

王平, 王晓峰, 张蕾, 等, 2017. 地面观测资料在快速更新同化系统中的敏感性试验[J]. 气象, 43(8):901-911.

地面观测资料在快速更新同化系统中的敏感性试验*

王 平^{1,2,3,4} 王晓峰^{1,2,3} 张 蕾^{1,2,3} 李 佳^{1,2,3} 许晓林^{1,2,3}

1 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

2 上海区域高分辨率数值预报创新中心, 上海 200030

3 中国气象局台风数值预报重点实验室, 上海 200030

4 上海市公共气象服务中心, 上海 200030

提 要: 通过对 2011 年 7 月 31 日发生在上海的局地强对流过程, 利用快速更新同化系统(SMS-WARR), 设计了四个试验, 对地面观测资料(常规地面观测资料、加密自动气象站资料)进行敏感性数值试验。结果表明: 不同地面观测资料同化对模式初始场的调整作用不同, 地面观测资料的疏密影响模式初始场预报, 加密自动站气象资料同化对初始温度场、风场的影响最明显; 所有试验中, 同化所有观测资料的模式能较好地模拟出此次强降水过程, 且模拟的地面温度场、风场以及辐合线的演变与实况基本一致; 通过分析、比较各试验初始场和预报结果的影响发现, 同化所有地面观测资料能改善模式的初值, 且观测资料通过循环同化的方式融合进模式, 提高了模式对强对流中尺度结构特征的刻画, 改善了对局地强对流天气系统的预报效果。

关键词: 快速更新同化系统; 地面观测资料; 常规地面观测; 自动气象站

中图分类号: P435, P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.001

Sensitivity Analysis of Surface Observation Data in WRF-ADAS Rapid Refresh System

WANG Ping^{1,2,3,4} WANG Xiaofeng^{1,2,3} ZHANG Lei^{1,2,3} LI Jia^{1,2,3} XU Xiaolin^{1,2,3}

1 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

2 Shanghai Innovative Center of Regional High Resolution Numerical Weather Prediction, Shanghai 200030

3 Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, CMA, Shanghai 200030

4 Shanghai Public Meteorological Service Centre, Shanghai 200030

Abstract: Using SMS-WARR and rapid refresh technique, the sensitivity of surface observation data (surface conventional observation data, automatic weather station data) to the numerical simulation of the severe convection event which occurred in Shanghai on July 31 2011 was analyzed. Four comparison experiments were designed to study the assimilation of surface observation data. The results showed that the adjustment of model initial fields varies with assimilating different surface observation data. The density of surface observation data has impacts on initial fields. The initial temperature and wind fields are obviously affected by assimilating the automatic weather station data. After assimilating conventional surface observation data and automatic weather station data, we found that the model can not only well simulate the process of this severe convection, but also simulate the surface temperature, wind field and evolution of convergence line which is more consistent with the observation. Through the analysis and comparison of the initial fields and simulation results, we also found that the assimilation of all the observation data can

* 上海市科学技术委员会重点基金(13231203300)、国家科技支撑计划项目(2012BAC21B02)和上海市气象局科技开发项目(QM201708)共同资助

2016 年 9 月 19 日收稿; 2017 年 6 月 14 日收修定稿

第一作者: 王平, 从事数值预报研发应用及公共气象服务. Email: wangp@typhoon.org.cn

通信作者: 王晓峰, 从事数值预报研发应用及台风预报研究. Email: wangxf@typhoon.org.cn

improve the initial values of the model, and the observation data are integrated into the model by the mode of rapid refresh, which enhances the characterization of mesoscale structure of server convection, and improved simulation capacity of the local severe convective systems.

Key words: rapid refresh system, surface observation data, surface conventional observation, automatic weather station

引 言

强对流天气预报准确率的提高越来越依赖于数值预报技术的发展和改进,由于强对流系统水平尺度小、生命史短暂,传统的数值预报系统不适合于较短时间尺度的预报,因此较短时间间隔的高频资料同化的预报系统是提高短时临近预报准确率的重要方向,而地面[常规地面观测站(SYNOP)和自动气象站(AWS)]观测资料有较高的时空分辨率,如每小时的地面自动站 2 m 温度和 10 m 风观测,自然成为快速更新同化预报系统中的一个重要的观测资料来源(陈葆德等,2013;程磊等,2011;代刊等,2010;东高红等,2015;傅娜等,2013;徐枝芳等,2013)。Zhang and Fritsch(1986)通过对一次中尺度对流天气过程进行观测资料敏感性数值模拟试验,研究发现初始场中同化稠密的地面观测资料可以改进中尺度系统的预报,如温湿场,特别是气压场的分布,从而改进了中尺度对流天气发生时间和位置。徐枝芳等(2007a; 2007b)利用 MM5-3DVAR 同化系统对地面观测资料进行三维变分同化分析,研究发现地面观测资料中的温压湿风都能影响 24 h 降水,其中影响最大的是温度,其次为湿度。俞飞等(2013)利用 WRF-Var 同化地面观测资料,对河套地区的一次强飚线天气过程进行数值模拟,结果表明模式初始场有明显改善,提高了飚线天气过程的模拟效果。尽管目前将地面观测资料应用到数值模式的研究工作进展很大,但上述观测资料在应用于短时临近预报的快速更新同化系统中的效果如何,国内在这方面的研究很少。鉴于此,本文选取发生在上海地区的一次强对流天气过程,针对此问题作详细分析。

1 资料和方法介绍

1.1 快速更新同化系统简介

鉴于强对流系统具有水平尺度较小、生命史较

短的特点,城市尺度的局地强对流生命史往往不到 2 h,因此模式初始时刻对当前对流系统的准确把握是准确模拟强对流发生、发展以及随时间演变的关键。由于模式初始平衡(spun-up)问题,传统的每 6 h 或更长时间更新一次模式初值的数值预报系统显然不适合用于短时临近预报时间尺度的业务需求。为此,进行较密时间间隔的高频资料同化以便初始场尽可能包含更多对流系统的信息对中小尺度天气系统的数值模拟就显得十分必要。然而高频资料同化存在着模式初始变量不协调而引发的较长时间(>1 h)的 spun-up 问题与误差积累等问题,将大大削弱模式 1~2 h 的预报能力,为此热启动技术就应运而生(王晓峰等,2015)。为了有效利用观测资料,建立了一套基于 ADAS(ARPS Data Assimilation System)资料同化系统和区域中尺度数值模式 WRF 的快速更新同化系统(Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, SMS-WARR)。该系统水平分辨率为 3 km,垂直分辨率为 51 层,预报区域覆盖华东及其周边地区,系统采用逐小时循环同化的方式对观测资料进行同化,每日 02 时冷启动,冷启动的背景场和侧边界条件由 NCEP GFS 6 h 的全球预报场提供,其他时刻同化的背景场则由 SMS-WARR 系统上一时次的 1 h 预报场提供。系统每小时启动一次预报,预报时效为 12 h,并提供逐小时高分辨率中尺度分析场。之后每个整点时刻采用热启动技术,即将前一时次 WRF 的 1 h 预报场作为该时次的背景场,经 ADAS 同化多源观测资料后得到 WRF 模式在该时刻的初始场,继续做 12 h 预报,同时提供中尺度客观分析场,依此类推。同化观测资料包括常规天气观测、自动站、飞机报、探空、雷达反射率和 FY-2E 红外辐射率资料(图 1;陈葆德等,2013)。

1.2 试验设计

为了研究地面观测资料在快速更新同化系统中的作用,本文设计了四个观测资料敏感性同化分析试验,各试验均从 2011 年 7 月 31 日 02 时(北京时,

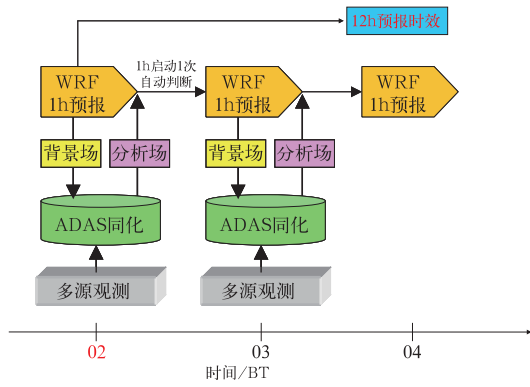


图 1 快速更新同化试验设计

Fig. 1 The flow chart of the numerical experiments

表 1 地面观测资料同化试验方案

Table 1 Experiment design for different numerical experiments

| 试验名称 | 同化资料类型 | 试验时段 |
|-------------|--|---------|
| 控制试验 (ctrl) | 常规地面观测、机场地面报、船舶观测、浮标、加密自动气象站、飞机观测、探空观测、小球测风、雷达反射率观测、卫星红外数据 | |
| T1 | 同 ctrl, 但去除常规地面观测 | 02—18 时 |
| T2 | 同 ctrl, 但去除加密自动气象站 | |
| T3 | 同 ctrl, 但去除常规地面观测和加密自动气象站 | |

步订正的客观分析方法对数值预报模式初始场进行修正;云底高度、雷达反射率和卫星辐射观测通过云分析方法完善模式初始场的三维云特征量场的构造。

1.4 “0731”强对流个例简介

2011年7月31日午后,上海中心城区出现了少见的强降雨过程,局部地区达到大暴雨,东方体育中心 2 h(16—18 时)累计雨量达 82.3 mm。

图 3 为 12—19 时逐小时累计实况降水图。11—15 时上海出现局地小范围短时降水过程,上大附中站 13—14 时累积雨量达到 41.9 mm;15—16 时上海西北部和江苏交界出现强对流;16—17 时上海西部郊区形成了一条雨带,另外上海北部沿江(长江)至上海中部沿江(黄浦江)形成另一条雨带,雨强极大,强降水中心(东方体育中心)1 h 雨量达 70.9 mm;17—18 时对流系统减弱并东移南落,18—19 时此次降水过程基本结束。

Wilson and Schreiber (1986), Wilson et al (1992), Wilson and Mueller(1993)研究表明,边界层辐合线的监测和识别是强对流发生、发展和消亡的关键所在。对强对流的预报而言,地面辐合线的移动和变化对降水落区、降水起止时间的预报尤为重要,模式是否能成功地模拟出 7 月 31 日海陆风演

下同)冷启动,随后逐小时热启动。ADAS 同化常规地面观测资料的时间频率为 3 h,同化加密自动气象站资料的时间频率为每 1 h 一次。具体试验设计如表 1 所示。

1.3 观测资料

同化观测资料包括常规地面观测、加密自动气象站、机场地面报、船舶、浮标、飞机报、探空、雷达反射率和 FY-2E 红外和可见光辐射率资料,如图 2 所示。表 2 给出了快速更新同化系统用到的观测资料列表,观测要素中的温度、湿度、风、气压主要通过逐

变过程及地面辐合线是关键。考虑到预报的及时性,同时,以往的研究(王晓峰等,2015;2017)已经对 ctrl 试验做了详细分析,为了和 ctrl 试验保持一致,因此本文在对敏感性试验预报结果进行研究时,选取了一样的起报时次(13 时起报)的模式结果进行分析。

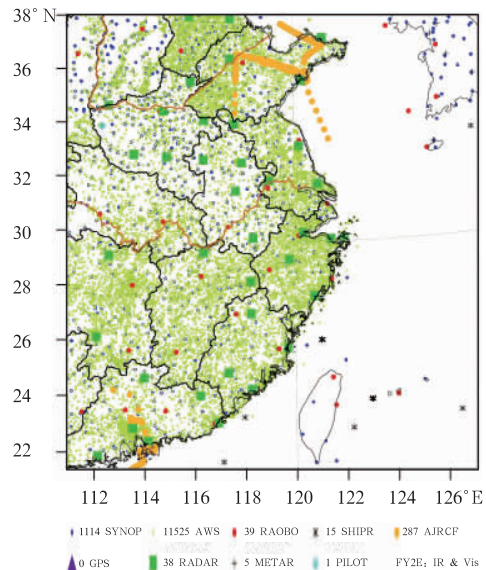


图 2 2011 年 7 月 31 日 08 时同化数据站点分布

Fig. 2 Spatial distribution of observation data

表 2 观测资料列表

Table 2 List of observation data

| 观测资料类型 | 观测气象要素 | 是否为多层数据 | 时间频率/h | 数量 |
|----------------------|---------------------|---------|--------|---------|
| 常规地面观测 (SYNOP) | 温度、湿度、风向、风速、气压、云底高度 | 否 | 3 | 1000 左右 |
| 加密自动气象站 (AWS) | 温度、湿度、风向、风速、气压 | 否 | 1 | 大于 8000 |
| 机场地面 (METAR) | 温度、湿度、风向、风速、气压、能见度 | 否 | 1 | 根据报文 |
| 船舶观测 (SHIPR) | 温度、湿度、风向、风速、气压 | 否 | 1 | 根据报文 |
| 浮标 (BUOYR) | 温度、湿度、风向、风速、气压 | 否 | 1 | 6 |
| 飞机观测 (AIRCF) | 温度、风向、风速、气压 | 否 | 1 | 根据报文 |
| 探空 (RAOBO) | 温度、湿度、风向、风速、气压 | 是 | 12 | 39 |
| 小球测风 (PILOT) | 风向、风速 | 是 | 12 | 根据报文 |
| 雷达 (反射率) (RADAR) | 雷达反射率 | 是 | 1 | 40 左右 |
| FY2E 红外和可见光 (IR&Vis) | 红外通道辐射亮温可见光通道反射率 | 否 | 1 | 根据报文 |

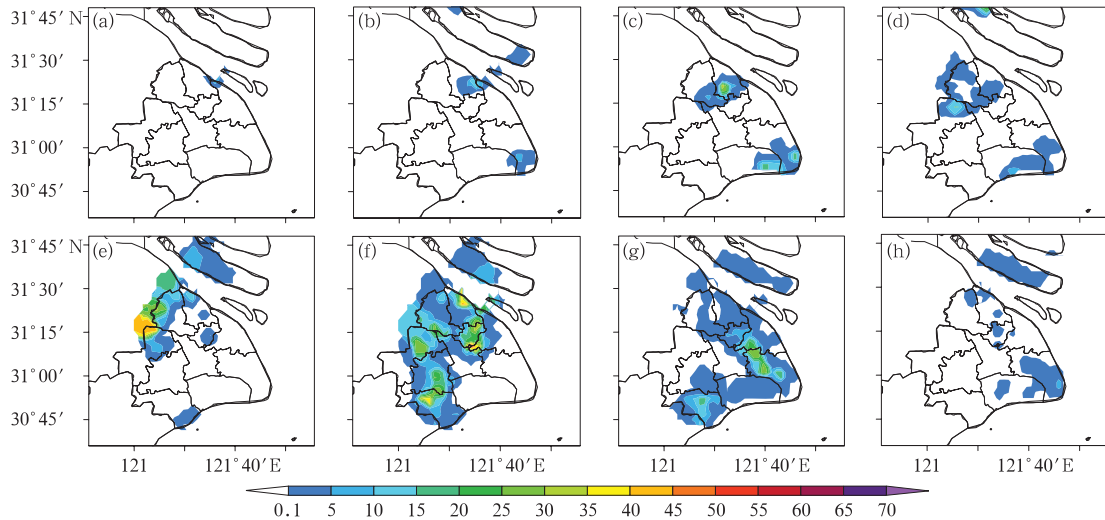


图 3 上海地区 2011 年 7 月 31 日逐小时雨量分布 (单位: mm)
 (a) 11—12 时, (b) 12—13 时, (c) 13—14 时, (d) 14—15 时, (e) 15—16 时,
 (f) 16—17 时, (g) 17—18 时, (h) 18—19 时

Fig. 3 Hourly accumulated rainfall distributions (unit: mm) in
 31 July 2011 in Shanghai

(a) 11:00—12:00 BT, (b) 12:00—13:00 BT, (c) 13:00—14:00 BT, (d) 14:00—15:00 BT,
 (e) 15:00—16:00 BT, (f) 16:00—17:00 BT, (g) 17:00—18:00 BT, (h) 18:00—19:00 BT

2 试验结果分析

2.1 模式初始场的调整

02 时冷启动, 观测资料第一次进入模式, 当同化所有地面观测资料 (即 ctrl 试验), 模式模拟的风场更接近实际观测 (王晓峰等, 2014) (图略)。下面将 T1、T2、T3 三个试验 02 时初始温度场、风场分别与 ctrl 试验做对比 (图 4), 可以发现: T1 试验与 ctrl 试验对温度场和风场的模拟差别很小 (图 4a, 4b, 4e), 去除常规地面观测资料后, 模式初始场的调整不明显; 和常规地面观测资料相比, 加密自动站资

料时空分辨率更高, 因此 T2 试验中温度和风速的变化较明显 (图 4a, 4c, 4f), 上海西郊温度调整为 1.4°C 左右, 其他地区温度基本无变化, 上海中部至北部小部分地区的风场有调整, 但不明显, 风速变化值小于 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而 T3 试验模拟的风场和温度场的变化最明显 (图 4a, 4d, 4g), T3 试验中上海西部大部分地区的地面温度比 ctrl 试验高 1.6°C , 上海大部分地区的风速也大于 ctrl 试验。

经过 12 个同化循环后 (13 时, 图 5), T1、T2、T3 试验均能模拟出上海地区西北—东南向的地面辐合线 (图 5b, 5c, 5d), 但是辐合线的位置不尽相同。T1 试验的地面辐合线较 ctrl 试验更靠近上海北部沿江, T2 试验的辐合线较 ctrl 试验更偏西, T3

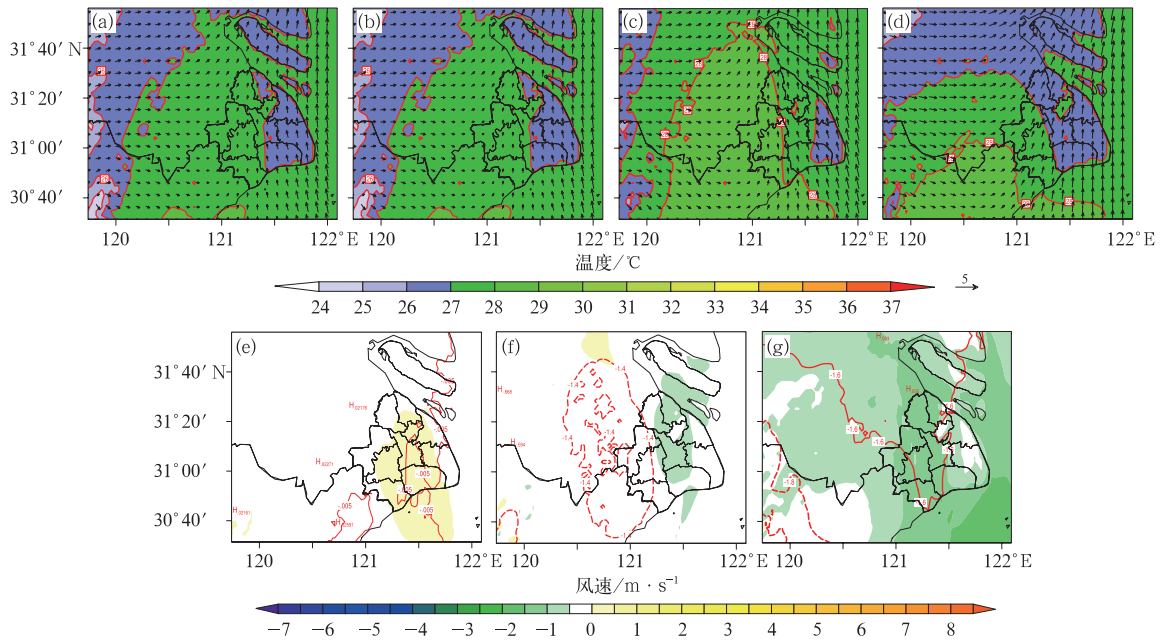


图 4 不同试验 2011 年 7 月 31 日 02 时初始时刻的(a, b, c, d)温度场(阴影,单位:℃)和地面风场(矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$)及(e, f, g)温度和风场的差值场(等值线:温度;阴影:风速)
(a)ctrl 试验, (b)T1 试验, (c)T2 试验, (d)T3 试验, (e)ctrl-T1 的差值场, (f)ctrl-T2 的差值场, (g)ctrl-T3 的差值场

Fig. 4 (a, b, c, d) Simulated initial surface temperature (shaded area, unit: $^{\circ}C$) and surface wind (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) and (e, f, g) differences of the temperature (contour, unit: $^{\circ}C$) and wind (shaded area, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 02:00 BT 31 July 2011
(a) control experiment, (b) T1 experiment, (c) T2 experiment, (d) T3 experiment, (e) control minus T1, (f) control minus T2, (g) control minus T3

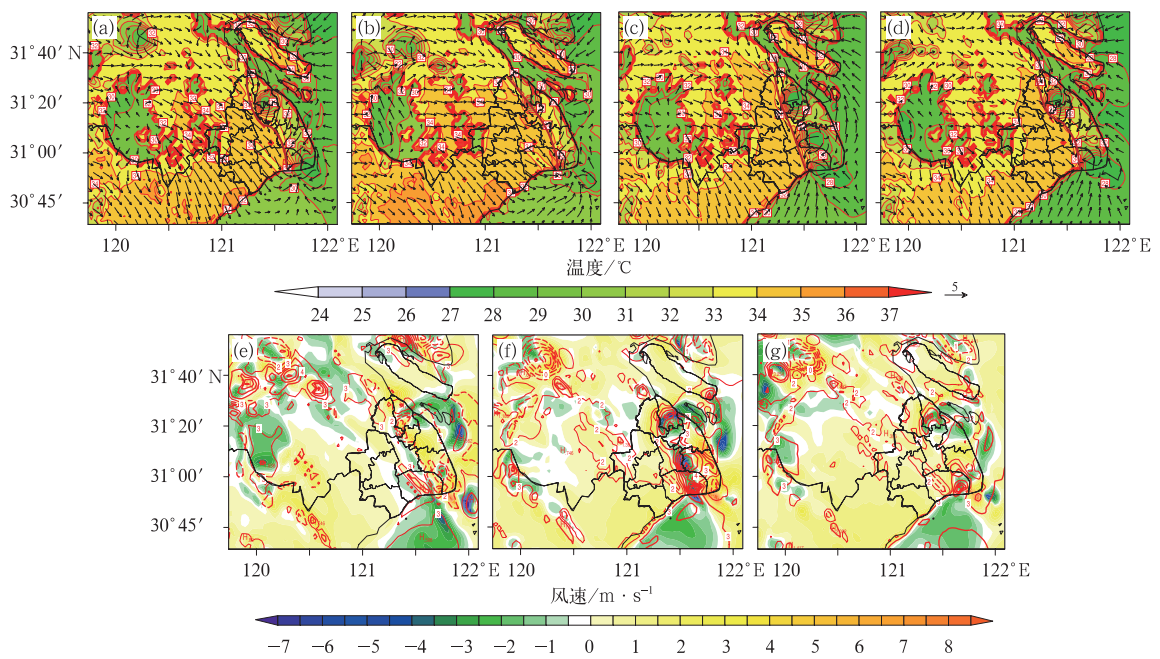


图 5 同图 4, 但为 13 时

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 13:00 BT

试验的辐合线位置与 ctrl 试验大致相同。从 13 时初始地面温度和风场的差值场(图 5e, 5f, 5g)清楚地

看到, T1、T2、T3 三个试验的地面温度和地面风场都有不同程度的变化, 温度和风速变化明显的区域

都位于上海东部,靠近长江入海口一带,呈西北—东南走向;其中 T2 试验辐合线附近的温度和风速变化最为明显,温度变化最大的地方风速调整也最明显。去除任何一种观测资料,都会影响地面温度的模拟,地面温度的调整直接影响着海陆风的模拟,决定了地面辐合线的位置。

2.2 预报结果分析

2.2.1 降水

从 13 时起报的逐小时降水模拟结果的对比可以清晰地看到 ctrl 试验、T1、T2 和 T3 试验模拟的降水显著不同(图 6),以降水最强时段 15—17 时

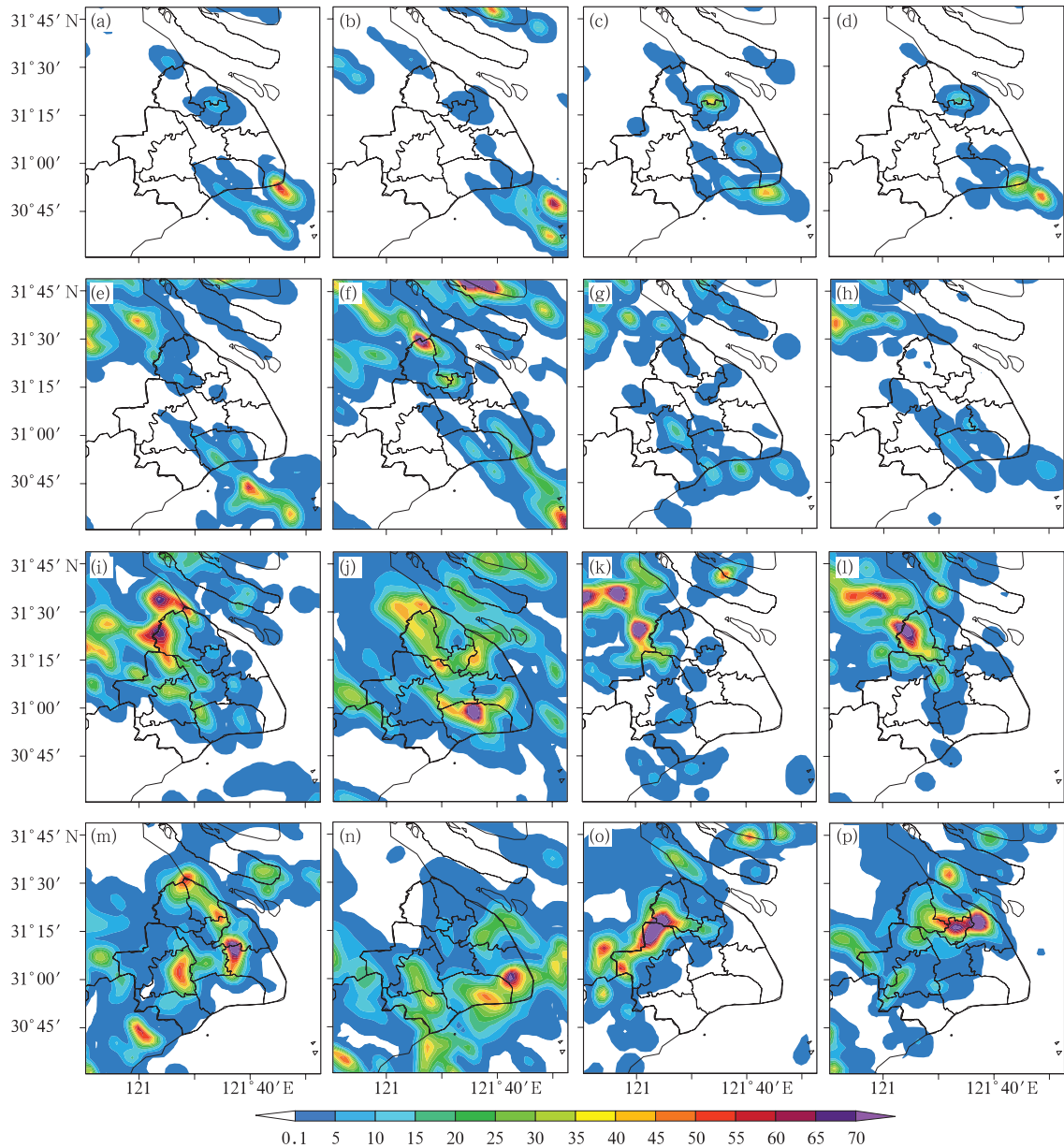


图 6 模式模拟的 1 h 累积降水(13 时起报,单位: mm)

(a, e, i, m) ctrl 试验, (b, f, j, n) T1 试验, (c, g, k, o) T2 试验, (d, h, l, p) T3 试验

(a~d) 13—14 时, (e~h) 14—15 时, (i~l) 15—16 时, (m~p) 16—17 时

Fig. 6 Simulated 1 h accumulated rainfall (initiated at 13:00 BT, unit: mm)

(a, e, i, m) control experiment, (b, f, j, n) T1 experiment, (c, g, k, o) T2 experiment,

(d, h, l, p) T3 experiment

(a—d) 13:00—14:00 BT, (e—h) 14:00—15:00 BT, (i—l) 15:00—16:00 BT, (m—p) 16:00—17:00 BT

为例。15—16 时,ctrl 试验模拟的强降水中心位于上海西北与江苏交界处,与实况一致;而 T1 试验模拟出上海所有地区有降水,强降水中心在南部,最大雨强超过了 70 mm;T2 试验模拟出西北部的降水,但强降水中心位置偏西;T3 试验也模拟出上海西北部的降水,但强度偏大,最大降水量超过了 70 mm;ctrl 试验和三个敏感性试验在上海中部和南部都有大范围的空报。16—17 时,ctrl 试验很好地把握了强降水中心的落区及量级,最大降水达 70 mm 以上,与观测相符,同时也较好地模拟出西北—东南走向的强降雨带;而 T1、T2 和 T3 试验未能模拟出强降水的落区和雨带走向。

2.2.2 风场

图 7 是 ctrl 试验 13 时起报模拟的地面温度、风场随时间的演变以及实际观测地面温度和风场随时间的变化。14 时,随着江苏中部弱冷空气的南下,可以看到一条呈西北—东南向风速辐合线(图 7b),辐合线的位置和观测(图 7a)基本一致。15 时,强劲的西北风继续东移南压,与东部的海风在上海西部形成辐合(图 7d),辐合线的位置较观测(图 7c)稍偏东一点;此外,来自南部的海风与来自北部的海风在上海中部汇合,形成另外一条辐合线(图 7c, 7d)。16 时,奉贤沿海风向迅速由西北风转为偏南风,西

北风明显增大,进一步南压,与深入内陆的海风在宝山—中心城区—松江一带辐合,形成了一条新的东北—西南向地面辐合线,辐合线西侧存在大风区(图 7f),与观测的风速辐合线(图 7e)位置也比较接近,这和图 6i 中 ctrl 试验模拟出的上海西部降水很好的对应;另外,东方体育中心存在一辐合区,辐合区附近温度较四周高、风速也较大,这给局地强对流的产生带来了有力条件。17 时,东方体育中心附近的辐合仍然存在,且更强,该辐合区的位置与降水区有着良好的对应关系。18 时强对流迅速减弱,地面辐合线也迅速消失,上海城区降水随之结束(图略)。总体来看,ctrl 试验基本上模拟出了两块对流区的发展过程和分布特征,边界层辐合线的形成和发展是促发强对流天气的重要因素。

从 T1、T2 和 T3 各试验的模拟结果(图 8)和实况、ctrl 试验(图 7)相比较可以看出:14 时,由于海陆温度的差异,T1 试验(图 8a)靠近沿海的东部地区受海风影响,形成一条西北—东南地面辐合线,位置较观测偏东;而 T2、T3 试验(图 8b, 8c)模拟的海风强劲,已经越过上海中部,上海东部降温明显,模拟的地面温度低于观测和 ctrl 试验,西部地区维持弱的偏西风,于是形成的西北—东南向辐合线位置偏西;15 时,T2 试验(图 8e)模拟上海不存在地面辐

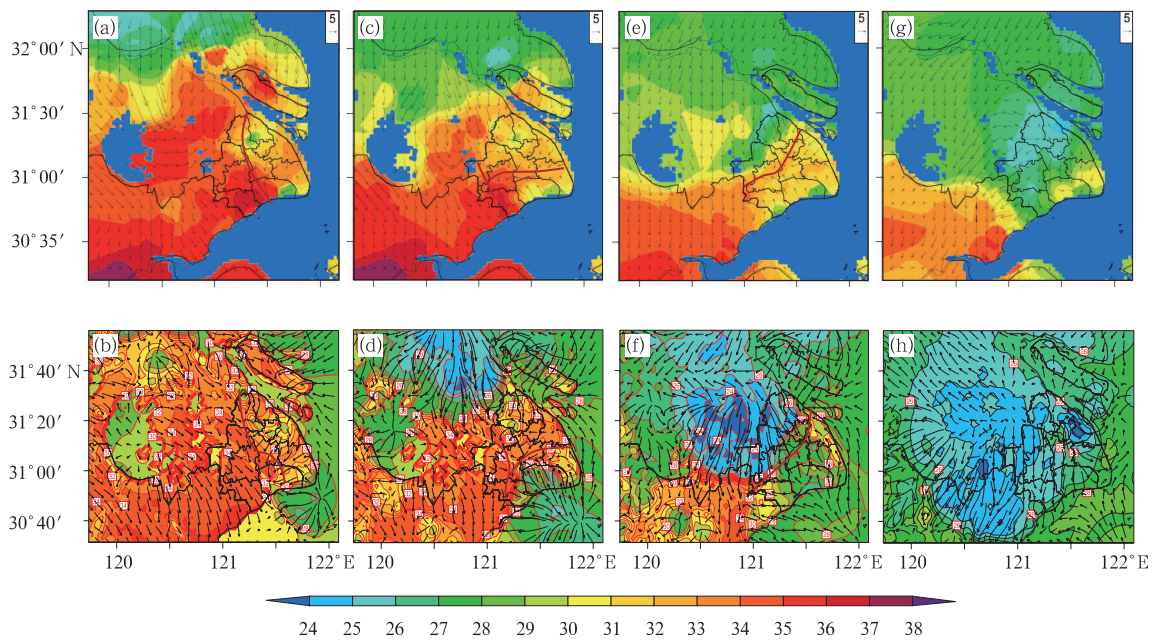


图 7 不同时刻地面温度(阴影,单位:℃)和地面风场(矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$)

(a, c, e, g) 观测, (b, d, f, h) ctrl 试验(13 时起报); (a, b) 14 时, (c, d) 15 时, (e, f) 16 时, (g, h) 17 时

Fig. 7 Surface temperature (shaded area, unit: $^{\circ}C$) and surface wind (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) fields at different time

(b, d, f, h) observation, (a, c, e, g) control experiment (initiated at 13:00 BT);

(a, b) 14:00 BT, (c, d) 15:00 BT, (e, f) 16:00 BT, (g, h) 17:00 BT

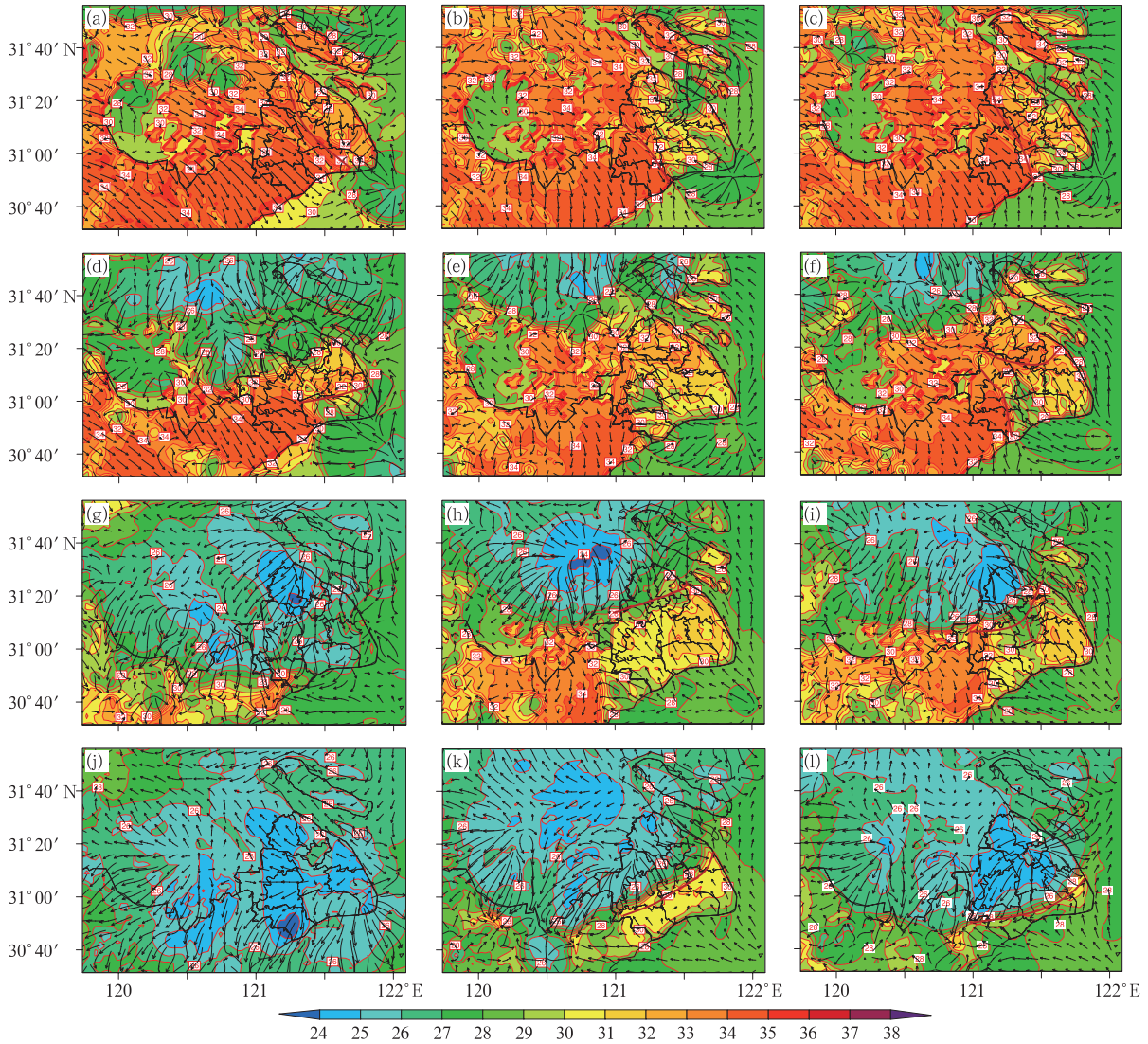


图 8 不同数值试验模拟的 14—17 时的地面温度(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)和地面风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(13 时起报)

(a,d,g,j)T1 试验, (b,e,h,k)T2 试验, (c,f,i,l)T3 试验; (a~c)14 时, (d~f)15 时, (g~i)16 时, (j~l)17 时

Fig. 8 Simulated surface temperature (shaded area, unit: $^{\circ}\text{C}$) and surface wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) fields from 14:00 BT to 17:00 BT of different experiments (initiated at 13:00)

(a, d, g, j) T1 experiment, (b, e, h, k) T2 experiment, (c, f, i, l) T3 experiment;

(a-c) 14:00 BT, (d-f) 15:00 BT, (g-i) 16:00 BT, (j-l) 17:00 BT

合线,虽然 T1 和 T3 试验(图 8d,8f)模拟出了东南风与偏北风形成的辐合线,但走向、位置与观测均有差异。16 时,T1 试验(图 8g)模拟的偏北风逐渐加强,除了上海东南部靠近沿海的地方有一个小辐合区,其他地区盛行偏北风;T2、T3 试验中地面辐合线的走向和观测相似,但 T2 试验模拟的辐合线的位置和观测不同。17 时,T1 试验模拟上海地区的地面风场又转为海风控制,东南部靠近沿海的小辐合区仍然存在,这和 T1 试验模拟的强降水中心很好的对应;T2、T3 试验中北方冷空气加强并逐渐南压,西北郊区地面温度明显下降,地面辐合线位置也

随之向南推进,这与观测完全不符。由此可见,ctrl 试验对海陆风的移动和地面辐合线的移动变化的模拟都比 T1、T2、T3 试验的模拟结果更接近实况,这是由于同化地面观测资料后,地面温度场、风场都有明显的调整。

2.2.3 垂直环流

为了更清楚地分析各试验对强对流发生发展的模拟,以东方体育中心(31.1586°N 、 121.4717°E)为中心,做东西向剖面图(图 9),该垂直剖面图能清楚地反映垂直环流的变化。

14 时,ctrl 试验(图 9a)模拟的城市热岛非常明

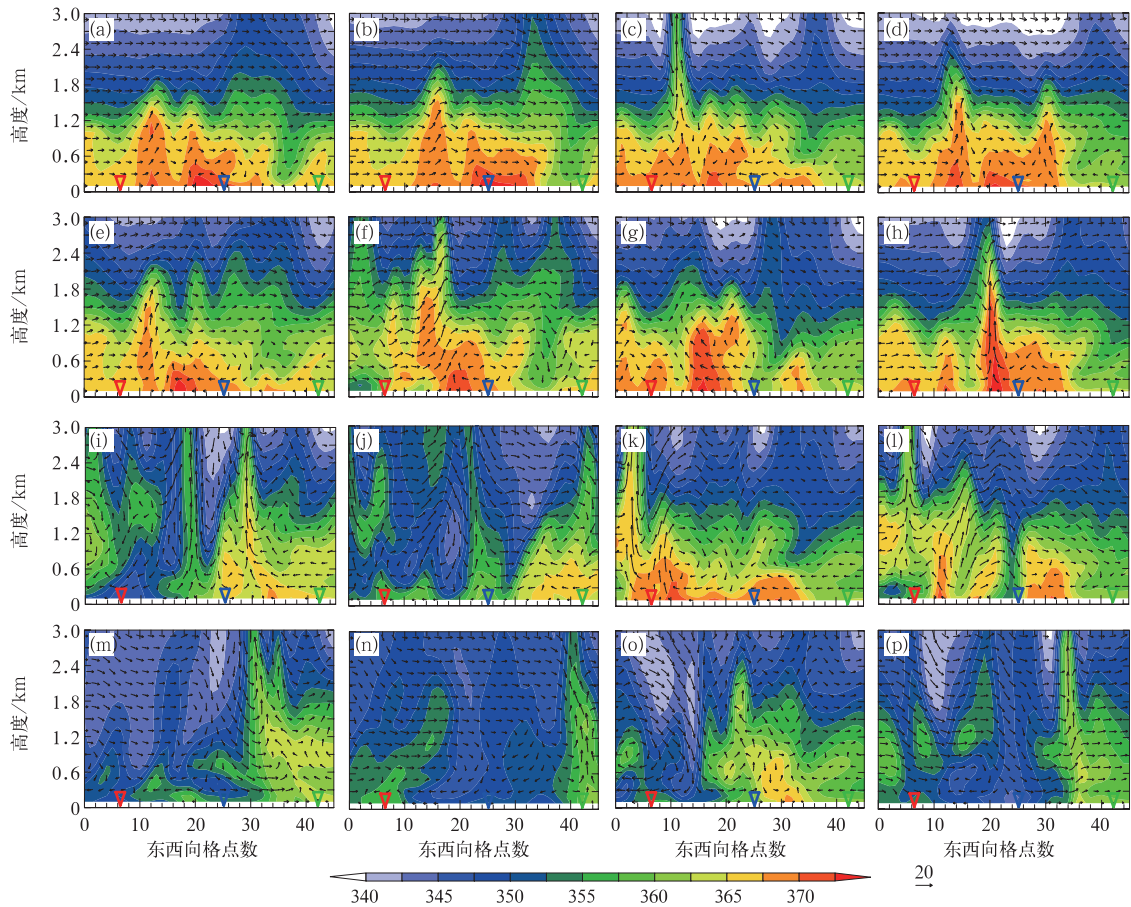


图 9 不同数值试验模拟的 14—17 时相当位温(阴影,单位:K)和垂直环流(矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$)的 W-E 剖面图(13 时起报)

(a, e, i, m)ctrl 试验, (b, f, j, n)T1 试验, (c, g, k, o)T2 试验, (d, h, l, p)T3 试验;
 (a~d)14 时, (e~h)15 时, (i~l)16 时, (m~p)17 时
 (红、蓝、绿三角形分别是淀山湖、东方体育中心、海岸线)

Fig. 9 W-E cross-section of equivalent potential temperature (shaded area, unit: K) and vertical circulation (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) from 14:00 BT to 17:00 BT of different experiments (initiated at 13:00 BT)
 (a, e, i, m) control experiment, (b, f, j, n) T1 experiment, (c, g, k, o) T2 experiment,
 (d, h, l, p) T3 experiment;
 (a~d) 14:00 BT, (e~h) 15:00 BT, (i~l) 16:00 BT, (m~p) 17:00 BT
 (red triangle: Dianshan Lake; blue triangle: Oriental Sports Center; green triangle: the location of coastline)

显,边界层存在两个弱的环流,一个为淀山湖湖陆风与城市热岛叠加形成的环流,水平尺度约 18 km,垂直尺度在 1.3 km 左右,略低于热岛高度;另一个为其在下风方形成的次级环流,水平尺度约 9 km,环流垂直高度仅为 0.9 km;而边界层以下以西风为主,海岸线附近逐渐出现偏东海风;T1 试验(图 9b)仅模拟出了淀山湖与城市热岛叠加形成的一个环流,海岸线附近上空为西风控制,此时还没有明显的海陆风;而 T2 试验(图 9c)虽然也模拟出了两个环流,低层(0.6 km 以下)的海风已经发展强劲,海风与湖陆风在淀山湖西侧形成强烈的辐合上升,另外辐合区西侧的下沉气流与海风又形成一个环流;T3

试验(图 9d)模拟的海风也已深入内陆,在东方体育中心东侧形成辐合上升,一部分海风继续西进在东方体育中心西侧与湖陆风的下沉气流形成另一环流。15 时,可以清楚地看到 ctrl 试验(图 9e)0.6 km 高度以下,海陆风显著发展,并在东方体育中心与淀山湖之间的两个闭合环流之间与偏西方向湖陆风交汇,在近地层形成辐合上升。导致两个闭合环流的上升气流显著增强并逐渐合并,其上升气流突破边界层,由此来自海洋的水汽通过海陆风引导进入城市上空,其上升最强烈的地方与城市热岛中心区一致;T1 试验(9f)模拟的偏西风强盛,在淀山湖和东方体育中心之间的城市上空形成强烈的上升运动,

然后在海岸线西侧附近下沉与海风相遇,阻断了低层东风气流输送来的水汽;T2、T3 试验(图 9g,9h) 0.6 km 以下海风已经到达东方体育中心西侧,它与偏西风交汇形成辐合上升。16 时,ctrl 试验中(图 9i)淀山湖与东方体育中心间的对流已经发展成熟,边界层以下的水汽被源源不断抬升至高空,并在体育中心上空形成下击暴流;与此同时,海陆风发展愈发强盛,垂直高度扩展至 0.9 km 左右,并在东方体育中心东侧与热岛环流叠加,产生明显的上升,使低层暖湿水汽被输送至边界层以上;而西侧下击暴流的补偿气流,加剧了对流的发展。继续推进的偏西风(图 9j)与低层的弱水汽相遇,在东方体育中心西侧附近形成上升运动。而 T2、T3(图 9k,9l)模拟的低层的海风已经到达淀山湖。17 时,由于暴雨的发生,体育中心上空能量释放完毕,ctrl 试验(图 9m)模拟的地面温度急剧降低,城市热岛明显减弱,整层大气转为下沉气流,海陆风无法抵达东方体育中心,东方体育中心降雨基本结束;T1 试验中低层(0.6 km)的东风和高层西风在淀山湖和东方体育中心之间形成闭合的环流圈,另外,海岸线附近上空存在强烈的辐合上升;T2 试验中 0.9 km 以下的水汽输送至东方体育中心附近,并不断抬升至 2.5 km,在西侧下沉,与淀山湖上空的环流汇合,这正与 T2 试验

模拟出上海西边的降水位置相对应(图 6o);T3 试验 3 km 以下都被西风控制,没有明显的海陆风。

2.2.4 水汽条件

为了进一步了解各试验对暴雨过程的水汽输送特征,我们对强降水中心(东方体育中心)附近上空的相对湿度进行分析,以前的研究(王晓峰等,2015)对 ctrl 试验 13—16 时的水汽分布做了细致分析,因此下面主要对强对流集中阶段(16—17 时)进行分析。16 时,ctrl 试验(图 10a)中东方体育中心以东 3 km 高度以下的湿度达到 80% 以上,上升运动将此处充足的水汽输送至东方体育中心上空,使得东方体育中心高层(8 km 以上)存在深厚的湿层,而东方体育中心上空 3~8 km 处存在弱下沉运动,此处湿度较小,这种上干下湿的配置有利于降水的发生(寿绍文,2002);而 T1、T2 试验(图 10b,10c)模拟的东方体育中心上空整层均为上升气流,强上升运动带略向西移,模拟的 6 km 以上均为干区,而深厚的湿区位于淀山湖和东方体育中心之间,从前面的分析也看到,T1 和 T2 试验模拟的强降水中心位置偏西,与上升运动和相对湿度的变化比较一致;T3 试验(图 10d)模拟的东方体育中心上空上湿下干,不利于降水的发生。17 时,ctrl 试验中(图 10e)东方体育中心上空的上升运动已不明显,降水发生,但西

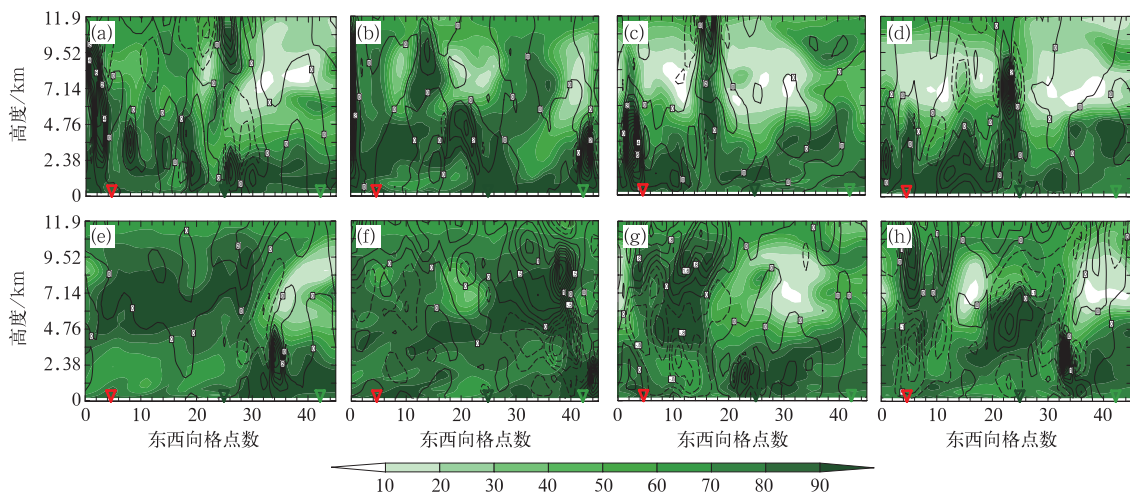


图 10 不同数值试验模拟的 16—17 时相对湿度(阴影,单位:%)和垂直速度(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的 W-E 剖面图(13 时起报)

(a, e)ctrl 试验, (b, f)T1 试验, (c, g)T2 试验, (d, h)T3 试验; (a~d)16 时, (e~h)17 时
(红、蓝、绿标记分别是淀山湖、东方体育中心和海岸线位置)

Fig. 10 W-E cross-section plots of simulated relative humidity (shaded area, unit:%) and vertical circulation (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at different time of different experiments (initiated at 13:00)

(a, e) control experiment, (b, f) T1 experiment, (c, g) T2 experiment,
(d, h) T3 experiment; (a—d)16:00 BT, (e—h)17:00 BT
(red triangle: Dianshan Lake; blue triangle: Oriental Sports Center; green triangle: coastline)

侧低层的水汽仍通过上升运动源源不断地向上空输送;T1、T3 试验中(图 10f,10h)东方体育中心西侧弱的下沉运动抑制了近地层水汽的输送,湿度较小;而 T2 试验(图 10g)中东方体育中心至海岸线附近的上升运动将低层的水汽输送至淀山湖西侧中高层(4~10 km 高度),离距离淀山湖西侧 2~11 km 低层有明显的下沉运动,此处正是 T2 试验模拟出的强降水位置。总体看,地面观测资料引入带来的物理量场变化,影响着降水模拟结果。

3 结论与讨论

本文对上海地区的一次强对流过程,利用快速更新同化系统对地面观测资料进行敏感性试验;不同化常规地面观测资料、不同化加密自动站资料和两种资料都不同化,分析观测资料对降水预报的影响,得到如下结论:

(1) 模式范围的加密自动气象站站点比常规地面观测站站点分布密,且多。从 T1 和 T2 试验模拟结果可以看到:在快速更新同化系统中,不同地面观测资料同化对模式初始场的调整作用不同,加密自动站资料对 02、13 时初始温度场、风场调整幅度最大,可见,地面观测资料的疏密影响模式初始场预报。

(2) 从模拟的降水结果可知,只有 ctrl 试验成功地模拟出了此次强降水过程,同时同化常规地面观测资料和加密自动站资料有利于此次降水预报准确率的提高。

(3) 同化所有资料可以在较长时段内改进模式预报结果,快速更新同化系统每小时对观测资料进行同化可以不断更新模式背景场,形成更准确的初始场,ctrl 试验模拟的地面温度场和风场优于 T1、T2 和 T3 试验结果,ctrl 试验模拟的辐合线位置也与实况基本一致,垂直方向的水汽输送及辐合上升运动的模拟与实际更相符,也就是说加入所有观测资料后,此次强对流中尺度结构特征刻画得更加清晰准确,改善了模式对局地强对流天气系统的预报效果。

(4) ctrl 试验使用的观测资料数量最多,其次依次是 T1、T2 和 T3 试验(即 $\text{ctrl} > \text{T1} > \text{T2} > \text{T3}$),通过上面各试验的对比发现,ctrl 试验的模拟效果也是最好,可以说预报结果的好坏取决于同化地面

观测资料的多寡。

(5) 另外,通过对各试验 02 时(冷启动)、13 时初始场以及 13 时起报 14—17 时的模拟结果分析可得:采用逐小时循环同化的方式对观测资料进行同化,能把最新的观测数据融合进模式中,让地面观测资料发挥作用;简而言之,多次同化优于单次同化。

参考文献

- 陈葆德,王晓峰,李泓,等,2013.快速更新同化预报的关键技术综述[J].气象科技进展,3(2):29-35.
- 程磊,沈桐立,徐海明,等,2011.地面加密自动站资料同化和数值模拟[J].气象科学,31(1):24-32.
- 代刊,何立富,金荣花,2010.加密观测资料在北京 2008 年 9 月 7 日雷暴过程分析中的综合应用[J].气象,36(7):160-167.
- 东高红,尉英华,解以扬,等,2015.天津地区城市热岛环流与海风环流相互作用的研究[J].气象,41(12):1447-1455.
- 傅娜,陈葆德,谭燕,等,2013.基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J].气象,39(10):1247-1256.
- 寿绍文,2002.天气学分析[M].北京:气象出版社.
- 王晓峰,许晓林,张蕾,等,2014.上海“0731”局地强对流观测分析[J].高原气象,33(6):1627-1639.
- 王晓峰,王平,张蕾,等,2015.上海“7·31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究[J].高原气象,34(1):124-136.
- 王晓峰,王平,张蕾,等,2017.多源观测在快速更新同化系统中的敏感性试验[J].高原气象,36(1):148-161.
- 徐枝芳,郝民,朱立娟,等,2013. GRAPES_RAFS 系统研发[J].气象,39(4):466-477.
- 徐枝芳,龚建东,王建捷,等,2007a.复杂地形下地面观测资料同化 I.模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究[J].大气科学,31(2):222-232.
- 徐枝芳,龚建东,王建捷,等,2007b.复杂地形下地面观测资料同化 II.模式地形与观测站地形高度差异代表性误差[J].大气科学,31(3):449-458.
- 俞飞,付伟基,姬鸿丽,2013.基于地面观测资料同化的飊线过程数值模拟试验[J].大气科学研究与应用,(2):41-50.
- Wilson J W, Foote G B, Crook N A, et al, 1992. The role of boundary-layer convergence zones and horizontal rolls in the initiation of thunderstorms; a case study[J]. Mon Wea Rev, 120(9):1785-1815.
- Wilson J W, Mueller C K, 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution[J]. Wea Forecasting, 8(1):113-131.
- Wilson J W, Schreiber W E, 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 114(12):2516-2536.
- Zhang D L, Fritsch J M, 1986. A case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective systems to varying initial conditions[J]. Mon Wea Rev, 114(12):2481-2431.