

动力降尺度方法在辐射雾大涡模拟中的应用

林继配^{1,2} 张庆红^{1,†}

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国人民解放军 91181 部队, 青岛 266405;

† 通信作者, E-mail: qzhang@pku.edu.cn

摘要 针对大涡模拟(LES)计算精确但耗费大量计算机资源的特点, 采用动力降尺度的方法, 把传统的边界层(PBL)方案与LES模拟相结合, 利用WRFV3.7模式四重到五重嵌套网格, 以华北地区一次辐射雾为例进行模拟, 试图保留LES计算精确的特点, 并减少计算机时。结果表明, 动力降尺度方法能够准确地预报雾的发生, 与同样水平分辨率的LES模拟相比, 四层嵌套网格节省47.02%计算机时, 五层嵌套网格节省67.67%计算机时, 可以为未来高分辨率业务预报系统的LES模拟实现提供一种可能性。

关键词 辐射雾; 大涡模拟; 边界层; 降尺度; 计算机时

中图分类号 P445

Application of Dynamic Downscaling Method for the Large Eddy Simulation in a Radiation Fog Case

LIN Jipei^{1,2}, ZHANG Qinghong^{1,†}

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. 91181 Troops of PLA, Qingdao 266405; † Corresponding author, E-mail: qzhang@pku.edu.cn

Abstract The large eddy simulation (LES) has accurate calculation, but consumes a lot of computer resources. Based on the WRFV3.7 model with four to five nested domains, a radiation fog in North China is simulated through the dynamic downscaling method, to retain the advantages of the LES and reduce the computational time. The results show that, compared with LES scheme under the same horizontal grid resolution, dynamic downscaling method can predict formation of fog more successfully, and in addition, save 47.02% to 67.67% computational time. This study raise possibility for the LES scheme to be used in the operational forecast system in the future.

Key words radiation fog; large eddy simulation; boundary layer; downscaling; computational time

大涡模拟(the large eddy simulation, LES)是一种分辨率能够达到米级^[1-2], 可以精确地解析湍流运动的模拟方法, 近年已广泛应用于大气精细物理过程的研究中, 如边界层辐射雾^[3-4]、台风边界层小尺度运动^[5]、城市中的颗粒物排放源^[6]和层积云的风场、能量输送特征^[7]。

Deardorff^[8]于 1972 年首次提出将 LES 应用于行星边界层(planetary boundary layer, PBL)的研究, LES 方法的优势在于具有高分辨率, 能够更好地模拟边界层湍流和能量输送的结构特征^[9-10]。特别是

在对雾的研究中, LES 能够更好地研究辐射雾的精细结构^[3]以及辐射雾形成和发展过程中的细节^[4]。Bergot^[11]利用 LES 研究辐射雾的小尺度结构, 发现了雾形成和发展阶段物理量场的不同特征, 探讨了湍流能量在不同阶段对雾的影响。左全等^[11]利用 LES 对华北地区一次冬季辐射雾过程进行模拟, 对比分析了雾爆发前后的地面气温和相对湿度等物理场变化, 发现与 PBL 方案相比, LES 可以明显提高中尺度模式对华北地区辐射雾的预报技巧。然而, 与提高网格水平分辨率类似, LES 通过高分辨率地

解析湍流运动来研究辐射雾的精细结构,也需要大量的计算资源来进行模拟运算,因此在现有的计算能力条件下还不能用于业务模式预报。

动力降尺度模拟方法在气候研究领域有较多的应用^[12]。降尺度方法能将全球气候模式输出的粗空间分辨率和较长时间间隔的数据转化为几千米以内的空间尺度和短时间间隔的气象数据,为气象、水文、生态、环境模拟和预警研究提供数据资料和参考依据,目前已成为一个重要的研究领域^[13]。左河疆等^[14]分别采用直接插值、WRF (the weather research and forecasting model)模式嵌套和 WRF+CALMET (california meteorological model) 3 种降尺度方案,对比分析风功率预报业务中的效果。陈威霖^[15]针对中国东南部区域,分别利用可变网格区域气候模式的动力模式和统计模型 SDSM (statistical down scaling model) 进行动力和统计降尺度,对该区域 21 世纪的气候变化进行高分辨率预估研究。在雾的研究领域,为了提高分辨率,WRF 模式常用的方法是增加网格嵌套层数,但由于不同嵌套网格之间的数据交换,需要的计算资源通常比较大。

辐射雾通常在较大面积区域内爆发性出现。在日常业务预报中,若能够准确地预报辐射雾的出雾时间,及时发布大雾预警,就可以有效地减少经济损失。高分辨率 LES 在雾的预报中有一定优势,但是计算量比 PBL 方案大,难以用于业务模式。基于以上原因及前人的研究,本文选取华北地区一次辐射雾天气个例以及对此次辐射雾个例模拟效果相对最优的 PBL 方案^[11],首先通过不同分辨率网格嵌套的 LES 模拟方法对此次辐射雾过程进行模拟,然后利用动力降尺度方法将传统 PBL 方案的模拟结果作为 LES 方案的初值和侧边界条件进行模拟,最后利用 ETS (equitable threat score) 和 Bias 评分,对比分析不同敏感性实验的模拟结果,探讨动力降尺度方法在辐射雾个例中的预报效果及应用前景。

1 天气背景及资料来源

1.1 天气过程

2013 年 1 月 21 日 08:00 前,华北地区位于高空槽前,地面位于西南暖湿气流控制下,河北省大部分地区经历了一次降水过程(图略)。北京时(local standard time, LST) 21 日 08:00,中高层槽线移过华北地区,至 21 日 20:00 后中高层已经转变为由西北气流控制下的槽后天气,大气中高层以少云天气为

主。21 日华北地区地面位于高压系统的底部,水平气压梯度小,多数地区有 2 m/s 左右的水平风。这样的天气形势有利于雾的形成和发展^[16]。地面观测站及高速公路气象观测站监测到,大雾最早于 21 日 18:00 开始在河北省境内形成,19:00 后雾区范围迅速扩大,3 小时后河北省大部分地区被大雾笼罩,多地出现能见度小于 100 m 的浓雾,持续长达两天时间。这次大雾过程有出现时间早、浓度大、维持时间长、影响范围广的特点,是一次非常典型的华北地区辐射雾^[11]。

1.2 资料

1) 美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)的 FNL (final operational global analysis)再分析资料,垂向共 26 层,每天 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 (世界标准时(coordinated universal time, UTC)) 4 个时次的资料,包括经向和纬向风速分量、相对湿度、2 m 空气温度及海表面温度等 26 个变量(<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2>)。

2) 河北省气象局高速公路自动观测站提供的每小时气象要素,包括能见度、风向风速和温度。

3) 中国气象局常规地面自动观测站点提供的每 3 小时气象要素,包括能见度、风向风速、气压、温度和露点温度。

高速公路观测站和气象常规观测站共 145 个观测站点(其中常规气象观测站点 71 个,高速公路观测站点 74 个)的分布如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 能见度计算方法

WRF 模式并不直接输出能见度数据。本文选取垂直层次的第一层混合相态水含量(雨水、雪水、云水、云冰含量之和)来计算能见度,主要参考并使用 Kunkel^[17]的研究结果和计算方法。

大气水平能见度 AVH (atmospheric horizontal visibility)与消光系数 β 之间的关系如下:

$$AVH = -1000 \ln(0.02)\beta,$$

式中,AVH 的单位是 m。 β 的计算方法如下:

$$\beta = 144.7 MWC^{0.88},$$

MWC (visibility-mixed-phase water content)表示混合相态水含量(g/m³)。

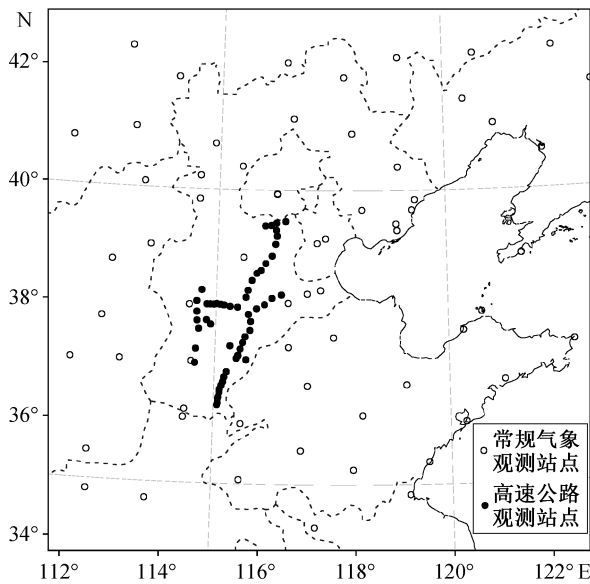


图1 高速公路站点与常规气象观测站点在D03区域内的分布情况

Fig. 1 Distribution of freeway and meteorology observation stations in D03

2.2 ETS 和 Bias 评分

本文使用常规气象观测站和河北省高速公路自动站能见度数据以及实验模拟结果,进行逐小时 ETS 和 Bias 评分^[18-20],对实验模拟效果做出评价。计算公式如下:

$$ETS = \frac{H - R}{F + O - H - R}, \quad B = \frac{F}{O},$$

F 为模拟结果。对于区域内的所有测站,如果模式模拟测站出雾,则记一次 $F=1$, 否则 $F=0$ 。 O 为观测结果,观测站出雾则 $O=1$, 否则 $O=0$ 。 H 为正确的模拟结果,当测站模拟的结果出雾且同时观测站出雾,计算为一次正确预报,则 $H=1$, 否则 $H=0$ 。 $R=F \times O / N$ 为权重系数, N 为模拟区域内观测站的总数。ETS 可以衡量模拟结果的好坏,取值范围为 $-1/3 \sim 1$, 其值越高,说明模拟的结果越好,当模拟结果与观测完全一致时, $ETS=1$ 。Bias 可以衡量模拟结果的空间偏差,其值为 1 说明模拟结果最理想,大于 1 说明模拟的雾区范围过大,小于 1 说明模拟的雾区范围小于观测值。

3 模拟区域及实验方案设计

3.1 模拟区域

左全等^[11]用 WRFV3.5 对此个例做了模拟,本

文选用 WRFV3.7 对此次大雾过程进行研究。选择相同的模拟区域,区域设置如图 2 中 D01, D02, D03, D04 和 D05 所示,水平分辨率分别为 30 km, 10 km, 3.3 km, 1.1 km 和 222 m; 模式的顶层为 50 hPa, 垂直方向共分为 40 层。用 NCEP 每 6 小时一次的 FNL 全球分析资料作为模式初值和侧边界条件。实验模拟的起始时间为 2013 年 1 月 21 日 08:00, 共运行 24 小时。

3.2 实验方案及实验设计

本研究对不同边界层方案进行模拟实验,结果表明各方案都可以模拟出雾区,但是出雾时间都有一定的滞后(图略),这与左全等^[11]的结论一致,因此选择模拟效果最好的 QNSE 方案作为 PBL 实验。采用连续嵌套的方式,设计 PBL3.3km(3p)实验、PBL1.1km(4p)实验和 PBL222m(5p)实验,以便检验 PBL 方案对此次辐射雾的模拟效果。模式的物理过程为 WSM-6 微物理过程方案^[21]、RRTM 长波辐射方案^[22]、Dudhia 短波辐射方案^[23]、Kain-Fritsch 积云参数化方案^[24]以及 QNSE 边界层方案^[25]。从 D03 区域开始关闭积云参数化方案。

WRF-LES 大涡模拟除在实验的最内层关闭了边界层方案和积云参数化方案并使用大涡模拟外,还使用了与相应的 PBL 实验相同的区域、垂直分

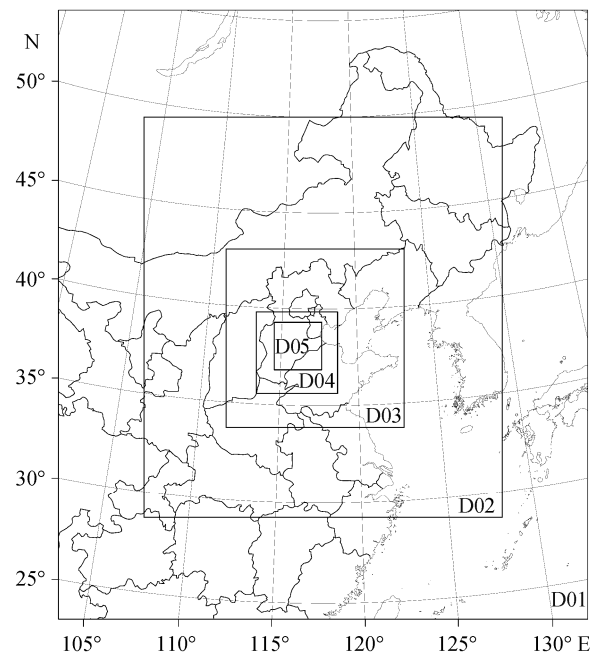


图2 各实验的模拟区域

Fig. 2 Configurations of the nested model domains

分辨率以及基本相同的物理过程参数化方案。本文通过 LES1.1km(4l)实验和 LES222m(5l)实验, 检验改变水平分辨率对 LES 模拟结果的影响。

WRF 模式提供一种 ndown 动力降尺度方法(http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap5.htm), 其核心是单向嵌套, 也就是利用已经生成的粗分辨率网格模拟结果, 通过 ndown 程序生成细分辨率网格运行所需的初始侧边界条件, 并读取更高分辨率的下边界条件(地形高度、地表类型等), 积分得到精细的模拟结果。

本文利用 PBL 实验的模拟结果(相对粗分辨率网格), 通过 ndown 程序计算, 输出更细分辨率网格的初始边界条件数据。在细分辨率网格的基础上, 利用 WRF 单层模式对此次辐射雾过程进行模拟, 得到比 PBL 实验更高分辨率的模拟结果。为了检验动力降尺度方法对此次辐射雾过程模拟的可行性, 本文设计两组实验: 一组在细网格的 WRF 单层模拟中关闭边界层方案并使用大涡模拟, 将 PBL 实验与大涡模拟(LES)相结合, 即 ndLES-1.1km(3p4l)实验和 ndLES222m(4p5l)实验; 另一组

为比对实验, 在细网格的 WRF 单层模拟中继续选用 PBL 方案, 即 ndPBL222m(4p5p)实验。在最后的单层 WRF 模式中选用大涡模拟还是 PBL 方案, 是 ndLES1.1km 和 ndLES222m 与 ndPBL222m 的主要区别。

不同实验的分辨率、边界层和积云参数化方案设置见表 1。由于 ndLES1.1km(3p4l)实验与 LES-1.1km(4l)实验的区别在于前者关闭了 D04 的 feedback 项, ndLES222m(4p5l)实验与 LES222m(5l)实验、ndPBL222m(4p5p)实验与 PBL222m(5p)实验的区别在于前者关闭了 D05 的 feedback 项, 因此 ndLES1.1km, ndLES222m 和 ndPBL222m 的这几项不在表 1 中列出。

4 实验结果和分析

4.1 PBL 方案的模拟结果

从模拟结果(图 3)可以看到: 随着水平网格分辨率提高, WRF 模式 PBL 方案对雾结构的模拟变得更加清晰, 其中以 PBL222m 实验最理想; 3 组实验模拟的雾区都是在河北省南部与山东省交界的区

表 1 各实验的模式分辨率、水平格点数和边界层方案设置

Table 1 Configuration of resolution, horizontal grid points and boundary layer schemes of different experiments

实验名称	参数名称	参数设置				
		D01	D02	D03	D04	D05
PBL3.3km(3p)	分辨率	30 km	10 km	3.3 km	—	—
	水平格点	100×115	202×226	301×301	—	—
	边界层方案	QNSE	QNSE	QNSE	—	—
	feedback	—	1	1	—	—
PBL1.1km(4p)	分辨率	30 km	10 km	3.3 km	1.1 km	—
	水平格点	100×115	202×226	301×301	412×412	—
	边界层方案	QNSE	QNSE	QNSE	QNSE	—
	feedback	—	1	1	1	—
LES1.1km(4l)	分辨率	30 km	10 km	3.3 km	1.1 km	—
	水平格点	100×115	202×226	301×301	412×412	—
	边界层方案	QNSE	QNSE	QNSE	—	—
	feedback	—	1	1	1	—
PBL222m(5p)	分辨率	30 km	10 km	3.3 km	1.1 km	222 m
	水平格点	100×115	202×226	301×301	412×412	1201×1201
	边界层方案	QNSE	QNSE	QNSE	QNSE	QNSE
	feedback	—	1	1	1	1
LES222m(5l)	分辨率	30 km	10 km	3.3 km	1.1 km	222 m
	水平格点	100×115	202×226	301×301	412×412	1201×1201
	边界层方案	QNSE	QNSE	QNSE	QNSE	关闭
	feedback	—	1	1	1	1

域最先开始发展。虽然提高了网格水平分辨率,但出雾时间并没有提前,可以看到 PBL3.3km 实验、PBL1.1km 实验和 PBL222m 实验的出雾时间均为 21 日 21:00,比实际爆发时间(21 日 18:00)晚约 3 小时,这与左全等^[11]的实验结果一致。另外,21 日 21:00,3 组实验的 ETS 评分(图 4(a))分别为 0.071, 0.025 和 0.122,表明 PBL222m 实验表现最好;而在 21 日 23:00 后的时间段,PBL222m 实验的 ETS 评分并不理想,是 3 组实验里最低的。通过这 3 组实验可以看出,传统的 PBL 方案对此次辐射雾爆发的模拟效果比较差,因此不能简单地通过提高水平网格分辨率来提高 PBL 方案的预报效果。

4.2 LES 的模拟结果

从模式结果(图 5)可以看出,采用 LES 可以改善对此次辐射雾的预报效果。特别是对雾爆发的预报,LES 比传统 PBL 方案有很大改进,模拟的出雾时间提前 4~5 小时。LES 虽然比 PBL 提前了出雾时间,但比实际出雾时间超前 1~2 小时。实际观测到的出雾时间为 21 日 18:00,而 LES1.1km 实验在 21 日 16:00,LES222m 实验在 21 日 17:00 即出现雾区,均早于实况。在左全等^[11]的研究中,LES1.1km 实验的出雾时间为 21 日 17:00,比本文相同的实验晚 1 小时,初步归因为 WRF 版本的差异。更新地形数据后,WRFV3.7 对受地形影响的小尺度过程能够模拟得更加精细。此外,对比图 5 中上下两行可以看到,LES1.1km 实验在 21 日 16:00 即在 D05 区域北部出现雾区,并在 21 日 17:00 发展扩大;LES222m 实验虽然也在 21 日 17:00 开始出现雾区,但仅为中部小范围雾区,比 LES1.1km 实验更接近实况。结果表明通过增加嵌套层数提高网格水平分辨率,可以改进 LES 对出雾时间的预报效果,这与左全等^[11]的研究结论相吻合。

从 D03 区域的 ETS 和 Bias 评分(图 4)可以看到:LES1.1km(4l)实验 21 日 18:00 的 ETS 为 0.006, Bias 为 3.75;LES222m(5l)实验 21 日 18:00 的 ETS 为 0.041, Bias 为 2.25。评分结果表明,在实际出雾时间 21 日 18:00,LES222m 实验比 LES1.1km 实验的模拟效果更好,更接近实况。

与 LES1.1km 实验相比,LES222m 实验虽然在预报雾爆发时间上有所改进,但两者在 21 日 19:00 的 ETS 评分区别并不明显。21 日 19:00 的 ETS 评分,LES1.1km 实验为 0.133,LES222m 实验为 0.131。21 日 20:00 后,LES222m 实验的 ETS 评分反而

比 LES1.1km 实验低,LES1.1km 实验 ETS 评分单次最高为 21 日 23:00 的 0.611,高出 LES222m 实验单次最高值(21 日 23:00 的 0.430)约 42.1%。

从所模拟的此次辐射雾整个时间段来看,LES 存在前期空报、后期漏报的现象。辐射雾爆发及维持阶段,LES 方案较 PBL 方案有很大的改进,ETS 评分也高,与实况更接近。但是,在 22 日 01:00 之后,LES 方案模拟的雾区快速消散,Bias 逐渐小于 1,ETS 逐渐低于 PBL 方案,并有直线下降的趋势,说明 LES 方案在此次辐射雾过程后半阶段的模拟效果并不理想,而 PBL 方案在后半段的 ETS 及 Bias 评分表现都相对较好,更接近实况。

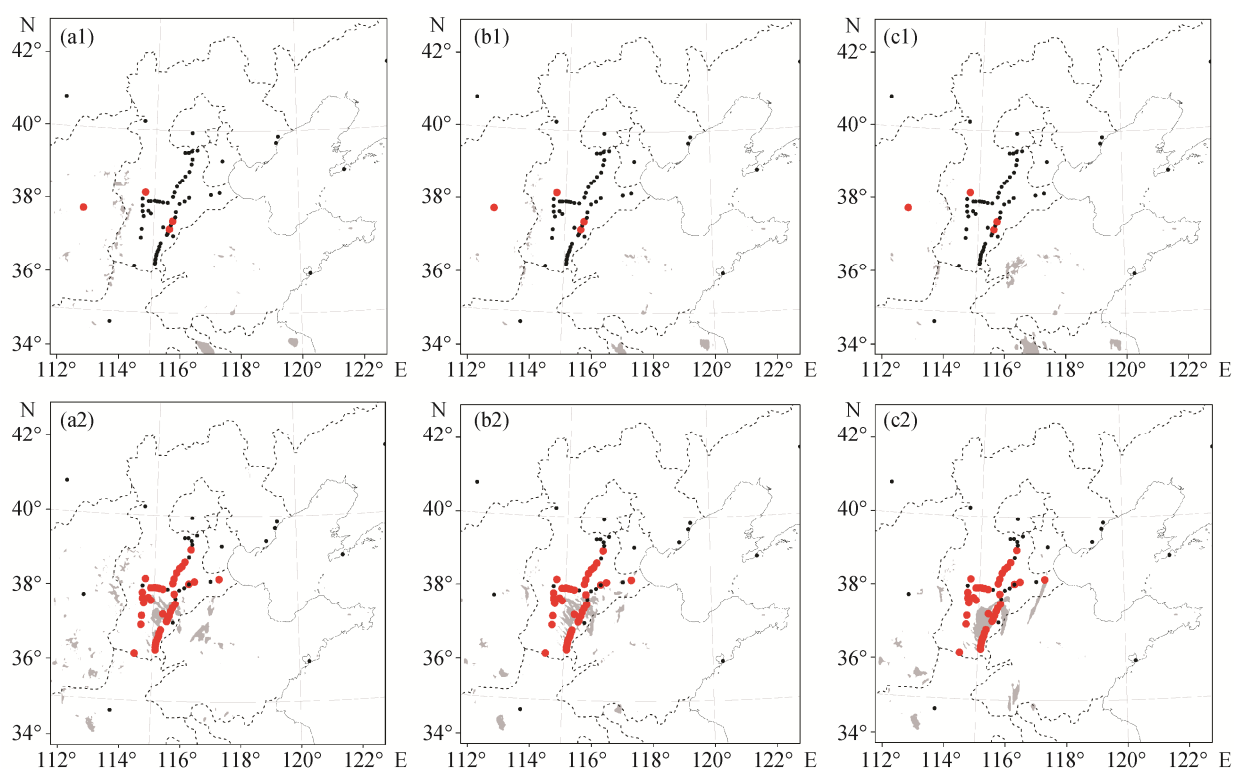
总结 4.1 节和 4.2 节的结果可以看到,对于出雾时间的模拟,传统的 PBL 边界层方案与实况有 3 小时左右的滞后,LES 方案虽然提前了出雾时间预报,但又比实际出雾时间偏早 1~2 小时。如果能将两个方案进行有机的结合,应该可以对此次辐射雾的出雾时间进行准确模拟。

4.3 动力降尺度方法的模拟结果

我们发现,LES 方案模拟此次辐射雾过程比 PBL 方案花费更多的计算机时(图 6),LES1.1km 实验比 PBL1.1km 实验计算机时多 10.07%,LES222m 实验比 PBL222m 实验计算机时多 23.63%。如果采用增加嵌套层数来提高水平网格分辨率的方法,则需要花费几倍甚至几十倍的计算机时,PBL1.1km 实验的机时是 PBL3.3km 实验的 10.06 倍,PBL222m 实验是 PBL1.1km 实验的 21.59 倍,LES222m 实验是 LES1.1km 的 44.59 倍。可见,提高模式分辨率必然耗费大量的计算资源,在目前的日常业务预报中难以实现。

本文采用动力降尺度方法,利用 LES 重新进行 WRF 模拟运算,得到更高分辨率的模拟结果。利用 PBL3.3km 实验的模拟结果设计 ndLES1.1km 实验,并利用 PBL1.1km 实验的模拟结果分别设计 ndLES222m 实验和 ndPBL222m 实验。

对比 PBL1.1km 实验(图 3(b1)~(b2))、LES1.1km 实验(图 5(a1)~(a3))和 ndLES1.1km 实验(图 7(a1)~(a3))可以发现,PBL1.1km 实验的出雾时间为 21 日 21:00;LES1.1km 实验在 21 日 16:00 就已经有小面积的雾区出现;ndLES1.1km 实验在 21 日 17:00 模拟出雾区,是相对最接近实况(21 日 18:00)的实验。结果表明,ndLES1.1km 实验对此次辐射雾过程出雾时间的预报效果有很大的改进。



a, b 和 c 分别代表 PBL3.3km, PBL1.1km 和 PBL222m, 1 和 2 分别代表 21 日 18:00 和 21:00 的模拟结果; 黑色圆点代表没有出雾的观测站, 红色圆点代表出雾的观测站, 灰色表示模拟的雾区(雾区的定义为能见度小于 1 km 的区域)

图 3 D03 区域地面观测站与不同 PBL 实验雾区对比

Fig. 3 Comparison of observation and different PBL simulations in D03

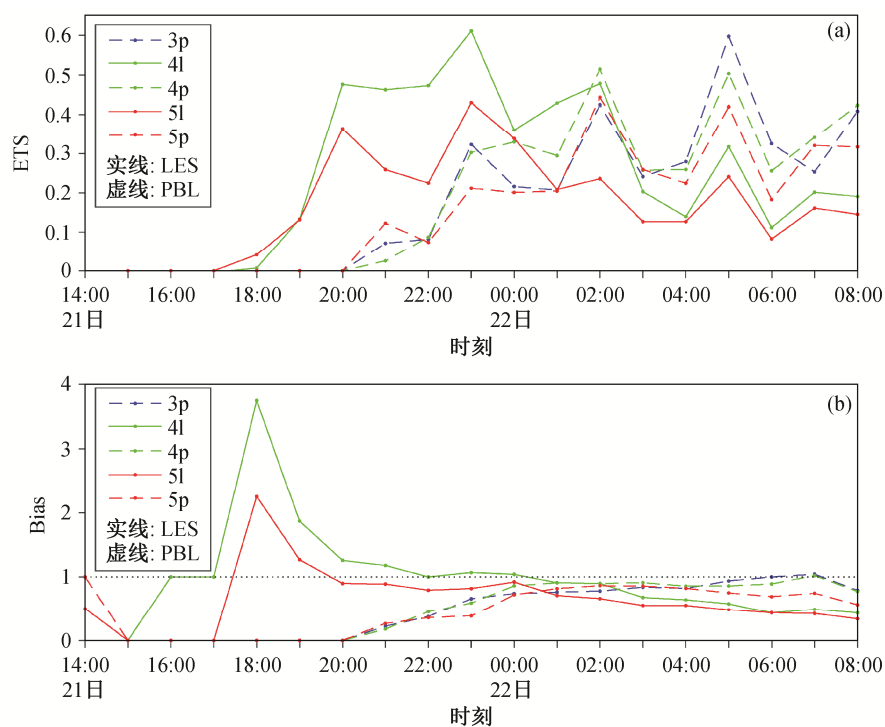
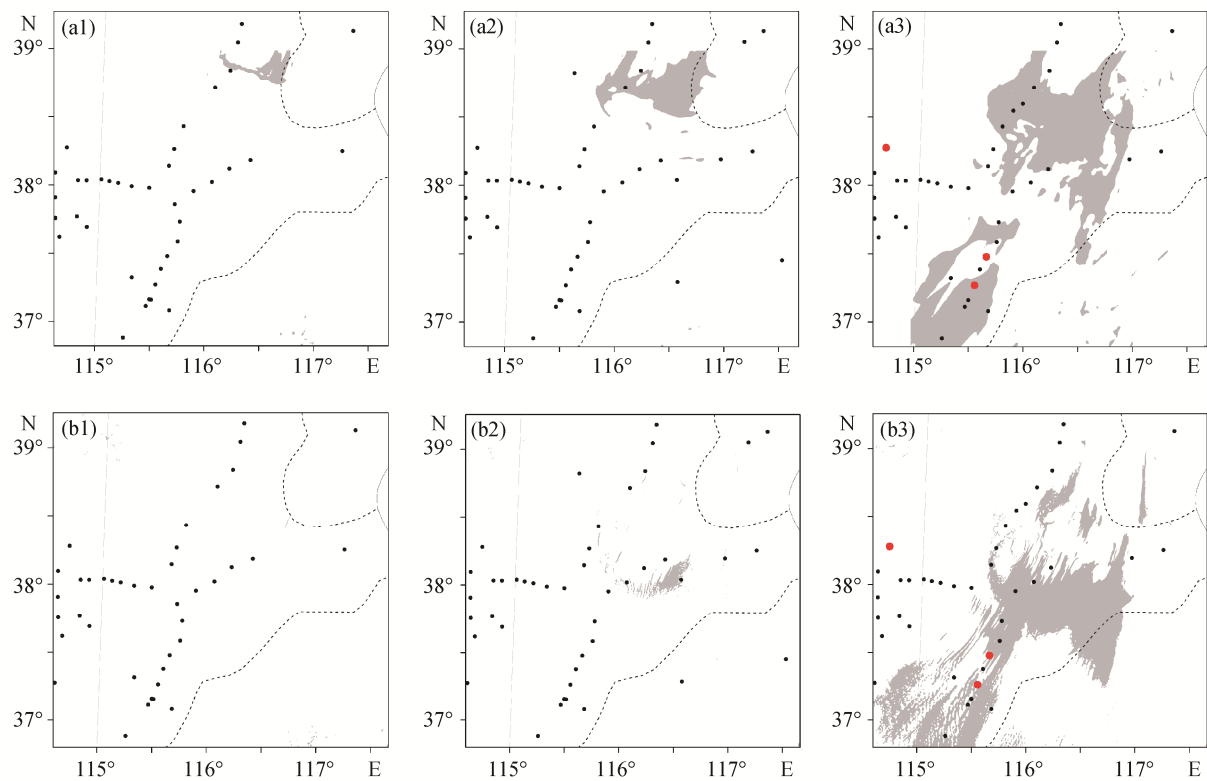


图 4 D03 区域不同模拟实验的 ETS 和 Bias 评分

Fig. 4 ETS and Bias of different experiments in D03



a 和 b 分别代表 LES1.1km 和 LES222m, 1, 2 和 3 分别代表 21 日 16:00, 17:00 和 18:00 的模拟结果; 黑色圆点代表没有出雾的观测站, 红色圆点代表出雾的观测站, 灰色表示模拟的雾区(雾区的定义为能见度小于 1 km 的区域)

图 5 D05 区域地面观测站与不同 LES 实验雾区对比

Fig. 5 Comparison of observation and different LES simulations in D05

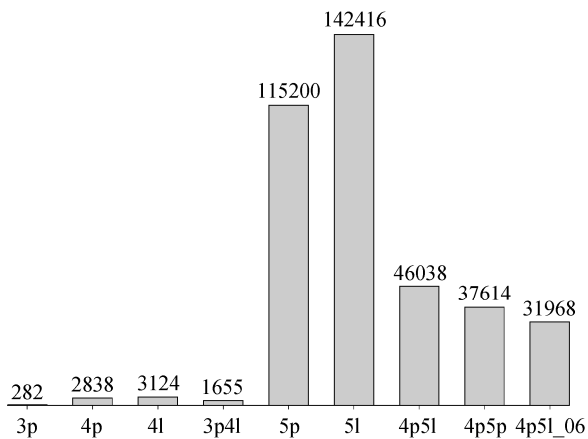


图 6 各实验所需的计算机时

Fig. 6 Computational time of different experiments

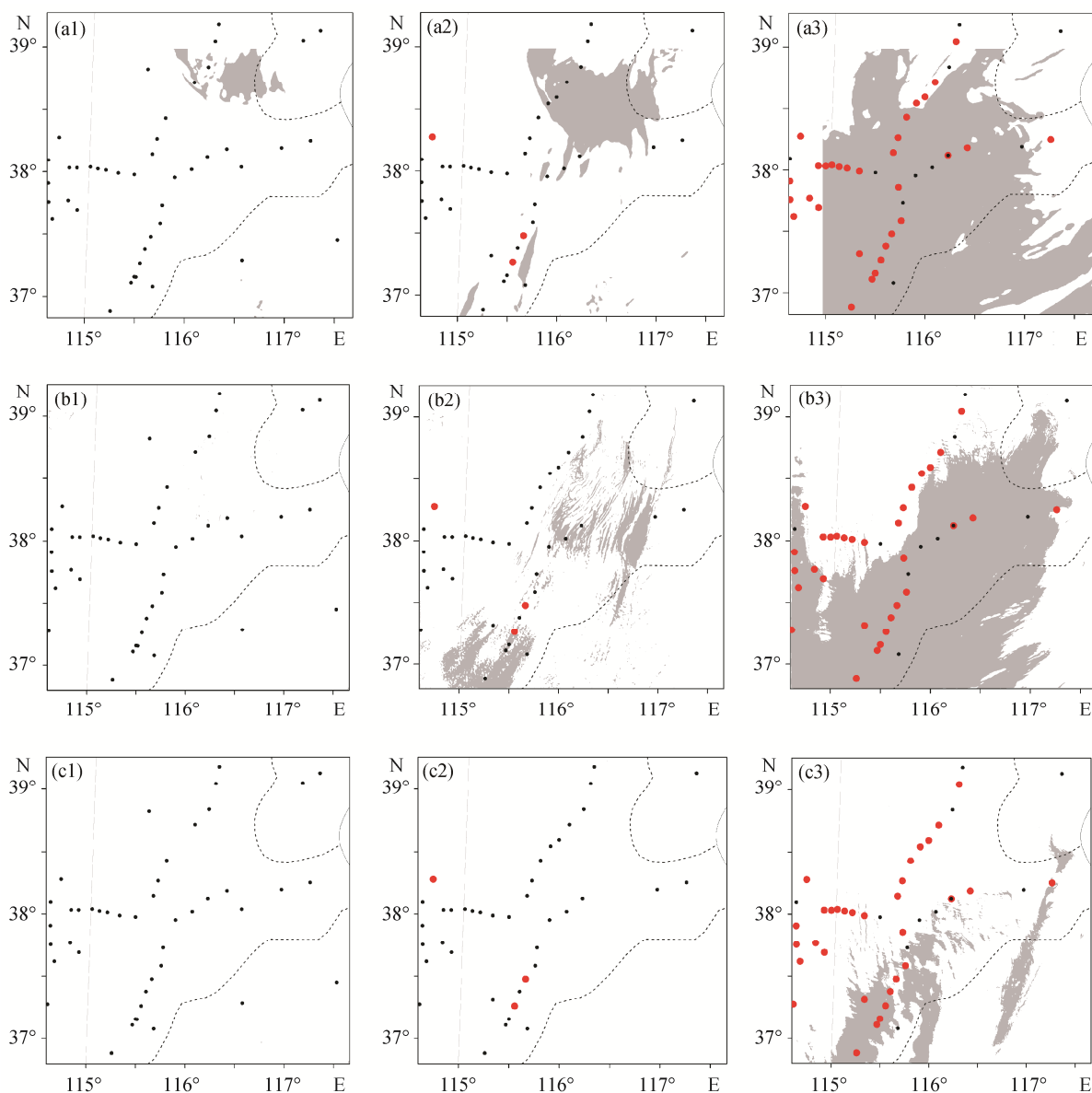
与 PBL1.1km 实验和 LES1.1km 实验相比, nd-LES1.1km 实验虽然模拟结果最接近实况, 但预报的出雾时间并不准确, 而是早于实际出雾时间 1 小时。并且, ndLES1.1km 实验在 D05 区域的 ETS 评分(图 8 中深蓝色线) 21 日 18:00 为-0.027, 19:00 为

-0.006, 在所有 LES 实验中是最低的, 模拟效果不理想。为了进一步提高网格分辨率, 我们在 PBL-1.1km 实验模拟结果的基础上分别设计 ndLES222m 实验和 ndPBL222m 实验。

从作为比对试验的 ndPBL222m 实验模拟结果(图 7(c1)~(c3))可以看出, 该实验对出雾时间的预报效果没有明显改善, 21 日 21:00 才模拟出雾区, 晚于实况约 3 小时。这个结果也说明传统的 PBL 方案对此次辐射雾爆发的模拟效果并不理想, 不管是通过提高水平网格分辨率, 还是采用动力降尺度方法, 都并不能将出雾时间提前。另外, 从图 6 可以看到, ndPBL222m 实验的计算机时比 PBL222m 实验减少 67.34%。

从 ndLES222m 实验的结果可以看到, 该实验预报的出雾时间为 21 日 18:00(图 7(b2)), 与实际出雾时间一致。这个结果说明采用动力降尺度方法, 将 PBL 方案与 LES 方案相结合, 可以准确预报此次辐射雾的出雾时间。

从图 8 可以看到, 在此次辐射雾的出雾阶段,



a, b 和 c 分别代表 ndLES1.1km, ndLES222m 和 ndPBL222m。1, 2 和 3 分别代表 21 日 17:00, 18:00 和 21:00 的模拟结果; 黑色圆点代表没有出雾的观测站, 红色圆点代表出雾的观测站, 灰色表示模拟的雾区(雾区的定义为能见度小于 1 km 的区域)

图 7 D05 区域地面观测站与不同 ndown 实验雾区对比

Fig. 7 Comparison of observation and different ndown simulations in D05

ndLES222m 实验的 ETS 评分(图 8(a)中黑线)21 日 18:00 为 0.100, 21 日 19:00 为 0.254, 远远高于同时刻其他 LES 实验与动力降尺度实验的 ETS 评分。ndLES222m 实验的 Bias 评分(图 8(b)中黑线)21 日 18:00 为 1.66, 21 日 19:00 为 1.14, 在所有实验中是最接近 1 的, 说明 ndLES222m 实验可以有效地提高模拟能力, 特别是对此次辐射雾出雾时间的预报上, 效果比所有的 PBL 方案和 LES 方案更好。

此外, 从计算资源的需求上可以看到, 同样的

水平分辨率情况下, 运用动力降尺度方法进行的模拟实验所需要的计算机时明显减少: ndLES1.1km 实验比 LES1.1km 实验减少 47.02%, ndLES222m 实验比 LES222m 实验减少 67.67% (图 6)。可以看出, 利用动力降尺度方法, 将 PBL 方案与 LES 方案相结合进行模拟运算, 可以节省大量计算资源, 为业务预报提供了一种可能性。

为了进一步降低计算机时, 我们进行改变起报时间的 ndLES222m_06(4p5l_06)实验, 即将实验的

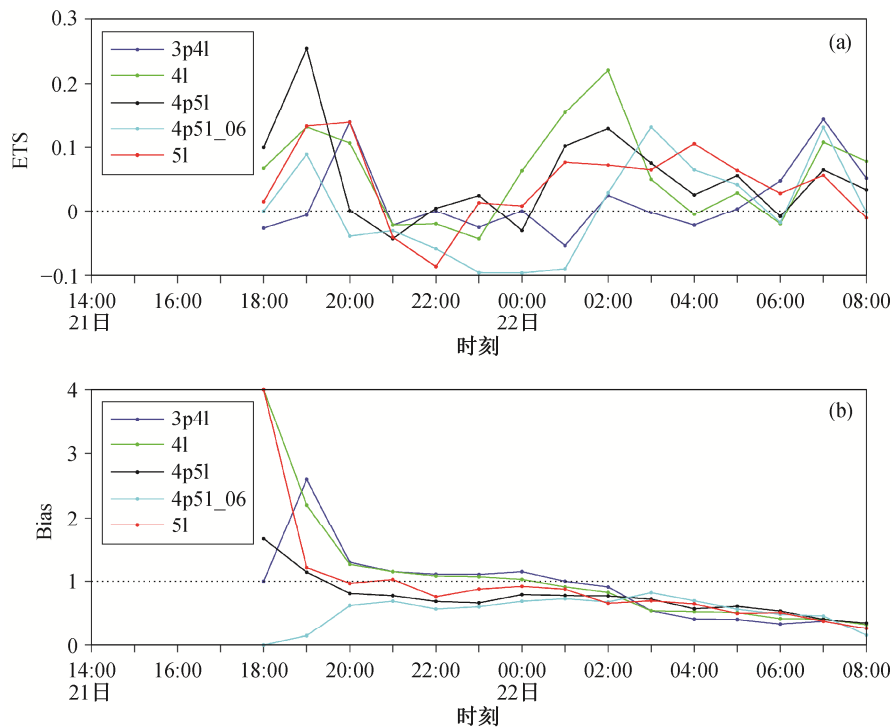


图 8 D05 区域 LES 实验与 ndown 实验的 ETS 和 Bias 评分
Fig. 8 ETS and Bias of different LES simulations and ndown simulations in D05

起报时间由原来的 21 日 08:00 延后 6 小时至 21 日 14:00。从图 6 可以看出,该实验确实能够减少计算机时,但是对此次辐射雾过程及出雾时间的预报效果并不好,模拟的出雾时间有 1 小时的滞后(图略)。并且,从图 8 (浅蓝色线)可以看到,该实验的 ETS 和 Bias 评分都不理想。

5 结论

本文采用 WRFV3.7 模式,选用 LES 和 PBL 方案设计敏感性实验,对华北地区一次辐射雾个例的起雾时间及迅速扩大阶段进行了模拟研究,主要结果如下。

1) LES 方案可以改善对起雾时间预报效果,比 PBL 方案提前 4~5 小时,但比实际出雾时间有 1~2 小时的超前。提高水平网格分辨率可以改善 LES 的预报效果,在出雾时间上 LES1.1km 实验比实况超前 2 小时,LES222m 实验比实况超前 1 小时。在 21 日 18:00 的出雾时间上,LES222m 实验在 D03 区域内预报效果比 LES1.1km 实验好,表现在 ETS 评分更高, Bias 值也更小。但是,LES 提高水平分辨率需要较多的计算资源,LES222m 实验所需计算机时是 LES1.1km 实验的 44.59 倍。

2) 运用动力降尺度方法,将传统的 PBL 方案与 LES 方案相结合,可以提高出雾时间预报的准确性。ndLES1.1km 实验比 PBL1.1km 实验出雾时间提前 4 小时,比 LES1.1km 实验推迟 1 小时,更接近实况。ndLES222m 实验能够在 18:00 准确预报起雾时间,与实况出雾时间一致,并且在 21 日 18:00 和 19:00 的预报评分也是所有实验中最高的。运用动力降尺度方法,将传统的 PBL 方案与 LES 相结合,还能节约大量计算机时。NdLES1.1km 实验比 LES1.1km 实验计算机时减少 47.02%, ndLES222m 实验的计算机时比 LES222m 实验减少 67.67%。

出雾时间是业务预报的难题,计算资源是制约业务预报发展的瓶颈。本文通过动力降尺度方法,将 LES 方案与传统 PBL 方案相结合,较成功地模拟了华北地区一次辐射雾过程,不仅提高了预报技巧,准确地预报出雾时间,同时节省了大量计算机时,展现了动力降尺度方法在辐射雾研究及业务预报中的应用前景及价值。在日常业务预报中,可以采用传统的 PBL 方案对天气过程进行模拟预报,能够在不耗费太多计算资源的前提下快速把握未来的天气形势和天气过程;在 PBL 方案预报结果显示有辐射雾出现时,应重点关注可能出雾区域,利

用动力降尺度方法, 将 LES 方案与传统 PBL 方案相结合进行 WRF 模拟预报, 可以精确定位辐射雾的发生地点和出雾时间。这样, 既可节省计算资源, 又能提高业务预报技巧。本研究为未来高分辨率业务预报系统的 LES 模拟实现提供了一种可能性, 但是本文结论有待于更多实际个例的检验。

参考文献

- [1] Bergot T. Small-scale structure of radiation fog: a large-eddy simulation study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 121: 1099–1112
- [2] Bergot T, Escobar J, Masson V. Effect of small-scale surface heterogeneities and buildings on radiation fog: large-eddy simulation study at Paris-Charles de Gaulle airport. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141: 285–298
- [3] Nakanishi M. Large-eddy simulation of radiation fog. *Boundary-layer Meteorology*, 2000, 94(3): 461–493
- [4] Román-Cascón C, Steeneveld G J, Yagüe C, et al. Radiation fogs: WRF and LES numerical experiments // 14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC). EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 11. Prague, 2014: EMS2014-375
- [5] Alizadeh-Choobari O. Large-eddy simulation of the hurricane boundary layer: evaluation of the planetary boundary-layer parametrizations. *Atmospheric Research*, 2015, 154: 73–88
- [6] Joe D K, Zhang H, Denaro S P, et al. Implementation of a high-resolution Source-Oriented WRF/Chem model at the Port of Oakland. *Atmospheric Environment*, 2014, 82: 351–393
- [7] Zhu P, Albrecht B A, Ghate V P, et al. Multiple-scale simulations of stratocumulus clouds. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D23): D23201.1–D23201.20
- [8] Deardorff J W. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers. *J Atmos Sci*, 1972, 29(1): 91–115
- [9] 蒋维楣, 苗世光. 大涡模拟与大气边界层研究: 30 年回顾与展望. *自然科学进展*, 2004, 14(1): 11–19
- [10] Cuxart J, Bougeault P, Redelsperger J. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126: 1–30
- [11] 左全, 张庆红. 大涡模拟在华北地区一次冬季辐射雾过程中的应用. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 51(3): 427–436
- [12] 王雅萍. WRF 模式气候动力降尺度的适应性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014
- [13] 徐红, 龚强. 基于 ndown 的 WRF 模式降尺度方法研究. *现代农业科技*, 2015(20): 200–201
- [14] 左河疆, 孙银川, 崔洋. WRF 模式三种降尺度方案在风功率预报业务中的效果对比分析. *电网与清洁能源*, 2013, 29(10): 105–108
- [15] 陈威霖. 基于多模式和降尺度结合的中国区域未来气候变化预估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012
- [16] 何志强, 卢新平, 金宏忆. 首都机场近 10 年辐射雾的特征分析 // 第 31 届中国气象学会年会: S3 短期气候预测理论、方法与技术. 北京, 2014: 30–37
- [17] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(1): 34–41
- [18] Muller M. Numerical simulation of fog and radiation in complex terrain [D]. Basel: University of Basel, 2006
- [19] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 303–322
- [20] Zhou B, Du J, Gultepe I, et al. Forecast of low visibility and fog from NCEP: current status and efforts. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, 169(5/6): 895–909
- [21] Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, 2006, 42(2): 129–151
- [22] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 16663–16682
- [23] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077–3107
- [24] Ma L M, Tan Z M. Improving the behavior of the cumulus parameterization for tropical cyclone prediction: convection trigger. *Atmospheric Research*, 2009, 92(2): 190–211
- [25] Sukoriansky S, Galperin B, Preov V. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 117(2): 231–257