黄楚惠，郝丽萍，牛金龙，等. 2014. 基于 ECMWF 细网格模式产品的湿螺旋度在四川盆地强降水预报的应用试验. 气象，40(9)：1088-1096.

基于 ECMWF 细网格模式产品的湿螺旋度在四川盆地强降水预报的应用试验*

黄楚惠[1] 郝丽萍[1] 牛金龙[2] 张 平[1]

1 四川省气象台，成都 610072

2 成都市气象局，成都 610071

提 要： 利用欧洲中期数值预报中心(ECMWF)高分辨率预报场(0.25°×0.25°)资料以及四川省加密自动站降水量资料对2011 年汛期 7—9 月和 2012 年 5—7 月共计 20 例强降水个例进行湿螺旋度指标的统计分析，分别归纳总结出 6 和 24 h 内强降水发生发展及落区分布的判据指标。利用这些判据指标对 2012 年 8 月 30 日至 9 月 1 日及 9 月 8 日发生在四川盆地的两例强降水过程及 2013 年汛期 6—8 月暴雨个例进行检验并在汛期投入了业务预报工作。检验结果表明：低层 700 或 850 hPa 湿螺旋度正值区的分布对强降水落区分布指示较好；当强降水发生时，24 h 时效预报的 24～48 h 3 h 间隔预报场湿螺旋度数量值超过了指标值并持续了 2 个时次以上，达到了强降水发生的要求；零场预报的 0～24 h 及 12 h 时效预报的 12～36 h 间隔 3 h 预报场任一时刻湿螺旋度数量值达到了 6 h 指标判据值，对其后 6 h 的暴雨落区有较好的指示作用，可作为短时临近预报的业务参考；湿螺旋度订正预报暴雨发生的 TS 评分远高于 ECMWF 模式，预报效果好。

关键词： 细网格，湿螺旋度，强降水，指标

中图分类号： P456 **文献标志码：** A **doi：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.006

Moist Helicity Application Test for Severe Precipitation Forecast in Sichuan Basin Based on the Fine-Mesh Grid Model of ECMWF

HUANG Chuhui[1] HAO Liping[1] NIU Jinlong[2] ZHANG Ping[1]

1 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

2 Chengdu Meteorological Burean of Sichuan, Chengdu 610071

Abstract: Using high resolution prediction field (0.25°×0.25°) data of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the data of encrypted automatic stations of Sichuan Province, 20 cases of heavy rainfall indexes for moist helicity in flood season from July to September 2011 and May to July 2012 were analyzed by the statistical method, including the moist helicity indexes of the occurrence, development and falling area distribution of 6 h, 24 h severe precipitation. Two cases of severe precipitation process and all heavy rainfalls in Sichuan Basin during the 2013 flood season were checked out by using these criteria and put into the forecasting operation in the flood season. The results show that the distribution of 700 or 850 hPa moisture helicity can give good indicator to the distribution of rainfalls. When extremely heavy rainfall occurs, moist helicity values exceed the index values two times or more in the 24 h forecast, with 3 h interval forecasting field, meeting the requirments of severe precipitation occurrence. In zero field prediction of the 24 h forecast with 3 h interval forecasting field. The moist helicity number at

* 中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013Z04)、西南区域强降水预报创新团队和四川省气象局青年基金项目(2011-01)共同资助

2013 年 8 月 9 日收稿； 2014 年 6 月 18 日收修定稿

第一作者：黄楚惠，主要从事天气动力学诊断及预报研究工作. Email：huangchu267@sina.com

any time reaches the 6 h criterion value, which has instructive effect on subsequent 6 h rainfall area and can be used as a short-time nowcasting reference. TS score for corrected moist helicity is higher than ECMWF model and has a good forecast effect.

Key words: fine-mesh grid, moist helicity, severe precipitation, index

引　言

四川盆地处青藏高原东麓，地形十分复杂，其暴雨突发性强、时空分布不均匀，如何准确预报一直是相关科技工作者长期探索的科学难题，并在暴雨的发生发展机理、数值模拟及预报方法等方面取得了一些可喜的成果（陶诗言等，1980；四川省气象台，2011）。早期的工作多集中在暴雨天气系统的分析总结方面，其后多集中在不稳定理论的研究方面，近期研究主要集中在湿位涡、倾斜涡度发展和数值模拟分析等方面（陈静等，2002；肖洪郁等，2003；汪丽等，2007；缪强等，2009；王中等，2008；顾清源等，2008，2009；陈永仁等，2013；康岚等，2013）。在业务天气预报中如何采用新诊断量，如何有效地结合预报员经验和数值预报产品，稳步提高四川盆地暴雨的预报准确率是我们现在及以后关注的重点。螺旋度是表征流体旋转和沿旋转方向运动的动力特性的物理量（陆慧娟等，2003）。自 20 世纪 80 年代以来国内外气象学者对螺旋度进行了相关理论及数值模拟的研究（Lilly，1986a，1986b；Davies-Jones et al，1990；Brooks et al，1990；1993；Fei et al，2001；李岩瑛等，2012）。随着螺旋度的理论研究、数值模拟和观测资料分析的逐步深入，螺旋度逐渐成为引入天气分析特别是强降水分析预报中的一个重要物理量。陆慧娟等（2003）认为水平螺旋度反映了环境风场的变化对预报强天气走向及分布有指示意义，而垂直螺旋度在一定程度上反映了系统的维持、发展以及天气现象的剧烈程度。王淑静（1998）研究了垂直螺旋度的高低空耦合区与区域暴雨的关系。刘惠敏等（2009）利用 T106 数值预报产品，分别计算高、低空的 Z 螺旋度结合相对湿位涡、Q 矢量等物理量场，采用动态逐步回归统计方法预报未来 6 h 的降水面雨量，获得很好的效果。不少实际天气过程的个例诊断也表明螺旋度的分布与雨区配合较好（寿绍文等，1998；谭志华等，2000；王丽荣等，2006；尤红等，2007；黄楚惠等，2009；2010）。目前，螺旋度诊断用于强降水的研究多见于个例的诊断分析，而用于实际天气预报业务工作的比较少见。

本文从天气预报角度考虑常规的表征大气动力条件的物理量如涡度、散度和垂直速度，表征水汽条件的物理量如水汽通量及水汽通量散度等表现的特征单一化，且各物理量相互对应区并不一致，这样预报员在参考时耗费时间较多，对落区把握准确度不高。文中涉及的湿螺旋度诊断量将产生强降水的水汽和动力条件进行耦合能将更多的信息集中到一个变量上，为预报员确定强降水落区及走向节约了宝贵的时间，加深对强降水发生发展机制的认识，同时将归纳总结的判据和指标每天实时在省台会商图形显示系统展示，供市（州）局调阅，亦可为预报会商提供材料。因此采用新型的综合物理量诊断方法来研究四川盆地强降水过程是非常必要的，对于提高高原东侧地区的天气预报水平具有实际意义。

1　判据指标

1.1　湿螺旋度介绍

在上升运动 $\omega<0$ 的情况下，P 坐标系下 P-螺旋度计算公式为：

$$h=\omega\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{1}$$

钮学新等（2004）指出由于垂直速度是造成天气现象的直接原因，加之垂直涡度大的系统与强对流天气有密切联系，所以使用垂直螺旋度计算出来的湿螺旋散度对强降水有很好的指示作用。该文中湿螺旋度散度（F）计算公式为：

$$F=\omega\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial uq}{\partial x}+\frac{\partial vq}{\partial y}\right) \tag{2}$$

只考虑有上升运动 $\omega<0$ 以及正涡度 $\zeta>0$ 时的情况下，则当有水汽通量散度的辐合 $\nabla\cdot(\boldsymbol{V}q)<0$ 时，湿螺旋度为正值；反之当有水汽通量散度的辐散 $\nabla\cdot(\boldsymbol{V}q)>0$ 时，湿螺旋度为负值。本文采用欧洲中期数值预报中心（ECMWF）高分辨率预报场（0.25°×0.25°）计算的湿螺旋度，其单位为 10^{-11} Pa·s^{-3}。

1.2 判据指标的选取

研究表明，湿螺旋度对于强降水落区及走向具有较好的指示性（钮学新等，2004；王颖等 2007；雷正翠等，2006；黄楚惠等，2011）。因此根据式(2)，采用 ECMWF 细网格数据(0.25°×0.25°)以 20 时作为初值起报的 24 h 预报，计算每 3 h 间隔的湿螺旋度数量值分布。选取 2011 年汛期 7—9 月和 2012 年 5—7 月共计 20 个强降水个例进行统计分析（其中暴雨出现时间定为 20—20 时），将前述模式计算的 3 h 间隔湿螺旋度数量值分布中持续 2 个时次或以上的湿螺旋度正值区与 24 h 内暴雨或大暴雨落区对应进行统计，最后将 20 个个例得到的值取平均，得出 24 h 湿螺旋度指标阈值如表 1；对于 6 h 的指标值也是选取任一时刻湿螺旋度正值与其后 6 h 内降水分布相对应进行选取统计，最后再取平均值作为 6 h 产生大雨或暴雨的指标(表 1)。其中大雨、暴雨和大暴雨定义按照 GB/T28592-2012 的规定划分为 25.0～49.9、50～99.9 和 100～249.0 mm。

根据各指标阈值，划定了四川盆地 24 h 发生暴雨、大暴雨及 6 h 发生暴雨的湿螺旋度数量值判据(表 2)。

由 ECMWF 细网格模式湿螺旋度指标及判据分布(表 1 和表 2)可知：(1)700 hPa湿螺旋度数量值指标均大于 850 hPa 数量值指标。这是因为多数个例中，西南急流对水汽的输送常在700 hPa表现最强，故指标也最大。(2)700 和 850 hPa 湿螺旋度正值区大于 20×10^{-11} Pa·s^{-3} 的区域即有利于暴雨的发生，表明湿螺旋度对 24 h 内暴雨发生的指示意义较好。(3)以上指标值是 20 个个例的统计结果，从分析来看 700 或 850 hPa 湿螺旋度正值区的分布均与相应时段强降水落区、分布较为一致，表明湿螺旋度分布对于强降水的落区和走向确实具有较好的指示性。若湿螺旋度数量值在短时间内骤增，将有利于短时强降水的发生。本文分别选取两例发生在四川盆地的强降水过程利用上述湿螺旋度判据指标进行检验分析（区域性降水过程指盆地 5 个及以上地市分别有 1/4 县站达到暴雨及以上量级指标，未达到则为非区域降水过程）。

表 1 ECMWF 细网格模式初值场湿螺旋度数量值指标(单位：10^{-11} Pa·s^{-3})

Table 1 Moist helicity indexes of the fine-mesh grid model of ECMWF initial field (unit: 10^{-11} Pa·s^{-3})

时效	6 h		24 h		
雨量级别	大雨	暴雨	暴雨	大暴雨	最大值
700 hPa	140	180	20	150	300
850 hPa	120	150	20	140	200

表 2 ECMWF 细网格模式湿螺旋度数量值对应降水判据(单位：10^{-11} Pa·s^{-3})

Table 2 Moist helicity numbers of the fine-mesh grid model of ECMWF corresponding to precipitation criteria (unit: 10^{-11} Pa·s^{-3})

时效	6 h	24 h	
雨量级别	暴雨	暴雨	大暴雨
700 hPa	140～180	20～150	150～300
850 hPa	120～150	20～140	140～200

2 个例检验

2.1 2012 年 8 月 30 日至 9 月 1 日盆地区域性降水过程

选取 2012 年 8 月 31 日 20 时至 9 月 1 日 20 时降水时段进行分析，对比 24～48 h 的降水量预报场(图 1a)与实况降水(图 1b)，ECMWF 细网格模式对降水落区预报与实况落区基本吻合，但暴雨落区范围显著偏小，量级偏弱，强降水中心位置偏西位于广元中部，而实况强降水中心位于广元、巴中、南充，遂宁、广安五市的交界处及南部的宜宾、泸州、自贡、内江一带，预报场漏报了南部的强降水。以下通过湿螺旋度判据指标进行分析可以重新判定降水落区及强度。

8 月 30 日 20 时起报的 24～48 h 预报场中 700 和 850 hPa(图 2a～2e)湿螺旋度正值区呈东北—西南向带状分布，自西往东缓慢移动，大于 20×10^{-11} Pa·s^{-3} 的正值区域与暴雨落区基本一致，表明湿螺旋度对未来 48 h 内暴雨发生有较好的指示意义，其中心区始终维持在盆地北部到中部一带，这与大暴雨落区的分布有较好对应。此外，正值湿螺旋度大值分布在 700 hPa 要比 850 hPa 强，表明低空急流对水汽的输送在低层较强，这是强降水发生的有利条件。1 日 02 时(30 h，图略)，700 和 850 hPa 自陕甘一带有正值湿螺旋度下沿至盆地北部，到 1 日 11 时(39 h)，700 hPa 湿螺旋度正极值达到 480×10^{-11} Pa·s^{-3}(图 2a)，而 850 hPa 湿螺旋度极值也达到 400×10^{-11} Pa·s^{-3}(图 2d)，到 1 日 14 时(42 h，图

2b 和 2e)，700 hPa 湿螺旋度极值达 580×10^{-11} Pa·s^{-3}位于巴中以北，850 hPa 维持 400×10^{-11} Pa·s^{-3}，以上两时次较强的正值湿螺旋度维持，远远超过了前述大暴雨发生的指标，利于大暴雨或以上量级强降水的发生。1 日 17 时(45 h，图 2c)，700 hPa 湿螺旋度值迅速减弱为 240×10^{-11} Pa·s^{-3}，且 850 hPa(图略)降水落区已完全为负值，表明低层动力和水汽条件已经开始衰竭，降水也迅速减弱。

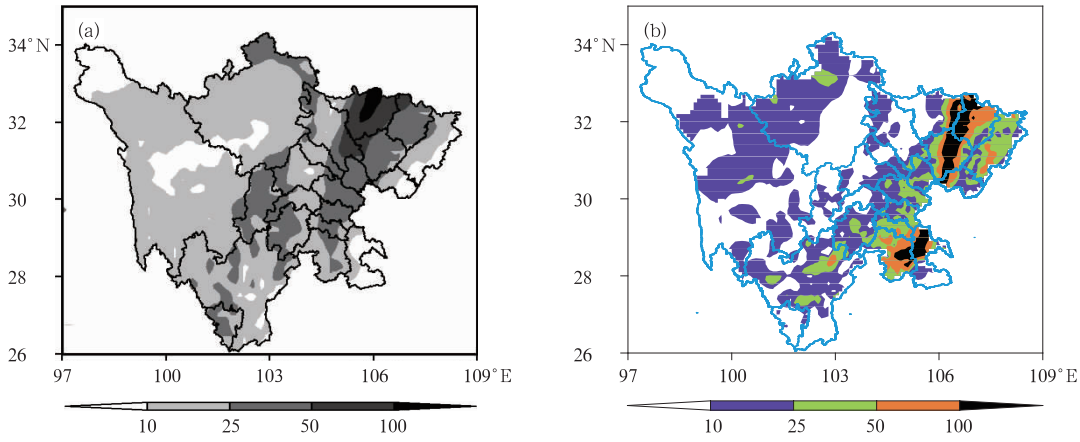


图 1　(a)2012 年 8 月 30 日 20 时起报 31 日 20 时至 9 月 1 日 20 时降水量和
(b)31 日 20 时至 9 月 1 日 20 时实况降水量(单位：mm)

Fig. 1　Precipitation for the period from 20:00 BT 31 August to 20:00 BT 1 September
(a) forecasted at 20:00 BT 30 August 2012 and the observed precipitation
for the corresponding period (b) (unit: mm)

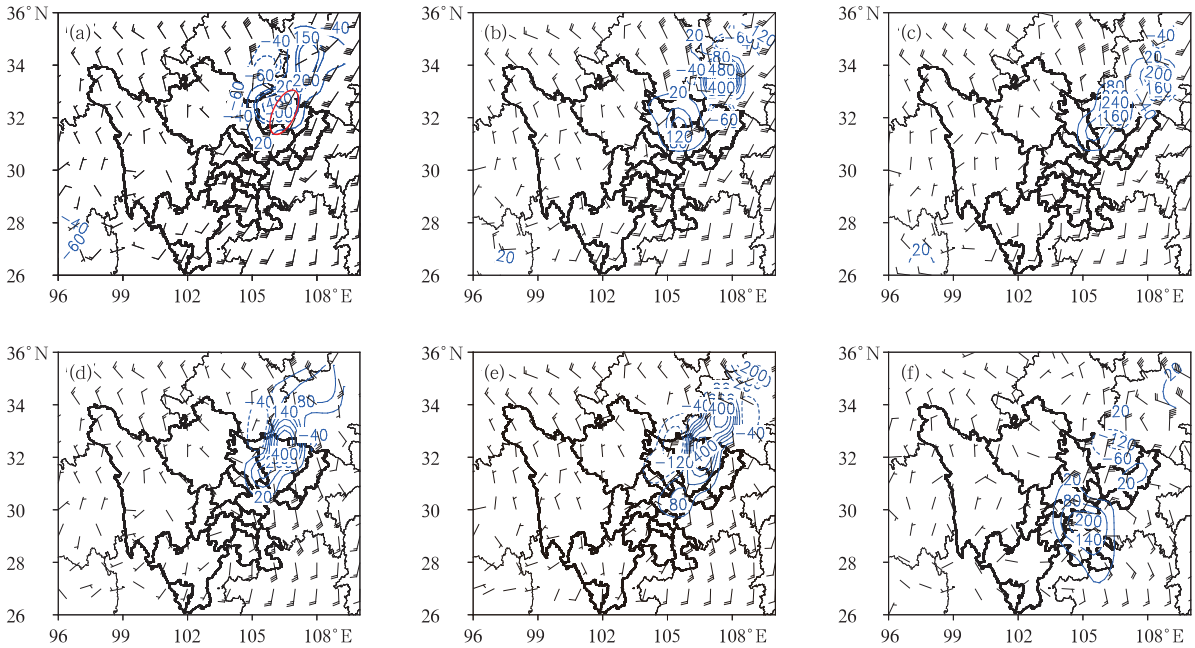


图 2　2012 年 8 月 30 日 20 时起报 9 月 1 日 700 hPa 11 时(a)、14 时(b)和 17 时(c)及
850 hPa 11 时(d)、14 时(e)和 20 时(f)风场(单位：m·s^{-1})和湿螺旋度分布
(等值线，单位：10^{-11} Pa·s^{-3}，椭圆为订正落区)

Fig. 2　Wind (unit: m·s^{-1}) and moist helicity (contour, unit: 10^{-11} Pa·s^{-3}) of 11:00 (a), 14:00 (b) and 17:00 (c) BT at 700 hPa and of 11:00 (d), 14:00 (e) and 20:00 (f) BT at 850 hPa forecasted at 20:00 BT 30 August 2012 (Ellipse is corrected falling zone)

盆地北部到中部降水时段主要集中在 1 日上午，到 1 日 17 时迅速减弱，此时宜宾、自贡一带有极值中心达 40×10^{-11} Pa·s^{-3}的湿螺旋度区产生，也达到了暴雨的指标（图略），至 1 日 20 时（48 h，图 2f）乐山到宜宾一带有湿螺旋度的迅速增加，其值达 200×10^{-11} Pa·s^{-3}，超过了大暴雨的湿螺旋度指标，配合风场辐合的位置，表明在该时段内有利于盆地南部强降水的发生。即盆地南部湿螺旋度正值区迅速增强，并超过了暴雨及大暴雨的指标，弥补了数值预报降水对盆地南部大暴雨中心漏报的不足，为盆地南部强降水发生提供了很好的预报参考效果。

此外，还可以利用 31 日 20 时起报的 24 h 间隔 3 h 的湿螺旋度分布图与其后 6 h 降水的关系为短临预报提供参考。从图 3a 和 3b 可知，1 日 08 时（12 h）及 11 时（15 h）预报场 700 hPa 的正值湿螺旋度大于 140×10^{-11} Pa·s^{-3}的区域和未来 6 h 即 1 日 08—14 时的暴雨落区（图 3a 和 3b 中阴影）对应较好，范围比雨区略宽，主要位于盆地北部到中部，大值区分别达到了 400×10^{-11} 和 300×10^{-11} Pa·s^{-3}，且大值区与大暴雨区对应较好。因此，3 h 间隔预报场的湿螺旋度可作为未来 6 h 强降水发生的短临参考指标。

通过对比 30 日 20 时起报的 24～48 h 时效预报场与 31 日 20 时起报的 0～24 h 时效内 3 h 间隔预报场同一时次 700 或 850 hPa 湿螺旋度分布可知：24～48 h 时效的 700 或 850 hPa 湿螺旋度正值分布要比 0～24 h 时效的降雨区偏西，也比实况降水落区偏西，如图 2a～2c 中 700 hPa 正值湿螺旋度区域包括了风场辐合区内偏北气流的区域，考虑到 8 月该模式对四川盆地降水落区预报总是偏西，则降水落区应该定在 700 hPa 风场辐合区的偏南风一侧，图 2a 中椭圆部分为重新划定的降水落区（仅标注盆地降水）。而图 3b 中正值湿螺旋度的分布区域与降水对应较好，表明 0～24 h 预报场比 24～48 h 预报场更接近实况。

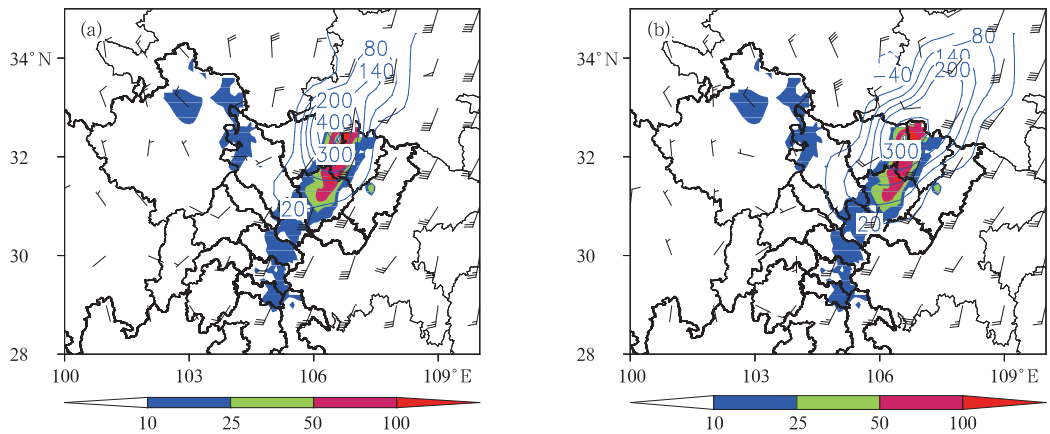


图 3 2012 年 8 月 31 日 20 时起报 9 月 1 日 08 时(a)、11 时(b)700 hPa 风场(单位：m·s^{-1})、湿螺旋度分布(等值线，单位：10^{-11} Pa·s^{-3})并叠加 1 日 08—14 时 6 h 降水(阴影，单位：mm)

Fig. 3 Wind (unit: m·s^{-1}) and moist helicity (contour, unit: 10^{-11} Pa·s^{-3}) over 700 hPa at 08:00 BT (a) and 11:00 BT (b) 1 September forecasted at 20:00 BT 31 August 2012, overlapped the 6 h precipitation during 8:00—14:00 BT 1 Spetember

由以上分析可知：该个例低层湿螺旋度大于 20×10^{-11} Pa·s^{-3}的区域对 24 h 暴雨发生的指示意义较好，弥补了数值预报降水对盆地南部大暴雨中心漏报的不足，为盆地南部强降水发生提供了很好的预报参考效果。20 时为初值的 0～24 h 内湿螺旋度 3 h 间隔分布图与相邻 6 h 降水分布有较好指示，可作为短临参考。当模式预报降水比实况偏西时应进行相应调整，降水落区可定在低层正值湿螺旋度带的风场辐合区的偏南风一侧。

2.2 2012 年 9 月 7—8 日盆地东北部降水过程（非区域降水过程）

由图 4 可知，ECWMF 模式 24 h 时效预报 24～48 h 降水落区较接近实况，但强降水量级较实况偏弱，达州北部和遂宁的大暴雨区均未报出（箭头所指），实况达州北部和遂宁大暴雨主要降雨时段在 8

日上午。下文中由湿螺旋度分布进行订正。

图 5 中，无论是 6 日 20 时起报或 7 日 08 时起报的 700 或 850 hPa 湿螺旋度正值大于 20×10^{-11} Pa·s^{-3}的分布区域均对暴雨的落区指示较好，且湿螺旋度大值中心始终位于巴中、达州的北部，与大暴雨区对应。存在显著差异的是 6 日 20 时起报的比 7 日 08 时起报的相应时次预报场湿螺旋度正极值要弱，6 日 20 时起报的 8 日 08 和 11 时(32 和 35 h，图 5a 和 5b)预报场中 700 hPa 极值中心分别为 60×10^{-11}和120×10^{-11} Pa·s^{-3}，正值湿螺旋度范围

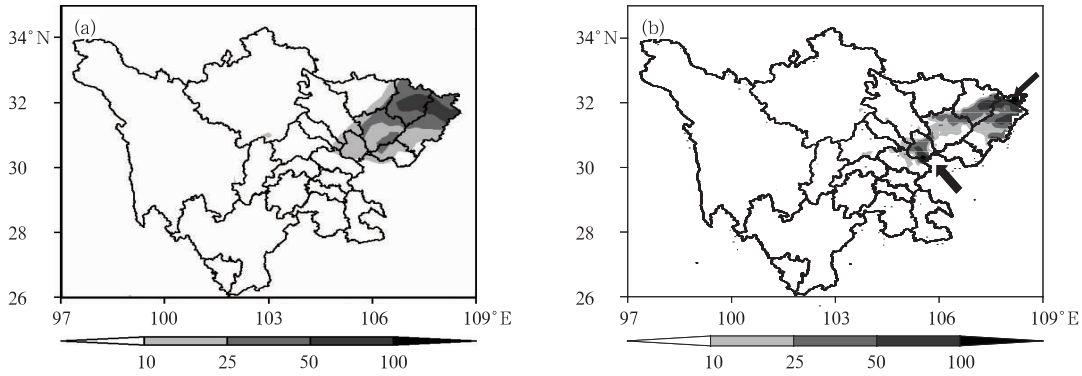


图 4　(a)2012 年 9 月 6 日 20 时起报 7 日 20 时至 8 日 20 时降水量和
(b)7 日 20 时至 8 日 20 时实况降水量(单位：mm)

Fig. 4　Precipitation from 20:00 BT 7 to 20:00 BT 8 September forecasted at 20:00 BT 6 September 2012 (a) and the observed precipitation in the same period (unit: mm)

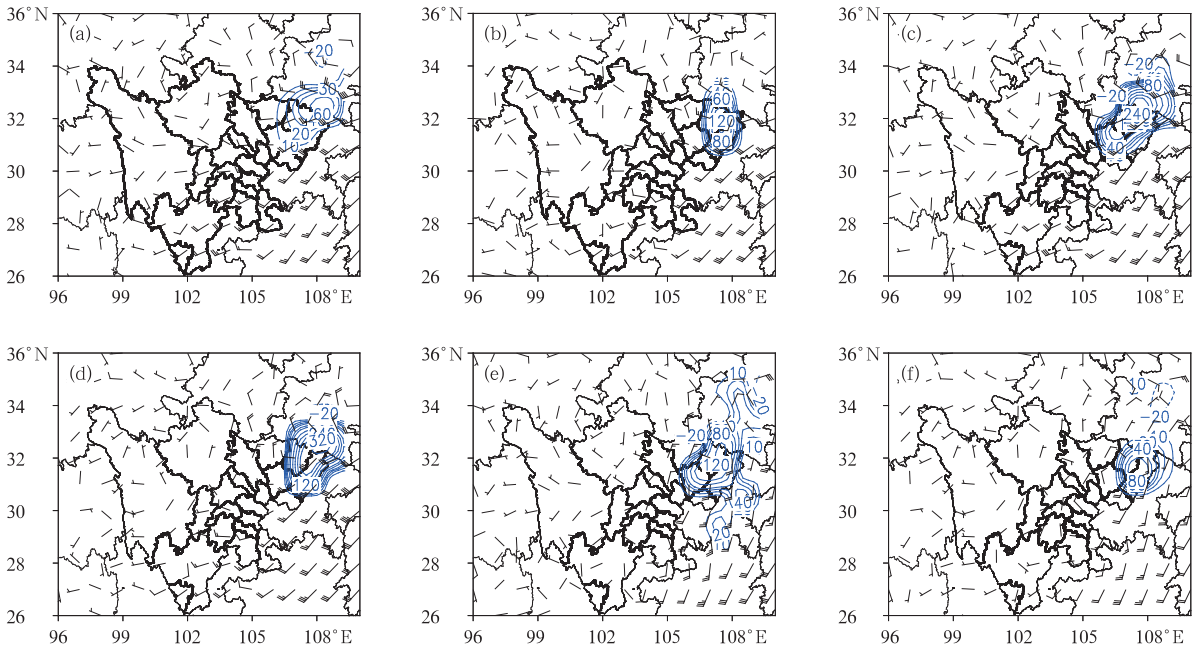


图 5　2012 年 9 月试验中不同时刻起报的风场(单位：m·s^{-1})和
湿螺旋度(等值线，单位：10^{-11} Pa·s^{-3})分布
(a)和(b)分别为 6 日 20 时起报 700 hPa 8 日 08 和 11 时结果，(c)和(d)分别为 7 日 08 时起报 700 hPa 8 日 08 和 11 时结果，(e)和(f)分别为 7 日 08 时起报 850 hPa 8 日 08 和 11 时结果

Fig. 5　Wind (unit: m·s^{-1}) and moist helicity (contour, unit: 10^{-11} Pa·s^{-3}) at 700 hPa at 08:00 BT (a) and 11:00 BT (b) 8 September forecasted at 20:00 BT 6 and the wind and moist helicity at 700 (c, d) and 850 hPa (e, f) at 08:00 BT and 11:00 BT 8 September forecasted at 08:00 BT 7 September 2012

较小，正极值中心仅 08 时位于达州北部，11 时南移，因此漏报了达州北部的大暴雨。而 7 日 08 时起报的 8 日 08 时(24 h)预报场中 700 hPa 湿螺旋度正极值达 240×10^{-11} Pa·s^{-3}(图 5c)，位于达州北部，850 hPa 也达到 120×10^{-11} Pa·s^{-3}(图 5e)。8 日 11 时(27 h)，湿螺旋度正值区东移北收并继续加强，700 hPa 正值达到了 320×10^{-11} Pa·s^{-3}(图 5d)位于达州和重庆两市北部，利于该时段内达州北部大暴雨的出现。但是，7 日 08 时起报的预报场对于遂宁大暴雨并未有明确体现，仅 08 时(24 h，图 5c 和 5e)湿螺旋度正值区伸展到了遂宁附近，距离遂宁大暴雨出现点仍然存在偏差，表明该物理量分布仍依赖于数值模式的预报准确率。

由以上分析可知：6 日 20 时及 7 日 08 时起报的相应预报时次中低层 700 或 850 hPa 湿螺旋度正值区的分布及数量值均达到了 6 h 及 24 h 暴雨发生的判据指标值，对暴雨落区均指示较好。7 日 08 时起报的 27 h 预报场正值湿螺旋度分布对达州北部大暴雨的预报参考性好，但对遂宁大暴雨无明显展示，表明 7 日 08 时起报的 3 h 间隔预报场亦可作为短临预报参考，该物理量一定程度上仍然依赖于数值模式的预报准确性。

2.3 应用检验及推广

目前，湿螺旋度诊断方法已于 2012 年汛期投入四川省气象台业务预报工作中，每天实时自动展示物理量图片，方便省、市(州)局预报员调用及制作会商材料。我们对 2013 年汛期 6—8 月发生在四川盆地的 12 次(其中区域性暴雨 6 次)强降水个例进行了检验，仅对 24 h 内出现暴雨进行评定。当 ECMWF 模式预报降水 3/5 以上市(州)出现暴雨即评为正确，未出现或未达 3/5 个市(州)即为漏报，若预报的 3/5 个市(州)非实况落区即为空报。由表 3 可知，根据前述暴雨发生时湿螺旋度阈值及落区订正后的湿螺旋度预报对于暴雨发生的 TS 评分达 69.2%，远高于 ECMWF 模式预报降水的 TS 评分。因此，该方法对于暴雨的发生有很好的预报效果。

表 3 降水预报评分(单位：%)

Table 3 Score evaluation of precipitation forecast (unit: %)

	正确次数	空报次数	漏报次数	TS
ECWMF 模式降水预报	5	1	7	38.5
湿螺旋度订正预报	9	1	3	69.2

此外，通过对多个例的研究分析发现，湿螺旋度分布除了能应用于四川盆地的强降水研究之外，还可应用于西南地区和我国别的省(区、市)。图 6 给出了 ECMWR 细网格模式预报场(初值为 25 日 20 时)计算的 2012 年 6 月 26 日 08 时 700 hPa 湿螺旋度和观测降雨量的对比。由图可知，700 hPa 湿螺旋度正值区的分布与降水落区较为一致，且暴雨中心也与湿螺旋度的正大值中心相对应。从图 7 的分布也可以看出，2012 年 7 月 12 日 20 时起报的湿螺旋度正值区的分布与我国长江流域的降水落区分布一致，且强降水中心值也与湿螺旋度正极值中心对应较好。因此，湿螺旋度不仅对四川盆地强降水指示较好，而且对西南地区及长江流域地区的强降水均有较好的指示性。可以尝试在这些地区进行推广或进行合作研究。

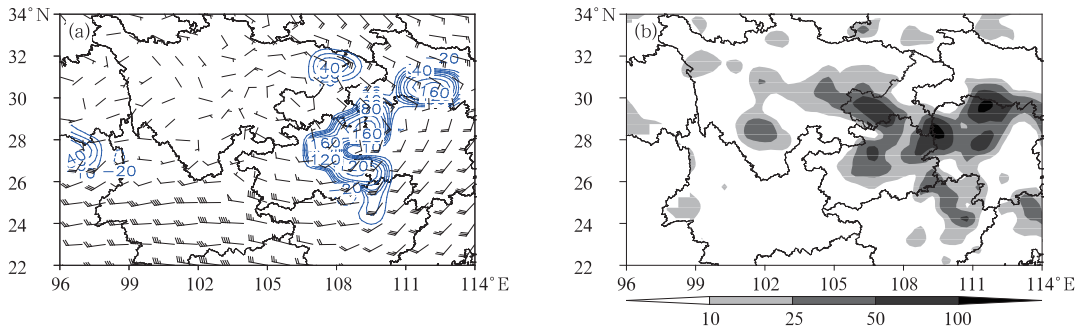


图 6 2012 年 6 月 25 日 20 时起报 26 日 08 时 700 hPa 风场(单位：m·s^{-1})和湿螺旋度(a，单位：10^{-11} Pa·s^{-3})及 26 日 08 时 24 h 降水量(b，单位：mm)

Fig. 6 Wind (unit: m·s^{-1}) and moist helicity (unit: 10^{-11} Pa·s^{-3}) at 700 hPa at 08:00 BT 26 June (a) forecasted at 20:00 BT 25 June and 24 h precipitation to 08:00 BT 26 June 2012 (b, unit: mm)

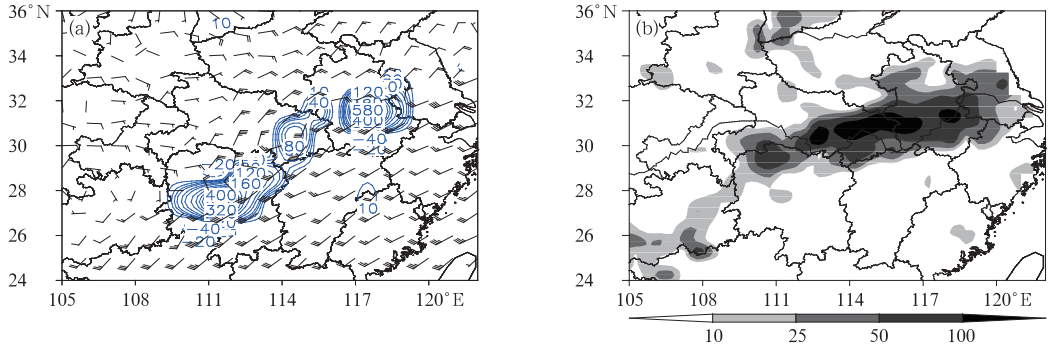


图 7　2012 年 7 月 12 日 20 时起报 14 日 08 时 ECWMF 模式 850 hPa 风场(单位：m·s^{-1})和湿螺旋度(a，单位：10^{-11} Pa·s^{-3})及 14 日 08 时 24 h 降水量(b，单位：mm)

Fig. 7　Wind (unit: m·s^{-1}) and moist helicity (unit: 10^{-11} Pa·s^{-3}) at 850 hPa at 08:00 BT 14 July (a) forecasted at 20:00 BT 12 July and 24 h precipitation to 08:00 BT 14 July 2012 (b, unit: mm)

3　结　论

(1) 对于两个个例，低层 700 或 850 hPa 湿螺旋度正值区的分布对强降水落区分布指示较好；当强降水发生时，24 h 时效预报的 24～48 h 3 h 间隔预报场湿螺旋度数量值超过了指标值并持续了 2 个时次以上，达到了强降水发生的要求。零场起报的 0～24 h 及 12 h 时效起报的 12～36 h 3 h 间隔预报场图片可作为短临参考。

(2) 对于模式预报降水场均比实况偏弱的情况下可以根据湿螺旋度的判据指标进行订正，更好地分析暴雨落区及大暴雨落区分布。

(3) 对于模式预报降水落区偏西的情况下可以通过分析低层湿螺旋度正值分布区域结合风场辐合的位置进行判定。通常，强降水带位于辐合区内偏南风气流一侧，而不是辐合区内偏北风气流一侧，从而对数值预报降水落区进行订正。

(4) 湿螺旋度等诊断量的研究已投入四川预报业务工作中，且湿螺旋度订正预报暴雨发生的 TS 评分远高于 ECMWF 模式，在实际预报中我们可以根据前述三点结论进行分析预报。应用该物理量研究四川盆地强降水的分析方法对于西南地区及我国其他地区的强降水也具有一定指示性，可考虑推广或合作研究。

本文仅对四川盆地强降水进行了研究，而对于川西高原及西南山地的强降水仍值得进一步的分析。针对汛期不同月份(5、6、9 和 10 月，7 和 8 月)及盆地强降水发生的短临指标(3、6 和 12 h)的选取应用还需总结。此外，结合能量、水汽及动力条件的综合物理量的开发仍待进一步研究。

参考文献

陈静，李川，谌贵珣. 2002. 低空急流在四川“9. 18”大暴雨中的触发作用. 气象，28(8)：24-29.

陈永仁，李跃清. 2013. “12. 7. 22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响. 气象，39(7)：848-860.

黄楚惠，顾清源，李国平，等. 2010. 一次高原低涡东移引发四川盆地暴雨的机制分析. 高原气象，29(4)：832-839.

黄楚惠，李国平. 2009. 基于螺旋度和非地转湿 Q 矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析. 高原气象，28(2)：319-326.

黄楚惠，李国平，牛金龙，等. 2011. 一次高原低涡东移引发四川盆地强降水的湿螺旋度分析. 高原气象，30(6)：1427-1434.

顾清源，肖递祥，黄楚惠，等. 2009. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用. 气象，35(4)：59-67.

顾清源，周春花，青泉，等. 2008. 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析. 气象，34(4)：39-47.

康岚，牛俊丽，徐琳娜，等 2013 台风对四川暴雨影响的环境场对比分析. 气象，39(4)：427-435.

雷正翠，任健，马镜娴，等. 2006. 一次江淮梅雨中的涡旋合并过程分析. 南京气象学院学报，29(3)：358-363.

李岩瑛，张强. 2012 水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用. 气象学报，70(1)：144-154.

刘惠敏，郑兰芝. 2009. 螺旋度诊断分析与短时强降水面雨量预报. 气象，28(10)：37-40.

陆慧娟，高守亭. 2003. 螺旋度及螺旋度方程的讨论. 气象学报，61(6)：684-691.

缪强，黄德刚，等. 2009. 多模式热动力耦合诊断系统与暴雨预报. 高原山地气象研究，29(4)：10-17.

钮学新，董加斌，杜惠良. 2004. 华东地区台风降水及造成异常降水机制的分析. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 上海：中国气象局上海台风研究所.

寿绍文，王祖锋. 1998. 1991 年 7 月上旬贵州地区暴雨过程物理机制

的诊断研究. 气象科学,18(3):231-238.

四川省气象台. 2011. 四川天气预报手册,90-125.

谭志华,杨晓霞. 2000. "99·8"山东特大暴雨的螺旋度分析. 气象,26(9):7-11.

陶诗言,等. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,33.

汪丽,青泉,谢娜,等. 2007. 2006 年川渝两次久旱转雨过程对比分析. 气象,33(4):53-57.

王丽荣,胡志群,匡顺四. 2006. 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度. 气象,32(4):45-51.

王淑静. 1998. 螺旋度与区域暴雨落区. 省地气象台短期预报岗位培训教材. 北京:气象出版社,121-123.

王颖,寿绍文,周军. 2007. 水汽螺旋度及其在一次江淮暴雨分析中的应用. 南京气象学院学报,30(1):101-106.

王中,白莹莹,等. 2008. 一次无地面冷空气触发的西南涡特大暴雨分析. 气象,34(12):63-71.

肖洪郁,郁淑华. 2003. 副高活动与四川暴雨. 四川气象,23(2):8-12.

尤红,姜丽萍,彭端,等. 2007. 2005 年 6 月广东特大暴雨垂直螺旋度分析. 气象,33(4):71-76.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2012. GB/T28592-2012 降水量等级. 北京:中国标准出版社.

Brooks H E, Dos well III C A. 1990. The effect of low-level hodograph curvature on supercell structure. Preprints, 16th Conf on severe local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada. Amer Meteor Soc, 34-39.

Brooks H E, Doswell III C A, Davies-Jones R P. 1993. Environmental helicity and the maintenance and evolution of low-level mesocyclones // The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys Monogr, No. 79, Amer Geophys Union, 97-104.

Davies-Jones R P, Burgess D W, Foster M. 1990. Test of helicity as tornado forecasting parameter. Preprint, 16th Conf on severe local storms. Kananaskis Park, AB, Canada. Amer Meteor Soc, 588-593.

Fei Shiqiang, Tan Zhemin. 2001. On the helicity dynamics of severe convective storms. Adv Atmos Sci, 18(1): 67-86.

Lilly D K. 1986a. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part Ⅰ: Energy exchange with the mean flow. J Atmos Sci, 43(2): 13-125.

Lilly D K. 1986b. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part Ⅱ: Helicity and storm stabilization. J Atmos Sci, 43(2): 126-140.