

熊仕焱,曾新民,刘金波,等.陆面参数随机扰动对一次暴雨过程模拟的影响分析[J].暴雨灾害,2010,29(2):117-121

# 陆面参数随机扰动对一次暴雨过程模拟的影响分析

熊仕焱<sup>1</sup>,曾新民<sup>1,2</sup>,刘金波<sup>1</sup>,吴志皇<sup>1</sup>

(1.解放军理工大学气象学院,南京 211101;2.教育部中尺度灾害性天气重点实验室,南京大学,南京 210093)

**摘要:**利用中尺度模式 WRFV2.2,选取其中 NOAH 陆面模式进行陆面参数随机扰动试验,模拟研究了南京地区 2007 年 7 月 8—9 日的暴雨对扰动的敏感性。结果表明:(1)此次暴雨过程对陆面参数随机扰动较为敏感,其中对土壤最大容积含水量的扰动最为敏感,对地表反照率的扰动敏感性次之,对地表粗糙度、最小叶孔阻抗扰动的敏感性较前两者要小;(2)降水变化的触发原因是陆面参数扰动引起的通量变化,其主要的机制是通过低层大气环流(如低空急流)和水汽辐合来影响暴雨的落区和强度。

**关键词:**陆面参数;随机扰动;暴雨;数值模拟

中图分类号:P435 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2010)02-0117-05

## 1 引言

前人关于陆气相互作用的研究主要集中在气候-陆面方面上,1969 年 Manabe<sup>[1]</sup>在大气环流模式中考虑了较为详细的陆面水文过程;Yeh 等<sup>[2]</sup>用简化的全球气候模式模拟了不同的纬度带灌溉后产生的气候、水文变化;Giorgi 等<sup>[3]</sup>利用区域气候模式模拟了夏季气温对土壤湿度的敏感性。近年来,陆面过程对短期天气影响的研究也逐渐为人们所关注,Pielke<sup>[4]</sup>指出,陆面特性量可对大气产生显著的影响,影响尺度可从单个雷暴尺度到全球尺度;Zeng 等<sup>[5]</sup>发现陆面参数的非均匀性可影响暴雨强度;Jin 和 Miller<sup>[6]</sup>发现积雪对逐日天气变化有较大影响;张朝林等<sup>[7]</sup>研究了引用北京地区下垫面信息后对暴雨模拟的影响。

同时,如何准确或合理地为中尺度模式提供初值是短期天气数值模拟或预报的重要问题。为此,前人就中尺度模式的初值处理方法作过许多研究(如程小平等<sup>[8]</sup>在四维资料同化的工作,关吉平等<sup>[9]</sup>在增长模繁殖法初始分析误差的工作)。但这些工作都是着眼于大气变量的初值方面。事实上,中尺度模式中陆面参数的选取也至关重要。由于陆面参数取值的不确定性,曾新民和张强<sup>[10]</sup>通过设置陆面参数的扰动,证实了暴雨模拟对这种扰动的敏感性。但该文中选取的陆面参数扰动是基于一种确定性扰动比率设置的方法。由于陆面参数取值存在诸多方面的不确定性(如观测精度、观测空间分辨率,资料获取时间与模拟时间的差异等),更为实际的参数扰动显然具有一定的随机性。因

此,本文采用随机扰动方法,利用中尺度模式 WRF,模拟研究了 2007 年 7 月南京地区的一次暴雨个例对陆面参数初始扰动的敏感性。

## 2 模式及试验方案简介

本文采用中尺度模式 WRF,该模式是美国环境预报中心(NCEP)、国家大气研究中心(NCAR)等科研机构推动开发的新一代中尺度研究预报模式,自 2000 年后已广泛地应用于各种研究与业务预报中<sup>[11]</sup>。该模式为非静力完全可压缩,水平方向采用 Arakawa C 网格,垂直方向采用地形跟随质量坐标,在时间积分方面采用二阶或三阶的 Runge-Kutta 算法。

作为 WRF 模式中陆面过程方案的一个主要选项,NOAH 陆面方案最早源自 Pan 和 Mahrt<sup>[12]</sup>的工作,后来 Chen 等作了一些改进<sup>[13]</sup>,其后多个机构对其进行了合作开发和不断完善。NOAH 陆面方案根据陆面水平衡及能量平衡规律,对土壤湿度、土壤温度、雪深及其水当量、冠层水含量等进行了详细的模拟。

本文模拟区域中心点为(32°N,118°E),分辨率为 10 km,格点数为 90×75。除选取 NOAH 陆面模式外,其他物理方案还包括:WSM 3-class simple ice 微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、YSU 边界层方案、Betts-Miller-Janjic 积云方案。

模拟的初始场及边界条件采用 NCEP 1°×1° FNL 资料。积分时间从 2007 年 7 月 8 日 00UTC 至 9 日 00UTC 共 24 h,输出结果时间间隔为 1 h。

在 NOAH 陆面方案中,相关参数包括由土壤类型

收稿日期:2010-02-02;定稿日期:2010-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40875067 号)及中国科学院知识创新工程领域前沿项目(IAP09306)共同资助

作者简介:熊仕焱,男,1983 年生,研究生,主要研究方向为陆面过程数值模拟。E-mail: xionsgyan@163.com

决定的参数、由植被类型决定的参数以及其它的一般参数。这里具体选取地表反照率(简记为 AL)、地表粗糙度(Z0)、最小叶孔阻抗(RS)、土壤最大容积水含量(SM),其中前三种取决于植被类型(此处采用 USGS 给出的 27 种不同植被的分类),后一个取决于土壤类型(STAS 给定的 19 种土壤类型)。对这些参数取一组扰动比率系数  $k$ ,令  $k$  为设计模拟试验的陆面参数初始值与原版 WRF 模拟标准输入值的比值。

$k$  为控制在一定范围的随机数,以使得参数基本都在可以接受的自然变率范围内。利用 fortran 90 软件编程生成一个取值在 0.0~1.0 之间的随机数组

$$\text{random}(9), r(i) = \text{random}(i) / \sum [\text{random}(i)], k(i) = 0.3r(i) + (1 - 0.3), i = 1, 2, 3, \dots, 9。$$

这里实际取得的随机数  $r(9)$  为 (0.759983, 0.171077, 0.026302, 0.185976, 0.801924, 0.054943, 0.890182, 0.593184, 0.361654), 排列后的  $k(9)$  为 (0.718468, 0.738579, 0.820125, 0.830587, 0.953943, 1.116516, 1.233637, 1.263087, 1.325059)。

对每个参数做 9 个模拟试验,加上没有扰动的原版 WRF 模拟试验( $k=1$ ,控制试验 CTL),共设计 37 个试验(试验命名见表 1),以检验这些参数的扰动对此次暴雨模拟结果的影响。

表 1 陆面参数初始随机扰动的设计试验方案

试验方案	扰动比率系数 $k$ 命名									K=1
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	
粗糙度(Z0)试验	Z01	Z02	Z03	Z04	Z05	Z06	Z07	Z08	Z09	CTL
反照率(AL)试验	AL1	AL2	AL3	AL4	AL5	AL6	AL7	AL8	AL9	CTL
最小叶孔阻抗(RS)试验	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7	RS8	RS9	CTL
最大土壤水含量(SM)试验	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	SM6	SM7	SM8	SM9	CTL

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 降水模拟结果

2007 年 7 月初,江淮流域进入了梅雨季节。从 7 月 7 日开始,随着梅雨锋的南北摆动,受梅雨锋和底层切变线影响,7 月 7—8 日,江苏省沿江和江淮之间出现暴雨到大暴雨;8 日西太平洋副热带高压势力有所减弱,梅雨主轴南压,全省沿江地区普降暴雨;9 日随着低槽东移出海,全省的雨势减小。期间,强降水过程主要集中在江宁、南京和江浦,据观测,其中江浦

站 1 h 降水量达到 70.6 mm,为建站以来 1 h 降水量历史最高值。

图 1 给出了模拟及观测的 24 h 降水情况(在这里以 SMK7 作为扰动模拟试验的例子)。图中方框区域为考察区域,其面积约为 125 386 km<sup>2</sup>。由图可知,各个方案总体模拟降水情况与实况基本吻合,均较好地模拟出了我国江淮流域的强降水带,(32.5°N,116.3°E)附近的降水中心位置也模拟较好,与实况大致相符。但各试验模拟的强中心位置及降水落区分布上存在一些差异。

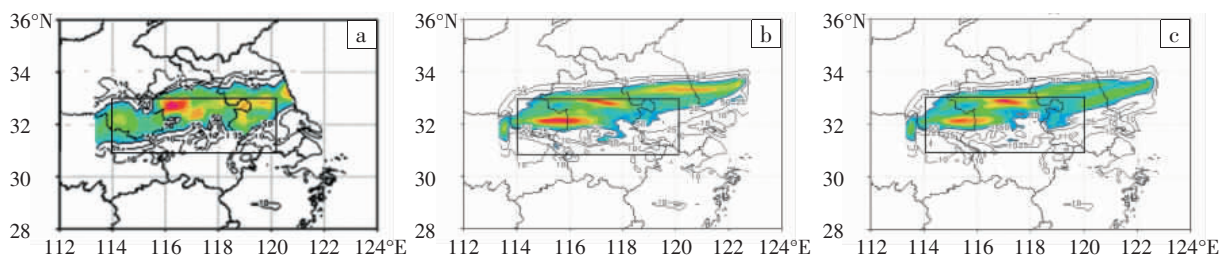


图 1 模拟及观测的 2007 年 7 月 8 日 00UTC 至 9 日 00UTC 24 h 降水(单位:mm)分布图(a:OBS,b:CTL,c:SMK7)

图 2 给出了由地表反照率(AL)、地表粗糙度(Z0)、最小叶孔阻抗(RS)、土壤最大容积水含量(SM)四种参数的扰动引起的 24 h 模拟降水各种特征量的变化。如果只比较单站的累计降水值,可能因观测误差或者偶然因素导致结果的较大偏差,所以这里用累计降水的区域平均来衡量累计降水的变化大小。降水的区域平均是指所研究区域的单位面积降水量。从图中可以看出,扰动引起的模拟 24 h 降水区域平均差异可达 10%左右(图 2a),中心降水量差异可达 30 mm 左右

(约 15%,图 2b),大雨及暴雨面积差异均可达 10%左右(图 2c,d)。综合 4 个扰动因子可知,以土壤最大容积水含量(SM)、地表反照率(AL)扰动的影响最为显著,最小叶孔阻抗(RS)及地表粗糙度(Z0)扰动影响较小。

图 3 给出了由扰动引起的格元尺度降水、积云降水变化的区域平均百分率。由图可知,各种扰动引起的模拟 24 h 降水变化的特点有所差异,AL 扰动更易引起格元尺度降水的变化,并以此较大幅度地导致总降水的变化(区域平均差异可达 8%左右,图 3a);RS 扰

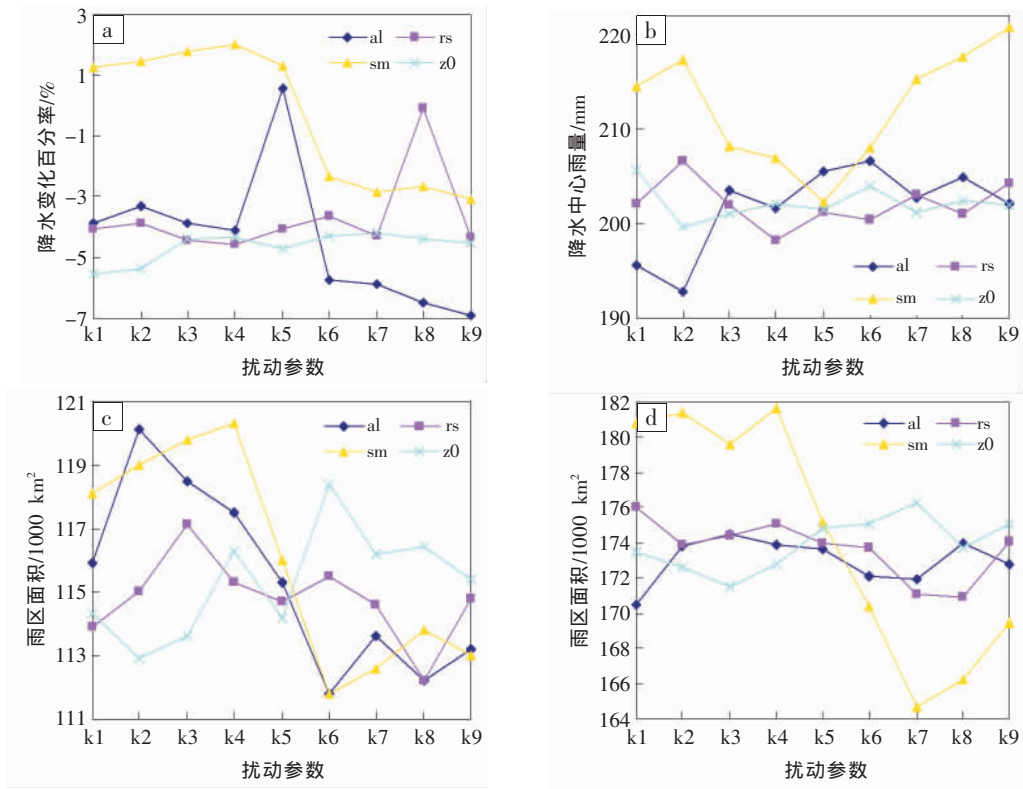


图 2 由扰动引起的降水特征量变化图(a:区域平均降水;b:区域降水中心值;  
c:>25 mm 雨区面积;d:>50 mm 雨区面积)

动则更易引起格元尺度的变化,并以此较大幅度地导致总降水的变化(区域平均差异可达 5%左右,图 3b); SM 扰动可引起积云降水非常大的变化幅度(区域平均差异可达 20%左右,图 3c),但总降水的变化小;Z0 扰

动的影 响主要体现在格元尺度降水上。值得注意的是,这些扰动都导致考察区域降水减少。

图 4 给出了各试验模拟的大于 50 mm 降水的 TS 评分结果。从图中可以看出,扰动可导致 TS 评分的波

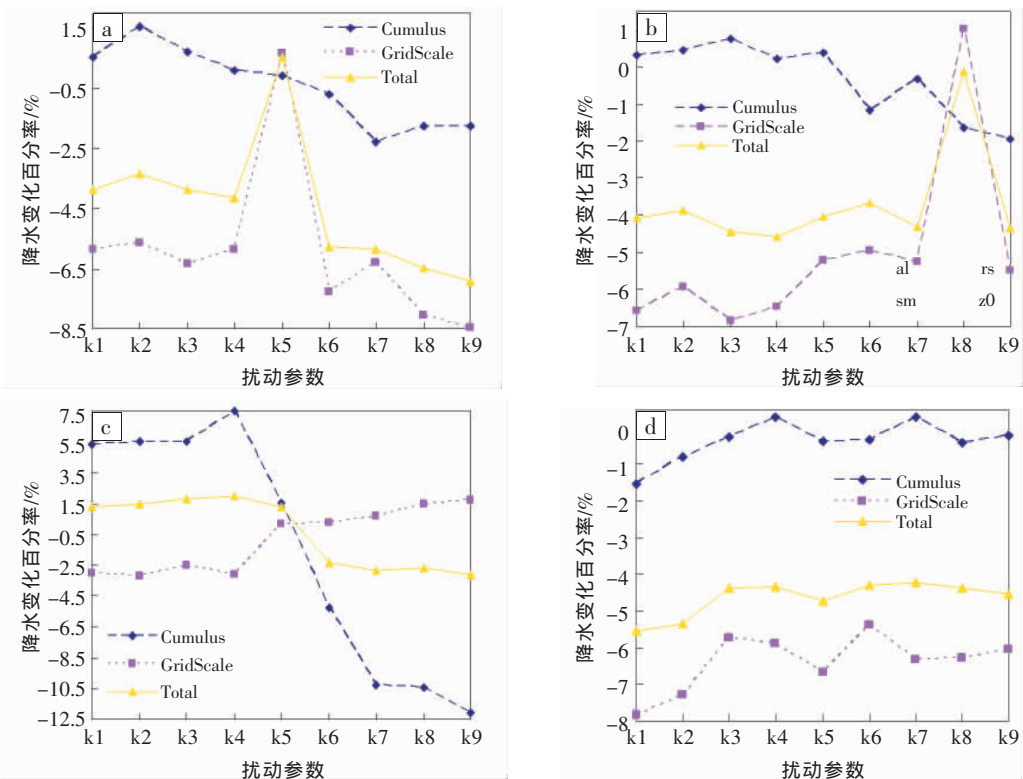


图 3 由扰动引起的格元尺度降水、积云降水变化的区域平均百分率图(a:AL;b:RS;c:SM;d:Z0)

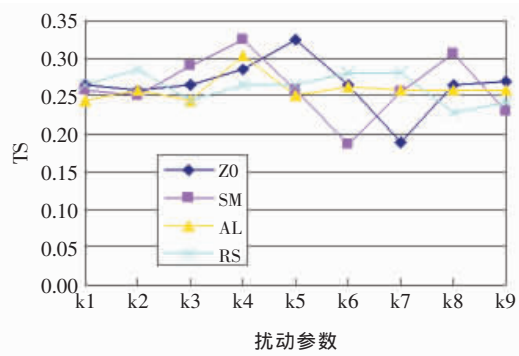


图 4 不同试验方案大于 50 mm 降水的 TS 评分

动,其中 Z0,SM 扰动引起的大于 50 mm 降水的 TS 评分波动范围较大。

### 3.2 机理简析

图 5 给出了模拟的由 SM 扰动引起的区域平均逐时感热通量及降水变化。由图可知,陆面参数化扰动引起的通量变化与模拟降水波动并非同步的。

图 6 为 2007 年 7 月 8 日 15 时所选区域 850 hPa 试验 CTL、SMK9 的急流和潜热通量。由图可见,低空急流的范围及强度出现大幅度的增强,使得水汽输送增加,且在低层辐合,从而加强了区域降水。

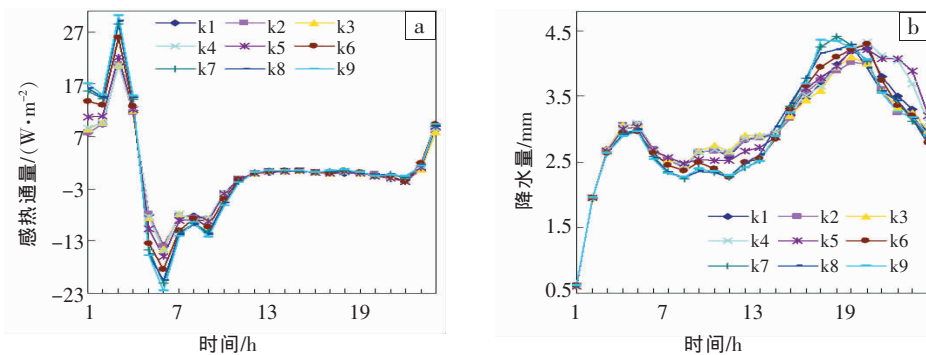


图 5 由 SM 扰动引起的区域平均逐时感热通量(a,单位:w/m²)及降水(b,单位:mm)变化

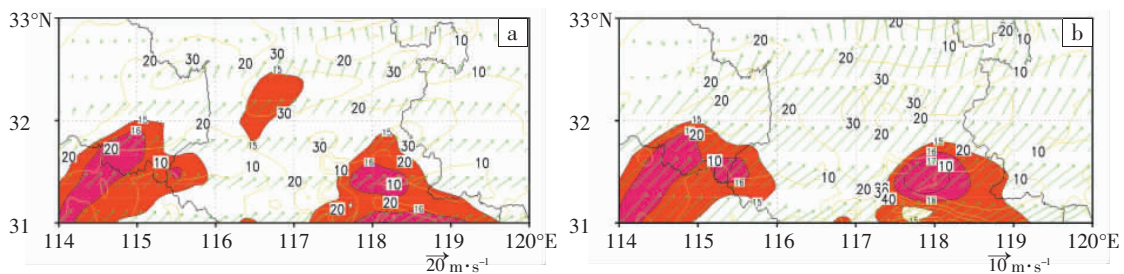


图 6 模拟 2007 年 7 月 8 日 1 500UTC 考察区域 850 hPa 急流(阴影 $\geq 15$  m/s 风速区)及潜热通量(等值线,单位:w/m²)分布图(a:CTL 试验;b:SMK9 试验)

由水量平衡原理,陆面上区域 S 某一时段内降水 P 可来自:1)S 上方气柱中的水汽量;2)气柱中的云水量;3)气柱外围的辐合;4) 区域表面蒸发。表 2 给出了 24 h 由于参数 SM 扰动引起的水通量的总体变化。从表中数据可知,即使地表蒸发全部转化为降水,比率

也仅为 5%左右,可见蒸发转化的降水量只占总降水相当小的一部分。如表 2 中 SMK5 与 SMK6 试验比较,累积蒸发量增大 0.14 mm,总降水减小 2.48 mm,两者并不同步增大,对考察的较小尺度的暴雨区域来说,显然是区域强烈水平辐合的较大变化导致了降水的变化。

表 2 SM 试验模拟的 24 h 水通量的总体变化情况表

物理量	试验								
	SMK1	SMK2	SMK3	SMK4	SMK5	SMK6	SMK7	SMK8	SMK9
平均水汽通量/( $10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	2.32	2.34	2.36	2.38	2.44	2.56	2.37	2.34	2.32
累积蒸发量/mm	2.59	2.61	2.63	2.65	2.72	2.86	2.64	2.61	2.58
总降水/mm	62.25	62.26	62.50	62.84	60.44	57.96	56.66	56.72	56.47

土壤最大含水量扰动直接影响土壤内部的水、热传输特性的变化,从而也影响到陆面-大气间的热量和水汽的交换。由以上 SM 扰动影响降水的结果可知,SM 扰动更主要地是通过影响低层大气环流(如低空急流)和水汽辐合,进而影响降水过程。即,暴雨过程中雨

量的增加并非主要由于地表水汽的垂直方向湍流输送,而主要是通过水平水汽辐合,从而影响降水区域和强度的变化。其它陆面参数的扰动也是如此<sup>[12]</sup>(限于篇幅,这里不再一一讨论)。

陆面参数化扰动首先引起地表通量变化,在模拟

降水处于“spin-up”时段也能显示出这一变化,通量变化可能是模拟降水变化的触发因子;但更为重要的是,扰动引起了环流及水汽输送的变化(见图6),从而在考察暴雨出现的子区域尺度上,可引起较大的降水变化。

#### 4 结论

利用中尺度模式 WRFV2.2, 选取 NOAH 陆面模式进行陆面参数随机扰动试验, 模拟研究了南京地区 2007 年 7 月 8—9 日的暴雨过程对扰动的敏感性, 主要结论如下:

(1) 此次暴雨过程对陆面参数随机扰动是较为敏感的, 扰动引起的模拟 24 h 降水区域平均差异可达 10% 左右, 中心降水量差异可达 30 mm 左右, 大雨及暴雨面积差异均可达 10% 左右。

(2) 综合 4 个扰动因子, 此次暴雨模拟对土壤最大容积含水量的扰动最为敏感, 对地表反照率的扰动敏感性次之, 对地表粗糙度、最小叶孔阻抗扰动的敏感性较前两者要小。

(3) 降水变化的触发原因可能是陆面参数扰动引起的通量变化, 主要的机制是通过低层大气环流(如低空急流)和水汽辐合, 而影响暴雨的落区和强度。

#### 参考文献:

- [1] Manabe S. Climate and ocean circulation: The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface [J]. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 939-805.  
 [2] Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effects of soil moisture

- on the short-term climate and hydrology change, a numerical experiment[J]. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 474-490.  
 [3] Giorgi F, Marinucci M R. Validation of regional climate model over Europe: Sensitivities of wintertime and summer time simulations to selected parameterizations and lower boundary conditions[J]. *Quart J R Meteor Soc*, 1991, 117: 1171-1206.  
 [4] Pielke R A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall [J]. *Rev Geophys*, 2001, 39:151-177.  
 [5] Zeng Xinmin, Zhao Ming, Su Bingkai. A Numerical Study on Effects of Land-surface Heterogeneity from 'Combined Approach' on Atmospheric Process, Part II: Coupling-model simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17: 441-455.  
 [6] Jin J, Miller N L. Analysis of the impact of snow on daily weather variability in mountainous regions using MM5 [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8: 245-258.  
 [7] 张朝林, 苗世光, 李青春, 等. 北京精细下垫面信息引入对暴雨模拟的影响[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(5):1373-1382.  
 [8] 程小平, 侯志明, 费建芳, 等. 四维变分同化方法在暴雨预报中的应用[J]. *气象科学*, 2006, 26(2):143-148.  
 [9] 关吉平, 张立凤, 马环宇. 基于增长模繁殖法的初始分析误差计算及集合预报试验[J]. *气象科学*, 2009, 29(3):317-322.  
 [10] 曾新民, 张强. 陆面参数的扰动对一次西北暴雨模拟影响的研究[J]. *气象科学*, 2009, 29(3):291-298.  
 [11] 章国才. 美国 WRF 模式的进展和应用[J]. *气象*, 2004, 30(12):27-31.  
 [12] Pan H L, Mahrt L. Interaction between soil hydrology and boundary-layer development [J]. *Bound-Layer Meteor*, 1987, 38: 185-202.  
 [13] CHEN F, Dudhia J. Coupling and advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon Weather Rev*, 2001, 129, 569-585.

## Numerical Simulation on the Sensitivity of a Heavy Rain Case to the Random Disturbances of Land Surface Parameters

XIONG Shi-yan<sup>1</sup>, ZENG Xin-min<sup>1,2</sup>, LIU Jin-bo<sup>1</sup>, WU Zhi-huang<sup>1</sup>

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101;

2. Key Laboratory for Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract:** The simulation of the heavy rainfall occurring in Nanjing during 8~9 July, 2007 was conducted to test the sensitivity of the rainfall to the random perturbation of NOAH land surface parameters by using WRFV2.2. The conclusions show: (1) The heavy rainfall is sensitive to random perturbations of the land surface parameters. The maximum volumetric soil water is the most sensitive to disturbance, the second is surface albedo, and the surface roughness length and the minimum stomatal resistance are less sensitive to the disturbance than the first two. (2) These disturbances directly result in the change in the surfaces fluxes, and more importantly, through the change in the low-level circulations (e.g., low-level jet) and moisture convergence, greatly influence the intensity and area of the heavy rainfall.

**Key words:** Land surface parameters; Random perturbation; Heavy rain; Numerical simulation