中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 5 期: 862 ~ 873
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

中期模式扰动风在 2010 年区域暴雨预报中的天气学释用

钱维宏*, 李进, 单晓龙

北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871
* E-mail: qianwh@pku.edu.cn

收稿日期: 2012-06-08; 接受日期: 2013-01-09; 网络版发表日期: 2013-04-19
公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY201306013)资助

摘要 观测和中期模式预报的大气风场可以物理分解为气候风场、行星尺度瞬时扰动风场和天气尺度瞬时扰动风场. 本文用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式和美国全球预报系统(GFS)模式输出的 850 hPa 风场进行天气尺度瞬时扰动风的分解, 发现中国大陆暴雨带多位于扰动风的辐合线上. 用 2010 年发生在中国大陆的主要区域性暴雨做分析, ECMWF 预报产品分解的 850 hPa 扰动风辐合线提前 3, 6 和 9 天指示暴雨带的正确率分别是 100%, 85%和 15%, 而 GFS 预报产品分解的正确率分别为 53%, 15%和 6%. 欧洲模式直接预报区域暴雨的平均提前有效时间为 3.1 天, 而模式预报产品分解的扰动风辐合系统指示区域暴雨的平均提前有效时间为 6.7 天.

关键词
物理分解
数值天气预报
模式
扰动风场
区域暴雨
辐合线

暴雨是我国的主要灾害性天气之一. 强暴雨(日雨量大于 100 mm)多与中β尺度和次天气尺度(几十至百公里)的强对流性扰动相联系. 暴雨可以在我国南方的四季发生, 也可以在北方的半干旱区夏季发生.

2010 年, 中国暴雨过程频繁, 降雨强度大, 导致多个流域汛情紧张, 并引发了严重的次生灾害[1]. 2010 年暴雨事件的特点表现为开汛早, 分布广, 持续时间长. 2010 年 1~3 月, 中国南方等地就开始受到区域性暴雨的袭击, 江西、浙江等地 3 月初出现历史罕见早汛. 5~7 月, 南方地区共出现 14 次强降水天气过程, 部分地区累计降水量达 800~1200 mm. 汛期前(1~4 月)降水偏多和汛期中(5~10 月)频繁的强降水过程, 使得江河湖库水位超过警戒线, 长江上游干流不断发生洪水, 经济损失和人员伤亡较重. 7 月中旬至 9 月上旬, 北方和西部地区遭受 10 轮暴雨袭击. 7 月 20~24 日, 区域性大暴雨使辽宁、吉林部分地区严重受灾. 8 月 7 日 20~24 时, 甘肃省甘南州出现局部短时强降水, 引发舟曲县城的特大山洪泥石流灾害, 造成 1700 多人死亡或失踪. 10 月 1~19 日, 海南平均降水量达 1060.1 mm, 为有记录历史同期最多. 国内研究者对这些暴雨事件的大气环流特征及其灾害已有一些分析[2~10].

对局地短时强降水, 用常规天气图方法和全球范围的数值模式方法尚难以提前几天做出预报. 但在 2010 年, 大多数大于 3 站或大于 300 km 长度的雨带都是持续几日, 甚至 10 多天的区域暴雨. 这些区域暴雨在 850 hPa 实况风场和 2.5 经纬度分析风场上都有对应的关系. 暴雨雨带大多数位于低空急流的

中文引用格式: 钱维宏, 李进, 单晓龙. 中期模式扰动风在 2010 年区域暴雨预报中的天气学释用. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 862–873
英文引用格式: Qian W H, Li J, Shan X L. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 1059–1070, doi: 10.1007/s11430-013-4586-5

左侧, 但相对急流的距离难以预先确定. 对 3~5 天以上的所谓中期-延伸期区域暴雨预报, 预报能否成功主要依赖于中期数值天气预报模式对环流形势预报的准确程度. 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国全球预报系统(GFS)模式输出的未来 1~2 周产品在气象业务中有着较多的应用. 对这些预报产品的释用方法主要是模式输出统计(MOS)[11]. MOS 需要大量样本建立模式输出产品与天气事件之间的统计关系, 不同的模式有不同的统计关系方程. 随着模式的改进, 统计方程也要随之改变. 本文用物理分解的方法主要对欧洲模式预报的 1~10 天风场进行分解, 同时也给出美国模式预报风场分解的例子, 考察天气尺度扰动风中辐合线等系统对区域暴雨的指示意义, 从而可进一步认识数值模式产品在暴雨预报中的天气学释用.

1　资料和方法

本文使用的降水数据来自中国气象局整编的《中国地面气候资料日值数据集》中 2010 年的 756 个基本、基准地面气象观测站及自动站的逐日降水量. 模式产品资料来自欧洲(ECMWF)模式和美国(GFS 15 个)模式集成提供的每日 08:00 时(北京时)当日北半球 2.5°×2.5°格点 850 hPa 风场初始值和未来 1~10 天的预报值. 对比分析中, 850 hPa 风取用当日 08 时再分析值或模式预报值, 降水取用前日 20 时(北京时)至当日 20 时, 24 h 内的累积值. 欧洲模式每日两个时刻(08 时和 20 时)起始预报的未来 1 至 10 日逐日 24 h 欧亚地区 0.125 经纬度格点降水量, 时间从 2010 年 6 月 1 日至 9 月 30 日.

全球大气变量的分解有多种满足正交性的数学方法, 如球谐函数展开和经验正交函数(EOF)展开等. 全球大气变量也可以分解成纬圈和时间平均的气候对称部分、时间平均的气候非对称部分、纬圈平均的瞬时对称部分和瞬时非对称部分. 因此, 观测的和模式预报的风可以物理分解成四个部分[12]. 大气中的天气尺度瞬时扰动风分量的分解方法是观测风减去逐日气候风, 再减去瞬时纬圈平均扰动风.

大气边界层顶位于 850 hPa 附近. 在饱和大气的边界层中, 气流辐合的地方有利于产生降水. 因此, 在日常天气预报中, 预报员最关注 850 hPa 层上的气旋性环流系统. 以下的分解式中, $V(\lambda,\varphi,t)_Y^{*\prime}$ 是第 Y 年第 t 日瞬时 850 hPa 天气尺度扰动风的分量.

$$V(\lambda,\varphi,t)_Y^{*\prime} = V(\lambda,\varphi,t)_Y - \tilde{V}_t(\lambda,\varphi) - [V(\varphi,t)]_Y', \quad (1)$$

其中, 式(1)右侧第一项 $V(\lambda,\varphi,t)_Y$ 为 850 hPa 观测风或模式预报的风, 右侧第二项为每日确定时刻和确定位置上的多年平均气候风:

$$\tilde{V}_t(\lambda,\varphi) = \sum_{\tau=1}^{N} V_t(\lambda,\varphi,\tau)/N. \quad (2)$$

该分量是不同位置上某时刻太阳辐射与海陆分布共同影响下的逐日气候风, 可用 1981~2010 年美国再分析大气风资料确定.

式(1)右侧第三项 $[V(\varphi,t)]_Y'$ 是行星尺度的瞬时扰动风. 它的分离方法是用历史观测风、当日观测风, 或用未来 1~10 天中期数值模式预报风, 减去逐日气候风后再做纬圈平均得到. 这项与热带海洋或极地年代际、年际和季节内热力强迫变化有关[13].

大量的例子分析得到, 由原始观测风分解得到扰动风后, 扰动风的辐合线对区域暴雨的指示意义更为清楚[14]. 图 1 是 2010 年 7 月 6 日 850 hPa 原始风

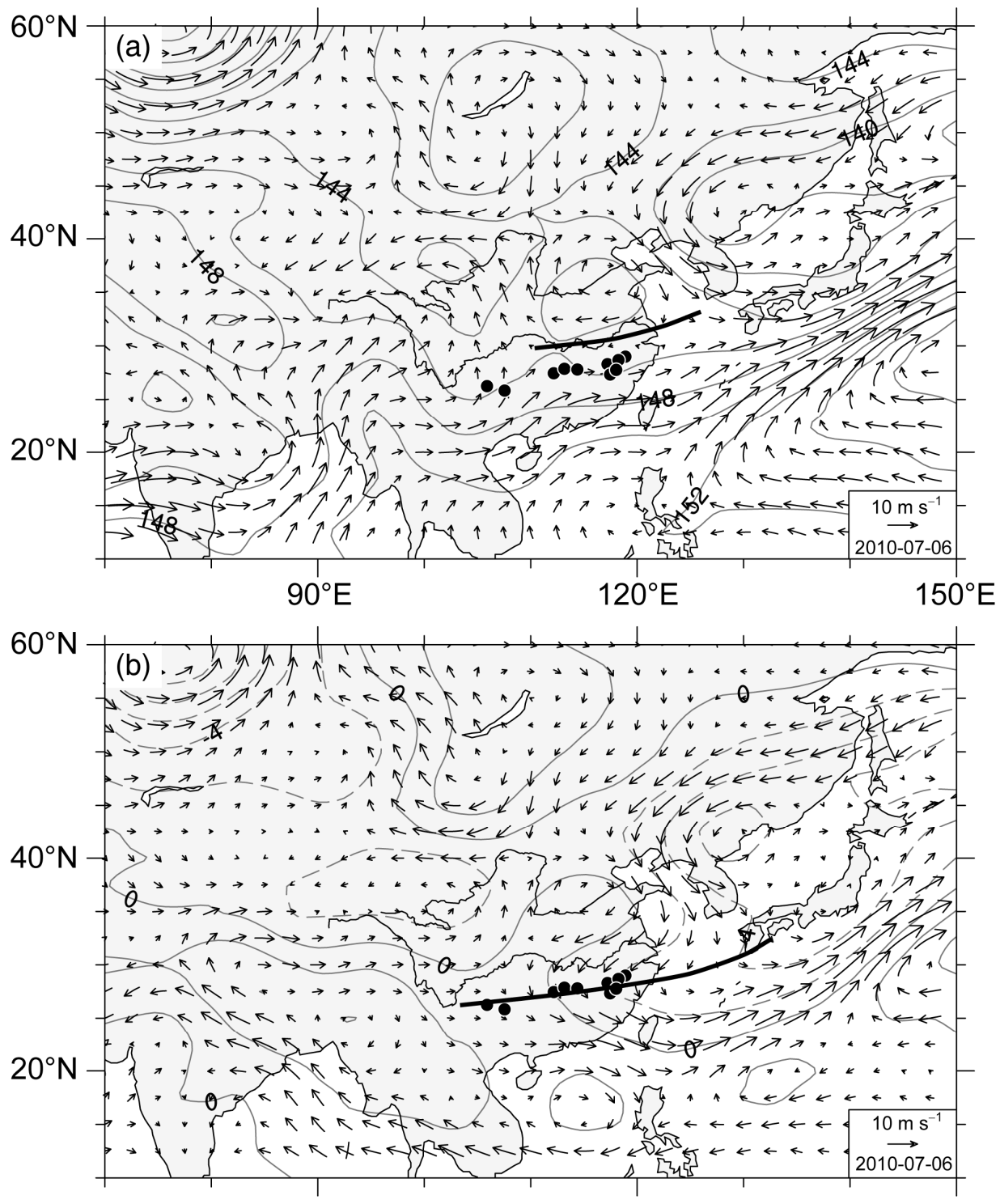

图 1　2010 年 7 月 6 日 08 时 850 hPa 原始风场(a)和物理分解的扰动风场(b)

黑色圆点表示 2010 年 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时 24 h 暴雨(≥50 mm)站. 北京时间, 下同

和天气尺度扰动风分布相对暴雨落区位置的比较. 2010 年 7 月 6 日, 江南地区有 10 个站出现了大于 50 mm 的降水, 其中东部 8 个暴雨站的地理位置相对集中. 原始流场上(图 1(a)), 一条切变线沿长江下游分隔了南北两个高压环流系统. 暴雨落区并不在切变线上, 而是位于西南较强气流的左侧. 与原始风场不同, 分解后的扰动风场(图 1(b))上也有一条切变线, 称为扰动切变线. 这条扰动切变线把分散的 10 个暴雨站连接起来了. 切变线的性质在两种风场下是不同的. 原始风场上, 切变线属于两个高压环流之间的低值带. 在天气尺度扰动风场上, 切变线属于低压(气旋)后部的冷式槽线. 暴雨带直接与这条槽线两侧的扰动气流对峙有关.

在实际预报业务中, 预报员更容易理解扰动风场中的冷式扰动槽线与暴雨落区的对应关系. 图 2 是 2010 年 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时, 24 h 实况降水量与欧洲模式从 2010 年 7 月 5 日 20 时起报的 0~24 h 累积 24 h 降水量和 2010 年 7 月 5 日 08 时起报的 12~36 h 累积 24 h 降水量. 预报与实况之间有下列差别: 一是预报的雨强比实况的弱, 预报只在长江下游有一个暴雨区, 而实况暴雨区的长度是其几倍; 二是预报的暴雨带位置比实况偏北和偏东, 即预报的暴雨中心位置比实况暴雨区偏东北 100~200 km 的距离.

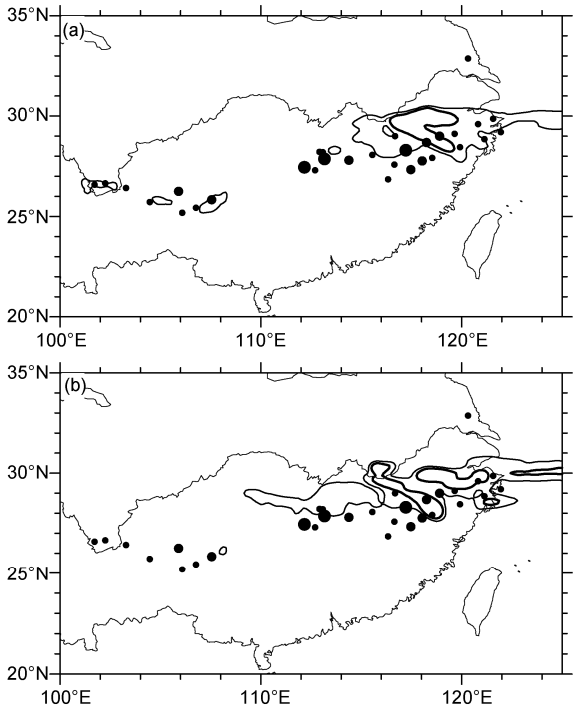

图 2　2010 年 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时实况 24 h 降水量与欧洲模式从 2010 年 7 月 5 日 20 时起报的 0~24 h 累积 24 h 降水量(a)和 2010 年 7 月 5 日 08 时起报的 12~36 h 累积 24 h 降水量(b)

黑圆点由小到大分别为 25~49.9 mm, 50~99.9 mm 和>100 mm. 欧洲模式预报的累积 24 h 降水量细线为 25 mm, 粗线为 50 mm

结合图 1 中原始风场与物理分解后的扰动风场的比较, 我们能够理解欧洲模式降水预报与实况降水的上述差别, 其原因来自原始风的辐合强度弱, 并且辐合线相对实况降水位置偏北和偏东. 如果分别由原始风和扰动风计算涡度, 则后者的扰动风正涡度位置与降水区一致. 欧洲模式预报的降水位置是与原始低层风辐合系统对应的, 而实况暴雨带是与扰动风的辐合线对应.

上述这个例子的对比再次说明, 扰动环流系统与区域暴雨落区更有明确的天气学意义, 暴雨落区位于 850 hPa 两支扰动气流对峙的切变线上[14]. 预报员对此关系一目了然, 暴雨是大气异常运动(扰动)的产物, 气候流场掩盖了扰动流场对暴雨落区的指示意义. 这样, 对模式预报能力的评估就转变为对扰动流场预报能力的评估, 因为气候流场并不需要预报.

区域性暴雨多以雨带的形式出现. 雨带是指在降水量分布图上的一条等降水量线所包围的区域. 在雨带中常常有多个排列的暴雨中心, 它们是中β尺度系统的产物. 但暴雨中心的排列和生消受到天气尺度扰动系统(如扰动辐合线)的控制. 正常的气候态并不能指示一次暴雨的落区. 行星尺度的大气瞬变扰动也不能指示一次暴雨的落区. 暴雨事件必然是大气瞬变扰动形成的结果. 物理分解出的瞬变扰动风辐合系统有助于预报员直观地判断暴雨发生的地理位置.

2　区域暴雨特征

2010 年发生的暴雨次数不算多, 有 78 次, 但平均持续时间是 1960 年以来最长的, 有 1.9 天[15]. 78 次区域暴雨事件的逐候(5 天)次数分布如图 3 中的柱状线所示. 从图 3 看见, 区域暴雨事件主要集中在 4~10 月, 以 7~8 月最多, 其中 7 月第 5 候有 5 次暴雨事件. 最早的区域性暴雨事件发生在 1 月 21~22 日, 位置在华南地区. 最晚的 2 天区域持续性暴雨发生在 12 月 12 日, 位于江西和湖南的中北部地区.

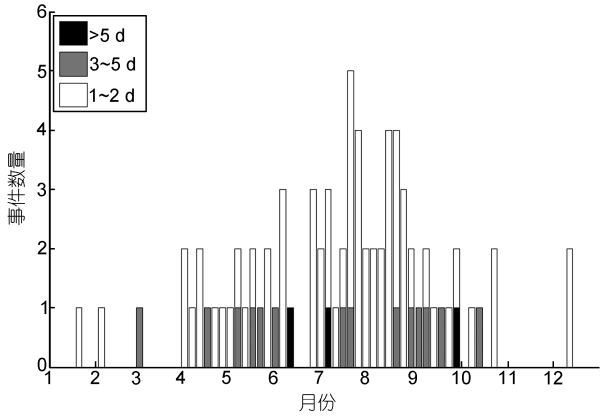

图 3　2010 年中国区域性暴雨事件的逐候分布

空心柱、灰色柱和黑色柱分别代表 1~2 天, 3~5 天和>5 天的暴雨事件次数

在区域(大于 3 站)暴雨的持续性上, 2010 年 1~2 天的暴雨事件占总暴雨事件的 78%. 持续 3~5 天的暴雨事件有 14 次, 5 天及其以上的暴雨事件只有 3 次. 表 1 给出了 2010 年暴雨持续时间最长的前 10 个事件. 最长的区域暴雨事件开始于 2010 年 6 月 14 日, 持续了 11 天, 有 122 站发生了暴雨, 其中福建省武夷山市在 6 月 19 日有最大日降雨量记录(251.7 mm). 第 2 长时间的暴雨事件主体位于长江中下游, 开始于 7 月 8 日, 持续了 7 天, 最大降水中心位于安徽省的安庆. 第 3 长的暴雨事件开始于 10 月 1 日, 持续 7 天, 其中海南的琼海雨量达到 614.7 mm. 这是 2010 年 10 月中上旬海南持续暴雨事件中的第一场降水. 表 1 后面的第 3~10 次暴雨事件中心分别发生在江南的江西、西南的四川、东北的辽宁、东南的福建、华南的广州和长江中游的湖北等地.

3　汛期前暴雨

我国副热带季风区的暴雨主要集中在 5~10 月的主汛期. 汛期前暴雨是指发生在 1~4 月的降水. 在中国季风区, 暴雨发生早的年份, 当年的雨水量大, 持续性大暴雨事件也比较多. 2010 年 1 月 21~22 日, 华南地区出现了我国 2010 年的第一场区域性暴雨. 图 4 显示了 1 月 21 日 08 时的 850 hPa 原始风场、天气尺度扰动风场和欧洲模式提前 1~7 天预报的逐日扰动风场. 从原始风场上看, 东部海上至华南为一西风槽和延伸的切变线. 在沿江-江南地区, 切变线的北侧为东北风, 南侧为西南风, 区域暴雨(圆点)就位于这条切变线上. 在分解的扰动流场上, 尽管切变线位置与原始流场中的切变线位置基本一致, 但气流的分布形态及其强弱都有不同. 它们之间的不同就是天气尺度扰动流场中不再包含气候流场和纬圈平均的行星尺度扰动流场. 在东北地区, 扰动气流比观测的原始气流弱, 但槽线两侧气流的对比更清楚. 分析发现, 这样的扰动气流辐合线与暴雨带的紧密联系一直提前到第 6 天, 即提前 6 天模式预示出了这一扰动辐合线(切变线). 提前第 7 天预报的扰动气流辐合线成为暖切变的形式, 位于江淮地区, 而暴雨带(圆点)位于江南地区, 相对位置发生了较大的偏移. 因此, 我们认定, 欧洲模式提前 6 天预示出了 2010 年的第一场区域性暴雨事件的扰动辐合线.

表 1　2010 年持续时间排序最长的前 10 个暴雨事件

开始日期	持续天数	总站数	最大站日雨量 (mm)	最大站日雨量日期	最大站日雨量地点	中心经度(E)	中心纬度(N)
2010-06-14	11	122	251.7	2010-06-19	武夷山市/福建	114.40°	26.56°
2010-07-08	7	98	300.3	2010-07-13	安庆/安徽	115.09°	30.38°
2010-10-01	7	9	614.7	2010-10-05	琼海/海南	109.99°	19.22°
2010-03-05	4	62	90.2	2010-03-05	景德镇/江西	118.16°	28.24°
2010-05-17	4	48	124.1	2010-05-17	波阳/江西	116.85°	28.12°
2010-07-16	4	83	257.6	2010-07-17	乐山/四川	111.15°	32.56°
2010-08-19	4	61	166	2010-08-20	桓仁/辽宁	120.91°	40.68°
2010-09-02	4	60	205.9	2010-09-02	东山/福建	115.69°	26.98°
2010-09-20	4	71	349.8	2010-09-21	上川岛/广东	111.35°	24.20°
2010-04-19	3	72	90.5	2010-04-21	嘉鱼/湖北	114.27°	30.68°

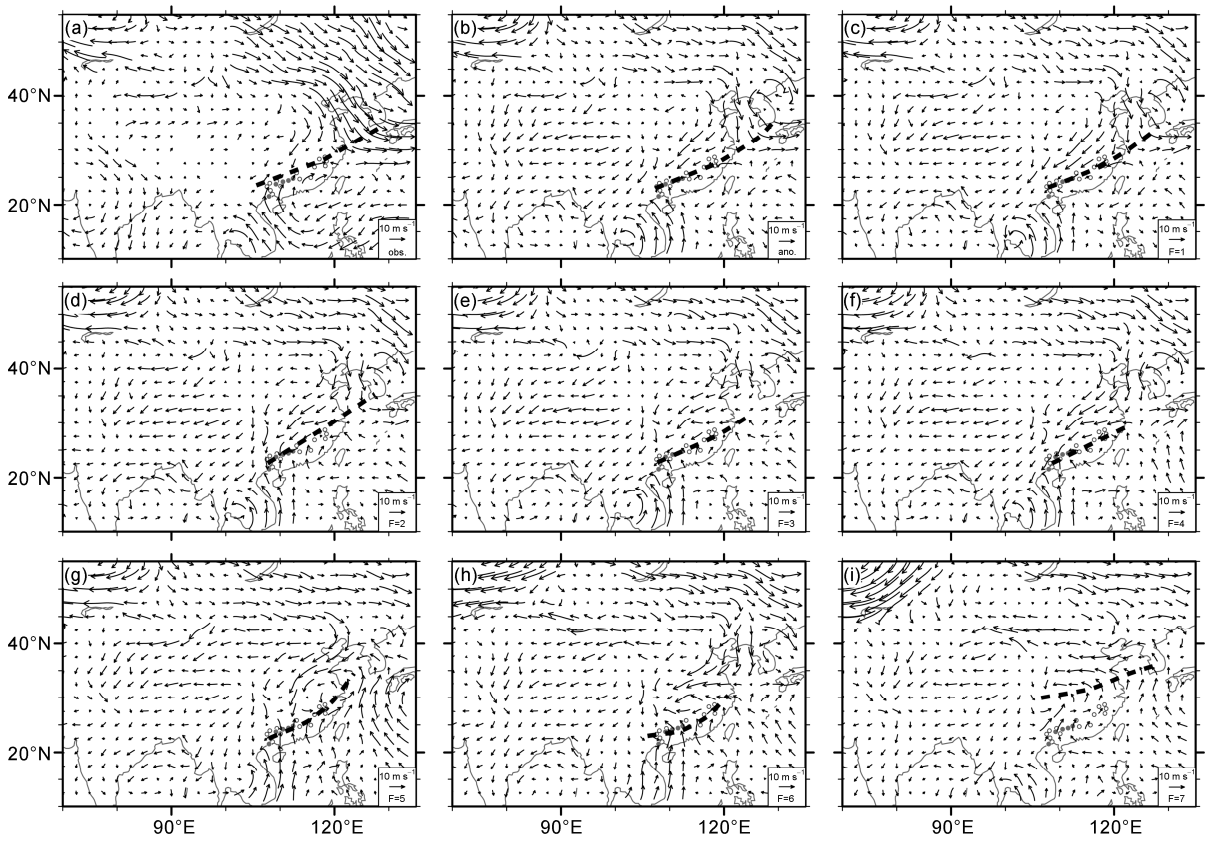

图 4　2010 年 1 月 21 日 08 时 850 hPa 观测风场(a)、天气尺度扰动风场(b)和提前 1~7 天((c)~(i))的 ECMWF 逐日天气尺度扰动风场预报

虚线为流场辐合线, 实心点和空心圆点分别为 20 日 20 时~21 日 20 时的≥50 mm 和 25~50 mm 降水站点

2010 年中国大陆出现的第一场持续 4 天的区域暴雨开始于 3 月 5 日. 在图 5 中, 区域暴雨(圆点)位于长江下游的沿江地区. 原始 850 hPa 流场上, 东北地区有一气旋, 气旋向西南方向延伸的槽线与江淮切变线联接在一起. 江淮切变线并不与沿江暴雨带位置一致. 江淮切变线的南北两侧分别是副热带高压和大陆高压. 在分解的扰动流场上, 沿江暖切变线与沿江暴雨带一致. 扰动流场切变线两侧气流呈对峙状态. 扰动切变线南侧的偏南气流在切变线附近形成明显的辐合, 暴雨就发生在扰动辐合线附近. 这样的扰动切变线或扰动辐合线在提前 4 天的逐日预报图中, 都是出现的. 但在提前第 5 天的预报扰动流场上, 切变线北移到淮河流域, 与暴雨带之间有了距离. 提前第 6 天, 预报的扰动切变线位置相对暴雨带更偏北了, 相差 500 km. 因此, 对这场持续性暴雨事件, 欧洲模式提前 4 天预报出了与暴雨带对应的扰动切变线.

4　主汛期暴雨

表 1 中, 2010 年长度和强度为第一位的是持续 11 天的暴雨事件, 它开始于 6 月 14 日. 图 6 是 6 月 16 日的暴雨(圆点)带与原始风场、扰动风场和提前各日预报的 6 月 16 日扰动风场. 原始 850 hPa 流场上, 沿江有一黄海高压与副高之间的切变线, 暴雨带位于江南地区, 暴雨带与切变线之间相差 400 km 以上. 在分解的扰动流场上, 黄海高压环流比原始流场上的高压环流更强, 范围更大, 东北风的范围影响到了东海地区. 一条扰动切变线正好位于江南, 并与江南暴雨带重合. 到提前第 10 天预报的扰动流场上, 这样的切变线位置一直位于江南地区, 也很好地指示了江南暴雨带. 因此, 对 6 月 16 日的江南雨带, 早在

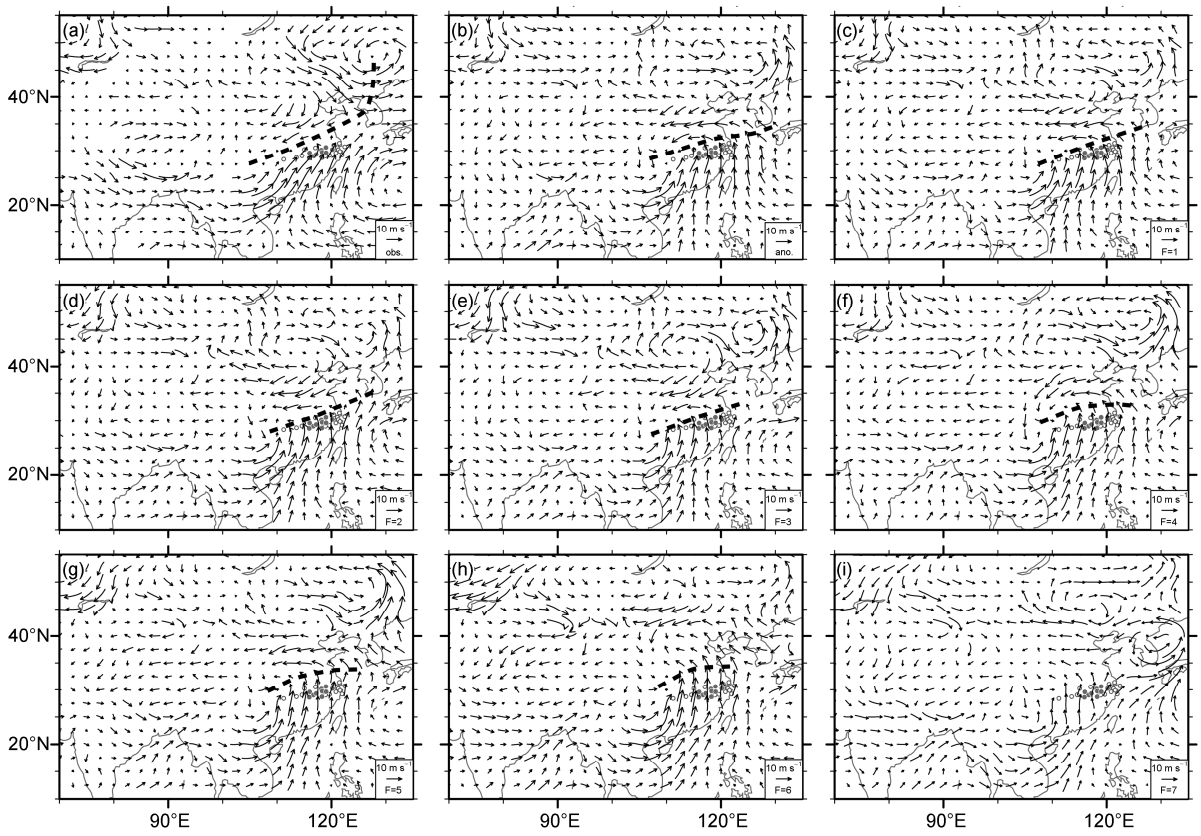

图 5　2010 年 3 月 5 日的 08 时 850 hPa 观测风场(a)、扰动风场(b)和提前 1~7 天预报((c)~(i))的 ECMWF 逐日天气尺度扰动风场预报

10 天前(6 月 7 日), 欧洲模式就提前预报出了与暴雨带有联系的扰动切变线. 然而, 提前第 7 天至第 10 天预报的一些扰动环流系统并不完全与原始观测的一致, 如黄海扰动高压环流明显偏弱. 我们也对欧洲模式预报的 6 月 16 日暴雨带强度和位置做了对比分析. 从提前第 2 天至提前第 10 天, 欧洲模式预报的暴雨强度偏弱, 位置偏北 100~300 km(图略).

在 6 月 14~24 日期间, 欧洲模式预报各日扰动切变线的提前时间有所不同. 最长的在 6 月 16 日和 19 日, 提前 10 天预报出了与暴雨带一致的扰动切变线. 最短的在 6 月 22 日, 只提前 4 天预报出了与暴雨带一致的扰动切变线. 它们成功预报扰动切变线的平均提前时间是 6.9 天. 这期间的扰动切变线活动于江南至华南之间, 华南扰动切变线只有 2 天. 对照欧洲模式提前各日预报暴雨带与实况暴雨带发现, 除了 6 月 20 日欧洲模式提前预报的暴雨带位置与实况暴雨带位置比较一致外, 其他 10 天各日预报的暴雨带位置都相比实况偏北和偏东, 强度也普遍偏弱.

表 1 中, 2010 年第 3 长时间的暴雨事件发生在海南. 10 月 1~19 日期间, 海南发生了两场暴雨事件. 这次海南的持续性暴雨为中心位于南海和中印半岛的热带低压向北延伸的倒槽环流引起. 对这些低压环流, 850 hPa 原始风场与扰动风场的结构相似. 海南的暴雨虽然时间很长, 但暴雨的区域范围在陆地的并不大, 扰动环流系统也不强. 欧洲模式预报的倒槽和低压系统对海南暴雨有指示意义的扰动流场, 提前时间只有 3.4 天.

我们关注 2010 年 7 月 8~14 日发生在江淮流域的, 在当年所有事件中持续时间排第 2 的区域持续暴雨事件. 7 月 8~10 日, 欧洲模式分别提前 7, 4 和 9 天预报出了对应暴雨带的江淮扰动切变线. 图 7 是 7 月 11 日的暴雨(圆点)带与观测风场、扰动风场和提前各日预报的 7 月 11 日扰动风场. 原始 850 hPa 流场上, 一个低压环流在黄海, 低压伸向西南方向的切变线在江淮流域, 与暴雨带位置基本一致. 同日的扰动流场上, 切变线沿长江, 与雨带对应. 扰动流场上,

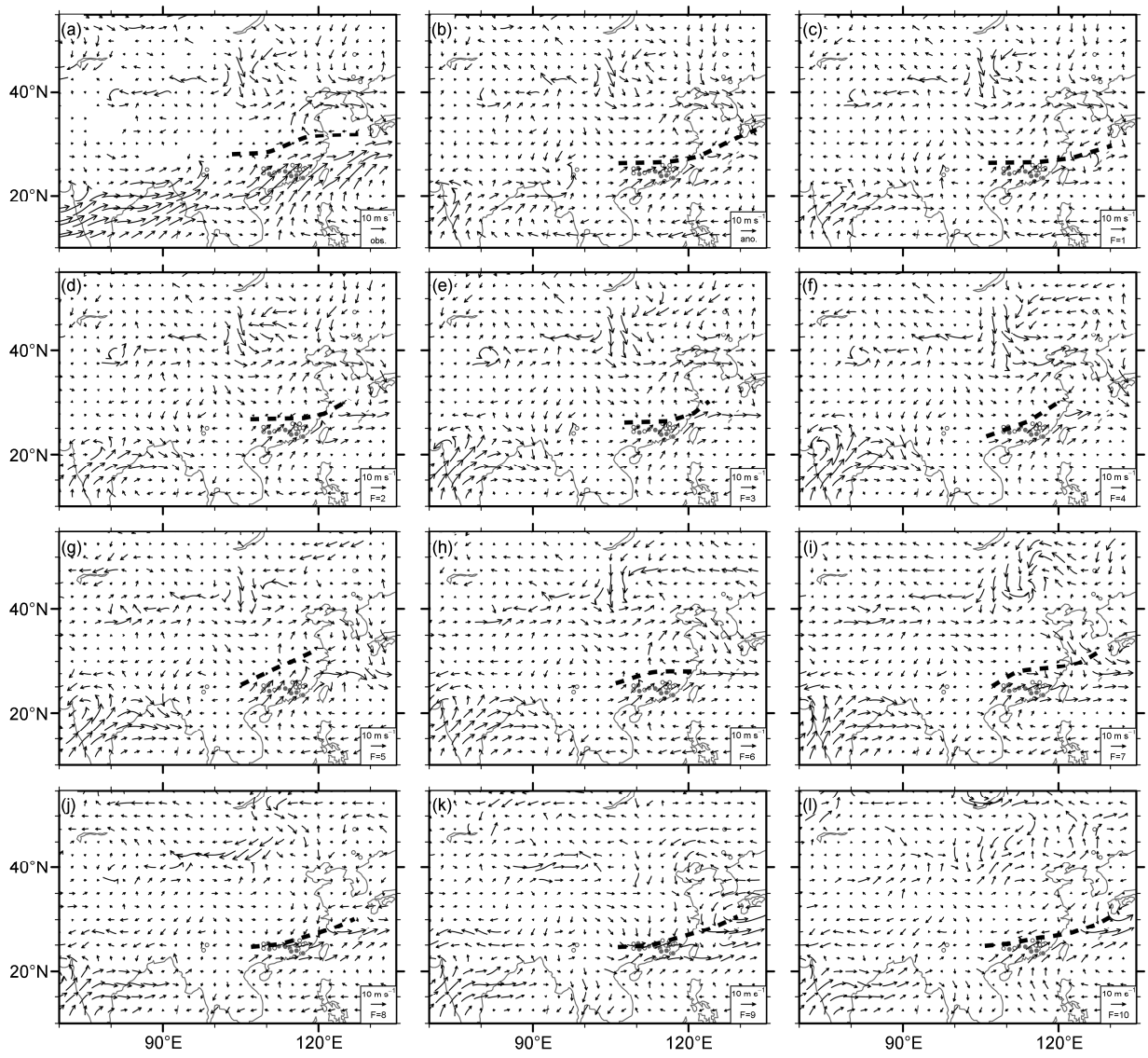

图 6　2010 年 6 月 16 日的 08 时 850 hPa 观测风场(a)、扰动风场(b)和提前 1~10 天预报((c)~(l))的 ECMWF 逐日天气尺度扰动风场预报

预报的切变线与雨带可对比到提前第 9 天. 提前第 6 天至第 9 天, 模式预报的暴雨带比实况降水偏北 200 km. 提前第 10 天, 扰动切变线位置预报在黄河流域, 而暴雨带在长江流域, 它们之间已经相差了 500 km 以上.

在 7 月 8~14 日期间, 欧洲模式提前预报时效最长的是在 7 月 10, 11 和 14 日, 提前 9 天预报出了与暴雨带对应的扰动切变线. 最短的在 7 月 9 日, 只提前 4 天预报出了与暴雨带位置一致的扰动切变线. 它们成功预报扰动切变线的平均提前时间是 7.5 天. 这期间, 扰动切变线主要位于江淮流域, 只有一天在黄淮流域. 欧洲模式 7 月 9 日提前第 3 天预报的暴雨带比实况偏北 50~100 km, 第 6 天偏北达到 200 km. 模式 7 月 10 日提前第 4 天预报的暴雨位置比实况偏东 300~400 km, 提前第 5 天和第 6 天偏北 150~400 km.

2010 年 8 月份, 东北地区南部先后在 4~5 日, 8~9 日, 19~22 日及 29 日, 发生了 4 场区域暴雨. 之前, 7 月 21 日在辽宁的新民站, 出现最大日雨量, 达到 187.6 mm. 7 月 28 日吉林大部及辽宁东北部出现了一次大范围的强降水过程[3], 前期的这几场暴雨事件,

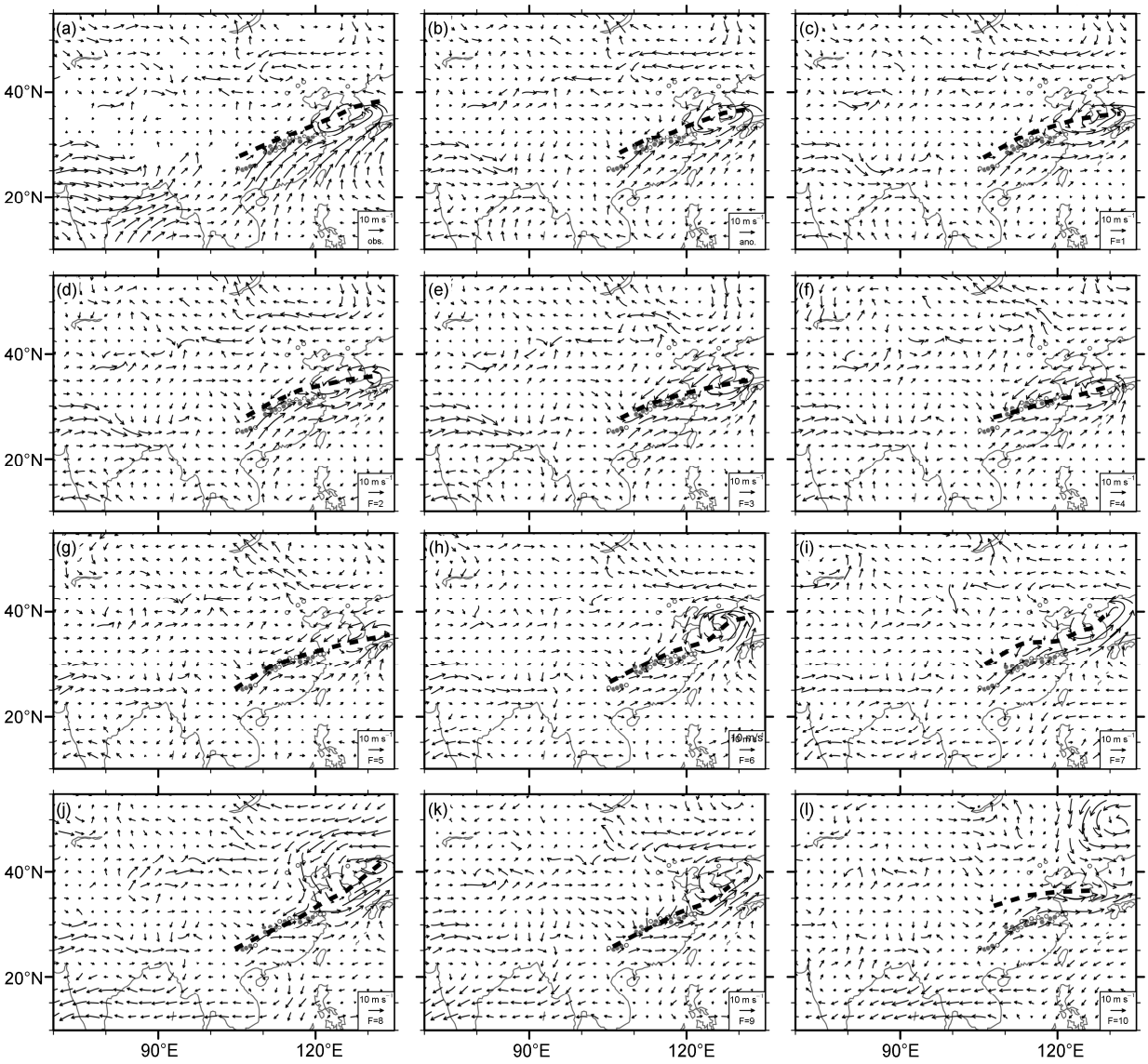

图 7　2010 年 7 月 11 日的 08 时 850 hPa 观测风场(a)、扰动风场(b)和提前 1~10 天预报((c)~(l))的 ECMWF 逐日天气尺度扰动风场预报

加重了后来区域暴雨发生时的灾情. 8 月 22 日, 辽宁的桓仁站最大日降水量达到了 166 mm. 图 8 是 2010 年 8 月 22 日的暴雨(圆点)带与原始风场、扰动风场和提前各日预报的 8 月 22 日扰动风场. 原始 850 hPa 流场上, 由环渤海西北侧伸向西南的辐合线与雨带位置一致, 雨带上最大的降水中心位于辽宁省. 扰动流场上, 辐合线与雨带也是对应的, 辽宁暴雨区的闭合低压环流结构更清楚. 到提前预报的第 7 天, 扰动环流特征和辐合线与雨带的关系, 特别是辽宁地区的暴雨与低压环流的联系都是对应的. 而在提前第 8 天和第 9 天, 扰动切变线(或扰动辐合线)的位置相对雨带北移了 300~500 km. 欧洲模式提前 7 天的环流系统预报对 8 月 22 日的区域暴雨落区有指示意义, 而后 2 天的预报已经失去了指示意义.

5　预报能力

2010 年中国暴雨的特点是, 平均持续时间长, 暴雨出现时间早, 分布地区广, 暴雨范围从流域尺度到局地尺度, 造成了严重灾害. 本文的目的是用 ECMWF

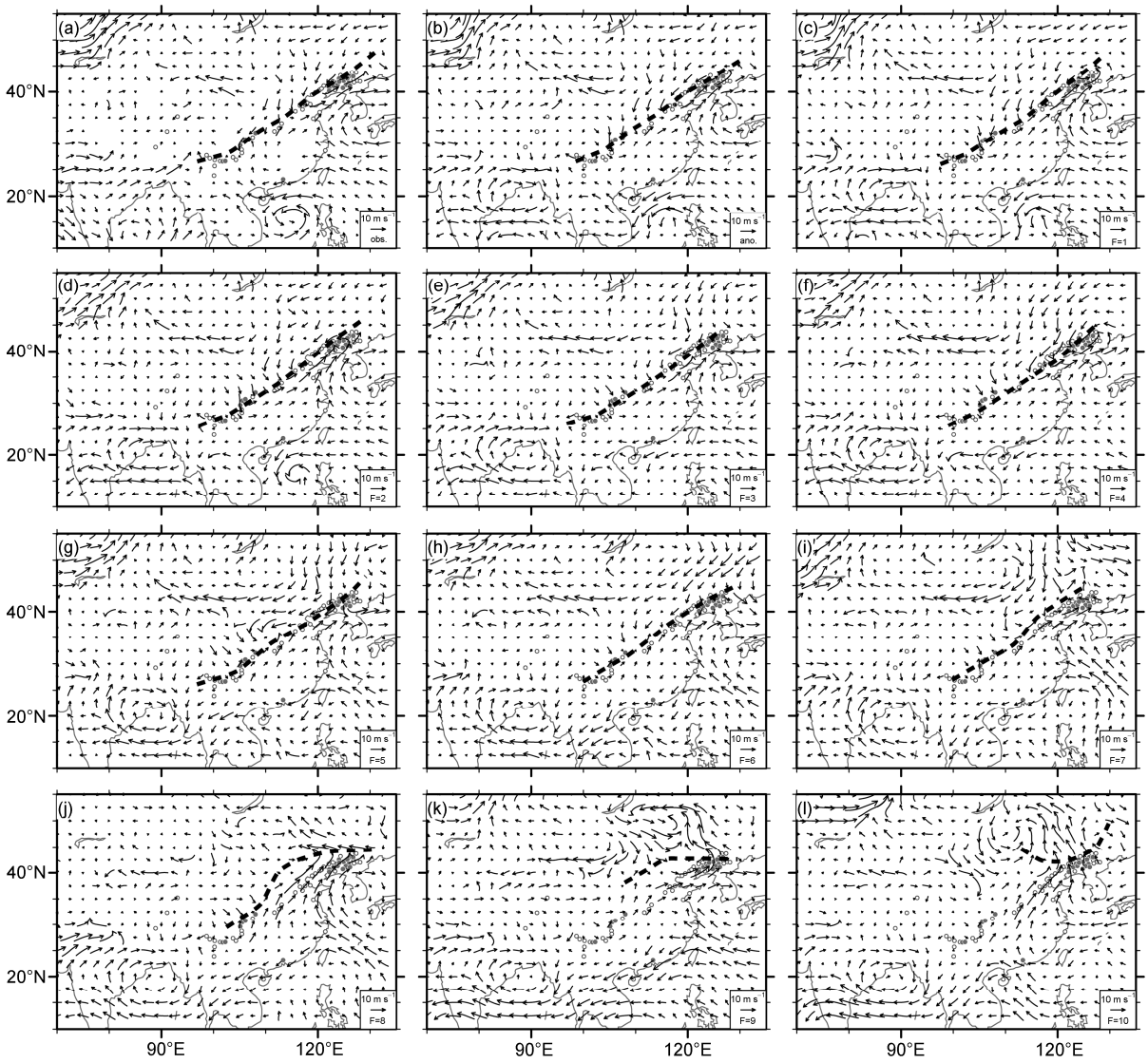

图 8　2010 年 8 月 22 日的 08 时 850 hPa 观测风场(a)、扰动风场(b)和提前 1~10 天预报((c)~(l))的 ECMWF 逐日天气尺度扰动风场预报

模式和美国 GFS 模式产品中的风做物理分解, 考察它们在 2010 年中国区域暴雨预报中的天气学解释应用. 我们分别考察了 2010 年 1~9 月期间中国东部大陆上发生的 34 个暴雨日所对应的扰动流场. 其中, 部分日次原始流场辐合线与暴雨带之间存在位置上的偏差, 而扰动流场辐合线对暴雨带的指示意义更清楚. 其原因是原始流场中包含了气候流场和纬圈平均的行星尺度扰动流场, 它们对区域暴雨没有指示意义[14]. 对 2010 年 10 月上－中旬的海南持续性暴雨, 我们分析了 2 次暴雨过程的环流系统, 扰动环流系统对海南暴雨有指示意义的提前时间只有 3.4 天.

表 2 给出的是 2010 年 1~9 月期间, 欧洲模式预报的 34 个日次 850 hPa 扰动辐合线与雨带对应的提前天数. 提前天数要求预报的扰动辐合线与暴雨带的距离差小于一个格距(250 km). 最早的区域性暴雨发生在年初的 1 月 21~22 日, 模式提前 3~6 天预报出了与暴雨有紧密联系的沿海西风槽扰动系统. 春季的 3 月 5~7 日, 模式提前 5~7 天预报出了与暴雨有紧密联系的江淮切变线. 进入初夏的 6 月 14~20 日, 模式提前 6~10 天预报了与暴雨带有紧密联系的江南切变线. 进入仲夏 7 月 11~15 日, 模式提前 7~9 天预报出了与暴雨有联系的江淮切变线. 模式对华南切变

表 2　2010 年 1~9 月期间欧洲模式预报出扰动辐合线(扰动系统)的提前天数和模式预报出暴雨带的提前天数

序号	月-日	辐合线形式	系统提前天数	暴雨提前天数	序号	月-日	辐合线形式	系统提前天数	暴雨提前天数
1	1-21	沿海西风槽	6		18	6-25	江南切变线	6	3
2	1-22	同上	3		19	7-8	江淮切变线	7	7
3	3-5	江淮切变线	5		20	7-9	同上	4	4
4	3-6	同上	6		21	7-10	黄淮切变线	9	3
5	3-7	同上	7		22	7-11	江淮切变线	9	4
6	3-8	江南切变线	7		23	7-12	同上	7	2
7	6-14	江南切变线	6	6	24	7-13	同上	8	2
8	6-15	同上	7	4	25	7-14	同上	9	1
9	6-16	同上	10	5	26	7-15	同上	7	0
10	6-17	同上	6	1	27	7-28	东北低涡切变线	7	6
11	6-18	同上	8	2	28	7-31	同上	7	3
12	6-19	同上	10	5	29	8-5	东北槽	6	0
13	6-20	同上	7	6	30	8-8	东北气旋	6	3
14	6-21	华南切变线	6	2	31	8-9	同上	6	0
15	6-22	同上	4	2	32	8-22	东北槽	7	4
16	6-23	江南切变线	7	1	33	9-21	华南台风	5	5
17	6-24	同上	6	2	34	9-22	同上	6	5

线、黄淮切变线、东北低涡切变线、东北槽、东北气旋和华南台风等, 也都能提前 4~9 天预报出与区域暴雨有联系的扰动系统. 在分析的这一时段 34 个日次中, ECMWF 模式最短提前 3 天, 最长提前 10 天, 可以预报出与暴雨对应的扰动辐合线, 平均提前时间为 6.7 天. 欧洲模式预报的 850 hPa 扰动流场辐合线提前 3, 6 和 9 天对暴雨带有指示能力的正确率分别是 100%, 85%和 15%.

欧洲模式直接预报暴雨带的提前天数也给出在表 2 中. 由于资料量大, 表 2 中只统计给出了 2010 年 6~9 月欧洲模式预报暴雨带的对应结果. 当模式提前某日预报的降水中心比实况暴雨平均降水量低 50 mm 或预报暴雨带位置比实况偏北达到 150~200 km 和以上时, 欧洲模式具有到上一日的暴雨带预报能力. 28 个日次中, 欧洲模式平均具有可提前 3.1 天的暴雨带预报能力.

在 NCEP 再分析 850 hPa 风场及其分解的扰动风场与区域暴雨关系的分析中[13], 2003~2010 年的 8 年期间区域暴雨有 772 日次, 其中 624 日次(81%)区域暴雨与扰动流场中的辐合线位置有明确的对应关系. 图 9 是 2010 年 8 月 22 日 08 时 850 hPa 原始风、扰动风和美国模式提前第 1~7 天预报的扰动风. 与图 8 比较, 欧洲模式能够提前 7 天预报出这一日次区域暴雨对应的扰动辐合线. 美国模式预报的扰动辐合线对环渤海地区的暴雨有提前 4 天的预示能力, 但对向西南延伸的区域暴雨只有提前 2 天的环流系统预示能力.

对表 2 中的 34 个日次暴雨, 我们也用美国模式预报的 850 hPa 风场做分解, 再与暴雨的关系做逐一分析, 得到的结果给出在表 3 中. 美国模式分解的扰动风有 10 个区域暴雨日次没有提前的预示信号, 提前有预示意义的天数从 1~10 天不等, 平均提前天数为 3 天. 美国模式预报的 850 hPa 扰动流场辐合线提前 3, 6 和 9 天对暴雨带有指示能力的正确率分别为 53%, 15%和 6%. 这里只是对欧美模式预报扰动辐合线的差异给出了简单的统计, 而产生差异的原因需要分析.

此外, 我们还给出了欧洲模式扰动风场对中国不同地区暴雨指示能力的比较. 在长江流域的 21 个暴雨日次中, 模式预报的扰动系统提前 3, 6 和 9 天对暴雨有指示能力的正确率分别为 100%, 90%和 19%. 在华南的 6 个暴雨日次中, 它们的正确率分别为 100%, 50%和 0. 在北方的 7 个暴雨日次中, 它们的正确率分别为 100%, 100%和 14%. 从这一简单的统计可得到一个初步的认识: 南方暴雨的扰动系统变化快, 模式的可预报时效会短于北方的扰动系统. 由于华南和北方参与的区域暴雨日次较少, 统计的指示能力还需要更多的暴雨日比较.

6　讨论与结论

(1) 大气边界层顶 850 hPa 风场中的气流辐合系

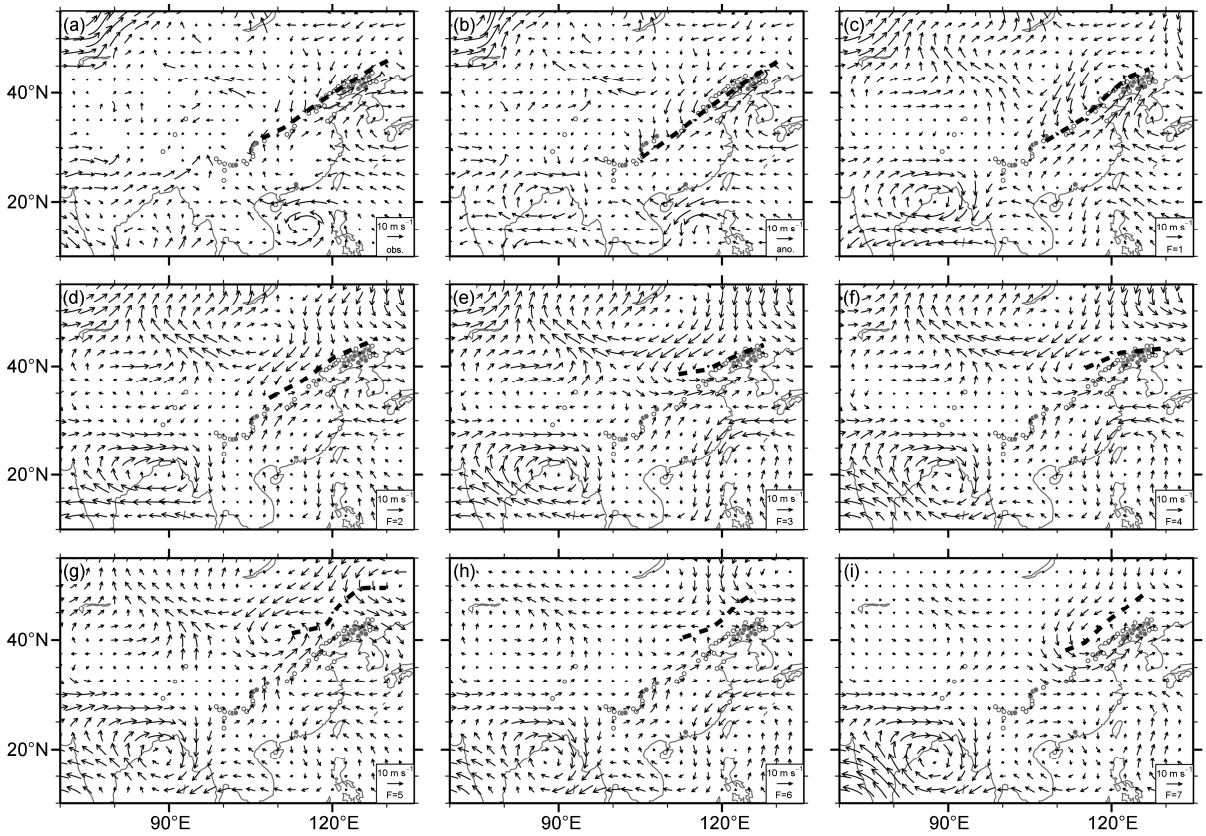

图 9　2010 年 8 月 22 日 08 时 850 hPa 观测风场(a)、天气扰动风场(b)和美国模式提前 1~7 天((c)~(i))的 ECMWF 逐日天气尺度扰动风场预报

表 3　2010 年 1~9 月期间美国模式提前预报出扰动辐合线和扰动系统的天数

序号	月-日	辐合线形式	提前天数	序号	月-日	辐合线形式	提前天数
1	1-21	沿海西风槽	5	18	6-25	江南切变线	5
2	1-22	同上	0	19	7-8	江淮切变线	5
3	3-5	江淮切变线	10	20	7-9	同上	6
4	3-6	同上	4	21	7-10	黄淮切变线	3
5	3-7	同上	8	22	7-11	江淮切变线	3
6	3-8	江南切变线	4	23	7-12	同上	2
7	6-14	江南切变线	0	24	7-13	同上	0
8	6-15	同上	0	25	7-14	同上	2
9	6-16	同上	0	26	7-15	同上	1
10	6-17	同上	0	27	7-28	东北低涡切变线	2
11	6-18	同上	0	28	7-31	同上	4
12	6-19	同上	0	29	8-5	东北槽	9
13	6-20	同上	4	30	8-8	东北气旋	8
14	6-21	华南切变线	1	31	8-9	同上	0
15	6-22	同上	0	32	8-22	东北槽	4
16	6-23	江南切变线	3	33	9-21	华南台风	1
17	6-24	同上	5	34	9-22	同上	3

统对区域暴雨预报有重要的指示意义, 但其中包含的气候部分并没有预报暴雨的意义, 与区域暴雨相联系的是那些天气尺度扰动环流系统中的对流性系统, 如扰动切变线上的中β尺度对流系统. 对中国大陆 2010 年发生的区域性暴雨事件, 只要有足够的水汽, 不同季节分解的扰动辐合线上, 多会出现暴雨,

没有季节差异. 因此, 暴雨预报需要从观测的或模式预报的风场中分离出天气尺度扰动风场. 扰动风场中的扰动系统, 如扰动切变线对雨带有较好的指示意义. 但天气尺度扰动系统只是可能产生暴雨的动力条件之一, 对大气热力稳定性条件和弱的切变条件还需要更多的例子总结.

(2) 在我国东部季风区中, 发生的雨带多与850 hPa上的扰动气流辐合线(扰动切变线)有密切的联系. 这些扰动切变线包括南北两个高压环流之间的华南扰动切变线、江南扰动切变线、江淮扰动切变线和黄淮扰动切变线等. 当有大陆扰动气旋(华南气旋、江淮气旋、黄河气旋和东北气旋)出现时, 扰动气旋西侧的冷切变线和扰动气旋东侧的暖切变线上也能出现区域暴雨. 此外, 大陆东部的扰动西风槽、西南地区的扰动西南倒槽、台风(热带低压)环流向北延伸的倒槽和热带-副热带地区的东风波等扰动切变线上也容易出现暴雨.

(3) 欧洲中期天气预报模式预报的环流形势中包含对区域暴雨有指示意义的信息. 从模式预报的环流场中去掉逐日气候流场部分和纬圈平均的行星尺度扰动流场部分, 则余留的天气尺度扰动流场中的扰动系统对区域暴雨落区的指示能力更强. 利用中期数值模式预报产品, 绘制瞬变扰动天气图会是短期和中期降水预报的有用方法. 分解后的观测扰动流场和模式预报扰动流场更有利于对大降水带出现时间和落区的诊断. 高时空高分辨率(如 1 h 与 0.25 和 0.10 经纬度)模式输出产品的物理分解预期会提高中β尺度对流系统的预报效果.

(4) 在目前得到的 1~10 天欧洲模式预报产品资料的分析中, 它能够提前 3, 6 和 9 天预报出与暴雨带对应的扰动辐合线的正确率分别是 100%, 85%和 15%. 欧洲模式预报的区域暴雨与实况区域暴雨对比, 平均提前有效时间为 3.1 天, 而模式预报产品分解的扰动系统指示区域暴雨的平均提前时间为 6.7 天. 作为后报问题, 即由已知的区域性暴雨事件去分析欧洲模式预报的结果, 扰动辐合线提前 5 天能够指示有暴雨发生的正确率达到 91%. 但作为预报问题, 即针对欧洲每天预报的 1~10 天产品输出中, 扰动流场辐合线对应的暴雨发生正确率还需要增加分析. 大量的后报问题分析可以为预报员提供有用的预报思路, 预报实践可以增加预报员的经验积累. 物理分解的扰动流场对暴雨落区的诊断和预报能力会随着中期数值模式水平的提高而得到提高.

(5) 美国 GFS 系统中 15 个模式的集合可提供 2 周内的逐日全球 2.5×2.5 经纬度的风场预报. 经过 2010 年 34 个区域暴雨日的对比, 结果认为欧洲中期模式预报产品对中国东部大陆区域暴雨的指示能力高于美国模式的指示能力. 初步的结果显示, 欧洲模式预报的扰动环流系统提前预示区域暴雨的平均时间为 6.7 天, 美国模式的平均时间为 3 天.

参考文献

1 王遵娅, 曾红玲, 高歌, 等. 2010 年中国气候概况. 气象, 2011, 37: 439–445
2 闵爱荣, 廖移山, 杨荆安. 2010 年 4~10 月我国主要暴雨天气过程简述. 暴雨灾害, 2011, 30: 90–96
3 王宝书, 张瑛. 2010 年 7 月 27~29 日吉林省大范围强降水过程分析. 暴雨灾害, 2011, 30: 36–43
4 曲晓波, 张涛, 刘鑫华, 等. 舟曲"8.8"特大山洪泥石流灾害气象成因分析. 气象, 2010, 36: 102–105
5 王晓芳, 徐明, 闵爱荣, 等. 2010 年 5 月我国南方持续性暴雨过程分析. 暴雨灾害, 2010, 29: 193–199
6 孔期. 2010 年 6 月大气环流和天气分析. 气象, 2010, 36: 120–125
7 赵伟. 2010 年 8 月大气环流和天气分析. 气象, 2010, 36: 109–114
8 沈洴英, 匡奕煜, 訾丽. 2010 年长江暴雨洪水成因及与 1998 年洪水比较. 人民长江, 2011, 42: 11–14
9 胡中明, 刘善亮, 胡洪泉, 等. TBB 和湿位涡在 2010 年主汛期吉林省最强暴雨天气中的应用分析. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40: 162–167
10 訾丽, 李春龙, 张方伟. 2010 年 6 月两湖水系暴雨预报与天气成因分析. 人民长江, 2011, 42: 32–34
11 Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. J Appl Meteoro, 1972, 11: 1203–1214
12 钱维宏. 天气尺度瞬变扰动的物理分解原理. 地球物理学报, 2012, 55: 1439–1448
13 钱维宏, 梁浩原. 行星尺度纬圈平均风扰动的传播与南北极涛动. 科学通报, 2012, 57: 1326–1333
14 钱维宏, 单晓龙, 朱亚芬. 天气尺度扰动流场对区域暴雨的指示能力. 地球物理学报, 2012, 55: 1513–1522
15 钱维宏. 气候变化与极端气候事件图集. 北京: 气象出版社, 2011