



三维插值方法在 2 m 温度评估中的应用

摘要

模式地形与实况站点地形高度间固有差异严重影响了 2 m 温度检验评估精度,传统二维插值方法仅满足预报要素与实况观测间经纬度二维空间上的一致性,而忽略了垂直方向的一致性问题,使得检验评估中预报与观测不在同一三维空间上进行检验,从而引起严重的评估误导.利用模式三维预报变量,结合近地面要素预报产品,建立新的近地面要素三维插值方法,以确保预报与观测在三维空间上保持一致性.利用 2013 年 7 月整月 24 h 预报产品与观测的对比分析发现,新插值方法有效地改进了由于地形误差引起的评估误导问题,在不同地形高度条件下均保持了较为一致的误差分布趋势,显示其评估结论不受地形因素影响,具有更好的实际应用价值.进一步关注新插值方法在复杂地形区不同模拟分辨率条件下的评估改进效果,采用 GRAPES 区域预报模式 (GRAPES-MESO4.0) 针对 2012 年 7 月个例,对青藏高原复杂地形区进行了不同分辨率 (45, 15, 5 和 2 km) 条件下的 60 h 模拟敏感分析,结果表明新插值方法在高分辨率条件下 (2 km) 依然显示出明显的改进优势.

关键词

2 m 温度;三维插值方法;地形;评估误导

中图分类号 P435

文献标志码 A

收稿日期 2015-05-08

资助项目 国家自然科学基金青年基金 (41305091);中国气象局成都高原气象研究所科研基金 (LPM201401)

作者简介

赵滨,男,博士,主要从事数值预报检验评估工作.zhaob@cma.gov.cn

0 引言

随着数值计算能力的不断提高,数值模式已具备对较小尺度系统的指导预报能力,精细化数值预报产品,特别是降水、近地面温度及风场等地面要素的预报性能逐渐成为关注的热点,而针对地面要素的精细化检验评估是了解预报能力的必然途径.在近地面要素检验中模式格点资料与实况站点资料间的检验匹配是首先要关注的问题,通常需采用特定的插值计算方法使得预报与观测在同等条件下进行比较.

当前针对近地面要素的检验评估方式有两种.一种是将实况站点资料通过空间插值方式插值到模式格点空间上,利用模式格点预报资料与插值后的实况观测资料在格点空间上进行检验评估.此类评估方法可以最大限度地保持模式预报信息,对系统性(强降水雨带等)的预报产品具有明显的评估优势.但由于站点分布的不均匀,模式分辨率与实况站点分辨率间很难匹配,特别是我国西部地区观测站点稀疏,采用邻域法、径向函数法及线性三角函数等空间插值方式均将面临大量缺测插补问题,如果没有更为精细化的非常规观测资料(卫星、雷达等)加以融合,很难保证插值资料的合理性^[1-7].

另一种是将模式格点预报产品插值到实况站点上,这类方法将涉及具体的插值方法选取,通常采用的插值方法有双线性插值、样条插值及权重插值等.这些方法的插值结果虽存在差异,但并不成为影响评估结果的主要因素.当前针对这种评估方式大多仅考虑站点资料与格点资料在水平二维空间上的一致性^[8-12],而忽略了两者在垂直空间上的差异.作为与地形高度具有较强相关性的变量,温度检验中忽视垂直方向上的差异将引起较大的评估误差.由于模式地形与实况地形间存在的固有差异已使得复杂地形条件下 2 m 温度检验评估成为难点,采用常规的垂直地形插值方法将不可避免地引起检验要素的插值误差积累,无法追踪正确的误差来源.文献^[13-14]在 2 m 温度检验中考虑了模式地形与实况地形间的差异,采用分类检验方法,根据站点周围地形特征而将地形分为平原、高原、谷地,分别分析了不同地形条件下 2 m 温度的误差分布特征及地形影响,结果表明,平原地区评估差异并不显著,复杂地形条件下差异明显,同时误差来源不仅仅归因于地形差异,同时来源于系统性误差.该分析结果由于未能提出更好的优化插值方法,因此并不能根本解决误差来源问题.

1 中国气象局 国家气象中心,北京,100081

2 黑龙江省黑河市气象局,黑河,164300

为减小模式预报变量的系统性误差,当前国内外针对近地面要素均开展了误差订正技术的研究,研究对象涉及降水、2 m 温度和 10 m 风场等^[15-19].订正中多采用历史时段的预报误差作为参考,采用加权平均方法消减系统性误差.文献[20-22]引入 MOS (Model Output Statistical) 预报方法,利用历史实况与预报产品进行建模分析,以提供更为精确的精细化订正预报产品.此类方法可较为有效地提供更为准确的预报产品,但无助于评估模式的基本性能.

采用垂直递减率在垂直方向上进行订正,以实现预报与观测在相同三维空间上保持一致性也是当前常用的 2 m 温度检验评估方法,通常定义垂直递减率为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$,而三维空间场的垂直递减率并非定值,采用统一的垂直递减率对预报变量进行订正将严重影响订正效果.

本文在 2 m 温度检验中引入三维模式气压层预报变量,将原有的二维插值方法改进为三维插值方法,从而实现模式预报产品与实况观测在三维空间上保持位置一致性,并在此基础上进行分析比较,以此了解改进方法在实际应用中对评估效果的影响.

1 资料与方法

1.1 资料

2 m 温度实况观测采用国家气象信息中心提供的逐小时加密站点资料,中国区域 ($70^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 范围内的中国陆面区域) 2 600 站左右.模式预报资料选取中国气象局数值预报中心开发运行的 GRAPES_MESO 区域预报模式预报产品.模式分辨率 15 km,预报范围覆盖中国及周边地区,与站点观测资料覆盖区域基本吻合.垂直 26 层 (1 000、975、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa).本文首先选取 2013 年 7 月整月业务运行产品对全国范围内不同地形条件下的评估效果进行分析,其中个例分析选取 2013 年 7 月 29 日 12UTC.表 1 给出了 7 月 29 日 12UTC 实况站点信息,总站点数为 2 685 个,其中海拔高度在 1 000 m 以下的站点占总站数的 72.6%,为 1 950 个;1 000~2 000 m 站数为 463 个,占 17.2%;2 000~3 000 m 共 105 站,占总量的 3.9%;3 000~4 000 m 站数 97 个,占 3.6%;高原上 4 000 m 以上的站数 70 个,占总量的 2.7%.选取 GRAPES_MESO 区域预报模式 24 h 预报产品,对应时段与实况资料一致.

表 1 各海拔高度下站点分布

总数	1 000 m 以下	1000~2 000 m	2 000~3 000 m	3 000~4 000 m	4 000 m 以上
2 685	1 950	463	105	97	70

采用 GRAPES_MESO 模式在青藏高原复杂地形区针对不同分辨率 (45、15、5 和 2 km) 条件下进行进一步的分析以考察其在复杂地形区的评估效果及对模拟分辨率的敏感性.模拟范围如图 1 所示,其中 45 及 15 km 包含整个中国区域,5 km 模拟覆盖中国西部地区,2 km 模拟主要包含青藏高原复杂地形区.选取 2012 年 7 月 20 日个例进行模拟,模式启报时间为 12UTC,模拟时间 60 h 并分别针对 24 h 及逐小时模拟结果进行检验分析以获取三维插值方案的评估改进信息.敏感性实验设置参数如表 2 所示.

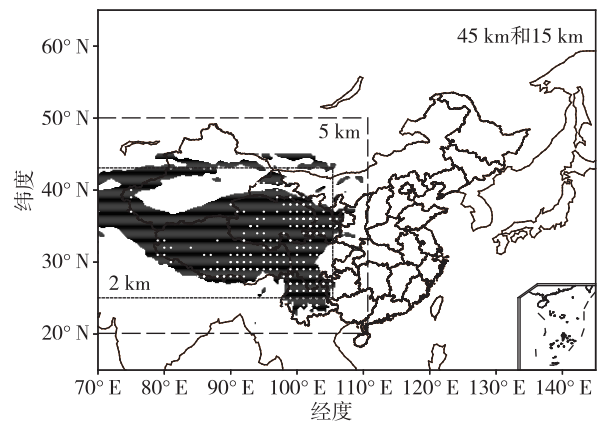


图 1 敏感性实验中模拟范围分布

Fig. 1 Region distribution for sensitive tests

表 2 敏感性实验参数设置

Table 2 Parameter values for sensitive tests

	分辨率/ km	模拟范围	格点数	模拟步长/ s	模拟时间/ h
TEST1	45	$70^{\circ}\text{E}\sim 145.6^{\circ}\text{E}$ $15^{\circ}\text{N}\sim 64.05^{\circ}\text{N}$	169×110	180	60
TEST2	15	$70^{\circ}\text{E}\sim 145.15^{\circ}\text{E}$ $15^{\circ}\text{N}\sim 64.35^{\circ}\text{N}$	502×330	90	60
TEST3	5	$70^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ $20^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$	801×601	45	60
TEST4	2	$70^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ $25^{\circ}\text{N}\sim 43^{\circ}\text{N}$	1 751×901	20	48

1.2 方法

常规的水平二维插值方法仅考虑预报要素与实况观测在水平二维空间上的一致性,而忽视垂直方

向上的一致性,即预报与观测不在同一三维空间上进行比较,从而导致明显的评估误导问题.三维插值方法利用模式高度及温度预报产品,配合近地面 2 m 温度预报产品,首先通过垂直插值方式获取在实况站点周围 4 个与观测相同高度的温度值,然后在水平方向上通过双线性插值方法获得实况观测位置的预报变量,这样就使预报和观测在相同三维空间上进行检验评估.此方法由于采用模式自身的多层预报变量进行垂直插值,相当于获取了一个动态的垂直递减率,其在不同格点、不同时次均提供不同的递减率量值,规避了采用相同垂直递减率引起的合理性问题,可更为准确地获取评估信息.插值方法如图 2 所示,具体公式推导如下:

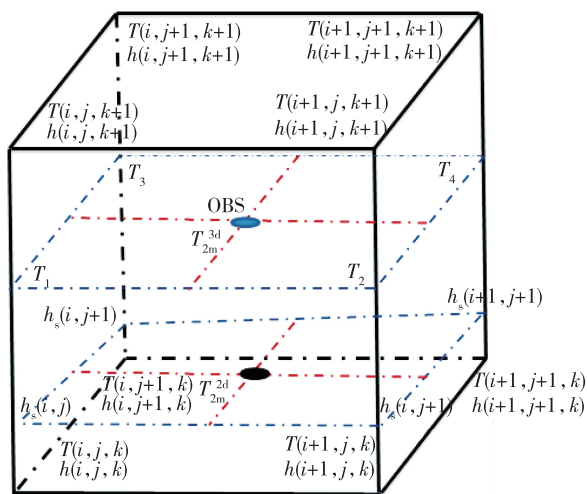


图 2 插值方法示意

Fig. 2 Diagram of interpolation method

如图 2 所示,假定实况观测处于模式经纬度网格点之间,其中 $h_s(i, j), h_s(i + 1, j), h_s(i, j + 1), h_s(i + 1, j + 1)$ 分别为实况观测水平位置周围 4 点的模式地形高度, $t_{2m}(i, j), t_{2m}(i + 1, j), t_{2m}(i, j + 1), t_{2m}(i + 1, j + 1)$ 为相应的 2 m 温度预报产品. i 为经度格点, j 为纬度格点.

常规获取 2 m 温度结果的二维插值方法推导如下:

$$T^{2a} = t_{2m}(i, j) + (t_{2m}(i + 1, j) - t_{2m}(i, j)) \frac{(l_{ono} - l_{on}(i))}{l_{on}(i + 1) - l_{on}(i)}, \quad (1)$$

$$T^{2b} = t_{2m}(i, j + 1) + (t_{2m}(i + 1, j + 1) - t_{2m}(i, j + 1)) \frac{(l_{ono} - l_{on}(i))}{l_{on}(i + 1) - l_{on}(i)}, \quad (2)$$

$$T_{2m}^{2d} = t^{2a} + (t^{2b} - t^{2a}) \frac{(l_{ato} - l_{at}(j))}{l_{at}(j + 1) - l_{at}(j)}, \quad (3)$$

其中 l_{ono} 及 l_{ato} 分别为实况观测站点经、纬度, $l_{on}(i), l_{on}(i + 1)$ 为格点经度, $l_{at}(j), l_{at}(j + 1)$ 为格点纬度, T_{2m}^{2d} 为获取的水平二维插值结果.

而新插值方法则需借助模式三维高度 (h) 及温度 (T) 预报产品,首先获取观测高度周围 4 点温度值 T_1, T_2, T_3, T_4 .

如观测高度高于模式地形高度,并处于 k 及 $k + 1$ 气压层间,则

$$T_1 = t_{2m}(i, j) + (T(i, j, k + 1) - t_{2m}(i, j)) \cdot \frac{h_o - h_s(i, j) - 2}{h(i, j, k + 1) - h_s(i, j) - 2}, \quad (4)$$

$$T_2 = t_{2m}(i + 1, j) + (T(i + 1, j, k + 1) - t_{2m}(i + 1, j)) \cdot \frac{h_o - h_s(i + 1, j) - 2}{h(i + 1, j, k + 1) - h_s(i + 1, j) - 2}, \quad (5)$$

$$T_3 = t_{2m}(i, j + 1) + (T(i, j + 1, k + 1) - t_{2m}(i, j + 1)) \cdot \frac{h_o - h_s(i, j + 1) - 2}{h(i, j + 1, k + 1) - h_s(i, j + 1) - 2}, \quad (6)$$

$$T_4 = t_{2m}(i + 1, j + 1) + (T(i + 1, j + 1, k + 1) - t_{2m}(i + 1, j + 1)) \cdot \frac{h_o - h_s(i + 1, j + 1) - 2}{h(i + 1, j + 1, k + 1) - h_s(i + 1, j + 1) - 2}, \quad (7)$$

h_o 为实况观测站点高度.

如观测高度低于模式地形高度,并处于 k 及 $k + 1$ 气压层间,则

$$T_1 = t_{2m}(i, j) + (T(i, j, k) - t_{2m}(i, j)) \cdot \frac{h_s(i, j) + 2 - h_o}{h_s(i, j) + 2 - h(i, j, k)}, \quad (8)$$

$$T_2 = t_{2m}(i + 1, j) + (T(i + 1, j, k) - t_{2m}(i + 1, j)) \cdot \frac{h_s(i + 1, j) + 2 - h_o}{h_s(i + 1, j) + 2 - h(i + 1, j, k)}, \quad (9)$$

$$T_3 = t_{2m}(i, j + 1) + (T(i, j + 1, k) - t_{2m}(i, j + 1)) \cdot \frac{h_s(i, j + 1) + 2 - h_o}{h_s(i, j + 1) + 2 - h(i, j + 1, k)}, \quad (10)$$

$$T_4 = t_{2m}(i + 1, j + 1) + (T(i + 1, j + 1, k) - t_{2m}(i + 1, j + 1)) \cdot \frac{h_s(i + 1, j + 1) + 2 - h_o}{h_s(i + 1, j + 1) + 2 - h(i + 1, j + 1, k)}. \quad (11)$$

如观测高度低于 1 000 hPa 高度 $h(i, j, 1)$, 则使用外插求取 T_1, T_2, T_3, T_4 (公式略).

利用实况高度上观测站点周围 4 点的格点温度 T_1, T_2, T_3, T_4 , 在水平方向上采用双线性插值获取观

测高度上的预报要素结果 T_{2m}^{3d} :

$$T^{3a} = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{(l_{ono} - l_{on}(i))}{l_{on}(i+1) - l_{on}(i)}, \quad (12)$$

$$T^{3b} = T_3 + (T_4 - T_3) \frac{(l_{ono} - l_{on}(i))}{l_{on}(i+1) - l_{on}(i)}, \quad (13)$$

$$T_{2m}^{3d} = T^{3a} + (T^{3b} - T^{3a}) \frac{(l_{ato} - l_{at}(j))}{l_{at}(j+1) - l_{at}(j)}. \quad (14)$$

T_{2m}^{3d} 为获取的三维2 m 温度插值结果,利用这一结果与观测资料对比即可保证预报与观测在相同三维空间上进行检验.

2 个例分析

选取2013年7月29日12UTC 实况资料对应GRAPES_MESO 模式2013年7月28日12UTC 启报的24 h 预报资料进行对比分析,考察三维插值方法相对于传统二维插值方法在2 m 温度评估中的优势.图3首先给出了实况地形与模式地形的差异分布,其中实况地形做了高度递增排序,横坐标显示站点序号.对应模式地形高度可以看到,实况地形高度500 m 以下站点与模式站点间差异并不明显,共有站点1 600 个,占总体的59.6%.1 000 m 以上地形高度差异逐渐明显,最大地形高度差异已经超过1 500 m,如对应常规垂直递减率(0.6 °C/(100 m))估算,由于地形高度差异引起的温度评估误差可超过9 °C.

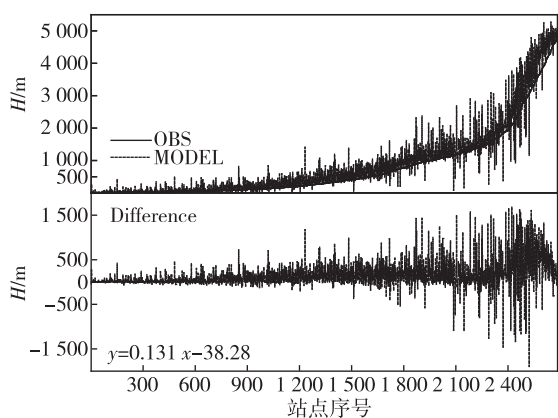


图3 站点地形与模式地形差异分布

Fig. 3 Distribution of difference between observed topography and modeled terrain

图4给出了4个不同站点高度阈值条件下实况(OBS)、二维插值方法(2D)及三维插值方法(3D)所计算的2 m 温度结果和两种插值方法计算的2 m 温度与实况温度间的差异分布,以及所对应的实况站点与模式地形间高度差异.可以看到,实况站点高度

在2 000 m 以上阈值条件下,三维插值方法有效地减弱了评估误差.从实况站点高度与模式地形高度差异图中(图4a,b,c)可以看到,改进最大的地区即为地形高度差异最为明显的站点,如图4b中部分站点高度差异达到-1 600 m,而对应的二维插值方法所计算的温度误差已超过10 °C,对应三维方法误差小于3 °C.图4d中评估改进效果相对并不明显,其主要原因在于大部分观测站点高度与模式地形高度间差异并不显著,但从其中部分差异较大的站点(500 m 以上)看,其所对应的温度误差改进还是相当显著的.

当然应该注意到,模式预报与实况间的误差是客观存在的,不能简单以所计算的温度误差较小即确认其更接近实际情况.但从图4中所反映的结果看,评估改进最为显著的站点均为观测高度与模式地形高度差异较大的站点,即说明其温度误差的来源主要可归结为是由于地形误差所造成的.因此新插值方法所体现的评估改进应可反映为是由于其更为准确地描述模式在实况站点高度上的预报信息而体现出的改进优势.

为更为直观地了解站点高度与模式地形高度间差异对评估误差的影响,图5给出了两种插值方法下实况站点高度与模式地形高度差异与2 m 温度误差的散点分布特征.可以看到,二维插值方法计算的2 m 温度与实况温度间的误差分布随着高度差异呈现出明显的反比例分布,温度评估误差的大值区集中在二、四象限,其中高度差异超过1 000 m 以上的站点,其温度误差极值已经超过10 °C,显然误差的主要来源是由地形差异所造成的.而三维插值方法(图5b)有效地减弱了二、四象限内由于巨大的高度差异所造成的温度评估误差,其误差已由 ± 10 °C左右缩减到5 °C以内.高度差异较小的站点(集中于0值附近)其散点分布形势与二维插值方法结果基本一致,同样印证了由于高度差异较小,三维插值方法在垂直方向上的插值改进有限,因此并未体现出明显的改进优势.

3 整月评估

在个例分析的基础上,选择2013年7月整月的实况观测数据,并结合GRAPES_MESO 整月24 h 2 m 温度预报产品,综合评估三维插值方法在2 m 温度检验评估中的改进效果.图6给出了两种插值方法在不同站点高度下的绝对误差(上)、均方根误

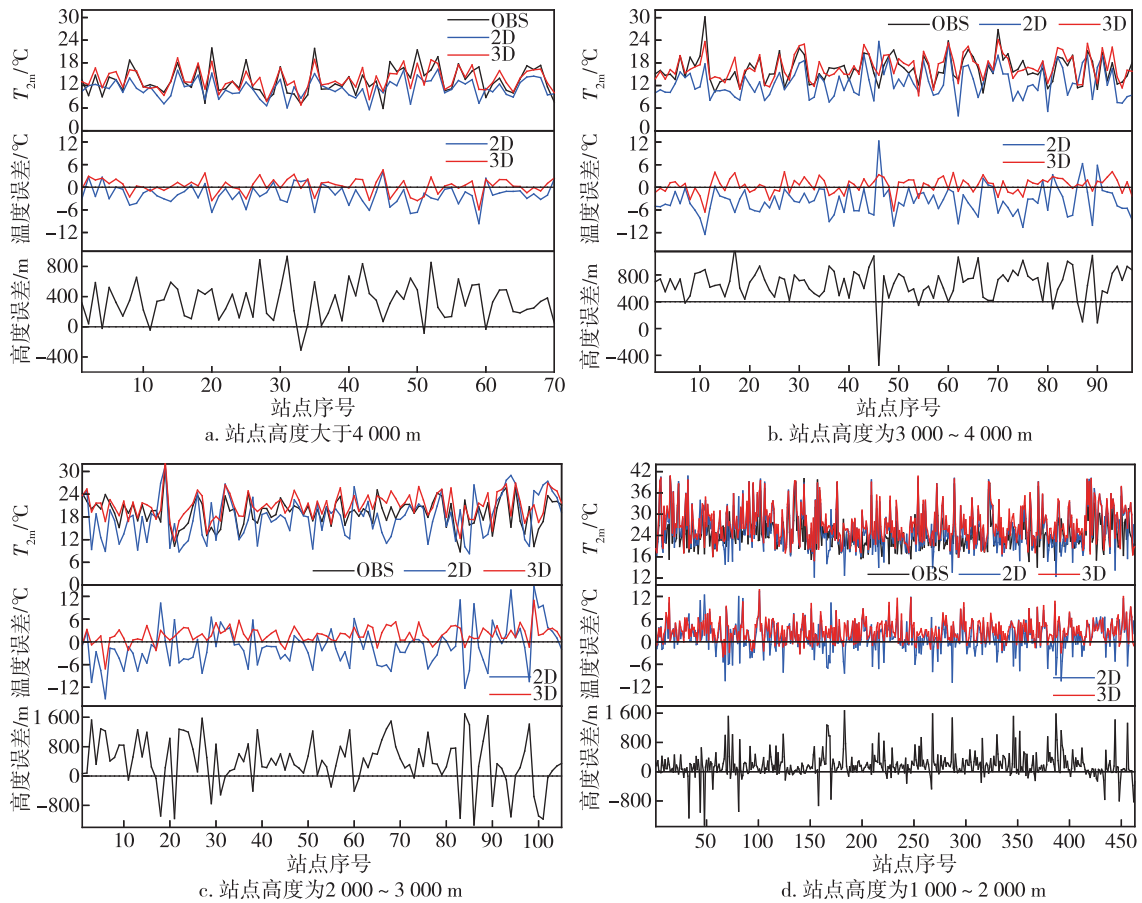


图4 两种插值方法在不同站点高度下2 m温度分布(从上至下分别为2 m温度(上);两种插值方法与实况温度误差(中);模式高度及站点高度误差(下))

Fig. 4 Comparison of 2 m temperature calculated by two interpolation methods for stations at different height, including height over 4 000 m (a), between 3 000-4 000 m (b), between 2 000-3 000 m (c), and between 1 000-2 000 m (d).

Three figures from up to down are 2 m temperature (observation, calculated by 2D/3D interpolation method), bias (2D/3D interpolation method), and HGT difference from model and observation, respectively

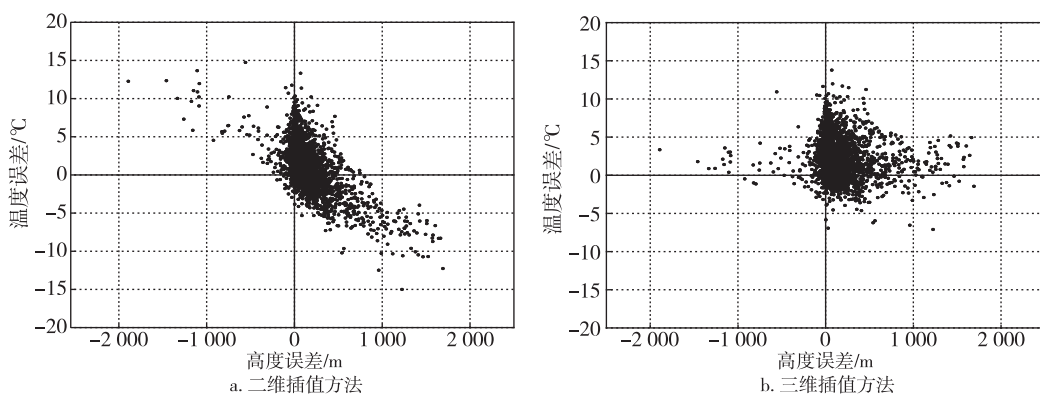


图5 两种插值方法下实况站点高度与模式地形高度差异与温度评估误差的散点分布

Fig. 5 The 2 m temperature estimation difference between interpolation method and observation, varied with height bias

差(中)及所对应的站点数(下).可以看到,站点高度1 000 m以下两种插值方法的评估结论基本一致,绝

对误差基本集中在2 °C左右,均方根误差除部分时段外差异不明显.随着站点高度的增加,新插值方法

计算的 2 m 温度在检验评估中明显减弱了评估误差,其中站点高度 2 000 m 以上(图 6b、c)绝对误差最大改进可达 3.3 °C,可见在具有复杂地形的高原地区三维插值方法在 2 m 温度计算中体现了更好的准确性和评估优势.

基于图 6 中的分析结果,图 7 进一步给出了不同实况站点高度与模式地形高度差异下的温度误差分布,以便了解三维插值方法在不同地形高度差异阈值条件下的改进效果.可以看到,地形高度差异在 200 m 以上(图 7a),三维插值方法的评估改进已经较为明显,其中绝对误差 31 d 平均降低 0.69 °C,均方根误差平均减少 1.06 °C.在图 7a 基础上进一步分析地形差异在 300 m 以上(图 7b)情况,三维插值方法使得 2 m 温度误差降低更为明显,其月平均绝对误差降低 1.37 °C,而均方根误差降低 1.75 °C.图 7c、d 则分别给出了地形高度差异达到 500 m 及 1 000 m 以上的误差分布特征,从中可以看到新方法

的改进趋势更为明显,二维插值方法在 500 m 以上,绝对误差已经达到 6 °C 左右,而 1 000 m 以上的绝对误差超过 10 °C,误差显然是由于巨大的地形差异引起的,检验结论并不符合 2 m 温度实际情况.而三维插值方法绝对误差在不同地形高度差异阈值条件下均表现甚为稳定,绝对误差基本保持在 3 °C 左右.综合图 7 信息可以看到,二维插值方法温度误差随着地形高度差异增加而显著增长,其误差增长趋势与地形高度差异增加趋势吻合,可以认为地形高度差异是造成检验评估差异的最重要因素.三维插值方法由于可以使模式预报的 2 m 温度与实况站点温度在相同三维空间上进行比较,规避了垂直误差引起的评估误判,因此可获取更为实际的评估信息.

4 敏感分析

模式静态地形高度与实况地形高度间存在固有差异,其差异一方面可归因于实况站点位置的特殊

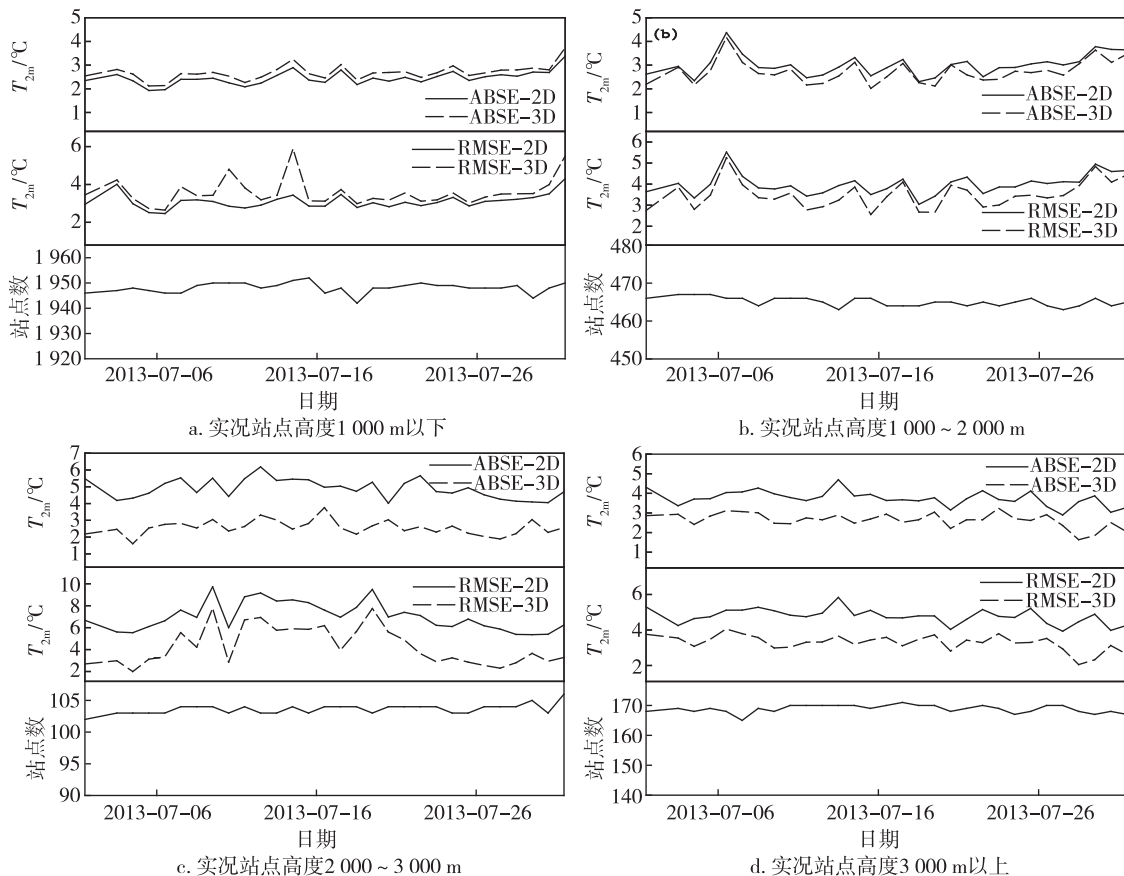


图 6 两种插值方法在不同实况站点高度下的温度误差分布(从上至下分别为两种插值方式的 2 m 温度绝对误差(上); 2 m 温度均方根误差(中);参与检验站点数(下),ABSE 表示绝对误差, RMSE 表示均方根误差)

Fig. 6 Comparison of 2 m temperature bias calculated by two interpolation methods for stations at different height, including height under 1 000 m (a), between 1 000–2 000 m (b), between 2 000–3 000 m (c), and over 3 000 m (d).

Three figures from up to down are absolute error, RMSE of 2 m temperature estimation, and number of stations, respectively

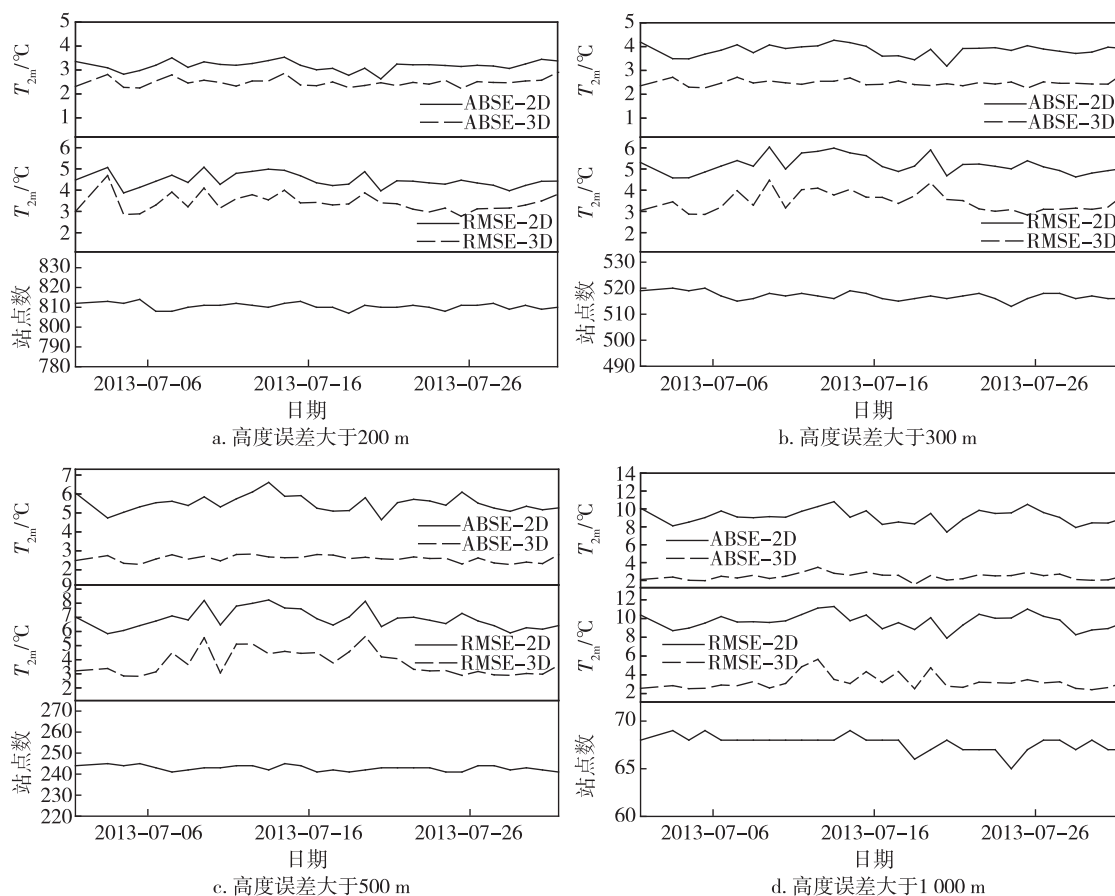


图7 两种插值方法在不同实况站点与模式地形高度差异下的温度误差分布(从上至下分别为两种插值方式的2 m 温度绝对误差(上);2 m 温度均方根误差(中);参与检验站点数(下),ABSE表示绝对误差, RMSE表示均方根误差)

Fig. 7 Comparison of 2 m temperature bias calculated by two interpolation methods for height bias over 200 m(a), over 300 m(b), over 500 m(c), and over 1 000 m(d). Three figures from up to down are absolute error, RMSE of 2 m temperature estimation, and number of stations, respectively

性,其难以与模式网格点相重合,因此需要进行插值获得模式与实况站点间水平二维空间的一致性,这样就直接导致其垂直方向上的差异.另一方面模式分辨率过低难以获取精细化的地形高度信息,提高模式分辨率可以很大程度上使得模式格点与实况站点间的距离更小,其所描述的垂直差异也会随之被削弱.因此提高模式分辨率是获得更为精确的插值信息的一种可能途径.

选取2012年7月20日12UTC为模拟启报时间,利用GRAPES-MESO4.0模式在4种分辨率(45、15、5和2 km)下进行60 h模拟(2 km模拟运行48 h),模拟结果逐小时输出.首先选取24 h模拟结果与实况资料进行比较分析,以考察三维插值方法相对于传统二维插值方法在2 m温度评估中的优势.选取青藏高原地区实况高度大于1 500 m的站点进行分析,该时段分析区域内可用站点共计293个.

首先以15 km分辨率模式地形高度为例考察实况地形与模式地形的差异分布,如表3所示,全区域高度绝对偏差(偏差的绝对值)均值达529.5 m.其中高度差异300 m以下的站点共计126个,占总体的43.0%,平均绝对偏差148.1 m;300~500 m站点共计55个,占总体的18.8%,平均绝对偏差383.5 m;500~1 000 m站点共计78个,占总体的26.6%,平

表3 15 km分辨率下模式地形与实况站点间高度差异特征
Table 3 Difference between modeled terrain and observed topography at resolution of 15 km

	站点数	百分比/%	平均绝对偏差/m
总体	293	100.0	529.5
300 m 以下	126	43.0	148.1
300~500 m	55	18.8	383.5
500~1 000 m	78	26.6	707.0
1 000 m 以上	34	11.6	1 268.7

均绝对偏差 707.0 m; 1 000 m 以上站点共计 34 个, 占总体的 11.6%, 平均绝对偏差 1 268.7 m. 如对应常规垂直递减率 ($0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$) 估算, 全区域地形差异均值达到 529.5 m, 其温度评估误差可超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对于占总数 38.2% 的 500 m 以上偏差站点而言, 其平均偏差可达 877 m, 其温度误差估算可超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 可见青藏高原复杂地形区内模式与实况地形间差异显著, 并有可能引起近地面温度的评估误导问题.

图 8 给出了 4 种分辨率模拟条件下三维插值方法及二维插值方法所计算的 2 m 温度和实况站点资料在不同站点上的强度比较及其误差分布和所对应的高度差异信息. 可以看到, 低分辨率 (45 km) 结果差异最为明显, 其二维插值方法温度偏差最大超过 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而三维插值方法误差则稳定于 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 对应温度偏差较大站点对应的模式及实况高度差异

可以看到, 温度误差较大的站点所对应的高度偏差均最为明显, 其中高度偏差超过 1 000 m 的站点均是三维插值方案相对二维插值方案改进最为显著的站点.

随着模拟分辨率的提高, 模式格距减小, 因此模式可提供更为精细化的地形高度信息, 通过插值后其与实况站点间的高度差异将会被有效降低. 从图 8b—d 中可以看到, 随着分辨率由 15 km 向 2 km 逐渐提高, 模式高度与实况高度间偏差显著减少, 2 km 分辨率下已少有超过 1 000 m 以上的偏差存在. 对应温度误差可以发现, 高度偏差大值站点同样对应的是两种插值方法所计算的 2 m 温度插值最为明显的站点. 2 km 分辨率的模拟中, 模式地形与实况地形间高度偏差已显著减少, 但部分站点的较强高度偏差依然是导致二维插值方法所计算的 2 m 温度评估偏大的主要原因.

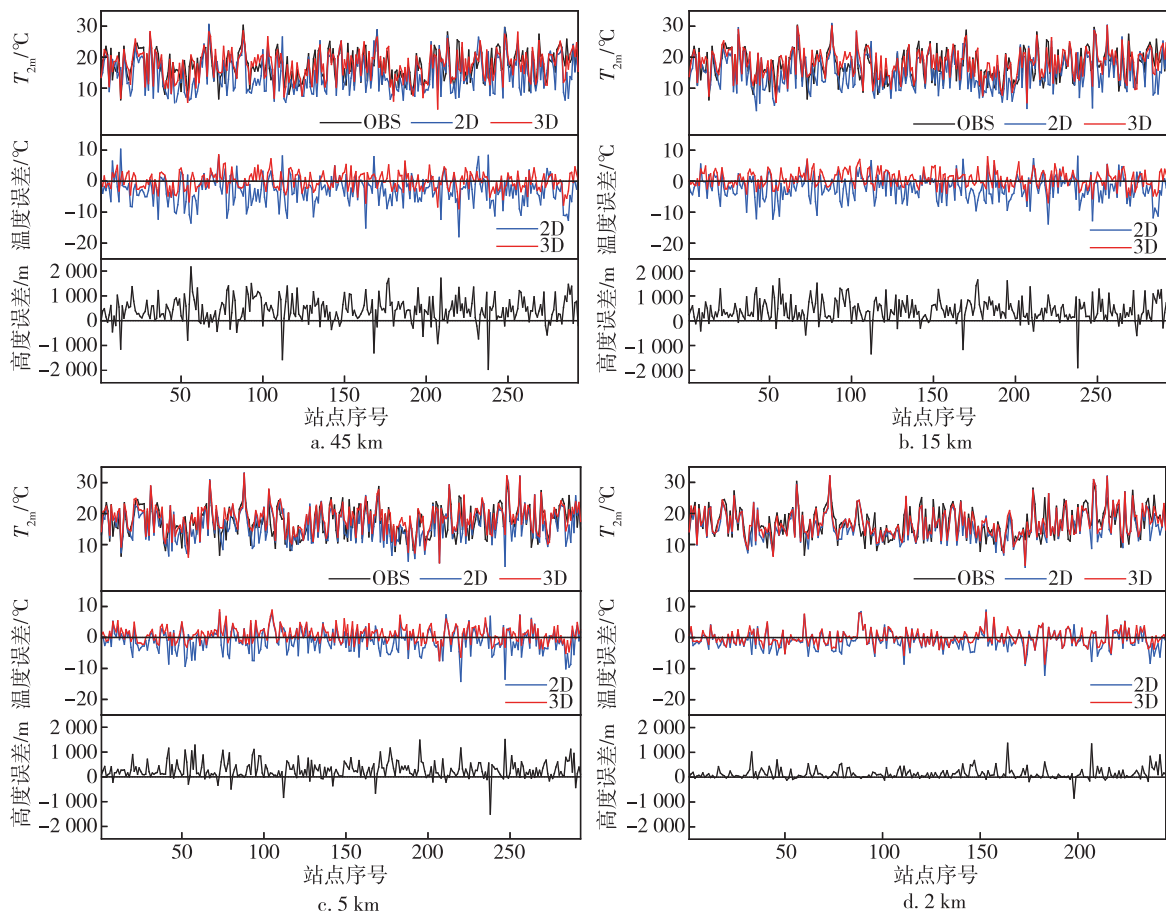


图 8 4 种分辨率模拟下三维及二维插值方法计算的 2 m 温度和实况对比 (从上至下分别为实况及两种插值方法计算的 2 m 温度 (上); 两种插值方法与实况温度误差 (中); 模式高度及站点高度误差 (下))

Fig. 8 Comparison of 2m temperature calculated by two interpolation methods and observation under 4 resolutions of 45 km (a), 15 km (b), 5 km (c), and 2 km (d). Three figures from up to down are 2 m temperature (observation, calculated by 2D/3D interpolation method), bias (2D/3D interpolation method), and HGT difference from model and observation, respectively

从4种分辨率模拟的综合结果可以发现,三维插值方法在不同分辨率中均可以获取相似的评估结论,其温度误差稳定在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 之间,并不因为模式分辨率的提高而产生过于明显的评估“震荡”,这主要是源于其所计算的2 m温度在三维空间上与实况站点保持一致,其评估结果不受地形高度偏差的显著影响,可获取较为稳定的评估结论。

图9给出了4种分辨率模拟实验中二维(图9a)及三维(图9b)插值方法下实况与模式地形高度差异与2 m温度误差的散点分布特征。可以看到,二维插值方法所计算的2 m温度与实况温度间的误差分布随着高度差异呈现出明显的反比例分布,温度评估误差的大值区集中在二、四象限,其中高度差异超过1 000 m以上的站点,其温度误差极值已经超过 10°C ,显然误差的主要来源是由巨大的地形偏差所造成的。随着分辨率的逐渐提高,地形高度偏差逐渐减弱,2 km分辨率时高度偏差已经集中在较小范围之内,而温度误差也集中在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内,但其评估误差与高度误差分布的反比例关系形势并没有改变(依然集中在二、四象限)。而三维插值方法有效地减弱了二、四象限内由于巨大的高度差异所造成的温度评估误差,其误差已由 $\pm 10^\circ\text{C}$ 左右缩减到 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内。同时,高度偏差较小的站点(集中于0值附近)其散点分布形势与二维插值方法结果基本一致,同样印证了由于高度差异较小,三维插值方法在垂直方向上的改进有限,因此并未体现出明显的改进优势。随着分辨率的逐渐提高,高分辨实验中可获取更为准确的评估信息,这很大程度上是由于模式模拟精度的提高和更为精细化的静态地形描述引起的。

在24 h模拟效果评估基础上,重点考察模拟实验逐小时检验结果。其中45、15及5 km分辨率实验模拟运行了60 h,而2 km分辨率实验模拟48 h。通过对逐小时模拟结果的比较可以考察三维插值方法的综合评估改进效果。图10给出了二维及三维插值方法在青藏高原复杂地形区内293个站点(2 km分辨率实验为245个站)所计算的2 m温度与实况的温度误差及绝对误差随时间演变曲线,可以看到,较低分辨率的模拟结果中两种插值方法显示出明显的差异,对应温度误差分布可以发现随着积分时间增长,误差有所增加,对于5 km以上(45、15和5 km)分辨率模拟结果,三维插值误差逐渐增加到 2°C 左右,二维插值误差则主要表现为明显的负误差趋势,强度则由约 -2.5°C 逐渐增长至 0°C 左右。随着分辨率的逐渐增高,两种插值方法间的误差逐渐靠近。对应各个时次的95%置信区间可以发现,二维插值方法在所有分辨率内均表现出较大的置信估计值,即统计样本温度误差变化幅度较大。这是由于总体样本间差异相对较大,不同站点的计算结果相对于均值并不稳定,主要原因即在于不同站点高度偏差不同,振幅偏大,这就引起了2 m温度插值结果的波动。而相比于二维插值方法,三维插值方法所获取的计算结果置信估计较小,可见其样本所受复杂地形条件影响较小,所有样本均集中于均值附近,评估结果一致性较好。对应高分辨率(2 km)结果,由于高分辨率模拟可获取更为精细化的地形高度描述信息,因而两种插值方法间差异已经十分微弱,但二维插值方法的置信估计依然相对较为明显。

2 m温度误差由于不同站点间误差属性不同,

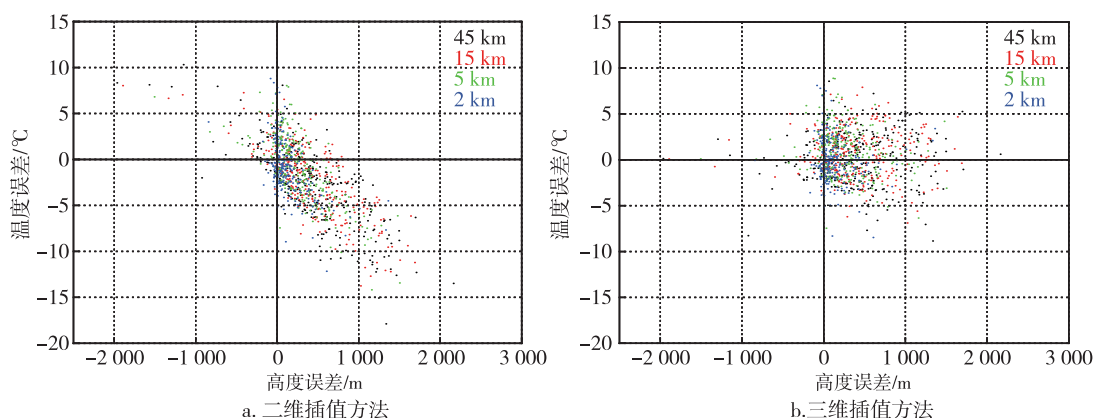


图9 4种分辨率下实况站点高度与模式地形高度差异与两种插值方法温度评估误差的散点分布

Fig. 9 The 2 m temperature estimation difference between interpolation method and observation under 4 resolutions, varied with height bias

在全区域平均过程中会产生正负误差抵消的现象,这将严重影响评估结论.因此本文进一步利用温度误差绝对值(即绝对误差)的统计结果分析三维插值方法减弱评估误差的效果.从绝对误差的分布形势可以明显看到,在15 km 以上分辨率,二维插值误差可达4℃左右,三维插值方法有效地减弱了由于高度偏差引起的评估误导问题,其误差维持于2℃左右.随着分辨率的提高,改进效果逐渐趋于不明显,在2 km 的精细化模拟结果上改进效果显得较为微弱.

另一方面,从不同时次的预报结果的绝对误差演变中也看到了,2 m 温度预报存在一定的日变化特征,即青藏高原复杂地形区的2 m 温度预报夜晚预报误差偏高,其中北京时间20时左右误差最高,白天误差偏低,08—14时左右误差最低.随着分辨率的提高,这种日变化特征变得更为明显.

高分辨率评估效果改进不明显的原因主要有两方面:一方面是由于精细化模拟的地形高度信息已与实况站点高度较为接近,通过插值后的高度偏差已经较小;另一方面是由于青藏高原复杂地形区内

高度偏差并不是一致偏大的.在之前分析中(图9)可以发现,三维插值方法对高度偏差较小的站点评估改进是微弱的,巨大的评估改进来源于高度偏差明显的站点,而图10的分析中包含了过多偏差较小的站点.因此对高度偏差站点进行进一步筛选,图11给出了高度偏差大于300 m 的站点评估结果,对照图10中结果可以明显看到,不同分辨率实验的评估差异明显增大,高分辨率下的改进效果显著提高.同时,不同筛选方式中二维插值方法评估结论不断变化,随着高度偏差增大,温度的评估误差也增大,可以归因为高度偏差引起的检验误差的不稳定.而三维插值方法在不同分辨率及不同站点选择方式条件下均保持了2~3℃的评估误差分布,其评估结论非常稳定,可以认为三维插值方法不受地形条件影响,可以获取非常稳定的评估结论,这一方面的优势将有助于在高原复杂地形条件下获取稳定且真实的检验评估结论.

5 结论与讨论

模式地形高度与实况站点高度间存在固有差异

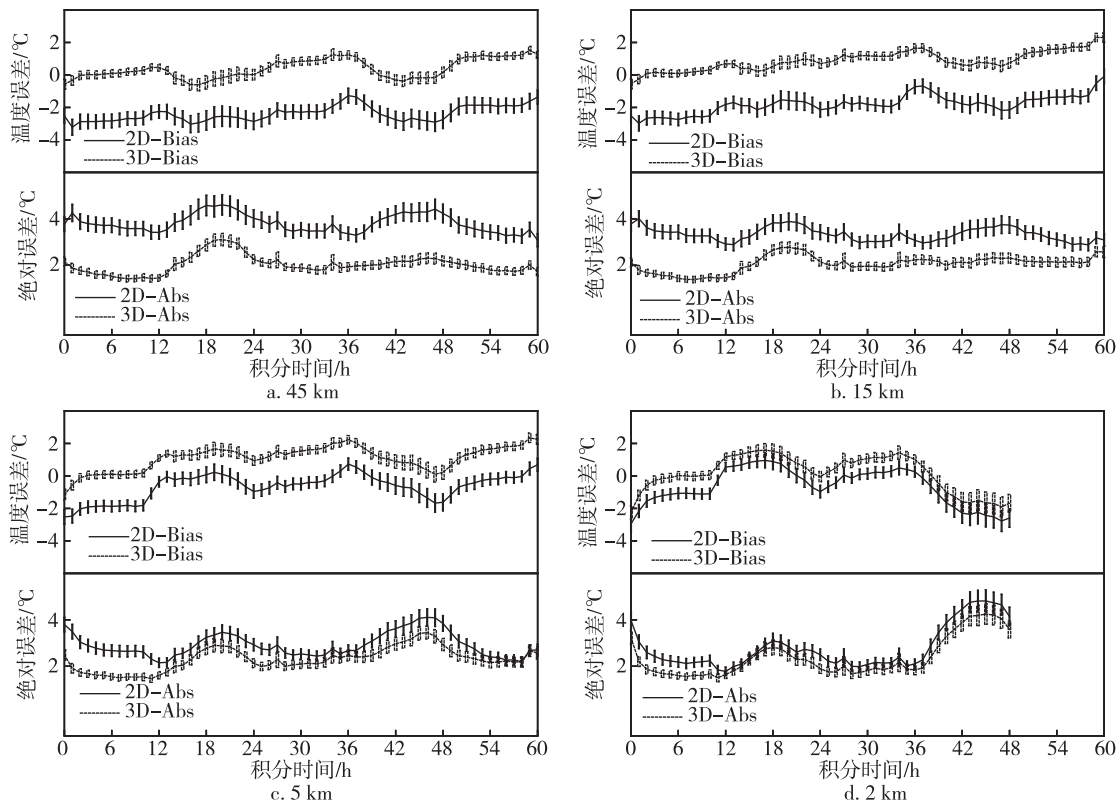


图10 两种插值方法计算的温度误差(上)及绝对误差(下)随积分时间分布(矩形框;95%置信区间)

Fig. 10 Comparison of 2 m temperature bias (up) and absolute bias (down) calculated by 3D and 2D interpolation methods under 4 resolutions, varied with forecast time(a.45 km;b.15 km;c.5 km;d.2 km;outline bar;95% confidence level)

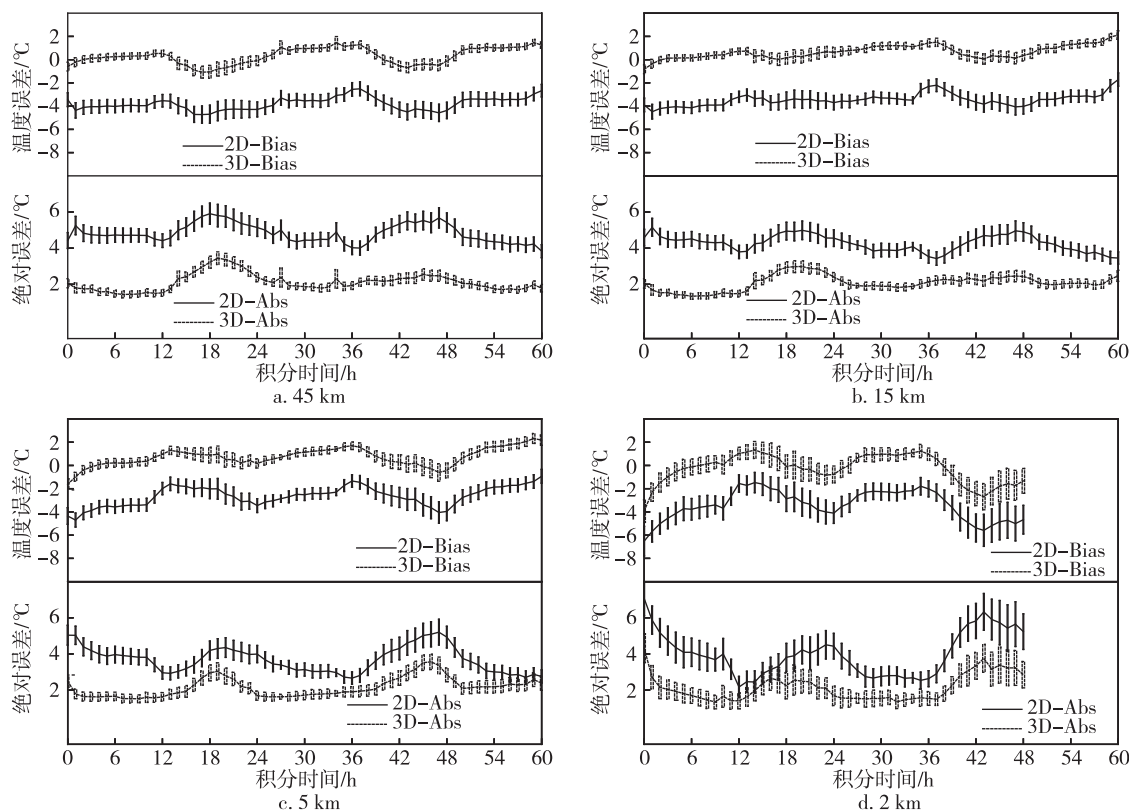


图 11 地形高度偏差大于 300 m 的两种插值方法计算温度误差(上)及绝对误差(下)随积分时间分布(矩型框:95%置信区间)

Fig. 11 Comparison of 2 m temperature bias (up) and absolute bias (down) calculated by 3D and 2D interpolation methods under 4 resolutions with height bias over 300 meters, varied with forecast time (a.45 km;b.15 km;c.5 km;d.2 km;outline bar:95% confidence level)

严重影响近地面要素(特别是 2 m 温度)检验评估精度.传统的检验方法中通常使用水平二维插值方法,该方法仅考虑水平经纬度网格空间上预报要素与实况观测的一致性,而忽略其垂直方向上的一致性,从而引起明显的评估误导问题.本文针对这一问题开展三维插值方法研究,所采用的三维插值方法可使预报与观测在相同的三维空间上进行比较,确保了检验评估的准确性.

利用 2013 年 7 月 29 日的个例分析及不同季节、不同时效的检验分析发现,三维插值方法在地形高度差异较大的复杂地形区表现出了明显的改进效果,显著减弱了由于高度差异所引起的 2 m 温度评估误差,同时三维插值方法不受复杂地形条件影响,可获取较为稳定的评估信息,更符合实际评估情况.进一步采用 GRAPES 模式对高原复杂地形区进行不同分辨率条件下的敏感分析发现,新插值方案在高分辨率条件下改进效果虽相对减弱,但依然存在较为一致的改进趋势.

同时,模式分辨率提高可提供更为精细化的模

式地形描述信息,能够使得模式地形高度与实况站点高度更为接近,可有效地削弱常规二维插值方法中由于模式地形高度与实况高度间垂直偏差而引起的评估误差,但该评估误差依然存在,分辨率的提高无法根本解决二维插值方法中高度偏差引起的评估误导问题.三维插值方法由于可实现实况与模式地形高度在三维空间上的一致性,因此可以规避该问题,是解决评估误导问题的简便途径.

参考文献

References

[1] 刘宇,陈泮勤,张稳,等.一种地面气温的空间插值方法及其误差分析[J].大气科学,2006,30(1):146-152
LIU Yu, CHEN Panqin, ZHANG Wen, et al. A spatial interpolation method for surface air temperature and its error analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(1): 146-152

[2] 林忠辉,莫兴国,李宏轩,等.中国陆地区域气象要素的空间插值[J].地理学报,2002,57(1):47-56
LIN Zhonghui, MO Xingguo, LI Hongxuan. et al.

- Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1):47-56
- [3] 李新,程国栋,卢玲.空间内插方法比较[J].*地球科学进展*,2000,15(3):260-265
LI Xin, CHENG Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods [J]. *Advance In Earth Sciences*, 2000, 15(3):260-265
- [4] 王智,师庆东,常顺利,等.新疆地区平均气温空间插值方法研究[J].*高原气象*,2012,31(1):201-208
WANG Zhi, SHI Qingdong, CHANG Shunli, et al. Study on spatial interpolation method of mean air temperature in Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(1):201-208
- [5] Engel C, Ebert E E. Gridded operational consensus forecasts of 2-m temperature over Australia [J]. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(2):301-322
- [6] Degaetano A T, Belcher B N. Spatial interpolation of daily maximum and minimum air temperature based on meteorological model analyses and independent observations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(11):1981-1992
- [7] Kann A, Wittmann C, Wang Y, et al. Calibrating 2-m temperature of limited-area ensemble forecasts using high-resolution analysis [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(10):3373-3387
- [8] 梁丰,王迎春.用中尺度非静力模式制作北京气温和风预报[J].*气象*,2000,26(6):33-39
LIANG Feng, WANG Yingchun. The forecast of 2-m temperature and 10-m wind with nonhydrostatic mesoscale numerical forecasting system [J]. *Meteorological Monthly*, 2000, 26(6):33-39
- [9] 王思维,刘勇,朱超洪,等.青海省逐日地面气温数据不同插值方法的对比[J].*高原气象*,2011,30(6):1640-1646
WANG Siwei, LIU Yong, ZHU Chaohong, et al. Contrast on different spatial interpolation methods of daily surface temperature data in terrain complex area, Qinghai province [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(6):1640-1646
- [10] Pitman A J, Perkins S E. Global and regional comparison of daily 2-m and 1 000-hPa maximum and minimum temperatures in three global reanalyses [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(17):4467-4681
- [11] Patarčić M, Branković Č. Skill of 2-m temperature seasonal forecasts over Europe in ECMWF and RegCM models [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 140(4):1326-1346
- [12] 熊秋芬. GRAPES_Meso 模式的降水格点检验和站点检验分析[J].*气象*,2011,37(2):185-193
XIONG Qiufen. Verification of GRAPES_Meso precipitation forecasts based on fine-mesh and station datasets [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(2):185-193
- [13] Uboldi F, Lussana C. Representativity of a mesonet temperature observations with respect to model fields [R]. Poster Presentation at 13th EMS Annual Meeting & 11th Conference on Applications of Meteorology (ECAM), 2013
- [14] Lussana C, Uboldi F, Salvati M R. A spatial consistency test for surface observations from mesoscale meteorological networks [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(649):1075-1088
- [15] 李莉,李应林,田华,等. T213 全球集合预报系统性误差订正研究[J].*气象*,2011,37(1):31-38
LI Li, LI Yinglin, TIAN Hua, et al. Study of bias-correction in T213 global ensemble forecast [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(1):31-38
- [16] 李莉,朱跃建. T213 降水预报订正系统的建立与研究 [J]. *应用气象学报*, 2006, 17(增刊1):130-133
LI Li, ZHU Yuejian. The establishment and research of T213 precipitation calibration system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(sup1):130-133
- [17] Fan Y, Dool H V D. Bias correction and forecast skill of NCEP GFS ensemble week-1 and week-2 precipitation, 2-m surface air temperature, and soil moisture forecasts [J]. *Weather & Forecasting*, 2011, 26(3):355-370
- [18] Cui B, Toth Z, Zhu Y J, et al. The trade-off in bias correction between using the latest analysis/modeling system with a short, an older system with a long archive [C]// *Proceedings of the First Thorpex International Science Symposium*, World Meteorological Organization, 2006:281-284
- [19] North G R, Wang J, Genton M G. Correlation models for temperature fields [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24:5850-5862
- [20] 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等.我国精细化客观气象要素预报进展[J].*气象科技进展*,2012,2(5):12-21
ZHAO Shengrong, ZHAO Cuiguang, ZHAO Ruixiao, et al. The development of objective meteorological element forecast in China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(5):12-21
- [21] 刘还珠,赵声蓉,陆志善,等.国家气象中心气象要素的客观预报: MOS 系统 [J]. *应用气象学报*, 2004, 15(2):181-181
LIU Huangzhu, ZHAO Shengrong, LU Zhishan, et al. Objective element forecasts at NMC-A MOS system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(2):181-181
- [22] 赵声蓉.多模式温度集成预报[J].*应用气象学报*, 2006, 17(1):52-58
ZHAO Shengrong. Multi-model consensus forecast for temperature [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(1):52-58

Application of a 3D interpolation scheme for 2 meter temperature verification

ZHAO Bin¹ LI Ziliang² ZHANG Bo¹

1 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Heihe Weather Office of Heilongjiang Province, Heihe 164300

Abstract The inherent difference between the modeled terrain and observed topography has seriously affected the 2 m temperature verification accuracy. The traditional 2D interpolation scheme can only ensure the consistency in two-dimensional space at latitude and longitude, while its neglect of the consistency at vertical direction produces error between forecast result and observation data. Using three-dimensional forecast variables, combined with near-surface elements of forecast products, an advanced 3D interpolation scheme is developed to ensure the consistency with the observed 3D space forecasting. The 24 h forecast products and observation data in July 2013 are used to compare and the results show that the proposed 3D interpolation scheme effectively solve the evaluation difference caused by the height bias between the modeled terrain and observed topography, which have maintained relatively consistent error distribution under different terrain height. And the evaluation results are not affected by terrain, which means it has good application value. To verify the proposed 3-D interpolation scheme for complex terrain with different resolutions, we carry out 60 h simulation sensitive tests for 2 m temperature estimation of Tibetan in July, 2012 under resolution of 45 km, 15 km, 5 km, and 2 km, which show that the proposed method can improve estimation accuracy even under high resolution of 2 m.

Key words 2 m temperature; three-dimensional interpolation scheme; topography; evaluation difference