

唐颖潇,秦明月,蔡子颖,等.基于松弛逼近方法的天津PM_{2.5}延伸期数值预报研究[J].中国环境科学,2023,43(9):4503-4511.

Tang Y X, Qin M Y, Cai Z Y, et al. Numerical prediction technology of extended period PM_{2.5} in autumn and winter in Tianjin based on Nudging method [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4503-4511.

基于松弛逼近方法的天津PM_{2.5}延伸期数值预报研究

唐颖潇¹,秦明月²,蔡子颖^{1*},杨旭¹(1.天津市环境气象中心,天津 300074; 2.国家海洋信息中心,天津 300171)

摘要: 在现有天津延伸期空气质量数值预报系统(CFS/WRF-Chem)的基础上,引入 Nudging 技术约束模式积分过程,开展 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 敏感性试验.通过张弛波数、张弛时间、张弛变量等参数的最优化方案测试,提升 Nudging 技术在天津秋冬季PM_{2.5}延伸期数值预报中的适用性,以期有效提升天津秋冬季10~45d空气质量趋势预测的准确性.研究表明:与未采用 Nudging 技术的延伸期空气质量数值模式预报相比,使用 Nudging 技术后,无论是 Grid Nudging 还是 Spectral Nudging,延伸期空气质量预报效果均得以提升.逐日预报与实况PM_{2.5}质量浓度的相关系数由未采用 Nudging 技术的0.1分别提高至 Grid Nudging 的0.35和 Spectral Nudging 的0.43,PM_{2.5}等级预报准确率由33%分别提高至47%和44%.相比 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 方案的选择,张弛波数、截断波长和张弛变量等参数最优配置对 Nudging 技术运用更为关键. Grid Nudging 技术中张弛系数 5×10^{-5} ,张弛时间尺度6h,张弛变量 $\theta-q-uv$ 为最优;Spectral Nudging 技术中张弛波数1,截断波长1800km,张弛变量 $\theta-q-uv$ 最优.即使采用 Nudging 技术,延伸期PM_{2.5}质量浓度逐日预报仍有很大的不确定性,其更适合趋势(增加或者下降)预测.从候与候之间PM_{2.5}浓度变化趋势结果分析,未采用 Nudging 技术时,预报准确率为50%,采用 Grid Nudging 提高至75%,采用 Spectral Nudging 可提高至88%,Spectral Nudging 的预报结果略优,且可以有效支撑延伸期PM_{2.5}候分辨率尺度空气质量趋势预测.

关键词: 天津; 松弛逼近方法; 延伸期PM_{2.5}数值预报; WRF-Chem

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)09-4503-09

Numerical prediction technology of extended period PM_{2.5} in autumn and winter in Tianjin based on Nudging method. TANG Ying-xiao¹, QIN Ming-yue², CAI Zi-ying^{1*}, YANG Xu¹(1.Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China; 2.National Marine Data and Information Service, Tianjin 300074, China). *China Environmental Science*, 2023,43(9): 4503-4511

Abstract: Based on the Tianjin extended period Air Quality Numerical forecasting system (CFS/WRF-Chem), this study introduced Nudging technology to restrict the model integration process, and conducted sensitivity experiments by Grid Nudging and Spectral Nudging. Through the optimization scheme experiments of parameters such as Nudging wave number, Nudging time and Nudging variables, the improvement applicability of Nudging technology in the extended period PM_{2.5} numerical prediction to effectively enhance the accuracy of air quality trend prediction for 10~45 days in autumn and winter in Tianjin. The results showed that: Compared to the extend period numerical model prediction without Nudging technology, no matter the Grid Nudging or Spectral Nudging, prediction improved after using Nudging technology. The correlation coefficient between daily prediction and observed PM_{2.5} concentration increased from 0.1 without Nudging technology to 0.35 by Grid Nudging and 0.43 by Spectral Nudging, and the prediction accuracy of PM_{2.5} grade increased from 33% to 47% and 44%, respectively. Compared to the selection of Grid Nudging and Spectral Nudging scheme, the optimal configuration of parameters such as Nudging wave number, Nudging time and Nudging variables, was more critical to the application of Nudging technology. In Grid Nudging, the best prediction was the experiment by Nudging coefficient was 5×10^{-5} , Nudging time was 6h, and Nudging variable was $\theta-q-uv$. In Spectral Nudging, the best prediction is the experiment by Nudging wave number was 1, truncated wavelength was 1800km, and Nudging variable was $\theta-q-uv$. Even using Nudging technology, there are still great uncertainties in the extended period daily PM_{2.5} concentration prediction, which is more suitable for trend prediction (increase or decrease). According to the analysis of the PM_{2.5} concentration trend between pentads, the prediction accuracy was 50% without Nudging technology, and increased to 75% by Grid Nudging, and 88% by Spectral Nudging. Spectral Nudging provided a slightly better prediction, which could effectively support the extended period PM_{2.5} trend prediction by pentad resolution.

Key words: Tianjin; Nudging; numerical prediction technology of extended period PM_{2.5}; WRF-Chem

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(42130513);天津市气象局项目(202206ybxm03)

* 责任作者, 高级工程师, 120078030@163.com

随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》深入实施,我国环境空气质量逐年改善.在大气污染防治调度中,基于气象条件的空气质量预报和重污染预警在其中发挥积极作用.大气污染事件的发生往往是不利气象条件和污染物排放共同作用的结果^[1-4].在一定时期内排放相对稳定的情况下,污染形成、累积更多受气象条件影响,研究显示气象因子的日变化可以解释 50%的 $PM_{2.5}$ 变化^[5].由于大气污染变化与气象条件密切相关,以及气象条件的可预测性,为空气质量预报提供了可能^[6-7].根据预报方法和预报时效,气象和气候预测一般可分为短时预报(24h),短期预报(1~3d),中期预报(4~10d),延伸期预报(10~40d),月预测、季预测和年预测.与之对应,生态环境部门和气象部门联合全国重点城市从 2013 年开始开展了基于 AQI 的短期空气质量预报,且随着能力逐渐提升发展至短中期预报和延伸期月污染过程预测.因此,不断提高未来 7~10d 区域污染过程预报准确率,以及研究提升未来月尺度区域空气质量趋势预测能力是现阶段空气质量预报预测技术发展的难点,也是实际大气污染防治中迫切需求的技术.

近年随着数值预报技术和超级计算机的发展,数值模式在空气质量预报中发挥了越来越重要的作用.如 CAMx、WRF-Chem 及 CMAQ 作为三代大气化学模式典型代表,在 0~10d 空气质量预报中均表现出不错的性能^[8-10].随着预报时效的延长,对于延伸期的空气质量预报,其不确定性必然超过短中期预报,但也成为新技术和产品开发的热点,包括中国气象局^[11-12]、四川^[13]和上海^[14]等单位 and 地区基于数值模式和客观分型等相关统计方法,实现全国和不同地区的环境气象延伸期预报技术.天津环境气象中心于 2021 年搭建了延伸期空气质量数值预报系统(CFS/WRF-Chem),模式水平分辨率 15km,可以提供 10~45d 天津及周边地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化趋势.但是这些研究均表现出延伸期空气质量预报较强的不确定性,以及现有技术和产品的不足.分析原因,其可能为在直接使用全球再分析数据驱动数值模式的过程中,随着模式的连续积分,往往使得模拟结果逐渐偏离模式大尺度背景场^[15-16].

为应对这种情况,松弛逼近方法(Nudging)得以发展,这项技术主要是通过通过在模式侧边界上增加松

弛项,以约束模式积分过程,松弛项根据分析场和预报场的偏差以反比例的指数形式在时间上调整模式状态,从而使得积分过程向着强迫场逼近^[17-18].Nudging 方法最早由 Hoke 等^[19]提出,并在气象预报中广泛运用,也常应用于延伸期气象要素的预报^[20-21].Nudging 方法在空气质量预报领域的应用,主要是采用 Nudging 源同化反演方法,从而对排放源进行优化,减少模式预报结果与实际观测浓度的误差^[22-23].一种是基于模式的自适应 Nudging 源反演方法^[24],一种则是基于源清单 Nudging 修正方法^[25],以提高模式污染物浓度预报的准确率.而通过 Nudging 方法改进气象场,也能够进一步优化空气质量的模拟效果.可以在模式中 Nudging 自动气象站观测资料,以此通过气象场的改善使得 $PM_{2.5}$ 浓度的模拟效果的改善^[26].这些研究主要是通过同化观测资料的方式实现对模拟结果的改进.在延伸期空气质量的预报中,则需要考虑从动力学的角度约束模式的积分过程,进而改进预报效果,以实现业务化运行.

本研究在现有天津延伸期空气质量数值预报系统(CFS/WRF-Chem)的基础上,引入 Nudging 技术约束模式积分过程,开展 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 敏感性试验,通过张弛波数、张弛时间、张弛变量和截断波长等参数的最优化方案测试,提升 Nudging 技术在天津秋冬季 $PM_{2.5}$ 延伸期数值预报中的适用性,以期有效提升天津秋冬季 10~45d 空气质量趋势预测的准确性,更好地支撑天津地区延伸期空气质量预报工作的开展,并为其他城市空气质量预报工作提供参考.

1 材料与方法

1.1 监测数据

污染物浓度数据来源于天津市环境空气质量监测网络国控评价点,包括天津地区 21 个点位逐小时 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO 质量浓度.

1.2 大气化学模式和 CFS 气象场

WRF-Chem 模式是 NCAR 和 NOAA 联合其他研究机构共同开发的大气化学模式,在空气质量模拟和预报中得到广泛应用^[27-29].本研究采用 WRF-Chem3.8.1 版本,气相化学过程采用 CBMZ 机制,气溶胶过程采用 MOSAIC 模型,积云对流方案采用 GRELL-3D,微物理过程采用 WSM5,长波辐射方

案和短波辐射方案均采用 RRTMG,考虑气溶胶直接辐射反馈,边界层方案使用 YSU 方案,模式所模拟的天津以外地区人为排放源清单使用清华大学 MEIC2020 排放源清单,分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,在天津地区使用 2020 年源谱调查排放源清单数据,其分辨率为 1km,模式水平分辨率 15km,水平网格 121×121 ,中心经纬度为 39°N , 117°E ,垂直方向分为 41 层。

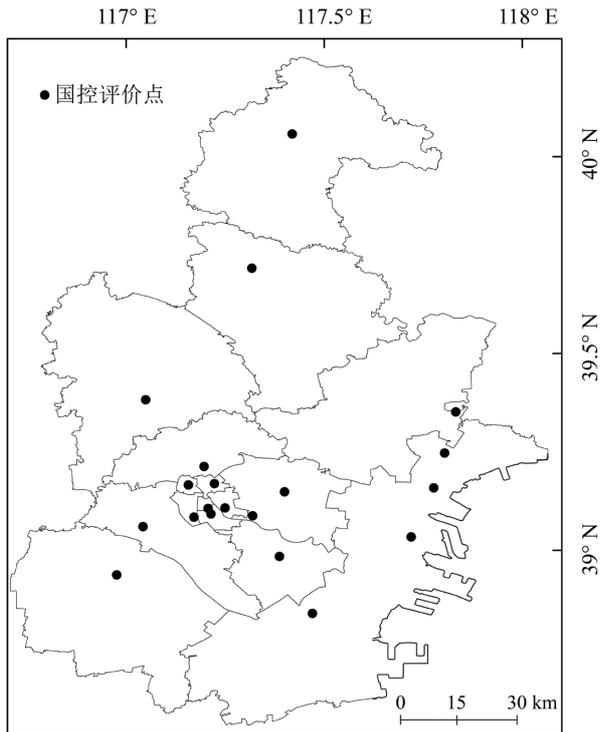


图1 监测点位分布示意

Fig.1 Location of the sampling station

天津延伸期空气质量数值预报系统(CFS/WRF-Chem)由 CFS(The Climate Forecast System)气象场驱动,CFSv2 是美国环境预报中心(NECP)研发完全耦合气候预报系统,包含大气、陆面和海洋模式^[30].提供 29a(1982~2010 年)的历史回报数据,于 2011 年 3 月提供业务化预报.具有 3 种不同预报长度且时间分辨率为 6h 的预报产品:4 个时段(00:00、06:00、12:00 和 18:00),预报长度为 9 个月的预报;1 个时段(00:00)预报长度为 1 个季度的预报(约 123d);3 个时段(06:00、12:00 和 18:00)预报长度为 45d 的预报^[31].本研究开展 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 敏感性试验,设计情景方案 23 组,选用 2019 年 12 月 5 日 12:00 起报案例作为研究对象,预报时效为 45d,spinup 时间为 24h,每 24h 输入一次 CFSv2 气象场,

Nudging 时间为 45d,模拟时间段为 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 18 日。

1.3 Nudging 技术

Nudging 技术的基本思路是在数值模式积分指定时刻,在预报方程中增加一个附加项,即预报值与分析值之差的松弛项,使得方程的解逼近分析值,从而实现对预报结果的约束^[32-33].本研究主要使用 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 这两种方法。

Grid Nudging 方法的基本思路是在方程中加入额外的逼近项,即在每个格点上将模式结果逼近到时间插值后的分析场,从而实现对模式场的调整,其公式如下:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(\alpha) + G_{\alpha} W_{\alpha} (\alpha_0 - \alpha) \quad (1)$$

式中: α 为模式的积分变量; t 为时间; $F(\alpha)$ 为物理强迫项; G_{α} 为控制松弛大小的时间尺度因子; W_{α} 为附加的四维权重系数; α_0 是通过临近时刻插值后的时空分析场,以此实现逼近模式解^[32].在 WRF 模式中, α 可以是风的经纬向分量(uv)、位温(θ)或者水汽混合比(q).Nudging 不同变量时,通过公式(1)产生影响,并通过模式内部方程约束,实现其他要素的更新.Nudging 强度或者 Nudging 系数,被 Nudging 时间尺度所控制.Nudging 时间尺度越小,Nudging 强度越强,变量 α 越接近 α_0 .

Spectral Nudging 利用波谱法,设置波数通过快速傅里叶分析将资料转化进行波谱分析,在空间中过滤掉大于设置波数的高频波,保留大尺度的低频波,然后按照一定权重,把低频波加到模式预报场,从而可以将模拟状态不断靠近大尺度驱动状态,较好地减小大尺度误差,避免了过多的高频资料被大尺度分析场过渡修正^[34-36].模式变量可自由发展中小尺度过程,同时又可以反应出较小尺度的特性.其公式如下:

$$\frac{d\alpha}{dt} = X(\alpha) + G_{\alpha} w(\eta) \sum_{|n| \leq N} \sum_{|m| \leq M} K_{nm} (\alpha_{0, nm} - \alpha_{nm}) e^{iK_n x} e^{iK_m y} \quad (2)$$

式中:变量 α 的值由相邻时刻的分析值内插得到,可以是水平风(uv)、位温(θ)或者位势高度(ph); t 为时间; X 为模式的物理强迫项, G_{α} 为 Nudging 系数,它决定了模式中同化项相对于物理强迫中所有模式物理过程的大小; $w(\eta)$ 为垂直方向上 Nudging 的权重

系数; α_0 为再分析变量; K_{mm} 代表对于不同尺度的逼近系数; k_m 、 k_n 代表经向和纬向的波矢量分量; m 、 n 分别表示经向和纬向上的波数; M 、 N 为经向和纬向上的 Nudging 波数,其值根据格距,格点数以及波长进行计算而得,以此来调整模式的大尺度环流场,使其与真实强迫场保持一致。

为了对模式预报结果进行检验,本研究使用相关系数 R 和 Z_s 评分统计分析模式预报结果与实况的关系,其中 Z_s 评分原本主要用于评价强降水过程预测的准确性^[37-38],而在本研究中则用于评价污染过程预测的准确性.本研究将连续两天空气质量水平为轻度及以上污染,或者单日空气质量水平为中度及以上污染,定义为污染过程或称污染事件.所预测的污染过程与实际发生的污染过程允许存在两日及以内的偏差,实际发生的污染过程未出现在预测时段,则记为漏报 1 次;预测时段内实际未发生污染过程,则记为空报 1 次;预报正确,记为正确 1 次. Z_s 评分的计算公式如下:

$$Z_s = \frac{\text{预测正确的过程数}}{\text{预测正确过程数} + \text{空报过程数} + \text{漏报过程数}} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 基于 CFS 气象场的延伸期 $PM_{2.5}$ 浓度数值预报

以天津延伸期空气质量数值预报系统 (CFS/WRF-Chem)2019 年 12 月 5 日起报的 45d 预报产品为例开展模式预报产品评估研究.图 2(a)中给出了 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 18 日期间天津地区 $PM_{2.5}$ 观测日值浓度变化,可以看出模拟期间天津地区一共发生了 5 次污染事件,分别为 2019 年 12 月 7~10 日、12 月 22~23 日、12 月 28~29 日、2020 年 1 月 2~4 日和 1 月 15~18 日,其中 1 月 15~18 日污染最为严重, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度可达 $212.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,污染过程持续 4d 且污染程度均达到重度污染水平.图 2(a)中也给出基于 CFSv2 气象场的 $PM_{2.5}$ 浓度数值预报情况.对比显示,所预报的 $PM_{2.5}$ 质量浓度整体偏高,尤其在非污染时段.同时,模式预报出 6 次污染事件,多于实况的 5 次,而预报与观测的相关系数为 0.1.根据我国《环境空气质量数值预报技术规范》(HJ 1130—2020)^[39]的评估方法,对模式延伸期预报进行检验,结果显示 $PM_{2.5}$ 等级预报准确率为 33%.这说明 CFS/WRF-Chem 的延伸期空气质量预报产

品在逐日精确预报上存在不足.考虑延伸期和气候预报预测检验评估的特殊性,本文使用降水预报中常用的 Z_s 评分来评估预报时段内污染事件的影响,以达到对延伸期污染事件的预测.结果表明预报与实况的 Z_s 评分为 0.83,说明以气象过程预测标准,CFS/WRF-Chem 在指导延伸期污染过程预报中能发挥一定作用.图 2(b)给出逐候(每 5d) $PM_{2.5}$ 浓度实况和预报对比情况,结果表明,模式预报出了第 2~3 候、第 3~4 候、第 6~7 候、第 7~8 候和第 8~9 候期间的浓度变化趋势,逐候均方根误差的结果显示,第 2、5、6 和 8 候的均方根误差相对较小,此时也对应逐候预报趋势正确的时段.根据 Z_s 评分和逐候预报结果说明,基于 CFSv2 的延伸期模式能够预报出 45d 内近 50% $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势。

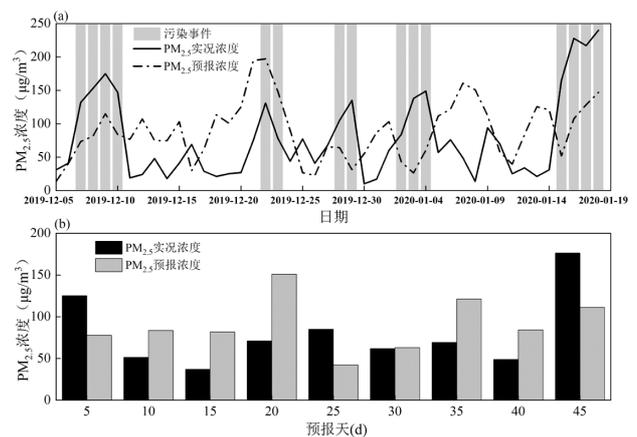


图 2 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 18 日 $PM_{2.5}$ 日值实况与预报浓度对比

Fig.2 Comparison of observed and forecast $PM_{2.5}$ concentration from December 5, 2019 to January 18, 2020

(a)为逐日浓度对比情况,其中阴影部分为污染事件;(b)为逐候对比情况

2.2 Nudging 技术敏感性测试

Nudging 技术主要分为 Grid Nudging 和 Spectral Nudging,不同参数的设置对预报结果的影响存在一定差异,其主要调整的参数包括:张弛波数、张弛时间、张弛变量等.本节通过 22 组敏感性试验对比分析确定不同参数设置下 Nudging 技术对 CFS/WRF-Chem 模式延伸期 $PM_{2.5}$ 质量浓度预报影响,从而确定最优方案,提升预报效果.图 3 显示不同参数设置下,基于 Grid Nudging 技术的模式预报 $PM_{2.5}$ 质量浓度与实况对比情况,11 组敏感性试验(表 1)表明:在考虑 Nudging 所有变量的情况下,使用 Nudging 系数为

5×10⁻⁵,预报效果最佳,相关系数为 0.35,Zs 评分为 0.8;使用 Nudging 系数为 1.7×10⁻⁵,预报效果最差,相关系数为 0.29,Zs 评分为 0.57.Nudging 系数表征 Nudging 时间尺度,其数值与 Nudging 时间相对应,系数越小,时间尺度越长;反之,则越短.从不同系数设置的模式预报结果分析,并不是 Nudging 时间尺度越短越好;在 Nudging 系数从 3×10⁻⁴变为 1×10⁻⁴的过程中,相关系数减小,在系数为 5×10⁻⁵时,相关系数再次提升,之后相关系数随着系数减小而减小.这说明 6h(系数为 5×10⁻⁵)为最佳 Nudging 时间尺度,长于或者短于这个时间都将导致天津延伸期模式系统预报效果转差.在使用最佳 Nudging 系数的情况下,开展不同变量组合的 Nudging 试验,对于 PM_{2.5} 浓度预报,仅 Nudging 一个变量的情况下,Nudging 水平风 uv 的效果最好,水汽混合比 q 的效果最差.Nudging 两个变量时,Nudging 位温和水平风 θ-uv 的试验效果最佳,位温和水汽混合比 θ-q 的试验效果最差.Nudging 多变量的预报效果要优于单变量,Nudging 全部三个变量的预报结果最佳.

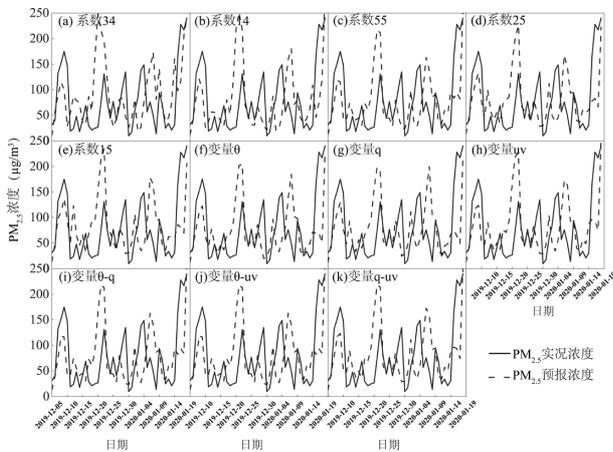


图3 2019年12月5日~2020年1月18日基于 Grid Nudging 技术的逐日 PM_{2.5} 浓度预报结果与实况对比

Fig.3 Comparison of observed and forecast daily PM_{2.5} concentration from December 5, 2019 to January 18, 2020 based on Grid Nudging

(a-e)为不同系数的试验;(f-k)为不同变量组合的试验

图4为 Grid Nudging 试验中逐候 PM_{2.5} 实况和预报浓度对比情况.由图显示实况共出现 3 次污染,分别出现在第 1、5、9 候,Grid Nudging 试验中不同系数的试验均预报出了第 9 候的污染,均未预报出第 5 候的污染.Nudging 时间尺度为 1h(系数为 3×10⁻⁴)

时,相关系数最高为 0.54;时间尺度为 12h(系数为 2.5×10⁻⁵),相关系数最低,为 0.29.所有系数的试验均预报出了第 1~2 和 7~8 候的浓度下降,以及第 3~4、6~7 和 8~9 候的浓度上升.不同变量组合的试验均预报出了第 9 候的污染.与逐日预报相似,只 Nudging 一个变量的情况下,Nudging 水平风 uv 的预报效果最佳,相关系数为 0.43;Nudging 水汽混合比 q 的预报效果最差,为 0.27.Nudging 两个变量的组合中,位温和水平风 θ-uv 的预报效果最佳,相关系数为 0.47;位温和水汽混合比 θ-q 的预报效果最差,相关系数为 0.34.所有关于变量的敏感性试验均预报出了第 1~2、7~8 和 8~9 候的 PM_{2.5} 质量浓度下降,以及第 3~4 和 6~7 候的浓度上升.除 Nudging 位温和水平风的 θ-uv 试验外,其他试验均预报出了 5~6 候的浓度下降.对于候与候之间的 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势,Grid Nudging 的 11 组敏感性试验至少预报准确率达 63%,其中最优方案预报准确率达 75%.相比未采用 Nudging 技术的 CFS/WRF-Chem 的 50%预报准确率,使用 Nudging 技术的模式预报 PM_{2.5} 质量浓度候趋势准确率有明显改进.

表1 基于 Grid Nudging 不同敏感性试验的相关参数设置和统计指标

Table 1 Parameter setting and statistical indexes of different sensitivity simulations based on Grid Nudging

试验名称	张弛系数	张弛时间尺度(h)	张弛变量	相关系数	Zs 评分
系数 34	3×10 ⁻⁴	1	θ-q-uv	0.32	0.83
系数 14	1×10 ⁻⁴	3	θ-q-uv	0.29	0.8
系数 55	5×10 ⁻⁵	6	θ-q-uv	0.35	0.8
系数 25	2.5×10 ⁻⁵	12	θ-q-uv	0.32	0.67
系数 15	1.7×10 ⁻⁵	24	θ-q-uv	0.29	0.57
变量 θ	5×10 ⁻⁵	6	θ	0.29	0.8
变量 q	5×10 ⁻⁵	6	q	0.25	0.8
变量 uv	5×10 ⁻⁵	6	uv	0.34	0.8
变量 θ-q	5×10 ⁻⁵	6	θ-q	0.29	0.8
变量 θ-uv	5×10 ⁻⁵	6	θ-uv	0.34	0.8
变量 q-uv	5×10 ⁻⁵	6	q-uv	0.34	0.67

对 Spectral Nudging 技术来说,Nudging 时间尺度的设置影响较小^[40-41],因此,只考虑不同截断波长和变量对预报结果的影响,并在相同的 Nudging 强度(Nudging 系数)情况下,测试 Spectral Nudging 对截断波长的敏感性.研究表明,截断波长越短,Nudging 过程包含所有比所选截断波长长的波就越多,在模

式中,截断波长对应的设置是 Nudging 波数,截断波长越长,Nudging 波数越少.由于网格经纬度范围限制,因此在本研究中,考虑最大经向和纬向波数均为 4.图 5 给出了不同参数设置下,基于 Spectral Nudging 技术 CFS/WRF-Chem 逐日 PM_{2.5} 预报情况,表 2 给出了基于 Spectral Nudging 技术的 11 组不同敏感性试验的相关参数设置和统计指标.

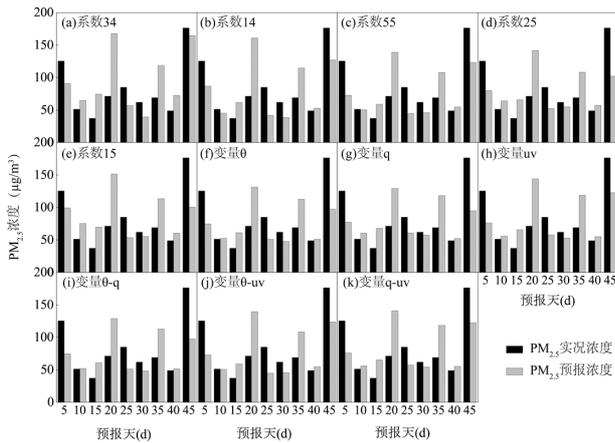


图 4 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 18 日基于 Grid Nudging 技术的 PM_{2.5} 浓度逐候预报结果与实况对比
Fig.4 Comparison of observed and forecast pentad PM_{2.5} concentration from December 5, 2019 to January 18, 2020 based on Grid Nudging

(a-e)为不同系数的试验;(f-k)为不同变量组合的试验

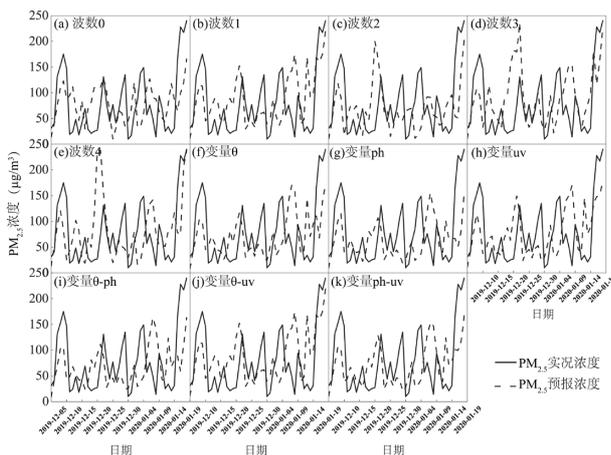


图 5 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 18 日基于 Spectral Nudging 技术的逐日 PM_{2.5} 浓度的预报结果与实况对比
Fig.5 Comparison of observed and forecast daily PM_{2.5} concentration from December 5, 2019 to January 18, 2020 based on Spectral Nudging

(a-e)为不同波数的试验;(f-k)为不同变量组合的试验

图 5 显示波数从 0~4 时模式预报结果的变化.

在考虑 Nudging 所有变量的情况下,使用 Spectral Nudging 波数为 1,即波长为 1800km 时,预报效果最佳,相关系数为 0.43,Zs 评分为 0.67;使用截断波长为 900km(波数 2),预报效果最差,相关系数为 0.22,Zs 评分为 0.67.从不同截断波长的预报结果分析,并不是截断波长越短(模式保留的波越多),预报结果越好.在截断波长由长变短的过程,预报与实况的相关系数经历了 2 次升高,相比于不设置截断波长,在 1800km 时,预报效果显著提高;随截断波长变短,预报结果转差,之后当截断波长为 600km 时,预报结果转好,随后预报结果再次转差.在使用最佳截断波长(1800km)的条件下,开展不同变量组合的 Nudging 试验.结果显示,只 Nudging 一个变量的情况下,水平风 uv 的预报效果最好,位势高度 ph 的效果最差;Nudging 两个变量时,位温和水平风 θ-uv 的效果最佳,位温和位势高度 θ-ph 的效果最差;与 Grid Nudging 试验一样,Nudging 多变量的效果要优于单变量,Nudging 全部 3 个变量的预报结果最佳.

表 2 基于 Spectral Nudging 技术不同敏感性试验的相关参数设置和统计指标

Table 2 Parameter setting and statistical indexes of different sensitivity simulations based on Spectral Nudging

试验名称	张弛波数	截断波长(km)	张弛变量	相关系数	Zs 评分
波数 0	0	-	θ-ph-uv	0.29	0.57
波数 1	1	1800	θ-ph-uv	0.43	0.67
波数 2	2	900	θ-ph-uv	0.22	0.67
波数 3	3	600	θ-ph-uv	0.37	1
波数 4	4	300	θ-ph-uv	0.28	0.57
变量 θ	1	1800	θ	0.29	0.57
变量 ph	1	1800	ph	0.22	0.8
变量 uv	1	1800	uv	0.36	0.8
变量 θ-ph	1	1800	θ-ph	0.26	0.57
变量 θ-uv	1	1800	θ-uv	0.41	0.67
变量 ph-uv	1	1800	ph-uv	0.31	0.67

图 6 为 Spectral Nudging 试验逐候 PM_{2.5} 实况浓度和预报浓度对比情况,实况在第 1、5、9 候发生污染,而不同 Nudging 波数试验均预报出了第 1 和 9 候的污染,未预报出第 5 候的污染.与逐日预报结果相似,截断波长为 1800km 时,相关系数最高,为 0.68;未考虑截断波长时,相关系数最低,为 0.42.所有试验均预报出了第 1~2 和 7~8 候的浓度下降,以及第 3~4、6~7 和 8~9 候的浓度上升.除截断波长为 600km 的试

验外,其他试验均预报出了第 2~3 候的浓度下降.仅有截断波长 600 和 300km 的试验预报出 5~6 候的浓度下降.Nudging 不同变量组合的试验均预报出了第 9 候的污染,只 Nudging 一个变量的情况下,均预报出了第 1 候的污染.与逐日预报相似,只 Nudging 一个变量的情况下,Nudging 水平风 uv 的预报效果最佳,相关系数为 0.62;Nudging 位势高度 ph 的预报效果最差,为 0.41;Nudging 两个变量的试验中,Nudging 位温和水平风 $\theta-uv$ 的效果最佳,相关系数为 0.62;Nudging 位温和位势高度 $\theta-ph$ 的效果最差,相关系数为 0.42.所有关于变量的敏感性试验均预报出了第 1~2、7~8 和 8~9 候的浓度下降,以及第 3~4 和 6~7 候的浓度上升.仅 Nudging 位温 θ 和 $\theta-ph$ 的试验预报出了 2~3 候的浓度下降.所有 Spectral Nudging 试验均预报出了 63% 的浓度变化趋势,其中 Nudging 所有变量,截断波长为 300km 的试验预报出了 88% 的浓度变化趋势.

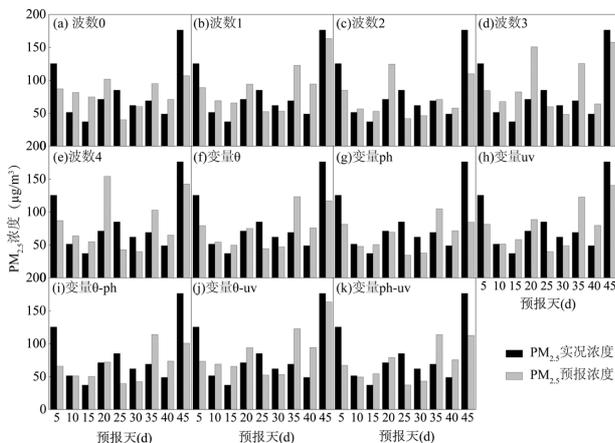


图 6 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 18 日基于 Spectral Nudging 技术的 PM_{2.5} 浓度逐候预报结果与实况对比
Fig.6 Comparison of observed and forecast pentad PM_{2.5} concentration from December 5, 2019 to January 18, 2020 based on Spectral Nudging
(a-e) 为不同波数的实验;(f-k) 为不同变量组合的试验

2.3 Nudging-CFS/WRF-Chem 模式 45d 预报结果检验

本研究中,PM_{2.5} 浓度预报效果的改进是基于 Nudging 技术对气象场的改进而来.与未采用 Nudging 技术时的风场预报结果相比,引入 Nudging 技术后,预报的日值风速与实况的相关系数由原先的 -0.04,提升为 0.02~0.32,而对气温等改进效果不明

显.其中 Grid Nudging 试验中预报风速与实况的相关系数为 0.02~0.18,略低于 Spectral Nudging 的 0.09~0.32.对逐候风速的趋势预测中,未采用 Nudging 技术时,趋势预测的准确率为 50%,与 PM_{2.5} 浓度逐候趋势预测准确率一致.Grid Nudging 敏感性试验中风速逐候预测准确率为 50%~63%,而 Spectral Nudging 敏感性试验中风速逐候预测准确率为 50%~88%,对于逐候趋势的预测 Spectral Nudging 仍旧要略优于 Grid Nudging.此外,Nudging 技术对 PM_{2.5} 浓度预报的改进中,无论是 Grid Nudging 还是 Spectral Nudging,仅 Nudging 水平风 uv 时的改进效果要优于其他变量,说明风场改进对 PM_{2.5} 浓度改进最为明显.通过与未采用 Nudging 技术的延伸期预报结果对比,风速日值预报和逐候预测的改进效果与 PM_{2.5} 浓度的改进效果相一致,这说明采用 Nudging 技术主要实现对风场预报效果的改进,使得大范围内风场预报效果得以改善,进而改进 PM_{2.5} 浓度的预报效果.

在最优 Nudging 参数设置的基础上,基于 Nudging-CFS/WRF-Chem 模式开展 45d 预报试验,评估 PM_{2.5} 浓度预报结果表明:与未使用 Nudging 技术的预报结果相比,无论是 Grid Nudging 还是 Spectral Nudging,相关系数都得到了显著提高.对比 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 逐日预报结果,逐日预报中使用 Spectral Nudging 相关系数更高,而 Grid Nudging 的 Zs 评分更高.从统计分析,Grid Nudging 的 11 组方案 PM_{2.5} 等级预报准确率均值为 38%~47%,Spectral Nudging 的 11 组方案 PM_{2.5} 等级预报准确率均值为 33%~44%,两者的最优方案相比未采用 Nudging 的技术方案,PM_{2.5} 等级预报准确率提升幅度均达到 10%以上,这显示 Nudging 技术在延伸期 PM_{2.5} 数值预报中的重要性.从逐候趋势预测分析,对于 PM_{2.5} 污染趋势的把握,Spectral Nudging 的预报结果要略优于 Grid Nudging,未采用 Nudging 技术时,预报准确率为 50%,采用 Grid Nudging 最高提高至 75%,采用 Spectral Nudging 最高可提高至 88%.

在整体趋势可靠的基础上,Nudging-CFS/WRF-Chem 模式也体现出延伸期预报中一些无法解决的问题,一些过程的漏报和空报无法避免,如 2019 年 12 月 28~29 日的污染事件,仅 Spectral

Nudging 试验中截断波长为 600km 的敏感性试验有所体现,其它敏感性则均存在漏报,其原因是多方面的,如与中短期预报的可靠性相比,延伸期的 $PM_{2.5}$ 数值预报仅仅是能提供参考,仍然需要一些气候预测的统计手段去补充改进,如低频滤波等等。

3 结论

3.1 天津延伸期空气质量数值预报系统 CFS/WRF-Chem 在逐日精确预报上存在不足, $PM_{2.5}$ 预报和实况相关系数为 0.1,但基于延伸期和气候预测的评估指标,其 Z_s 评分和逐候趋势预测准确率分别达到 0.83 和 50%,可一定程度上支撑延伸期和月尺度 $PM_{2.5}$ 污染过程预测。

3.2 采用 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 均可以有有效的避免中尺度大气化学模式气象驱动场后期预报偏差的问题,其相较于未采用 Nudging 技术的 CFS/WRF-Chem 模式,预报和实况相关系数由 0.1 提高至 Grid Nudging 的 0.35 和 Spectral Nudging 的 0.43, $PM_{2.5}$ 等级预报准确率由 33% 分别提高至 47% 和 44%。

3.3 相比 Grid Nudging 和 Spectral Nudging 技术方案选择,其参数最优配置对 Nudging 技术运用更为关键,包括张弛波数、张弛时间和张弛变量等,这与模式分辨率、气象驱动场分辨率、预报目标要素均有关系,Nudging 技术的运用需要本地化的敏感测试,对于天津延伸期空气质量数值预报系统 Nudging-CFS/WRF-Chem,运用 Grid Nudging 技术时张弛系数 5×10^{-5} ,张弛时间尺度 6h,张弛变量 $\theta-q-uv$ 为最优;运用 Spectral Nudging 技术,张弛波数 1,截断波长 1800km,张弛变量 $\theta-q-uv$ 最优。

参考文献:

- [1] 林廷坤,洪礼楠,黄争超,等.北京市秋冬季大气环流型下的气象和污染特征 [J]. 中国环境科学, 2019,39(5):1813-1822.
Lin T K, Hong L N, Huang Z C, et al. Meteorological and pollution characteristics under atmospheric circulation types in autumn and winter in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019,39(5):1813-1822.
- [2] 吕梦瑶,张恒德,王继康,等.2015 年冬季京津冀两次重污染天气过程气象成因 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7): 2748-2757.
Lü M Y, Zhang H D, Wang J K, et al. Analysis of meteorological causes of two heavily polluted weather processes in Beijing-Tianjin-Hebei Region in winter of 2015 [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2748-2757.
- [3] 程念亮,李云婷,张大伟,等.2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析 [J]. 环境科学, 2015,36(4):10.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, et al. Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. Environmental Science, 2015,36(4):1154-1163.
- [4] 蔡子颖,韩素芹,邱晓滨,等.基于 WRF/Chem 模式天津地区重污染天气成因分析 [J]. 高原气象, 2019,38(5):12.
Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, et al. 2019. Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on WRF/Chem [J]. Plateau Meteorology, 38(5):1108-1119.
- [5] Tai A, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change [J]. Atmospheric environment, 2010,(32):3976-3984.
- [6] He J, Gong S, Yu Y, et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2017,223:484-496.
- [7] Zhang H, Wang Y, Hu J, et al. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China [J]. Environmental Research, 2015,140:242-254.
- [8] Hossein S, Sajjad K, Vahid H, et al. A novel regression imputation framework for Tehran air pollution monitoring network using outputs from WRF and CAMx models [J]. Atmospheric Environment, 2018,187:24-33.
- [9] 关攀博,周颖,程水源,等.典型重工业城市空气重污染过程特征与来源解析 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):31-40.
Guan P B, Zhou Y, Cheng S Y, et al. Characteristics of heavy pollution process and source appointment in typical heavy industry cities [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):31-40.
- [10] 周广强,谢英,吴剑斌,等.基于 WRF-Chem 模式的华东区域 $PM_{2.5}$ 预报及偏差原因 [J]. 中国环境科学, 2016,36(8):2251-2259.
Zhou G Q, Xie Y, Wu J B, et al. WRF-Chem based $PM_{2.5}$ forecast and bias analysis over the East China Region [J]. China Environmental Science, 2016,36(8):2251-2259.
- [11] 朱蓉,张存杰,梅梅.大气自净能力指数的气候特征与应用研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(10):3601-3610.
Zhu R, Zhang C J, Mei M. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China [J]. China Environmental Science, 2018,38(10):3601-3610.
- [12] Wei Y, Chen X, Chen H, et al. IAP-AACM v1.0: a global to regional evaluation of the atmospheric chemistry model in CAS-ESM [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(12):8269-8296.
- [13] 杨欣悦,谭钦文,陆成伟,等.基于 CFSv2 的延伸期空气质量数值预报技术及效果评估 [J]. 中国环境监测, 2021,37(5):175-184.
Yang X Y, Tan Q W, Lu C W, et al. Numerical prediction technology and effect evaluation of extended period air quality based on CFSv2 [J]. Environmental Monitoring in China, 2021,37(5):175-184.
- [14] 常炉子,谷怡萱,周广强,等.长三角环境气象预报预警中心,华东区域环境气象延伸期预报技术研发 [Z]. 2020-09-24.
Chang L Y, Gu Y X, Zhou G Q, et al. Yangtze River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning. Forecast technology of environmental meteorological extended period in east China [Z]. 2020-09-24.
- [15] Storch H V, Langenberg H, Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes [J]. Mon. wea. rev., 2000,128(10): 3664-3673.

- [16] Miguez M G, Stenchikow G L, Robock A. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004,109(D13):1025-1045.
- [17] Salameh T, Drobinski P, Dubos T. The effect of indiscriminate nudging time on large and small scales in regional climate modelling: Application to the Mediterranean basin [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010,136(646):170-182.
- [18] Omrani H, Drobinski P, Dubos T. Investigation of indiscriminate nudging and predictability in a nested quasi-geostrophic model [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012,138(662):158-169.
- [19] Hoke J E, Anthes R. The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique [J]. 1976,104(12):1551-1556.
- [20] 易雪,李得勤,赵春雨,等.分析 Nudging 对辽宁地区降尺度的影响 [J]. *地球科学进展*, 2018,33(5):517-531.
Yi X, Li D Q, Zhao C Y, et al. Assessment of dynamical climate downscaling methods using analysis nudging for Liaoning Area [J]. *Advances in Earth Science*, 2018,33(5):517-531.
- [21] 李明妍,崔志强,王澄海.Nudging 方法对中国西北强降水过程的模拟试验研究 [J]. *气候与环境研究*, 2017,22(5):563-573.
Li M Y, Cui Z Q, Wang C H. A numerical simulation study on Heavy rain processes in Northwest China using the Nudging method [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017,22(5):563-573.
- [22] Xu X, Xie L, Cheng X, et al. Application of an adaptive Nudging scheme in air quality forecasting in China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008,47(8):2105-2114.
- [23] Cheng X H, Xu X D, Ding G A. An emission source inversion model based on satellite data and its application in air quality forecasts [J]. *Science China*, 2010,53(5):752-762.
- [24] 李嘉鼎,孟凯,赵天良,等.基于CMAQ模式的自适应“nudging”源反演方法的中国主要污染区排放特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3):754-762.
Li J D, Meng K, Zhao T L, et al. Air pollutant emission characteristics over major pollution areas in China based on adaptive "nudging" method with CMAQ model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(3):754-762.
- [25] 赵俊日,肖昕,吴涛,等.空气质量数值预报优化方法研究 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(6):2047-2054.
Zhao J R, Xiao X, Wu T, et al. A revised approach to air quality forecast based on Models-3/CMAQ [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(6):2047-2054.
- [26] 熊一帆,丁秋冀,舒卓智,等.基于数值模拟与资料同化探究长三角地区冬季 PM_{2.5} 污染过程的气象影响 [J]. *环境科学学报*, 2022,42(4):293-303.
Xiong Y F, Ding Q J, Shu Z Z, et al. The influence of meteorological parameters on particulate matter in the Yangtze River Delta Region based on numerical simulation and data assimilation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(4):293-303.
- [27] 邱雨露,陈磊,朱佳,等.COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM_{2.5} 浓度影响 [J]. *环境科学*, 2022,43(6):2831-2839.
Qiu Y L, Chen L, Zhu J, et al. Impacts of changes in meteorological conditions during COVID-19 lockdown on PM_{2.5} concentrations over the Jing-Jin-Ji Region [J]. *Environmental Science*, 2022,43(6):2831-2839.
- [28] Liang F, Meng G, Xiao Q, et al. Evaluation of a data fusion approach to estimate daily PM_{2.5} levels in North China [J]. *Environmental Research*, 2017,158:54-60.
- [29] Du Q, Zhao C, Zhang M, et al. Modeling diurnal variation of surface PM_{2.5} concentrations over East China with WRF-Chem: impacts from boundary-layer mixing and anthropogenic emission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020,(5):2839-2863.
- [30] Saha S, Moorthi S, Wu X, et al. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *Journal of climate*, 2014,27(6):2185-2208.
- [31] 郎杨.CFSv2 在中国区域的季节干旱可预报性研究 [D]. 北京:北京师范大学, 2015:1-40.
Lang Y. CFSv2-based seasonal drought predictability in China [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2015:1-40.
- [32] Stauffer D R, Seaman N L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data [J]. *Monthly Weather Review*, 1990,118(6):1250-1277.
- [33] Glisan J M, Gutowski Jr W J, Cassano J J, et al. Effects of spectral nudging in WRF on Arctic temperature and precipitation simulations [J]. *Journal of Climate*, 2013,26(12):3985-3999.
- [34] Waldron K M, Paegle J, Horel J D. Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options [J]. *Monthly weather review*, 1996,124(3):529-547.
- [35] von Storch H, Langenberg H, Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes [J]. *Monthly weather review*, 2000,128(10):3664-3673.
- [36] Choi S J, Lee D K. Impact of spectral nudging on the downscaling of tropical cyclones in regional climate simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016,33(6):730-742.
- [37] 陈伯民,梁萍,信飞,等.延伸期过程预报预测技术及应用 [J]. *气象科技进展*, 2017,7(6):82-91.
Chen B M, Liang P, Xin F, et al. The extended-range process prediction technique and application [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2017,7(6):82-91.
- [38] 郑广芬,王素艳,杨建玲,等.基于前期海温异常的宁夏 5-9 月降水量客观预测方法及检验评估 [J]. *干旱气象*, 2016,34(1):43-50.
Zheng G F, Wang S Y, Yang J L, et al. Study on the objective prediction method and its verification and assessment for pentad precipitation from May to September in Ningxia based on the preceding SST anomaly [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016,34(1):43-50.
- [39] 生态环境部.环境空气质量数值预报技术规范:HJ1130—2020 [S]. 北京:中国环境出版社, 2020.
- [40] Bullock Jr O R, Alapaty K, Herwehe J A, et al. An observation-based investigation of nudging in WRF for downscaling surface climate information to 12-km grid spacing [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014,53(1):20-33.
- [41] Mai X, Ma Y, Yang Y, et al. Impact of Grid Nudging parameters on dynamical downscaling during summer over mainland China [J]. *Atmosphere*, 2017,8(10):184.

作者简介: 唐颖潇(1990-),男,福建福安人,工程师,博士,主要研究方向为大气环境与数值模式.发表论文 20 余篇.tangyingx@163.com.