

# 不同陆面过程参数化方案模拟效果评估

谢菲, 何宏让, 张云 (解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

**摘要** [目的]模拟南京及其周边一次区域雾天气过程变化过程。[方法]利用2013年12月6日NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料为初始场, 采用WRF模式对陆面过程参数化方案进行了敏感性数值试验, 利用相关系数、平均偏差、平均绝对偏差、观测值的标准偏差、模拟值的标准偏差等对各参数化方案下的物理量的模拟效果进行评估, 并与南京站的地面常规观测资料进行对比。[结果]不同陆面过程参数化方案对大雾天气过程的模拟结果是敏感的, 不同的参数化方案模拟的地面温湿风存在较大差异, 其中SLAB方案模拟结果可信度最高, 偏差范围最小, 且各变量的偏差均呈现正态分布状态。[结论]此次大雾过程中相对湿度、温度露点差、地面温度等变量的模拟效果较好, 可将其作为判别指标, 为后期提高雾过程预报准确率提供依据。

**关键词** 区域雾; 数值模拟; 效果评估; 陆面方案

**中图分类号** S16 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)09-210-06

## Evaluation of Simulation Results for Different Parameterization Schemes of Land Process

XIE Fei, HE Hong-rang, ZHANG Yun (College of Meteorologic Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101)

**Abstract** [Objective] To simulate the process of fog weather in Nanjing and its surrounding area. [Method] With NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data on December 6, 2013 as the initial field, sensitive numerical experiment on parameterization schemes of land process was carried out by WRF mode. Simulation effects of physical quantity in parameterization schemes was evaluated by using the correlation coefficient, mean deviation, mean absolute deviation, standard deviation of observed value, standard deviation of simulated value. The results were compared with the ground routine observation data in Nanjing Station. [Result] Simulation results of fog weather were found to be the most sensitive by different parameterization schemes of land process. Surface moist wind simulated by different parameterization schemes had relatively significant differences. Among them, SLAB's scheme had the highest reliability of simulation results with the smallest deviation range. The deviation of each variable showed normal distribution state. [Conclusion] The simulation results of relative humidity, dew point temperature difference and surface temperature are consistent with the measured data. So they can be used as criterions and provide basis to improve the fog forecast accuracy in later period.

**Key words** Regional fog; Numerical simulation; Effect evaluation; Land scheme

随着社会经济的快速发展,雾引起的危害愈发明显,对机场、高速公路、城市道路和港口航道安全的威胁越来越严重,此外,大雾还会加剧近地层的空气污染,影响人类的生命健康。因此,开展雾天气的数值模拟技术研究对于提高雾的预报准确率和大雾产生机制的认识具有重要意义。国外对雾的数值模拟研究开展较早<sup>[1]</sup>,主要经历了一维<sup>[2]</sup>、二维<sup>[3]</sup>到三维<sup>[4]</sup>辐射雾模式,使雾的研究不断深入。国内应用数值模式对雾开展研究始于20世纪80年代中期,也经历了从一维<sup>[5-6]</sup>、二维<sup>[7]</sup>到比较完善的三维模式<sup>[8]</sup>。由于雾现象的出现越来越频繁,不少学者对雾的生消机制及条件均进行了更为细致的研究。同时随着研究的深入,有气象学家通过改变初始条件、边界条件、微物理方案、陆面方案等对模拟结果进行对比分析<sup>[9-10]</sup>,为提高大雾判识及预报准确率提供依据。

2013年12月5日起,南京及其周边受雾和霾共同影响严重,且以霾现象为主,能见度维持在3 km左右,这种状态持续到6日20:00后,雾过程逐渐产生并于7日02:00能见度开始骤降,08:00后发展成为部分地区能见度<50 m,但低能见度持续时间较短,即日出后开始消散,能见度维持在5 km以上。7日20:00起,能见度再次骤降,于8日08:00再次降至50 m左右,12:00大雾开始逐步减弱消散,直到9日

此次雾过程才完全结束<sup>[11]</sup>。由于雾一般由近地层产生后逐渐发展,与下垫面相关的陆面过程也会影响雾的变化,笔者通过不同陆面方案试验来研究大雾发展过程,同时由于WRF模式缺乏气溶胶参数,对霾的模拟效果不佳,所以该研究仅利用2013年12月6日NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料为初始场,对大雾过程中(6日20:00~9日02:00)的不同陆面过程参数化方案进行敏感性数值试验,并对模拟效果进行定量评估,从而得到模拟效果最佳方案,为进一步研究此次雾天气过程的特征和发生发展的演变机制奠定基础。

## 1 资料与方法

**1.1 模拟方案设计** 利用中尺度模式WRF3.5,采用三重网格嵌套方案,模式水平分辨率分别取27、9和3 km,格点数分别为 $200 \times 129$ 、 $283 \times 175$ 、 $361 \times 250$ ;地形分辨率分别为 $10'$ 、 $5'$ 、 $30''$ ;模拟区域中心为南京( $118.78^\circ\text{E}$ 、 $32.04^\circ\text{N}$ );模拟起止时间为2013年12月6日12:00~9日02:00,积分时间步长取90 s。模式参数设置如下:微物理过程选取Goddard方案,长波辐射过程选取RRTM方案,短波辐射过程选取Dudhia方案,近地面层选取Monin-Obukhov方案,边界层方案选取YSU方案。此外考虑到雾是发生在边界层内的天气现象,将垂直方向增加至42层,其中近地面700 m以下加密至21层。选取5类不同陆面过程参数化方案进行对比试验,包括5层热力扩散方案(SLAB方案)、RUC方案、Pleim-Xiu方案、Noah方案及不采用陆面方案(Wu方案)。

**1.2 模拟效果评估方法** 利用相关系数( $r$ )、平均偏差(MD)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、观测值

**基金项目** 国家重点基础研究计划(973计划)(2014CB441405); 国家科技部公益性气象行业科研专项项目(GYHY201006031); 中国气象局气象软科学项目(2012-053)。

**作者简介** 谢菲(1990-),女,江苏丹阳人,硕士研究生,研究方向:中小尺度数值模拟。

**收稿日期** 2016-03-01

的标准偏差 ( $SD\_O$ )、模拟值的标准偏差 ( $SD\_S$ )、观测值与模拟值的吻合指数 ( $IA$ ),对模拟第 3 重嵌套区域中在 2013 年 12 月 6 日 20:00~9 日 02:00 时间段中 2 m 高处相对湿度、2 m 高处温度露点差、地面风速、地面温度、海平面气压场等要素的模拟效果进行考察。国内外已有诸多学者利用该方法进行效果评估研究<sup>[12-14]</sup>。相关计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}} \quad (1)$$

$$MD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\phi_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$SD\_O = \frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$SD\_S = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|s_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

其中,  $s_i$  为第  $i$  个模拟值,  $O_i$  为第  $i$  个观测值,  $N$  为时间样本总数,  $\bar{O}$  为观测值的平均,  $\bar{s}$  为模拟值的平均,  $\phi_i$  为第  $i$  个模

拟值和观测值之间的差值。这些统计量中,  $MD$ 、 $MAE$ 、 $RMSE$  越小越好;  $r$  和  $IA$  为 1 时表明模拟值和观测值之间时空变化趋势吻合得很好, 为 0 则表明模拟值与观测值完全不吻合;  $SD\_O$  和  $SD\_S$  越接近越好<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 各气象要素模拟效果评估

由表 1 可见, SLAB、Noah、Pleim-Xiu 陆面过程参数化方案模拟所得 2 m 高处相对湿度、2 m 高处温度露点差、地面温度和海平面气压的相关系数通过了 95% 的置信度检验, 其中 2 m 高处温度露点差和地面温度相关系数均达 0.80 以上, 为高度相关。RUC 方案及 Wu 方案模拟的 2 m 高处相对湿度和温度露点差的相关性均较低。而不同陆面过程参数化方案模拟的地面风速均未完全通过 95% 置信度检验, SLAB 方案仅有 90% 的点通过 95% 的置信度检验; Noah 方案中仅有 57.5% 的点通过 95% 的置信度检验; Pleim-Xiu 方案也仅有 60% 的点通过 95% 的置信度检验。此外, 不同方案模拟的海平面气压相关系数均在 0.9 以上, 相关性高, 且各陆面参数化方案偏差范围均为  $-1 \sim 1$  hPa, 模拟偏差较小, 计算第 3 嵌套区域中海平面气压相对误差百分比 (图 1) 发现, SLAB 方案的模拟误差在 0.05%, 几乎可以忽略, 最大为 Pleim-Xiu 方案, 误差也仅 0.6%; 不同方案的模拟偏差随时间变化也很小, 说明各方案模拟的海平面气压场效果均较好。因此下面选取相关性较高且通过部分置信度检验的陆面过程参数化方案的模拟结果进行对比分析。

表 1 不同陆面过程参数化方案模拟的气象要素相关系数

Table 1 Correlation coefficients of the meteorological factors between parameterization schemes in different land processes

方案 Scheme	相对湿度 Relative humidity	温度露点差 Dew point temperature difference	地面风速 Surface wind	地面温度 Surface temperature	海平面气压 Sea level pressure
SLAB	0.808 6*	0.839 2*	0.384 3	0.878 6*	0.935 5*
Noah	0.817 8*	0.830 3*	0.278 0	0.925 3*	0.939 8*
RUC	0.289 0	0.185 9	0.385 6	0.493 9*	0.909 4*
Pleim-Xiu	0.755 1*	0.886 8*	0.276 9	0.843 1*	0.928 4*
Wu	0.190 2	0.046 2	0.308 0	0.115 3	0.851 9

注: \* 表示通过 95% 的置信度检验。

Note: \* indicated passing by the 95% confidence test.

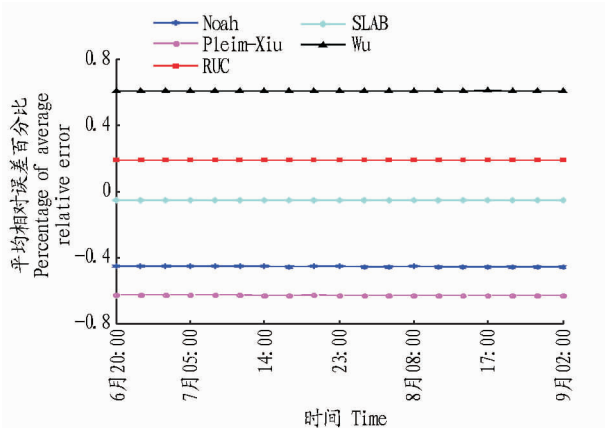


图 1 各微物理参数化方案模拟的海平面气压平均相对误差百分比

Fig. 1 Percentage of average relative error of sea level pressure simulated by micro physical parameterization scheme

### 2.1.1 SLAB 陆面参数化方案的模拟效果评估。

由表 2 可见, SLAB 参数化方案中 2 m 高相对湿度、2 m 高温度露点差及地面温度的相关系数均通过了 95% 的置信度检验, 相关系数分别为 0.808 6、0.839 2、0.878 6, 模拟与观测的吻合指数均达 0.98 以上, 表明模拟与观测比较一致。从  $MD$  看, 模拟相对湿度偏大 ( $MD = 1.495 9\%$ )、温度露点差偏低 ( $MD = -0.499 5\text{ }^\circ\text{C}$ )、地面风速偏大 ( $MD = 0.625 7\text{ m/s}$ )、地面温度也偏高 ( $MD = 0.568 2\text{ }^\circ\text{C}$ )。4 个变量  $SD\_O$  和  $SD\_S$  相差较小, 差值分别为 0.889 1%、0.041 1  $^\circ\text{C}$ 、0.221 7  $\text{m/s}$ 、0.093 2  $^\circ\text{C}$ 。李耀孙<sup>[12]</sup>研究发现当  $IA$  较高,  $RMSE < SD\_O$ , 且  $SD\_O$  与  $SD\_S$  比较接近时, 模拟结果才是可信的。从表 2 来看, SLAB 方案模拟的 2 m 高处相对湿度、温度露点差及地面温度的结果是可信, 而模拟的地面风速相关系数仅 0.384 3, 为低度相关, 且其  $RMSE$  为 1.041 5  $\text{m/s}$ , 大于  $SD\_O$ , 因此认定模拟的地面风速不可信。

表2 SLAB 陆面过程参数化方案模拟效果的评估结果

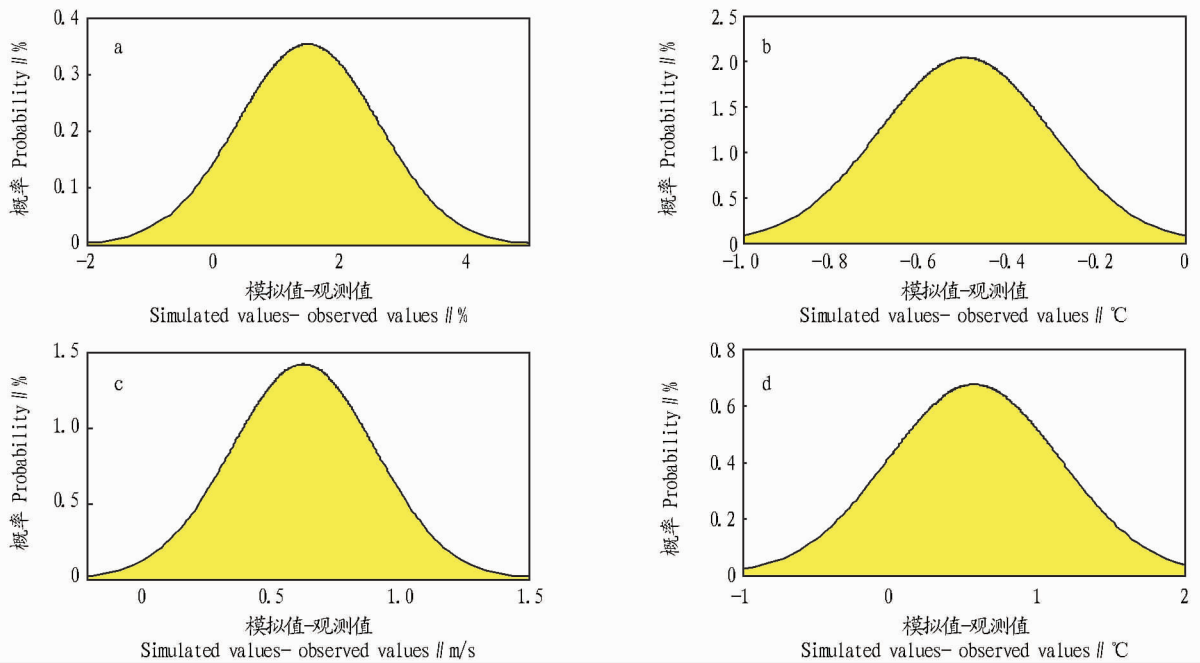
Table 2 Evaluation results of land surface process parameter scheme of SLAB

要素 Element	<i>r</i>	<i>MD</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>SD_O</i>	<i>SD_S</i>	<i>IA</i>
相对湿度 Relative humidity // %	0.808 6	1.495 9	3.405 8	4.668 9	6.229 0	7.118 1	0.996 0
温度露点差 Dew point temperature difference // °C	0.839 2	-0.499 5	0.703 0	0.853 6	1.157 6	1.198 7	0.995 9
地面风速 Surface wind // m/s	0.384 3	0.625 7	0.872 0	1.041 5	0.596 4	0.818 1	0.989 0
地面温度 Surface temperature // °C	0.878 6	0.568 2	1.294 3	1.557 7	2.410 2	2.503 4	0.997 1

利用模拟所得相对湿度、温度露点差、地面风速、地面温度值与观测值进行对比,并对模拟与观测值的偏差进行概率分布统计,结果发现(图2),SLAB 参数化方案中4个变量的偏差均符合正态分布,但偏差均不是严格对称,相对湿度呈现出偏向大于0一侧;仅8.75%点的偏差<0;温度露点差偏向小于0一侧,仅2.5%的点偏差>0;地面风速则偏向略大于0一侧;4个变量的偏差中值分别为1.90%、-0.56℃、0.58 m/s、0.39℃,基本与计算所得的平均偏差值相一致。SLAB 参数化方案模拟结果中所有点的相对湿度偏差范围基

本在-1.874 5%~ -3.945 8%,偏差均在10%以内;温度露点差偏差范围主要为-0.910 4~0.098 2℃,所有偏差均在1℃内,表明模拟结果与实况相近;地面风速偏差范围为0.033 5~1.113 8 m/s,其中有13.75%点偏差超过1 m/s;地面温度偏差主要为-0.040 5~2.655 1℃,83.75%样本偏差均在1℃内,偏差较小。

整体分析发现,SLAB 参数化方案模拟的各气象要素除地面风速外均可信,且偏差也相对较小,对雾浓度及雾区范围影响较小。



注:a.2 m 高处相对湿度;b.2 m 高处温度露点差;c.地面风速;d.地面温度。

Note:a was relative humidity at 2 m,b was  $T - T_d$  at 2 m,c was surface wind;and d was surface temperature.

图2 各气象要素模拟值与观测值偏差的概率分布(SLAB 陆面过程参数化方案)

Fig.2 Probability distribution of the simulated values and the observed values of each meteorological element (SLAB parameterization scheme)

**2.1.2 Noah 陆面参数化方案的模拟效果评估。**由表3可见,Noah 参数化方案中2 m 高处相对湿度、温度露点差和地面温度的相关系数均通过了95%的置信度检验,模拟的相关系数分别为0.817 8、0.830 3、0.925 3,*IA*均超过了0.98,表明模拟与观测吻合程度较好。从*MD*看,相对湿度模拟值偏小(*MD* = -9.301 5%)、温度露点差偏高(*MD* = 1.480 1℃)、地面风速偏大(*MD* = 0.509 3 m/s)、地面温度

偏高(*MD* = 1.684 9℃),Noah 陆面过程参数化方案模拟的2 m 高处相对湿度、2 m 高处温度露点差、地面风速、地面温度 *SD\_O* 和 *SD\_S* 相差较小,差值分别为8.256 4%、1.693 0℃、0.314 8 m/s、0.711 1℃,但仅地面温度满足  $RMSE < SD_O$ ,说明地面温度的模拟是可信的<sup>[12]</sup>,而其他3个变量的模拟结果没有完全符合此条件,因此可以认为其模拟结果是不可信的。

表 3 Noah 陆面过程参数化方案模拟效果的评估结果

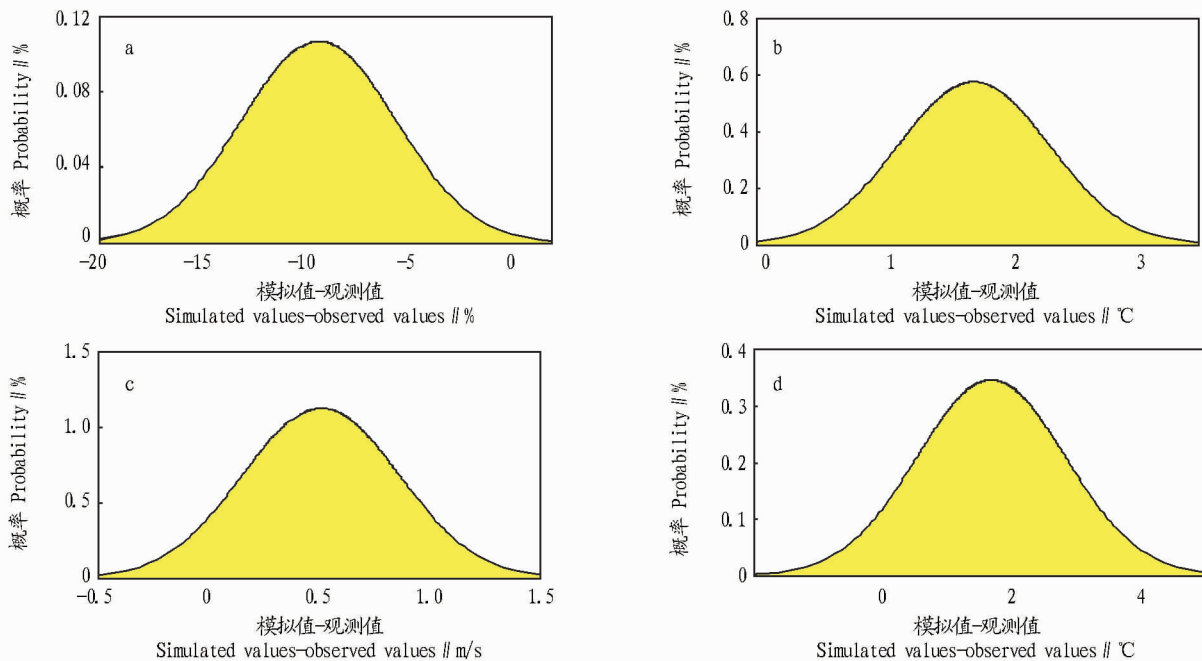
Table 3 Evaluation results of Noah land surface process parameter scheme

要素 Element	$r$	$MD$	$MAE$	$RMSE$	$SD_O$	$SD_S$	$IA$
相对湿度 Relative humidity // %	0.817 8	-9.301 5	10.163 9	14.054 5	6.229 0	14.485 4	0.985 9
温度露点差 Dew point temperature difference // °C	0.830 3	1.480 1	1.735 8	2.534 3	1.157 6	2.850 6	0.985 6
地面风速 Surface wind // m/s	0.278 0	0.509 3	0.889 5	1.100 4	0.596 4	0.911 2	0.988 1
地面温度 Surface temperature // °C	0.925 3	1.684 9	2.034 5	2.389 0	2.410 2	3.121 3	0.995 4

利用模拟所得相对湿度、温度露点差、地面风速、地面温度值与相应的观测值进行对比,并对模拟与观测值的偏差进行概率分布统计,结果发现(图 3),Noah 参数化方案中 4 个变量的偏差均符合正态分布,相对湿度呈现出所有点偏向小于 0 一侧,且偏差值较大,偏差范围为  $-19.856\ 5\% \sim -5.080\ 9\%$ ,其中有 27.5% 点的偏差值超过 10%;温度露点差中所有点的偏差均偏向大于 0 一侧,偏差范围为  $0.699\ 9 \sim 3.522\ 4\ ^\circ\text{C}$ ,约 16.25% 点的偏差超过  $2\ ^\circ\text{C}$ ,约 81.25% 点偏差超过  $1\ ^\circ\text{C}$ ,与实际偏差较大;地面风速则偏向略大于 0 一侧,偏差范围为  $-0.102\ 5 \sim 1.064\ 6\ \text{m/s}$ ;地面温度偏差范围为

$0.528\ 9 \sim 4.553\ 0\ ^\circ\text{C}$ ,但仅有 45% 样本点偏差在  $1\ ^\circ\text{C}$  内,多数样本偏差较大;4 个变量的偏差中值分别为  $-7.91\%$ 、 $1.24\ ^\circ\text{C}$ 、 $0.49\ \text{m/s}$ 、 $1.15\ ^\circ\text{C}$ ,与计算所得的平均偏差值存在一定差值。表明模拟结果与实况存在较大偏差,配合表 3 分析模拟结果不可信,因此舍弃 Noah 陆面过程参数化方案。

分析 Noah 参数化方案模拟的近地面气象要素发现,整体模拟结果除地面温度外均不可信,且相对湿度和地面风速的偏差范围相对较大,势必对雾区范围及强度的模拟产生影响。



注:a. 2 m 高处相对湿度;b. 2 m 高处温度露点差;c. 地面风速;d. 地面温度。

Note:a was relative humidity at 2 m,b was  $T - T_d$  at 2 m,c was surface wind;and d was surface temperature.

图 3 各气象要素模拟值与观测值偏差的概率分布(Noah 陆面过程参数化方案)

Fig.3 Probability distribution of the simulated values and the observed values of each meteorological element (Noah parameterization scheme)

**2.1.3 Pleim-Xiu 陆面过程参数化方案的模拟效果评估。**从表 4 可以看出,Pleim-Xiu 参数化方案模拟的 2 m 高相对湿度、2 m 高温露点差、地面温度的相关系数均通过了 95% 的置信度检验,相关系数分别为 0.755 1、0.886 8、0.843 1;而地面风速仅有 60% 的点通过 95% 置信度检验且相关系数仅为 0.276 9。从  $MD$  来看,相对湿度模拟值偏小( $MD = -5.278\ 8\%$ )、温度露点差偏高( $MD = 0.845\ 4\ ^\circ\text{C}$ )、地面风速偏大( $MD = 0.678\ 6\ \text{m/s}$ )、地面温度偏高( $MD = 2.121\ 8\ ^\circ\text{C}$ )。

4 个变量  $SD_O$  和  $SD_S$  差值分别为  $9.518\ 1\%$ 、 $2.054\ 6\ ^\circ\text{C}$ 、 $0.281\ 5\ \text{m/s}$ 、 $0.356\ 7\ ^\circ\text{C}$ 。根据李耀孙<sup>[12]</sup>的研究,Pleim-Xiu 参数化方案模拟的 2 m 高处相对湿度、温度露点差和地面风速 3 个变量的  $RMSE > SD_O$ ,且相对湿度和温度露点差的  $SD_S$  与  $SD_O$  存在较大差距,说明模式对 3 个变量的模拟不可信。而地面温度满足判断准则,因此可以认为其模拟结果是可信的。

利用模拟所得相对湿度、温度露点差、地面风速、地面温



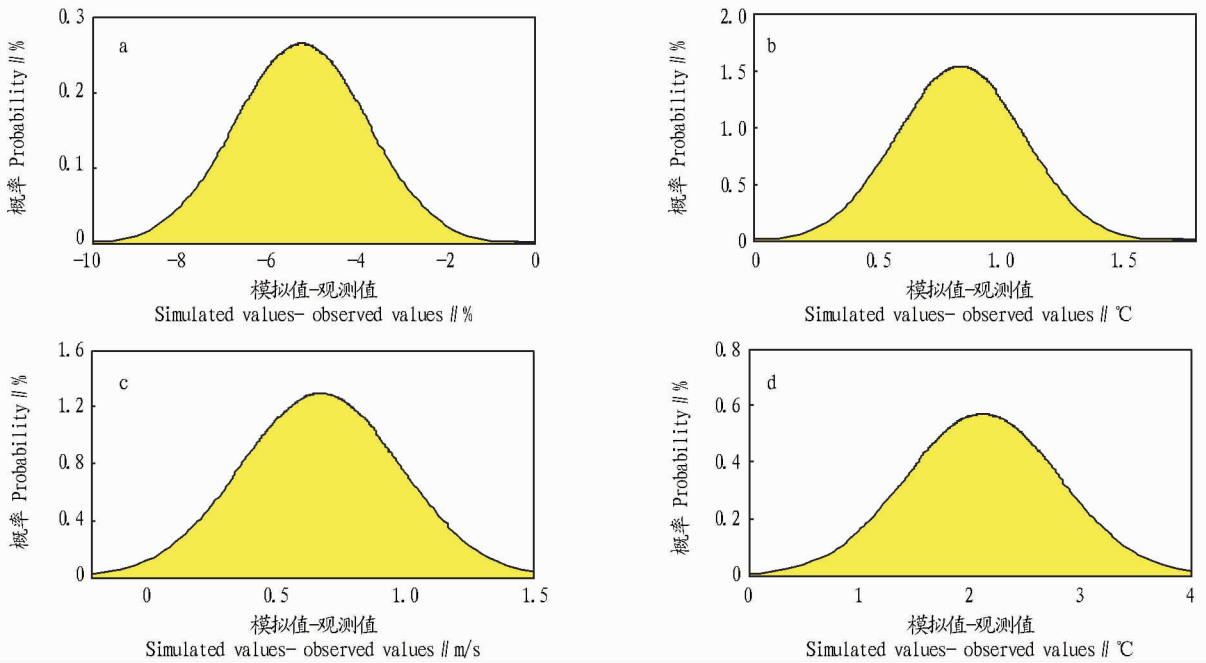
表 4 Pleim-Xiu 陆面过程参数化方案模拟效果的评估结果

Table 4 Evaluation results of the simulated effects of Pleim-Xiu land surface process parameter scheme

要素 Element	<i>r</i>	<i>MD</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>SD_O</i>	<i>SD_S</i>	<i>IA</i>
相对湿度 Relative humidity // %	0.755 1	-5.278 8	8.316 6	13.066 6	6.229 0	15.747 1	0.984 8
温度露点差 Dew point temperature difference // °C	0.886 8	0.845 4	1.445 2	2.433 9	1.157 6	3.212 2	0.985 3
地面风速 Surface wind // m/s	0.276 9	0.678 6	0.936 9	1.154 5	0.596 4	0.877 9	0.987 9
地面温度 Surface temperature // °C	0.843 1	2.121 8	2.140 7	2.403 4	2.410 2	2.766 9	0.995 0

度与相应的观测值进行对比,并对模拟与观测值的偏差进行概率分布统计,结果发现(图 4),Pleim-Xiu 参数化方案中的变量偏差均符合正态分布,相对湿度呈现出偏向小于 0 一侧,所有点的偏差均小于 0;温度露点差偏向大于 0 一侧;地面风速也呈现偏向大于 0 一侧;地面温度偏差均在大于 0 一侧,偏差范围为 1.436 6~4.717 4 °C;4 个变量的偏差中值分

别为 -5.20%、0.84 °C、0.63 m/s、1.90 °C,基本与计算所得的平均偏差值相一致。方案值中所有点的相对湿度偏差范围为 -10.368 2% ~ -2.773 5%,偏差在 10% 以内的有 98.75%;温度露点差偏差范围主要为 0.373 9~1.577 4 °C,偏差在 1 °C 内的达 81.25%;地面风速偏差范围为 0.160 8~1.399 6 m/s,其中有 19.75% 点偏差超过 1 m/s。



注:a.2 m 高处相对湿度;b.2 m 高处温度露点差;c.地面风速;d.地面温度。

Note:a was relative humidity at 2 m,b was  $T - T_d$  at 2 m,c was surface wind;and d was surface temperature.

图 4 各气象要素模拟值与观测值偏差的概率分布(Pleim-Xiu 陆面过程参数化方案)

Fig.4 Probability distribution of the simulated values and the observed values of each meteorological element (Pleim-Xiu parameterization scheme)

总体而言,SLAB 陆面过程参数化方案的模拟结果可信度最高,具体对比模拟值发现,3 种方案中各变量的  $MAE > MD$ ,由于  $MAE$  能够更好地反应模拟误差的实际情况,对比 SLAB 方案、Noah 方案和 Pleim-Xiu 方案发现,SLAB 方案中的各变量  $MAE$  较 Noah 方案和 Pleim-Xiu 方案小,这与李耀孙<sup>[12]</sup>模拟所得结果一致。再从各方案偏差中值及偏差范围看,所有要素偏差范围由小到大依次为 SLAB 方案、Pleim-Xiu 方案、Noah 方案,因此 SLAB 方案的模拟效果最好。

## 2.2 站点地面气象要素模拟效果对比分析

### 2.2.1 2 m 高处相对湿度。从图 5a 可以看出,当不考虑陆

面方案时,模拟的相对湿度一直维持在 90% 以上,与实况不相符,其他几种陆面方案模拟的相对湿度变化趋势均与实况较为一致,7 日 20:00~8 日 08:00 及 8 日 20:00 后相对湿度模拟值均达 95% 以上,且多数时次是接近 100%,而白天受太阳短波辐射影响,水汽凝结作用减弱,相对湿度降低,这与实况观测一致。Noah 方案模拟的相对湿度值在 7 日 06:00~8 日 02:00 及 8 日 10:00 后与实况相比明显偏小,偏差最多出现在 7 日 14:00 和 8 日 14:00,模拟的湿度值比实况小 25% 左右,其他时次偏差基本在 10% 左右。Pleim-Xiu 方案模拟的相对湿度在 7 日 06:00 由饱和状态逐渐降低,并于 7 日

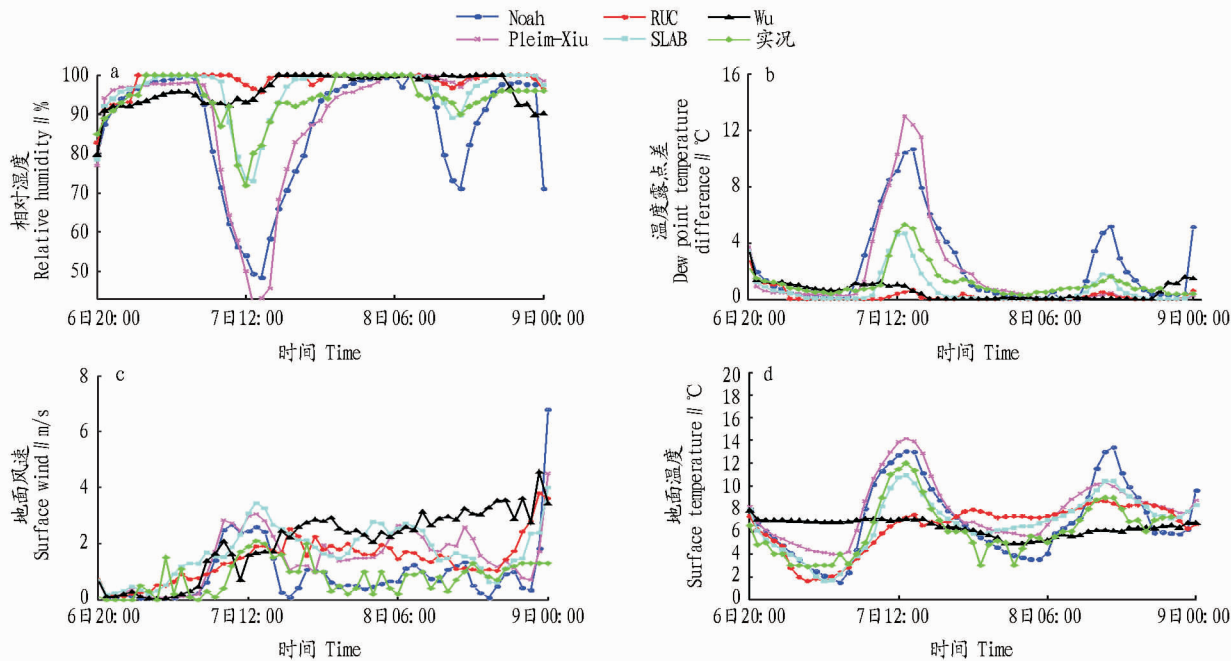
14:00 出现最小值(40%),这与实况(70%)相差较大,此后模拟的相对湿度值开始增大,但与实况仍存在超过10%的差值,这种状态持续到8日06:00,模拟的相对湿度值与实况值均达100%;8日06:00后模拟的相对湿度效果较好,基本维持在95%以上。RUC方案模拟的相对湿度变化趋势与实况观测基本一致,但在7日08:00~7日20:00及8日08:00后模拟的湿度值比实况观测值高。SLAB方案模拟的相对湿度不论从变化趋势还是值的大小均是与实况最为接近的,仅个别时次存在5%以内的差值。

**2.2.2 2 m 高处温度露点差。**由图5b可见,整个大雾过程RUC方案和SLAB方案模拟的温度露点差的变化趋势及其值与实况吻合性最佳,误差主要出现在7日14:00左右及8日14:00,温度露点差达5℃,其他时次误差基本可以忽略。Noah吻合性较差,整体温度露点差较实况大。Pleim-Xiu方案在7日14:00左右和8日14:00左右出现与实况误差达10℃现象。不考虑陆面方案时,温度露点差也基本维持不变,说明陆面方案在数值模拟过程中作用明显。

**2.2.3 地面风速。**图5c显示,SLAB方案模拟效果与实况

最为接近。各方案模拟的地面风速变化趋势大体一致,但模拟的地面风速值存在差异,Noah模拟的风速值整体偏大1 m/s左右,尤其7日夜间实况观测风速仅2.07 m/s,但模拟达3.3 m/s,不利于夜间雾的发展。其他方案模拟效果也存在分散情况,但与实况相差不大。当不考虑陆面方案时,地面风速也呈现与实况较为一致的变化趋势,风速值较实况偏小。

**2.2.4 地面温度。**从图5d可看出,各陆面方案的地面温度在6日20:00~7日08:00与实况差别较小,到7日08:00后逐渐增大。RUC方案模拟温度在7日14:00明显低于实况观测值,差值达5℃左右,7日14:00后模拟与实况的温度差一直维持存在。Pleim-Xiu方案的温度变化趋势基本符合实况,但其在午后的变化幅度过大,在7日12:00模拟温度比实况温度高约3℃,在8日12:00模拟温度也高出约2℃。Noah方案与Pleim-Xiu方案相似,午后一般高出2~3℃,此外其模拟的夜间温度比实况又低3℃左右。SLAB方案模拟的地面温度变化情况与实况观测基本一致,仅个别时次出现温度偏差,但偏差也相对偏小。



注:a.2 m 高处相对湿度;b.2 m 高处温度露点差;c.地面风速;d.地面温度。

Note:a was relative humidity at 2 m,b was  $T - T_d$  at 2 m,c was surface wind;and d was surface temperature.

图5 各陆面过程方案模拟的南京站气象要素时间序列

Fig.5 Time series of meteorological elements at Nanjing station simulated by different PBL schemes

### 3 结论

该研究利用相关系数、平均偏差、平均绝对偏差、观测值的标准偏差、模拟值的标准偏差等对各参数化方案下的物理量(2 m 高处相对湿度、2 m 高处温度露点差、地面风速、地面温度)的模拟效果进行评估,并利用南京站的地面常规观测资料进行对比。结果表明,不同陆面过程参数化方案对大雾天气过程的模拟结果是敏感的,模拟的温湿风存在较大差异,其中 SLAB 方案可信度最高,偏差范围最小,且各

变量的偏差均呈现正态分布状态,模拟的相对湿度偏差为1.90%,地面温度偏差约0.39℃,与实况相差最小,除此之外相比较其他方案,SLAB方案模拟的各物理量平均偏差的绝对值、平均绝对误差以及均方根误差等均更小。后期可利用2 m 高处相对湿度、2 m 高处温度露点差和地面温度作为雾过程的判别指标,从而为后期提高雾过程的预报准确性提供依据。

(下转第220页)

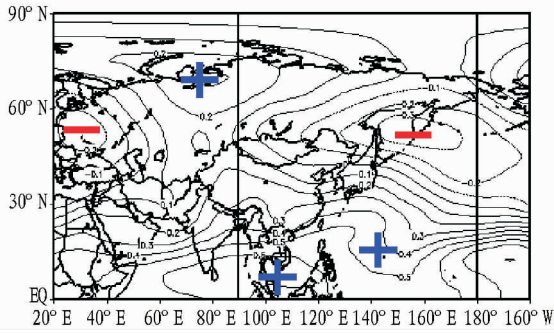


图9 1961~2015年4月NINO4海区指数和500 hPa高度场相关分析

Fig.9 Correlation analysis between NINO4 sea area index and 500 hPa height field in April from 1961 to 2015

续偏少,干旱发展,华南前汛期开始时间较常年明显偏晚。

(2)环流异常是导致我国降水异常的最直接原因。2015年4月上旬,500 hPa高度场上欧亚中高纬环流呈“西高东低”的分布型,有利于高纬度地区的冷空气南下影响我国。相应850 hPa低层风场上,在西北太平洋上空维持一强大的异常反气旋式环流,其西侧偏西南气流不断将暖湿水汽向我国长江中下游及其以北的地区输送,冷暖气流频繁交汇,造成我国长江中下游及以北地区降水异常偏多。

(3)4月上旬我国江南和华南地区受高压控制,降水偏少;4月中下旬,受副高加强西伸的影响,使得西南季风水汽和副热带高压外围的暖湿水汽无法输送到我国长江以南地

区,造成江南和华南地区降水持续偏少,干旱发展。

(4)受赤道太平洋和印度洋暖海温的影响,在赤道印度洋—太平洋地区形成印—太齿轮组,使得2015年4月中下旬副热带高压出现了明显的加强西伸,进而对江南和华南地区降水持续偏少产生影响。此外,相关分析表明2014~2016年厄尔尼诺事件的发生对欧亚中高纬度地区环流也有一定的影响,并通过影响环流进而对我国降水异常也产生影响。

参考文献

[1] 陶亦为,孙照渤,李维京,等. ENSO与青藏高原积雪的关系及其对我国夏季降水异常的影响[J]. 气象,2011,37(8):919-928.  
 [2] 宗海锋,陈烈庭,张庆云. ENSO与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J]. 大气科学,2010,34(1):184-192.  
 [3] 薛峰,刘长征. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响及其与强 ENSO 的对比分析[J]. 科学通报,2007,52(32):2798-2805.  
 [4] 王艳姣,闫峰. 2011年11月我国降水异常特征及成因分析[J]. 自然灾害学报,2014,23(1):100-106.  
 [5] 赵强,严华生,程路. ENSO发展和衰减阶段的陕西夏季降水异常特征[J]. 应用气象学报,2013,24(4):495-503.  
 [6] 崔童,王东轩,李多,等. 2014年夏季我国气候异常及成因简析[J]. 气象,2015,41(1):121-125.  
 [7] 王艳姣,周兵,司东,等. 2012年夏季我国降水异常及成因分析[J]. 气象,2013,39(1):118-122.  
 [8] 侯威,邹旭凯,王朋岭,等. 2014年中国气候概况[J]. 气象,2015,41(4):480-488.  
 [9] 李清泉,王安乾,周兵,等. 2014年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象,2015,41(4):497-507.  
 [10] 王朋岭,周兵,柳艳菊,等. 2014年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象,2015,41(4):489-496.  
 [11] 吴国雄,孟文. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件: I 资料分析[J]. 大气科学,1998,22(4):470-480.

(上接第215页)

参考文献

[1] FISHER E L, CAPLAN P, FISHER E L, et al. An experiment in the numerical prediction of fog and stratus[J]. Journal of the atmospheric sciences, 1963,20(5):425-437.  
 [2] ROACH W T, BROWN R, CAUGHEY S J, et al. The physics of radiation fog. I: a field study[J]. Quarterly journal of the royal meteorological society, 1976,102:313-333.  
 [3] DUYNKERKE P G. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observation[J]. Mon Wea Rev, 1991,119:324-341.  
 [4] BOTT A. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs [J]. Boundary layer meteorology, 1991, 56(1/2):1-31.  
 [5] 尹球,许绍祖. 辐射雾生消的数值研究(I):数值模式[J]. 气象学报, 1993,51(3):351-360.  
 [6] 尹球,许绍祖. 辐射雾生消的数值研究(II):生消机制[J]. 气象学报, 1994,52(1):60-67.  
 [7] 孙旭东,徐华英,李桂忱,等. 二维平流辐射雾的数值模拟[J]. 大气科

学,1991,15(6):99-109.  
 [8] 石春娥,曹必铭,李子华,等. 复杂地形上三维局地环流的模拟研究[J]. 南京气象学院学报,1996,19(3):320-328.  
 [9] 王益柏,梅娜,范磊,等. WRF模式对2013年1月华北一次大雾的数值模拟对比试验[J]. 气象,2014,40(12):1522-1529.  
 [10] 刘汉卫,潘晓斌,臧增亮,等. 华东地区一次辐射雾的数值模拟分析[J]. 干旱气象,2011,29(2):174-181.  
 [11] 崔强,王春明,岳甫璐,等. 南京2013年12月一次大雾天气过程的数值模拟及诊断分析[C]//第31届中国气象学会年会 S11 第三届城市气象论坛—城市与环境气象. 中国气象学会,2014.  
 [12] 李耀孙. MM5和WRF对华东地区冬季边界层廓线和雾模拟效果的对比研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012:14.  
 [13] 周昆,郝元甲,姚晨,等. 6种数值模式在安徽区域天气预报中的检验[J]. 气象科学,2010,30(6):801-805.  
 [14] OTTE T L. The impact of nudging in the meteorological model for retrospective air quality simulations. Part I: Evaluation against National Observation Networks [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2008,47(7):1853-1867.