

# “凤凰”台风模拟对陆面方案敏感性的分析

倪煜淮<sup>1</sup>, 郭宏军<sup>2</sup>, 吴志皇<sup>3</sup>, 曾新民<sup>2</sup>

(1. 海军参谋部军事海洋环境建设办公室, 北京 100081; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 中国人民解放军 31110 部队, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 为研究台风模拟对不同陆面过程方案的敏感性, 本文以 0808 号登陆台风“凤凰”为例, 采用中尺度数值模式 WRFv3 及 NCEP 同化资料, 进行了 48 h 的数值研究。结果表明, 每一陆面方案与大气模式耦合模拟时台风中心位置及台风最大风速都呈现出该耦合系统独特的模拟特征, 如与观测台风中心位置相比, NOAH 方案模拟移动路径平均偏差最小, PX 模拟偏差最大, NOAH-PX 两方案差异可达 NOAH 方案模拟移动路径平均偏差的 40%, 可见台风模拟可因陆面方案的不同而呈现系统性的差异, 且台风模拟对陆面方案的选择是敏感的; 不同陆面方案通过模拟地表通量的差异导致温压场差异, 并进一步影响模拟台风路径及台风强度。这些结果都表明了在台风的模式预报中, 选择适当陆面方案的重要性。

**关键词:** WRF 模式; 陆面方案; 数值模拟; “凤凰”台风

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2019)07-0072-05

**DOI:** 10.11759/hyxx20190415002

我国每年都要遭受严重的台风灾害。台风登陆, 常常伴随着暴雨和大风。统计研究表明<sup>[1]</sup>, 平均有 16% 的台风移到中国沿海突然加强, 另有一些则移到沿海突然减弱甚至消失。影响台风路径和强度的因素较多, 下垫面地形和边界层摩擦等是重要的外部因子<sup>[2]</sup>。李英等<sup>[3]</sup>用中尺度天气模式 MM5 研究了台风 Nina, 发现湿地边界层通量对登陆台风的强度、结构和降水有影响, 其感热及潜热通量有利于台风的维持和增强; 张福青等<sup>[4]</sup>用热带地区 6 层模式研究台风暴雨, 发现地面潜热通量和边界层动量通量在台风的维持和增强中起重要作用。此外, 大量的研究表明, 台风结构和强度变化与冷空气、急流、西风槽、中小尺度系统等物理因子密切相关<sup>[2]</sup>, 大气内部潜热释放和斜压位能释放是近海或登陆热带气旋加强或维持的两种主要能源<sup>[3, 5-6]</sup>。显然, 台风的发展或结构变化是下垫面及大气内部过程综合作用的结果。

下垫面基本可分为陆地与海洋两部分。陆面过程模式(也称陆面方案)是反映下垫面与大气之间动量、水汽及能量交换的地球物理及生物化学的参数化方案<sup>[7-8]</sup>, 其中包含陆面通量及海洋表面通量的算法。由于台风生成、发展于海上, 不同陆面方案采用的陆地及海洋表面通量的算法有所差异, 在与大气模式耦合用于台风模拟时, 也必将对台风演变模拟结果起到重要的影响。为定量研究陆面方案的选择

对台风模拟的影响, 本文选取了 2008 年的“凤凰”台风作为代表性个例, 进行了台风登陆前后 48 h 的数值研究。

## 1 模式及方案设计

### 1.1 模式和陆面方案

本文使用的模式为 WRFv3<sup>[7]</sup>。WRF 模式作为新一代中尺度数值天气预报模式, 现已广泛应用于各种研究与业务应用中。除了极具特色的数值化动力框架外, WRF 模式还包含许多先进的物理参数化方案选项, 考虑了比较详细的陆面过程, 能描述不同下垫面的热量、水分等的传输过程, 并实现其与边界层过程的耦合, 以增强模式模拟边界层物理过程的能力。本文采用 WRFv3 模式中四种陆面方案, 即 SLAB 陆面方案、NOAH 陆面方案、PX 陆面方案、RUC 陆面方案<sup>[7-8]</sup>。

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-06-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508200); 国家自然科学基金项目(41675007)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC1508200; National Science Foundation of China, No. 41675007]

作者简介: 倪煜淮, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋环境保护研究, E-mail: 457447850@qq.com; 曾新民, 通信作者, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事天气气候模拟及陆面模式研究, E-mail: xinmin.zeng@hhu.edu.cn

上述方案中, SLAB 方案是由原中尺度模式 MM5 中五层土壤方案移植而来。该方案采用修正的强迫-恢复法计算土壤层的温度, 较少考虑土壤湿度的变化, 同时没有显示地考虑植被的影响。NOAH 方案经 OSU 陆面过程方案发展而来, 考虑了植被的影响、预报了四层(10、30、60、100 cm 厚)土壤温度和湿度以及植被冠层水分和雪盖, 其表皮温度(skin temperature)由诊断方法得到。RUC 陆面方案来自美国国家环境预报中心(NCEP)天气业务预报系统, 计算六层土壤的温度和湿度, 其中土壤温度由热扩散方程求解, 土壤湿度由 Richards 水分传输方程求解。PX 陆面方案将土壤分为 2 层, 即 1 cm 的地表上层和 99 cm 的下层, 并用强迫-恢复法来计算土壤温度与湿度。

上述方案与 WRF 中大气模块耦合后, 计算通量将发生变化。不同的地表通量将改变大气内容的动力、热力结构, 从而对模拟台风产生影响。

## 1.2 模拟方案

模拟试验使用 NCEP 的  $1^\circ \times 1^\circ$  的 FNL 全球同化资料作为初始及边界条件, 采用三重嵌套, 水平分辨率分别为 45、15 和 5 km, 中心点位于(24°N, 116°E), 其中三重区域格点数分别为  $52 \times 45$ 、 $127 \times 106$  和  $325 \times 268$ (见图 1); 垂直方向分为不等距的 31 层。物理方案采用的是 Betts-Miller-Janjic 积云对流参数化方案、简单冰相微物理方案、RRTM 长波辐射方案以及 YSU 边界层方案<sup>[7]</sup>。选取模拟时段为台风登陆前后各 24 h, 积分时间为 48 h, 时间步长为 180 s。

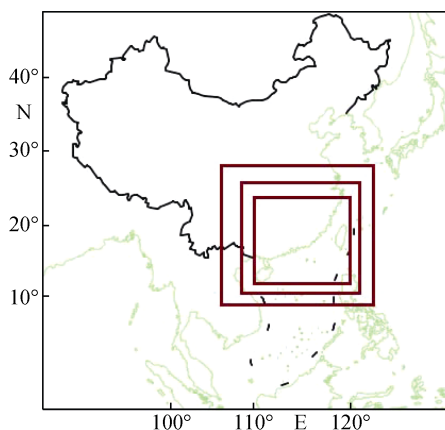


图 1 模式模拟中三重嵌套区域的划分(审图号: 9072670881)  
Fig. 1 Three nested model domains in the simulations

本文通过高分辨率嵌套模拟实验, 研究了不同陆面方案对台风过程模拟的影响。为此, 设计的模拟

区域中, 陆面区域与海洋区域的面积近似相等, 以考察面积同等区域的不同通量源在台风登陆前后的相对影响。试验一选用 SLAB 陆面方案进行模拟, 试验二选用 NOAH 陆面过程方案, 试验三选用 PX 陆面过程方案, 试验四选用 RUC 陆面过程方案。

## 1.3 “凤凰”台风概况

“凤凰”台风于 2008 年 7 月 25 日下午在西北太平洋洋面上生成, 26 日下午加强为台风, 27 日夜间加强为强台风。28 日 6 时 30 分前后在台湾花莲南部沿海登陆, 强度有所减弱, 28 日 22 时在福建福清东瀚镇登陆, 登陆时为台风最大风速为 33 m/s。登陆后, “凤凰”深入陆地, 强度逐渐减弱。29 日夜间, “凤凰”进入江西东北部, 30 日 14 时在江西鄱阳县境内减弱为热带低压。

从 500 hPa 位势高度场可以看出(图略), 台风登陆前, 位于副热带高压西南侧, 受引导气流影响, 台风向西北方向移动, 移速正常, 随着副热带高压加强西伸, 逐渐与大陆上的高压相连接, 使得“凤凰”低压环流被局限在大陆和海上的副热带高压之间, 导致“凤凰”登陆后缓慢移动; 同时副热带高压的增强与台风之间存在很强的位势梯度, 使得台风由于摩擦作用而衰减的动能可以得到补偿, 并有利于台风东侧的水汽输送得以维持和加强, 从而有利于“凤凰”登陆后维持强度。

## 2 模拟结果及分析

下面主要从台风“凤凰”的移动路径、最大风速、地表通量等这几个方面的模拟结果进行分析, 探讨不同陆面方案的影响。

### 2.1 移动路径

图 2 为模拟的台风“凤凰”移动路径与实况的对比。四种陆面方案模拟路径与实况相比均偏北。另外可以看出台风在登陆福建以前, 路径模拟结果与实况都较为接近, 登陆福建之后, 路径偏差开始变大, 但走势还基本能与实况保持一致。SLAB 方案和 NOAH 方案对移动路径的模拟效果比其他两种陆面方案好, 更接近实况。

对台风“凤凰”的移动路径模拟效果的检验可以通过对移动路径与实况的偏差来考察(表 1)。通过方案模拟结果的对比, 可以看出, 模拟效果有系统性的差异。在三种偏差中, 以 NOAH 方案最好, SLAB 方案次之, RUC 方案再次之, 而 PX 方案模拟的效果

最差。NOAH 方案的移动路径平均偏差为 73 km, 登陆后路径平均偏差为 92 km, 与 PX 方案的结果相比较, 同时刻的移动路径平均偏差及登陆后路径平均偏

差的差值达到了 29 km 及 35 km, 可见不同陆面方案可导致较大的台风路径差异, 同时说明在对台风“凤凰”的路径模拟方面对不同的陆面方案是敏感的。

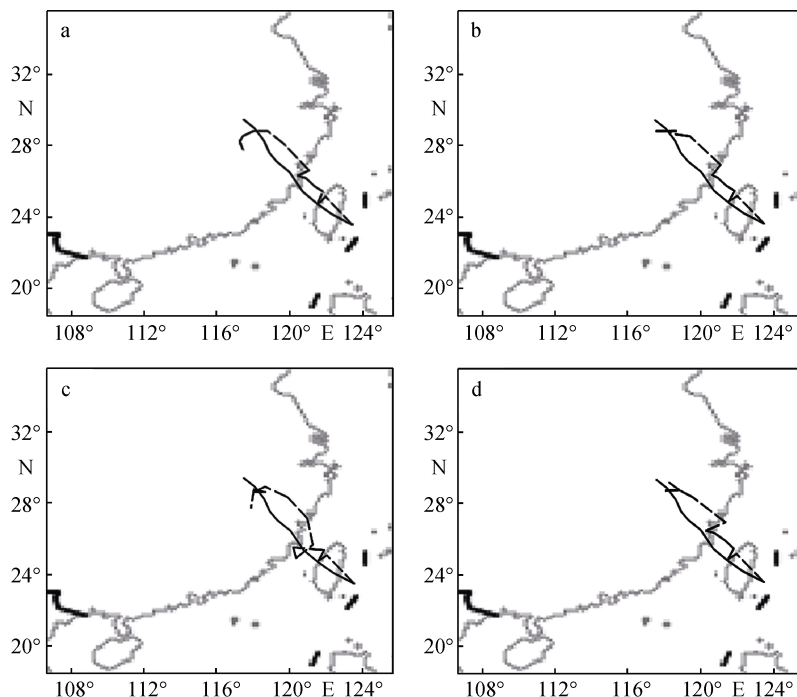


图 2 模拟的台风“凤凰”移动路径与实况的对比(实线为实况, 虚线为各方案模拟结果)

Fig. 2 Comparison of simulated and observed trajectories of the Phoenix typhoon, whereby the solid and dashed lines respectively denote observations and simulations (from the SLAB, NOAH, PX, and RUC in panels a-d, respectively)

注: a: SLAB 方案; b: NOAH 方案; c: PX 方案; d: RUC 方案

表 1 WRF 模拟“凤凰”台风的路径偏差(单位: km)

Tab. 1 WRF-simulated trajectory biases for Typhoon Phoenix (unit: km)

内容	RUC 方案	SLAB 方案	NOAH 方案	PX 方案
移动路径平均偏差	91	79	73	102
登陆后路径平均偏差	109	96	92	127
最后落点偏差	67	65	49	72

## 2.2 最大风速

图 3 给出了选用四种陆面方案模拟的地面最大风速随时间的变化曲线。类似上述模拟路径的差异, 各个时次最大模拟风速也呈现出系统性特点。四种方案, RUC 方案偏大, 而 PX 方案最小。对 RUC 方案, 与 SLAB 方案、NOAH 方案和 PX 方案的模拟结果相比, 最大差值达到 8.6 m/s, 平均已经达到 PX 方案最大风速的 20%~30%, 差异相当明显, 但后面三种方案之间差异不很明显。

## 2.3 地表通量

图 4 为模拟区域 48 小时感热通量和潜热通量平

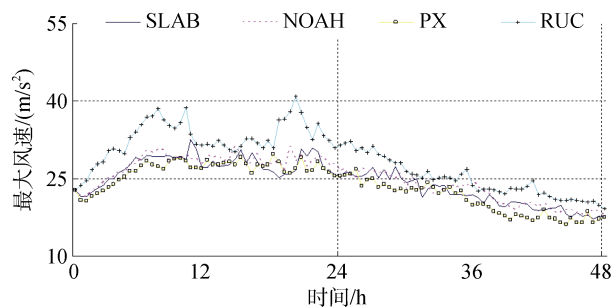


图 3 模拟区域内台风“凤凰”最大风速随模拟时间的变化(模拟时段为 28 日 02 时—30 日 02 时; 单位: m/s)

Fig. 3 Simulated variations of maximum wind speed changing with time for Phoenix within the model domain during the simulation period of 02 UTC July 28-02 UTC July 30, 2008 (unit: m/s)

均值随时间变化。在平均感热通量的比较上, SLAB 方案与 PX 方案最大差异达到  $20 \text{ W/m}^2$ , 约占平均通量最大值的 28%。对于平均潜热通量, NOAH 方案与 RUC 方案的最大差值达到  $107 \text{ W/m}^2$ , 约占 NOAH 方案平均潜热通量最大值的 23%。另外可以看出, 对通量的模拟有明显的日变化特征, 如, 感热通量在北京时 08 时—20 时比较强而晚上很小。由于模拟地表通量的差异将直接导致陆面及海面底层大气加热场的差异, 最终对模拟水平温度场的变化产生影响<sup>[8]</sup>, 再由热成风关系, 水平温度场的变化可进一步造成水平气压梯度及风速场的变化, 从而对标志台风强度的风速及标志路径的台风眼位置等构成重要影响。

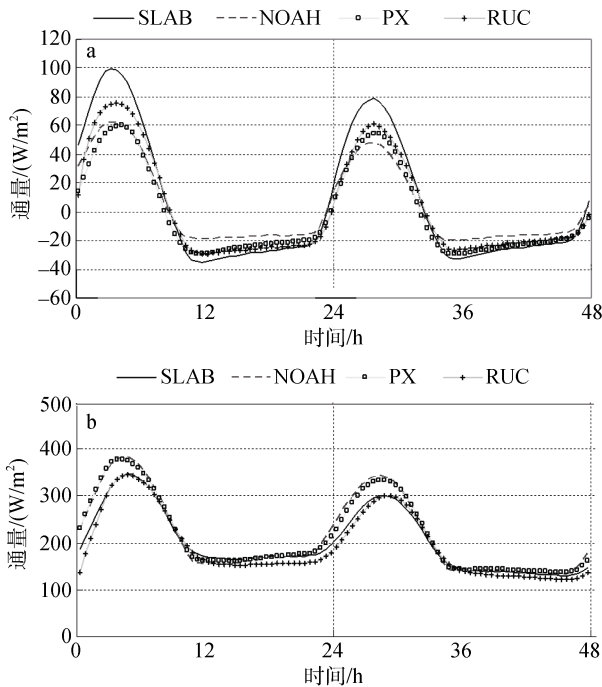


图 4 模拟区域 48 小时地表通量平均值随时间变化图(单位:  $\text{W/m}^2$ )  
Fig. 4 Simulated surface (a) sensible and (b) latent heat fluxes changing with time during the 48 hours (unit:  $\text{W/m}^2$ )

注: a: 感热通量; b: 潜热通量

### 3 结论

本文使用 WRFv3 模式, 对 2008 年 08 号台风“凤凰”进行了不同陆面过程方案的敏感性数值试验, 得出以下主要结论:

(1) 台风模拟可因陆面方案的不同而呈现系统性的差异。如模拟平均路径偏差中, 以 NOAH 方案最好, SLAB 方案次之, RUC 方案再次之, 而 PX 方案

模拟的效果最差; 四种方案地面最大风速中, RUC 方案最大, 而 PX 方案最小。由于不同陆面方案的侧重点不同, SLAB 在四种方案中结构最简单, 在一定程度上也表明, 并非陆面模式越先进、越精细, 对台风的数值模拟效果也就越好。

(2) 台风模拟对陆面方案是敏感的。如, NOAH 方案的移动路径平均偏差为 73 km, 与 PX 方案的结果相比较, 差异可达这一数值的一半左右。

(3) 不同陆面方案主要通过模拟地表通量的差异导致温压场差异, 并最终影响模拟台风路径及台风强度。

#### 参考文献:

[1] Laval K, Picon L. Effects of change of the surface albedo of the Sahel on climate[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(21): 2418-2429.

[2] Walker J M, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1977, 103(43S): 29-46.

[3] 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 683-692.  
Li Ying, Chen Lianshou. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclone[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 683-692.

[4] 张福青, 杜华武, 蒋全荣. 成熟台风边界层作用的数值研究[J]. 热带气象学报, 1994, 10(2): 107-114.  
Zhang Fuqing, Du Huawu, Jiang Quanrong. A numerical study of the boundary layer effect on mature typhoon[J]. Acta Journal of Tropical Meteorology, 1994, 10(2): 107-114.

[5] 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量对登陆热带气旋维持机制的数值试验[C]//中国气象学会: 新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“热带气旋和季风”分会论文集. 北京: 气象出版社, 2003: 148-149.  
Li Ying, Chen Lianshou. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on mechanism for sustention of landfalling typhoon[C]//Chinese Meteorological Society Innovations of Meteorological Science and Technology and Development of Atmospheric Sciences in the New Century[M]. The Tropical Cyclone and Monsoon Session of the 2003 China Meteorological Association Annual Meeting. Beijing, 2003, 313.

[6] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持的迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 167-179.

- Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after its landfall[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 167-179.
- [7] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR/TN-475 + STR[J]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 2008: 1-113.
- [8] Zeng Xinmin, Wang M, Wang N, et al. Assessing simulated summer 10-m wind speed over China: influencing processes and sensitivities to land surface schemes[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(11-12): 4189-4209.

## Sensitivity of simulated Typhoon Phoenix to different land surface schemes

NI Yu-huai<sup>1</sup>, GUO Hong-jun<sup>2</sup>, WU Zhi-huang<sup>3</sup>, ZENG Xin-min<sup>2</sup>

(1. Military Ocean Environment Construction Office, Beijing 100081; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098; 3. P.L.A. Unit 31110, Nanjing 210018)

**Received:** Apr. 15, 2019

**Key words:** WRF model; land surface schemes; numerical simulation; Typhoon Phoenix

**Abstract:** The Weather Research and Forecasting model version 3 (WRFv3) is used to analyze the sensitivity of simulated Typhoon Phoenix to different land surface schemes for a simulation period of 48 h. The results show that the typhoon simulation can show systematic differences caused by different land surface schemes, and the typhoon simulation is sensitive to the choice of land surface schemes. Different land surface schemes lead to differences in temperature and pressure fields by simulating the differences in surface fluxes, which further affects the simulated typhoon tracks and typhoon intensities. These results demonstrate the importance of choosing a proper land surface scheme in the model for typhoon forecasts.

(本文编辑: 丛培秀)