

利用 GABLS2 客观评估 GRAPES 的 边界层参数化方案

杨军丽^{1,2} 沈学顺^{1,2} 陈炯^{1,2}

(1 国家气象中心, 北京 100081; 2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

摘要 根据 GABLS(Global Energy and Water Cycle Experiment Atmospheric Boundary Layer Study)的第 2 个个例在 GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System)单柱模式中构造了一个试验,用于检验规定的下垫面温度强迫条件下边界层过程的昼夜循环模拟能力。然后,将模拟结果与观测和大涡模拟结果进行了比较。结果表明,在规定的下垫面温度强迫下,GRAPES 模拟的 2 m 温度基本合理。然而,对于稳定条件(夜间),GRAPES 模拟的向下的感热通量比观测的大,过估 10 m 风速和摩擦速度,过估稳定边界层高度;对于不稳定条件(白天),GRAPES 模拟的向上的感热通量比观测的小,低估不稳定边界层高度,低层位温偏冷。随后的敏感试验表明,减小边界层方案中的动量和热量的背景扩散值后,GRAPES 模拟的稳定条件下的 10 m 风速和摩擦速度,以及对流边界层的风和温度的廓线更接近大涡模拟。

关键词 GABLS2;GRAPES;边界层;单柱模式

中图分类号: P435 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20180016 **文献标识码:** A

引言

大气边界层,又称行星边界层,定义为大气受下垫面影响的层次,或大气与下垫面相互作用的层次。边界层的厚度在百米到千米量级之间,边界层的运动形式主要为湍流,边界层内的主要物理过程为热量、水汽、动量等物理量的湍流交换和输送。在大气边界层内,温度、湿度和风速有明显的日变化,与我们的生活密切相关^[1],边界层顶的变化特征对雷雨、强雷暴及寒潮等灾害天气有显著的预兆性^[2],边界层是一个重要的研究方向。

GABLS 的目标是对天气预报和气候模式中不同尺度的大气边界层的描述加强理解和改进。具体做法是选择特定的个例,使用相同的规定条件(例如指定平流,近地面条件等),对天气预报和气候模式的单柱模式(SCM, Single Column Model)的模拟结果与观测和/或大涡模拟(LES, Large Eddy Simulation)比较^[3]。GABLS 目前有 4 个可选择的个例(Bazile E, Couvreur F, Moigne P L, et al. General

objectives and description of GABLS4. DICE and GABLS4 Workshop, Toulouse, 2015): ① 基于 BASE 试验(the Beaufort Sea Arctic Stratus Experiment),下垫面为海冰的 GABLS1 个例。该个例为只有湍流的理想个例,指定下垫面温度强迫;② 基于 CASES-99 (Cooperative Atmosphere-Surface Exchange Study),下垫面为草地的 GABLS2 个例。该个例为模拟昼夜循环的理想个例,指定下垫面温度强迫;③ 基于荷兰 Cabauw 和周围站点的观测,下垫面为草地的 GABLS3 个例。该个例为模拟昼夜循环真实个例。④ 基于南极高原 Dome-C(Dome-Concordia)研究站点的夏季观测,下垫面为冰雪覆盖的陆地的 GABLS4 个例。该个例的目标是研究南极高原真实的昼夜循环。单柱模式可以看作是全局模式的一个格点柱,它孤立于模式的其他部分,可用于研究基本物理问题、发展参数化和评估模式结果对参数改变的敏感性^[4]。

GRAPES 模式是由我国科学家在充分吸收国内外数值预报与相关学科的最新科研成果的基

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发计划“高精度可扩展数值天气预报模式研究”(2017YFC1501904)、国家自然科学基金青年基金“平缓下垫面稳定边界层数值模拟研究”(41405102)资助

作者简介:杨军丽,女,1978 年生,博士,高级工程师,主要从事数值模拟研究,Email: yangjl@cma.cn

收稿日期:2018 年 1 月 10 日;定稿日期:2018 年 10 月 30 日

础上,自行设计的新一代数值预报系统。该系统以多尺度通用模式为核心,以统一编程软件标准为平台。它的核心技术包括三/四维变分的资料同化技术,半隐式-半拉格朗日时间差分方法和全可压非静力平衡动力模式,可自由组合的优化的物理过程参数化方案,全球、区域一体化的同化与预报系统,以及标准化、模块化、并行化的同化与模式程序^[5]。我们已经为 GRAPES 建立了单柱模式版本,并将包括 GABLS3 等特定个例应用于 GRAPES 单柱模式中^[6-7]。本文的目标是将 GABLS2 个例应用于 GRAPES 单柱模式,希望在指定下垫面温度强迫条件下,集中考察边界层过程的性能。因此,本文首先介绍了 GRAPES 的主要物理过程参数化方案,然后介绍了如何将 GABLS2 应用于 GRAPES 单柱模式,随后分析了 GRAPES 边界层方案在规定的下垫面温度强迫下的性能,并对背景扩散进行了讨论和敏感试验,最后为总结和讨论。

1 GRAPES 模式中的主要物理过程参数化方案

GRAPES 模式包含积云对流、微物理、辐射、边界层、陆面、重力波拖曳等全套物理过程参数化方案。每种物理过程参数化方案有多种选择,用于不同的应用目的(如全球模拟、区域模拟等)。本研究选择的近地层方案为 CoLM(Common Land Model)陆面方案自带的近地层方案^[8](Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. Common Land Model (CLM): Technical Documentation and User's Guide, 2001),采用 Moinin-Obukhov 相似理论,稳定参数为 $\zeta(z/L, L$ 为 Monin-Obukhov 长度);选择边界层方案为改进的 MRF (Medium-Range Forecast)方案^[9],白天混合均匀的边界层考虑了地表和云顶驱动的涡动扩散,以及大涡产生的非局地反梯度混合,混合层以上的大气层和夜间稳定边界层考虑了基于局地梯度里查逊数的混合。

2 GABLS2 介绍及其在 GRAPES 模式中的实现

2.1 GABLS2 介绍

GABLS2 的中心目标是检验当前数值天气预报和气候模式的边界层方案对陆地昼夜循环的描述。该个例基于美国堪萨斯州(37.6°N, -96.7°E) 1999 年早秋 CASES-99 项目中两个连续的晴天(意味着相对干的陆地上强烈的昼夜循环)的观测进行

比较研究,下垫面为草地。由于 GABLS2 集中于边界层方案的比较,试验设计对强迫条件进行了简化,更便于模式间闭合廓线的直接比较,而不是与观测详细比较。当地时间(LT, Local Time)比 UTC 时间晚 5 h。规定模式从 10 月 22 日 16:00 LT 开始模拟,积分 59 h^[10]。

GABLS2 规定单柱模式的模式层顶最少为 4000 m,垂直格点最好为 log 线性分布,第一个格点接近地表,在靠近模式层顶的分辨率至少为 100 m;也可以使用模式特定的业务格点。而且,时间步长应当与所用垂直分辨率协调一致。动力粗糙长度 z_0 设为 0.03 m,热力粗糙长度 z_T 设为 $z_0/10$ 。地表的潜热通量设为其潜在值(由指定温度下含水的饱和陆面给出)的 2.5%。用到的常数为:重力加速度 $g=9.81\text{ ms}^{-2}$;参考位温 $\theta_0=283.15\text{ K}$,参考气压 $p_0=1000\text{ hPa}$,初始时刻的地表气压为 972 hPa(试验位置的海拔高度为 436 m)。水平纬向和经向地转风 u_g 和 v_g 随高度和时间为常数: $u_g=3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_g=-9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。大尺度天气散度在 10 月 23 日 16:00 LT 时被引入,并且在积分剩余时段保持常数,导致 $z\leq 1000\text{ m}$ (z 为与地表的距离)时垂直风速 $w=-0.005z/1000$, $z>1000\text{ m}$ 时 $w=-0.005\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。位温 θ 和比湿 q 的初始(16:00LT)数据在表 1 中给出。

表 1 GABLS2 规定的位温和比湿的初始数据

z/m	θ/K	$q/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$
0	288	0.0025
200	286	0.0025
850	286	0.0025
900	288	0.0025
1000	292	0.0005
2000	300	0.0030
3500	310	0.0020
4000	312	0.0015

地表温度 T (单位:°C)为局地时间 t (+24 或者 48 分别为 10 月 23 日和 24 日)的函数:

$$T = \begin{cases} -10 - 25\cos(0.22t + 0.2), & t \leq 17.4 \\ -0.54t + 15.2, & 17.4 < t \leq 30 \\ -7 - 25\cos(0.21t + 1.8), & 30 < t \leq 41.9 \\ -0.37t + 18, & 41.9 < t \leq 53.3 \\ -4 - 25\cos(0.22t + 2.5), & 53.3 < t \leq 65.6 \\ 4.4, & t > 65.6 \end{cases}$$

(1)

这里,地表温度即为下垫面的强迫^[11]。积分时,关闭辐射方案。

2.2 试验设计

GRAPES 单柱模式发展自 GRAPES 系统,最初通过在 GRAPES 系统中添加新模块等构建而成,近两年优化了 GRAPES 单柱模式,通过去除其旧版本中单柱模式积分不需要的程序代码和变量,使之成为独立的系统。优化后的 GRAPES 单柱模式不仅大大缩短了积分时间,而且可以更灵活地检验不同版本 GRAPES 系统的物理过程。GRAPES 单柱模式分为 3 部分:SI、MODEL 和 RUN。SI 将收集的各个实验的资料处理成单柱模式积分需要的初始场和大尺度强迫场,MODEL 完成单柱积分,其中物理过程来自 GRAPES 系统的物理包,RUN 目录为作业控制脚本。

GRAPES 单柱模式采用与 GRAPES 全球模拟一致的垂直分层和时间步长(即垂直方向 60 层,时间步长为 600 s)。由于 GABLS2 试验的下垫面为草地,而下垫面为裸土和植被时,CoLM 方案会计算下垫面温度,然后使用该值(而不是输入的观测值)计算近地层通量;另外,GABLS2 要求地表的潜热通量设为它潜在值的 2.5%,即需要把下垫面当作含水的饱和陆面(实际下垫面为草地)。基于以上两个原因,我们根据观测的地表温度(公式(1))和 CoLM 自带的近地层方案编写了含水饱和和下垫面的近地层通量的计算模块,令传给边界层方案的水汽通量为潜在值的 2.5%。其它设置同 GABLS2 规定。

3 结果分析

将 GRAPES 单柱模式的结果与 Svensson^[10]中观测和 LES 的结果进行比较。LES 和 CRM (Cloud-Resolving Model)一般为二维或三维模式,由于水平分辨率通常很高,能够部分解析湍流(即显式计算大涡,只对小涡进行参数化)和对流,可以和观测一起用来评估 SCM^[12-14]。

去除积分的前面几个小时的 spinup,对 10 月 22 日 20:00LT 至 10 月 24 日 07:00LT(即两个整夜和中间的一个白天)的结果进行了比较。从图 1 可以看到,规定的下垫面温度强迫在白天为正弦函数,夜间为线性函数。LES 和 GRAPES 模拟的 2 m 温度的昼夜发展大致随规定的地表温度变化,从夜

间到白天的过渡明显。对流开始发展的时段观测增长得很快,LES 的增长相当慢,GRAPES 的增长速度接近观测结果,极大值略大于观测值。下午的第 2 部分,模拟的温度比观测的下降得更快,尽管规定的地表温度没有这么快。除第 2 个夜间相对观测的 2 m 温度为明显的正偏差(Svensson^[10]认为部分原因归于强加的下垫面温度)和 10 月 23 日大约 02:00LT 时观测的 2 m 温度突然增大没有模拟出来(归因于这个突然增大没有体现在下垫面温度强迫中)外,GRAPES 单柱模式模拟的 2 m 温度与观测的接近。

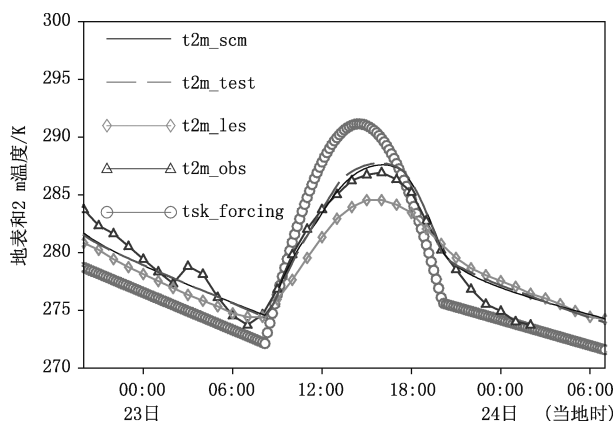


图 1 用于单柱模式和大涡模拟的下垫面温度强迫(tsk_forcing),Svensson^[10]给出的中心塔的观测和大涡模拟的 2 m 温度(t2m_obs 和 t2m_les),GRAPES 单柱模式模拟的 2 m 温度(t2m_scm),4 部分敏感试验模拟的 2 m 温度(t2m_test)(1999 年 10 月)

GRAPES 单柱模式的 10 m 风速和摩擦速度与 LES 和 Svensson^[10]中第 1 层大于 5 m 的单柱模式的表现相似,即夜间过估,白天的值与观测的接近,但 GRAPES 单柱模式昼夜差异最不明显(图 2a,b)。观测的摩擦速度在 23 日 02:00LT 的极大值与地表温度强迫中被忽略掉的局地扰动有关。第 2 个夜晚最后时段 10 m 风速的过估可能归于地转风强迫太强,而且规定的地表冷却也稍弱于观测^[10]。观测、LES 和 GRAPES 单柱模式的 10 m 风速和摩擦速度在夜晚过渡期都表现出明显的最小值。

从图 2c 可以看到,GRAPES 单柱模式模拟的夜晚向下的感热通量比观测的大,白天向上的感热通量比观测的小。我们知道,模式中感热通量与模式第一层大气的风和温度、大气和地表的温度差,以及地气湍流交换系数有关。Svensson^[10]发现模式模拟的地气湍流交换系数夜间偏大,而白天的与观

测相近。夜间时 GRAPES 单柱模式模拟的第一层大气比观测的低,因而大气和地表的温差小,向下的感热通量偏大可能与模拟的夜间 10 m 风速和地气湍流交换系数偏大有关。CASES-99 地区在早秋时非常干,观测的地表潜热通量夜间为 $0 \sim 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,白天最大值约为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。GRAPES 单柱模式模拟的潜热通量夜间的值与观测的大概相同,白天的值不超过 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 2c 的虚线。Svensson^[10]没有给出潜热通量的图,这里只给出 GRAPES 单柱模式的),与 Svensson^[10]中 SCM 的模拟结果相似。

夜间和上午的温度发展通过近地表的稳定性影响局地湍流和地表通量,进而影响边界层的发展。

GRAPES 的边界层方案中的边界层高度由总体里查逊数和临界里查逊数决定,而 Svensson^[10]中稳定边界条件下使用动量通量减小为地表值/0.95 的 5% 作为边界层高度,白天对流条件下边界层顶逆温的高度作为边界层高度。根据两个塔的观测估算得到 10 月 23 日 00:00 至 04:00 LT 的边界层高度为 $20 \sim 40 \text{ m}^{[10]}$,GRAPES 单柱模式在该时间的边界层高度(图 2d)比观测的高(为 100 m 左右),但比 LES 的低。对于白天对流边界层,根据 10 月 23 日 14:00 LT 的探空资料估算的边界层高度为 850 m,GRAPES 单柱模式的比观测的低(约为 725 m),与 LES 的接近(770 m)。

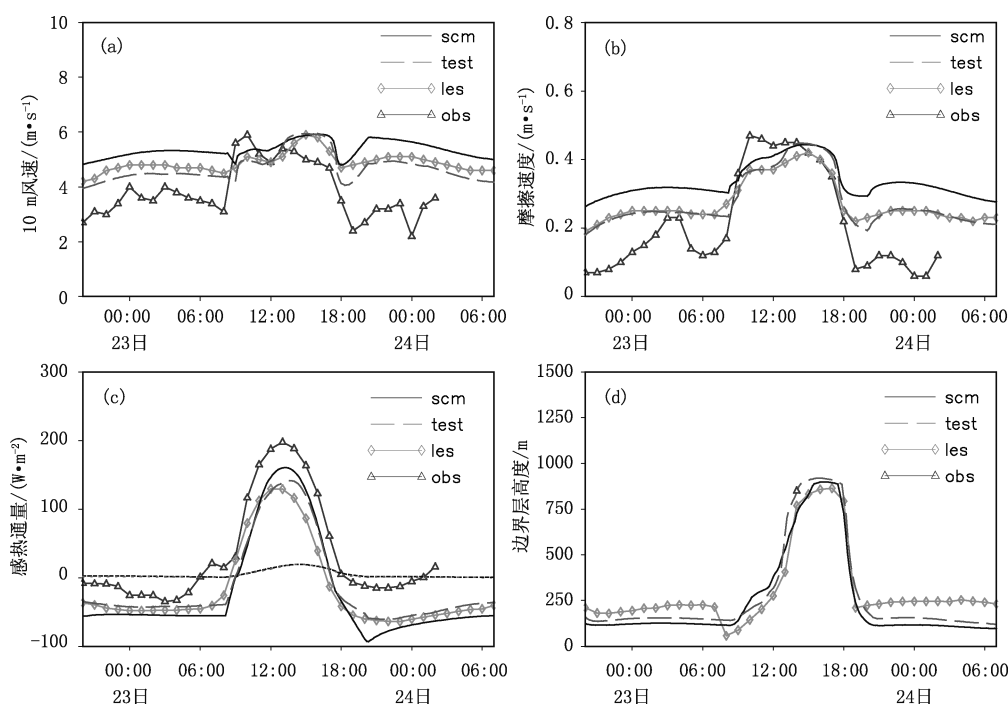


图 2 Svensson^[10]给出的中心塔的观测(obs)和 LES 模拟的(les)、GRAPES 单柱模式模拟的(scm)以及(test)4 部分敏感试验模拟的 10 m 风速(a),摩擦速度(b),感热通量(c)和边界层高度(d)(1999 年 10 月图 c 中的点线和虚线为 GRAPES 单柱模式和敏感试验模拟的潜热通量,单位与感热通量的相同)

图 3 为 10 月 23 日 14:00 LT 的位温和总水平风速的垂直廓线。GRAPES 单柱模式和 LES 模拟的位温形态与观测的基本相似:50~100 m 之间为递减(但相对观测都偏冷),其上直到大约 800 m 高度为近绝热廓线(GRAPES 单柱模式不完全为近绝热廓线),再往上为逆温区。GRAPES 和 LES 的低层位温偏低的误差与感热通量的误差是对应的(模拟的感热通量白天偏小,向上输送的通量也相应偏

小,所以整个不稳定边界层的位温会比观测偏低,低层更明显)。图 3b 中观测的风廓线变化大,可能象征着对流和水平非均匀瞬间情景^[10];而声雷达和风廓线仪测得混合边界层中为大约 $5.5 \sim 6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的近常数风速,其上层的值稍低,而在逆温区的值强烈增加。GRAPES 单柱模式模拟的总水平风速廓线与 LES 的结果相似;在逆温区的值没有强烈,归因于常数地转风强迫^[10]。

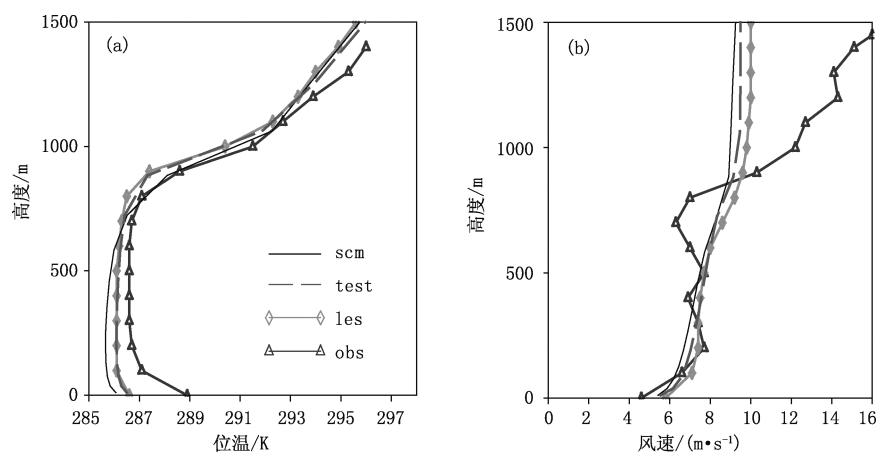


图 3 Svensson^[10]给出的中心塔的观测(obs)和 LES 模拟的(les)、GRAPES 单柱模式模拟的(scm)以及(test)

4 部分敏感试验模拟的 10 月 23 日 14:00LT 位温(a)和风速(b)的垂直廓线

4 稳定边界层模拟的讨论

Svensson^[10]的研究表明:所有模式在描述早上过渡期的近地面变量时有困难,特别是 10 m 风速和摩擦速度。第一个夜间的风速描述得相当好,但是摩擦速度过大。意味着模式的稳定性弱,夜间的湍流太积极,导致夜间和白天的差异小。从第 3 部分的比较可以看到,GRAPES 单柱模式中的这个问题更明显。GRAPES 边界层方案(即改进的 MRF 方案)中,各处动量的背景扩散都为 $3.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (目的是为了减小风的预报误差),热和湿的背景扩散随高度从 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 呈指数减少^[9]。我们将 GRAPES 边界层方案中动量和热量的背景扩散值从 3.0 和 1.0 都缩小为 0.1,其他代码都不变,来进行背景扩散的敏感试验。由于下垫面温度强迫为规定的,模拟的 2 m 温度的变化很小(图 1 中 t2m_test)。从图 2 和 3 可以看到,减小背景扩散值后,感热通量、10 m 风速和摩擦速度,以及对流边界层的温度和风廓线都有较大影响,更接近 LES 的结果。稳定边界层高度比原来高,更接近 LES,然而对流边界层的发展早于 LES 和原来的结果(图 2d),边界层高度在 23 日 14:00LT 为 840 m,更接近观测。

5 结论与讨论

本文根据 GABLS2 个例在 GRAPES 单柱模式中构造了一个检验规定的下垫面温度强迫下边界层过程性能的试验,并将模拟结果与观测和 LES 进行了比较。去除外强迫的不合理带来的影响,

GRAPES 单柱模式模拟的 2 m 温度基本合理;夜间向下的感热通量比观测的大,过估夜间 10 m 风速、摩擦速度和边界层高度;白天向上的感热通量比观测的小,低估白天边界层高度,低层的位温偏低。

将 GRAPES 边界层方案中动量和热量的背景扩散值减小后的模拟结果大有改善,除了仍然存在稳定边界层比观测高。这个敏感试验提示我们思考如何更好地考虑背景扩散来改进稳定边界层的模拟。另一方面,改进的 MRF 原方案增大背景扩散的原因是为了减小模式风的预报误差,所以在三维 GRAPES 系统中较大背景扩散值的模拟结果或许好于较小背景扩散值的结果,这提示我们思考如何更好地将单柱模式的评估结果应用于三维 GRAPES 系统中。因此,下一步的工作将是在三维 GRAPES 系统中全面评估不同背景扩散值的模拟。

参考文献

- [1] 赵鸣. 大气边界层动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 雷雨顺. 关于行星边界层顶现象[J]. 气象科技,1981(1): 10-13.
- [3] Holtslag A A M, Svensson G, Baas P, et al. Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: challenges for weather and climate models [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(11): 1691-1706.
- [4] Randall D A, Xu K M, Somerville R C J, et al. Single-column models and cloud ensemble models as links between observations and climate models [J]. Journal of Climate, 1996, 9: 1683-1697.
- [5] 薛纪善,陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社,2008.

- [6] Yang J L, Shen X S. The construction of SCM in GRAPES and its applications in two field experiment simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(3): 534-550.
- [7] 杨军丽, 沈学顺. GRAPES 单柱模式的试验研究[J]. *气象学报*, 2012, 70: 275-290.
- [8] Zeng X B, Zhao M, Dickinson R E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11: 2628-2644.
- [9] Han J, Pan H L. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system [J]. *Weather and Forecasting*, 2011, 26: 520-533.
- [10] Svensson G, Holtslag A A M, Kumar V, et al. Evaluation of the diurnal cycle in the atmospheric boundary layer over land as represented by a variety of single column models; The second GABLS experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 140: 177-206.
- [11] Kumar V, Svensson G, Holtslag A A M, et al. Impact of surface flux formulations and geostrophic forcing on large-eddy simulations of diurnal atmospheric boundary layer Flow [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49: 1496-1516.
- [12] Xu K M, Cederwall R T, Donner L J, et al. An intercomparison of cloud-resolving models with the Atmospheric Radiation Measurement summer 1997 Intensive Observation Period data [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, 128: 593-624.
- [13] Miao S G, Jiang W M. Large Eddy Simulation and Study of the Urban Boundary Layer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 4: 650-661.
- [14] 吴增茂, 盛立芳. 边界层大气大湍流模拟 (LES) 方法的研究进展[J]. *气象科技*, 1998(2): 7-12.

Objective Evaluation of PBL Parameterization Scheme in GRAPES Based on GABLS2

Yang Junli^{1,2} Shen Xueshun^{1,2} Chen Jiong^{1,2}

(1 National Meteorological Center, Beijing 100081; 2 China Meteorological Administration Numerical Prediction Center, Beijing 100081)

Abstract: Based on GABLS2 (the 2nd case of Global Energy and Water Cycle Experiment Atmospheric Boundary Layer Study), a SCM (Single Column Model) experiment is constructed to evaluate the diurnal cycle of PBL (Planetary Boundary Layer) processes in GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction System). Compared with observation and LES (Large Eddy Simulation), GRAPES simulates the 2-m temperature reasonably with the prescribed surface temperature forcing. However, it is found that the simulated downward sensible heat flux, 10-m wind speed, surface friction velocity, and PBL height are overestimated under stable condition (during nighttime), while the simulated upward sensible heat flux and PBL height are underestimated under unstable condition (during daytime). Sensitivity experiment shows that the simulated 10-m wind speed and friction velocity in the stable boundary layer, as well as the profiles of wind and temperature in the convective boundary layer, are closer to LES if the background diffusion values are reduced.

Keywords: GABLS2; GRAPES; Planetary Boundary Layer; SCM (Single Column Model)