候可预测性, 已有学者对此进行了初步研究和探索. 其中, 大部分工作是借助于统计方法, 试图通过建立某种关系式来实现沙尘事件的气候预测. 例如: 余林生等^[17]基于DWF与表面温度及850 hPa扰动涡旋之间的关系, 建立了一个用于描述中国北方除新疆以外地区沙尘天气变化规律的沙尘指数; 李栋梁等^[18]、赵红岩等^[19]、毛炜峰等^[20]通过综合考虑若干个前期大气环流特征量的影响, 针对沙尘暴的变化趋势或发生频次建立一个气候预测模型. 近年来, 在王会军等^[21]尝试了利用大气环流模式对中国沙尘天气进行跨年度实时气候预测并取得初步成功以后, 动力数值预测方法在中国的沙尘天气实时气候预测研究中越来越受到重视. 然而, 由于在以往针对沙尘天气进行的气候预测研究中, 或因对起关键作用的气候因子考虑得不够全面, 或因对某些相关气候背景的认识还不十分明确, 加之数值模式的预测水平有限, 截至目前, 对中国春季DWF进行准确的气候预测还存在着很大的难度. 那么, 如果尽可能地全面考虑影响中国沙尘天气的主要气候因子, 特别是引入最新发现的南极涛动的作用, 是否可以进一步提高中国北方春季DWF的可预测程度呢? 此外, 如果将统计方法和数值预测结果相结合, 是否能够提高单独基于观测资料或气候模式产品进行预测的准确度?

针对这些问题, 本文从气候学的角度出发, 综合考虑表面温度(SAT)、降水(PRE)、欧亚西风、南极涛动(AAO)、北极涛动(AO)、ENSO循环以及地面经向风(V_g , 北风为正)在中国华北春季沙尘事件中的作用, 建立了两个用于预测中国华北春季DWF的气候预测模型, 并评估了该预测思想在中国跨年度实时气候数值预测中的可行性.

1 资料和研究方法

利用的实测PRE和SAT资料均取自中国气象局160个台站的月平均数据集. 欧亚西风指数(EUI)定义为 $60^\circ\sim 120^\circ\text{E}$ 范围内500 hPa位势高度场沿 40° 和 65°N 纬圈平均之差的标准化值. AO指数和AAO指数

均采用Thompson和Wallace^[22,23]的定义, 前者为北半球 $20^\circ\sim 90^\circ\text{N}$ 海平面气压场经验正交函数(EOF)分解的第一模态的时间系数, 后者为 $20^\circ\sim 90^\circ\text{S}$ 850 hPa位势高度距平场EOF分解的第一模态的时间系数. 南方涛动指数(SOI)取自美国气候预测中心, 定义为南太平洋塔希堤岛和澳大利亚北部达尔文港的海平面气压差. 用于计算SOI的高度场资料以及 V_g 资料均来自于美国国家环境预测中心/大气研究中心.

文中对气候因子的季节平均定义如下: 取当年12月和次年1, 2月的平均作为当年冬季平均(DJF); 3, 4和5月的平均为春季平均(MAM); 6, 7和8月的平均为夏季平均(JJA); 9, 10和11月的平均为秋季平均(SON). DWF是指扬沙、浮尘和沙尘暴发生日数之和, 相应观测资料来源于中国气象局国家气候中心. 此外, 鉴于北京和天津地区月平均DWF的年际变化情况与中国华北地区的整体状况相一致, 并且主要发生在春季^[14,24-26], 本文选取北京站和天津站春季沙尘总日数的逐年变化情况作为中国华北春季DWF年际变化的代表进行研究, 以尽量避免因研究区域范围过大而影响预测模型的预测准确度.

本文针对中国华北春季DWF建立的预测模型是通过回归分析来实现的, 因此对所需的全部资料都进行了标准化处理. 为了在预测方程中尽可能充分地考虑上述7个气候因子的季节性影响, 文中首先通过相关分析考察了它们与DWF之间的密切程度. 在此基础上, 利用实测资料建立了一个中国华北春季DWF的气候预测模型——模型I. 之后, 基于该模型的预测思想, 同时结合跨年度实时气候预测工作, 利用中国科学院大气物理研究所九层全球大气环流格点模式(IAP9L-AGCM)的32 a (1970~2001)跨年度集合回报试验^[27], 在按照7个气候因子的自身定义计算出它们的数值之后, 又建立了另一个DWF气候预测模型——模型II. 最后, 检验了两个模型的实时预测性能, 其中模型II所需的资料来自IAP9L-AGCM针对2002~2006年春季气候异常进行的跨年度实时气候预测结果(预测方法见文献^[21]).

2 中国华北春季DWF预测模型的建立

2.1 DWF与气候因子相关分析

为了得到预测模型中表面温度、降水以及近地面

经向风场的时间序列,文中首先考察了中国华北春季 DWF 与这些气候要素场的相关系数分布情况. 统计结果显示, DWF 与降水及表面温度的相关都具有显著的区域性及季节性差异, 并且相关最大的区域都集中在华北和东北地区(见图 1 和 2). 不同的是, DWF 与降水的关系在冬季最大, 而与表面温度的相关在秋季以外的季节都较显著. 因此, 在回归分析中, 降水关注东北北部区域, 以博克图、齐齐哈尔、海伦和佳木斯 4 个站的平均降水量为代表. 表面温度时间序列则着眼于冬季华北、春季东北北部以及夏季新疆东部的季节性表面温度, 分别以北京和天津两个站的平均温度、海拉尔、齐齐哈尔、海伦和富锦 4 个站的平均温度、库车和哈密两个站的平均温度为代表. 此外, 春季 DWF 与前一年季节平均的地面经向风在

蒙古高原西部一带始终存在一个东北至西南走向的显著正相关区(见图 3), 这恰恰说明前期蒙古境内冷空气势力加强有利于中国春季沙尘天气的发生. 因此, 对于近地面经向风, 取 $95^{\circ}\sim 102.5^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\sim 47.5^{\circ}\text{N}$ 范围内的区域平均值进行研究.

表 1 中给出了中国华北春季 DWF 与前期 7 个气候因子季节性相关分析结果. 结果表明, 当东北北部冬季降水偏多, 新疆东部夏季表面温度偏高, La Niña 事件发生以及蒙古境内冷空气偏强时, 都有利于后期中国华北春季沙尘天气的发生. 与此相反, 当华北冬季或东北北部春季表面温度偏高, AO, AAO 以及欧亚西风指数偏强时, 后期中国春季沙尘天气倾向于减少. 此外, 相比而言, 表面温度、近地面经向风、欧亚西风及 AAO 对中国华北春季沙尘天气的影响程

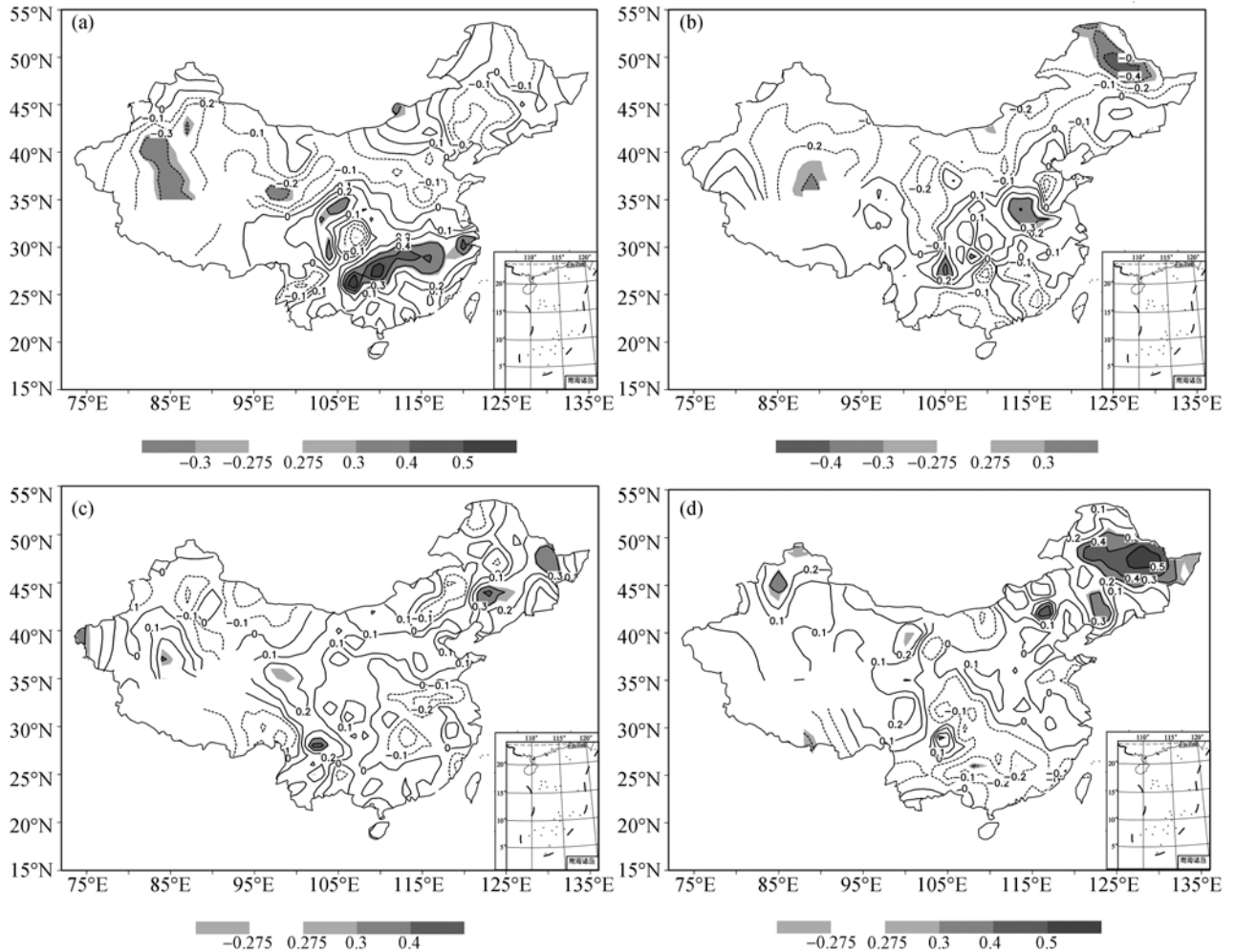


图 1 中国华北春季 DWF 与前一年季节平均降水的相关系数分布
(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季. 阴影区通过了 95% 显著性水平检验

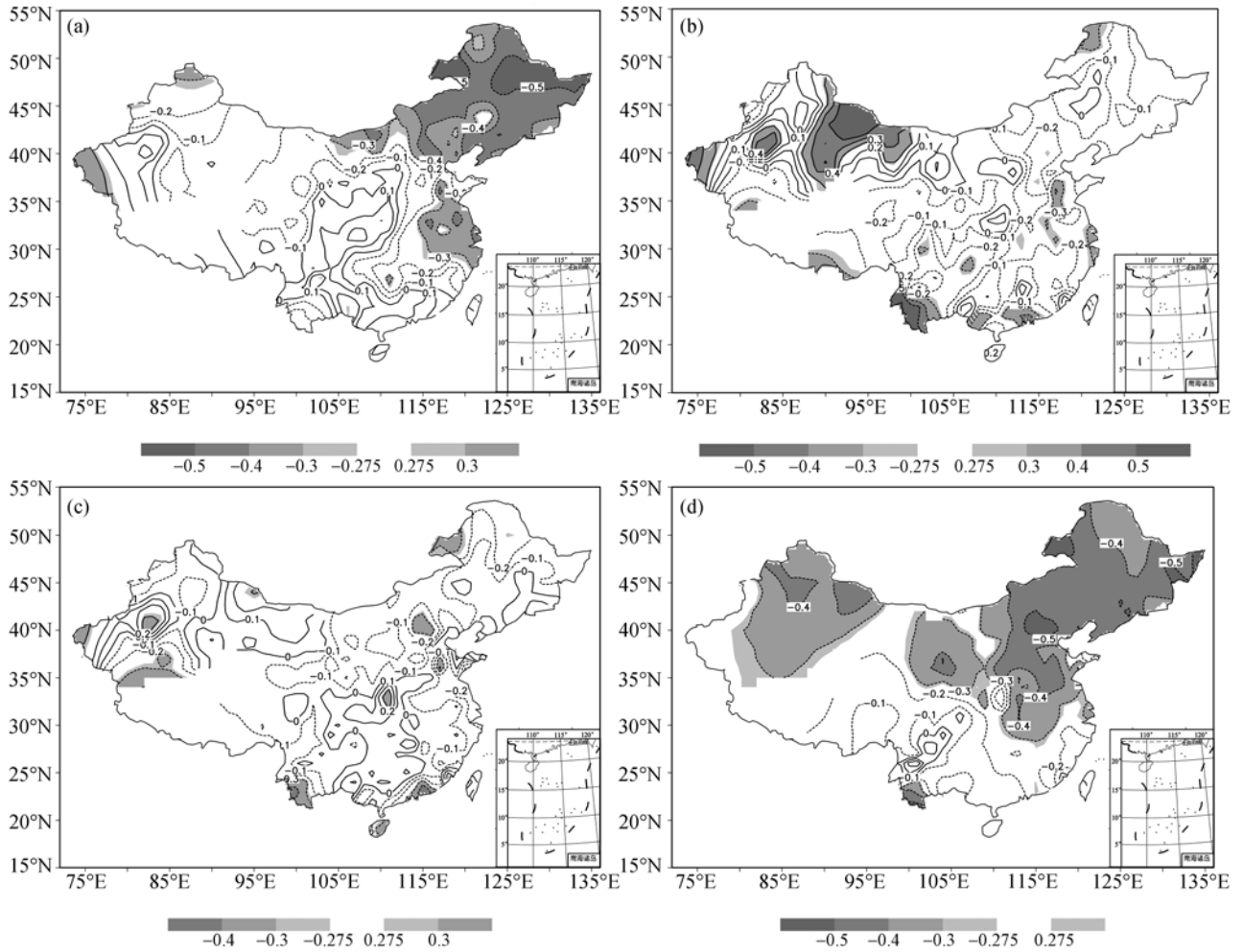


图 2 中国华北春季 DWF 与前一年季节平均表面温度的相关系数分布

(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季. 阴影区通过了 95% 显著性水平检验

表 1 中国华北春季 DWF 与前期气候因子相关系数^{a)}

时间		气候因子						
		SAT	PRE	EUI	AAO	AO	SOI	V_g
前一年(Y_{-1})	MAM	-0.53	-	-0.38	-0.49	-0.13	0.16	0.36
	JJA	0.64	-	-0.07	-0.48	-0.12	0.12	0.46
	SON	-	-	-0.23	-0.39	-0.05	0.12	0.50
	DJF	-0.57	0.55	-0.11	-0.43	-0.26	0.12	0.46
前两年(Y_{-2})	MAM	-0.39	-	-0.47	-0.39	-0.02	0.28	0.30
	JJA	0.60	-	0.01	-0.43	-0.00	0.24	0.34
	SON	-	-	-0.36	-0.40	-0.07	0.20	0.51
	DJF	-0.51	0.29	-0.25	-0.58	-0.11	0.15	0.43

a) -表示不予考虑

度相对较大, 作用时效相对较长; 而AO和SOI的作用则相对较小, 其中AO的作用在冬季最突出, 这很可能与AO在冬季强度最大^[28]有关。

2.2 基于观测资料的 DWF 预测模型

为了突出 7 个气候因子对后期春季 DWF 的综合影响, 在回归方程的建立过程中采用的气候因子个

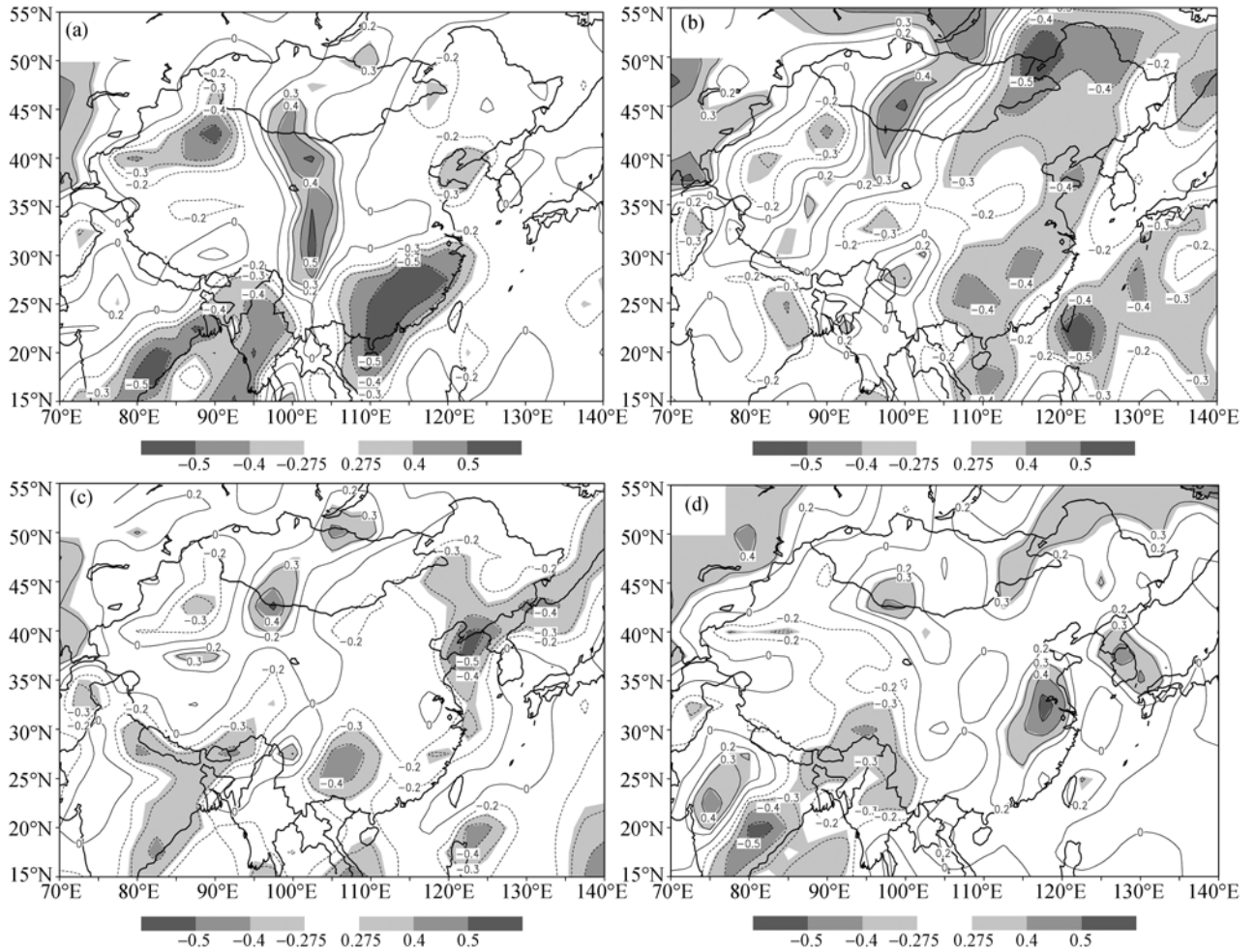


图3 中国华北春季DWF与前一年季节平均地面径向风的相关系数分布

(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季. 阴影区通过了95%显著性水平检验

数由单个逐渐递增. 考虑到表1中各个气候因子的每个季节平均都可视为一个拟合因子, 计算量较大, 因此在逐步回归过程中, 文中按照气候因子在表1中的排列顺序逐一增加, 并保持前一个回归方程中的因子不变. 由此得到的回归序列的年际变化情况如图4(a)~(g)所示. 可以看出, 若只考虑表1中个别气候因子的作用, 拟合结果虽然能够在线性趋势和年代际变化上接近实测, 但其年际变化幅度往往较实测要小, 总体不够合理. 随着预测模型中气候因子数目的增多, 预测结果不断逼近实况, 二者的线性相关系数由最初只考虑表面温度时的0.760最终增大到0.933, 拟合结果不仅在年际变化上与实况相当接近, 还在很大程度上弥补了图4(a)~(f)中20世纪60年代末到

70年代中期拟合结果失真的缺陷. 由此可见, 如果综合考虑7个气候因子的共同作用, 将有可能提前一个季度对中国华北春季沙尘天气异常做出较为可靠的预测, 该预测模型(称模型I)可用下式表达:

$$Y = X_{-1} + X_{-2} + 0.151, \tag{1}$$

$$\begin{aligned} X_{-1} = & -0.024x_{1MAM} + 0.382x_{1JJA} - 0.124x_{1DJF} \\ & + 0.368x_{2DJF} + 0.110x_{3MAM} - 0.123x_{3DJF} \\ & - 0.009x_{4MAM} - 0.383x_{4DJF} - 0.338x_{6SON} \\ & + 0.528x_{6DJF} - 0.515x_{7JJA} + 0.253x_{7SON}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} X_{-2} = & -0.138x_{1JJA} + 0.031x_{1DJF} - 0.177x_{3JJA} \\ & - 0.302x_{4DJF} + 0.291x_{5DJF} + 0.336x_{6MAM} \\ & + 0.678x_{7SON} - 0.171x_{7DJF}, \end{aligned} \tag{3}$$

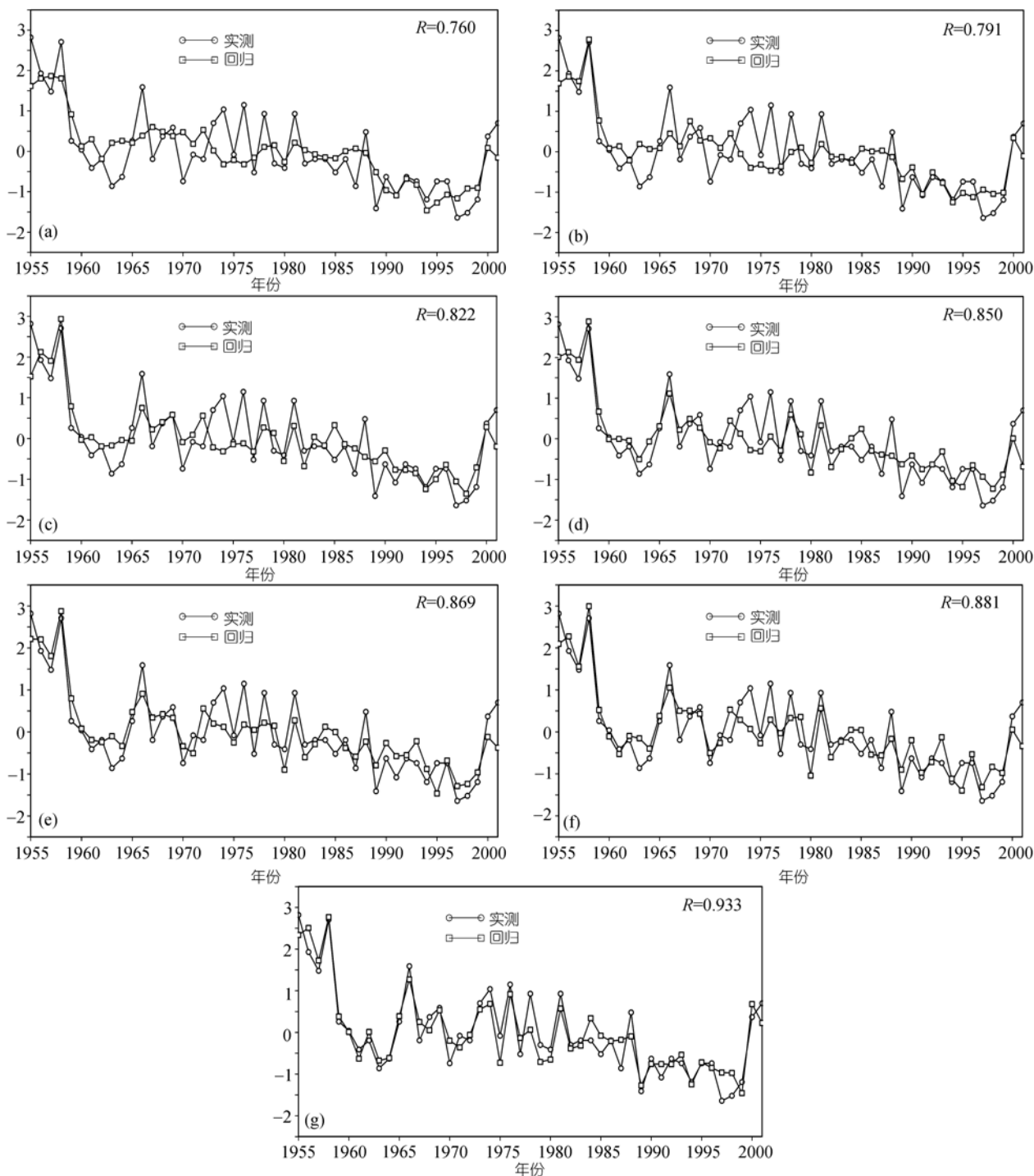


图 4 中国华北春季 DWF 预测模型 I (基于观测资料)的回归序列和实测序列的年际变化(标准化)

采用的气候因子有 SAT (a); SAT 和 PRE (b); SAT, PRE 和 EUI (c); SAT, PRE, EUI 和 AAO (d); SAT, PRE, EUI, AAO 和 AO (e); SAT, PRE, EUI, AAO, AO 和 SOI (f); SAT, PRE, EUI, AAO, AO, SOI 和 V_g (g)

其中, “ X_{-1} ”和“ X_{-2} ”的下标分别表示“前一年”和“前两年”; $x_1 \sim x_2$ 依次对应表 1 中的 7 个气候因子, 即 SAT,

PRE, ..., V_g . 从表达式可以看出, 这些气候因子在各个季节都对后期中国华北春季沙尘事件产生影响,

但冬、春季的影响总体上起着决定性作用. 这一点也证实了中国跨年度动力数值实时气候预测的基本思想, 即可以通过综合考虑冬、春季气候模式的预测结果来预测春季沙尘天气异常. 然而, 就预测的具体实践来讲, 模型 I 的预测性能还存在局限性. 首先, 中国沙尘天气的实时气候预测往往在冬末春初进行, 但模型 I 因包含有大量前期冬季气候信号, 致使实时预测因受资料的限制无法在冬末之前实现. 此外, 在该预测模型中无法引入 7 个气候因子的春季信号, 而沙尘天气的发生往往又与这些同期大气环流背景紧密相关 [2,6,15,17,29]. 表 2 的相关分析结果不但印证了这一点, 还突出了 SAT, AAO 和地面经向风的重要性. 因此, 如果能够建立一个既能尽早对沙尘事件做出准确气候预测, 又能充分利用相关气候信息的预测模型, 无疑有利于中国春季沙尘天气预测水平的提高. 对此, 气候模式实时数值预测结果的应用不失为解决这方面预测问题的一个有效途径.

表 2 1955~2001 年中国华北春季 DWF 与同期气候因子相关系数

气候因子	SAT	EUI	AO	AAO	SOI	V_g
相关系数	-0.58	0.13	-0.28	-0.48	0.26	0.52

2.3 基于大气环流模式回报结果的 DWF 预测模型

自中国科学院大气物理研究所积极开展沙尘天气气候预测研究以来, 已经利用 IAP9L-AGCM 取得了一些进展 [21,30]. 在利用该模式进行跨年度实时气候预测时, 通常是将预测结果中当年冬季及次年春季的冷空气势力、降水以及表面温度异常作为次年春季沙尘天气气候异常的判据. 这样得到的预测结果虽然有一定的物理基础, 但较模型 I 要略显粗略. 因此, 我们希望在 IAP9L-AGCM 进行实时气候预测的同时, 能够借鉴模型 I 的预测思想建立一个适合于预测中国华北春季沙尘天气的气候预测模型, 以便能够更加准确地对 DWF 及其年际变化进行有效的实时预测.

为此, 按照模型 I 中各个气候因子的定义, 利用 IAP9L-AGCM 的 32 a (1970~2001 年) 跨年度集合回报试验结果计算得到表 2 中各个气候因子的值, 然后参考模型 I 中拟合因子的组合方式, 建立了另一个

DWF 预测模型(称模型 II). 对该模型预测潜力的检验结果显示, 其试预测结果与实况间的线性相关系数可以达到 0.948. 从图 5 可以看出, 试预测结果不但在年际变化上与实况相当吻合, 数值上在某些年份也能非常接近实况. 加上该模型可以提前半年进行预测, 其预测结果会明显较原数值预测方法(即, 利用 IAP9L-AGCM 预测与沙尘天气有关气候背景场, 并将其作为预测依据)的结果更为具体、准确, 从而表现出较强的预测潜力. 模型 II 的具体表达式如下:

$$Y = X_0 + X_{-1} + X_{-2} + 0.314, \quad (4)$$

$$X_0 = -0.803 x_{1MAM} + 1.167 x_{2MAM} - 0.623 x_{3MAM} + 0.528 x_{4MAM} - 0.107 x_{5MAM}, \quad (5)$$

$$X_{-1} = 0.348 x_{1DJF} + 0.840 x_{2MAM} + 0.216 x_{3DJF} - 0.525 x_{4DJF} - 0.474 x_{5DJF} - 0.277 x_{6DJF} + 0.333 x_{6MAM}, \quad (6)$$

$$X_{-2} = -0.256 x_{1DJF} - 0.539 x_{2DJF} + 0.164 x_{3DJF} + 0.567 x_{3MAM} - 0.580 x_{5DJF}, \quad (7)$$

其中, “ X_0 ”, “ X_{-1} ”和“ X_{-2} ”的下标分别表示“当年”, “前一年”和“前两年”; $x_1 \sim x_6$ 依次对应表 2 中的气候因子, 即 SAT, EUI, ..., V_g . 相对模型 I, 该模型最大的改进就是引入了沙尘事件的同期气候信息, 并且可将预测的时间由原来的一个季度提前到半年. 需要说明的是, 该模型中没有考虑降水的作用, 这是由于同现有的其他大气环流模式一样, IAP9L-AGCM 对中、高纬地区降水也还存在着较大的预测困难, 即便是对模式结果采用某种修正 [31], 预测准确率也不是十分理想. 事实上, 提高降水预测水平仍然是目前气候预测研究领域的重点和难点.

2.4 利用预测模型对中国华北春季 DWF 的实时预测

既然两个模型都具有较大的预测潜势, 那么它们的实际应用价值究竟有多大, 这是本文最终关心的问题. 为此, 利用两个预测模型对 2002~2006 年中国华北春季 DWF 进行了实时预测. 在预测中, 模型 I 中所利用的资料如前所述, 在模型 II 中需要将拟合因子的模式回报结果用 IAP9L-AGCM 的实时预测结果来替代.

从图 6 可以看出, 模型 I 能够很准确地预测出前 3 a 春季中国华北地区沙尘事件发生频次的具体数值以及 5 a 来沙尘事件趋于频繁的线性趋势, 但对 2005

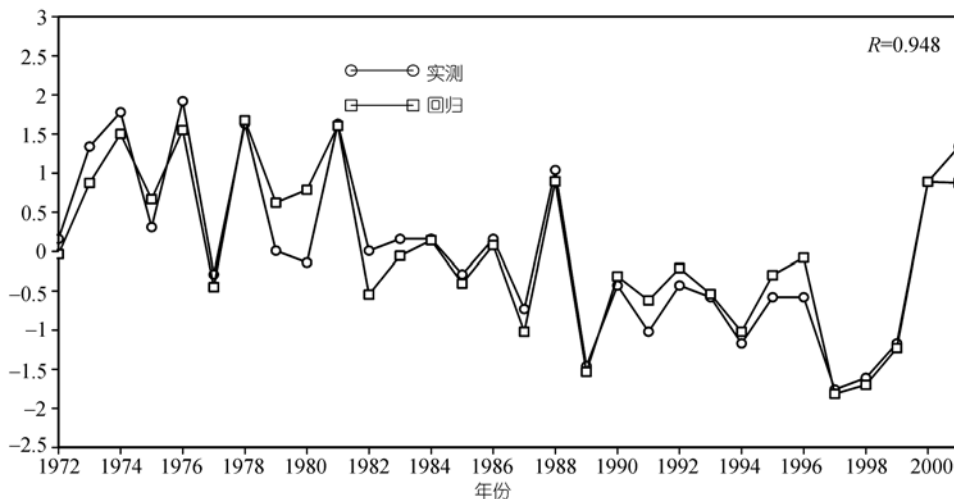


图 5 1972~2001 年预测模型 II (基于 IAP9L-AGCM 回报试验结果) 的回归序列和实测序列的年度变化(标准化)

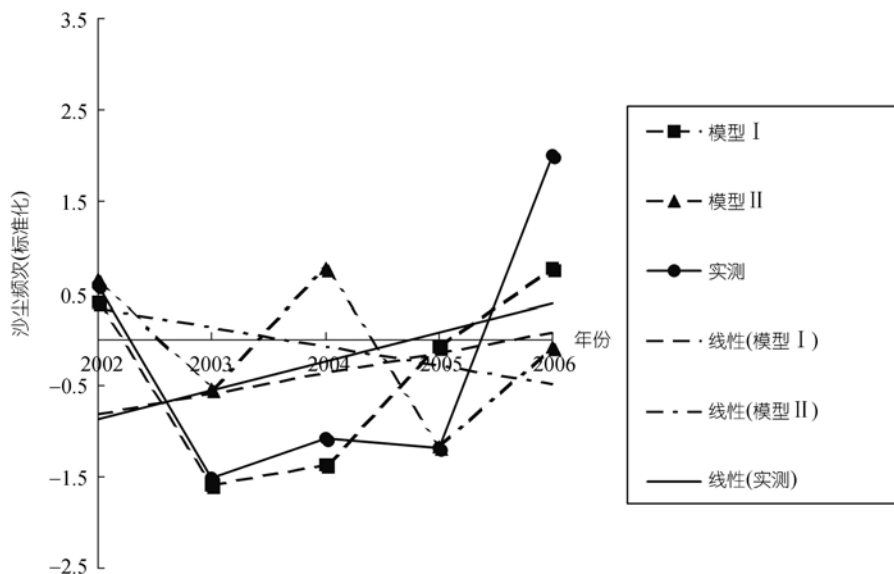


图 6 2002~2006 年中国华北春季 DWF 实况和预测模型 I 和 II (利用预测 SST) 实时预测结果的年度变化及线性趋势(标准化)

年的实况预测得不够准确, 其中的一个可能原因是春季气候信号对沙尘事件的影响较其他 4 个年份要大. 模型 II 对 2002~2005 年 DWF 年际变化及其线性趋势的预测结果(图略)与观测资料都比较接近, 但对 2006 年的预测结果不够理想, 这与模式对当年沙尘事件气候背景场的预测准确度有很大的关系. 总体来看, 就目前国内针对沙尘事件的实时气候预测水平来看, 两个模型的预测性能是令人满意的, 当然, 预测准确度还有待于进一步改进.

就模型 II 来说, 由于其资料基础是 IAP9L-

AGCM 的跨年度集合回报试验, 预测水平无疑要在很大程度上依赖于 SST 的预测准确度. 那么如果 SST 预测得完全准确, 预测效果是否会更好呢? 比较图 7 中模型 II 分别基于 IAP9L-AGCM 实时预测结果和回报结果的预测效果可以看出, 后者在某些年份(如 2003, 2004 和 2006 年)明显较前者好, 总体效果也更为理想一些, 但预测结果仍然不是十分精确. 这其中的原因涉及到了 IAP9L-AGCM 预测水平对关键海区 SST 信号强度的敏感性问题的, 在今后的工作中还需深入研究.

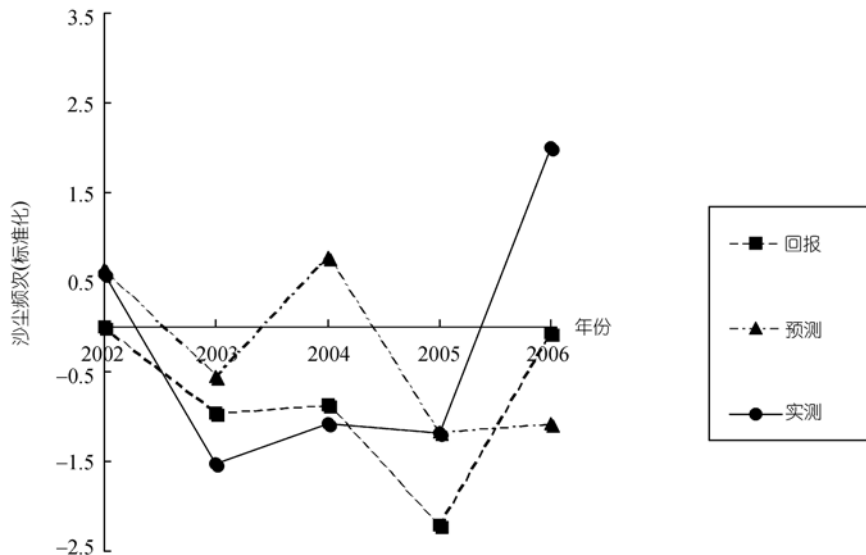


图7 2002~2006年中国华北春季DWF实测、模型Ⅱ实时预测结果(利用预测SST)以及回报结果(利用观测SST)的际年变化(标准化)

3 结论与讨论

本文研究了基于观测资料和数值模式结果建立中国华北春季DWF预测模型的可行性,以及该预测思想在中国实时气候预测中的可靠程度.文中首先利用相关分析确定了DWF与表面温度、降水、欧亚西风、北极涛动、南极涛动、南方涛动以及近地面经向风的密切关系.然后,利用这7个气候因子,通过线性回归分析建立了一个中国华北春季DWF的预测模型——模型Ⅰ,其试预测结果与实测间的相关系数在1955~2001年可达0.933,表现出较高的预测潜力.然而,模型Ⅰ在实际应用中存在两个缺陷:一是存在时间局限性,二是无法兼顾春季沙尘天气发生时的同期气候背景场信号.

为此,本文进一步利用IAP9L-AGCM的跨年度集合回报试验结果,借鉴模型Ⅰ的预测思想,建立了另一个预测模型——模型Ⅱ,其试预测结果与实测间的相关系数在1972~2001年可达0.948,不但可以使IAP9L-AGCM原预测方法的预测结果更具体、准确,还可将模型Ⅰ的实时预测时间由一个季度提前到半年.最后,考察了两个模型对2002~2006年中国华北春季DWF的实时预测水平,发现两个模型对其际变化和线性趋势都具有较强的预测能力,并且各具优势.因此,若在今后的实时预测中兼顾两个模

型,尤其是模型Ⅱ的预测结果,是有望进一步提高中国华北春季DWF的气候预测水平的.

作者在研究中注意到,从回归模型中选入的气候因子来看,冬、春季气候异常的影响在沙尘天气中的确占主导地位,而夏季和秋季的某些气候异常信号也很重要,在今后的预测工作中需要给予重视.另外,在对DWF的拟合中发现,若只考虑与DWF相关最大的拟合因子,拟合效果未必一定好.相反,某些气候因子虽然在相关分析结果中没有表现出与DWF十分密切的关系,在预测模型中却具有重要作用.可见,中国华北春季沙尘天气发生的气候背景具有高度的复杂性和多元性,沙尘天气的气候预测问题还需要不断的细致研究和深入探讨.

与此同时,在今后的相关工作中还有许多问题值得关注.例如,本文中的预测模型只是针对中国华北部分地区春季DWF建立起来的,其预测思想有必要广泛地应用于中国其他沙尘天气多发区.而针对不同的区域,预测模型中的气候因子需要重组,新的气候因子也许需要考虑进来,如地表植被状况^[32]、北极海冰^[33].还有,模型Ⅱ的预测准确度一方面会由于拟合因子具有区域性特征(尤其是降水、表面温度以及近地面经向风)而受到模式水平分辨率的影响,另一方面又会由于资料来源于气候模式的实时预测

结果而受大气环流模式本身预测水平的限制. 已有研究指出, 耦合的海气过程在季风区可能很关键 [34], 但目前模式对东亚季风区气候的模拟能力通常较低. 因此, 在发展气候模式的同时, 还迫切需要针对季风区气候特征和物理机制进一步完善耦合气候模式系统. 此外, 中国自然气候条件异常复杂, 局部范围内

沙尘辐射对气候的影响可能会很大, 使用区域气候模式应该能够对沙尘事件进行更具动力学意义的预测. 近几年来, 已有学者将沙尘过程引入到区域气候模式之中, 进而对沙尘事件进行了气候预测研究 [35,36], 并取得了一些进展, 这方面工作也是我们未来将要研究的重要内容之一.

致谢 感谢审稿人的评阅意见.

参考文献

- 1 王式功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方沙尘暴变化趋势初探. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 86—94
- 2 翟盘茂, 李晓燕. 中国北方沙尘天气的气候条件. 地理学报, 2003, 58(增刊): 125—138
- 3 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002年). 科学通报, 2003, 48(11): 1224—1228
- 4 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
- 5 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 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
- 6 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
- 7 陆均天, 邹旭恺, 王锦贵, 等. 近 3 年中国沙尘天气较频繁发生的原因分析. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 107—113
- 8 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘频次演变及其气候成因分析. 气象学报, 2003, 61(6): 744—750
- 9 周小平, 黄大刚. 北京春季沙尘天气特征和预报. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 300—305
- 10 尚可政, 孙黎辉, 王式功, 等. 甘肃河西走廊与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析. 中国沙漠, 1998, 18(3): 239—243
- 11 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特点及成因分析. 第四纪研究, 2002, 22(4): 374—380
- 12 Zhao C Z, Dabu X, Li Y. Relationship between climatic factors and dust storm frequency in inner Mongolia of China. Geophys Res Lett, 2004, 31: L01103[DOI]
- 13 彭公炳, 黄玫, 钱步东, 等. 北太平洋海温场与中国西北地区春季沙尘暴的关系. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 174—181
- 14 康杜鹃, 王会军. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(11): 1096—1102
- 15 唐红玉, 翟盘茂, 常有奎. 中国北方春季沙尘暴的频数与北半球 500 hPa 高度场的 SVD 分析. 中国沙漠, 2005, 24(4): 570—576
- 16 Fan K, Wang H J. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. Geophys Res Lett, 2004, 31: L10201[DOI]
- 17 余林生, 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
- 18 李栋梁, 王涛, 钟海玲. 中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测. 中国沙漠, 2004, 24(3): 376—379
- 19 赵红岩, 程旭辉, 王锡稳, 等. 西北地区春季沙尘暴气候分析及预测方法研究. 中国沙漠, 2004, 24(5): 637—641
- 20 毛炜峰, 艾力·买买提明, 陈胜, 等. 新疆春季沙尘天气与前期月环流特征量的关系. 干旱区地理, 2005, 28(2): 171—174
- 21 王会军, 郎咸梅, 周广庆, 等. 中国今冬明春气候异常与沙尘气候形势的模式预测初步报告. 大气科学, 2003, 27(1): 136—140
- 22 Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophys Res Lett, 1998, 25(9): 1297—1300[DOI]
- 23 Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. J Clim, 2000, 13: 1000—1016[DOI]
- 24 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近五十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
- 25 张小玲, 李青春, 谢璐, 等. 近年来北京沙尘天气特征及成因分析. 中国沙漠, 2005, 25(3): 417—421
- 26 范可, 王会军. 北京的沙尘频次的年际变化及其全球环流背景分析. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1006—1014
- 27 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 中国冬季气候可预测性的跨季度集合数值预测研究. 科学通报, 2003, 48(15): 1700—1704
- 28 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 北极涛动和南极涛动的年际变化特征. 大气科学, 2003, 27(3): 419—424
- 29 王小玲, 翟盘茂. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系. 气象学报, 2004, 62(1): 96—103

- 30 郎咸梅, 王会军, 周广庆. 中国 2003 年冬季气候特征与 2004 年春季沙尘气候形势的实时预测初步报告. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 381—386
- 31 Wang H J, Zhou G Q, Zhao Y. An effective method for correcting the seasonal—interannual prediction of summer climate anomaly. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17(2): 234—240 [\[DOI\]](#)
- 32 Zou X K, Zhai P M. Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China. *J Geophys Res*, 2004, 109: D03104 [\[DOI\]](#)
- 33 杨建玲, 何金海, 赵光平. 宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间的遥相关关系. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 296—307
- 34 Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L15711 [\[DOI\]](#)
- 35 Nickovic S, Kallos S, Papadopoulos A, et al. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *J Geophys Res*, 2001, 106: 18113—18129 [\[DOI\]](#)
- 36 Zaakey A S, Solomon F, Giorgi F. Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 4687—4704