

林宝亭,陆秋霖,林确略,等,2020.一次玉林地区漏报的强双雨带影响的过程分析[J].气象,46(3):313-324. Lin B T, Lu Q L, Lin Q L, et al, 2020. Process analysis of a missing-forecast severe double rain belt in Yulin[J]. Meteor Mon, 46(3):313-324 (in Chinese).

一次玉林地区漏报的强双雨带影响的过程分析^{*}

林宝亭 陆秋霖 林确略 陈明璐 苏尉宣

广西玉林市气象局,玉林 537000

提 要: 暖区暴雨一直是业务预报难点,而双雨带中的暖区暴雨预报更是难以把握。2016年4月19日20时至20日20时出现了一次很强的双雨带过程,业务值班漏报了其对玉林地区的影响(漏报玉林南雨带的暴雨、大暴雨量级)。通过对数值预报产品、NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 全球客观分析资料、常规气象资料、雷达资料等进行剖析,找出漏报的原因,结果如下:预报的500 hPa槽距本地较远,925 hPa辐合线不明显、雨量偏小,导致漏报玉林南雨带的暴雨、大暴雨量级;忽略了与冷温槽相配合的冷平流使高空槽加深的作用;上下游台站都误认为冷空气已入海,忽略了高压脊后部地面回流形势对玉林的影响;没有仔细分析暴雨前CAPE值,忽略了玉林周围已具备“上干下湿”的有利降水条件,易触发暴雨;边界层能量锋的锋生利于对流不稳定气团的抬升;低空急流为南雨带提供了源源不断的水汽输送,水汽通量大值区和水汽辐合区都集中在玉林,水汽补给充足,导致玉林普降暴雨。

关键词: 双雨带,漏报,地面回流

中图分类号: P435, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.003

Process Analysis of a Missing-Forecast Severe Double Rain Belt in Yulin

LIN Baoting LU Qiulin LIN Quelue CHEN Minglu SU Weixuan

Yulin Meteorological Office of Guangxi, Yulin 537000

Abstract: The warm-area rainstorm has always been a difficult point in operational forecasting, and forecasting the rainstorm in the double rain belt is even more difficult. There was a severe double belt rainstorm from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20 April 2016, which was missing in forecasting. In order to provide lessons for future forecasts, based on the numerical forecast products, NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ global objective analysis data, conventional meteorological data, the severe double rain belt were analyzed. The results are as follows. The predicted 500 hPa trough was far from Yulin, the convergence line at 925 hPa was not obvious, and the rainfall was small. The effect of cooling trough in front of the south branch trough was neglected. The cold air was misjudged into the sea, and the effect of backflow on Yulin was ignored. The CAPE value was not analyzed in detail and it was not found that before the rainstorm Yulin had favorable dynamic conditions for “dry and wet”, which was easy to trigger rainstorm. The energy frontogenesis contributed to the rise of convective instability. The low-level jet provided a continuous flow of water vapor for the south rain belt and the large area of water vapor flux and the convergence area of water vapor are concentrated in Yulin, which is conducive to the occurrence and development of rainstorms.

Key words: double rain belt, missing-forecast, surface backflow

^{*} 国家自然科学基金项目(41765002)、中国气象局预报员专项(CMAYBY 2018-055)、广西自然科学基金重点项目(2017GXNSFDA198030)和广西气象局面上项目(桂气科 2019M17)共同资助

2018年9月4日收稿; 2019年8月20日收修定稿

第一作者:林宝亭,主要从事短期天气预报工作. Email:baoting86@163.com

引言

广西玉林位于我国华南的偏南一带,是全国汛期最早的市之一,前汛期暴雨不仅有锋面暴雨,还有锋前 200~300 km 的暖区暴雨(黄士松等,1986),每年春末夏初,玉林是暖区暴雨的频发地带,偶尔有双雨带发展,带来强降水,造成严重的城市内涝和山体滑坡,给人民生活生产带来极大不便。暖区暴雨具有突发性强、雨势猛的特点,一直是国内外学者研究的重点(伍志方等,2018;傅佩玲等,2018;王坚红等,2017;陈玥等,2016),国内气象专家们通过观测数据分析、理论原理探讨和数值模式模拟等多种手段对华南暴雨进行研究,并取得了大量的成果:林良勋(2006)指出,华南前汛期暖区暴雨容易出现在高温、高湿和不稳定的情况下,锋面在长江流域时,华南就容易出现暴雨,且暖区雨强大于锋面雨强;丁治英等(2008)发现,华南和江南地区常有双雨带出现,当江南的北雨带出现时,华南的南雨带出现的概率达 40%以上,北雨带主要与锋面和冷空气活动有关,南雨带主要为暖区暴雨。目前,对广西区域性暴雨的研究很多(赵华生等,2018;李向红等,2018;孔期和林建,2017;刘国忠等,2017),但对广西双雨带的研究较少。

2016 年 4 月 19 日 20 时至 20 日 20 时,华南、江南出现双雨带暴雨过程,南雨带位于广西桂中到桂南玉林一带,北雨带位于江南为锋面暴雨,但各级台站均漏报出现在玉林($21.4^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$ 、 $109.3^{\circ}\sim 110.5^{\circ}\text{E}$)的南雨带,属疑难暴雨过程。本文以此次双雨带过程为例,通过对欧洲中心数值预报(ECMWF)、中国气象局 GRAPES_Meso 集合预报、中国气象局 T639 集合预报、日本细网格数值预报(Japan)等数值预报产品、 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 NCEP 全球客观再分析资料、常规观测资料、多普勒雷达资料,分析本次漏报的原因,对本次漏报过程的认识和问题进一步归因,以期今后提高暴雨预报的准确率提供有益参考。

1 双雨带天气实况

2016 年 4 月 19 日 20 时至 20 日 20 时(图 1),

华南、江南出现双雨带暴雨过程,广西玉林受双雨带过程影响,在 35°N 以南有两条明显的雨带,一条位于湖北、安徽南部和江苏南部(简称为北雨带),一条位于广西的桂中到桂南玉林一带(简称为南雨带)。北雨带主要降水发生在江淮到桂北一带($29^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 121^{\circ}\text{E}$),强降水范围集中,中心雨量为暴雨量级,局地大暴雨;南雨带主要降水在桂中到桂南玉林一带($20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$),暴雨落区为广西桂中来宾到桂南玉林一带。19 日 20 时(图略),有零散的小雨分布在广西境内;20 日 02 时开始(图 1a),出现双雨带,北雨带位于湖北和安徽一带,雨量为 10~30 mm,呈东西向的带状分布,南雨带位于广西西南部到东北部,雨量为 20~60 mm,呈西南—东北向的带状分布;08—14 时(图 1b),是双雨带旺盛时期,南雨带东移,最大降水区为玉林,雨量为 40~80 mm;14 时后(图 1c),南雨带移到广东,对广西的降雨影响逐渐减弱,广西 2849 个自动站监测数据(图略)显示:南雨带中有 812 个站大雨(25~49.9 mm),369 个站暴雨(50~99.9 mm),12 个站大暴雨(100~249.9 mm),玉林本地暴雨率为 54.5%(209 个自动站中有 114 个站出现暴雨以上降水),其中最大降水位于博白龙潭镇(163 mm)。

2 预报过程回顾

图 2 是 2016 年 4 月 18 日 20 时起报的 ECMWF、GRAPES_Meso、T639、Japan 共四种数值预报 48 h 的降雨量(4 月 19 日 20 时至 20 日 20 时),ECMWF 预报模式(图 2a)只考虑了桂北和江淮一带暴雨、局部大暴雨,而桂东南玉林地区只报了 20 mm 的中雨;GRAPES_Meso 预报模式(图 2b)显示强降雨区(暴雨量级)位于山东、武汉到贵州,桂中南为 10 mm 以下的小雨量级;T639 预报模式(图 2c)显示华中区域到贵州一带为暴雨、局部大暴雨量级,桂中南为小雨量级;Japan 预报模式(图 2d)考虑华中一带为暴雨区,桂中南为小雨量级。四个模式预报中,ECMWF 和 T639 都较好地报出雨带西南端有另一个强降水中心,但落区有偏差;GRAPES_Meso 双雨带结构清晰,但位置偏北;Japan 模式雨带整体形势可以,但分辨率低,降水强度偏小。四种数值预报都只预报了江淮一带的强降雨区,漏报了广西南部

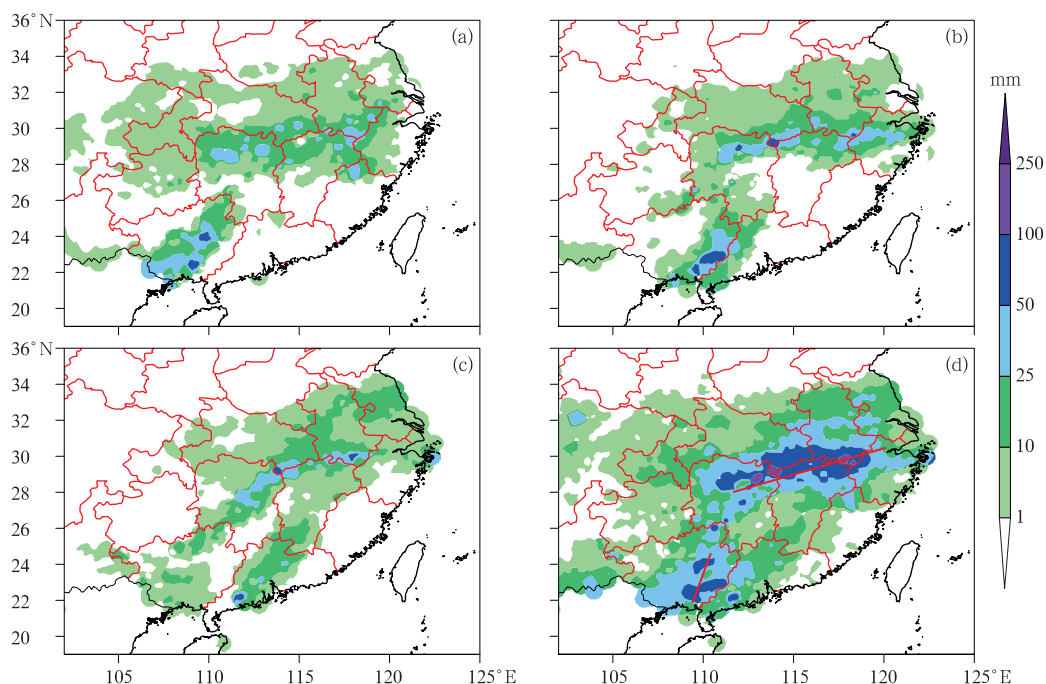


图1 2016年4月19—20日过程雨量实况

(a)20日02—08时,(b)20日08—14时,(c)20日14—20时,(d)19日20时至20日20时

(图1d中红色实线:南、北雨带中心位置)

Fig. 1 Observed rainfall in the process during 19—20 April 2016

(a) 02:00—08:00 BT 20, (b) 08:00—14:00 BT 20, (c) 14:00—20:00 BT 20, (d) from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20

(red solid line in Fig. 1d: center of rain belt)

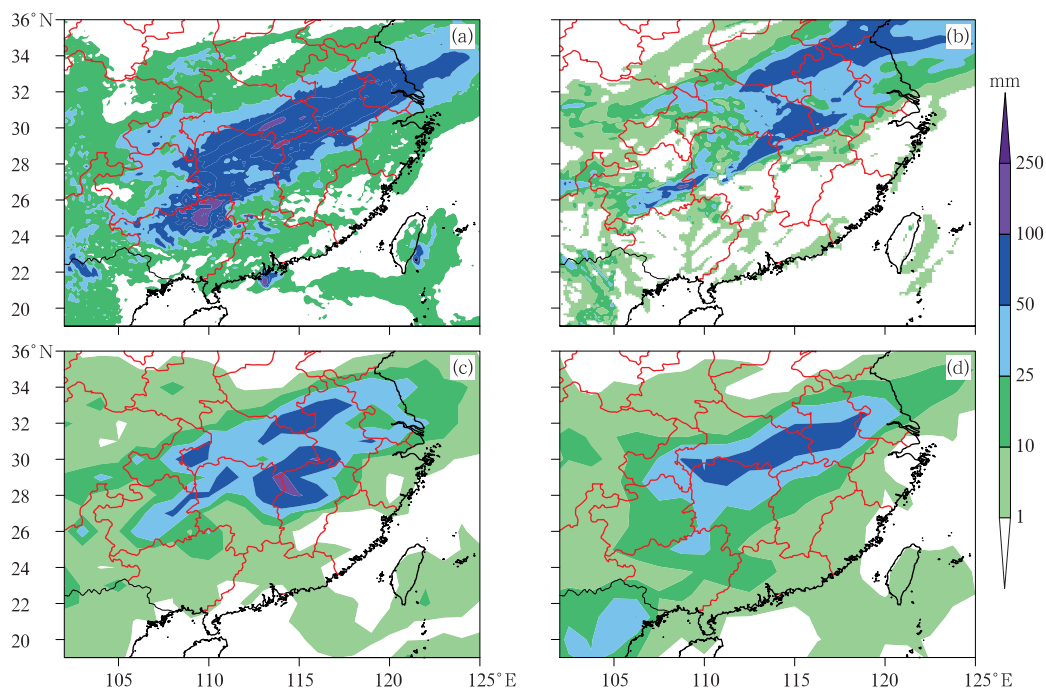


图2 2016年4月19日20时至20日20时(a)ECMWF,(b)GRAPES_Meso,(c)T639,(d)Japan模式雨量预报场

(18日20时起报48h预报)

Fig. 2 Precipitation forecast by (a) ECMWF, (b) GRAPES_Meso, (c) T639,

(d) Japan from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20 April 2016

(48 h forecast starts from 20:00 BT 18 April)

20 mm 以上的降雨。本次过程数值预报漏报的主要原因是由于地处高原下游,天气过程受青藏高原的影响显著,模式的预报难度大。就对高原的处理而言,ECMWF 模式最好,GRAPES_Meso 较差。

以 ECMWF 数值预报为代表,由 18 日 20 时起报的 24~36 h 的 500 hPa 和 850 hPa 预报形势场(图略)发现:4 月 19 日 20 时,高原槽位于四川中部,东移影响华中;南支槽位于云南东部,比较平滑,玉林受槽前西南气流控制,850 hPa 切变线位于贵州到湖南一带;4 月 20 日 08 时,高原槽东移到江西一带,将影响江淮一带,导致强降水天气出现,南支槽东移到云南中部,但玉林处于槽前西风区,距离槽比较远(超过 350 km),850 hPa 切变线位于广西与湖南交界,对玉林影响不大,因此考虑雨量不大。

预报员参考数值预报场得出的预报为桂北和安徽中部、江西中部、江苏南部考虑暴雨过程。玉林本站的预报为 19 日 20 时至 20 日 08 时,玉林雷阵雨;20 日 08—20 时,小到中雨。

3 天气过程实况

19 日 08 时(图略),高层 500 hPa 亚欧中高纬呈两槽一脊型,青藏高原以东的小槽异常活跃,不断分裂东移南下,西太平洋副热带高压呈东西带状分布,脊线位于 16°N 以南,位置偏南。20 日 08 时,位

于江淮一带的高原槽东移配合冷锋南下是江淮北雨带的主要影响系统,已预报准确;而四种数值预报都没有预报出华南的南雨带,尤其玉林(19 日 20 时至 20 日 20 时)只报了小到中雨,实况却出现了全市性的暴雨天气,最大降雨时段出现在 08—11 时,所以侧重分析南雨带的影响系统。通过分析南雨带发展旺盛时期(20 日 08 时)的形势场(图 3a)发现:南支槽已加深东移到广西西部,桂东南玉林处于高原槽前正涡度平流区,有利于其不稳定能量的释放;地面冷空气(图 3b)东移入海,没有新的强冷空气影响玉林,等压线呈南北走向,东高西低明显,玉林地面风向由北风已转为南风,玉林位于冷高压脊的后部。地面的偏南风与东南风相汇于玉林,地面有辐合线,玉林降雨明显,形成明显的南雨带。

4 南雨带漏报原因分析

4.1 ECMWF 的天气形势预报偏差

4.1.1 高空天气形势预报偏差原因

通过仔细分析双雨带期间的预报,发现南雨带过程漏报与数值预报漏报有关。以 ECMWF 数值预报为代表,分析数值预报漏报原因。预报员 19 日 15 时发布天气预报时,参考的是前一天(18 日)20 时的预报场。预报场显示 4 月 20 日 08 时(图 4),南

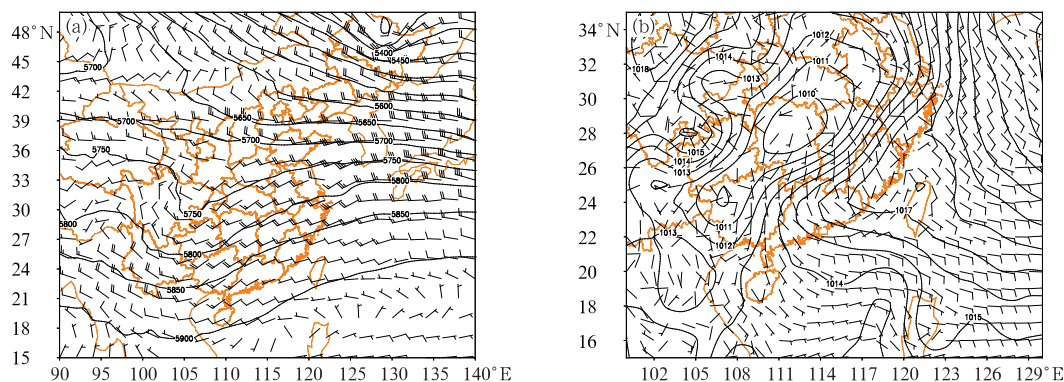


图 3 2016 年 4 月 20 日 08 时高空与地面形势场实况

(a) 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)和风场(风向杆,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

(b)海平面气压场(等值线,单位:hPa)和风场(风向杆,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Observed situation at 08:00 BT 20 April 2016

(a) 500 hPa height field (isoline, unit: gpm) and wind (wind barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(b) sea level pressure (isobar, unit: hPa) and wind (wind barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

支槽东移到云南中部,但处于槽前西风区的玉林距离槽比较远(>350 km),且此时预报的冷温槽位于缅甸境内(90°E 附近),考虑对南支槽影响不大。而20日08时实况,南支槽比预报更深,已快速东移到桂西,玉林位于槽前正涡度平流区,有利于其不稳定能量的释放,降雨明显;此时南支槽后的冷温槽比预报更加偏东,位于云南西部(100°E 附近),槽后冷平流明显,槽后西北风垂直于槽前西南风,呈 90° 角,与冷温槽相配合的冷平流使高空槽加深(覃靖等,2017),有利于玉林地区出现明显降雨,导致实况比预报的中雨雨量大了两个量级,最大达大暴雨量级。

4.1.2 低层预报场与实况对比

ECMWF 预报场显示,2016年4月19日20时(图略),925 hPa图上的切变线位于贵州中部到安徽一带,呈东北—西南向,桂西南和桂东南都为东南气流(东分量不明显),到20日08时(图5a),切变线缓慢南压到贵州—湖南一带,广西地区上空盛行偏南风,由两股气流组成,一股是位于桂西南的西南急流(南偏西分量非常小),来自北部湾地区,另一股位于玉林的东南急流(南偏东分量非常小),来自南海地区,且两股气流在广西地区无明显辐合现

象,而是与北方吹来的偏北干冷气流辐合于贵州到江淮地区,利于江南地区产生暴雨,因此,预报员在参考ECMWF预报时只重视了在江淮一带会产生暴雨天气,而没有考虑到会出现南雨带。而实际情况是:19日20时(图略),925 hPa图上,桂西南和玉林都为西南风,贵州中部到安徽一带有切变线;到了20日08时(图5b),切变线略南压,影响江淮地区,形成北雨带,玉林转为东南风,平均风力为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,桂东南的东南急流建立,与桂西南不断加大的西南急流形成辐合线相汇于玉林,触发当地不稳定能量释放,给玉林带来暴雨,形成南雨带。

对于玉林区域,在预报的南支槽不算太深、辐合线不明显、且雨量预报为中雨的情况下,预报员报了小到中雨,漏报了暴雨、局地大暴雨过程。

4.2 地面回流形势

仔细分析玉林双雨带过程的地面图发现,预报员漏报南雨带与对玉林地面的回流形势的认知度不够有关。回流暴雨是指前一股冷空气已变性东移出海,后一股冷空气未到华南,在变性冷高脊后部的辐合气流影响下产生的暖区暴雨(林良勋,2006)。研究此双雨带过程,发现地面回流形势明显。

4月18日08时(图6a),玉林受较强冷空气影响,冷锋压到海上,锋后玉林地面为北风,气温和气压明显下降。19日08时(图6b),冷高压逐渐东移入海,玉林处于冷高压脊后部,温度图显示(图略),福州(26°N 、 119.3°E)温度(17°C)和露点温度(12°C)比广州(23.1°N 、 113.3°E)温度(21°C)和露点温度(18°C)低,而处于西边的玉林(22.8°N 、 110°E)的温度(23°C)、露点温度(20°C)则比它们高,即 $T_{\text{福州}} < T_{\text{广州}} < T_{\text{玉林}}$, $T_{\text{d福州}} < T_{\text{d广州}} < T_{\text{d玉林}}$,说明有冷空气从东部(福建)向西部(广西)扩散,高压后部回流具有干冷空气性质,玉林地面风向由东北风转为东南风。19日20时(图6c),新一股冷空气已到达贵州北部,桂东南和桂西南的上空仍为东南风。20日02时(图7a),桂西南的钦州防城港开始由东南风转为西南风,与玉林的东南风汇合在桂西南,形成辐合线,强回波对应辐合线,呈飑线状位于桂西南、桂中(图7c),桂西南降雨明显,桂东南上空只有小部分回波,玉林雨量为 $2\sim 5\text{ mm}$ 。20日08时,冷锋南压到桂北(图6d),桂西南的辐合线东移到桂东南(图7b),强回波区也对应移到玉林(图7d),玉林普降暴雨($55\sim 80\text{ mm}$)。20日20时(图略),玉林上

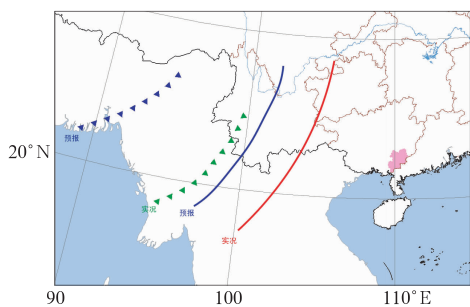


图4 2016年4月20日08时500 hPa
高度场预报与实况

(红色实线:实况高空槽;蓝色实线:预报的
高空槽;绿色三角间断线:实况温度槽;
蓝色三角间断线:预报的温度槽;
粉色区域:玉林)

Fig. 4 The 500 hPa height field forecast and
observation at 08:00 BT 20 April 2016
(red solid line: observed 500 hPa trough;
blue solid line: forecasted 500 hPa trough;
green triangle broken line: observed temperature
trough; blue triangle broken line: forecasted
temperature trough; pink area: Yulin)

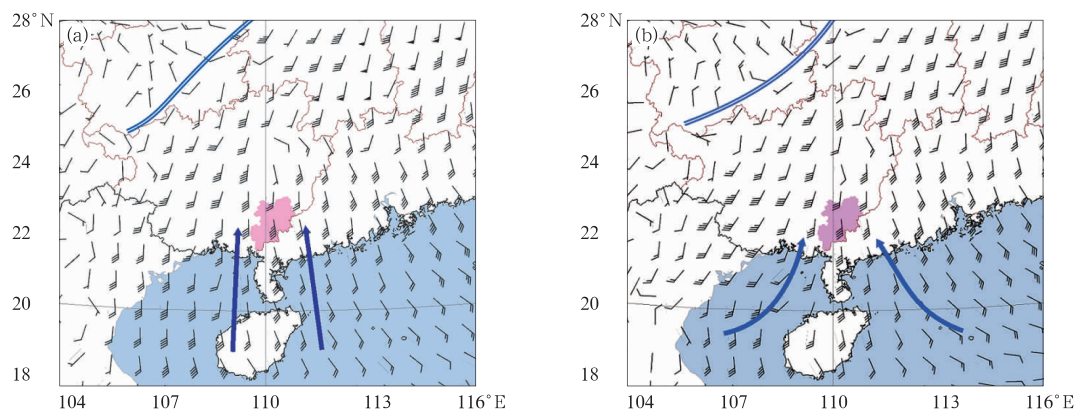


图 5 2016 年 4 月 20 日 08 时 925 hPa 风场 ECMWF 预报(a)与实况(b)

(深蓝色箭头表示急流,风向杆代表风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;粉色区域:玉林)

Fig. 5 The 925 hPa wind field forecast (a) and observation (b) at 08:00 BT 20 April 2016

(blue arrow: streamline; wind barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; pink area: Yulin)

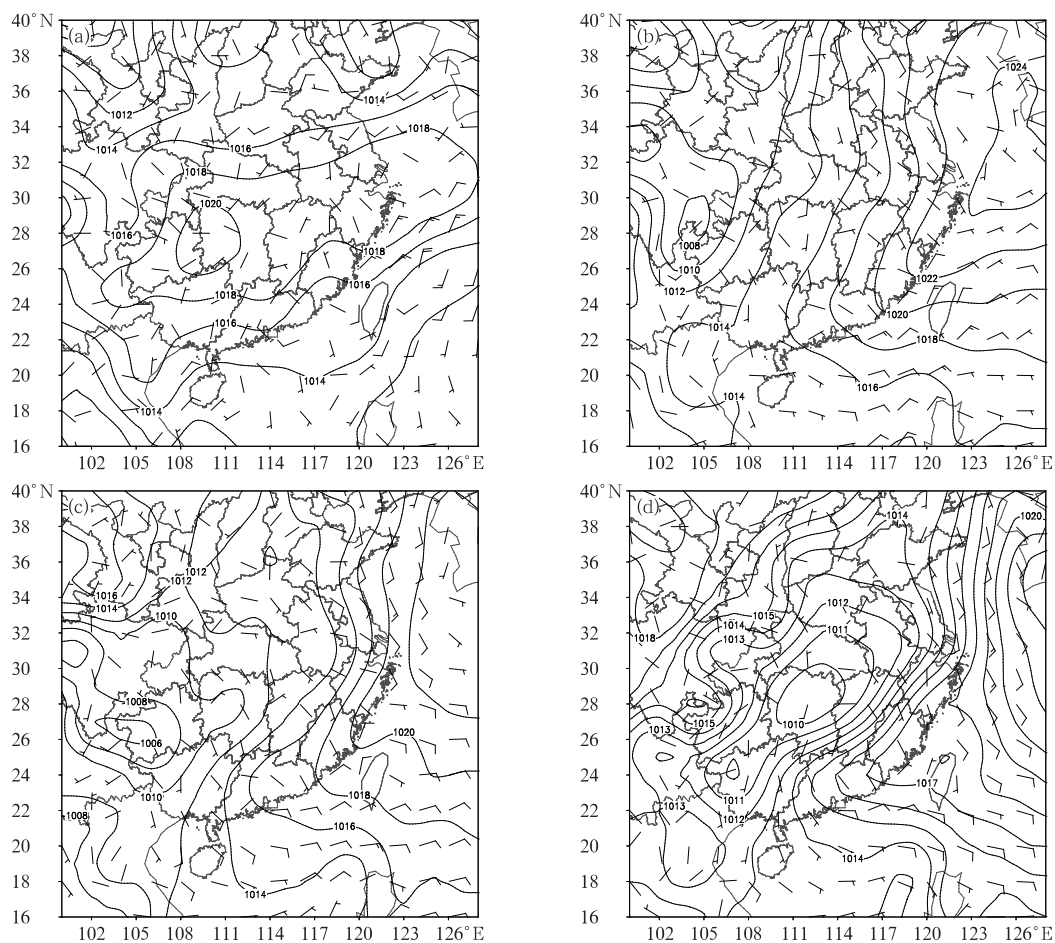


图 6 2016 年 4 月 18—20 日地面图实况

(a)18 日 08 时,(b)19 日 08 时,(c)19 日 20 时,(d)20 日 08 时

(等值线,单位:hPa;风向杆,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Observed situation from 18 to 20 April 2016

(a) 08:00 BT 18, (b) 08:00 BT 19, (c) 20:00 BT 19, (d) 08:00 BT 20

(isoline, unit: hPa; wind barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

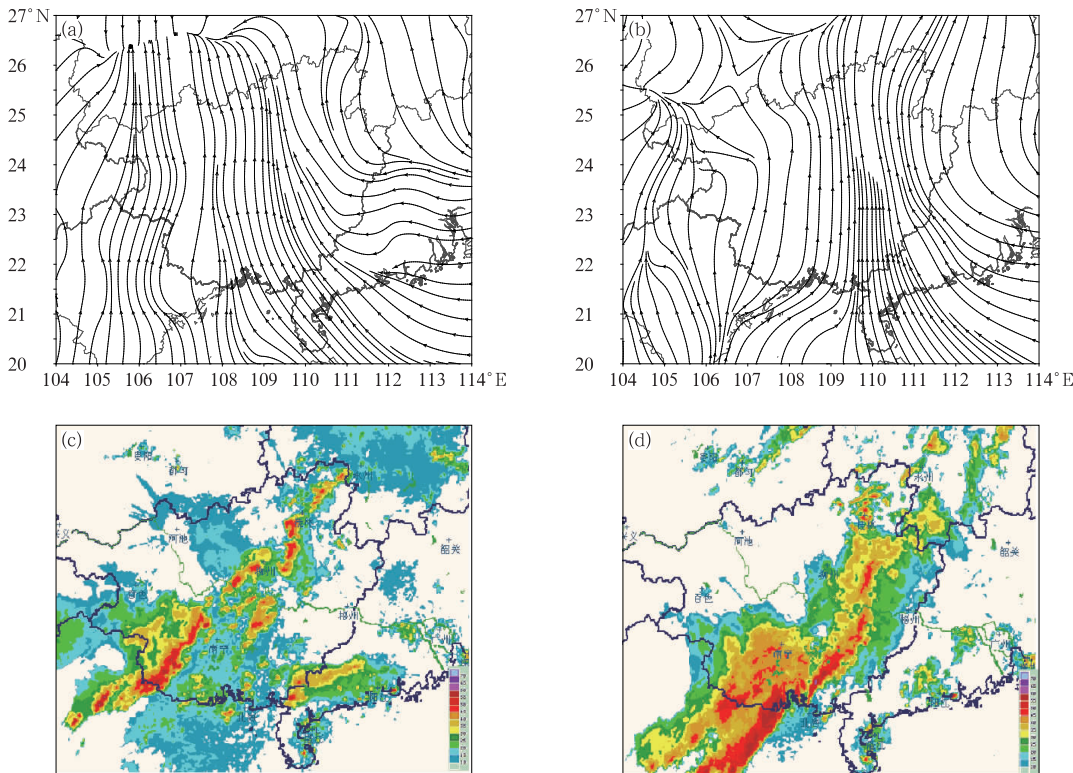


图 7 2016 年 4 月 20 日 02 时(a,c)和 08 时(b,d)地面流场实况(a,b,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
与雷达实况(c,d,单位: dBz)

Fig. 7 Surface streamline field (a, b, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and
observed radar reflectivity factor (c, d, unit: dBz)
at (a, c) 02:00 BT and (b, d) 08:00 BT 20 April 2016

空东南风减弱,辐合线消失,暴雨结束。19 日 15 时发布天气预报时,玉林位于高压脊后部的地面回流形势已明显,但上下游台站都误认为前一股冷空气已入海,只注重位于桂北的冷锋,忽略玉林回流的影响,从而漏报了南雨带过程。

通过分析此次南雨带的回流特点,以玉林区域($21.4^{\circ} \sim 23^{\circ}\text{N}$ 、 $109.3^{\circ} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$)为例,建立了回流形势指标模型(图 8):暴雨发生前 48 h,本区域受冷空气影响,且冷锋锋面南压至近海区域($19^{\circ} \sim 21^{\circ}\text{N}$ 、 $104^{\circ} \sim 114^{\circ}\text{E}$),暂无高空槽切变线影响,本站地面观测数据为北风;暴雨发生前 24 h,冷空气东移入海($20^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $130^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$),玉林位于高压后部,当 $T_{\text{福州}} < T_{\text{广州}} < T_{\text{玉林}}$, $T_{\text{d福州}} < T_{\text{d广州}} < T_{\text{d玉林}}$,说明高压后部回流有冷空气从东部(福建)向西部(广西)扩散,回流具有干冷空气性质,本站地面观测数据为东北风转东南风,高空槽位于云南中部($21^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $96^{\circ} \sim 100^{\circ}\text{E}$),第二股冷空气锋面位于河套地区($35^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ} \sim 110^{\circ}\text{E}$);暴雨当天,第二股冷空气锋面

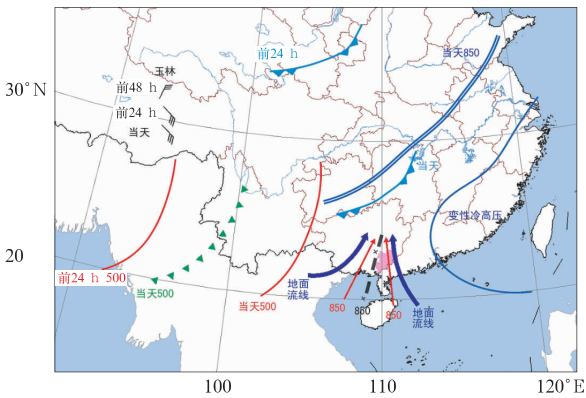


图 8 回流形势指标模型图
(红色实线:500 hPa 高空槽,绿色三角间断线:
500 hPa 温度槽,红色箭头线:850 hPa 急流,
黑色间断线:850 hPa 辐合线,带三角的蓝实线:
地面冷锋,蓝色双实线:850 hPa 切变线)
Fig. 8 Control parameters of the backflow index
(red solid line: 500 hPa trough, green triangle broken line:
500 hPa temperature trough, red arrow line:
850 hPa jet stream, black broken line: 850 hPa
convergence line, blue triangle line: surface cold front,
double blue solid line: 850 hPa shear line)

位于桂北与湖南交界($26^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$),高空槽东移到桂黔交界($21^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$),850 hPa 切变线位于江淮到湖南南部,850 hPa 有风向辐合位于玉林,对应地面场玉林有东南风与西南风的辐合线。当形势场符合指标时,可考虑玉林会出现暖区南雨带,并且通过 2016“4·30”、2017“3·19”等近三年共 7 个玉林双雨带个例的验证,是预报着眼点之一。

4.3 不稳定能量分析

探空图能很好地表征本区域是否具有高温高湿不稳定能量存在(张楠等,2018;祁海霞等,2017)。此过程,预报员没有仔细分析暴雨前的实况探空资料,忽略了玉林的不稳定能量的聚集。现侧重分析 2016 年 4 月 19 日 08 时(暴雨发生前 24 h,当天 15 时发布预报时能看到)及暴雨前(19 日 20 时)和旺盛时期(20 日 08 时)的探空资料,以期找出漏报南雨带的机理,避免同类漏报发生。因为玉林没有探空站,以玉林距离最近的北海站为南雨带的代表站。19 日 08 时(图 9a),北海站的对流有效位能(CAPE)比较小,对流自由高度(LFC)比较高(达 618.2 hPa),但低层 1000~700 hPa 是湿层,高层 600~400 hPa 是干层,0~6 km 强风切变达 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,低层为东南风,顺转为高层西南风,这种“上干下湿”的形势配合强风切变,具备形成强降水的有利条件。20 时(图 9b),北海站 CAPE 值增大达 $2359.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,LFC 下降到 846 hPa,垂直风切变达 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,700~400 hPa 为干层,700 hPa 以下为深

厚湿层,变得有利于降水产生。20 日 08 时(图 9c),北海站 CAPE 值继续增大(为 $2577.1\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$),LFC 下降为 977 hPa,垂直风切变达 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,干层上升到 500~300 hPa,低层水汽扩大范围到中层,即 1000~500 hPa 都为湿层,更有利于激发对流不稳定能量。由此可得,从暴雨发生前 24 h 到暴雨发生时,CAPE 值由小不断增大到 $2000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,LFC 不断下降至 900 hPa 以下,600 hPa 以上为干层并不断向高层扩大,700 hPa 以下维持深厚湿层,高温高湿条件配合明显的强风切变,有利于不稳定能量的聚集,导致南雨带形成。此过程,预报员没有仔细分析暴雨前的不稳定能量,忽略了玉林周围的不稳定能量的聚集,从而导致南雨带漏报。

仔细分析北海探空站的风场(图 10),进一步证明有回流存在,当暴雨发生前 48 h(18 日 08 时),受前一股冷空气影响,北海低层 1000~850 hPa 为偏北风,当暴雨发生前 24 h(19 日 08 时),北海站低层转为南风,形成回流过程,到 19 日 20 时低层南风逐渐加大,且高低空垂直强风切变达 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对流不稳定,利于产生暴雨。

进一步分析 19 日 20 时与 20 日 08 时的 CAPE 值分布图(图 11)可得,暴雨发生前(19 日 20 时),CAPE 大值区集中在桂南一带,暴雨发生时(20 日 08 时)桂南区域 CAPE 值达 $900\sim 1200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,玉林区域($21.4^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$ 、 $109.3^{\circ}\sim 110.5^{\circ}\text{E}$)CAPE 值由 $900\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升到 $1500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,有利于不稳定能量的维持,触发南雨带。

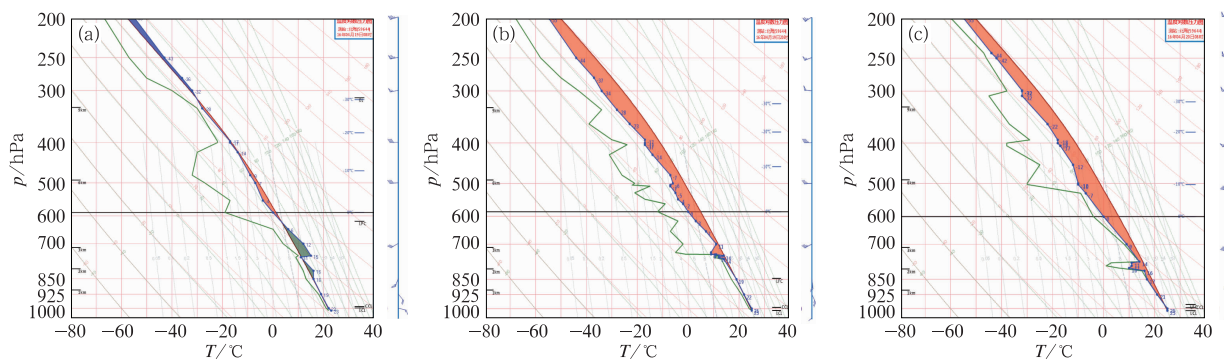


图 9 2016 年 4 月 19 日 08 时(a),19 日 20 时(b)和 20 日 08 时(c)北海实况探空图

Fig. 9 The T-log p diagram of Beihai at 08:00 BT 19 (a), 20:00 BT 19 (b) and 08:00 BT 20 (c) April 2016

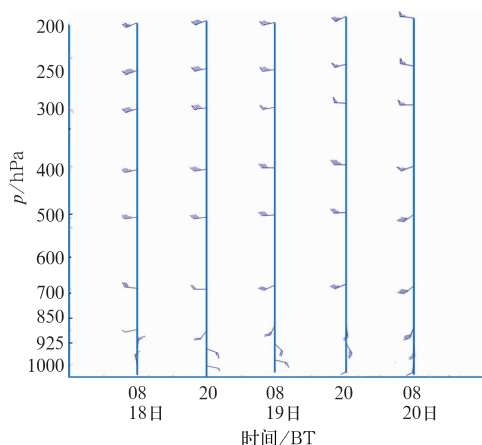


图10 2016年4月18日08时至20日08时北海站探空风场垂直分布
Fig. 10 Vertical distribution of wind at Beihai Station from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 20 April 2016

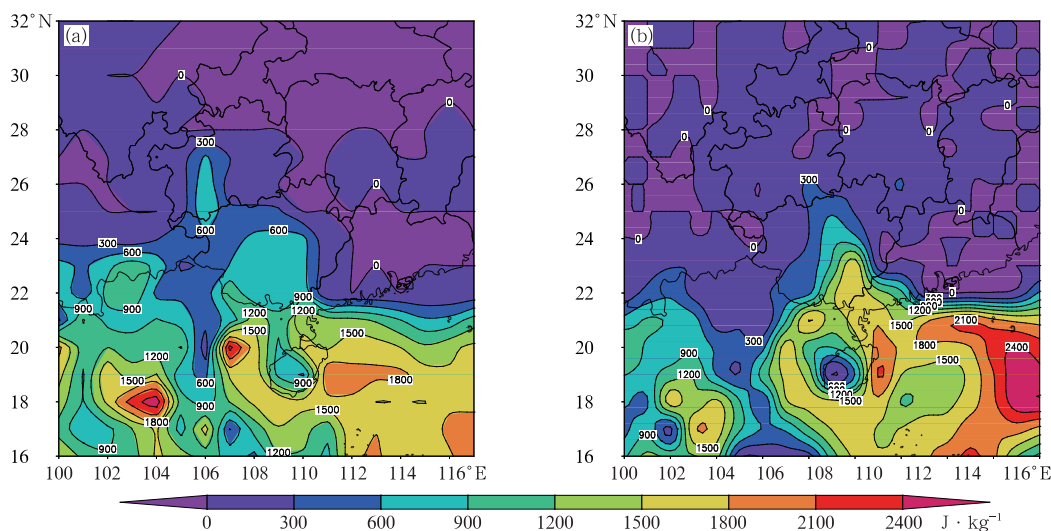


图11 2016年4月19日20时(a)和20日08时(b)CAPE值分布
Fig. 11 CAPE diagram at 20:00 BT 19 (a) and 08:00 BT 20 (b) April 2016

(图12),发现玉林站(22.8°N、110°E)西南侧是340~348 K的暖湿高值区,东北侧是中心低值为312 K的干冷区,指标站: $\theta_{e\text{玉林}} - \theta_{e\text{广州}} = 307 - 297 = 10 \text{ K} > 0$, $\theta_{e\text{广州}} - \theta_{e\text{福州}} = 297 - 285 = 12 \text{ K} > 0$, $\theta_{e\text{玉林}} > \theta_{e\text{广州}} > \theta_{e\text{福州}}$,对应的是高压后部的回流,东高西低,这股冷气流与玉林西南侧的暖湿气流相汇,结合08时地面图和雷达图(图7b,7d)判断出地面辐合线位于桂南中部,玉林东侧为 θ_e 等值线的密集带,说明沿低层辐合线有锋生发生。沿 θ_e 最大曲率作AB垂直剖面图(起点A:18°N、104°E,终点B:30°N、119°E)

4.4 边界层能量锋

假相当位温 θ_e 对当地的高温高湿有很好的指征(黄小刚等,2017,苏爱芳等,2016), θ_e 等值线的密集带,存在能量锋,是触发华南暴雨的重要天气系统(包澄澜,1986)。研究 θ_e 场发现:暴雨发生前,19日08时(图略),玉林500 hPa的 θ_e 达333 K,高于850 hPa的值(330 K),大气为稳定。19日20时(图略),玉林500 hPa的 θ_e 为328 K,850 hPa的 θ_e 为345 K,两者相差17 K,玉林上空变为不稳定。且从图6c可以看出云南、四川一带有暖低压存在,为锋前暖湿气团,东北部为干冷气团,相汇于广西,广西存在弱锋面。20日02时,地面辐合线在桂西南(图7a)。为了探究辐合线附近是否有锋生存在,作暴雨旺盛时期(20日08时)边界层1000 hPa的 θ_e 图

(图13)发现:玉林(22.8°N、110°E)的高空500 hPa的 θ_e 为最低值,达336 K为干冷区;低层975 hPa为最高值,达348 K为暖湿区;两者相差12 K,玉林处于“上干冷下暖湿”的不稳定区域,边界层能量锋配合“上干下湿”的不稳定条件,有利于玉林出现暴雨。

5 水汽输送分析

双雨带发生发展的首要条件,就是要有充沛的水汽输送到当地,如果离开了水汽输送,光靠当地已

有的水汽不可能形成暴雨(林确略等,2015),因此,必须要有水汽源源不断的输入,才有利暴雨形成,水汽通量是表示水汽输送的物理量(孔凡超等,

2016;冯晋勤等,2017;陶祖钰,2011)。从 2016 年 4 月 19 日 20 时至 20 日 20 时的低层 925 hPa 的水汽通量风场和水汽通量散度图(图 14)可以发现:来自于北部湾海上的西南气流与东南气流相汇合于桂中、

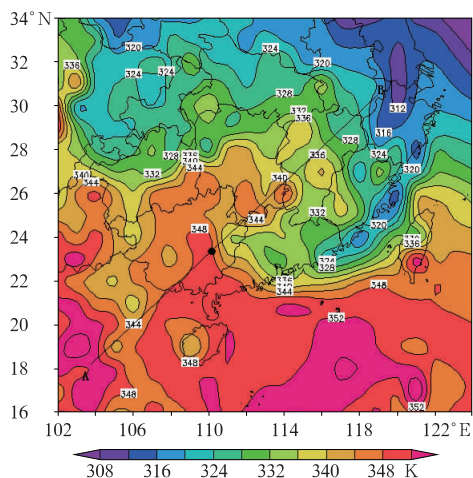


图 12 2016 年 4 月 20 日 08 时 1000 hPa θ_e 场
(黑点:玉林,黑色直线 AB:剖面线)

Fig. 12 1000 hPa θ_e at 08:00 BT 20 April 2016
(black dot: Yulin, black line AB: section line)

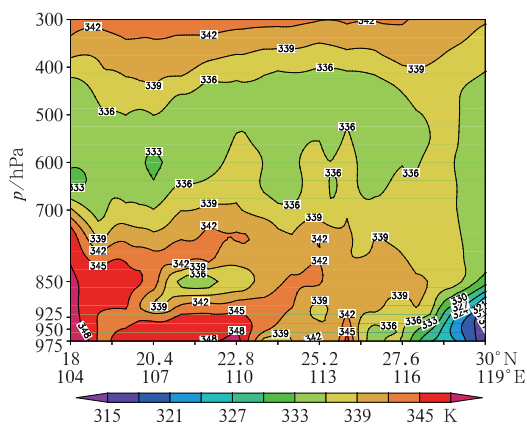


图 13 2016 年 4 月 20 日 08 时沿图 12 中 AB 的 θ_e 剖面

Fig. 13 θ_e section along line AB in Fig. 12
at 08:00 BT 20 April 2016

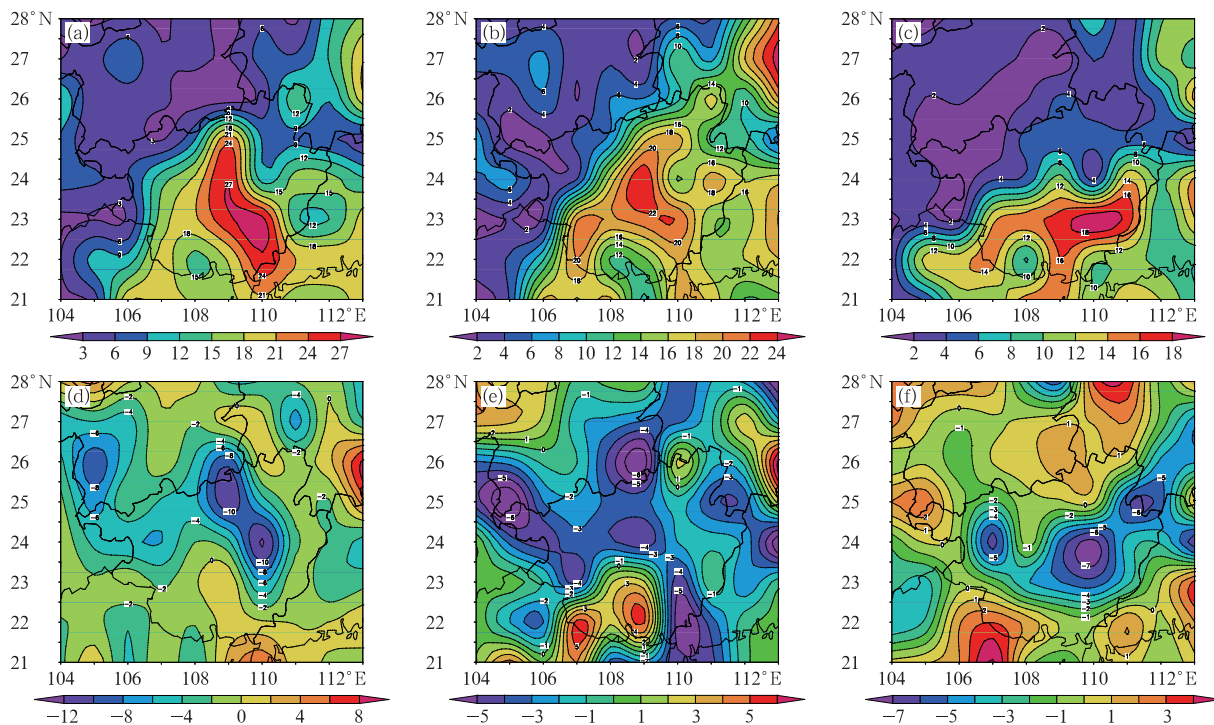


图 14 2016 年 4 月 19 日 20 时(a,d),20 日 08 时(b,e),20 日 20 时(c,f)925 hPa 水汽通量(a,b,c,
单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和 925 hPa 水汽通量散度(d,e,f,
单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 14 Water vapor flux (a, b, c, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
and water vapor flux divergence (d, e, f, unit: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa
at 20:00 BT 19 (a, d), 08:00 BT 20 (b, e), 20:00 BT 20 (c, f) April 2016

东南一带(图14b),为玉林的强降水提供了水汽供应。19日20时(图14a,14d),925 hPa 玉林水汽通量达 $27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,桂东北区域水汽通量比较小,只有 $9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,水汽通量大值区位于桂中南区域,水汽辐合区分别位于桂东北和桂东南,玉林水汽条件充足,利于强降水的形成。20日08时(图14b,14e),双雨带旺盛期间,925 hPa 显示南雨带所在的桂中、南区域的水汽通量为最大值区,桂中水汽通量极值达 $22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,玉林达 $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,水汽辐合区比较零散,玉林上空水汽通量散度达 $-5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,为水汽辐合,利于南雨带的维持。20日20时(图14c,14f),925 hPa 的水汽通量减弱东移,南雨带雨势减弱。南雨带的形成和持续,离不开低层充足的水汽供应。

6 结论与讨论

2016年4月19日20时至20日20时,广西玉林受双雨带过程影响,本地降水达暴雨、局部大暴雨量级,位于江淮的北雨带已预报出来,而位于广西东南部玉林的南雨带过程,上下游业务台站和常用的ECMWF、GRAPES_Meso、T639、Japan 预报产品都漏报,具有突发性强、机制复杂、预报难度大等特点,因此有必要深入研究其机理,探讨漏报原因,得出以下结论。

(1) 数值预报场漏报双雨带中的玉林南雨带,在预报的500 hPa 槽距离本地较远,925 hPa 辐合线不明显、雨量偏小的情况下,预报员预报玉林小到中雨,漏报了暴雨、局地大暴雨过程。

(2) 忽略了南支槽前的冷温槽对其加深的增幅作用、边界层的能量锋以及暴雨前本区域的不稳定能量,这些容易产生的对流不稳定,导致了玉林南雨带发生发展。上下游台站都误认为冷空气已入海,忽略了高压脊后部地面回流形势对玉林的影响。

(3) 双雨带的形成和持续,离不开低层充足的水汽输送条件,南雨带发生前期和旺盛期间,桂东南区域的水汽通量为大值区,配合水汽辐合区,水汽补给充足,导致了玉林普降暴雨。

今后,我们将加强对中尺度数值预报的应用,特别是根据12~36 h的数值预报,及时进行修正,提高预报准确率,努力为防灾减灾做贡献。

参考文献

- 包澄澜,1986. 华南前汛期暴雨研究的进展[J]. 海洋学报,8(1):31-40. Bao C L, 1986. Progress of rainstorm research in pre flood season in southern China[J]. Acta Oceanol Sin, 8(1):31-40(in Chinese).
- 陈玥, 湛芸, 陈涛, 等, 2016. 长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 42(6): 724-731. Chen Y, Chen Y, Chen T, et al, 2016. Characteristics analysis of warm-sector rainstorms over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Meteor Mon, 42(6): 724-731(in Chinese).
- 丁治英, 常越, 朱莉, 等, 2008. 1958—2000年6月连续性暴雨的特征分析[J]. 热带气象学报, 24(2): 117-126. Ding Z Y, Chang Y, Zhu L, et al, 2008. Research on the reason of the double rainbands' forming in a sustaining storm rainfall of South China [J]. J Trop Meteor, 24(2): 117-126(in Chinese).
- 冯晋勤, 俞小鼎, 蔡菁, 等, 2017. 福建春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置及环境条件分析[J]. 气象, 43(11): 1354-1363. Feng J Q, Yu X D, Cai J, et al, 2017. Flow pattern and ambient condition analysis of spring southwest low-level jet warm sector severe convection in Fujian[J]. Meteor Mon, 43(11): 1354-1363(in Chinese).
- 傅佩玲, 胡东明, 张羽, 等, 2018. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象, 44(4): 500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510(in Chinese).
- 黄士松, 李真光, 包澄澜, 等, 1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社: 1-7. Huang S S, Li Z G, Bao C L, et al, 1986. The Preflood Season Rainstorm in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press: 1-7(in Chinese).
- 黄小刚, 费建芳, 孙吉明, 等, 2017. 2013年冬季长江中下游地区一次高架雷暴过程的成因分析[J]. 气象学报, 75(3): 429-441. Huang X G, Fei J F, Sun J M, et al, 2017. Analysis on the formation mechanism of an elevated thunderstorm over the middle and lower Yangtze Basin in February 2013[J]. Acta Meteor Sin, 75(3): 429-441(in Chinese).
- 孔凡超, 赵庆海, 李江波, 2016. 2013年7月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J]. 气象, 42(5): 578-588. Kong F C, Zhao Q H, Li J B, 2016. Diagnostic analysis of mesoscale system and environmental conditions during Hebei severe rainstorm [J]. Meteor Mon, 42(5): 578-588(in Chinese).
- 孔期, 林建, 2017. 2015年5月19-20日华南地区不同性质暴雨成因和预报分析[J]. 气象, 43(7): 792-803. Kong Q, Lin J, 2017. Analysis on causes and forecasts of the torrential rainfall with different features over South China during 19 to 20 May 2015 [J]. Meteor Mon, 43(7): 792-803(in Chinese).
- 李向红, 陆虹, 伍静, 等, 2018. 孟加拉湾对流对广西秋季暴雨影响分析[J]. 热带气象学报, 34(4): 507-513. Li X H, Lu H, Wu J, et al, 2018. Analysis of the impact of the convection over the Bay of

- Bengal to autumn heavy rain in Guangxi[J]. J Trop Meteor, 34(4):507-513(in Chinese).
- 林良勋, 2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社: 137-144. Lin L X, 2006. Guangdong Weather Forecast Technical Manua[M]. Beijing: China Meteorological Press: 137-144 (in Chinese).
- 林确略, 寿绍文, 杨华, 2015. 基于数值模拟对一次广西前汛期回流暴雨形成机制的分析[J]. 气象, 41(7):852-862. Lin Q L, Shou S W, Yang H, 2015. Analysis on formation mechanism of the backflow rainstorm occurring in first rainy season of Guangxi based on numerical simulation[J]. Meteor Mon, 41(7):852-862 (in Chinese).
- 刘国忠, 赖珍权, 钟祥平, 等, 2017. “15·7”广西超长持续性暴雨过程多尺度特征分析[J]. 热带气象学报, 33(3):357-367. Liu G Z, Lai Z Q, Zhong X P, et al, 2017. Analysis of multi-scale characteristics of a July 2015 persistently long heavy rainfall in Guangxi [J]. J Trop Meteor, 33(3):357-367(in Chinese).
- 祁海霞, 辜旭赞, 白永清, 等, 2017. 2013 年湖北一次大暴雨 β 中尺度分析和模拟诊断[J]. 气象, 43(3):268-277. Qi H X, Gu X Z, Bai Y Q, et al, 2017. Simulation and diagnosis of the evolution characteristics of a meso- β scale heavy rainstorm event in Hubei in 2013[J]. Meteor Mon, 43(3):268-277(in Chinese).
- 覃靖, 潘海, 刘蕾, 2017. 柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. 气象, 43(6):745-755. Qin J, Pan H, Liu L, 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016[J]. Meteor Mon, 43(6):745-755(in Chinese).
- 苏爱芳, 张宁, 黄勇, 2016. “8·13”黄淮北部暴雨云团的组织结构和触发机制[J]. 气象, 42(8):905-919. Su A F, Zhang N, Huang Y, 2016. Organizational structure and trigger mechanism of rainstorm cloud clusters over North Huanghuai Region on 13 August 2010[J]. Meteor Mon, 42(8):905-919(in Chinese).
- 陶祖钰, 2011. 基础理论与预报实践[J]. 气象, 37(2):129-135. Tao Z Y, 2011. Basic theories and forecast practices[J]. Meteor Mon, 37(2):129-135(in Chinese).
- 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等, 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学, 41(4):784-796. Wang J H, Yang Y Y, Miao C S, et al, 2017. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China Coast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):784-796 (in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 张楠, 杨晓君, 邱晓滨, 等, 2018. 一次突发性暴雨的机理分析及短期预报思考[J]. 气象, 44(1):118-131. Zhang N, Yang X J, Qiu X B, et al, 2018. Mechanism analysis and rethinking of short-term prediction of a sudden rainstorm[J]. Meteor Mon, 44(1):118-131(in Chinese).
- 赵华生, 黄小燕, 黄颖, 2018. ECMWF 集合预报产品在广西暴雨预报中的释用[J]. 应用气象学报, 29(3):344-353. Zhao H S, Huang X Y, Huang Y, 2018. Application of ECMWF ensemble forecast products to rainstorm forecast in Guangxi[J]. J Appl Meteor Sci, 29(3):344-353(in Chinese).