

基于WRF模式的北方地区逆温层特征模拟研究

胡进宝¹, 罗浩^{2*}, 杜刚³

¹中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安

²中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

³上海位温信息科技有限公司, 上海

收稿日期: 2022年4月6日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月10日

摘要

为分析我国北方地区的逆温层特征, 本研究选取北方地区十个代表性站点使用WRF模式进行数值模拟, 并结合2019年相关站点临近区域的探空及地面观测数据进行对比分析。WRF模拟结果显示: 各站点中发生逆温的最高频率为64%, 最低频率为23%, 秋冬季发生的频率高于春夏季; 大部分站点逆温现象的日变化呈现出了U形分布特征, 发生逆温的高频时段集中在世界时21~00时; 逆温厚度方面, 多数站点呈现出秋冬季高于春夏季的特征, 冬季最厚者居多, 悬浮逆温厚度在多数站点中均为最厚; 逆温强度在所有模拟站点中都是贴地逆温强于悬浮逆温, 从不同季节上来看, 冬季最强, 春秋相当, 夏季最弱; 逆温底高和顶高方面, 北京、山西和白城悬浮逆温的相对位置较高且接近本地边界层高度。对比分析模式模拟与实际观测结果则表明, 世界时0时各逆温指数平均偏差为17%, 世界时12时平均偏差为29%, 模拟与观测的逆温时次的月变化趋势基本一致。总的来说, WRF模式能比较好的刻画出模拟地区边界层内气温的垂直变化特征。因此, 可借助模式模拟弥补外场观测的局限性, 为我国北方地区大气污染物的排放和扩散提供研究基础, 继而为污染防治措施提供理论支撑。

关键词

逆温层, 数值模拟, 逆温厚度, 逆温强度, 探空观测

Modelling Study of Temperature Inversion Layer Characteristics over Northern China Based on WRF Model

Jinbao Hu¹, Hao Luo^{2*}, Gang Du³

¹Northwest Electric Power Design Institute Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an Shanxi

²Guizhou Sub Bureau of Southwest Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

³Shanghai Weiwen Information Technology Co. Ltd, Shanghai

Received: Apr. 6th, 2022; accepted: May 3rd, 2022; published: May 10th, 2022

*通讯作者。

Abstract

To better understand the characteristics of inversion layer in northern China, ten representative stations in northern China are selected for numerical simulation using WRF model, and compared with the radiosonde and ground observation data in the vicinity of relevant stations in 2019. WRF simulation results show that: the highest frequency of temperature inversion is 64%, minimum frequency is 23%, inversion in autumn and winter occurs more frequently than in spring and summer; temperature inversion at most simulated sites have a daily U-shaped distribution feature, the high-frequency period of temperature inversion happened between 21 UTC and 00 UTC; in terms of the temperature inversion thickness, most sites have thicker inversion layer in autumn and winter than spring and summer, most of the thickest inversion layer happen in winter, the above surface temperature inversion layer thickness is the thickest in most sites; temperature inversion intensity of from surface temperature inversion layer is stronger than above surface temperature inversion layer in all simulation sites, from the different seasons, winter has the highest inversion layer intensity, spring and autumn are equivalent, summer is the weakest; Inversion temperature bottom height and top height aspects, the relative position of the above surface temperature inversion layer in Beijing, Shanxi and Baicheng is high and close to the height of the local boundary layer. Comparative analysis of the model simulation and actual observation results shows that the average deviation of each inversion index at 00 UTC is 17%, and the average deviation at 12 UTC is 29%. The monthly variation trend of the inversion time between the simulation and observation is basically consistent. In general, the WRF model well described the vertical variation characteristics of temperature in the boundary layer over simulated region. Therefore, model simulation can make up for the limitations of field observation, provide a research basis for the emission and diffusion of air pollutants in northern China, and then provide theoretical support for pollution control measures in these areas.

Keywords

Inversion Layer, Numeric Simulation, Inversion Layer Thickness, Inversion Intensity, Radiosonde Observation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气边界层通常指近地面至 2 km 高度的大气层, 研究表明, 当污染物进入大气层后主要在大气边界层内进行扩散, 而边界层逆温是影响大气污染物分布和扩散的重要因素, 当边界层内发生逆温现象时, 较为稳定的温度层结阻碍了污染物的扩散, 从而使得空气污染加重[1] [2] [3]。目前, 许多关于这方面的研究都集中在城市地区, Hua Wang 等[4]分析了北京地区气溶胶的垂直分布特征及其所对应的不同热力条件, 研究表明在北京地区发生的两次严重污染事件中都存在着大气边界层内的逆温现象; 周文利等[5]研究了格尔木地区低空逆温特征及其对空气污染物浓度的影响, 结果表明格尔木地区以贴地逆温层为主, 冬季最厚, 夏季最薄, 逆温层对污染物的浓度有较为显著的影响; 国内还有大量的学者对各个地区近地空间逆温层的特征进行了研究[6]-[23]。

目前已有的研究主要使用了高空和地面观测资料[24] [25] [26]、L 波段雷达探空资料[27] [28]以及飞机报告, 但是观测资料存在一定的局限性, 会受到外场观测站点空间分布稀疏的限制。本文所研究的对象广泛地分布于我国北方各地, 对于这些站点而言, 既没有地面观测站点的覆盖, 也缺乏高空资料和雷

达探空资料, 山东师范大学的尹相玉[29]曾基于 WRF (The Weather Research and Forecasting Model) 模式对济南地区大气边界层的特征进行了模拟研究, 结果表明 WRF 模拟结果能很好地反映当地大气边界层内的逆温特征, 稳定的温度层结和大气环流为空气污染提供了有利的大气环境场。本文选取我国北方地区共十个代表性模拟点分别进行数值模拟, 并结合探空和地面数据进行对比分析, 总结了各模拟点的逆温层特征, 借助模式模拟弥补了外场观测的局限性, 为我国北方地区大气污染物的排放和扩散提供研究基础, 继而为污染防治措施提供理论支撑。

2. 资料与方法

本文使用美国国家环境预报中心(NCEP)的全球再分析资料(空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为逐 6 小时)、各模拟区域临近的十个探空站点(乌鲁木齐、北京、哈尔滨、崆峒、太原、泾河、锡林浩特、延安、长春、呼和浩特) 2019 年全年探空数据及地面观测数据。

各探空站点和模拟站点分布情况如图 1 所示。

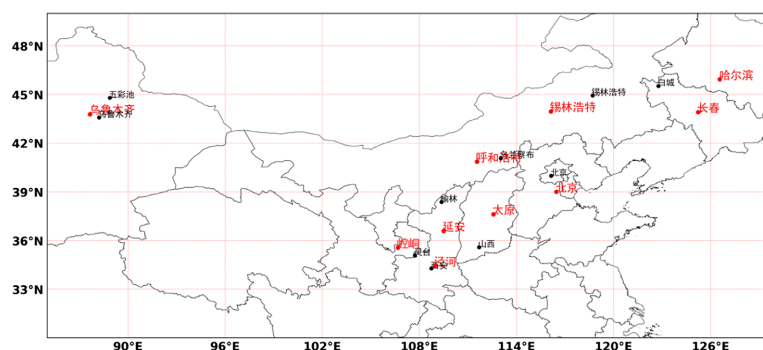


Figure 1. Spatial distribution of sounding stations and simulated stations (red for sounding stations and black for simulated stations)

图 1. 探空站点和模拟站点分布(红色为探空站, 黑色为模拟站点)

本研究所使用的数值模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)、国家环境预报中心(NCEP)和国家海洋大气局(NOAA)等单位联合开发的第三代中尺度预报模式 WRF v4.0 版本。模拟的时间范围为世界时 2019 年 1 月 1 日 00 时至 2020 年 1 月 1 日 00 时。

由于模拟区域较为分散, 将嵌套区域分为三个(图 1): 新疆区域(含乌鲁木齐、五彩池两个模拟点); 南部区域(含西安、灵台、山西、榆林四个模拟点); 北部区域(含乌兰察布、北京、白城以及锡林浩特四个模拟点)。模拟区域采用双层嵌套, 外层水平分辨率 15 km, 内层水平分辨率 3 km, 垂直分层 65 层, 垂直高度 3 km 以下分辨率为 60 m。

模式参数化配置方案如表 1 所示:

逆温判定: 判断在各模拟点地面至 2 km 高度区间发生的任意逆温情况。

逆温底高: 逆温层底的海拔高度(单位: m)。

逆温顶高: 逆温层顶的海拔高度(单位: m)。

逆温厚度: 逆温层的厚度(单位: m)。

逆温类型分为两类: 贴地逆温是指逆温起始高度为地面海拔高度加 2 m (WRF 模式输出的 2 m 气温所在高度)的逆温层; 悬浮逆温是指逆温起始高度大于地面海拔高度加 2 m 的逆温层[6]。

逆温强度: $\Delta T / (\Delta H \times 100)$ (单位: 摄氏度每百米), 其中 $\Delta T = T_2 - T_1$ (T_2 为逆温层顶气温, T_1 为逆温层底气温); $\Delta H = H_2 - H_1$ (H_2 为逆温层顶海拔高度, H_1 为逆温层底海拔高度)。逆温强度表征为在逆温层中每升高 100 m 增加的温度。

Table 1. Configuration options and settings of WRF parameterization scheme
表 1. WRF 参数化方案的选择和设置

微物理方案	WSM3
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
近地面层方案	Monin-Obukhov
陆面过程方案	热量扩散
边界层参数化方案	YSU
积云参数化	浅对流 Kain-Fritsch (new Eta)

3. 模拟结果分析

3.1. 各模拟站点逆温时次及逆温率

图 2 统计分析各模拟点 2019 年全年气温模拟数据, 将同一时刻中贴地逆温层和悬浮逆温层同时存在

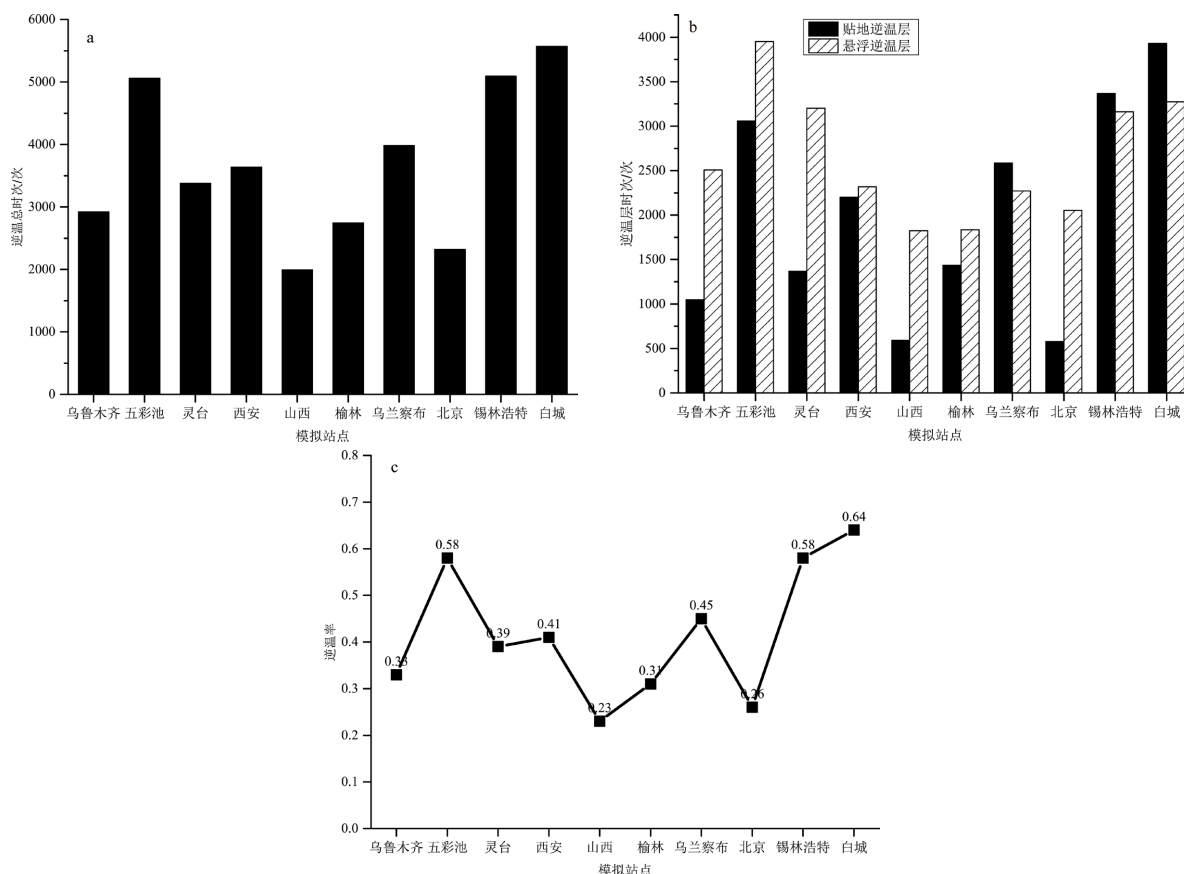


Figure 2. Inversion times and inversion rate distribution in 2019 at each simulated station: (a) total inversion times, (b) different type inversion layer occurrence times, (c) inversion rates (total inversion times (excluding multi-layer inversion layers)/annual total times)

图 2. 模式模拟各站点 2019 年逆温时次及逆温率分布: (a) 逆温总时次; (b) 不同逆温层逆温发生时次; (c) 逆温率(逆温总时次(不含多层逆温)/全年总时次)

的情况视为一次计算逆温总时数如图 2(a)柱状图所示, 发生逆温现象最多的模拟站点依次是白城、锡林浩特、五彩池、乌兰察布、西安、灵台、乌鲁木齐、榆林、北京和山西; 将逆温层类型分为贴地逆温层和悬浮逆温层, 各模拟点逆温不同逆温类型的时次分布如图 2(b)所示, 有 3 个模拟点(乌兰察布、锡林浩特、白城)贴地逆温层发生的时次较多, 其余 7 个模拟点(乌鲁木齐、五彩池、灵台、西安、山西、榆林、北京)则是悬浮逆温层发生的时次较多; 图 2(c)为各模拟站点全年逆温率的分布情况, 超过 0.5 的站点有白城、锡林浩特和五彩池, 而北京和山西模拟点逆温率不足 0.3。

3.2. 各模拟站点不同类型逆温层发生时次的月变化和日变化

3.2.1. 月变化特征

图 3 为各模拟站点 2019 年逆温层发生总时次归一化后的月分布情况, 对于大部分模拟站点而言(图 3(a)), 秋冬季发生贴地逆温的时次都高于夏秋季, 略有不同的是, 山西、北京、灵台、西安四个模拟点在 1 月或 2 月发生贴地逆温的时次相较于其他月份呈现出了下降的趋势, 而在 3 月或 4 月则出现了高峰; 悬浮逆温层在所有站点都表现出相同的月变化特征(图 3(b)), 呈浅 U 形分布, 秋冬季发生的频次高于春夏季; 整体而言, 悬浮逆温发生时次从冬季到夏季呈明显下降趋势, 到了 10 月份以后才又开始呈现出明显的上升趋势。

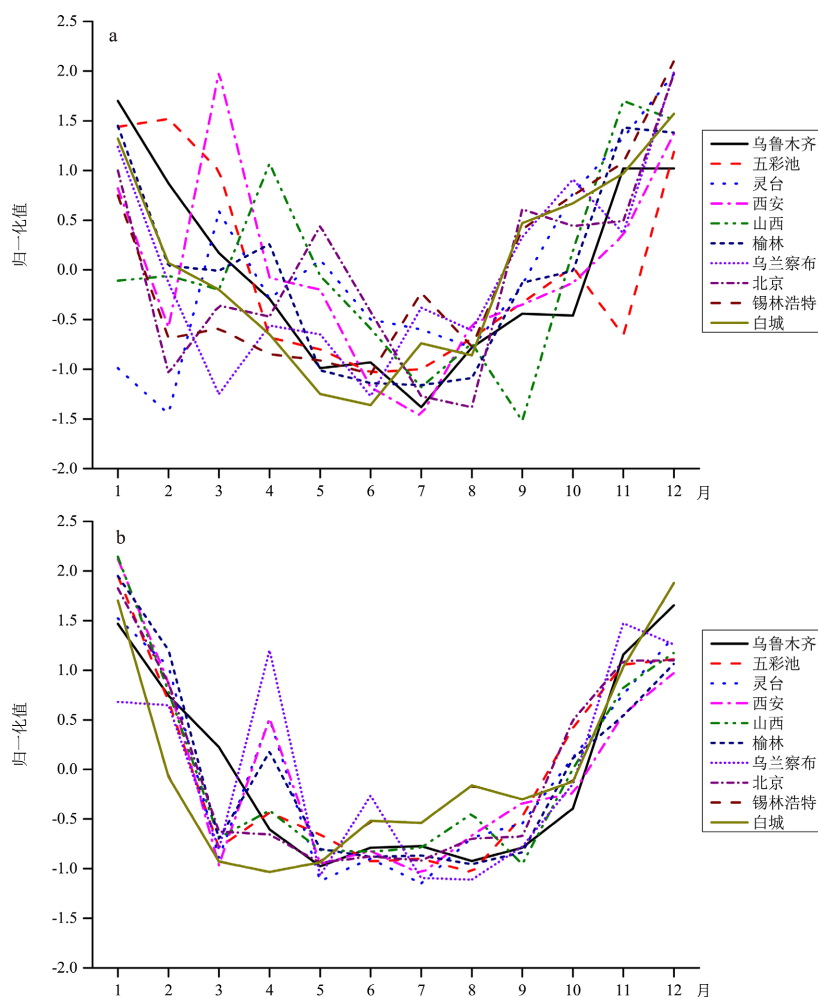


Figure 3. Normalized value of from surface temperature inversion layer occurrence times monthly distribution at each simulation station (unit: normalized value): (a) from surface inversion layer, (b) above surface inversion layer

图 3. 模式模拟各站逆温层发生时次归一化后的月分布(单位: 归一化值): (a) 贴地逆温层; (b) 悬浮逆温层

3.2.2. 日变化特征

图 4 显示了各模拟站点 2019 年逆温层发生总时次归一化后的日分布情况, 由图可见, 各模拟点贴地逆温层发生时次相差较大(图 4(a)), 除了乌鲁木齐模拟点日变化特征不明显以外, 其余各模拟点均呈浅 U 形分布, 发生贴地逆温的高频时段为 21 UTC 至 00 UTC, 各模拟点发生贴地逆温最高频的时段略有差别, 五彩池、灵台、山西、榆林和北京五个模拟点贴地逆温发生的最高频时次出现在世界时 00 UTC, 而西安、乌兰察布、锡林浩特和白城四个模拟点贴地逆温发生的最高频时次出现在世界时 21 UTC 至世界时 23 UTC 之间, 对于西安模拟点而言, 世界时 00 UTC 同样为高频时刻; 悬浮逆温层的情况如图 4(b)所示, 可以看到各模拟站点都呈现出了 U 形分布特征。另外, 乌鲁木齐、五彩池、西安、榆林四个模拟点发生悬浮逆温最高频的时刻为世界时 00 UTC, 灵台、乌兰察布、北京、锡林浩特和白城五个模拟点发生悬浮逆温最高频的时次为世界时 21 UTC 至世界时 23 UTC 之间, 山西模拟点发生悬浮逆温的最高频时刻则为世界时 16 UTC。在十个模拟点中, 灵台、西安、榆林、北京四个模拟点波谷时段较长, 而乌兰察布、锡林浩特、白城三个模拟点波峰时段较长。

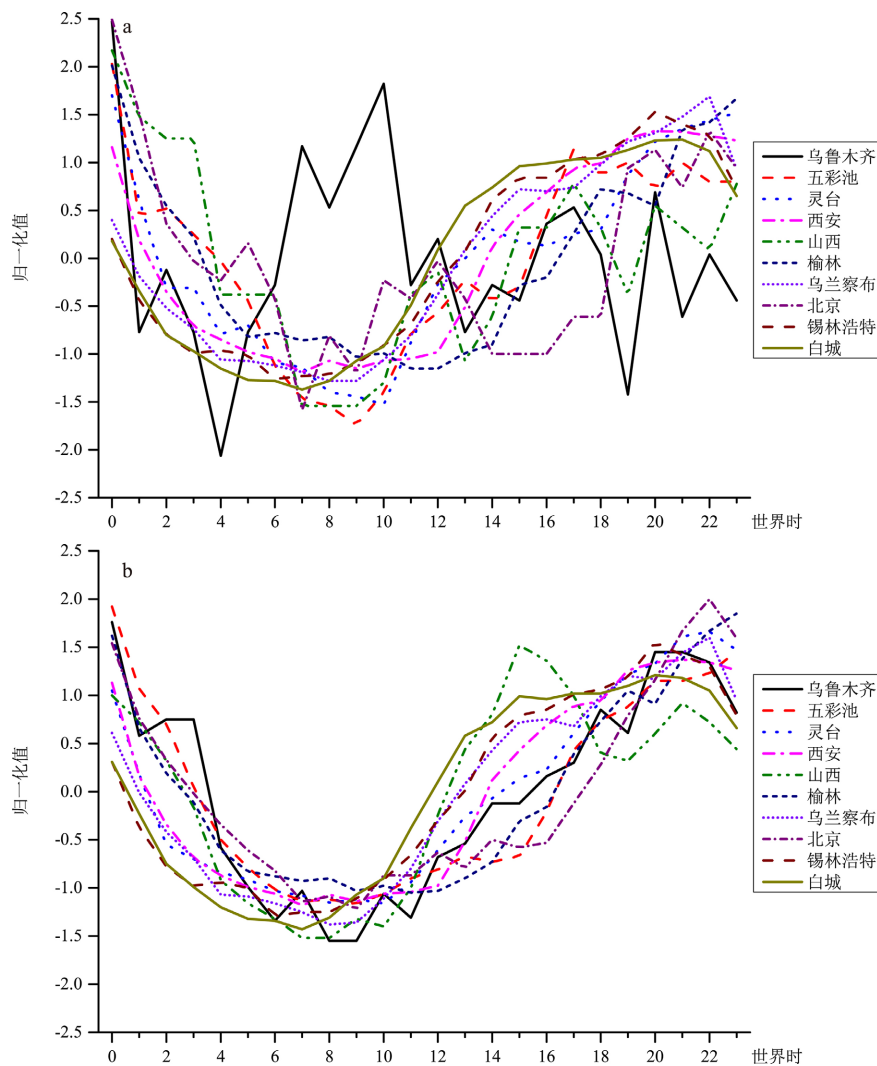


Figure 4. Normalized value of from surface temperature inversion layer occurrence times daily distribution at each simulation station (unit: normalized value): (a) from surface inversion layer, (b) above surface inversion layer

图 4. 模式模拟各站逆温层发生时次归一化后的日分布(单位: 归一化值): (a) 贴地逆温层; (b) 悬浮逆温层

3.3. 各模拟站点不同类型逆温层的逆温指数

3.3.1. 逆温厚度和逆温强度

图 5 是各模拟站点 2019 年不同类型逆温层逆温厚度和逆温强度的年平均统计, 由图可见, 乌鲁木齐、五彩池、西安和白城 4 个模拟点贴地逆温层的厚度大于悬浮逆温层(图 5(a)), 另外的 6 个模拟点则都是悬浮逆温层厚度最大, 从各个模拟点来看, 五彩池模拟点逆温厚度最大, 年均值超过了 300 m, 西安模拟点逆温厚度最小, 均值小于 200 m, 其余各站点逆温厚度的均值均在 200 m 以上; 图 5(b)显示了逆温强度的年平均统计, 对于所有的模拟点而言, 贴地逆温层的逆温强度均大于悬浮逆温层的逆温强度, 且逆温强度随着逆温层高度的增加而递减, 所有站点中, 悬浮逆温层逆温强度的年平均值最大不超过 0.6°C/100m, 而贴地逆温层逆温强度年平均值最小的模拟点也达到了 1.11°C/100m; 十个模拟站点中, 逆温强度最大的是乌兰察布, 年平均值达到了 5.2°C/100m, 最小的是山西, 年平均值仅为 0.25°C/100m。

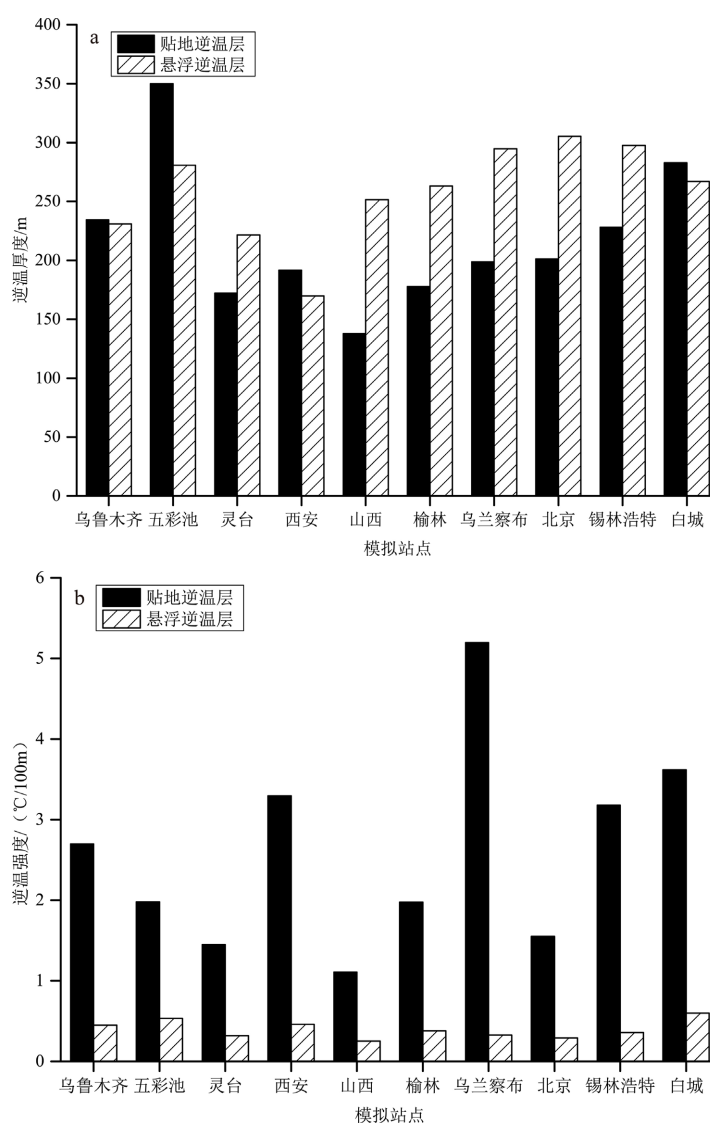


Figure 5. The annual average of inversion thickness (unit: m) and inversion intensity ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) of each simulation station: (a) inversion thickness, (b) inversion intensity

图 5. 模式模拟各站点不同类型逆温层逆温厚度(单位: m)及逆温强度(单位: $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)的年平均值: (a) 逆温厚度; (b) 逆温强度

季节变化方面(图略),对于贴地逆温层而言,大部分模拟站点逆温厚度在秋冬季最大,只有灵台、山西和乌兰察布三个模拟点春夏季逆温厚度大于秋冬季;逆温强度来看,秋季逆温强度最强的模拟点有灵台、乌兰察布,北京模拟点春季最强,其余模拟点逆温强度最强的季节则都出现在冬季,夏季逆温强度最弱。

悬浮逆温层所有模拟站点的逆温厚度在月分布上均表现出了浅U形分布特征,逆温厚度在11月至3月较大,而从5月至10月则逆温厚度较小,处于波谷,最小值一般出现在6月或7月,最大值则全部出现在秋冬季;逆温强度方面则月变化特征不明显。

3.3.2. 逆温底高和逆温顶高

如图6所示,乌鲁木齐模拟点海拔为1638 m,其悬浮逆温顶高的均值为2227 m,两者差值589 m,为所有站点中最小的,考察其他站点悬浮逆温层顶高均值与海拔高度的落差,分布区间为900 m到1300 m之间。结合前文对各模拟站点逆温厚度的统计分析可见,不同模拟站点悬浮逆温层所在的高度有所差别,以悬浮逆温层发生频次最高的7个模拟点来看,其中北京、山西和白城三个模拟点悬浮逆温层发生于离地更高的位置,更接近本地的大气边界层顶高。

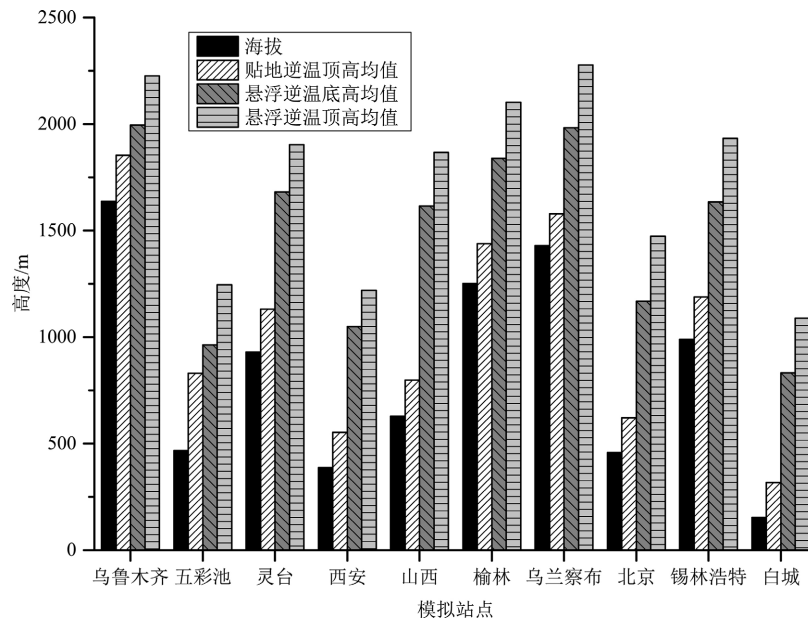


Figure 6. Statistics of annual average values of the inversion bottom height and top height in different inversion layers at each station based on model simulation (unit: m)

图6. 模式模拟各站点不同逆温层逆温底高和顶高年平均值统计(单位: m)

4. 模拟结果与探空站点实测的对比分析

4.1. 区域代表站点逆温指数模拟与实况的对比

从三个模拟区域分别选取一个区域性探空站点来对比 WRF 模拟与探空站点实测结果,新疆区域选取乌鲁木齐探空站、南部区域选取泾河探空站、北部区域选取北京探空站,将 WRF 模拟结果中各探空站 2019 年全年 00 UTC 及 12 UTC 的逆温层模拟指数与该站点 00 UTC 及 12 UTC 的实测结果进行对比,如表 2 所示为 00 UTC 的对比情况,由表可见,模拟发生的逆温时次较实测平均偏高 17%,逆温层厚度中位数则有偏高也有偏低,平均偏差 8%,逆温强度中位数平均偏差为 14%,逆温层底高中位数平均偏差 19%,逆温层顶高中位数平均偏差为 25%。

Table 2. Comparison of inversion index between real sounding station and simulation of the regional representative station (00 UTC)**表 2.** 区域代表站点实况与模拟对比(00 UTC)

	乌鲁木齐 (模拟)	乌鲁木齐 (实测)	泾河 (模拟)	泾河 (实测)	北京 (模拟)	北京 (实测)
全年逆温时次 (单位: 次)	344.00	309.00	352.00	321.00	294.00	211.00
逆温层厚度中位数 (单位: m)	203.00	196.00	188.00	217.00	163.50	151.00
逆温强度中位数 (单位: °C/100m)	1.10	1.46	0.84	0.97	0.91	0.91
逆温层底高中位数 (单位: m)	937.00	919.00	578.00	620.00	55.00	90.00
逆温层顶高中位数 (单位: m)	1440.00	1262.00	720.00	884.00	300.00	460.50

12 UTC 的对比情况如表 3 所示, 模拟发生的逆温时次与实测平均偏差为 25%, 逆温层厚度中位数平均偏差 38%, 逆温强度中位数平均偏差 35%, 逆温层底高平均偏差 31%, 逆温层顶高中位数平均偏差 16%, 整体而言, 12 UTC 模拟与实况的偏差比 00 UTC 大, 但除了 12 UTC 的逆温厚度、逆温底高、逆温强度平均偏差超过 30%以外, 其余各指数模拟与实况的对比偏差均小于 30%。

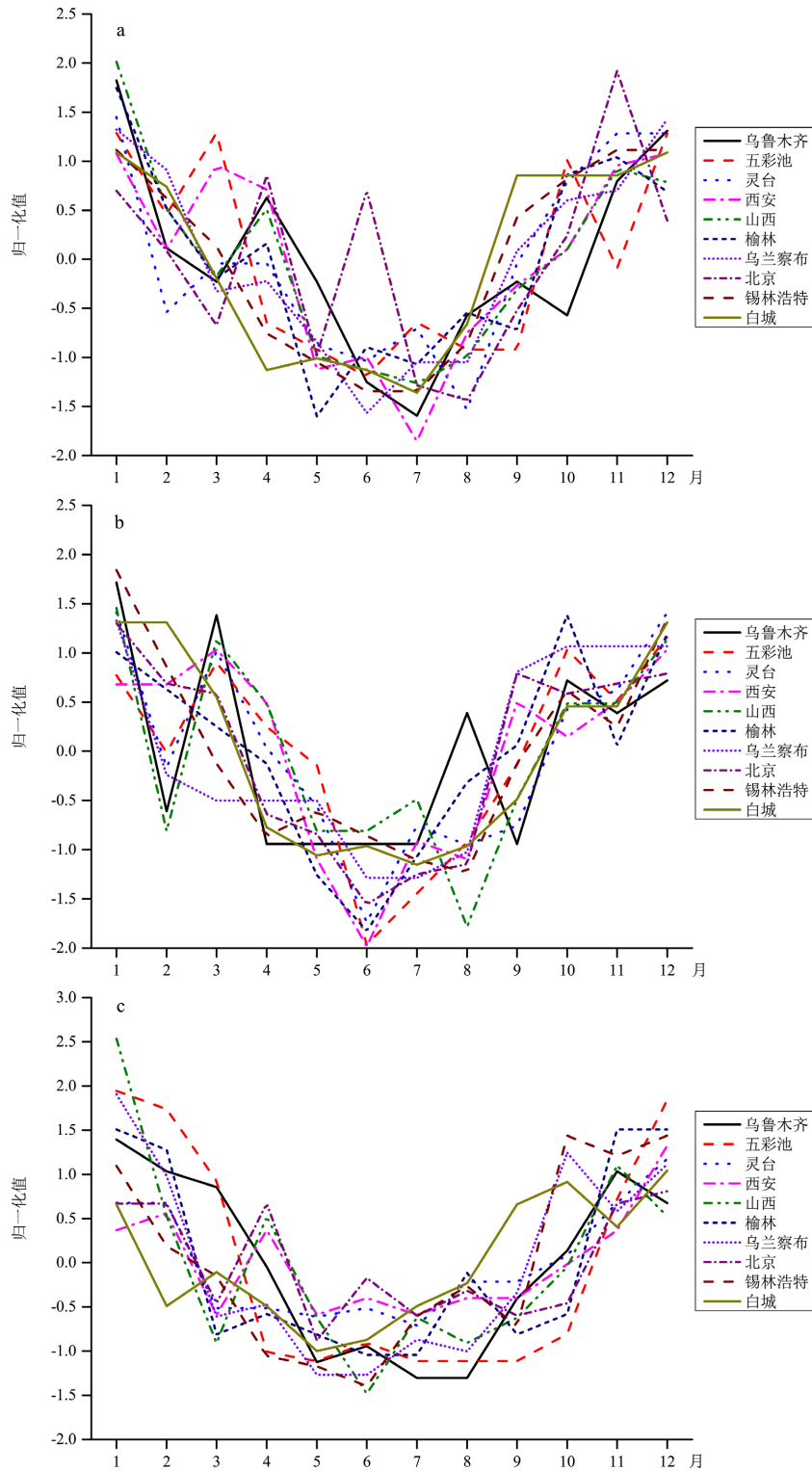
Table 3. Comparison of inversion index between real sounding station and simulation of the regional representative station (12 UTC)**表 3.** 区域代表站点实况与模拟对比(12 UTC)

	乌鲁木齐 (模拟)	乌鲁木齐 (实测)	泾河 (模拟)	泾河 (实测)	北京 (模拟)	北京 (实测)
全年逆温时次 (单位: 次)	153.00	166.00	305.00	196.00	264.00	209.00
逆温层厚度中位数 (单位: m)	270.00	268.00	188.00	100.50	87.00	148.00
逆温强度中位数 (单位: °C/100m)	0.77	1.21	1.13	1.53	1.13	0.91
逆温层底高中位数 (单位: m)	937.00	1398.00	411.00	422.00	55.00	33.00
逆温层顶高中位数 (单位: m)	1440.00	1855.00	660.00	583.50	120.00	133.00

探空站点实测数据为探空气球的探测结果, 其每一次探测时间、高度层都有所差别, 垂直间隔有大有小, 而本文 WRF 模拟在高度 3 km 以下的垂直分辨率为 60 m, 输出时间为每小时一次, 时空分辨率的不同以及模式本身的误差使得模拟结果与实测结果必然存在偏差, 如前所述, 各区域代表探空站逆温指数中偏差度最大值为 38%, 最小值为 8%, 00 UTC 各指数平均偏差为 17%, 12 UTC 平均偏差为 29%, 由此可以看到, WRF 模拟结果固然不能代替实际观测, 但在逆温层模拟指数上仍有较高的代表性。

4.2. 逆温时次月变化趋势的模拟与实况对比

为了对比不同站点发生逆温时次的月变化特征，将各模拟站点和探空站点 00 UTC 及 12 UTC 逐月发生的逆温时次分别进行归一化，如图 7 所示可见，无论是模拟还是实测，逆温时次均表现出了 U 形分布



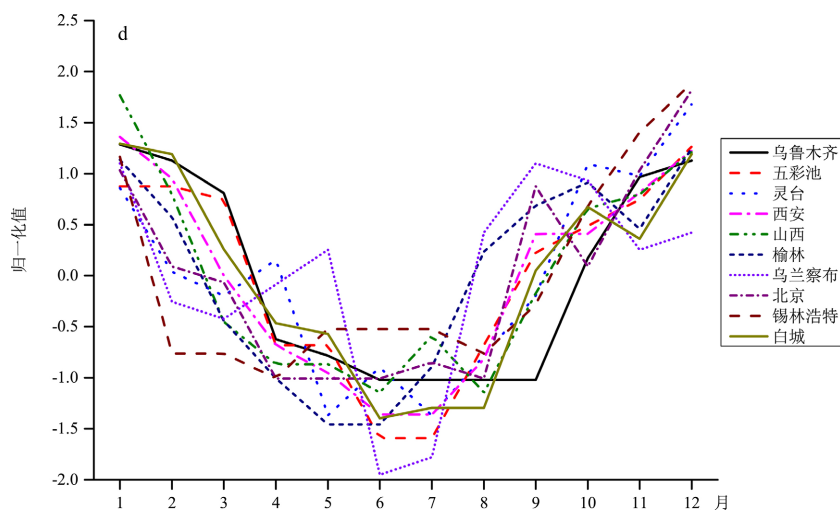


Figure 7. Comparison of inversion times in different month between simulation and observation (unit: normalized value). (a) Simulation results at 00UTC; (b) sounding results at 00UTC; (c) simulation results at 12 UTC; (d) sounding results at 12 UTC

图 7. 逆温时次月变化趋势的模拟与实况对比(单位:归一化值):(a) 模拟 00 UTC;(b) 探空 00 UTC;(c) 模拟 12 UTC;(d) 探空 12 UTC

特征, 秋冬季发生频率明显高于春夏季, 另外也体现出了部分站点在春季出现逆温现象的小高峰, 逆温厚度和逆温强度的月变化对比(图略)与之类似, 但不同类型逆温层表现略有差别, 对于模拟结果而言, 悬浮逆温层整体逆温强度偏小, 且月变化不明显, 这与前文所叙的时空分辨率有较大关系。

通过区域代表探空站逆温指数模拟与实测的对比, 以及模拟站点和探空站点逆温时次月变化趋势的对比, 进一步说明 WRF 模拟能够比较好地模拟出边界层内气温的垂直变化特征[29], 从而为探测资料空白地区的逆温层特征研究提供了切实可行的技术手段。

5. 结论

1) 结合探空站点观测数据的对比结果表明, WRF 模式总体上能比较好的模拟刻画边界层内气温的垂直变化特征, 从而为探测资料空白地区的逆温层特征研究提供了切实可行的技术手段。

2) 本文所模拟的我国北方具有代表性的十个站点逆温发生频次在 0.22~0.64 之间; 其中, 乌兰察布、锡林浩特和白城 3 个模拟点贴地逆温发生的频次较高, 其余 7 个模拟站点则是悬浮逆温发生的频次较高。

3) 山西、北京、灵台、西安四个模拟点在 1 月或 2 月发生贴地逆温的时次相较于其他月份呈现出了下降的趋势, 而在 3 月或 4 月出现了高峰, 除此之外, 逆温发生时次均表现为 U 形分布, 秋冬季发生的时次明显多于春夏季。

4) 受到太阳辐射的影响, 悬浮逆温层发生时次在所有模拟点均呈 U 形分布, 发生的高峰时段集中在世界时 21 时至 00 时; 对于贴地逆温层而言, 除了乌鲁木齐模拟点日变化特征不明显以外, 其余各模拟点均呈浅 U 形分布, 发生贴地逆温的高频时段同样为世界时 21 时至世界时 00 时。

5) 五彩池模拟的平均逆温厚度最大, 乌鲁木齐、五彩池、西安和白城贴地逆温层的厚度大于悬浮逆温层, 剩余的 6 个模拟点则都是悬浮逆温层厚度较大; 两种不同类型的逆温层整体上均表现出秋冬季厚于春夏季的特点, 但山西、灵台、乌兰察布 3 个模拟点贴地逆温层的逆温厚度表现出春夏季大于秋冬季的特征。

6) 所有模拟城市的贴地逆温层的逆温强度均强于悬浮逆温层, 模拟的贴地逆温层的年平均逆温强度在 1.1°C/100m 至 5.2°C/100m 之间。其中, 贴地逆温层秋季逆温强度最强的模拟点有灵台、乌兰察布, 北

京模拟点逆温强度最强的月份则出现在春季，其余模拟点逆温强度最强的季节则都出现在冬季；而悬浮逆温层的整体逆温强度较小，且没有明显的季节变化特征。

基金项目

项目资助：中国能源建设集团规划设计有限公司科技项目：北方地区低空逆温气象分析。项目编号：GSKJ2-W02-2019。

参考文献

- [1] 容娜, 徐梓杰. 克拉玛依区域逆温层特征分析[J]. 科技视界, 2019(17): 1-4+37.
- [2] 姚作新, 吕鸣, 贺晓东. 2008/2009 乌鲁木齐近地空间逆温层特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(3): 29-32.
- [3] 都占良, 韩廷芳, 等. 格尔木地区近地面逆温层特征及其影响因子分析[J]. 青海环境, 2019, 29(2): 67-71+76.
- [4] Wang, H., Sun, Z.B., et al. (2018) Vertical-Distribution Characteristics of Atmospheric Aerosols under Different Thermodynamic Conditions in Beijing. *Aerosol and Air Quality Research*, **18**, 2775-2787. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0078>
- [5] 周文利, 向亚飞, 等. 格尔木市低空逆温特征及其对空气污染物浓度的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(3): 88-94.
- [6] Lesin, Y.V. and Leshukov, T.V. (2016) Air Processes Resulting in a Surface Layer Pollution in Industrial Regions. *VII International Scientific Practical Conference "Innovative Technologies in Engineering"*, Vol. 142, 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012124>
- [7] Guédjé, F.K., Houéto, V.V.A. and Houngninnou, E. (2017) Features of the Low-Level Temperature Inversions at Abidjan Upper-Air Station. *Journal of Materials and Environmental Sciences (Ivory Coast)*, **8**, 264-272.
- [8] El-Askary, H. and Kafatos, M. (2007) Investigation of Thermal Inversions as a Major Contributor to the Black Cloud Episodes over Cairo. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007, Barcelona, 23-28 July 2007*, 4298-4301. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423802>
- [9] Guilbaud, C., Anquetin, S. and Chollet, J.-P. (1995) Evolution of the Inversion Layer and Pollutant Dispersion in Real Valley. *Transactions on Ecology and the Environment*, **10**, 243-250.
- [10] 刘金青, 聂永喜, 周措毛. 黄河源地区近地面逆温层特征及形成原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(2): 78-82.
- [11] 于文立, 郭淑芳, 刘洋. 临江市低空逆温层特征分析[J]. 气象灾害防御, 2018, 25(4): 26-29.
- [12] 刘金青, 聂永喜, 周措毛. 黄河源地区近地面逆温层特征及形成原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(2): 5.
- [13] 张佃国, 王洪, 等. 山东济南地区 2015 年大气边界层逆温特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(1): 43-50.
- [14] 马明亮, 祁栋林, 等. 西宁地区大气边界层风、温场特征研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1196-1206.
- [15] 周颖, 靳小兵, 曾涛. 成都市冬季逆温对大气污染的影响分析[J]. 四川气象, 2006, 26(2): 22-23.
- [16] 顾庭敏, 宫德文, 郑全岭, 等. 对大气污染因子-辐射逆温的讨论[J]. 气象学报, 1982(2): 103-112.
- [17] 李爱贞, 刘厚凤. 气象学与气候学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [18] Huang, X., Wang, Z. and Ding, A. (2018) Impact of Aerosol-PBL Interaction on Haze Pollution: Multiyear Observational Evidences in North China. *Geophysical Research Letters*, **45**, 8596-8603. <https://doi.org/10.1029/2018GL079239>
- [19] Huang, X., Ding, A., Wang, Z., et al. (2020) Amplified Transboundary Transport of Haze by Aerosol-Boundary Layer Interaction in China. *Nature Geoscience*, **13**, 428-434. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0583-4>
- [20] Zhang, Y., Ding, A., Mao, H., et al. (2016) Impact of Synoptic Weather Patterns and Interdecadal Climate Variability on Air Quality in the North China Plain during 1980-2013. *Atmospheric Environment*, **124**, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.063>
- [21] Xu, Z., Huang, X., Nie, W., et al. (2018) Impact of Biomass Burning and Vertical Mixing of Residual-Layer Aged Plumes on Ozone in the Yangtze River Delta, China: A Tethered-Balloon Measurement and Modeling Study of a Multiday Ozone Episode. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **123**, 11786-11803. <https://doi.org/10.1029/2018JD028994>
- [22] Li, J., Chen, H., Li, Z., et al. (2015) Low-Level Temperature Inversions and Their Effect on Aerosol Condensation

Nuclei Concentrations under Different Large-Scale Synoptic Circulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**, 898-908. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-4150-z>

- [23] 夏恒霞. 北京城区逆温气象特征及其对大气污染的影响[J]. 城市管理与科技, 2004, 6(2): 63-65+68.
- [24] 刘焕彬, 冯俊杰, 王恒明. 济南低空逆温层特征分析[J]. 山东气象, 2005, 25(1): 27-28.
- [25] 邱海涛, 徐桂梅. 呼和浩特市低空逆温特征分析[J]. 内蒙古气象, 2003(3): 25-26.
- [26] 周书华, 倪长健, 刘培川. 成都地区大气边界层逆温特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 108-111.
- [27] 唐家萍, 谭桂容, 谭畅. 基于 L 波段雷达探空资料的重庆市区低空逆温特征分析[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 789-793.
- [28] 张雪玲, 陈润浩. 南阳边界层逆温特征分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(B9): 116-119.
- [29] 尹相文. 基于 WRF 模式的济南地区大气边界层特征模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2014.