

杨袁慧,师春香,王炜,等. 2013. 一次强降水模拟中土壤湿度初值的影响研究. 气象, 39(11):1481-1489.

一次强降水模拟中土壤湿度初值的影响研究^{*1}

杨袁慧¹ 师春香² 王 炜³ 白 翎¹ 成 璐¹

1 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 天津市气象科学研究所, 天津 300074

提 要: 为了分析 WRFV3. 3. 1 模式中土壤湿度初值对降水模拟的影响, 在 4 个陆面方案的分析对比基础上, 采用中国区域土壤湿度同化系统(CLSMDAS)输出的土壤湿度替换模式初始场中的土壤湿度, 对 2010 年 6 月 19 日江西出现的一次强降水过程进行模拟, 分析改进后的土壤湿度初值对模式模拟降水的影响。结果表明, 耦合 Noah 方案的模拟结果要优于 SLAB、RUC、PX 方案; 通过对比试验发现 CLSMDAS 输出的土壤湿度初始条件下的模拟结果比 NCEP 资料的模拟结果更接近于实况, 能够很好地模拟出 24 h 累积降水的范围与强度, 对应地表能量的响应也更为明显, 表现出很好的区域波动性, 能够捕捉到细节降水信息, 且统计检验结果中各量级降水的 TS 评分基本都要高于 NCEP 土壤湿度初值条件下的结果, 空报率、漏报率和预报偏差进一步减小, 说明准确的土壤湿度初值能够提高模式的模拟预报能力。

关键词: WRF 降水, 陆面方案, 土壤湿度初值

中图分类号: P463

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 11. 012

Impact of Initial Soil Moisture on a Heavy Precipitation Simulation

YANG Yuanhui¹ SHI Chunxiang² WANG Wei³ BAI Ling¹ CHENG Lu¹

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

3 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074

Abstract: In order to analyze the influence of soil moisture on the simulation of precipitation in the WRFV3. 3. 1 mode, we use the soil moisture output from the China Land Soil Moisture Data Assimilation System (CLSMDAS) to replace the soil moisture in the WRF initial field, on the basis of comparative analysis of four land-surface process schemes, the heavy precipitation which occurred in Jiangxi Province on 19 June 2010 was simulated to study the influence of improved soil moisture on the model simulation of precipitation. The results show that the Noah scheme gives more reasonable results than SLAB, RUC and PX schemes. By comparative test we find that the simulation from the CLSMDAS output soil moisture generally agree with the observations, being able to simulate the intensity and range of heavy precipitation in 24 h as well as the response of the surface energy. The statistical verification test also shows that the TS score is higher, the miss rate, the false alarm and the bias are lower than the results from NCEP initial soil moisture. All these tell us that the accurate soil moisture can improve the forecasting capability of model simulation.

Key words: WRF precipitation, land surface scheme, initial soil moisture

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206008)和国际科技合作与交流专项(2011DFG23150)共同资助

2012 年 11 月 1 日收稿; 2012 年 5 月 22 日收修定稿

第一作者: 杨袁慧, 主要从事卫星资料同化方面的研究. Email: yhyang871@yeah. net

通信作者: 师春香, 主要从事多元数据融合同化研究. Email: shicx@cma. gov. cn

引言

陆地下垫面与大气圈层之间的各种时空尺度上的相互作用(包括动量、能量、水汽等的交换以及辐射传输),为暴雨的发生发展提供了动力、热力和水汽条件,所以说暴雨的发生发展与非均匀的下垫面是相互关联的(郭锐等,2010;张端禹等,2010;肖递祥等,2012),一些研究也表明(曾新民等,2009;马红云等,2009;熊仕焱等,2010;汪薇等,2011;张瑛等,2011;李安泰等,2012;何光碧,2012),暴雨过程对陆面参数的随机扰动是较为敏感的,不同陆面过程方案对暴雨的强度分布及中心落点等的模拟结果也存在一定的差异,说明陆面参数及陆面过程对暴雨等极端天气过程可以产生非常重要的影响。而土壤湿度作为陆气相互作用过程中的一个重要物理参数,通过改变地面蒸散、径流以及地表热通量等来改变大气低层的水热输送,进而影响天气过程,是值得关注的一个重要参数。

目前的暴雨研究主要利用的是中尺度数值预报模式,而数值模式对于初值非常敏感,尤其对中小尺度系统的预报结果在很大程度上要依赖于模式初始场的准确程度,所以在数值模式中考虑土壤湿度初始条件的影响并为模式提供准确的土壤湿度初值,是一项很有意义的研究。Chen 等(1996)在 Colorado 一次强风暴过程的数值模拟中发现,提供土壤湿度的模式预报能够很好地表现观测降水,说明了土壤湿度的初始化对中尺度模式的重要性,为我们的研究提供了很好的依据。Cassardo 等(2002)的研究也指出,土壤湿度在预报局地暴雨中对暴雨的空间分布以及强度等均扮演着重要的角色。Zhao 等(2006)则从卫星遥感资料反演的土壤水分指数得到接近实况的土壤湿度,替代 MM5V3 模式中的 NCEP 资料,通过分析 1998 年长江流域发生的几次暴雨过程发现,卫星遥感反演的土壤湿度模拟的降水强度和分布比 NCEP 模拟更接近实况,进一步强调土壤湿度的重要性,而准确的土壤湿度初值更是提高数值模式模拟精度的有利条件。当然,由于反演本身在数学上为非适定问题,没有稳定的唯一解,而且微小的测量误差可能引起很大的反演误差,所以卫星遥感反演的土壤湿度数据精度有待进一步提

高,如何为模式提供更为准确的土壤湿度初值以进一步提高模式的模拟精度是我们需要解决的问题。

本文利用 WRFV3.3.1(Weather Research & Forecasting)模式,对一次江西强降水过程进行模拟,以期进一步了解模式中不同陆面方案的特点及其对降水模拟的影响,为合理选择和使用模式中的陆面方案提供一些依据。在此基础上利用中国区域土壤湿度同化系统(China Land Soil Moisture Data Assimilation System, CLSMDAS)输出的土壤湿度(师春香等,2011)替换 NCEP 中的土壤湿度,分析改进的土壤湿度初始场对降水模拟的影响。

1 天气过程与影响系统

江西省位于我国长江中游的鄱阳湖流域,是冷暖空气经常交汇的地带,加上海洋暖湿气流输送的充沛水汽,这里的成云致雨条件较好,暴雨频繁、危害严重,2010 年 6 月 19 日发生在赣北南部及赣中地区罕见的强降水过程,就造成了严重的灾情。从天气形势看,此次强降水是因为北方冷空气南下带来大量干冷空气,同时西南暖湿气流不断发展强盛,给江西上空带来大量的暖湿气流,冷暖两股气流的相遇导致对流的迅速发展,而且这次过程的中低层存在明显的水汽输送通道,这些都是形成强降水的有利条件。

由 19 日 00 时 500 hPa 位势高度场(图 1a)可以看出,中高纬的低压槽位于我国东北地区,并一直延伸到江淮地区,与此同时东北冷涡不断生成,在东移南压过程中不断甩下冷空气;而沿副热带高压(以下简称副高)脊线的北侧不断有暖空气输送到江南地区,因而形成了冷暖空气的交汇。在 850 hPa 风场实况图(图 1a)上,西南暖湿气流不断从海上输送暖湿空气,使得江西地区的低层冷暖空气交汇明显,且切变线一直维持在江西中北部地区,这些因素共同作用产生了较强的辐合上升运动,造成持续性降水过程。水汽图(图 1b)表明从 19 日 00 时开始在 850 hPa 存在一个宽的舌状水汽通量高值,从而形成较强的水汽通道;水汽通量散度图上江西东北部存在一个西北—东南向一直延伸到福建的负值中心,表明该地存在较强的水汽辐合,有利于强降水的产生。

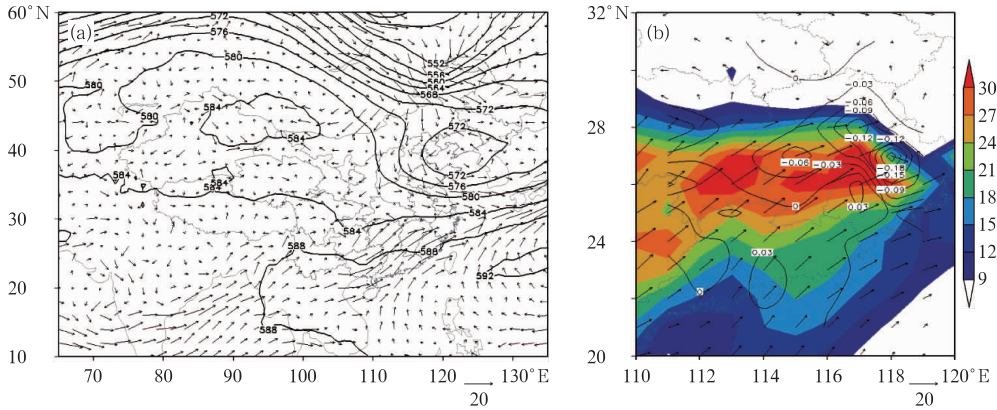


图 1 2010 年 6 月 19 日 00 时 500 hPa 位势高度场(单位:dagpm)和 850 hPa 风场
(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)叠加图(a)和 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度叠加图(b)
(填色图为水汽通量,单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,等值线图
为水汽通量散度,单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 1 The 500 hPa geopotential height (unit:dagpm) and 850 hPa wind field at 00:00 UTC 19 June 2010 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a), the composite chart of moisture flux (unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and moisture flux divergence (unit: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (b)

2 陆面方案敏感性试验

2.1 敏感性试验方案设计

模式的初始场及边界条件由 NCEP FNL 全球分析场资料提供,采用双重嵌套,粗网格为细网格提供边界条件,模式的水平分辨率为 30 和 10 km,垂直方向均为 28 层,微物理过程选用 WSM3 方案,边界层选用 YSU 方案,积云对流选用 Kain-Fritsch 方案,长波辐射和短波辐射分别为 RRTM 方案和 Dudhia 方案,积分时间从 6 月 18 日 12 时到 20 日 12 时(UTC),共 48 h。

本文采用的是新版的中尺度数值天气预报模式 WRFV3. 3. 1,共提供 4 种陆面过程方案:热扩散方案、Noah 陆面模式、RUC 陆面模式和 PX 方案,所以本文共设计 5 组敏感性试验,不耦合陆面方案(NOSFC 方案)以及分别耦合 SLAB 方案、Noah 方案、RUC 方案和 PX 方案,将降水主要发生时段 19 日 00 时至 20 日 00 时作为一次完整的降水过程进行分析,比较几种方案对降水模拟的强度及范围等的影响。

2.2 敏感性试验结果分析

图 2 给出 24 h 累积降水量实况和敏感性试验模拟结果,其中实况资料为国家气象信息中心提供

的中国地面逐日降水量 0.25° 网格数据,该数据的来源是全国 2400 多台站的逐日降水量得到的网格产品。从整个降水实况分布(图 2a)可以看出,实际降雨主要位于赣北南部和赣中地区,呈带状分布;降水的大值中心位于抚州北部、鹰潭以及南昌交界的地区,最大雨量值达到 300 mm 以上。不耦合陆面方案时(图 2b),主要雨区及降水中心的分布均发生明显的变化,最大降水中心不再是浙赣铁路沿线一带,而是有 1° 左右的向西偏移至南昌市境内,导致实际降水中心的雨量值偏小约 100 mm,且在上饶市境内模拟出虚假的次降水中心。所以不考虑陆面方案将会缺少地面潜热通量项,导致由地面蒸发引起的降水减小,使得模式模拟的降水存在一定的偏差;而耦合陆面方案后,降水中心的强度和分布与观测结果更为接近,虽然陆面过程不会直接产生降水,但可以通过与其他物理过程的相互作用来影响降水过程。

4 种耦合陆面方案的试验中模拟的降水落区范围及强度与实况基本接近,但在降水中心的分布上存在一定偏移,这与各陆面方案的物理机制及设计等有关,与试验采用的分辨率也有一定关联,但提高模式分辨率后发现模拟出较多的虚假降水中心,反而不能反映真实的降水分布。此外,降水中心分布的偏移问题还可能与边界区域的选择以及其他物理过程选用的参数化方案有关,这里没有进行深入研究。就耦合陆面方案的试验而言,SLAB 方案对强

降水中心的模拟结果最差,但在资溪地区的次降水中心的体现上优于其他方案,这可能与 SLAB 方案的土壤层厚度(1、2、4、8 和 16 cm)有关,从模式初始土壤湿度层数(10、40、100 和 200 cm)进行处理会存在一定的误差,而且该方案没有考虑植被作用及一些物理量随时间变化的影响,这些都是造成模拟偏差较大的可能因素;PX 方案模拟出来的降水中心

存在 0.5° 左右的南移,且模拟出多个降水大值中心;相对而言 Noah 与 RUC 方案更接近于实况,但 RUC 方案在 $(28.5^\circ\text{N}, 114.5^\circ\text{E})$ 附近以及降水中心的西南面模拟出虚假的较强降水带,且降水中心的落区略向南偏移;所以从定性角度考虑本次降水,尽管 Noah 方案模拟的降水中心的走向略微区别于实况,但总体模拟效果最好。

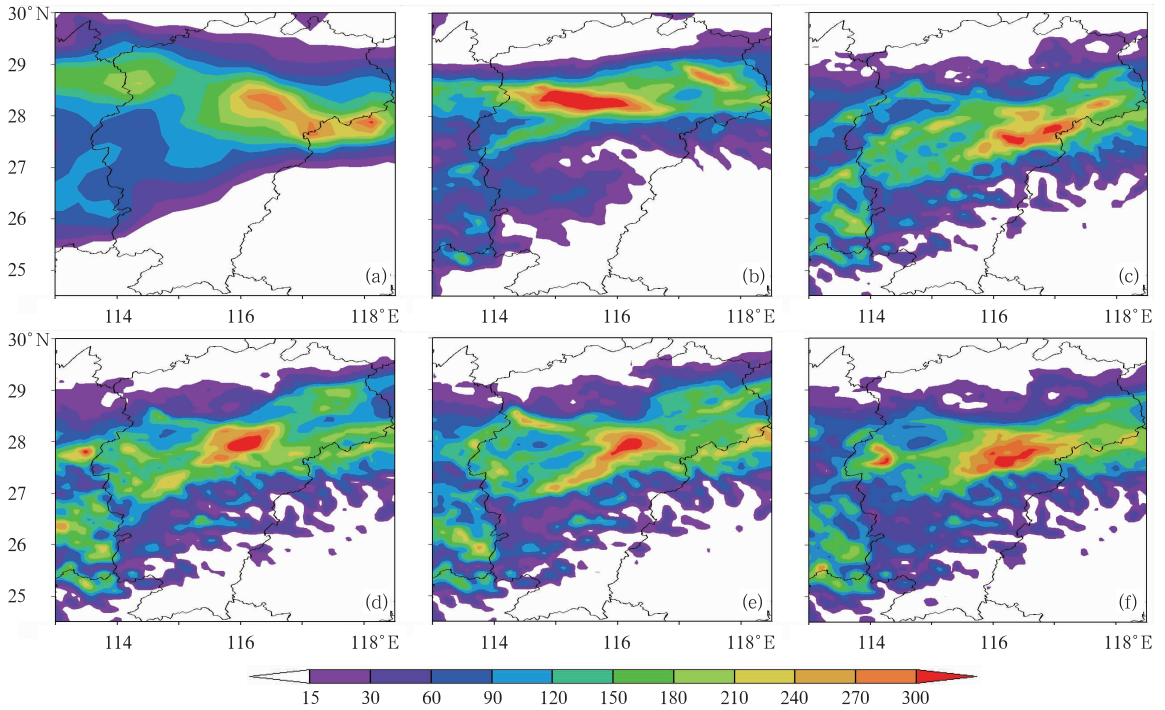


图 2 2010 年 6 月 19 日 00 时至 20 日 00 时 24 h 累积降水量实况和 5 种试验模拟结果比较(单位: mm)

(a) 实况, (b) NOSFC 方案, (c) 耦合 SLAB 方案, (d) 耦合 Noah 方案, (e) 耦合 RUC 方案, (f) 耦合 PX 方案

Fig. 2 Observed and simulated 24-h rainfall (unit: mm) from 00:00 UTC 19 June to 00:00 UTC 20 June 2010

(a) observation, (b) NOSFC scheme, (c) SLAB scheme, (d) Noah scheme,

(e) RUC scheme, (f) PX scheme

尽管 4 个陆面方案均能够大致地模拟出雨带的分布以及降水中心, Noah 方案对于降水中心位置及强度的模拟相对要好些,但总体的模拟能力有待进一步提高。本文在陆面方案敏感性试验的基础上,从土壤湿度初值的角度来考虑,利用 CLSMDAS 输出的较为准确的土壤湿度数据替换 NCEP 资料中的,分析改进的土壤湿度初值对降水模拟的影响,以期得到更为准确的降水模拟。

3 土壤湿度初值改进试验

我们所说的土壤湿度是指土壤体积含水量

(volumetric soil moisture), 土壤体积含水量的变化直接导致土壤内部水热传输特性的变化,对降水而言,主要通过影响低层的大气环流和水汽辐合来影响降水过程。

3.1 CLSMDAS 土壤湿度数据简介

师春香等(2008;2011)基于集合卡尔曼滤波及陆面过程模型建立了中国区域土壤湿度同化系统 CLSMDAS,并应用于中国区域陆面土壤湿度同化试验中。该同化系统中采用 FY-2 静止气象卫星的小时产品和 NCEP/NCAR 再分析数据构建多年的高时空分辨率的大气强迫数据来驱动陆面模式

CLM3.0(Community Land Model Version 3.0),且加入了中国区域地面观测和卫星微波亮温资料进行订正。朱晨等(待发表)对 CLSMDAS 输出的土壤湿度数据进行定性与定量化的综合评估,利用全国 778 个农业气象土壤湿度观测站的观测数据对系统输出的 2005—2010 年同化土壤湿度数据集进行的验证表明:同化系统输出结果能较好地体现我国土壤湿度的时空分布特征,干湿程度变化与观测基本一致。

3.2 改进试验方案设计

为了探讨土壤湿度变化对降水过程的影响,用 CLSMDAS 输出的较为真实的土壤湿度数据替换 NCEP 数据中的土壤湿度。由于 WRF 模式中的土壤湿度范围在地面和地面以下 200 cm 之间,分别为 10、40、100 和 200 cm 4 层,所以需要 将 CLSMDAS 输出的 10 层土壤湿度数据与模式土壤层数相匹配,采用加权平均的方法计算所需深度的土壤湿度。根据上一节的讨论,选取 Noah 方案,在保持其余参数化方案及参量设置一样的前提下对土壤湿度初始场数据进行替换,分析改进的土壤湿度初值对降水过程模拟的效果。

3.3 改进试验结果分析

3.3.1 初始土壤湿度

土壤湿度初始场的变化对陆面过程特别是对陆面向大气的水分输送和能量通量有很大影响。图 3 给出 10 cm 处 CLSMDAS 输出土壤湿度和模式初始时刻土壤湿度的差异(CLSMDAS-NCEP),由图 3b 可以看出,研究区域 NCEP 资料的土壤湿度模拟整体高于 CLSMDAS 的模拟结果,与 Roads 等(1999)及 Chen 等(1999)的研究结论一致,即 NCEP 资料的土壤湿度偏高,而 CLSMDAS 输出的土壤湿度数据经验证与观测资料更为接近,但 CLSMDAS 的结果整体偏干,所以导致两者的差异比较大。

分析各层的土壤湿度差异(图略)可以发现,浅层土壤湿度的空间变异性比较明显,在已经发生降水的区域或者鄱阳湖附近,两种资料的土壤湿度差异比较小;而越往深层,土壤湿度的差异越大,一方面说明前期降水对深层土壤的影响还比较小,向下的渗透未能对深层的土壤湿度产生明显的作用,另一方面也说明模式对深层土壤湿度的模拟性能有待进一步验证,深层土壤对陆面模式的敏感性有待进一步分析。

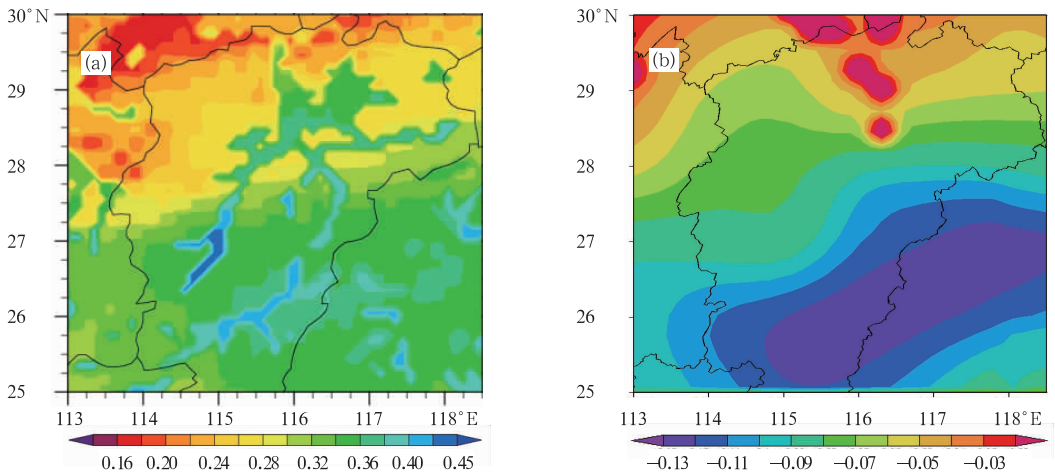


图 3 (a) CLSMDAS 模式输出的 10 cm 处土壤湿度(单位: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

(b) CLSMDAS 与 NCEP 中初始土壤湿度场 10 cm 上的差异分布(CLSMDAS-NCEP)

Fig. 3 (a) Soil moisture at 10 cm spot output from CLSMDAS model (unit: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$),

(b) differences (CLSMDAS minus NCEP) of volumetric soil moisture

at 10 cm spot at the initial time

3.3.2 3 h 时段降水

土壤湿度值对应于整个模拟区域的土壤饱和度或孔隙度,而土壤含水量不仅可以反映过去降水的

发生状况,也对后期的降水产生影响。我们知道,较干土壤中的水汽含量呈现不饱和状态,大部分的地表水将渗透到土壤中,使得通过潜热蒸发进入到

气中的水汽减少,从而导致降水的减少;而较湿的土壤容易达到饱和,通过蒸发进入大气的地表水增多并引起降水的增加;但当土壤湿度增加到一定程度陆面供水充分后,地表的水分蒸发则主要取决于大气中水汽的饱和状况。

图 4 是 NCEP 和 CLSMDAS 模拟的 10 cm 处土壤湿度的差异(CLSMDAS-NCEP)以及对应下一时段 3 h 的累积降水差异。由于 NCEP 资料的土壤湿度值偏高,在降水初期会使得降水的强度增加,但随着降水过程的发生,土壤湿度容易达到饱和,陆面供水充分时地表蒸发的影响相对要小,甚至不敏感,而此时 CLSMDAS 模拟的土壤湿度则呈现逐步增大的趋势,会有更多的地表水蒸发进入大气引起

降水强度的增加,所以 12 时(图 4b)在(27.6°N、116.5°E)附近出现了由负降水变为大的正值中心的降水差异。而到降水后期,图 4c 中 21 时降水落区的土壤湿度差异逐渐减小,随着渗透以及降水的消失,NCEP 模拟的土壤湿度表现为明显的减小趋势,而 CLSMDAS 的模拟在未饱和前仍呈逐渐增大的趋势,从而导致了 27.6°N 附近降水差异大的正值中心,达到 60 mm 的量级。而在(28°~29°N、115.5°~117.5°E)附近出现的新降水区域,可以看到较强的降水差异负值,达到 40 mm 的量级,这就是由于 NCEP 资料土壤偏湿,从而导致较大的热通量从地表进入到边界层中,使得低层大气能量交换更为明显,引起降水强度的增加。

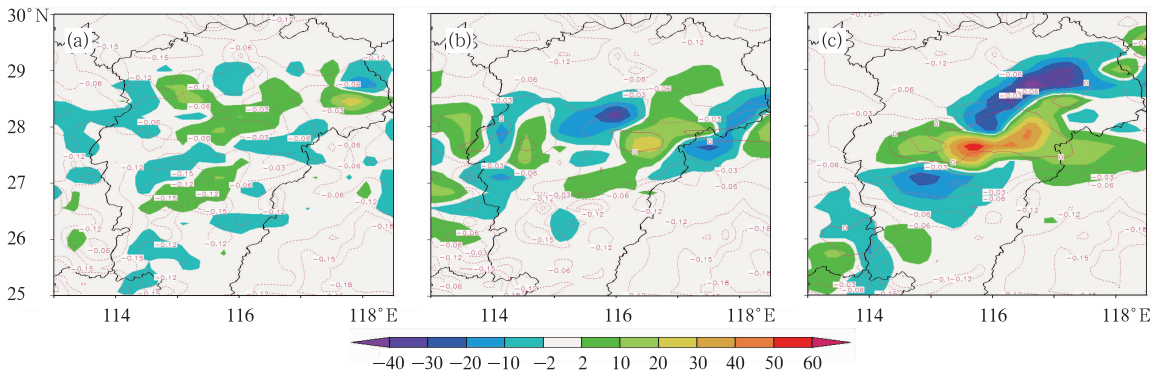


图 4 不同土壤湿度初值条件下模拟的土壤湿度及其下一时段降水的差异分布(CLSMDAS-NCEP)

(a) 03 时, (b) 12 时, (c) 21 时

(等值线图为土壤湿度,单位: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 填色图为 3 h 降水,单位: mm)

Fig. 4 Differences (CLSMDAS minus NCEP) of soil moisture and latter period precipitation simulated from different initial soil moisture

(a) 03:00 UTC, (b) 12:00 UTC, (c) 21:00 UTC

(Contour is soil moisture, unit: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; shadow is 3-h rainfall, unit: mm)

3.3.3 24 h 累积降水

图 5 给出了不同土壤湿度初值条件下 24 h 累积降水的分布,观测结果(图 2a)表明,强降水主要位于赣北南部和赣中地区,降水呈带状分布,主要降水带分布在浙赣铁路沿线一带,中心强度可达 270 mm 以上,位于余江地区。由模拟结果与实况比较可以看出,NCEP 和 CLSMDAS 土壤湿度资料都能很好地模拟出雨区的带状分布特征,但模拟的雨区均较实况偏南,且在降水中心及其周围地区的雨强模拟上两者还存在一些差异。根据 Zhao 等(2006)的研究知道,NCEP 资料的土壤湿度一般表现为波动少动,不能客观地反映观测中土壤湿度在不同区域波动的特点,对于强降水过程中土壤湿度的响应

变化不是很明显。由于 CLSMDAS 输出结果的分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,而 NCEP 资料的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,所以两种初始条件下模式的模拟结果中包含的局地细节信息不同,CLSMDAS 的输出结果具有较高的分辨率,可以更好地表现局部的细节信息,而 NCEP 资料中的一些细节信息则不能很好地体现出来。

对比两种初始条件下的模拟结果可以发现,在 CLSMDAS 中 270 mm 的等值线较 NCEP 模拟范围更大些,出现 3 个降水中心,体现出区域波动的特点;在赣东上饶市附近 210 mm 以上累积降水的模拟与实况较为一致,而在 NCEP 模拟中却未能体现;在(28.6°N、117°E)附近较弱的降水区域的模拟

上也优于 NCEP 的模拟结果。在实况观测降水雨带的大部分区域 CLSMDAS 模拟与实况基本一致,比 NCEP 的模拟结果更接近实况,而且最重要的一点是,CLSMDAS 的模拟是唯一能够细致地体现出

降水中心的西北-东南走向的,能够表现局部细节特征,对于降水的发生更为敏感,这在其他的方案模拟结果中是无法实现的。

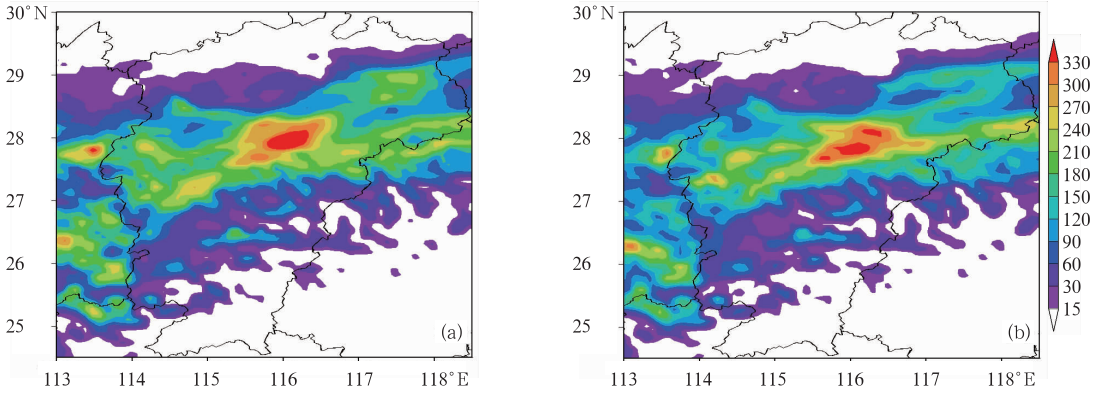


图 5 2010 年 6 月 19 日 00 时至 20 日 00 时不同土壤湿度初值条件下 24 h 累积降水分布
(a) NCEP 资料, (b) CLSMDAS 输出的土壤湿度资料 (单位:mm)

Fig. 5 24-h precipitation simulated from different initial soil moisture from 00:00 UTC
19 June to 00:00 UTC 20 June 2010
(a) NCEP data, (b) CLSMDAS output (unit: mm)

3.3.4 地表热通量

土壤湿度初值可以引起地表能量的变化,大气中能量释放的早晚、快慢以及多寡决定了中尺度对流系统发生发展的时间和强度,也直接决定了降水的发生发展过程(卢萍等,2008)。图 6 给出了不同土壤湿度初值条件下模拟的感热通量与潜热通量的差异,由图可以看出,06 时两种条件下热通量的差值比较大,潜热通量的差异更为明显,说明冷暖空气交汇引起的前期降水使得地表土壤湿度增大,潜热通量逐渐占据主导地位,提供给大气中的水汽增多,由于土壤湿度初值的不同,从而导致潜热通量的响应差异比较大。研究发现,土壤湿度初值的差异对降水具有明显的反馈作用,模拟土壤湿度的变化引起感热潜热通量的变化,对提高 WRF 的降水预报能力具有一定的指导意义。

土壤湿度对降水的响应的主要原因是:在降水发生的初期地表土壤湿度较小,因而由潜热通量提供给大气中的水汽也较少,此时主要是感热通量的变化,太阳辐射使得地表增温较快,局地热对流迅速发展,并造成大气不稳定,冷暖空气的交汇引起降水的产生;而后随着冷空气的继续侵入,前期降水使得地表土壤湿度增大,潜热通量逐渐占据主导地位,通过改变大气的层结状况来影响大气中能量的分布,

并配合有利的环流形势,使得中尺度对流活动增多,降水过程进一步加强。

3.4 改进试验结果检验

为定量分析不同土壤湿度初值条件下降水模拟结果的差异,本文采用降水分级检验的 TS(threat score)评分方法对模拟结果进行评估,将模拟区域内的实况降水与插值到站点的模拟值做统计检验,将降水等级划分为:小雨(>0 且 <10 mm),中雨(≥ 10 mm 且 <25 mm),大雨(≥ 25 mm 且 <50 mm),暴雨(≥ 50 mm 且 <100 mm),大暴雨(≥ 100 mm 且 <200 mm),较大暴雨(≥ 150 mm 且 <200 mm),特大暴雨(≥ 200 mm 且 <300 mm),评分表达式可写为:

$$TS \text{ 评分}(TS): N_a / (N_a + N_b + N_c) \quad (1)$$

$$\text{空报率}(NH): N_b / (N_a + N_b) \quad (2)$$

$$\text{漏报率}(PO): N_c / (N_a + N_c) \quad (3)$$

$$\text{预报偏差}(Bias): N_a + N_b / (N_a + N_c) \quad (4)$$

式中, N_a 为正确的站点数,即模式与实况均有某量级降水; N_b 为空报的站点数,即观测无某量级降水而模拟结果有; N_c 为漏报的站点数,即观测有某量级降水而模拟结果无。

表 1 给出不同土壤湿度初值条件下模拟降水的

评分结果,可以看出:对于小雨级别的降水,TS 评分均较高,改进效果不太明显;对于中雨级别的降水,TS 评分值均较低,且改进试验未能带来正效

果;但对大雨级别的降水,改进试验有一定的正调整;对于暴雨及以上级别的降水,TS 评分则有明显的提高,如[50,100)量级降水的TS评分提高了

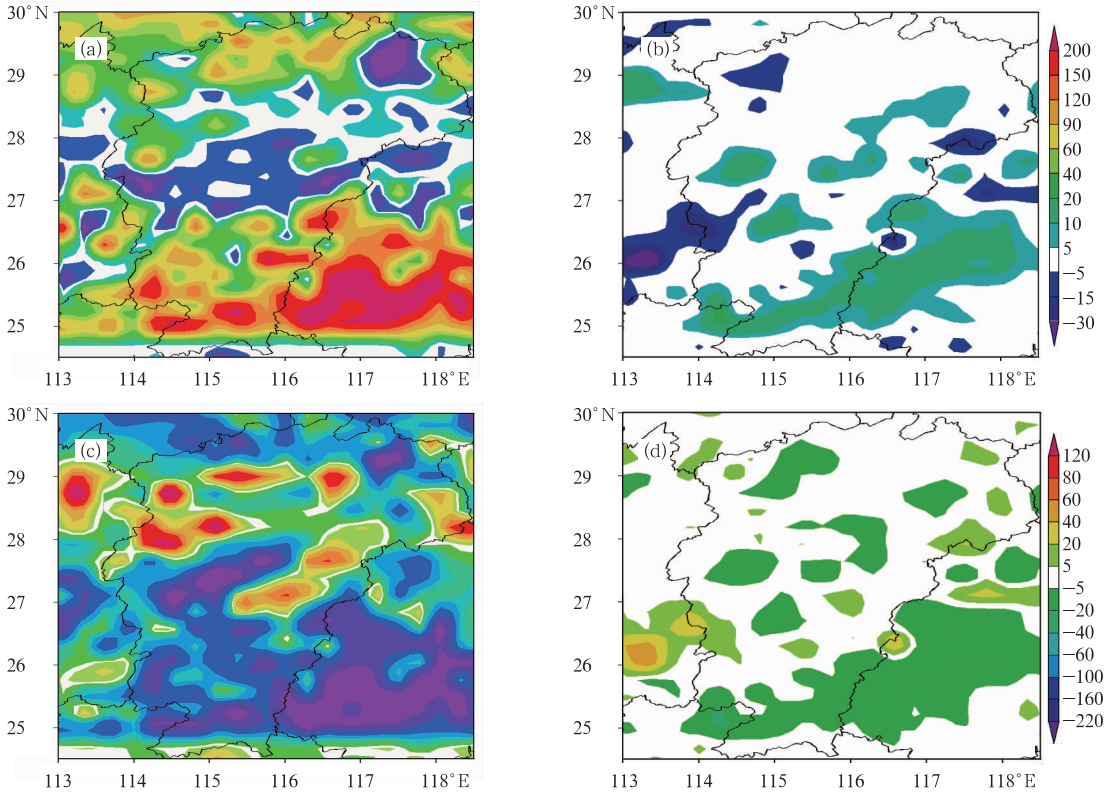


图 6 不同土壤湿度初值条件下模拟的感热通量(a, b)与潜热通量(c, d)的差异分布(CLSMDAS-NCEP)(单位:W·m⁻²)

(a) 06 时感热通量差异, (b) 18 时感热通量差异, (c) 06 时潜热通量差异, (d) 18 时潜热通量差异

Fig. 6 Differences (CLSMDAS minus NCEP) of sensible heat flux (a, b) and latent heat flux (c, d) simulated from different initial soil moisture sensible heat flux at 06:00 UTC (a) and 18:00 UTC (b); latent heat flux at 06:00 UTC (c) and 18:00 UTC (d)

表 1 不同土壤湿度初值条件下不同等级降水的评分结果

Table 1 Verification results of different precipitation intensities for different initial soil moisture

土壤湿度初值	降水等级	TS	空报率	漏报率	预报偏差
NCEP 土壤湿度初值条件	(0,10)	0.67	0.28	0	1.4
	[10,25)	0.39	0.43	0.35	1.25
	[25,50)	0.31	0.54	0.44	1.57
	[50,100)	0.5	0.3	0.23	1.34
	[100,150)	0.43	0.24	0.21	1.91
	[150,200)	0.22	0.6	0.35	1.18
	[200,300)	0.36	0.48	0.37	0.8
CLSMDAS 土壤湿度初值条件	(0,10)	0.68	0.27	0	1.39
	[10,25)	0.37	0.45	0.35	1.35
	[25,50)	0.33	0.52	0.4	1.51
	[50,100)	0.62	0.18	0.12	1.13
	[100,150)	0.38	0.43	0.33	1.65
	[150,200)	0.25	0.54	0.32	1.36
	[200,300)	0.42	0.26	0.2	0.76

0.12,空报率和漏报率分别减小了0.12和0.11,预报偏差值明显减小,达到0.21的差值,是模拟结果较好的一个量级;对于[200,300)量级特大暴雨的评分检验,TS评分从0.36调整到0.42,可以得出与前面一致的结论,CLSM-DAS土壤湿度初值条件下降水中心的模拟结果要优于NCEP的,与实况降水分布更为接近,且更能体现降水的区域波动性特点。除中雨和大暴雨外,CLSM-DAS土壤湿度初值条件下各量级降水的TS评分基本都要高于NCEP土壤湿度初值条件下的结果,空报率和漏报率进一步减小,说明不同级别降水的模拟结果与实况站点分布更为接近。

4 结论与讨论

利用WRF模式对2010年6月19日江西地区的一次强降水过程进行模拟,比较几种陆面方案对此次降水过程的模拟结果,在此基础上利用CLSM-DAS模式输出的土壤湿度替换NCEP资料中的土壤湿度数据,分析改进的土壤湿度初始场对降水模拟的影响,得到以下结论:

(1) WRF模式耦合几种陆面方案的模拟中,雨带的分布及降水中心的位置与实况之间存在一定的差异。针对此次降水过程,对于24h累积降水的模拟从定性的角度考虑,Noah方案能够大致模拟出雨带分布与中心雨强,要优于其他的几种方案。

(2) 土壤湿度改进试验说明,初始土壤湿度的变化对降水的响应是敏感的,土壤湿度初始场的变化可以引起短时降水及地表热通量明显的差异变化。对于24h累积降水的模拟,CLSM-DAS输出的较为准确的土壤湿度初值条件下的模拟对强降水中心的走向以及区域波动特点等都有较好的表现,从统计检验结果可以看出各量级降水的TS评分基本都要高于NCEP土壤湿度初值条件下的结果,空报率、漏报率和预报偏差进一步减小,不同级别降水的模拟结果与实况站点分布更为接近。此外,这些研究对于分析局地区域降水出现的时间以及降水强度的变化等也有一定的指导意义。

总体而言,陆面方案及陆面参数(这里考虑土壤湿度)虽然不能根本改变降水的模拟,但能起到改善的作用,模拟的结果还有待进一步提高,下一步可以在卫星资料同化方面开展研究,在改变模式初始场的基础上,综合考虑多种陆面参数(如土壤温度、土

壤湿度等)的影响,提高模式的模拟能力。

致谢:衷心感谢中国气象局武汉暴雨研究所张瑛老师、中国科学院大气物理研究所赵得明老师等对本文的指导,以及好友张涛、张斌等给予的帮助。

参考文献

- 郭锐,李泽椿,张国平.2010.ATOVS资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究.气象,36(2):1-12.
- 何光碧.2012.西南低涡研究综述.气象,38(2):155-163.
- 李安泰,何宏让,张云.2012.WRF模式陆面参数扰动对一次西北暴雨影响的数值模拟.高原气象,31(1):65-75.
- 卢萍,宇如聪.2008.地表潜热通量对四川地区降水影响的数值分析.高原山地气象研究,28(3):1-7.
- 马红云,郭品文,宋洁.2009.耦合不同陆面方案的WRF模式对2007年7月江淮强降水过程的模拟.大气科学,33(3):557-567.
- 师春香,谢正辉.2008.基于静止气象卫星观测的降水时间降尺度研究.地理科学进展,27(4):15-22.
- 师春香,谢正辉,钱辉,等.2011.基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度EnKF数据同化.中国科学:地球科学,41(3):375-385.
- 汪薇,尹小飞,张瑛.2011.应用WRF模式对江西一次暴雨过程的模拟分析.气象与减灾研究,34(1):32-39.
- 肖递祥,杨康权,祁生秀.2012.2011年7月四川盆地两次突发性暴雨过程的对比分析.气象,38(12):1482-1491.
- 熊仕焱,曾新民,刘金波,等.2010.陆面参数随机扰动对一次暴雨过程模拟的影响分析.暴雨灾害,29(2):117-121.
- 曾新民,张强.2009.一次暴雨天气对陆面参数扰动的敏感性数值影响.解放军理工大学学报,10(4):384-390.
- 张端禹,王明欢,陈波.2010.2008年8月末湖北连续大暴雨的水汽输送特征.气象,36(2):48-53.
- 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.
- 朱晨,师春香,席琳,等.中国区域不同深度土壤湿度模拟和评估.气象科技,待发表.
- Cassardo C, Balsamo G P, Cacciamani C, et al. 2002. Impact of soil surface moisture initialization on rainfall in a limited area model: a case study of the 1995 South Ticino flash flood. Hydrol Process, 16:1301-1317.
- Chen F, Coauthors. 1996. Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. J Geophys Res, 101:7251-7268.
- Chen F, Mitchell K. 1999. Using GEWEX/ISLSCP forcing data to simulate global soil moisture fields and hydrological cycle for 1987-1988. Meteor. Soc. Japan, 77:1-6.
- Roads J Q, Chen S C, Kanamitsu M, et al. 1999. NCEP's water and energy budget analysis residuals. Geophys Res, 104 (D16): 19307-19327.
- Zhao Deming, Su Bingkai, Zhao Ming, et al. 2006. Soil moisture retrieval from satellite images and its application to heavy rain simulation in eastern China. Adv Atm Sci, 23(2):299-316.