

张果,薛海乐,徐晶,等. 2016. 东亚区域陆面过程方案 Noah 和 Noah-MP 的比较评估. 气象, 42(9):1058-1068.

东亚区域陆面过程方案 Noah 和 Noah-MP 的比较评估^{*1}

张 果¹ 薛海乐¹ 徐 晶¹ 陈军明² 何会中¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 文章对天气研究和预报(WRF)模式中两套陆面物理过程参数化方案: Noah 及 Noah-MP, 在整个东亚区域做了评估。评估时间分别为 2013 年 1 和 7 月。通过对地表通量、2 m 温度、10 m 风速、地表温度、第一层(5 cm)及第二层(25 cm)土壤含水量和第一层(5 cm)及第三层(70 cm)土壤温度的偏差和均方根误差的评估, 发现: (1) 与 Noah 陆面参数化方案相比, 冬季, Noah-MP 方案模拟的地表感热通量在大部分区域偏低, 而对地表潜热通量的模拟在大部分区域偏高; 夏季, Noah-MP 方案对感热通量的模拟值, 在印度次大陆、中国西部和相邻区域以及中国东北及其以北地区偏低, 其他地区偏高, 而对地表潜热通量的模拟在大部分地区偏高, 而且幅度明显高于 1 月。(2) Noah-MP 方案提高了土壤水分和土壤温度在东亚区域的整体模拟效果。(3) 相较于 Noah 方案, Noah-MP 方案模拟的 2 m 温度和 10 m 风的误差较小, 特别对印度大陆和高寒地区的 2 m 温度模拟有较大幅度的提高。此研究证明了 Noah-MP 在东亚区域的应用优势, 为 WRF/Noah-MP 在未来的进一步业务应用提供了一定的参考依据。

关键词: 天气研究和预报(WRF)模式, 东亚区域, 模式评估, 陆面过程

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.003

The WRF Performance Comparison Based on Noah and Noah-MP Land Surface Processes on East Asia

ZHANG Guo¹ XUE Haile¹ XU Jing¹ CHEN Junming² HE Huizhong¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: In this study, two land surface schemes (LSSs), Noah LSS and Noah-MP LSS, are evaluated over the East Asian Region for January and July in 2013. Through the evaluation of 2-m air temperature, 10-m wind speed, surface temperature, soil temperature at depths of 5 cm and 70 cm, and soil moisture at depths of 5 cm and 25 cm, the results showed that: (1) Compared to Noah LSS, Noah-MP LSS produces less surface sensible heat flux but more latent heat flux in January in most areas. Noah-MP LSS produces more sensible heat flux except for Indian continent, western China and its adjacent regions, northeastern China in July, also more latent heat flux in most areas. The magnitude of increase in latent heat flux in July is larger than in January. (2) Compared to Noah LSS, Noah-MP LSS improves the overall simulation of soil moisture and soil temperature over the East Asian Region. (3) Compared to Noah LSS, the bias and root-mean-squared-error of simulated 2-m air temperature and 10-m wind speed with Noah-MP LSS decrease, especially the simulation for the 2-m air temperature over Indian continent and cold climate regions

* 国家自然科学基金项目(41505010)和中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2015Z003 和 2015Z002)共同资助

2015 年 9 月 20 日收稿; 2015 年 12 月 26 日收修定稿

第一作者: 张果, 主要从事陆面过程参数化研究. Email: zhangguo@camsma.cn

通信作者: 薛海乐, 主要从事数值模式边界层参数化和模式订正等研究. Email: xuehl@camsma.cn

is improved significantly. This study indicates the advantage of coupled Noah-MP over the East Asian Region, and provides the basis for WRF/Noah-MP in future operational application.

Key words: Weather Research and Forecasting (WRF) Model, East Asian Region, model evaluation, land surface processes

引 言

陆面过程,是指发生在大气、地表(即下垫面,例如植被、雪盖、冰川等)和土壤层之间的能量、水分和动量交互作用的过程总和。陆面过程参数化则是针对各个过程的物理机制建立起来的计算机模型,从而对陆面过程问题进行研究分析(段志华等,2012)。陆面过程为天气和气候模式提供了必要的下垫面条件,陆面特征量的改变影响着陆地表面与大气之间的动量及水、热交换(王洋等,2014),进而影响着边界层结构的发展。由于陆气耦合系统是非线性的,陆气相互作用中来自于陆面过程方案的不确定性可以被放大或者缩小(Wei et al, 2010)。1980—1983年实施的“世界气候研究计划(WCRP)”,其中两项重要的研究课题涉及陆面过程,并将“陆面过程模式比较计划(PILPS)”确定为改进数值预报模式的重要计划之一,超过30种陆面过程模式参与了此计划并进行了对比评估(Henderson-Sellers et al, 1995)。由于模式发展者对陆面过程参数化方案中的各个子物理过程的认知不同,相同的物理过程在不同的陆面模式中所选用的参数化方案可能存在差异。在这样的背景条件下,将不同复杂程度的陆面过程参数化方案耦合进中尺度数值预报模式中的相关研究逐渐增多。分析和评估中尺度数值模式中陆面物理参数化方案的区域模拟能力和预报性能,选取合适的参数化方案对于成功利用中尺度数值模式进行区域模拟和预报至关重要。东亚地区地理位置独特,下垫面条件复杂,尤其青藏高原,以典型的季风气候为主,气候的区域特征非常明显(曹富强等,2014;周胜男等,2015)。所以,评估中尺度天气预报模式中不同的陆面参数化方案在东亚地区的模拟性能,对于我国进一步改进天气预报水平提供了很好的参考作用。

由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)开发的天气研究和预报(Weather Research and Forecasting, WRF)中尺度模式在科研和业务中应用广泛。在 WRF3.5

中有6个陆面过程参数化方案, Noah-MP 是最近耦合进 WRF 模式中的陆面过程方案。以往研究者针对不同的方案和区域进行了一系列的评估。王秋云等(2011)利用 WRF 模式中三种不同的陆面过程方案对2009年7月发生在江苏沿江及苏南地区的一次高温天气过程进行了对比,结果表明 Noah 陆面方案对地表通量、气温和近地面风速的模拟都比较合理。陈炯等(2006)、张瑛等(2011)和屠妮妮等(2012)的研究结果也表明 Noah 陆面模式能较好反映城市的热岛效应,并对江西省6·19暴雨过程及四川东部一次暴雨过程的模拟效果较好。因此选择 Noah 陆面过程模式作为控制试验。这些评估均未涉及 Noah-MP 陆面方案,而且也只是针对一些个例或者较小的区域进行,针对中国乃至整个东亚区域的评估还很少见。本研究将利用2013年1和7月的数据评估 Noah 和 Noah-MP 两个陆面过程参数化方案在东亚地区的模拟效果。

1 试验设计

1.1 Noah 和 Noah-MP 陆面参数化方案

Noah 陆面模式是在 OSU(Oregon State University)模式的基础上,由众多研究机构共同发展的(Pan et al, 1987; Chen et al, 2001; Ek et al, 2003)。Noah 陆面模式将土壤表层和植被看成一个整体,利用彭曼潜在蒸发方法计算潜热通量(Mahrt et al, 1984),且包括四层土壤模式,每层的深度分别为0.1、0.3、0.6及1m(Schaaake et al, 1996)。该模式包括土壤热力和水汽传导两个方程,分别采用常用的热扩散方程及 Richards 方程计算土壤温度和土壤含水量。它利用雷诺数方法确定热量粗糙度与动量粗糙度两者的比率(Zilitinkevich, 1995; Chen et al, 1997)。冠层阻抗的计算考虑了土壤的有效水分和大气条件(即 Jarvis 方案),而且 Noah 模式还加入了地表径流方案(Chen et al, 1996)。

而 Noah-MP(MP, multiparameterization)陆面过程参数化方案是在 Noah 陆面模式(v3.0)的基础

上,首先将植被与地表分开,并对模式的整体框架进行了调整,然后对其10个陆面过程的选项进行扩展而来(Niu et al, 2011; Hong et al, 2014)。Noah-MP 陆面过程方案沿用了 Noah 模式中的多数方案,但是由于 Noah-MP 陆面过程参数化方案将植被与地表分开,其对土壤热传导率的计算去除了土壤热传导率随植被覆盖率指数减小的关系。Noah-MP 方案主要增强了在植被生态、雪处理和地下水过程的表征能力(Chen et al, 1996; Jiang et al, 2009; Yang et al, 2011; Chen et al, 2014),每一个子物理过程均有2~4个平行物理选项,可以针对目标区域灵活选择。本试验中, Noah-MP 中各子物理过程参数化方案采用了默认选项,即:叶面积指数利用表格赋值、植被覆盖率设为最大值、Ball-Berry 冠层阻抗方案(Ball et al, 1987)、Monin-Obukhov 地表交换系数计算方案(Brutsaert, 1982)、Noah 模式中有关冠层阻抗的土壤水分控制因子(Chen et al, 1996)、SIMG 径流方案(Niu et al, 2007)、线性土壤渗透性方案(Niu et al, 2006)、利用植被覆盖率的二流辐射传输方案、冻土中超冷水的处理(Niu et al, 2006)以及 CLASS 雪盖表面反照率方案(Verseghy, 1991)等。与 Noah 陆面模式的不同主要体现在 Noah 采用 Jarvis 冠层阻抗方案、考虑热量粗糙度与动量粗糙度两者不同的地表热交换系数计算方案、自流排水径流方案。

1.2 试验设计

本研究基于 WRF3.5.1 版本,其动力过程为模式默认设置,其他物理参数化方案选用 RRTMG 长波辐射和短波辐射方案(Iacono et al, 2008)、基于 TKE 闭合的 MYNN2.5 边界层方案(Nakanishi et al, 2006)、WSM6 微物理过程(Hong et al, 2006)以及 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案(Kain, 2004)。模拟区域包括 $5^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$,空间分辨率为 15 km,垂直层分为 45 层,层顶设为 10 hPa。背景场和边界条件选用 NCEP(National Centers for Environment Prediction)的 CFSR(Climatology Forecast System Reanalysis; Saha, 2010)资料。地面观测资料来自全球电信系统数据(GTS)。模拟时段为 2013 年 1 和 7 月,每天起报一次(世界时 12 时起报),每次模拟时长为 48 h。验证资料包括中国地面气候资料定时值数据集(地温: 0、5、15、20、40、80、160 和 320 cm)和土壤体积水分数据(土壤体积

含水量: 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm)。由于 WRF/Noah 及 WRF/Noah-MP 包括四层土壤模式,每层的深度分别为 0.1、0.3、0.6 及 1 m(Schaaake et al, 1996),即每层的有效深度分别为 5、25、70 及 150 cm。所以,将模式输出的地表温度与 0 cm 地温观测值进行对比,第一层(5 cm)及第三层(70 cm)土壤温度模拟值分别与 5 及 80 cm 的土壤温度观测值对比,而第一层(5 cm)及第二层(25 cm)土壤含水量模拟值分别与 0~10 cm 及 20~30 cm 土壤含水量的观测值进行对比。

2 结果与讨论

2.1 地表通量模拟

陆面与大气间动量、水汽和能量的交换主要体现在不同下垫面条件下感热通量及潜热通量的分配,图 1 给出了 Noah 与 Noah-MP 陆面过程参数化方案对 2013 年 1 和 7 月地表通量模拟的差。1 月,与 Noah 陆面参数化方案相比,除去印度次大陆和我国华南的局部区域, Noah-MP 方案模拟的地表感热通量在大部分区域偏低,尤其是在 40°N 以北地区,比如西伯利亚和我国东北等地区偏低可达 $12\sim 18\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; Noah 陆面参数化方案将表层土壤和冠层作为一个整体进行处理,如果存在积雪,则将积雪也包括在内,这就导致在积雪较厚时,大量能量储存在积雪表面,从而使冬季 Noah 模拟的北部地区感热通量较大(Niu et al, 2011),而 Noah-MP 方案针对这一问题,将地表层和植被层分开,并将雪盖分层增加至最多三层,从而减少了感热通量。同时, Noah 方案采用雷诺数方法确定热量粗糙度与动量粗糙度两者的比率(Zilitinkevich, 1995; Chen et al, 1997),已有研究证明该计算方案明显高估植被高度较低时的感热通量(Chen et al, 2009; Zhang et al, 2014)。对于地表潜热通量,除去印度次大陆和青藏高原局部地区以外, Noah-MP 方案的模拟在大部分区域偏高,但是一般均不高于 $6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,仅在东南亚地区高于 $12\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

7 月,与 Noah 陆面参数化方案相比, Noah-MP 方案在印度次大陆、中国西部相邻区域和中国东北及其以北地区对感热通量的模拟值偏低,而在其他地区对地表感热通量的模拟偏高。这可能是两方案使用了不同的地表热交换系数计算方案, Noah-MP

方案考虑了零平面位移的影响,这在夏季植被较高区域差异比较明显。对于7月的地表潜热通量,与Noah陆面参数化方案相比,除去贝加尔湖以北区域, Noah-MP方案对大部分区域的模拟值整体偏

高,而且幅度明显高于1月。主要原因可能是Noah-MP方案采用了Ball-Berry冠层阻抗方案,在夏季植被生长状况下,更加有利于植被蒸腾作用,如中国东南沿海地区。

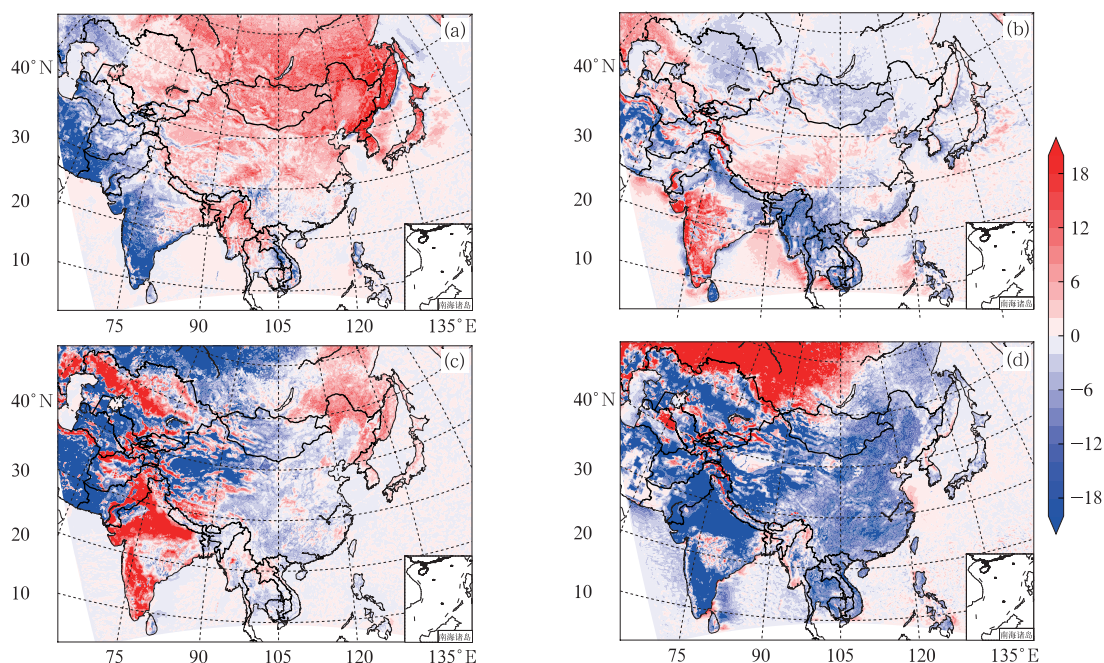


图1 利用Noah-MP和Noah方案模拟的2013年1月(a,b)和7月(c,d)

感热通量(a,c)和潜热通量(b,d)的月平均差(Noah-Noah-MP)(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Fig. 1 Monthly mean differences of simulated sensible heat flux (a,c) and latent heat flux (b,d) in January (a,b) and July (c,d) of 2013 between Noah scheme and Noah-MP scheme (unit: $W \cdot m^{-2}$)

2.2 土壤温度和土壤水分

影响不同下垫面条件下感热通量及潜热通量分配的直接因子是地表覆盖特征和土壤特征等(地表温度及土壤温湿度等),陆面过程参数化方案能否准确模拟土壤温度和土壤水分,直接影响着地表感热和潜热通量的模拟(王洋等,2014)。图2给出了两方案对表层土壤温度和湿度模拟的差值。1月,相比于Noah方案, Noah-MP方案几乎对整个区域的第一层土壤温度(5 cm)模拟偏高,尤其是西伯利亚的大部分区域和印度次大陆;对于第一层土壤湿度,除去青藏高原等局部区域外, Noah-MP方案对大部分区域的模拟值偏低,主要体现在模拟区域的北部。如前所述, Noah陆面过程参数化方案将表层土壤和冠层作为一个整体进行处理,导致积雪较厚时,大量能量储存在积雪表面,积雪较易融化,从而使地表温度降低,相应的表层土壤温度也比较低。同时,雪水渗透到土壤使表层土壤水分也相应增加(Niu et al,

2005)。而Noah-MP参数化方案针对这些问题,将冠层与地表层分开,增加多达3层的雪模式,同时增加冻土土壤渗透性,解决了上述问题(Niu et al, 2007)。

7月, Noah-MP对表层土壤温度的模拟值在中国西北及其以北地区偏高,其他地区偏低,尤其是印度次大陆; Noah-MP对于7月表层土壤湿度的模拟与Noah相比差别不是很大,整体偏干,但是在青藏高原地区及蒙古北部地区偏湿。整体上看,7月的差异要小于1月的差异,主要体现了Noah-MP与Noah方案两者在冻土及雪盖上处理的差异导致冬季地表能量平衡项及水文项的显著变化,而两者在冠层阻抗及地表交换系数上的差异,在夏季均匀植被条件下的影响较小。

图3给出了WRF模式分别利用Noah和Noah-MP模拟的2013年7月地表温度、表层土壤温度(5 cm)和深层土壤温度(70 cm)的偏差。可以看出,除了我国华北及西北地区东部的少数区域以外,

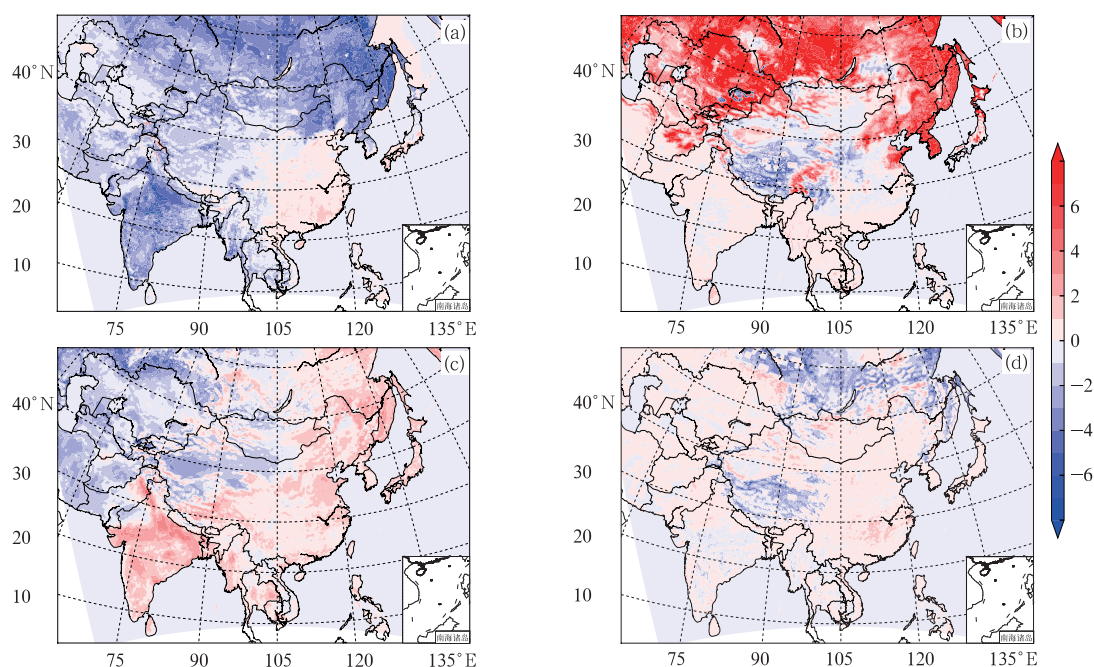


图 2 同图 1, 但为表层土壤温度(a, c, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和表层土壤水分(b, d, 单位: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)的月平均差(Noah—Noah-MP)
Fig. 2 Monthly mean differences of simulated surface soil temperature (a, c, unit: $^{\circ}\text{C}$) and soil moisture (b, d, unit: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
in January (a, b) and July (c, d) of 2013 between Noah scheme and Noah-MP scheme

WRF 模式利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的土壤温度都偏低, 这种系统性偏低主要是由于背景场的影响造成。7 月, Noah 陆面方案在西北地区、中南部偏差稍大, Noah-MP 与 Noah 的模拟效果类似(图 3)。在大部分地区低估地表温度, 尤其是在青藏高原东南部及西北北部地区。1 月两方案模拟的偏差要大于 7 月, 地表温度模拟的冷暖偏差对比明显, 在东北地区、西北地区北部及青藏高原东南缘明显低估, 而在西北地区东部高估。这种冷暖偏差的趋势在表层土壤温度及深层土壤中均有所体现, 但是深层土壤的这种趋势明显减弱, 冷暖偏差均有所降低(图略)。而 WRF 模式利用两个陆面过程参数化方案模拟的土壤水分在 2013 年 1(图略)和 7 月都偏高(图 4), 相比于 Noah 方案, Noah-MP 对土壤水分的高估程度有所降低(图 4), 但是对土壤温度作用并不明显。为了进一步分析 Noah 和 Noah-MP 方案的模拟能力, 图 5 给出了利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的土壤温度月平均均方根误差之差。1 月, Noah-MP 对地表温度的模拟在我国东北地区效果较差, 在我国西南地区较好; 而其对表层土壤温度(5 cm)的模拟整体较好, 特别是在东北、西北及青藏高原地区, 体现其在冻土过程及积雪过程处理上的优势; 而对于深层土壤温度(70 cm), 南北地

区模拟效果差异明显, 在北方地区及青藏高原东南部模拟效果较好, 而在南方地区稍差。7 月, Noah-MP 对地表温度及深层土壤温度的模拟效果在我国大部分区域较好, 但是对于表层土壤温度的模拟, 效果并不比 Noah 好。在陆面模式中, 地表温度是通过地表能量平衡迭代计算, 而土壤温度的计算却和土壤热容量及土壤热传导系数密切相关, 这两个系数又和土壤水分存在一定的关系, 所以地表温度模拟偏差的趋势与土壤温度模拟偏差的趋势不完全一致, 尤其是深层土壤。图 6 给出了利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的土壤水分月平均均方根误差之差。可以看出, 利用 Noah-MP 在 1 和 7 月的模拟效果相比于利用 Noah 都更好。Noah 陆面方案中采用较为简单的自由排水方案(Niu et al, 2011; Barlage et al, 2015), 而 Noah-MP 方案则基于 TOPMODEL 径流模式(Niu et al, 2007)计算地表径流和地下水排泄量。Noah-MP 模式采用的这一径流方案考虑了非承压水层与上层土壤之间的交换以及地下水流动对土壤水分的影响, 在计算上存在一定的优势(Niu et al, 2005)。这就使 Noah-MP 模式中土壤水分的模拟效果优于 Noah 模式。土壤温度和水分的区域平均偏差和均方根误差的日循环变化也显示, 利用 Noah-MP 除了对 7 月表层土壤

温度模拟稍差外,对于两个月的深层土壤温度和 1 月表层土壤温度的模拟与利用 Noah 模拟结果相当或略好(图略)。对于 1 和 7 月表层土壤(5 cm)和第

二层土壤水分(25 cm)的模拟,利用 Noah-MP 与利用 Noah 的效果相当或略好(图略)。

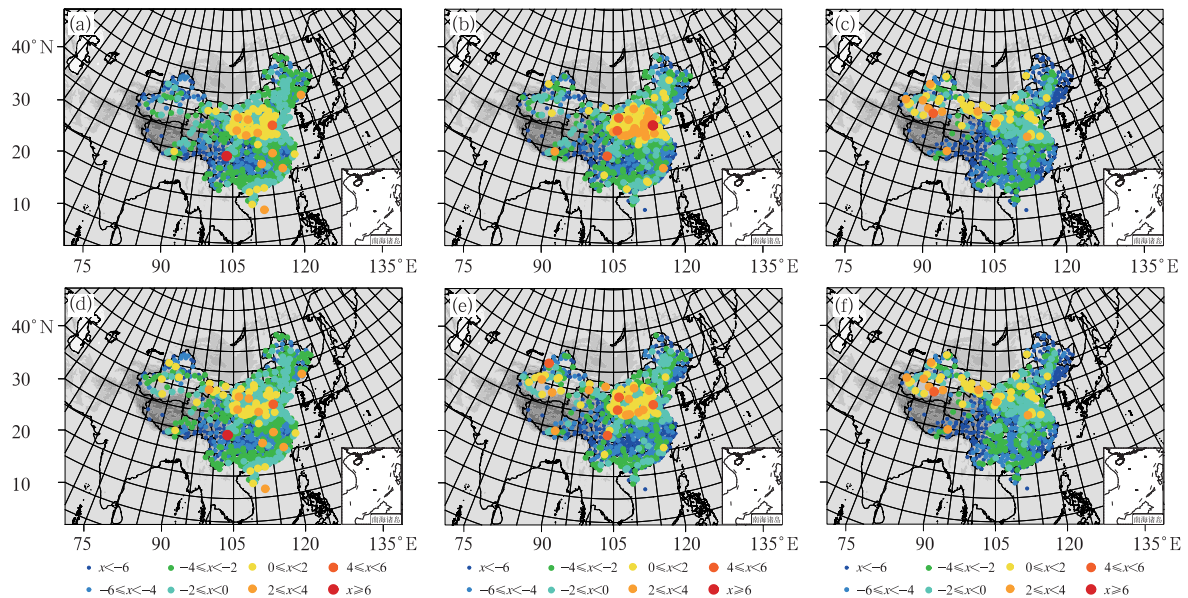


图3 分别利用 Noah(a,b,c)和 Noah-MP(d,e,f)模拟的 2013 年 7 月
地表温度(a,d),表层土壤温度(b,e)和深层土壤温度(c,f)的偏差(单位:℃)

Fig. 3 Monthly mean bias of simulated surface temperature (a,d), soil temperature at depth of 5 cm (b,e) and 70 cm (c,f) in WRF simulations with Noah (a,b,c) and Noah-MP scheme (d,e,f) in July of 2013 (unit: °C)

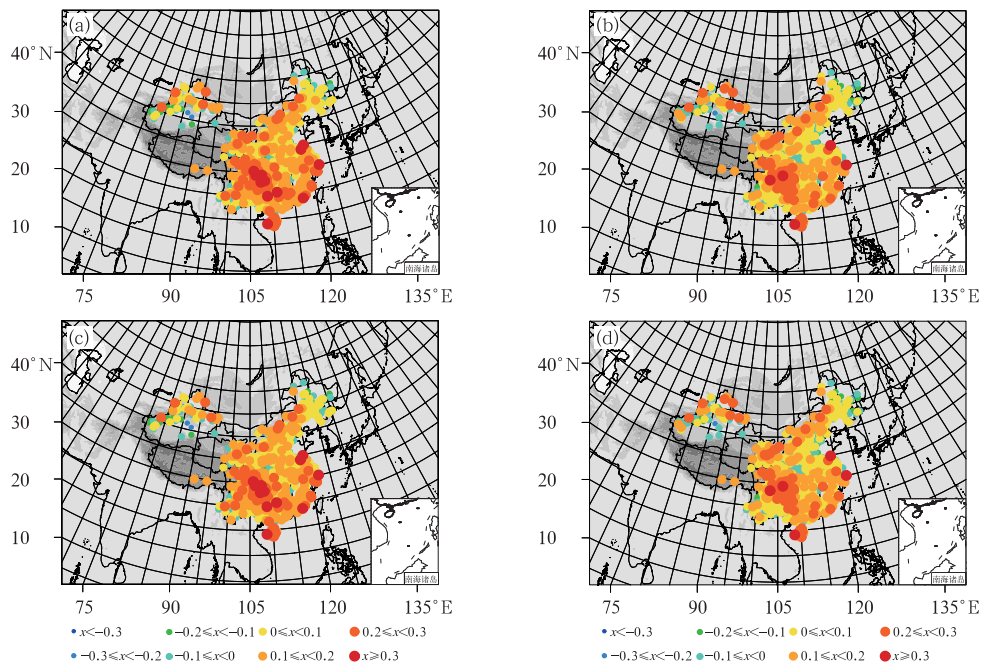


图4 分别利用 Noah(a,b)和 Noah-MP(c,d)模拟的 2013 年 7 月
表层土壤含水量(a,c)和第二层土壤含水量(b,d)的偏差(单位: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 4 Monthly mean bias of simulated soil moisture at depth of 5 cm (a,c) and 25 cm (b,d) in WRF simulations with Noah (a,b) and Noah-MP scheme (c,d) in July of 2013 (unit: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

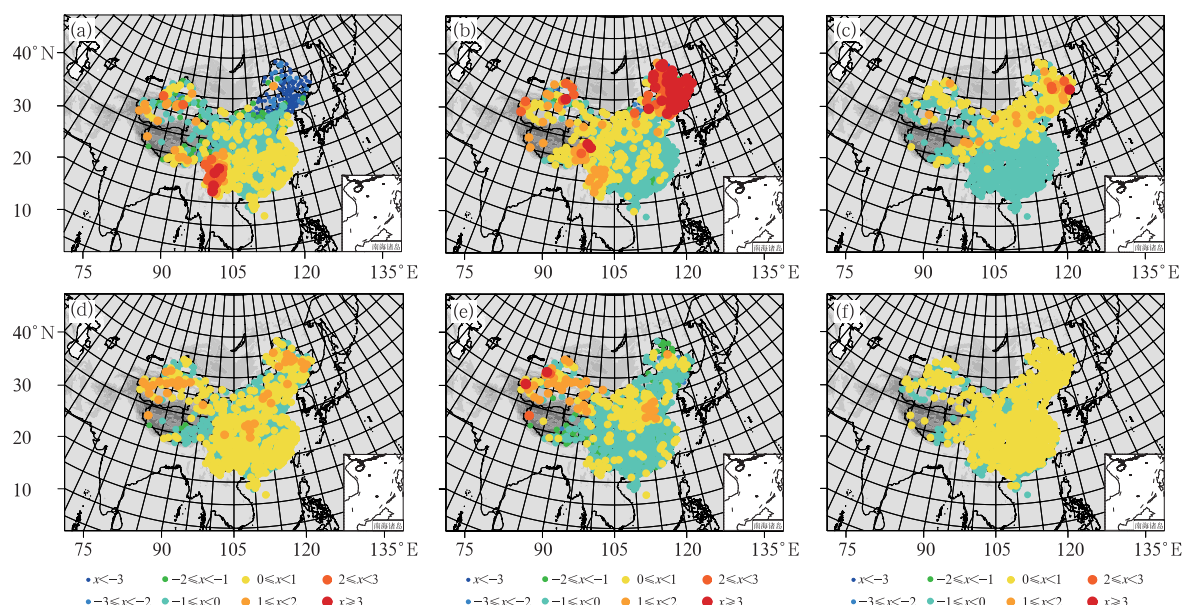


图 5 利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的 2013 年 1 月(a,b,c)和 7 月(d,e,f)的地表温度(a,d), 5 cm 土壤温度(b,e)及 70 cm 深土壤温度(c,f)的土壤温度月平均均方根误差之差($RMSE_{Noah} - RMSE_{Noah-MP}$)(单位: $^{\circ}C$)

Fig. 5 Differences of monthly mean RMSE of simulated surface temperature (a,d), soil temperatures at depth of 5 cm (b,e) and 70 cm (c,f) between WRF simulations with Noah and Noah-MP scheme in January (a,b,c) and July (d,e,f) of 2013 (unit: $^{\circ}C$)

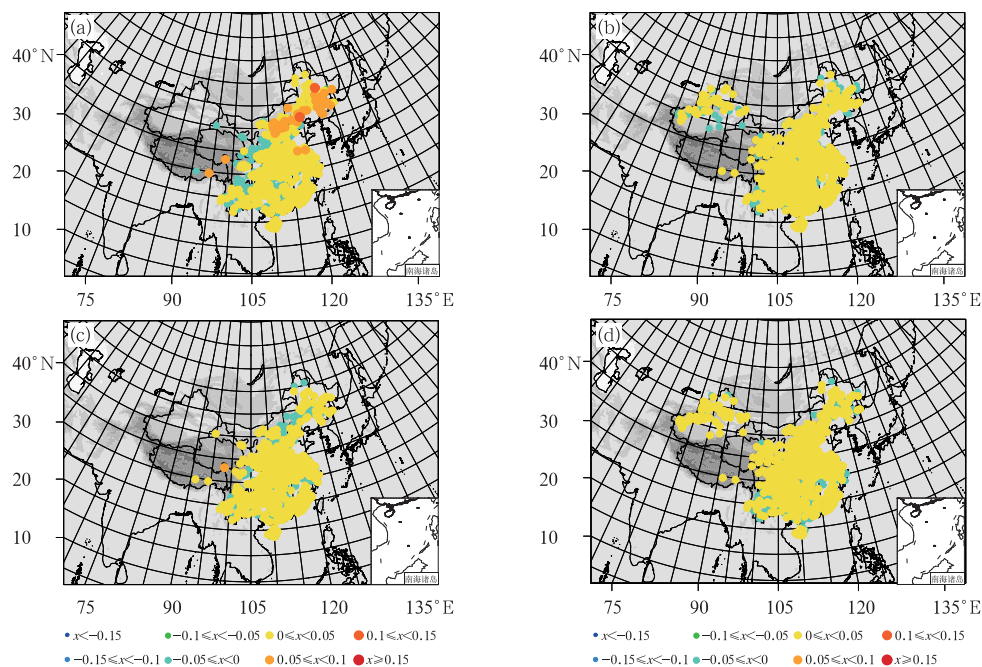


图 6 利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的 2013 年 1 月(a,c)和 7 月(b,d)

0~10 cm 土壤水分(a,b)及 10~40 cm 深土壤水分(c,d)月

平均均方根误差之差($RMSE_{Noah} - RMSE_{Noah-MP}$)(单位: $m^3 \cdot m^{-3}$)

Fig. 6 Differences of monthly mean RMSE of simulated soil moistures at depth of 0—10 cm (a,b) and 10—40 cm (c,d) in WRF simulations with Noah and Noah-MP scheme in January (a,c) and July (b,d) of 2013 (unit: $m^3 \cdot m^{-3}$)

2.3 近地面量

WRF 模式的输出量 2 m 气温、混合比及 10 m 风速,通过地表温度、地表湿度、感热通量及潜热通量诊断而来。因此,地表能量平衡项及土壤温湿度的变化(图 1 和图 2),必将影响这些地表诊断量。图 7 给出了分别利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的 2 m 温度偏差。冬季, Noah 方案模拟的 2 m 温度在 45°N 地区暖偏差比较明显;夏季, 2 m 温度在印度次大陆有一个系统性偏大中心,而在我国大部分区域偏低。在 Noah 方案中,对冻土的处理使其渗透性较差,导致在春季或夏季早期地表径流增加,而雪水渗透到土壤的量减少(Niu et al, 2005)。而 Noah-MP 参数化方案针对这些问题,将冠层与地表层分开,增加多达 3 层的雪模式,同时增加冻土土壤渗透性,解决了这一问题(Niu et al, 2007)。所以 Noah-MP 对冬季东北地区及青藏高原等地区土壤温度、土壤水分及相应 2 m 气温的模拟效果较好。

此外,在 2.1 节的分析中可以看出,冬季, Noah-MP 方案相较 Noah 模拟的感热通量在 40°N 以北地区偏低,潜热通量增加的幅度小于感热通量降低的幅度;而夏季, Noah-MP 方案对感热通量的模拟差异不大,在印度次大陆及以北地区模拟值偏低,潜热通量的模拟值在多数地区均偏高,但是在印度

次大陆地区并不明显(图 1),所以使总的热通量在该地区相较 Noah 方案减少。针对一个特定的下垫面,传输到大气中地表热通量的降低意味着地表和大气之间热量交换的减少;反之亦然。所以, Noah-MP 方案相比于 Noah 方案,在 2013 年冬季,整个模拟区域北部(蒙古和西伯利亚)2 m 温度的正偏差降低,同时降低了印度次大陆地区 2 m 温度在 2013 年夏季的正偏差。但是其在夏季大部分地区低估地表温度,尤其是在青藏高原东南部及西北北部地区(图 3),一定程度上解释了 2 m 气温在青藏高原东南缘及西北北部明显的冷偏差(图 7)。此外, Noah-MP 在印度北部地区冬季的正偏差相较 Noah 模式也有所增加,因其在该地区冬季模拟的感热通量偏低,潜热通量偏高,潜热通量的增加量大于感热通量的减少量(图 1),使总量高于 Noah 方案,从而增加了温度的暖偏差。同时 Noah-MP 增加了云南南部及其周边地区、渤海湾及朝鲜韩国地区的冷偏差,可能原因是 Noah-MP 在这些区域高估了表层土壤温度而低估了表层土壤湿度(图 2),同时又低估了感热通量,从而使冷偏差增加。

Noah-MP 相较 Noah 方案,同时改进了 2 m 相对湿度的模拟,降低了 2013 年 7 月华北地区偏高的 2 m 相对湿度,升高了 2013 年 1 月东北和内蒙古地区偏低的 2 m 相对湿度(图略)。在 2013 年 1 和 7 月

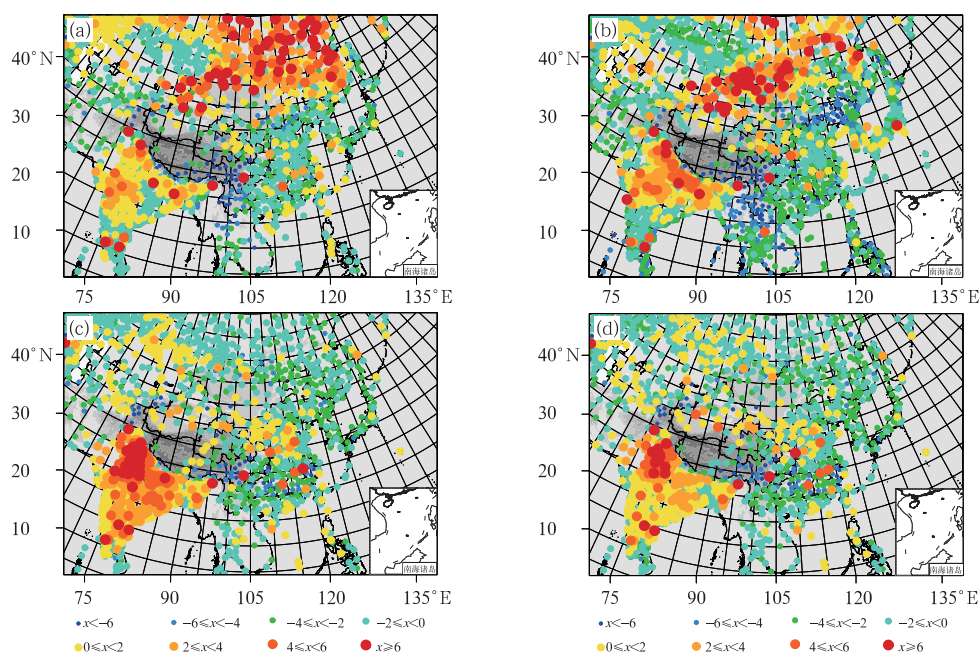


图 7 利用 Noah(a,c)和 Noah-MP(b,d)方案模拟的 2013 年 1 月(a,b), 7 月(c,d) 2 m 气温月平均偏差(单位: °C)

Fig. 7 Monthly mean bias of simulated 2 m air temperature in January (a,b) and July (c,d) of 2013 with Noah scheme (a,c) and Noah-MP scheme (b,d) (unit: °C)

两方案对 10 m 风速的模拟均偏大。为了更直观地考察两个方案对近地面量模拟的影响,图 8 给出了分别利用 Noah 和 Noah-MP 方案 WRF 模拟的 2 m 气温与 10 m 风速的均方根误差之差。可以看出 2013 年 1 月在青藏高原、南亚和西伯利亚地区,利用 Noah-MP 模拟的 2 m 温度的误差要比利用 Noah 模拟的误差减少最高超过 3°C ,但是在中国东南部尤其是渤海湾附近区域, Noah-MP 的误差明显偏

大。对于 2013 年 7 月而言,利用两个方案模拟的 2 m 温度误差在大部分区域相差在 1°C 以内,在南亚地区,利用 Noah-MP 模拟的 2 m 温度误差相对小约 2°C 。而两方案对 10 m 风的模拟影响相比于温度较小,两者的均方根误差之差多数在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内, Noah-MP 冬季在北部大部分地区及日本海表现稍好,而夏季在南亚和西北地区表现稍好。图 9 给出了 2 m 气温和 10 m 风速区域平均偏差和均方

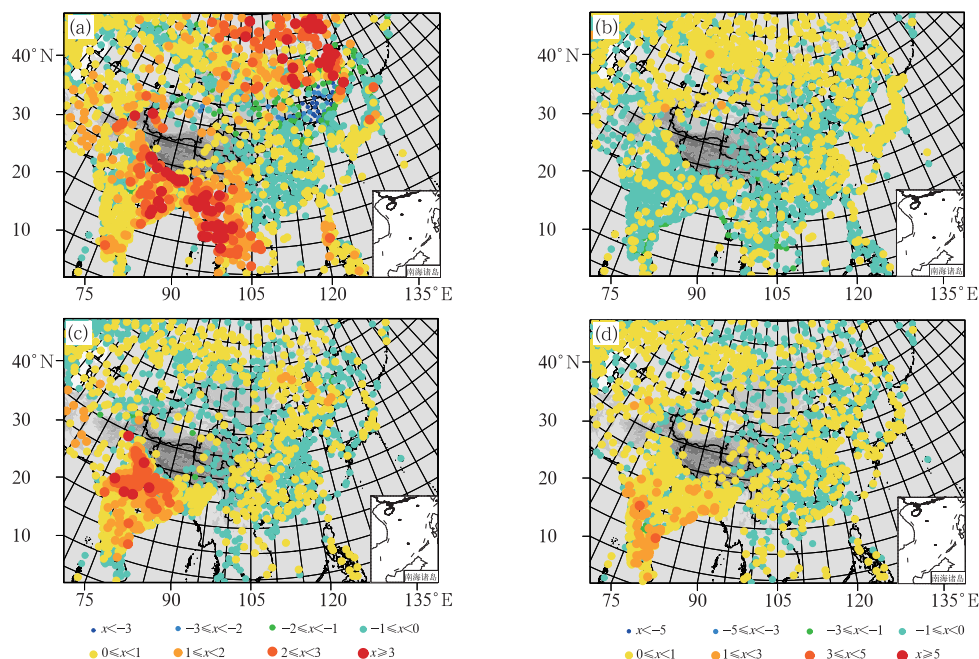


图 8 利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的 2013 年 1 月(a,b),7 月(c,d) 2 m 气温(a,c,单位: $^{\circ}\text{C}$)和 10 m 风速(b,d,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)均方根误差之差($\text{RMSE}_{\text{Noah}} - \text{RMSE}_{\text{Noah-MP}}$)
Fig. 8 Differences of monthly mean root-mean-squared-error (RMSE) of simulated 2 m air temperature (a,c,unit: $^{\circ}\text{C}$) and 10 m wind speed (b,d, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) between WRF simulations with Noah and Noah-MP scheme in January (a,b) and July (c,d) of 2013

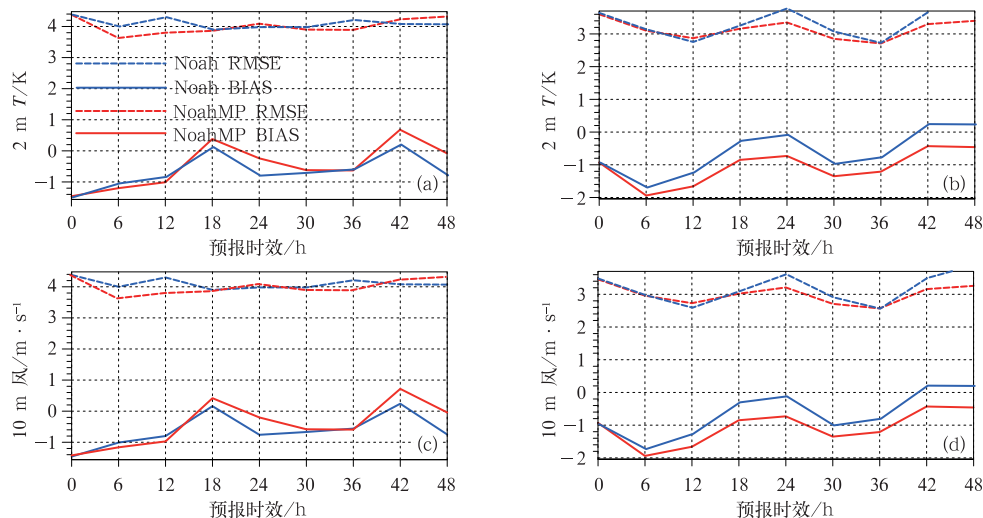


图 9 利用 Noah 和 Noah-MP 方案模拟的 2013 年 1 月(a,c)及 7 月(b,d)的 2 m 气温(a,b),10 m 风速(c,d) 近地面量月平均偏差(实线)和均方根误差(虚线)随积分时间的变化
Fig. 9 Time series of monthly mean bias(solid line) and RMSE (dashed line) of simulated near surface variables with Noah and Noah-MP scheme: 2 m temperature (a,b), 10 m wind speed (c,d) in January (a,c) and July (b,d) respectively

根误差的日循环变化。可以看出均方根误差并没有随预报时效而逐渐增大,而是在 48 h 预报过程中保持较为平稳的发展。从区域平均时间演变来看,利用 Noah-MP 模拟的 2 m 温度均方根误差相对较小,而相应的偏差却难分伯仲。利用两种陆面过程模拟的 10 m 风速也表现出了相似的特点。

3 结 论

Noah 陆面过程参数化方案在国内外各数值预报业务中心的应用最为广泛,而 Noah-MP 是在 Noah 方案的基础上改进而形成的新的多物理过程集合的陆面过程参数化方案。本文针对 Noah 和 Noah-MP 方案,在整个东亚区域做了 2013 年 1 和 7 月两个月的批量试验评估,评估主要针对地面量和土壤量。评估结论如下:

(1)冬季,与 Noah 陆面参数化方案相比,除去印度次大陆和我国华南的局部区域, Noah-MP 方案模拟的地表感热通量在大部分区域偏低,尤其是在 40°N 以北地区,比如西伯利亚和我国东北等地区偏低可达 $12 \sim 18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;对于地表潜热通量,除去印度次大陆和青藏高原局部地区以外, Noah-MP 方案的模拟在大部分区域偏高,不超过 $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,仅在东南亚地区高于 $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。夏季, Noah-MP 方案在印度次大陆、中国西部及相邻区域及中国东北及其以北地区对感热通量的模拟值偏低,而在其他地区对地表感热通量的模拟偏高; Noah-MP 方案在大部分区域对地表潜热通量的模拟值整体偏高,而且幅度明显高于 1 月。

(2)相较于 Noah 方案, Noah-MP 方案应用了较好的方案计算地表径流和地下水排泄量,并将积雪和植被分为多层来处理,其在东亚区域对土壤水分和土壤温度的整体模拟效果较好。

(3)相较 Noah 方案, Noah-MP 方案使得整个模拟区域北部(蒙古和西伯利亚) 2 m 温度在 2013 年冬季的暖偏差降低,同时降低了印度次大陆地区 2 m 气温在 2013 年夏季的暖偏差。但是 Noah-MP 在印度北部地区冬季的暖偏差相较 Noah 模式也有所增加,同时 Noah-MP 增加了云南南部及其周边地区、渤海湾及朝鲜半岛地区的冷偏差。对于整个模拟区域平均而言,利用 Noah-MP 方案模拟的 2 m 温度和 10 m 风的误差较小。

由于本文针对的是整个东亚区域的批量试验评

估,数据量和工作量大,所以并未深入到各个方面进行评估与诊断。评估集中比较了两个陆面方案在该区域的表现,在未来的工作中需要进一步评估 Noah-MP 方案在东亚区域的模拟效果,并在 Noah-MP 方案中获得最优的子过程组合。

参考文献

- 曹富强,丹利,马柱国. 2014. 区域气候模式与陆面模式的耦合及其对东亚气候模拟的影响. *大气科学*, 38(2):322-336, doi:10.3878/j.issn.
- 陈炯,王建捷. 2006. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨率模拟对比. *应用气象学报*, 17(4):403-411.
- 段志华,张钰,张伟,等. 2012. 评估 4 种寒区陆面、水文过程模式及在青藏高原的应用前景. *水资源与水工程学报*, 23(6):43-50.
- 屠妮妮,何光碧,张利红. 2012. 不同边界层和陆面过程参数化方案对比分析. *高原山地研究*, 32(3):1-8.
- 王秋云,严明良,包云轩,等. 2011. 基于不同陆面参数化方案的高温天气数值模拟. *气象科技*, 39(5):537-544.
- 王洋,曾新民,葛洪彬,等. 2014. 陆面特征量初始扰动的敏感性及其集合预报试验. *气象*, 40(2):146-157.
- 张瑛,肖安,马力,等. 2011. WRF 耦合 4 个陆面过程对“6.19”暴雨过程的模拟研究. *气象*, 37(9):1060-1069.
- 周胜男,罗亚丽,汪会. 2015. 青藏高原、中国东部及北美副热带地区夏季降水系统发生频次的 TRMM 资料分析. *气象*, 41(1):1-16.
- Ball J, Woodrow I, and Berry J. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In *Prog. Photosynthesis Res. Proc. Int. Congress 7th*, Providence, 10-15 August 1986. Kluwer, Boston, 4, 221-224.
- Barlage M, Tewari M, Chen F. 2015. The effect of groundwater interaction in North American regional climate simulations with WRF/Noah-MP. *Clim Change*, 129:485-498.
- Brutsaert W A. 1982. *Evaporation into the Atmosphere*. D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, 299 pp, 1982.
- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J Geophys Res Atmos*, 101:7251-7268.
- Chen F, Janjic Z, Mitchell K. 1997. Impact of atmospheric surface layer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta numerical model. *Bound Layer Meteorol*, 85:391-421.
- Chen F and Dudhia J. 2001. Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Mon Wea Rev*, 129:569-585.
- Chen F, Barlage M, Tewari M. 2014. Modeling seasonal snowpack evolution in the complex terrain and forested Colorado Headwaters region: A model inter-comparison study. *J Geophys Res*, 119:13795-13819.
- Chen F and Zhang Y. 2009. On the coupling strength between the

- land surface and the atmosphere; From viewpoint of surface exchange coefficients, *Geophys Res Lett*, 36, L10404, doi: 10.1029/2009GL037980.
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J Geophys Res*, 108(D22):8851.
- Henderson-Sellers A, Pitman A J, Love P K, et al. 1995. The project for intercomparison of land surface parameterization schemes (PILPS): Phase 2 and 3. *Bull Amer Meteor Soc*, 76(4): 489-503.
- Hong S, Yu X, Park S K, et al. 2014. Assessing optimal set of implemented physical parameterization schemes in a multi-physics land surface model using genetic algorithm. *Geosci Model Dev*, 7(5): 2517-2529.
- Hong Y S and Lim J. 2006. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J Korean Meteor Soc*, 42:129-151.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res*, 113:D13103.
- Jiang X, Niu G Y, Yang Z L. 2009. Impacts of vegetation and groundwater dynamics on warm season precipitation over the Central United States. *J Geophys Res*, 114:D06109.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *J Appl Meteor*, 43:170-181.
- Mahrt L, Ek M. 1984. The influence of atmospheric stability on potential evaporation. *J Climate Appl Meteor*, 23:222-234.
- Nakanishi M and Niino H. 2006. An Improved Mellor-Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Bound-Layer Meteor*, 119:397-407.
- Niu G Y and Yang Z L. 2006. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *J Geophys Res*, 110:D21106.
- Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E. 2007. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data. *J Geophys Res*, 112:D07103.
- Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. 2011. The Community Noah Land Surface Model with Multi-Parameterization Options (Noah-MP): 1. Model Description and Evaluation with Local-scale Measurements. *J Geophys Res*, 116:D12109.
- Pan H L and Mahrt L. 1987. Interaction between soil hydrology and boundary-layer development. *Bound-Layer Meteor*, 38:185-202.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 91:1015-1057.
- Schaake J C, Koren V I, Duan Q Y. 1996. A simple water balance model (SWB) for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *J Geophys Res*, 101:7461-7475.
- Verszeghy D L. 1991. GLASS a Canadian land surface scheme for GC-Ms. 1. soil model. *Int J Climatol*, 11:111-133.
- Wei J, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. 2010. How much do different land models matter for climate simulation? Part I: Climatology and variability. *J Climate*, 23(11):3120-3134.
- Yang Z L, Niu G Y, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *J Geophys Res-Atmos*, 116:D12110.
- Zhang G, Zhou G, Chen F, et al. 2014. A trial to improve surface heat exchange simulation through sensitivity experiments over a desert steppe site. *J Hydrometeor*, 15, 664-684. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-13-0113.1.
- Zilitinkevich S. 1995. Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows. *Air Pollution Theory and Simulation*, Air Pollution III, H. Power, N. Moussiopoulos, and C A Brebbia, Eds, Vol I, Computational Mechanics Publications, 53-60.