

中国东部冬季降水的动力结合统计预测方法研究^{* 1}

郎咸梅

LANG Xianmei

中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京,100029

*International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
Beijing, 100029, China*

2010-04-12 收稿,2011-07-08 改回.

Lang Xianmei, 2012. A hybrid dynamical-statistical approach for predicting winter precipitation over eastern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(2):174-182

Abstract Correlation analysis revealed that winter precipitation in six regions of eastern China is closely related not only to preceding climate signals but also to synchronous atmospheric general circulation fields. It is therefore necessary to use a method that combines both dynamical and statistical predictions of winter precipitation over eastern China (hereinafter called the hybrid approach). In this connection, seasonal real-time prediction models for winter precipitation were established for the six regions. The models use both the preceding observations and synchronous numerical predictions through a multivariate linear regression analysis. To improve the prediction accuracy, the systematic error between the original regression model result and the corresponding observation was corrected. Cross-validation analysis and real-time prediction experiments indicate that the prediction models using the hybrid approach can reliably predict the trend, sign, and interannual variation of regionally averaged winter precipitation in the six regions of concern. Averaged over the six target regions, the anomaly correlation coefficient and the rate with the same sign of anomaly between the cross-validation analysis and observation during 1982–2008 are 0.69 and 78%, respectively.

Key words Winter precipitation, Multivariate linear regression analysis, Seasonal prediction model, Hybrid dynamical and statistical approach

摘 要 针对中国东部 6 个气候关键区,首先,通过相关分析指出,冬季降水既与前期气候因子有关,又受同期大气环流的影响。因此,有必要采用动力与统计相结合的方法进行气候预测研究。然后,从实时预测的角度出发,综合考虑前期预测因子的观测信息和具有数值可预测性的同期气候因子的数值模式结果,使用多元线性回归分析方法就各区域平均冬季降水逐一建立了短期气候预测模型,并在预测模型中考虑了模型结果中系统误差的订正。交叉检验分析结果表明,所建立的各区域预测模型普遍具有较好的预测效果,预测优势主要表现在对冬季降水的变化趋势、年际变化、以及异常符号的预测准确率上。就 6 个区域平均而言,1982—2008 年交叉检验结果与实况间的相关系数和距平同号率分别为 0.69 和 78%,表明该预测思想具有可行性。

关键词 冬季降水,多元线性回归分析,季节预测模型,动力结合统计预测

中图法分类号 P43

* 资助课题:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q03-3)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421406)、国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906018)和国家自然科学基金项目(40875048)。

作者简介:郎咸梅,主要从事短期气候预测研究。E-mail: langxm@mail.iap.ac.cn

1 引言

气候变化对社会工农业生产,特别是粮食、能源、水资源有着重要影响,直接关系到社会的可持续发展。气候变化作为全球变化的一个重要前沿领域,已成为世界气候研究计划和国际地圈生物圈计划等国际大型科学综合研究计划的主要研究目标。其中,季节尺度上的气候预测问题是气候变率及其可预报性计划的核心研究内容之一。

中国及周边地区冬季气候异常事件频繁发生。例如,2001年亚洲北部超强暖冬、2008年1月中旬至2月初中国南方严重的低温雨雪冰冻灾害、2009年冬季中国北方大部分地区持续性暴风雪等,对人民日常生活、能源、交通等多个社会领域产生了严重影响,冬季气候异常及其动力学成因引起了科研人员的重视(Wang, 2003; 陶诗言等, 2008; 孙建奇等, 2009; Wen, et al, 2009; Wang, et al, 2009b)。加之,冬季降水是影响中国北方春季沙尘天气状况的重要气候因子(张莉等, 2005; Lang, 2008),冬季降水的预测能力对于后期春季沙尘天气的实时预测水平有着重要影响,因此,中国冬季降水的季节尺度预测工作急需深入、实时预测水平亟待提高。

已有研究表明,中国冬季降水与前期和同期气候因子的变化密切相关。从大气环流内部变动来看,南极涛动(AAO)和北极涛动(AO)分别是南半球和北半球中高纬度大气环流系统中最具代表性的大气环流因子。其中,南极涛动对中国冬季和春季气候有调控作用(Fan, et al, 2004, 2006),北极涛动对中国冬季降水有显著性的影响(龚道溢等, 2003; 杨辉等, 2008)。此外,表征欧亚大陆上空西风环流状况的500 hPa位势高度场以及代表入侵中国冷空气强弱的经向风异常也是中国冬季降水的重要影响因子(施能, 1996; 龚道溢等, 2001)。另外,海洋表面温度变化作为大气环流外部最为熟知的气候强迫因子之一,也会对中国冬季气候产生明显影响(常蕊等, 2008)。穆明权等(1999)指出,厄尔尼诺和拉尼娜事件对东亚冬季风异常具有很好的指示意义;Li等(2007)研究发现,大西洋表面温度年代际振荡的暖位相,能够在该时间尺度上造成中国东部地区降水呈现南少北多的分布形式。以上及其他相关研究成果改进了对于季节尺度东亚气候变化的认

识,也为从统计和动力学的角度开展中国冬季降水的季节尺度预测工作提供了依据和思路。

近期有关中国冬季降水的初步预测试验表明,尽管其在季节尺度上具有一定程度的可预测性,但像持续性降水异常这样的气象灾害事件在季节和月尺度上的预报技巧是较低的(王会军等, 2003; 陈红等, 2008; 卫捷等, 2008)。总之,目前单纯就统计或动力数值预测方法而言,对冬季降水季节尺度预测的准确度还都是非常有限的。那么,如果既能够有效提取数值模式结果中有用的预测信息,又能够兼顾那些在数值预测中未能充分加以考虑、却对中国冬季降水具有很好指示意义的前期观测信息,从而通过动力与统计相结合的研究方法进行气候预测,是否会有效地提高中国冬季降水的季节预测水平呢? Wang等(2009a)的研究表明,若提取模式在热带地区预测信息的基础上同时考虑观测的信息,则能使东亚地区夏季降水的预测效能得到显著改进。为此,本研究一方面通过统计学分析方法找出对于冬季降水有预测价值的前期气候因子,另一方面,兼顾模式结果中既与冬季降水统计上存在着显著相关关系又具有一定可预测性的气候因子,针对中国冬季降水的季节预测问题进行了动力结合统计方法的综合预测研究。

2 资料和方法

考虑到所用资料的可靠性问题,研究的时段为1982—2008年。降水资料为中国气象局国家气候中心整编的160个常规气象台站的月平均观测降水。气候预测因子的资料主要分为两类,一类为再分析资料,其中,北极涛动和南极涛动资料来自美国国家大气海洋局气候预测中心,分别定义为 20°N 以北1000 hPa位势高度场距平和 20°S 以南700 hPa位势高度场距平的经验正交函数分解的第一模态时间系数;风场及位势高度场资料来源于美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(Kalnay, et al, 1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$;月平均海洋表面温度资料取自美国国家航空航天局(Reynolds, et al, 2002),水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。另一类资料为冬季气候的数值模式结果,来源于中国科学院大气物理研究所9层全球大气环流模式(IAP9L-AGCM)针对1982—2008年冬季气候进行的集合回报试验。对于每一年,考虑了当年10月25—31

日大气初始异常的影响,统一由 10 月 28 日开始积分至次年 2 月底,将等权重算术平均的冬季集合回报试验结果视为最终的冬季气候预测结果。需要说明的是,在集合回报试验中,由于全球大气环流模式的下边界强迫条件为观测的海洋表面温度异常,因此,本文模式结果体现的是 IAP9L-AGCM 对冬季气候的最大预测潜力。

研究的目的在于从实时预测的角度出发,兼顾前期和同期气候因子信息,采用多元线性回归分析等统计学方法,针对中国东部冬季降水异常建立动力和统计结合的季节预测模型。根据 Lang 等(2010)提出的预测研究方法,使用了扣除多元线性回归分析结果系统误差的订正方法。按照 Chen 等(2009)提出的气候区域划分方式,将中国东部的东北北部(46° — 53° N, 116° — 133° E, 含 10 个站点)、东北南部(36.5° — 46° N, 119° — 133° E, 含 15 个站点)、河套-华北(36.5° — 46° N, 100° — 119° E, 含 23 个站点)、黄淮流域(30° — 36.5° N, 105° — 122° E, 含 32 个站点)、东南沿海(21° — 26.5° N, 112° — 120° E, 含 10 个站点)、江南(26.5° — 30° N, 112° — 123° E, 含 13 个站点)选定为目标研究区域。依据传统的季节定义标准,文中春季为 3—5 月平均,夏季为 6—8 月平均,秋季为 9—11 月平均,冬季为 12 月至次年 2 月平均。

3 中国冬季降水的动力-统计结合预测模型

3.1 冬季降水前期气候预测因子的确定

3.1.1 目标区域冬季降水与南极涛动和北极涛动的相关

针对中国东部的每一个目标区域,首先考察 1982—2008 年目标区平均冬季降水分别与当年及前一年各季节南极涛动和北极涛动指数的距平相关(ACCs)。从各目标区距平相关系数计算结果中的最大值情况(表 1)可以看到,各区域最具指示意义的前期季节性南极涛动和北极涛动信号都出现在秋季,而且,除东北北部以外,都是超前一个季节的秋季南极涛动和北极涛动信号与冬季降水的相关性最强。相对而言,南极涛动的作用要明显大于北极涛动,这体现了南半球中高纬度地区秋季大气环流变化与后期中国冬季降水变化的紧密联系。为此,对于目标区域,将表 1 中各自所对应的南极涛动或北极涛动作为预测模型中的一个前期预测因子。

表 1 1982—2008 年各区域平均冬季降水与前期季节南极涛动和北极涛动指数的最大距平相关系数

Table 1 The maximum ACC between regionally averaged winter precipitation and the preceding seasonal AAO or AO, one season to one year in advance during 1982—2008

目标区域	秋季 南极涛动 (当年)	秋季 北极涛动 (当年)	秋季 南极涛动 (前一年)
东北北部			-0.42
东北南部		0.36	
河套-华北	-0.47		
黄淮流域	-0.40		
东南沿海	-0.45		
江南	-0.48		

3.1.2 目标区冬季降水与 500 hPa 位势高度场的相关

通过 20 a 滑动相关分析发现,除了东北北部以外,前期 500 hPa 位势高度场(H_{500})与后期其他 5 个目标区域平均冬季降水都存在着持续且显著的相关(图略),从所在的季节、区域范围以及与降水的相关系数(表 2)可以看出,在中国冬季降水异常所包含的前期对流层中层 500 hPa 位势高度场异常的信号中,既有超前一年的南半球中高纬度地区异常信息(例如在河套-华北、黄淮流域、江南地区),又有超前半年的赤道中东太平洋以及欧亚大陆北部的异常信息(例如在东北南部和东南沿海)。

表 2 1982—2008 年目标区域平均冬季降水与前期 500 hPa 位势高度场的距平相关系数

Table 2 The regions where the preceding H_{500} correlates stably and significantly with regionally averaged winter precipitation during 1982—2008 Also given the lead time and the corresponding ACC between each other

目标区域	季节	500 hPa 区域	相关系数
东北南部	春季(当年)	2° — 14° S, 150° — 180° W	-0.58
河套-华北	冬季(前一年)	58° — 74° S, 80° — 110° W	-0.64
黄淮流域	冬季(前一年)	38° — 50° S, 25° — 50° W	0.56
东南沿海	春季(当年)	66° — 70° N, 80° — 120° E	0.50
江南	冬季(前一年)	34° — 46° S, 15° — 45° W	0.59

3.1.3 目标区冬季降水与海洋表面温度的相关

相关分析结果表明,在考虑时间尺度为 1—3 个季节的超前影响下,各目标区都存在着与其降水维持显著相关关系的海洋表面温度区。总的来说,这些具有预测价值的海洋表面温度信号大多发生在前

期春季,其次是夏季和秋季(表3)。与上述有关大气环流预测因子的选定结果相类似,东北北部地区的情况与其他区域存在着较大差别,表明该区域冬季降水的发生机制与其他目标区的情况存在着一定程度的差异,其中值得注意的是,这里地处西风带,冬季西北风比其他区域偏强。

表3 1982—2008年目标区平均冬季降水与前期海洋表面温度的距平相关系数

Table 3 The regions where the preceding regionally averaged SST correlates stably and significantly with regionally averaged winter precipitation during 1982—2008. Also given the lead time and the corresponding ACC between each other

目标区域	季节	SST 区域	距平相关系数
东北北部	秋季(当年)	35°—50°N, 155°—175°E	0.68
东北南部	春季(当年)	5°—17°S, 120°—155°W	-0.71
河套-华北	春季(当年)	20°—30°S, 145°—165°W	0.63
黄淮流域	春季(当年)	38°—50°S, 128°—145°E	0.60
东南沿海	春季(当年)	19°—28°S, 15°—40°W	-0.70
江南	夏季(当年)	47°—55°N, 142°—168°W	0.63

3.2 冬季降水同期气候预测因子的确定

在实时预测过程中,为了能够借助数值模式得到冬季降水的同期气候预测因子信息,从而实现动力与统计结合的预测方法,需要结合数值模式本身的预测性能来合理确定这些预测因子,因为只有具备了一定程度的可预测性,相关的同期气候因子的数值模拟信息才会有助于提高预测模型的预报准确率。利用观测和再分析资料,首先对目标区域平均冬季降水与同期对流层有关大气环流场的相关性进行了分析,发现中国沿海一带 1000 hPa 经向风(V_{1000})和欧亚大陆上空 200 hPa 经向风(V_{200})都与目标区的冬季降水在统计学上存在着显著的相关。结果表明,当异常偏强的冷空气沿中国东部一带南下时,会加强这里冷暖空气的交汇,从而造成偏强的降水。但需要注意的是,东北北部地区的冬季降水总体上与以上两个气象变量场并不存在有预测价值的相关性,而是表现为与同期南大西洋 500 hPa 位势高度场(H_{500})的关系更为密切,这也再一次说明此前分析结果中有关东北北部地区降水机制或过程不同于其他 5 个目标区域,而可能具有特殊性。鉴于以上分析,针对各目标区选定了冬季降水的同期气候预测因子(表4)。

表4 1982—2008年目标区平均冬季降水与同期气候预测因子的距平相关系数

Table 4 The ACC between the regionally averaged variable derived from reanalysis data and the observed precipitation during winter 1982—2008

目标区域	变量	区域	距平相关系数
东北北部	H_{500}	42°—54°S, 25°—55°W	0.68
东北南部	V_{200}	42°—54°N, 115°—130°E	-0.71
河套-华北	V_{1000}	6°—14°N, 100°—110°E	-0.63
黄淮流域	V_{1000}	22°—30°N, 125°—140°E	-0.64
东南沿海	V_{1000}	14°—26°N, 125°—140°E	-0.68
江南	V_{1000}	10°—22°N, 105°—120°E	-0.73

3.3 动力-统计结合预测模型的建立

针对每个目标区,为了评估上述已选定的前期和同期气候预测因子对冬季降水的预测效果,采用多元线性回归分析方法,分别使用单纯前期气候预测因子和兼顾前期及同期气候预测因子建立预测模型,并分析了两种预测模型预测效果的差异。在此,预测效果用模型交叉检验结果与实况的距平相关系数、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、以及距平同号率(RSSA,指预测结果与实况距平符号相同的年份除以研究时段的总年份,然后乘以100%)来检验。结果表明,若单纯考虑前期气候预测因子,距平相关系数、均方根误差、平均绝对误差、以及距平同号率分别为0.60—0.74、0.67—0.81、0.51—0.65、以及70%—89%。但如果同时兼顾前期和同期气候预测因子的共同作用,不但距平相关系数和距平同号率普遍增大,均方根误差和平均绝对误差也都减小(图1)。这既表明预测模型中前期气候预测因子具有显著的预测意义,也充分说明了同期气候异常信号非常重要。因此,在实时预测中需要同时兼顾两类预测因子的作用。但由于在实时预测业务实践中,冬季降水预测通常要在前期的秋季进行,此时尚未发生的后期冬季气候预测因子的信息无法利用观测资料得到,而要得到这些因子的有价值信息,一个有效的方式就是借助于数值模式的集合预测结果来实现。即需要将观测的前期气候预测因子信号和数值模式动力预测的同期气候预测因子的结果相结合,针对每个目标区的平均冬季降水逐一建立统计与动力结合的气候预测模型。要实现这一预测思想,数值模式本身对于同期气候预测因子的数值预测能力是至关重要的。

为此,使用全球大气环流模式 IAP9L-AGCM,

针对 1982—2008 年冬季进行了集合回报试验,并通过相关分析评估了表 4 中所示各气候预测因子的数值可预测性。结果表明, H_{500} 和 V_{1000} 的数值可预测性普遍较高,后者在东南沿岸和江南地区尤为突出(图 2),这无疑有利于实现本文所提出的动力-统计结合的预测方法。但 IAP9L-AGCM 对于东北南部的同期预测因子 V_{200} 几乎没有预测潜力(图略)。除了在东北南部同期预测因子 V_{200} 的模式结果与实况的相关系数为弱的负值以外,其他目标区域二者的相关系数均为 0.47—0.71,至少通过了 95% 的显著性水平检验(表 5)。鉴于此,分析了冬季 200 hPa 纬向风(U_{200})的数值可预测性及与同期东北南部降水的相关。结果表明,冬季 U_{200} 不但与同期东北南部降水存在密切关系,其模式结果与实况距平相关系数在(10°—18°N, 50°—75°W)范围内为 0.37,接近 95% 的显著性水平。因此,最终选择 U_{200} 作为东北南部冬季降水的同期气候预测因子。

在确定了上述预测因子后,针对每个目标区平均的冬季降水,分别采用多元线性回归分析方法建立了动力与统计结合的预测模型,并通过交叉检验考察了预测模型的预测效果。由 1982—2008 年冬季降水的交叉检验结果(图 3)可以看出,模型的预

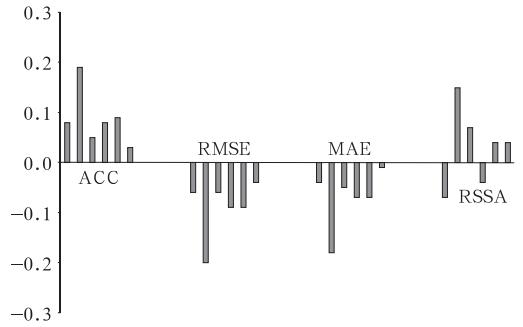


图 1 兼顾前期和同期气候预测因子与只考虑前期气候因子所建立的预测模型的预测效果差异(每组统计量中的柱形图从左至右依次对应东北北部、东北南部、河套-华北、黄淮流域、东南沿海、江南区域)
Fig. 1 Differences in statistical variables between the hybrid (both the precursory and synchronous predictors derived from the observations/reanalysis are considered) and purely statistical (only the precursory predictors derived from the observations are considered) approach results, with respect to the observations. Column charts arranged from left to right for each variable correspond to northern Northeast China, southern Northeast China, Hetao area and northern China, Yellow-Huai River basin, southeastern coastal China, and southern Yangtze River, respectively

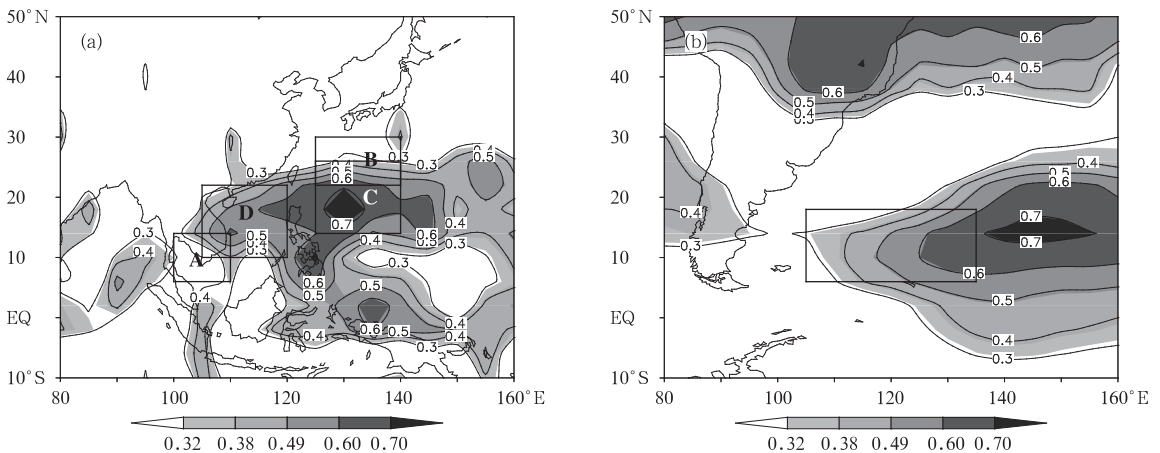


图 2 1982—2008 年 IAP9L-AGCM 集合回报试验结果与实况的时间相关系数

(a. 1000 hPa 经向风, A—D 区域分别为表 4 中河套-华北、黄淮流域、东南沿海、江南地区所对应的 1000 hPa 经向风预测因子的范围; b. 500 hPa 位势高度场, 矩形框为表 4 中东北北部所对应的 500 hPa 位势高度场预测因子的范围)

Fig. 2 Distributions of temporal ACCs between the IAP9L-AGCM hindcast experiment results and the corresponding observations during winters of 1982—2008 for (a) V_{1000} (marks A to D are defined in Table 4 and denote the regions where regionally averaged V_{1000} is taken as a predictor for winter precipitation over Hetao area and northern China, Yellow-Huai River basin, southeastern coastal China, and southern Yangtze River, respectively), and (b) geopotential height at 500 hPa (the rectangle is defined in Table 4 and denotes the region where regionally averaged H_{500} is taken as a predictor for winter precipitation over northern Northeast China)

表5 1982—2008年 IAP9L-AGCM 集合回报
试验结果与实况的距平相关系数

Table 5 The ACC of regionally averaged variables obtained from the IAP9L-AGCM hindcast experiment results and the reanalysis data during winters of 1982 - 2008

目标区域	变量	区域	距平相关系数
东北北部	H_{500}	42°—54°S, 25°—55°W	0.57
东北南部	V_{200}	42°—54°N, 115°—130°E	-0.03
河套-华北	V_{1000}	6°—14°N, 100°—110°E	0.47
黄淮流域	V_{1000}	22°—30°N, 125°—140°E	0.57
东南沿海	V_{1000}	14°—26°N, 125°—140°E	0.71
江南	V_{1000}	10°—22°N, 105°—120°E	0.71

测结果与实况降水的线性变化趋势基本一致,年际变化情况也具有很大的相似性,甚至具体数值在某些年份也非常接近。统计分析得出,6个区域的模型结果与实况的距平相关系数分别为 0.60、0.64、0.74、0.71、0.70、0.77,都通过了 99% 的显著性水平检验;距平同号率则依次为 82%、82%、74%、78%、74%、78%。

为了直观地评估动力与统计结合预测方法相对于单纯统计方法(只考虑前期预测因子)预测的优势,图4通过分析距平相关系数、均方根误差、平均

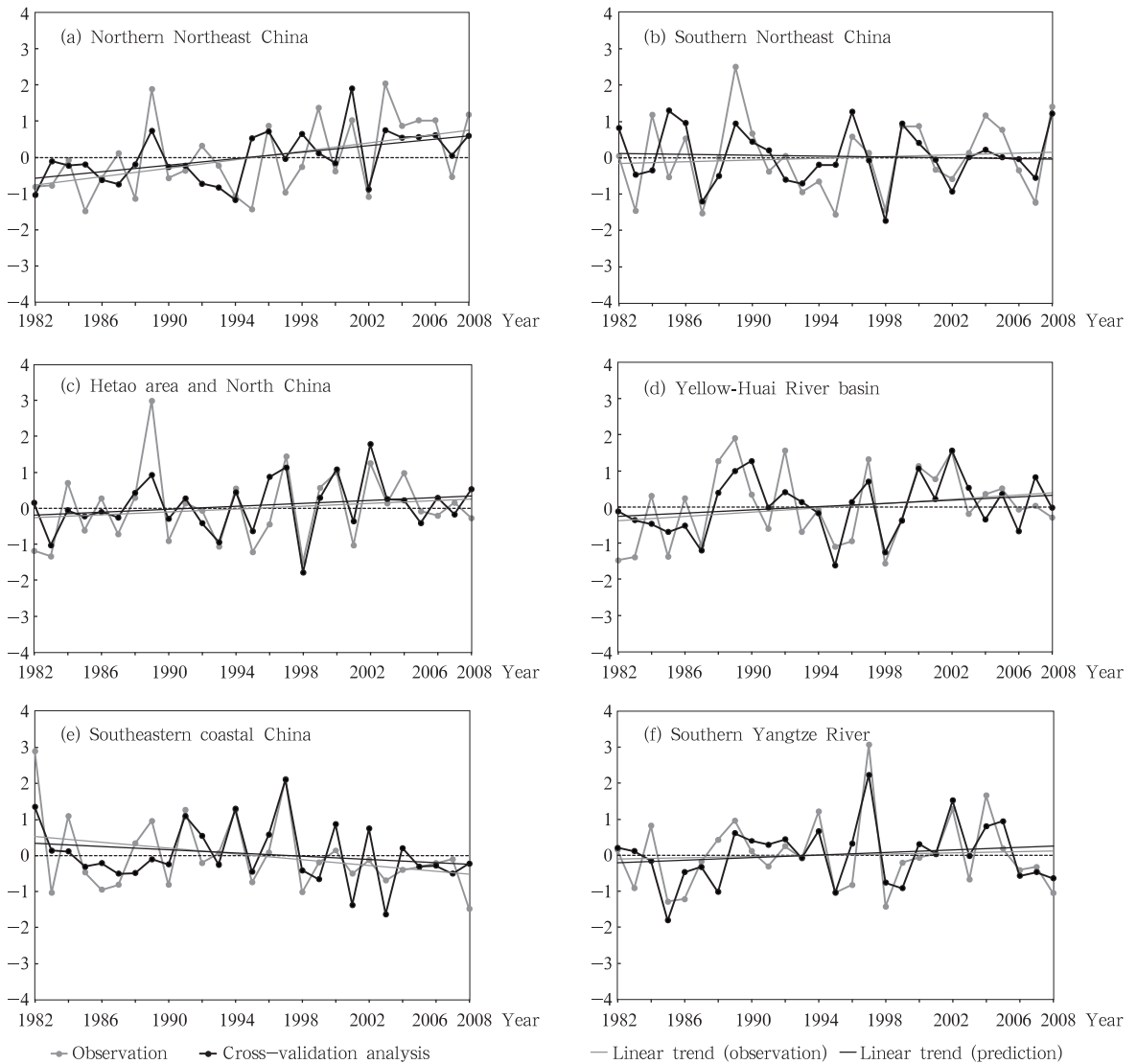


图3 目标区域平均冬季降水实况和预测模型的交叉检验结果

(a. 东北北部, b. 东北南部, c. 河套-华北, d. 黄淮流域, e. 东南沿海, f. 江南; 纵坐标为规一化的降水距平百分率, 虚线为 0 线)
Fig. 3 Regionally averaged winter precipitation (curves) and its linear trend (straight lines) derived from observation (black) and cross-validation analysis (grey) of the hybrid prediction models for the six regions indicated on the top of each panel. Abscissa and ordinate denote year and the normalized percentage anomaly of winter precipitation during 1982 - 2008, respectively. Dashed line denotes a zero value

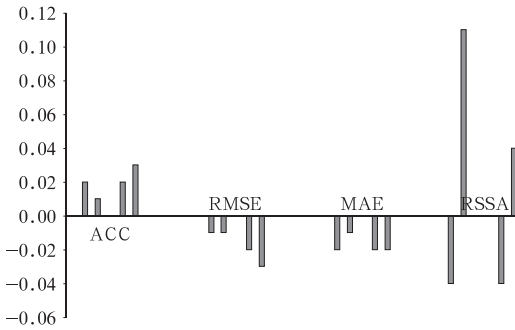


图4 动力-统计结合预测模型(兼顾前期观测的气候预测因子和同期数值模式结果中的预测因子)与单纯统计预测模型(只考虑前期观测的气候预测因子)的预测效果的差异(每个统计量对应的柱形图同图1;距平相关系数、均方根误差及平均绝对误差在东北北部和黄淮流域为0,距平同号率在河套-华北及黄淮流域为0)

Fig. 4 Differences in statistical variables between the hybrid (using both the precursory observed predictors and synchronous IAP9L-AGCM predicted predictors) and purely statistical (using only the precursory observed predictors) approach results, with respect to the observations (Column charts arranged from left to right are the same as in Fig. 1. ACC, RMSE, and MAE equal zero in northern Northeast China and Yellow-Huai River basin, and RSSA equals zero in Hetao area and northern China and Yellow-Huai River basin)

绝对误差、距平同号率给出了前者相对于后者的改进程度。可以看出,除了东北北部和黄淮流域外,若在考虑前期气候因子的同时兼顾冬季降水同期预测因子进行预测,得到的结果与实况相关程度更高,同时均方根误差和平均绝对误差又都会减小,从而提高了预测技巧。因此,整体而言,这种动力与统计结合的方法的确具有实用价值。然而,受数值模式本身预测能力的限制,源于模式结果的同期预测因子对预测模型预测效果的贡献不是非常明显,尤其是同号率。因此,引入具有更高预测技巧的数值模式结果应该会进一步提高该预测方法的效果。

4 结论与讨论

本文针对中国东部6个关键气候区冬季降水,开展了季节尺度气候预测研究工作。首先,通过分析指出中国冬季降水变化中包含了前期和同期

气候异常信号的信息,进而提出了结合两种预测信息来进行气候预测的研究思路。而要从实时预测的角度来实现这一预测思想,一个合理有效的途径就是借助数值模式得到冬季降水同期气候预测因子的预测信息,然后采用动力与统计结合的方法进行预测。为此,本文基于IAP9L-AGCM针对1982—2008年冬季气候异常进行了大规模集合回报试验,评估了模式对于基于观测资料确定出的同期气候预测因子的预测能力,确定了对目标区冬季降水具有数值预测潜力的同期气候预测因子。最后,通过兼顾前期观测气候因子和同期数值模式预测因子,采用多元线性回归分析方法和去除预报系统误差订正的方案,为各目标区冬季降水建立了动力-统计结合的气候预测模型。

通过交叉检验分析考察了预测模型的效果。结果表明,预测模型具有较高的预测准确度,预测优势主要表现在对区域平均冬季降水的变化趋势、年际变化、以及异常符号的预测上。就6个区域的平均情况,1982—2008年交叉检验结果与实况的距平相关系数和距平同号率分别为0.69和78%。需要说明的是,如果不扣除回归方程结果的系统误差,距平相关系数和距平同号率都有所下降(分别为0.65和75%)。因此,采用这种订正方法是有必要的。在接下来的工作中,需要尽快完成数值模式的实时预测试验(数值模式下边界强迫为实时预测的海洋表面温度而不是本文中所用到的观测海洋表面温度),评估该预测方法对中国冬季降水的真实预测能力。

由于独特的地形条件和所处的地理位置,中国冬季降水的影响因素复杂而多变,使得统计预测和动力数值预测的准确度都存在一定程度的不确定性和局限性。为此,在今后利用本文所提出的预测方法进行预测实践时,还有一些问题值得注意。首先,预测因子具有预测价值的一个重要前提是它与预报量具有持续且显著的相关。因此,针对新的预测年份,需要密切关注前期潜在的气候预测因子,例如高原积雪(Qin, et al, 2006)、欧亚积雪(陈海山等, 2003)、高纬度海冰(Fang, 1987; Liu, et al, 2007)、北太平洋高压强度(朱乾根等, 1997)与中国冬季降水的相关程度,以便及时对预测因子进行调整。其次,北半球中高纬度气候数值可预测性的季节性差

异还存在争议,例如:Branković等(1994)、Rowell(1998)、赵彦等(2000)的研究成果均表明春季(秋季)气候的可预测性最大(最小);Yang等(1998)则认为,气候可预测性最大和最小的季节分别为夏季和冬季;而Kumar等(2003)则指出二者相当。Lang等(2005)使用IAP9L-AGCM的研究表明,春季气候的可预测性往往较小,地表气温和位势高度场(风场和降水场)的可预测性则在夏季(冬季)相对较大。因此,对于预测模型中的同期气候预测因子,需要从实时预测的角度出发,评估现有数值模式的实时预测能力,以便择优选取准确度相对更高的预测结果,进而提高预测模型性能。考虑到与中国冬季降水关系最为密切的环流场主要分布在欧亚大陆和东亚沿海一带,因此,可能还需重视区域气候模式的应用。另外,需要扩大气候预测因子的搜索范围。在大气环流变化中,除了本文所用到的预测因子外,冬季北大西洋涛动和西伯利亚高压异常对中国冬季降水的指示意义也值得加以考察(武炳义等,1999;王遵娅等,2006;Gao,2009)。最后,需要指出的是,本文的研究思路对于中国以外区域,诸如北美和非洲等其他气候关键区气候变量的预测研究应该具有普适性。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所王会军研究员提出的宝贵意见。

参考文献

常蕊,张庆云,彭京备.2008.中国南方多雪年环流特征及对关键区海温的影响.气候与环境研究,13:468-477

陈海山,孙照渤.2003.欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I:观测研究.大气科学,27:304-316

陈红,郎咸梅,周广庆等.2008.2008年1月中国气候异常的动力学预测及效果检验.气候与环境研究,13:531-538

龚道溢,王绍武.2001.北半球冬季纬向平均环流的结构及对我国气候的影响.地理科学,21:108-112

龚道溢,王绍武.2003.近百年北极涛动对中国冬季气候的影响.地理学报,58:559-568

穆明权,李崇银.1999.东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 I:观测资料分析.大气科学,23:276-285

施能.1996.北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系.气象学报,54:675-683

孙建奇,王会军,袁薇.2009.2007年3月中国东部北方地区一次强灾害性暴风雪事件的成因初探.气象学报,67:469-477

陶诗言,卫捷.2008.2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析.

气候与环境研究,13:337-350

王会军,郎咸梅,周广庆等.2003.我国今冬和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,27:136-140

王遵娅,丁一汇.2006.近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因.大气科学,30:1068-1076

卫捷,陶诗言,赵琳娜.2008.2008年1月南方冰雪过程的可预报性问题分析.气候与环境研究,13:520-530

武炳义,黄荣辉.1999.冬季北大西洋涛动极端异常与东亚冬季风.大气科学,23:641-651

杨辉,李崇银.2008.冬季北极涛动的影响分析.气候与环境研究,13:395-404

张莉,丁一汇,任国玉.2005.我国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析.应用气象学报,16:583-592

赵彦,郭裕福,袁重光等.2000.短期气候数值预测可预报性问题.应用气象学报,11(增刊):64-71

朱乾根,施能,吴朝晖等.1997.近百年北半球冬季大气活动中心的长期变化及其与中国气候变化的关系.气象学报,55:750-758

Branković C, Palmer T N, Ferranti L. 1994. Predictability of seasonal atmospheric variations. J Climate, 7: 217-237

Chen Lijuan, Chen Deliang, Wang Huijun, et al. 2009. Regionalization of precipitation regimes in China. Atmos Ocean Sci Lett, 2: 301-307

Fan Ke, Wang Huijun. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. Geophys Res Lett, 31: L10201, doi:10.1029/2004GLD19465

Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring. Sci China Earth Sci, 49: 554-560

Fang Zhifang. 1987. Interaction between subtropical high and polar ice in Northern Hemisphere. Chinese Sci Bull, 32: 330-335

Gao Hui. 2009. China's snow disaster in 2008: Who is the principal player? Int J Climatol, 29: 2191-2196

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77: 437-472

Kumar A, Schubert S D, Suarez M S. 2003. Variability and predictability of 200 mb seasonal mean heights during summer and winter. J Geophys Res, 108 (D5): 4169, doi: 10.1029/2002JD002728

Lang Xianmei, Wang Huijun. 2005. Seasonal differences of model predictability and the impact of SST in the Pacific. Adv Atmos Sci, 22: 103-113

Lang Xianmei. 2008. Prediction model for spring dust weather frequency in North China. Sci China Earth Sci, 51: 709-720

Lang Xianmei, Wang Huijun. 2010. Improving extraseasonal summer rainfall prediction by merging information from GCMs and observations. Wea Forecasting, 25: 1263-1274

- Li S, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the winter climate of East China. *Adv Atmos Sci*, 24: 126-135
- Liu J, Zhang Z, Horton R M, et al. 2007. Variability of North Pacific sea ice and East Asia-North Pacific winter climate. *J Climate*, 20: 1991-2001
- Qin Dahe, Liu Shiyin, Li Peiji. 2006. Snow cover distribution, variability and response to climate change in western China. *J Climate*, 19: 1820-1833
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate*, 15: 1609-1625
- Rowell D P. 1998. Assessing potential seasonal predictability with an ensemble of multidecadal GCM simulations. *J Climate*, 11: 109-120
- Wang Huijun. 2003. the extra-strong warm winter event in North Asia and its accompanying anomalous atmospheric circulation. *Chinese Sci Bull*, 48: 1031-1033
- Wang Huijun, Fan Ke. 2009a. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies. *Wea Forecasting*, 24: 548-554
- Wang Huijun, Sun Jianqi. 2009b. Variability of Northeast China river break-up date. *Adv Atmos Sci*, 26: 701-706
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008. *Mon Wea Rev*, 137: 1111-1131
- Yang X Q, Anderson J L, Stern W F. 1998. Reproducible forced modes in AGCM ensemble integrations and potential predictability of atmospheric seasonal variations in the extratropics. *J Climate*, 11: 2942-2959