

基于多种集合的中国冬季气温逐月滚动预测

谭桂容^{①*}, 尹丝雨^①, 王永光^②

① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

② 中国气象局 国家气候中心, 北京 100081

* 联系人, E-mail: tanguirong@nuist.edu.cn

2016-04-19 收稿, 2016-07-12 接受

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206016; GYHY201306028); 国家自然科学基金资助项目(41475088)

摘要 利用 1979—2015 年中国国家气候中心整编的 160 站月平均气温和 NCEP/NCAR 全球大气再分析资料, 从 1979/1980—2008/2009 年冬季前期 500 hPa 高度场、200 hPa 势函数和 850 hPa 势函数场选择预测因子, 考虑不同时效因子的组合及其独立性, 综合应用多因子回归集合、交叉检验集合、逐月滚动集合, 建立了针对中国冬季气温的逐月滚动预测模型, 并利用该模型对 2010/2011—2014/2015 年冬季气温进行了独立预测试验和检验。结果表明, 综合运用多种集合可提高短期气候客观定量预测的可行性和稳定性。多因子回归集合能增加可预测站点数, 交叉检验集合可减少因统计关系不稳定而产生的对预报效果的影响, 逐月滚动集合的应用不仅增加了可预测站点数, 而且使预测效果更加稳定。本文建立的预测模型可对中国冬季气温进行长时效的预测, 且有一定的预报技巧, 对实际的季节预测业务有重要应用价值。

关键词

逐月滚动预测;
统计预测模型;
多集合预测;
冬季气温

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高, 国家和社会对短期气候预测的需求增加。长期以来, 人们对夏季降水的成因及其预测的研究较多(王会军, 1997; 王会军等, 2008), 但自 2008 年 1 月的低温事件以来, 人们对冬季气温的影响及其预测的研究也愈加重重视(贾小龙等, 2010; 谭桂容等, 2010; 杜良敏等, 2011; 房一禾等, 2013, 2016; 谭桂容和王腾飞, 2014; Tan et al., 2015; 谭晶等, 2016; 李栋梁和蓝柳茹, 2017)。因此, 研究冬季气温预测方法, 尽可能早地进行预测, 对防灾减灾具有重大的意义。

关于气温的预测, 早期一般为物理统计方法, 如典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, 简称 CCA), 包括变形的典型相关分析(Barnett-Preisendorfer canonical correlation analysis, 简称 BP-CCA)、集合典型相关分析(Ensemble Canonical Correlation, 简称 ECC)等在季节气温和月气温的预测中得到了

广泛的应用(毛恒青和李小泉, 1997; 陈正洪等, 1999; 余金波和吴洪宝, 2001; Kingtse, 2003; 陈小兰等, 2007; 贺晓霞等, 2008; 贾小龙等, 2010; 杜良敏等, 2011; 阮能等, 2016)。此外, 各种回归方法、相似方法等也用于气温的统计预测或者动力统计相结合的预测中(任宏利等, 2006; Tomozeiu et al., 2006; 郑志海等, 2009; 刘金波等, 2011)。另一方面, 近 20 年来, 气候模式对气温的预测水平有很大的提高(何慧根等, 2014)。现有的气候系统模式能合理预测东亚季风多时间尺度变率、季风与 ENSO 等主要气候现象(Liu and Fan, 2014; Wang et al., 2015), 且对我国气候尤其是极端气候异常事件的预测能力明显提升(郎咸梅等, 2004; 王会军等, 2008)。但是气候模式对东亚气候的预测仍存在明显的误差(Wen and Zhang, 2012)。鉴于当前气候模式的预测水平还不高, 动力统计相结合的预测方法成为现阶段主要的预测方法之一。气象学家们利用统计与动力相

引用格式: 谭桂容, 尹丝雨, 王永光, 2017. 基于多种集合的中国冬季气温逐月滚动预测[J]. 大气科学学报, 40(6): 749-758.

Tan G R, Yin S Y, Wang Y G, 2017. A monthly rolling prediction for winter surface air temperature over China based on multi-ensemble [J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 749-758. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160419002. (in Chinese).

结合的降尺度方法来提高短期气候预测技巧 (Tomazeu et al., 2006; 谭桂容等, 2012; Liu and Fan, 2014)。但由于模式大气也同观测大气类似, 气候系统变量之间存在复杂的多尺度特征, 气候模式对于某些要素的预报误差也不稳定, 其与相关的误差影响因素之间的关系存在时变性, 这也成为动力统计误差订正需解决的重要难题之一。目前我国短期气候预测水平仍十分有限 (李维京等, 2013)。

鉴于目前关于冬季气温预测的方法虽多, 但预测时效短且效果不稳定; 气候模式对热带外地区气温的跨季度预测在我国不少地区仍没能给出可信的结果 (Kim et al., 2012)。本文尝试采用 850 hPa、200 hPa 势函数场和 500 hPa 高度场为预测因子场, 并考虑不同时效因子的组合及其独立性, 综合应用多因子回归集合、交叉检验集合、逐月滚动集合, 对冬季气温进行预测试验, 以期能进行跨年度、长时效、客观定量的预测, 从而尽可能地满足实际业务预测的需求。

1 资料和方法

1.1 资料

使用国家气候中心整编的 160 站逐月气温资料以及美国 NCEP/NCAR 再分析月平均风场和 500 hPa 高度场资料, 网格点间距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。所有资料时间段为 1979—2015 年。

1.2 方法

选取了距平相关系数 (ACC)、距平同号率 (S_p)、技巧分 (S_k)、异常级 (T_s) 和预测评分 (P_s) 评估方法对模拟预测结果进行评估。这里的技巧分为基于气候值的评分, 各评分参数的具体计算方法参见文献 (孙照渤等, 2010)。

1.3 具体步骤

从 1979/1980—2008/2009 年冬季前期 500 hPa 高度场、200 hPa 势函数和 850 hPa 势函数场选择预测因子 (这里的因子值和后面的气温均取年际增量), 建立针对冬季气温的预测模型; 同时, 对 2010/2011—2014/2015 年冬季气温进行独立预测。该模型首先对所选预测因子集进行典型场分解, 得到不同组合因子对应的时间序列; 然后利用组合因子时间序列与全国 160 站冬季气温相关显著性确定该因子对该站点的作用, 以两者显著相关性达到 90% 为入选标准, 再利用入选因子对相应站点的气温距平年际增量进行回归拟合, 以多个因子回归拟合值的平均为该站点的模拟预测结果, 即为回归集合预测。

在此基础上, 为克服不同样本组合的均值改变对预测结果的可能影响, 采用交叉检验集合预测; 为了获取不同时效因子的有效预测, 采用了逐月滚动预测。基本步骤如下:

1) 选择基本因子场关键区域。由大尺度正压涡度方程

$$\frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} + J(\psi, \Delta \psi + f) + \gamma \Delta \psi = Q。$$

影响到局地涡度异常的因素有平流项 ($J(\psi, \Delta \psi + f)$) 和局地外强迫项 (Q) 的作用。对于准定常环流异常 ($\frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} = 0$), 平流项和局地外强迫项作用近乎平衡。

在热带地区的环流异常与局地外源的强迫关系较大, 而热带外地区的环流系统异常则主要表现为平流项的作用, 即反映了热带外大气对热带强迫的遥响应。考虑高低层势函数可以反映促使大气内系统发展与消亡的强迫源异常, 500 hPa 高度场则能反映大尺度大气的基本环流状态。因此考虑月平均 500 hPa 高度场、200 hPa 势函数及 850 hPa 势函数作为基本因子场, 针对预测目标, 选择基本因子场关键区域; 又由于势函数异常主要在热带地区, 而中国气温直接受北半球中高纬环流异常的影响, 故本文选择 850 hPa ($0^\circ \sim 360^\circ \text{E}, 30^\circ \text{S} \sim 30^\circ \text{N}$)、200 hPa 势函数场 ($0^\circ \sim 360^\circ \text{E}, 30^\circ \text{S} \sim 30^\circ \text{N}$)、500 hPa 高度场 ($0^\circ \sim 360^\circ \text{E}, 30^\circ \text{S} \sim 85^\circ \text{N}$) 进行分析。

2) 获得关键区域因子主分量。对上述区域的 850 hPa、200 hPa 势函数场及 500 hPa 高度场按月进行经验正交函数分解, 得到各量相应关键区域因子主分量。

3) 优化组合关键因子集。以上述三个变量对应的关键区域因子主分量作为粗选因子集。按照预测时效, 通过经验正交函数展开对关键因子集进行优化组合得到相应的组合因子, 并保证各预测因子间的相对独立性。本文选取 500 hPa 高度场、850 hPa 势函数场、200 hPa 势函数场时间系数分别为前 12 个、前 5 个、前 2 个共 20 个因子; 再对上述因子进行 EOF 分解, 得到组合因子主成分作为最终的预测因子, 第一因子即为组合因子的第一主成分; 上述因子均按照不同预测时效进行分解组合, 即前期 2 月起报的因子为前期 2 月因子场分析得到。

4) 进行多因子回归集合预测。按照预测时效, 利用线性回归和各相应的组合因子建立预测方程并对区域气候进行预测; 预测因子个数结合最大可预测的区域站点数及 Mallows' Cp 方法 (Delsole and

Shukla,2002)确定,即对于可预测站点全覆盖时采用 Mallows'Cp 方法确定,否则以可预测站点数较多确定因子个数。这里除前期 1—5 月因子按照覆盖率最大选取外,其他均按照 Mallows'Cp 方法选取。预测时效从前期 1 月到同期 1 月,选取的因子个数除前期 1—4 月为 20 个外,其他时效都为 14 个;然后,通过预测因子集合平均得到预测目标的预测值。

5)进行交叉检验集合预测。对步骤 1)—3)所选取的历史资料依照预测时效进行交叉检验;同时根据步骤 4)对独立预测时段预测目标进行多次预测,通过集合给出预测目标的预测结果。

6)进行逐月滚动集合预测。针对预测目标,按照预测时效逐月经步骤 4)、步骤 5)分别得到起报月前各月的多因子集合预测值及交叉检验集合预测值;在此基础上,对起报月之前更长预测时效的具有有效预测值站点的预测值滚动至对应预测时效的预测结果中,通过对不同预测时效的预测结果进行集合,得到预测目标的逐月滚动集合预测值。图 1 为该方法的预测流程图。为简便,以下记录多因子回归集合预测为 ENC1,多因子回归集合预测结合交叉检验集合预测为 ENC2,因子回归集合预测、交叉检验集合预测结合逐月滚动集合预测为 ENC3。

2 结果分析

2.1 模拟预测

表 1 为模型对冬季气温进行拟合预测的评估结果。可见,ENC1 各不同时效拟合的 P_s 评分平均为

82%,最高为 84%,最低为 79%; S_p 评分平均为 61%,最高为 63%,最低为 58%;ACC 评分平均为 0.26,最高为 0.29,最低为 0.21; S_k 评分平均为 0.19,最高为 0.24,最低为 0.12; T_s 评分平均为 0.47,最高为 0.49,最低为 0.43。ENC2 各不同时效拟合的 P_s 、 S_p 、ACC、 S_k 、 T_s 评分平均为 81%、62%、0.26、0.19、0.47,最高分别为 83%、64%、0.32、0.25、0.50,最低分别为 79%、58%、0.19、0.11、0.43。ENC3 各不同时效拟合的 P_s 、 S_p 、ACC、 S_k 、 T_s 评分平均为 83%、65%、0.42、0.26、0.50,最高分别为 84%、66%、0.45、0.29、0.52,最低分别为 80%、62%、0.29、0.22、0.48。由以上可见,一般 ENC2 各不同时效拟合的平均评分都比 ENC1 高,ENC3 则比 ENC2 高(表 1)。

图 2 给出了模型对应的各评分参数的评估结果随不同时效的分布。由图 2a 可见,尽管在前期 1 月,ENC1、ENC2 有较高的 P_s 评分,但从前期 1 月到次年 1 月,ENC3 的拟合 P_s 评分都较高。ENC1、ENC2 的 S_p 评分在前期 10 月最低,前期 7 月最高;除前期 1 月外,各时效都以 ENC3 的评分最高(图 2b)。ACC 评分除在 3、5 月外,ENC1 高于 ENC2,但各时效仍以 ENC3 最高(图 2c)。ENC1、ENC2 的 S_k 在前期 10 月较低,7 月较高,且多数时效以 ENC1 高于 ENC2;但各时效还是以 ENC3 评分最高(图 2d)。ENC1、ENC2 的 T_s 差别不大,各时效都以 ENC3 的评分最高(图 2e)。可见,ENC3 在各不同时效的评分最高,且以前期 1 月最低,7 月最高,评分也比较稳定。

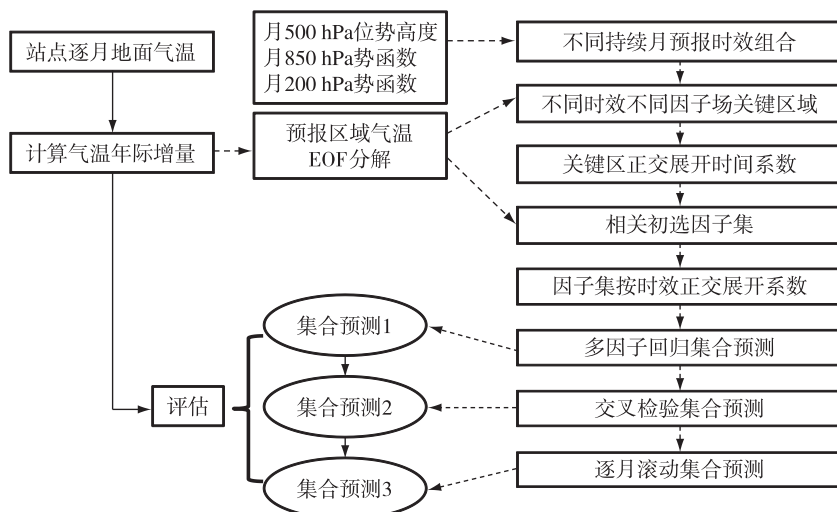


图 1 逐月滚动多集合预测流程图

Fig.1 Flow chart of monthly rolling multi-ensemble prediction

表 1 1979/1980—2014/2015 年冬季气温模拟预测的评估结果

Table 1 Evaluation resultsof simulation and prediction ofwinter surface air temperatureduring 1979/1980—2014/2015

	方法	$P_s/\%$	$S_p/\%$	ACC	S_k	T_s
拟合	ENC1	82	61	0.26	0.19	0.47
	ENC2	81	62	0.26	0.19	0.47
	ENC3	83	65	0.42	0.26	0.50
独立预测	ENC1	81	58	0.36	0.25	0.50
	ENC2	82	66	0.39	0.27	0.51
	ENC3	83	65	0.52	0.35	0.56

2.2 独立试验

为了检测模型的实际预报能力,利用基于 1979/1980—2008/2009 年资料建立的预测模型对 2010/2011—2014/2015 年的中国冬季气温进行独立样本的预测试验。由表 1 可见,在独立预测试验中除 ENC1 的 P_s 、 S_p 评分外,独立预测各时效平均评分均高于拟合结果。其中 ENC1 各不同时效独立预测的 P_s 、 S_p 、ACC、 S_k 、 T_s 平均评分最高分别为 86%、67%、0.44、0.43、0.59,最低分别为 75%、51%、0.22、0.12、0.43,平均为 81%、58%、0.36、0.25、0.50;ENC2 各不同时效独立预测的 P_s 、 S_p 、ACC、 S_k 、 T_s 评分最高分别为 86%、67%、0.46、0.43、0.68,最低分别为 77%、54%、0.29、0.13、0.44,平均为 82%、66%、0.39、0.27、0.51;ENC3 各不同时效预测的 P_s 、 S_p 、ACC、 S_k 、 T_s 评分最高分别为 84%、63%、0.54、0.42、0.60,最低分别为 82%、59%、0.43、0.13、0.44,平均为 83%、65%、0.52、0.35、0.56。总体看,ENC2 各不同时效独立预测的平均评分都比 ENC1 高,除 S_p 评分外 ENC3 的评分则又比 ENC2 高。

由图 3 可见,预测的 P_s 评分除了在前期 3 月以 ENC1 最高,2、7 月和同期 1 月以 ENC2 最高外,其他时效都是 ENC3 最高(图 3a)。 S_p 评分也多以 ENC3 最高,只在前期 3、7 月和同期 1 月以 ENC1 或 ENC2 最高(图 3b)。ACC 评分仅在前期 1 月以 ENC1 最高,其他都以 ENC3 最高(图 3c)。 S_k 和 T_s 评分都在前期 2 月和同期 1 月以 ENC2 最高、3 月 ENC1 最高,其他时效则以 ENC3 最高(图 3d、3e)。可见,尽管少数情况下 ENC1、ENC2 可能有较高的评分,但绝大多数情况 ENC3 的评分最高。由表 2 可见,对具体年份各不同时效独立预测的平均评分

除 2013/2014 年冬季外,ENC1、ENC2、ENC3 的平均评分都较高,特别是对 2011/2012 和 2012/2013 年冬季气温的预测评分较高,其中又以 ENC3 的预测效果最佳。这两年 ENC3 预测的 P_s 、 S_p 评分分别在 90%和 80%以上,ACC 和 T_s 在 0.7 以上, S_k 分别为 0.69 和 0.59。预测较差的 2013/2014 年,预测的 ACC 和 S_k 均为负,但 P_s 、 T_s 评分仍较高。可见上述三种集合预测方案对中国冬季气温都有较好的实际预测能力,且以 ENC3 的预测效果最好。

表 2 2010/2011—2014/2015 年冬季气温独立预测的评估结果

Table 2 Evaluation resultsof independentprediction ofwinter surface air temperature during 2010/2011—2014/2015

年份	预测方法	$P_s/\%$	$S_p/\%$	ACC	S_k	T_s
2010/2011	ENC1	86	64	0.40	0.25	0.48
	ENC2	86	65	0.43	0.26	0.49
	ENC3	91	76	0.64	0.49	0.62
2011/2012	ENC1	94	82	0.62	0.64	0.73
	ENC2	94	84	0.64	0.67	0.75
	ENC3	94	85	0.71	0.69	0.75
2012/2013	ENC1	90	70	0.56	0.34	0.55
	ENC2	91	73	0.62	0.37	0.58
	ENC3	95	84	0.85	0.59	0.72
2013/2014	ENC1	74	49	-0.04	-0.04	0.33
	ENC2	74	49	-0.04	-0.05	0.33
	ENC3	72	47	-0.00	-0.11	0.31
2014/2015	ENC1	80	55	0.24	0.05	0.39
	ENC2	82	58	0.27	0.10	0.41
	ENC3	83	57	0.42	0.10	0.40

2.3 可预测站点数

上述分析表明,ENC1、ENC2 和 ENC3 均具有一定的预测能力。但如果考虑到模型可预测的站点数,还是以 ENC3 为佳。由图 4 可见,不同预测时效,ENC1、ENC2 可以预测的站点不同,且并不随预测时效的变短而有所增加,如 ENC1 在前期 1 月可预测站点为 82 个站;而 7 月的可预测站点仅 51 个。ENC2 的可预测站点多于 ENC1,在前期 1 月可预测站点数达 144 个;在前期 5 月起报的站点数最少为 122 个;同期 1 月最多为 157 个。ENC3 因为考虑到预测站点的逐月滚动,随着预测时效的减少,可预测的站点数在逐月增加。到前期 4 月就可实现站点全

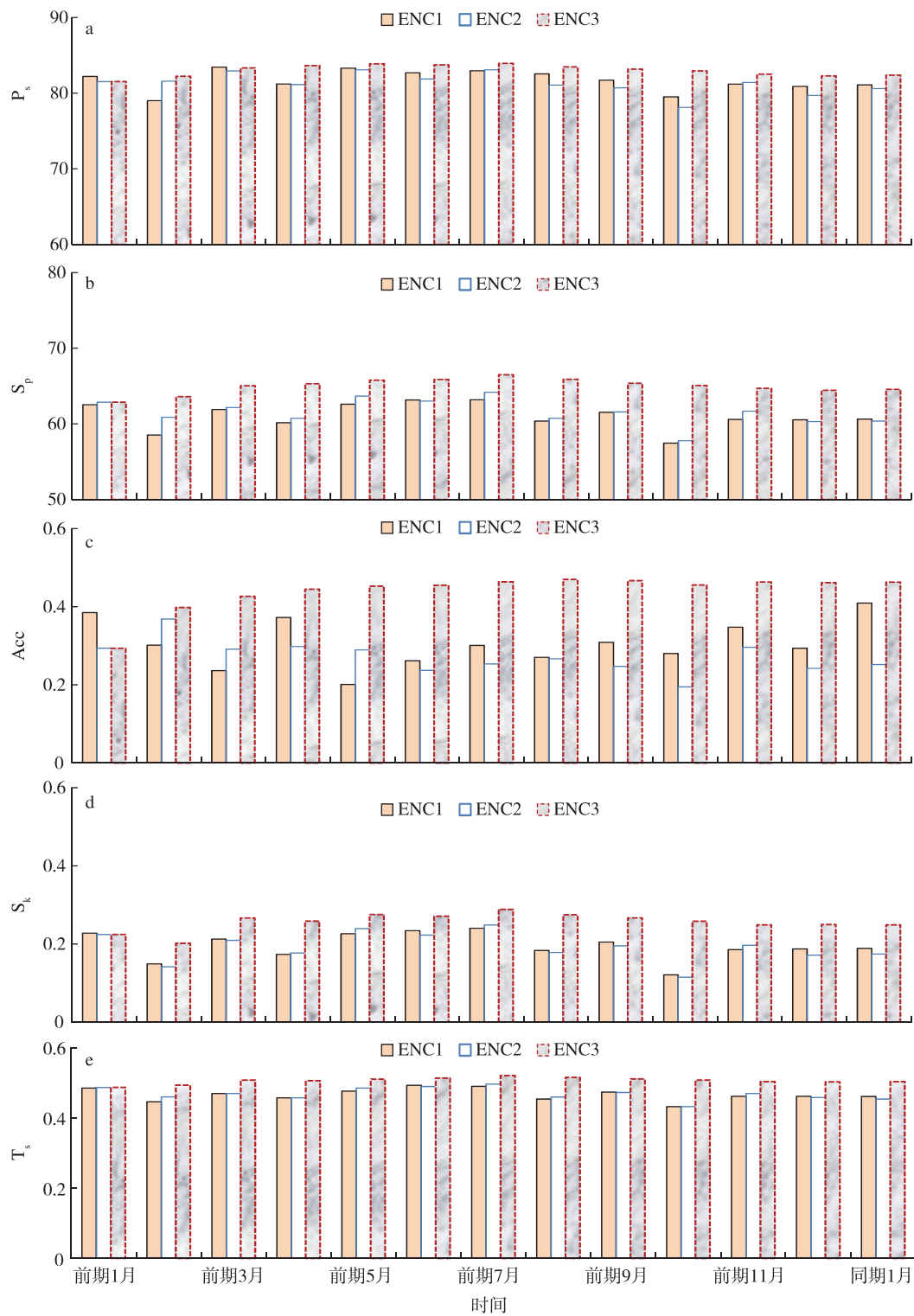


图2 基于多因子回归集合、交叉检验集合、逐月滚动集合方法对1979/1980—2008/2009年冬季地面气温距平的拟合结果 a.评分;b.同号率;c.距平相关系数;d.技巧分;e.异常级评分

Fig.2 Simulation results for predicting winter surface air temperature of 1979/1980—2008/2009 by using the multi-variable regression ensemble, the cross validation test ensemble and the monthly rolling prediction ensemble methods a. P_s ; b. S_p ; c. ACC; d. S_k ; e. T_s

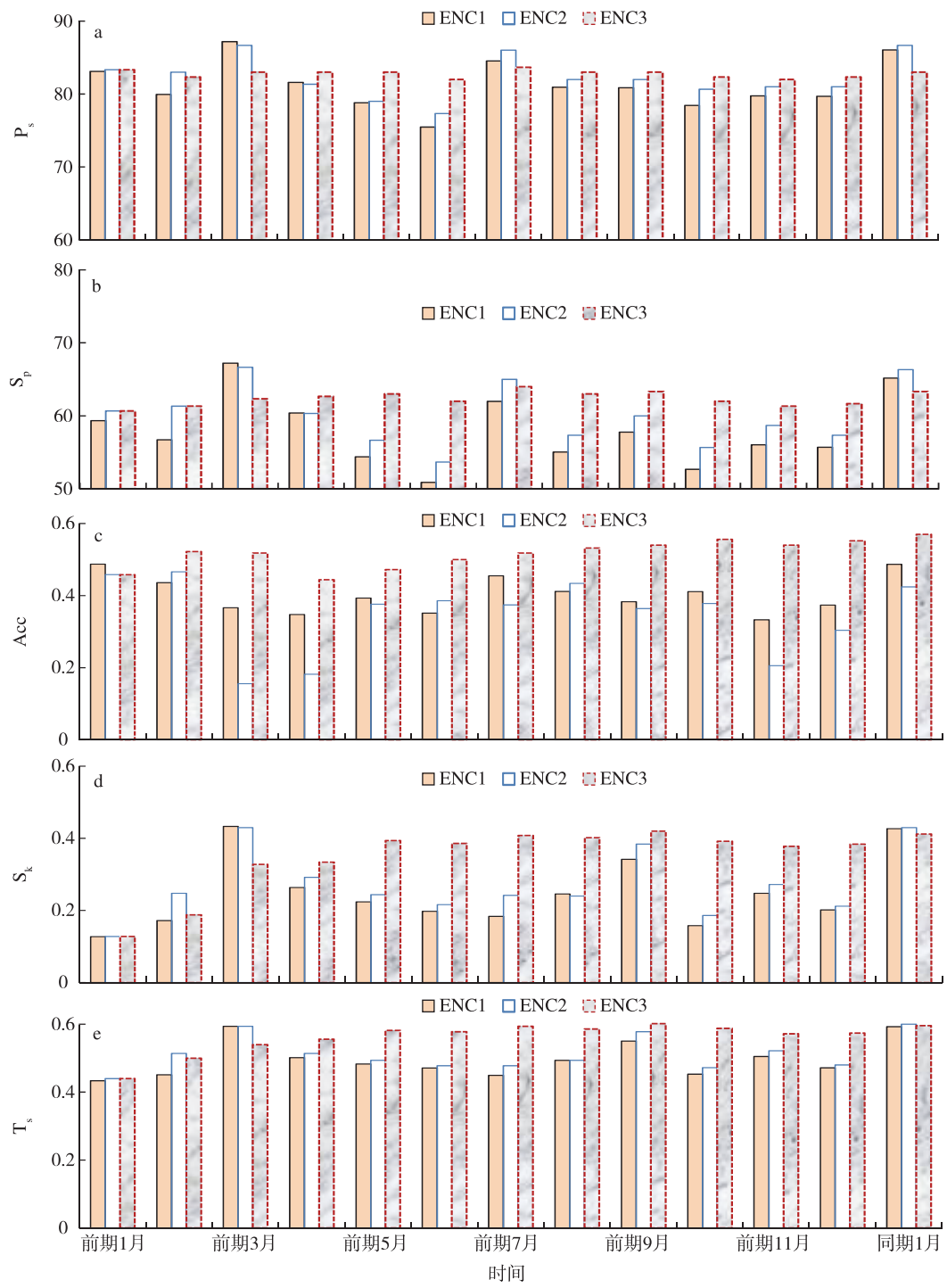


图 3 基于多因子回归集合、交叉检验集合、逐月滚动集合方法对 2010/2011—2014/2015 年冬季地面气温距平的独立预测结果 a.评分;b.同号率;c.距平相关系数;d.技巧分;e.异常级评分
Fig.3 Independent experimental results for predicting winter surface air temperature of 2010/2011—2014/2015 by using the multi-variable regression ensemble, the cross validation test ensemble and the monthly rolling prediction ensemble methods a. P_s ; b. S_p ; c. ACC; d. S_k ; e. T_s

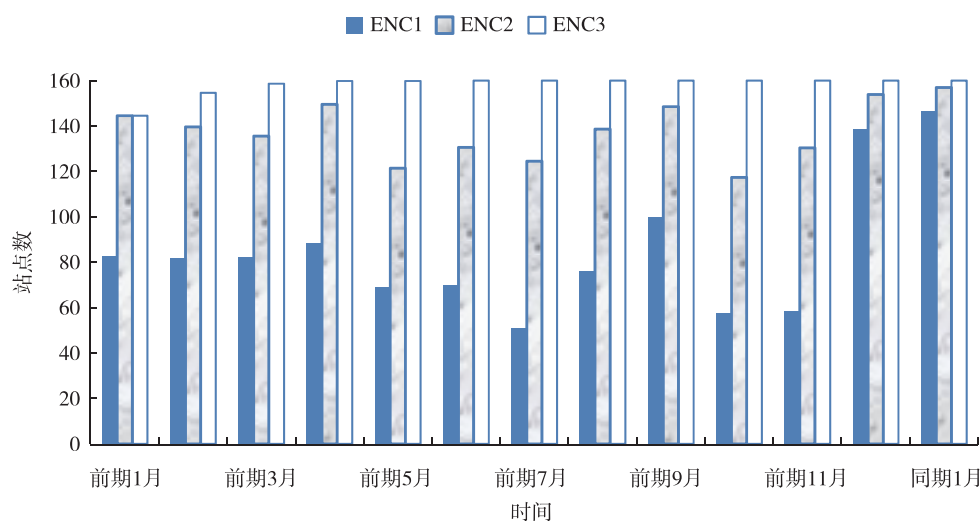


图4 有效可预报站点数随预报时效的变化

Fig.4 Variations of effective predictable station number with forecast time

覆盖。这意味着 ENC3 可以实现更长时效的有效预测。

3 结论与讨论

利用 1979/1980—2008/2009 年的样本资料,从前期 500 hPa 高度、200 hPa 势函数和 850 hPa 势函数场选择预测因子,考虑不同时效因子的组合及其独立性,综合应用多因子回归集合、交叉检验集合、逐月滚动集合,建立了针对中国冬季气温的逐月滚动预测模型。并利用该模型对 2010/2011—2014/2015 年冬季气温进行了独立预测试验和检验,得到以下结论:

1) 势函数可以反映促使大气内系统发展与消亡的强迫源,500 hPa 高度则能反映当时大气环流的基本状态。尽管大气内部环流的演变记忆在一周左右,但在预测初始时刻势函数的异常可以反映出大气上、下边界的外强迫异常,因而势函数异常可以反

映外强迫因子异常及其对未来气候异常演变的影响。本文试验考虑从以上三层次中选取预测因子,比较简单实用,试验结果具有可行性。

2) 综合运用多种集合可提高短期气候客观定量预测的可行性和稳定性。多因子回归集合可增加可预测站点数;交叉检验集合可减少统计关系不稳定性带来的预报误差;逐月滚动集合的应用不仅增加了可预测站点数,且使预测效果更加稳定。

虽然本文建立模型使用的资料较少,但通过三种集合的应用,最终建立的模型对冬季气温具有一定的实际预测能力,且预测时效相对比较长,这在实际应用中具有较广的使用价值。但在预测模型建立的过程中,仍存在一些值得探讨的问题。如预报因子场范围的不同可能对不同区域气温的影响不同,需要针对地区不同选择范围。此外,本文建模思路还可以应用到模式动力产品中,建立动力统计预测模型。

参考文献 (References)

- 陈小兰,吴洪宝,丁留贯,等,2007.中国冬季气温的集合典型相关分析和预报[J].南京气象学院学报,30(5):623-631. Chen X L, Wu H B, Ding G Z, et al., 2007. Ensemble canonical correlation prediction method of winter temperature over China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 30(5): 623-631. (in Chinese).
- 陈正洪,杨荆安,张鸿雁,1999.气温和降雨量与 500 hPa 高度场的 CCA 试验及其预报模式[J].气象科技(2):46-51. Chen Z H, Yang J A, Zhang H Y, 1999. The canonical correlation analysis and its predicting model between geopotential height at 500 hPa and temperature as well as precipitation[J]. Meteorological Science and Technology(2): 46-51. (in Chinese).
- Delsole T, Shukla J, 2002. Linear prediction of Indian monsoon rainfall[J]. J Climate, 13(24): 3645-3658.
- 杜良敏,张培群,周月华,等,2011.基于非负矩阵和典型相关的场定量预测方法研究[J].高原气象,30(1):103-108. Du L M, Zhang P Q, Zhou Y H, et al., 2011. Non-negative matrix and canonical correlation method of field quantitative prediction[J]. Plateau Meteor, 30(1): 103-108. (in Chinese).
- 房一禾,周放,张运福,等,2013.东北冬季气温年际年代际影响因子的比较[J].地理科学,33(7):844-850. Fang Y H, Zhou F, Zhang Y F, et al.,

- 2013.The comparison of factors on interannual and interdecadal variations of the winter temperature in Northeast China[J].Scientia Geographica Sinica,33(7):844-850.(in Chinese).
- 房一禾,孙照渤,倪东鸿,等,2016.中国冬季暖夜频率变化特征及其与海温的关系[J].大气科学学报,39(2):166-176. Fang Y H,Sun Z B,Ni D H,et al.,2016.Variation in the frequency of warm winter nights in China and the relationship with sea surface temperature[J].Trans Atmos Sci,39(2):166-176.(in Chinese).
- 何慧根,李巧萍,吴统文,等,2014.月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估[J].大气科学,38(5):950-964. He H G,Li Q P,Wu T W,et al.,2014.Temperature and precipitation evaluation of monthly Dynamic Extended Range Forecast operational system DERF2.0 in China [J].Chin J Atmos Sci,38(5):950-964.(in Chinese).
- 贺晓霞,吴洪宝,陈小兰,2008.我国东南夏季干旱指数的 ECC 预测方法[J].南京气象学院学报,31(1):10-17. He X X,Wu H B,Chen X L,2008.Ensemble canonical correlation forecasting of summer drought index over southeastern China[J].J Nanjing Inst Meteor,31(1):10-17.(in Chinese).
- 贾小龙,陈丽娟,李维京,等,2010.BP-CCA 方法用于中国冬季温度和降水的可预报性研究和将尺度季节预测[J].气象学报,68(3):398-410. Jia X L,Chen L J,Li W J,et al.,2010.Statistical downscaling based on BP-CCA:Predictability and application to the winter temperature and precipitation in China[J].Acta Meteorologica Sinica,68(3):398-410.(in Chinese).
- Kim H M,Peter J,Judith A,2012.Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere winter[J].Climate Dyn,39:2957-2973.
- Kingtse C M,2003.Ensemble canonical correlation prediction of surface temperature over the United States[J].J Climate,16(11):1665-1683.
- 柯宗建,张培群,董文杰,2009.最优子集回归方法在季节气候预测中的应用[J].大气科学,33(5):994-1002. Ke Z J,Zhang P Q,Dong W J,et al.,2009.An application of optimal subset regression in seasonal climate prediction[J].Chin J Atmos Sci,33(5):994-1002.(in Chinese).
- 郎咸梅,王会军,姜大膀,2004.应用九层全球大气格点模式进行跨季度短期气候预测系统性试验 [J].地球物理学报,47(1):19-24. Lang X M,Wang H J,Jiang D B,2004.Extraseasonal short-term predictions of summer climate with IAP9L-AGCM [J].Chinese J Geophys,47(1):19-24.(in Chinese).
- 李栋梁,蓝柳茹,2017.西伯利亚高压强度与北大西洋海温异常的关系[J].大气科学学报,40(1):13-24. Li D L,Lan L R,2017.Relationship between the intensity of the Siberian High and the SST anomaly in the North Atlantic[J].Trans Atmos Sci,40(1):13-24.(in Chinese).
- 李维京,郑志海,孙丞虎,2013.近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法研究与应用进展 [J].大气科学,37(2):341-350. Li W J,Zheng Z H,Sun C H,2013.Improvements to dynamical analogue climate prediction method in China [J].Chin J Atmos Sci,37(2):341-350.(in Chinese).
- 刘金波,曾新民,郑益群,2011.区域气候模式分辨率对中国夏季气温模拟影响的评估[J].气象学报,69(3):534-543. Liu J B,Zeng X M,Zheng Y Q,2011.An assessment of the effects of the resolution of a regional climate model on simulated summer temperatures in China[J].Acta Meteorologica Sinica,69(3):534-543.(in Chinese).
- Liu Y,Fan K,2014.An application of hybrid downscaling model to forecast summer precipitation at stations in China [J].Atmos Res,143(1):17-30.
- 毛恒青,李小泉,1997.典型相关分析对我国冬季气温的短期气候预测试验[J].应用气象学报,8(4):385-392. Mao H Q,Li X Q,1997.Short-term climate forecast experiment of winter temperature in China using canonical correlation analysis[J].J Appl Meteor Sci,8(4):385-392.(in Chinese).
- 任宏利,张培群,李维京,等,2006.基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用[J].物理学报,55(8):4388-4396. Ren H L,Zhang P Q,Li W J,et al.,2006.A new method of dynamical analogue prediction based on multi-reference-state updating and its application[J].Acta Physica Sinica,55(8):4388-4396.(in Chinese).
- 阮能,游庆龙,陈脩畅,等,2016.ECC 方法在中国夏季气温预测研究中的应用[J].气候与环境研究,21(2):221-235. Ruan N,You Q L,Chen X Y,et al.,2016.Application of an ensemble canonical correlation method in summer temperature prediction over China[J].Climatic Environ Res,21(2):221-235.(in Chinese).
- 孙照渤,陈海山,谭桂容,等,2010.短期气候预测基础[M].北京:气象出版社:256-263,256-263. Sun Z B,Chen H S,Tan G R,et al.,2010.Elements of short period climate predicitions[M].Beijing:China Meteorological Press:256-263.(in Chinese).
- 谭桂容,陈海山,孙照渤,等,2010.2008 年 1 月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系[J].大气科学,34(1):175-183. Tan G R,Chen H S,Sun Z B,et al.,2010.Linkage of the cold event in January 2008 over China to the North Atlantic Oscillation and stratospheric circulation anomalies[J].Chin J Atmos Sci,34(1):175-183.(in Chinese).
- 谭桂容,段浩,任宏利,2012.中高纬度地区 500 hPa 高度场动力预测统计订正[J].应用气象学报,23(3):304-311. Tan G R,Duan H,Ren H L,2012.Statistical correction for dynamical prediction of 500 hPa Height field at mid-high latitudes[J].Quarterly Journal of Applied Meteorological Science,23(3):304-311.(in Chinese).
- 谭桂容,王腾飞,2014.2011/2012 年冬季中国气温异常的成因及前兆[J].大气科学学报,37(1):65-74. Tan G R,Wang T F,2014.Causes and precursors of the winter temperature anomaly in China in 2011/2012[J].Trans Atmos Sci,37(1):65-74.(in Chinese).
- Tan G R,Ren H L,Chen H S,2015.Quantifying synoptic eddy feedback onto the low-frequency flow associated with anomalous temperature events in January over China[J].Int J Climatol,35(8):1976-1983.

- 谭晶,蔡怡,张海东,等,2016.2012/2013年冬季中国气温异常成因分析[J].大气科学学报,39(3):361-369. Tan J, Cai Y, Zhang H D, et al., 2016. Analysis of the cause of the 2012/2013 winter temperature anomaly in China[J]. Trans Atmos Sci, 39(3):361-369. (in Chinese).
- Tomozeiu R, Cacciamani C, Pavan V, et al., 2006. Climate change scenarios for surface temperature in Emilia-Romagna (Italy) obtained using statistical down scaling models[J]. Theor Appl Climatol, 90:25-47.
- 王会军, 1997. 试论短期气候预测的不确定性[J]. 气候与环境研究, 2(4):333-338. Wang H J, 1997. On the uncertainty of the short-term climate prediction[J]. Climatic Environ Res, 2(4):333-338. (in Chinese).
- 王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等, 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果 [J]. 大气科学, 32(4):806-814. Wang H J, Sun J Q, Lang X M, et al., 2008. Some new results in the research of the interannual climate variability and short-term climate prediction [J]. Chin J Atmos Sci, 32(4):806-814. (in Chinese).
- Wang H J, Fan K, Sun J Q, et al., 2015. A review of seasonal climate prediction research in China [J]. Adv Atmos Sci, 32(2):149-168.
- Wen M, Zhang R H, 2012. Impacts of model resolutions and initial conditions on predictions of the Asian summer monsoon by the NCEP Climate Forecast System [J]. Wea Forecasting, 27(3):629-646.
- 余金波, 吴洪宝, 2001. 3个月平均气温距平的 CCA 预报方法[J]. 南京气象学院学报, 24(2):171-177. Yu J B, Wu H B, 2001. CCA forecast scheme of 3-month mean temperature anomaly[J]. J Nanjing Inst Meteor, 24(2):171-177. (in Chinese).
- 郑志海, 任宏利, 黄建平, 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验[J]. 物理学报, 58(10):7359-7367. Zheng Z H, Ren H L, Huang J P, 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments[J]. Acta Physica Sinica, 58(10):7359-7367. (in Chinese).

A monthly rolling prediction for winter surface air temperature over China based on multi-ensemble

TAN Guirong¹, YIN Siyu¹, WANG Yongguang²

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

With the development of social economy and the improvement of people's living standard, the demand of country and society for the short-term climate prediction is increasing. Though current methods including statistic, dynamical-statistic and numerical methods for the prediction of surface air temperature in wintertime are more, the prediction lead time is usually short and the forecast skill is not stable. For example, the seasonal prediction of climate model for winter temperature is still low outside the tropics and the most models cannot give reliable results in many areas of China. So it is very important to carry prediction experiment of winter air temperature and expand valid prediction lead time, in order to meet the needs of the society. Based on NCC (National Climate Center of China) monthly surface air temperature data of 160 stations in China and NCEP/NCAR monthly mean reanalysis data during 1979—2015, the predictive factors are selected from early winter geopotential height at 500 hPa and velocity potential at 850 and 200 hPa during 1979/1980—2008/2009. Considering the combination of different predictive factors and their independence, the monthly rolling forecasting models are separately established by the multi-variable regression ensemble, the cross validation test ensemble and the monthly rolling prediction ensemble, in order to perform independent predictive tests for the winter temperature in China during 2010/2011—2014/2015. The velocity potential can reflect the external forcing source of atmospheric system, and 500 hPa height can denote the basic state of atmospheric circulation. Although the memory of internal evolution within atmosphere circulation is about a week or so, the initial time potential function at 850 and 200 hPa can reflect variations of the upper and lower level boundary forcing anomalies and their influences on the future atmosphere. Besides, it is simple and practical to select factors from the predictands on the above three levels.

Results show that the multi-variable regression ensemble (ENC1) may increase predictable station number.

Combined using of the multi-variable regression ensemble and the cross validation test ensemble(ENC2) can improve stability and prediction skill, which is negatively affected by unstable statistic relationship between predictor and predictand. The comprehensive ensemble of multi-variable regression, cross validation test and monthly rolling prediction(ENC3) can not only increase the predictable station number, but also make the prediction more stable, which improves the feasibility and stability of objective quantitative prediction of short-term climate. Although the data used in establishment of prediction model are less and not complex, the final prediction model, through the comprehensive application of the three ensemble methods, has a certain predictive ability for the winter surface air temperature in China, and the prediction lead time is relatively long. Therefore, the statistic model established here will make the long-lead prediction reliable and effective with valuable skill, which is very important in practical use in short-range climate prediction. In addition, the comprehensive application of multi-ensemble methods can also be employed to correct the numerical model products by the establishment of dynamic statistical forecasting model.

monthly rolling prediction; statistic prediction model; multi-ensemble prediction; winter surface air temperature

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160419002

(责任编辑:刘菲)