

# 不同陆面方案对珠三角春季晴天 边界层特征模拟效果的影响<sup>\*</sup>

邹振操, 邓院昌, 邓治平  
(中山大学工学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 选用WRF中尺度模式下5种陆面参数化方案(Noah、SLAB、RUC、Pleim-Xiu和SSiB),并结合目前最新陆地覆盖产品Globcover2009,对珠三角地区春季天气个例(2014年04月27日14:00至29日14:00)的大气边界层结构进行模拟试验,同时选取研究区域内18个地面气象站及1个探空站同期实测资料与10 m风速、2 m气温、风温廓线模拟结果进行比较。结果表明:①相比采用USGS土地利用数据,Globcover2009与当前实际地表类型分布情况更相符,通过更新下垫面资料能够有效提高近地面风速和温度的模拟精度;②各陆面方案均基本能够模拟出近地面气象要素的日变化特征,受沿海低平地形影响,各陆面方案下风速被高估的现象均比较明显,而气温则被不同程度低估。其中,SLAB方案模拟10m风速效果最佳,Noah方案模拟2 m温度效果略优,SSiB方案整体模拟效果偏差;③Noah、SLAB、RUC和Pleim-Xiu方案模拟风温廓线走势基本一致且符合实况,而SSiB方案得到的边界层结构特征不够明显,主要原因是近地面垂直层设置过于稀疏。

**关键词:** WRF模式;陆面参数化方案;大气边界层;Globcover2009;珠三角地区

**中图分类号:** TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)03-0158-07

## Effect of Different Land Surface Schemes on Simulation of Characteristics of Spring Clear Day Boundary Layer in Pearl River Delta Region

ZOU Zhencao, DENG Yuanchang, DENG Zhiping

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** By using five different kinds of land surface parameterization schemes (SLAB, Noah, RUC, Pleim-Xiu and SSiB) in WRF model and combining with the latest land cover data Globcover2009, the tests about boundary layer structural features were simulated in the Pearl River delta region from 28 to 29 April 2014. Meteorological parameters, including wind speed at 10m, temperature at 2 m, vertical profile of wind speed and temperature, were evaluated and compared to the observations from 18 surface weather stations and 1 sounding station in the research area. The results show that: ① compared with the USGS land use data, distribution of land use classes in Globcover2009 is more consistent with the current actual type of surface. The simulation precision of wind speed and temperature near the surface can be effectively improved by updating the land use data; ② WRF model can simulate the diurnal variations of surface meteorological parameters basically. Due to the lowly coastal terrain, the simulations of wind speed at 10m are more easily overestimated from these five schemes, while the results of temperature at 2m are underestimated to various degrees. Among them, the simulation result of wind speed in SLAB scheme is the best and the simulated temperature in Noah scheme is more accurate than others, the error between simulations and observations in SSiB scheme is the biggest. ③ The vertical profiles of wind speed

\* 收稿日期: 2014-06-09

基金项目: 国家高新技术研究发展计划“863”资助项目(2008AA05Z414)

作者简介: 邹振操(1989年生),男,研究方向:风能资源评估及风电场选址;通讯作者:邓院昌;E-mail: dengych@mail.sysu.edu.cn

and temperature obtained by Noah, SLAB, RUC and Pleim-Xiu are almost the same in variation trend and these simulations are in line with the actual situation. The characteristics of atmospheric boundary layer from SSIb scheme are not obvious for the reason that vertical stratification near the ground is set too sparsely.

**Key words:** WRF model; land surface parameterization scheme; atmospheric boundary layer; Globcover2009; the Pearl River delta region

大气边界层是最靠近地球表面、与人类生存息息相关的大气层区域，其结构和演变都会直接影响人类的正常生活。探究边界层大气中各种物理过程的演变规律，对于研究污染物传输扩散机制、模拟中小尺度对流系统、热岛效应以及提高风场模拟准确性等都有着重要意义。目前，依靠 WRF (Weather Research & Forecasting Model) 中尺度模式再现气象要素时空变化状况或中尺度现象已成为研究大气边界层特征及演化规律的主要途径之一。如：张亦洲等<sup>[1]</sup>通过耦合 Noah 陆面方案和单层城市冠层模型优化 WRF 模式，研究北京夏季晴天边界层日变化特征，并指出精确的地表使用类型分类对于提高模式预报准确度意义重大；王腾蛟等<sup>[2]</sup>利用 WRF 模式下 YSU 和 MYJ 两种边界层方案对黄土高原丘陵地形条件下的大气边界层结构进行细致模拟，发现近地面温度场模拟效果要好于其他气象要素，YSU 方案对于对流边界层结构的模拟较为准确，而 MYJ 方案模拟稳定边界层表现更优；张振州等<sup>[3]</sup>利用 WRF 模式模拟分析海南岛地区大气边界层高度的时空变化特征，探索季节、盛行风向、海锋环流等因素对边界层高度的影响。此外，在检验耦合不同陆面过程参数化方案后中尺度模式的模拟能力方面，陈炯等<sup>[4]</sup>采用三种陆面方案对北京夏季边界层结构进行高分辨率模拟，发现 Noah 方案能够较好反映城市热岛效应，而当有降水过程发生时，陆面过程对边界层结构的影响将增大；王秋云等<sup>[5]</sup>通过 WRF 模式耦合三种陆面方案对沪宁高速沿线一次高温天气进行模拟分析，结果表明 Noah 方案预报气温准确度最高；张华等<sup>[6]</sup>选用 4 种陆面方案对贵州某风电场进行近地面风场数值模拟后发现，SLAB 与 Noah 方案得到的风功率密度与实测站数据更接近。

本文为清晰展示不同陆面模型对边界层特征模拟效果的影响，同时摒除阴雨天气条件对模拟结果的干扰，选取一个春季晴天个例（2014 年 4 月 27 - 29 日）开展研究。以 GlobCover2009 数据替换 WRF 模式原有 USGS24 类土地利用数据，并就土地利用更新对近地面风场及温度场的影响进行评

估，在此基础上，结合五套陆面方案（Noah、SLAB、RUC、Pleim-Xiu 和 SSIb）对珠三角地区大气边界层特征进行模拟分析，重点考察各陆面方案对边界层日变化规律及垂直结构特征的模拟能力。

## 1 土地利用数据与陆面方案介绍

### 1.1 土地利用数据在 WRF 中的应用

大气边界层是大气与下垫面直接发生相互作用的层次，地表粗糙度产生的拖拽力是影响边界层结构的动力因素，而非均匀下垫面引起的地表非均匀加热则是热力因素，边界层结构的日变化关键受下垫面影响。图 1 为珠三角地区土地利用更新前后对比，更新前为 20 世纪 90 年代 USGS24 类土地利用数据，即 WRF 模式默认采用的地表分类数据，更新后为 2010 年欧空局制作的全球陆地覆盖产品 Globcover2009，该数据分辨率为 300 m，是目前世界上最新、分辨率最高的土地利用数据。可以看到，两种土地利用数据的差异主要体现在城市及林地区的面积和分布上，而 Globcover2009 数据与当前实情更相符。

### 1.2 陆面方案介绍

WRF 模式是新一代中尺度预报模式和同化系统，拥有强大稳定的动力框架以及可移植、易维护、高效方便等诸多优点，主要用于 1~10 km 水平网格下大气科学研究和数值预报。本文选用 WRF3.4 模式版本进行试验，该版本提供 5 套陆面方案。

1) Noah 方案：基于俄勒冈州大学 (OSU) 陆面方案，是一个由多家机构共同开发、不断完善的陆面模式，能预报四层土壤温度和湿度，并充分考虑植被、土壤、积雪及冻土等下垫面情况对水分及能量平衡的影响，能够计算出陆面与大气交换时的多种通量。

2) SLAB 方案（即五层土壤热扩散方案）：基于 MM5 模式中的 5 层土壤温度模式，将土壤层厚度分为 1、2、4、8 和 16 cm，并将层温固定为日平均值，其重点考虑辐射、感潜热通量等能量计算，对植被作用以及某些物理量随时间变化的影响考虑不足。

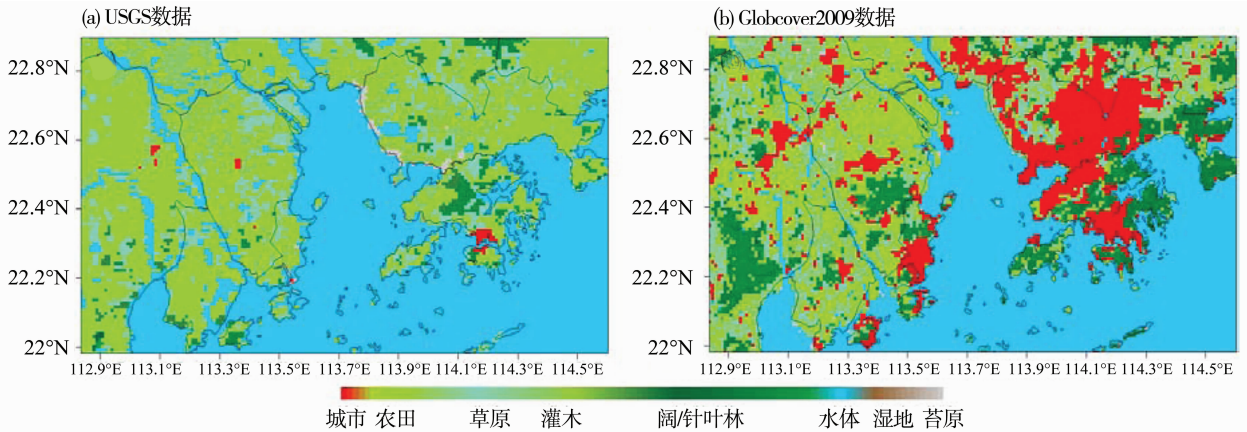


图 1 研究区域地表类型水平分布

Fig. 1 Distributions of land use classes in research area

3) RUC 方案: 基于 RUC (Rapid Update Cycle) 模式中的陆面方案, 包含 6 层土壤、2 层积雪以及植被处理方案, 对土壤冻结、雪盖温度和密度及植被效应的考虑比较细致。

4) Pleim-Xiu 方案 (以下简称 PX 方案): 基于 ISBA 模型, 属于复合的植被和地表方案, 能对两个土壤层的温度和湿度进行强制还原 (其中上层土壤厚度为 1 cm, 较低层为 99 cm), 该方案格点总体植被量和土壤参数分别来源于地表使用类别和土壤质地类型。

5) SSIb-3 方案: 第 3 代简单生物圈模式, 主要用于研究地表与大气间的相互作用, 与其它方案不同的是, SSIb 方案中第 2 个垂直层高度须设置在植被高度以上。

## 2 试验设计

### 2.1 方案设计及模拟参数设置

试验区水平范围中心为 23°N、113.5°E, 选用 NCEP FNL 全球分析资料作为模式初始场, 采用双向四重嵌套, 各层格点数及格距由外到内依次为 100 × 100, 27 m; 148 × 100, 9 m; 139 × 106, 3 km; 172 × 97, 1 km, 以最内层嵌套输出结果作为本文研究对象。模式初始积分时刻为 2014 年 04 月 27 日 14:00 (北京时间, 下同), 结束时刻为 04 月 29 日 14:00, 共 48 h, 其中前 12 h 输出结果视为模式调整期数据予以舍弃。模拟期间, 受一股干燥内陆气流影响, 研究区域天气晴朗, 边界层结构特征比较明显, 昼夜温差超过 8 °C, 当日夜间到次日上午均出现低风速气象特征<sup>[7]</sup>。

模拟方案分为 6 组 (见表 1), 其中, Noah\_U 和 Noah\_G 方案用于对比 USGS 和 Globcover2009 两种土地利用数据对近地面风场及温度场的影响; Noah\_G、SLAB、RUC、PX 和 SSIb 五组方案用于比较不同陆面方案模拟大气边界层结构效果。各试验方案中, 除陆面方案外, 其它物理过程及边界条件参数方案设置相同: 微物理过程参数化方案为 WSM6 方案; 辐射方案分别为 RRTM 长波方案和 Dudhia 短波方案; 近地面层方案为 Monin-Obukhov 方案; D01 和 D02 区域采用 Grell 积云参数化方案, 格距小于 5 km 的 D03 和 D04 区域则不采用积云方案; 行星边界层方案为 YSU 方案。

表 1 方案设计

Table 1 Test schemes design

方案名称	陆面过程	土地利用数据	垂直层数/层
Noah_U	Noah	USGS	35
Noah_G	Noah	Globcover2009	35
SLAB	SLAB	Globcover2009	35
RUC	RUC	Globcover2009	35
PX	Pleim-Xiu	Globcover2009	35
SSIb	SSIb-3	Globcover2009	28

### 2.2 实测资料

本文用于模拟结果检验的 10 m 风速和 2 m 气温逐时实测数据来源于研究区域内 18 个地面自动气象站, 垂直风廓线、位温廓线实测资料来源于京士柏探空站。模拟结果由最靠近气象站的模式格点输出。站点分布情况如图 2 所示。

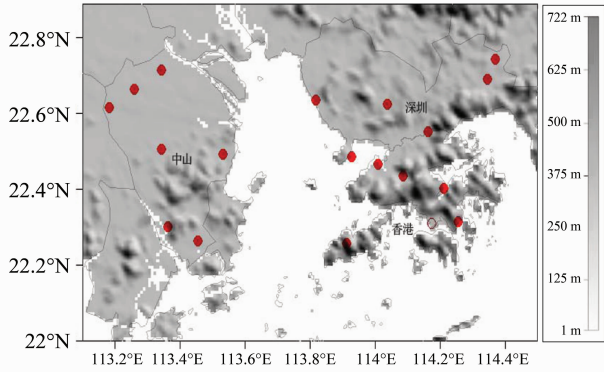


图 2 研究区域地形高度及气象站点分布  
(实心圆代表地面气象站, 圆圈代表探空站)

Fig. 2 Terrain height and distribution of meteorological stations in research area  
(Dots represent the location of surface weather stations; the circle indicates the sounding station)

### 3 试验结果分析

#### 3.1 土地利用更新对近地面风温的影响

图 3 和图 4 分别为 2014 年 04 月 28 日 12:00 研究区域 10 m 风速和 2 m 气温水平分布图。通过对比站点实测数据发现, 采用 Globcover2009 土地利用数据能有效改善近地面气象要素的模拟结果。其中, 相比 Noah\_U 方案 (图 3a), Noah\_G 方案 (图 3b) 中风速超过 3 m/s 的陆地区域明显减少, 但仍有部分站点位置模拟风速存在一定程度的高估; 对于 2 m 气温的模拟, Noah\_G 方案 (图 4b) 中温度大于 28 °C 的区域范围在 Noah\_U 方案 (图 4a) 的基础上有了明显增长, 绝大多数站点模拟气温均非常接近实测。影响两组方案模拟效果差异的主要原因是, 采用新的土地利用数据后, 城市范

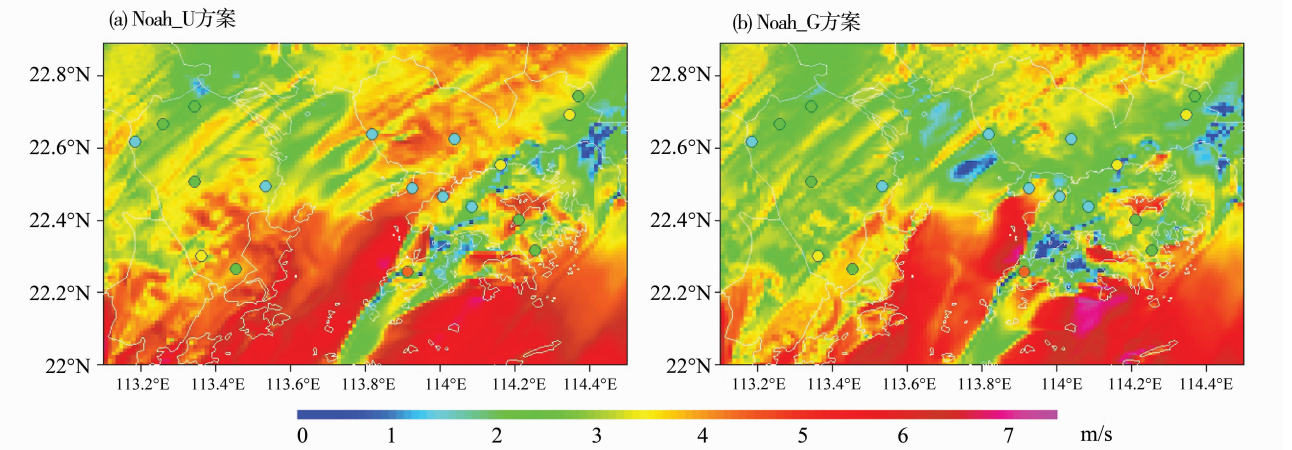


图 3 2014 年 04 月 28 日 12:00 10 m 风速水平分布 (图中水平填色为模拟, 圆点填色为实测, 下同)

Fig. 3 Horizontal distribution of 10m wind speed at 12:00, April 28 (shading is simulations, shaded circles are observations)

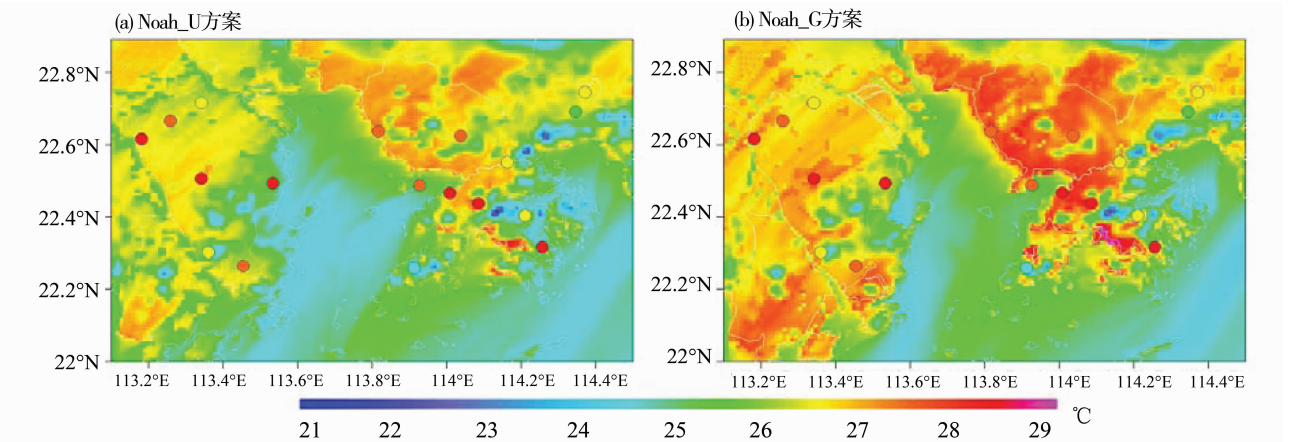


图 4 2014 年 04 月 28 日 12 时 2m 温度水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of 2m temperature at 12:00, April 28

围大大增加, 大片草地被林地所代替, 城市和林地较大的粗糙度及拖曳系数将对低层风速产生更为明显的阻碍作用, 同样, 随着土地利用数据的更新, 地表反照率、土壤热容量等参数的修正有效改善了感潜热通量模拟效果<sup>[8]</sup>, 进而提高近地面气温模拟精度。

### 3.2 陆面方案对近地面风温的影响

以香港地区石岗、昂坪两站为例, 对比分析 5 套陆面方案模拟近地面风温日变化趋势的差异。从图 5a 和图 5b 可以看出, 各方案均能大致模拟出 10 m 风速的起伏变化过程, 但风速模拟值与实测值间的差异非常明显, 相比而言, 各方案对于平稳风速的模拟好于风速处在波动阶段。石岗站模拟风速整体偏大, 而昂坪站风速则被低估, 这与两者的实际地理位置有关。石岗站三面环山, 实际高程 16 m, 昂坪站位于山腰, 实际高程 593 m, 根据相

关研究成果<sup>[9]</sup>, 低地势区域的风速易被高估, 而高海拔区域的风速易被低估。五套方案中, SSiB 方案 10 m 风速模拟误差相对较大。从图 5c 和图 5d 可以看出, 五套方案均较好模拟出了 2 m 气温的日变化特征, 但模拟气温峰值及其出现的时间则与实测值有一定偏离。如: 在石岗站, 虽然各方案模拟气温最低值出现的时间一致且准确, 但气温值却明显偏低, 其中, Noah\_G 方案模拟最低气温低于实测 2 °C 左右, 而 SSiB 方案的偏差则超过 4 °C。可能原因是模式下垫面地表类型和土壤类型与实际不相符; 在昂坪站, SSiB 方案模拟夜间温度误差显著大于其它方案, 而 RUC 方案得到的日间最高气温则为五组方案最低, 分析原因主要是不同陆面方案处理土壤湿度方式不同, 由此造成感潜热通量的模拟效果存在差异, 从而影响近地面气温的模拟。

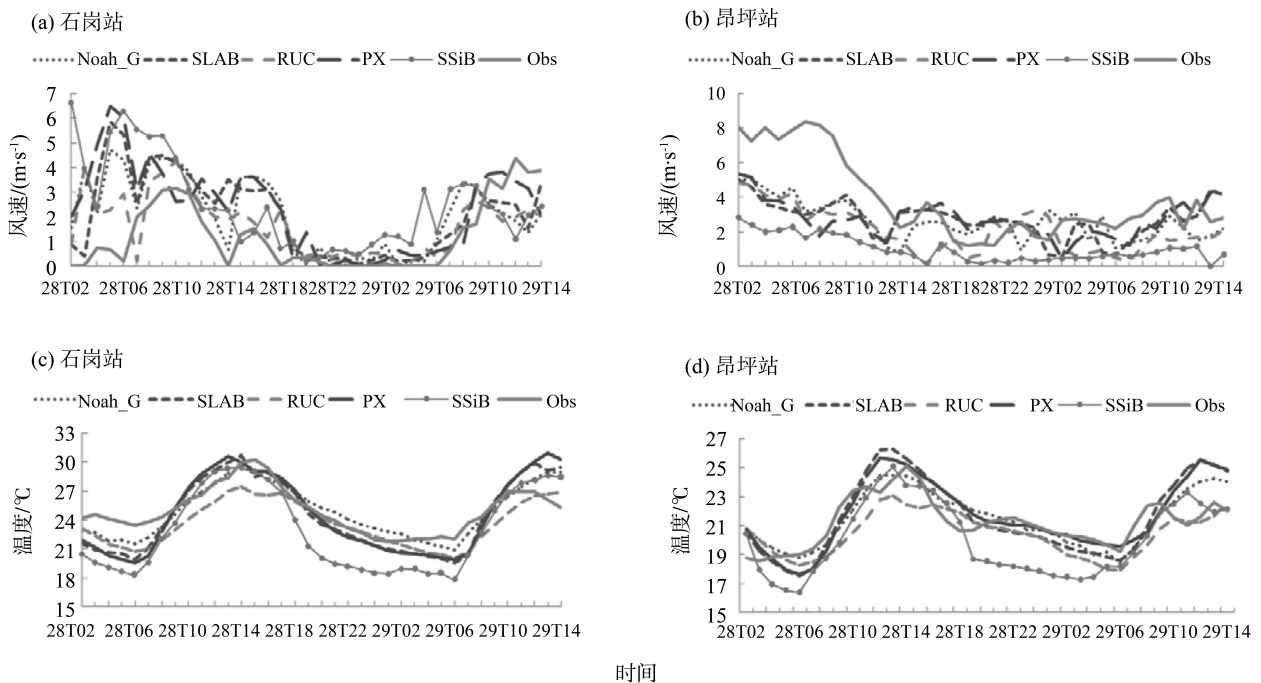


图 5 代表站点气温及风速日变化对比分析

Fig. 5 Diurnal comparison of temperature and wind speed at representative stations

此外, 采用平均偏差、平均绝对偏差、均方根误差及皮尔逊相关系数对 18 个地面站点 10 m 风速及 2 m 气温模拟结果进行统计特征分析。由表 2 可知, 3 项误差统计指标中, SLAB 方案 10 m 风速模拟误差均为最小, 而 SSiB 方案误差均为最大; 从相关系数看, SLAB 是唯一一个模拟风速与实测风速达到显著相关的方案, 意味着模拟风速的走势相

比其它方案更接近实测, 而 RUC 方案则在风速变化趋势的模拟中存在一定劣势; 由于绝大多数站点位于沿海低平区域, 近地面风速多被高估, 因此各方案 10 m 风速 MBE 值均为负。在 2 m 气温模拟中, 5 套方案的相关系数均超过 0.85, 气温模拟值与实测值为高度相关; 从模拟误差看, 各方案得到的 2 m 气温相比实测均有不同程度的偏低, 其中,

Noah\_ G 方案 MBE 值仅为 +0.260 °C，与实测值非常接近，而 RUC 和 SSiB 方案则偏离实际相对较远，MBE 值分别达到 +1.540 °C 和 +2.049 °C。整体上看，SLAB 和 PX 方案对于近地面风场的模拟较

好，而 Noah\_ G 方案模拟近地面温度场略优，SSiB 方案虽然在模拟近地面风温走势上与其他方案相差不大，但模拟误差偏大。

表 2 五套陆面方案下 18 个地面站点近地面风温模拟效果对比<sup>1)</sup>

Table 2 Statistics for 10 m wind speed and 2m temperature at all the surface weather stations for five simulations

项目	10 m 风速/(m · s <sup>-1</sup> )					2 m 气温/°C				
	Noah_G	SLAB	RUC	PX	SSiB	Noah_G	SLAB	RUC	PX	SSiB
MB	-1.059	-0.646	-1.102	-0.740	-1.126	0.260	0.864	1.540	0.909	2.049
MAGE	1.263	0.895	1.424	0.968	1.505	0.538	0.906	1.540	0.946	2.049
RMSE	1.810	1.529	2.025	1.798	2.234	1.290	1.955	1.973	2.101	3.770
corr	0.480	0.551	0.328	0.481	0.469	0.875	0.902	0.851	0.902	0.879

1) 这些统计指标常见于数值模式评估<sup>[10-11]</sup>，包括：mean bias (MB)、mean obsolete gross error (MAGE)、root mean-square error (RMSE) 及 correlation coefficient (corr)。

### 3.3 陆面方案对边界层垂直结构的影响

本文结合香港京士柏探空站 (22.31° N、114.16° E) 实测资料，对比了 5 套陆面方案下的风速与位温廓线模拟结果。2014 年 04 月 28 日 20:00 模拟结果 (图 6) 显示，各方案得到的近地层风温廓线走势基本一致，所反映出的垂直结构特征与实测资料非常吻合。由于该模拟时刻处在日落后不久，地面长波辐射冷却，热通量向下，空气虽已处在稳定层结状态，但稳定边界层厚度较小，不到 300 m。图 6a 中，在 200 m 高度附近，各方案模拟风速廓线因低空急流的存在均达到一个峰值。图 6b 中，除 SSiB 方案，其余方案得到的位温廓线均可以清楚分辨出表面层、稳定边界层、残留层的结构特征，其中，SLAB 方案因缺少植被物理过程的描述以致模拟夜间表面层温度偏低；SLAB 方案得到的残留层位温廓线与实测廓线几乎重合，Noah\_G 方案则误差较大。29 日 08:00 风温廓线模拟结果 (图 7) 显示，不同陆面方案对于边界层垂直结构的再现均存在一定偏差，其中，各方案模拟表面层位温廓线走势偏离实测较远。就风速廓线 (图 7a) 而言，RUC 方案得到的表面层风速增幅过快，SSiB 方案模拟近地层风速廓线则出现明显扭曲。同样结合模拟时刻可知，日出后，地表接受太阳辐射被加热，边界层内湍流运动加剧，空气处于不稳定层结状态。除 SSiB 方案外，其余方案得到的表面层、混合层、夹卷层结构特征均非常明显，其中，Noah\_G 和 SLAB 方案描述的混合层高度与实际比较一致，混合层高度接近 600 m (图 7b)，而 RUC 和 PX 方案模拟混合层高度偏低。另

外发现垂直分层设置对风温的垂直结构有较大影响，SSiB 方案因近地面垂直层设置过于稀疏，得到的风温廓线与其他方案差异较大，边界层结构特征不明显。

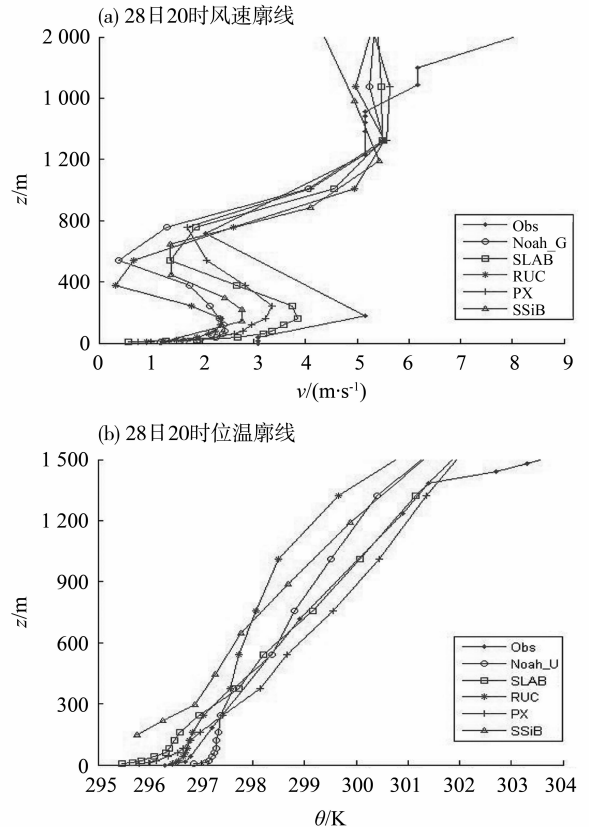


图 6 2014 年 04 月 28 日 20:00 京士柏站风温廓线  
Fig. 6 Vertical distribution of wind speed and potential temperature in King's Park station at 20:00 April 28

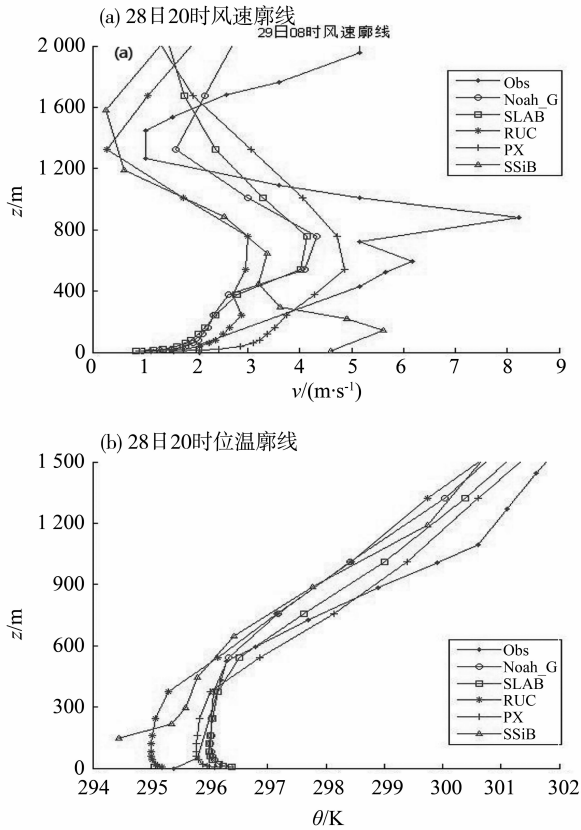


图7 2014年04月29日08:00京士柏站风温廓线  
Fig. 7 Vertical distribution of wind speed and potential temperature in King's Park station at 08:00 April 29

## 4 结论

本文选用 Globcover2009 对 WRF 模式原有 USGS 土地利用数据进行更新, 并利用模式系统下五套陆面方案对珠三角地区春季边界层结构进行 1 km 高分辨率模拟对比, 重点考察晴天天气条件下各套方案模拟近地面风场、温度场及边界层结构日变化特征的效果。结论如下:

1) 相比 USGS 数据, Globcover2009 最新陆地覆盖产品能更真实反映研究区域当前地表类型分布情况, 且能有效提高近地面风场及温度场的模拟精度。

2) 各陆面方案均能较好反映 10m 风速和 2m 气温的日变化特征, 由于实测站点多位于沿海低地势区域, 因此模拟风速被高估的现象较为明显, 而模拟气温, 尤其是夜间温度则更多被低估。此外, 各陆面方案土壤湿度处理方式的不同, 导致感潜热通量模拟效果存在差异, 进而影响 2 m 气温模拟效果。整体上看, SLAB、Noah 方案分别在近地面风、温模拟中表现最好, RUC 方案得到的日间气温偏

低, SSiB 方案风温模拟误差则明显偏大。

3) 除 SSiB 外, 其余方案模拟风温廓线效果相差不大, 所描述的边界层垂直特征亦基本符合实况, 可以认为, 近地面垂直层设置过于稀疏是造成 SSiB 方案模拟边界层垂直特征不明显的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 张亦洲, 苗世光, 戴永久, 等. 北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2558 - 2573.
- [2] 王腾蛟, 张镭, 胡向军, 等. WRF 模式对黄土高原丘陵地形条件下夏季边界层结构的数值模拟[J]. 高原气象, 2013, V32(5): 1261 - 1271.
- [3] 张振洲, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 海南岛地区大气边界层高度的时空变化特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 5(49): 783 - 790.
- [4] 陈炯, 王建捷. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比[J]. 应用气象学报, 2006, 17(4): 403 - 411.
- [5] 王秋云, 严明良, 包云轩, 等. 基于不同陆面参数化方案的高温天气数值模拟[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 537 - 544.
- [6] 张华, 孙科, 田玲, 等. 应用 WRF 模型模拟分析风力发电场风速[J]. 天津大学学报, 2013, 45(12): 1116 - 1120.
- [7] 唐敬, 蔡旭晖, 康凌, 等. 复杂地形低风速气象特征分析[J]. 气象科学, 2011, 31(4): 542 - 547.
- [8] 唐灵, 詹杰民, 李毓湘, 等. MM5 模拟垂直风剖面的准确性探讨及在垂向气象场的分析应用[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(6): 112 - 120.
- [9] JIMÉNEZ P A, DUDHIA J, GONZÁLEZ-ROUCO J F, et al. An evaluation of WRF's ability to reproduce the surface wind over complex terrain based on typical circulation patterns[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(14): 7651 - 7669.
- [10] YU C C, EDER B, DENNIS R, et al. New unbiased symmetric metrics for evaluation of air quality models[J]. Atmospheric Science Letters, 2006, 7(1): 26 - 34.
- [11] HAN Z W, UEDA H, AN J L. Evaluation and intercomparison of meteorological predictions by five MM5-PBL parameterizations in combination with three land-surface models[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(2): 233 - 249.