

谢玉华,何清芳,陈晓娜,等.副热带高压影响下龙岩夏季对流降水特征研究[J].气象研究与应用,2024,45(2):23-28.

XIE Yuhua, HE Qingfang, CHEN Xiaona, et al. A study on the characteristics of summer convective precipitation in Longyan under the influence of subtropical high[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2): 23-28.

副热带高压影响下龙岩夏季对流降水特征研究

谢玉华¹, 何清芳², 陈晓娜¹, 李 乐¹

(1. 龙岩市新罗区气象局, 福建 龙岩 364000; 2. 龙岩市气象局, 福建 龙岩 364000)

摘要:利用雷达基数据、ECthin 预报数据、ERA5 逐日4次再分析资料,选取2017—2021年每年7—9月受副热带高压(以下称“副高”)影响时段,分析龙岩地区对流降水时空分布特征、对流起源空间分布特征、不同的引导风下对流移动路径特征,及ECthin 模式预报检验情况。结果表明:(1)7—9月对流频次和对流起源频次均是龙岩东部多于西部,各月的峰值集中在午后到上半夜之间。(2)不同副高位置控制下造成各月的主要对流影响系统不同。(3)对流传播方向大多和850 hPa 引导风向一致。(4)ECthin 预报的各物理量值可信度高,个别物理量预报与实况空间分布对应较差。

关键词:副热带高压;对流降水;对流起源;ECthin;模式检验

中图分类号: P426.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.2.04

近年来关于西太平洋副热带高压(以下简称副高)对于降水的影响的研究已经很多。钟中^[1]等通过数值模拟,对西太副高对中国东部降水的影响进行检验,研究表明夏季中国东部雨带的南北进退和副高的南北进退过程存在很好的对应关系,同时研究还指出降水的主体位置基本上取决于副高的强度和位置,但降水的强度和降水发生时间在很大程度上还和其他因素有关。对于副高影响下的对流降水也有一定的成果,孙齐颖^[2]指出对流降水在6—8月陆地区域表现突出,中国南方大部分地区对流性降水主要出现在午后,并且有明显的地域特征,不同区域的降水廓线存在明显差异。副高的强度和位置不仅对中国南方地区对流天气有明显影响,对北方地区也有影响,如侯淑梅研究指出,2020年5月山东出现多次罕见的强对流天气过程原因之一,就是副热带高压强度偏强^[3]。史文丽^[4]指出在全球变暖背景下北半球夏季6—8月对流性降水事件的发生呈增多趋势且强度增强。对流的初生及发展与当地天气形势、地形特征、热力条件等都密切相关,对流日变化是多种物理机制混合作用造成的结

果,有着非常显著的地域差异,因此不同区域的对流日变化特征需要进行专门的研究。目前国内的学者进行对流的雷达研究的范围主要集中在京津冀、珠江三角洲和长江三角洲地区,龙岩地区的研究较少。

副高是夏季影响福建西部山区的主要天气系统,当山区被副高控制时多晴好天气,但若边界层有辐合线、热力扰动,并配合较好的对流潜势时,午后多局地对流降水发展,降水的强度往往较强,发展迅速,常常伴有雷雨大风、局地冰雹等强对流天气。副高边缘由于稳定性较弱,对流系统常常引发暴雨天气,如2021年6月27日至7月4日桂东北连续暴雨^[5]、2017年7月初广西极端暴雨过程^[6]就是受副高稳定维持引起。张树民等^[7]也指出副热带高压控制下的强对流天气常常漏报和错报,预报员对预报对流降水的发生发展有较大困难。本文研究龙岩地区受副高影响下对流特征,旨在提升预报员对副高影响下龙岩地区对流发生发展的认识,提高对对流天气的预警预报能力。龙岩市位于福建省西部,通称闽西。东与泉州市、漳州市接壤,西与江

收稿日期: 2024-01-28

基金项目: 龙岩市科技计划重点项目(龙财教[2022]58号)

第一作者: 谢玉华(1987-),本科,高级工程师,主要从事气象服务与应用气象。E-mail: 407734988@qq.com

西省赣州市交界,南邻广东省梅州市,北接三明市,处于沿海地区与内陆腹地的结合部,是闽南沿海联接内地的主要通道,总面积 $1.9028 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。龙岩市地势东高西低,北高南低。境内武夷山脉南段、玳瑁山、博平岭等山岭沿东北—西南走向,大体呈平行分布,横跨全市地势。本文以龙岩地区为代表,研究2017—2021年7—9月副高影响下西部山区夏季对流降水特征,并检验ECthin预报情况,研究成果可为预报副高影响下的龙岩对流降水提供参考依据。

1 资料与方法

选取龙岩市范围2017—2021年7—9月欧洲中心细网格(ECthin)模式08时和20时起报的3、6、9、12、24小时对流有效位能(Cape)、K指数、整层水汽含量(TCWW)、850 hPa比湿($Q_{850 \text{ hPa}}$)、500 hPa垂直速度($W_{500 \text{ hPa}}$)的预报数据,2017—2021年7—9月的ERA5再分析资料,分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,2017—2021年间7—9月的雷达基数据。

1.1 受副高影响的定义

定义某天任一时次588 hPa位势线在龙岩行政区范围内时,即为当天龙岩地区受副高影响。2017—2021年副高平均位置,7月副高平均脊线位于 25°N 附近,西脊点为 113°E ;8月副高平均脊线北抬到 28°N 附近,西脊点为 110°E 附近;9月副高平均脊线又回落到 25°N 附近,但是西脊点明显深入内陆,到 100°E 附近。经过筛选,2017—2021年间7—9月龙岩市受副高影响的天数总共为307 d,其中7月104 d,8月82 d,9月120 d。

1.2 初生对流识别

通过雷达基数据生成SWAN程序的TITAN和三维拼图TDMOSAIC产品,追踪TITAN中风暴信息,定义首次出现的风暴为新风暴;或者若风暴时次时间不连续认定该风暴为新风暴;若文件连续,根据风暴移速为0,判定为新风暴。

1.3 对流识别

本文采用M Steiner(1995)的对流云和层状云的分离算法(convective-stratiform separation)^[8]。

分离原则:降水区域内符合标准的对流核以及周围区域判定为对流性降水,剩下的降水区域认定为层状云降水。数据采用3.5 km高度的TDMOSAIC平面回波,格点分辨率1 km。

判定标准:

①任一格点反射率 $Z \geq 40 \text{ dBZ}$,即认为是对流核。

②如不满足①,则选择半径为11 km的非零降水反射率的平均值即为背景回波强度 Z_{bg} ,当任一格点反射率 Z 与背景回波强度 Z_{bg} 的差值,即 $\Delta Z = Z - Z_{bg}$ 超过一曲线临界值(标准如下),则判定为对流核。

$$\Delta Z = \begin{cases} 10 & Z_{bg} < 0 \\ 10 - Z_{bg}^2 / 180 & 0 \leq Z_{bg} < 42.43 \\ 0 & Z_{bg} \geq 42.43 \end{cases} \quad (1)$$

以满足标准的对流核为中心的圆形区域也判定为对流性降水,半径 R (单位:km)选用中半径等级,满足以下关系式:

$$R = \begin{cases} 1 & Z_{bg} < 25 \\ 2 & 25 \leq Z_{bg} < 30 \\ 3 & 30 \leq Z_{bg} < 35 \\ 4 & 35 \leq Z_{bg} < 40 \\ 5 & Z_{bg} < 40 \end{cases} \quad (2)$$

最后追踪titan风暴信息,符合至少是三角形,起点终点闭合(至少4个格点),风暴面积 $\geq 20 \text{ km}^2$ 处于风暴内部的符合对流特征的回波计算对流频次。

1.4 模式检验

选取龙岩范围内有对流时次和无对流时次的最近时次预报场CAPE、K、TCWW、 $Q_{850 \text{ hPa}}$ 、 $W_{500 \text{ hPa}}$ 物理量代表热力、水汽、动力等,进行有对流和无对流平均态区分,并挑取200个对流旺盛时次的最近时次物理量预报值进行制作箱线图,检验ECthin对流预报能力。选取覆盖龙岩地区的对流旺盛的50个时次的81个格点,分析物理量实况场与预报场的相关性。

2 结果与分析

2.1 对流频次空间分布特征

对龙岩地区2017—2021年7—9月副高影响下对流频次进行统计发现,对流频次7月最少,8、9月较多。7月主要分布在长汀北部、漳平、新罗南部;8月主要分布在新罗、武平、上杭、永定、连城东部;9月主要分布在龙岩市东部;7—9月总体来看龙岩东部多于西部。各月对流分布情况不同,可能与副高位置及控制各月的天气系统不同有关。

2.2 对流频次日分布特征

如图1所示,各月对流频次日变化呈单峰型,峰值7、8月出现在北京时(下同)16时前后,这和沈晓玲等研究的2010—2019年浙江暖季短时强降水特征中极端短时强降水频次16:00最多^[9]的结论一致,9月比7、8月推迟大概1到2 h,出现在18时前后,9

月峰值持续时间较长,集中在15时到20时之间。虽然各月对流峰值时间略有差异,但都集中在午后到上半夜之间,下半夜到上午对流发展频次较少。可能因为白天地面不断吸收太阳发出的短波辐射,温度上升,并且放出长波辐射加热大气,到午后往往为一天当中温度最高的时候,近地面的空气从地球表面接受到足够的热量,就会膨胀,密度减小,使得大气变成不稳定的状态,不稳定的大气受到地形或中小尺度系统的抬升触发作用,就容易激发对流。

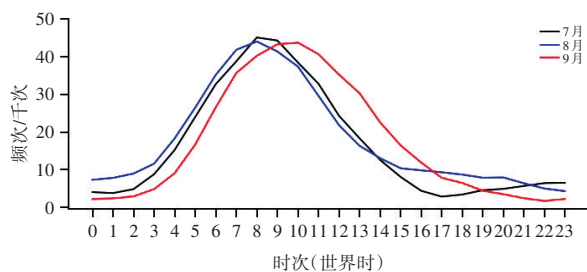


图1 7—9月对流频次日分布

2.3 不同强度对流分布特征

将不同强度的对流进行区分,各月分布中,40~45 dBZ 频次最多,7月主要分布龙岩市南北两条带,中间地区较少一些,8月、主要集中在龙岩市南部地区,9月集中在东部地区,各月50 dBZ 以上的次数都较少。7—9月总的来看,40~45 dBZ 对流全市分布广泛,最大值分布在永定地区。45~50 dBZ 主要分布在东部南部地区,50 dBZ 以上对流次数少,也呈现东部多于西部的情况。

2.4 不同影响系统下对流分布情况

对副高影响下低层不同影响系统进行分类,分为南风、切变、热带系统及其他(高压、均压场、偏北风等),其中受南风影响7月占66 d、8月32 d、9月9 d,热带系统影响中7月19 d、8月27 d、9月34 d,切变影响7月7 d、8月12 d、9月51 d,其他影响系统7月13 d、8月11 d、9月26 d。不同影响天气系统下各月对流频次分布如有1所示,南风影响形成的对流7月占比最多,热带系统影响形成的对流8月最多,切变影响形成的对流9月最多。成因可能与低层的天气系统和副高位置有一定关系,7月副高脊线位于25°N附近,龙岩刚好处于脊线附近,低层多受西南季风控制,暖区降水明显;8月副高脊线北抬到28°N附近,龙岩多处于副高南侧,此月多受到热带天气系统影响,对流频次也多分布于龙岩南部;9月副高

回落到25°N附近,多呈带状,西脊点偏西,此月处于夏秋交接时节,暖空气势力减弱,冷空气势力加强,多切变系统影响。

表1 不同影响系统下各月对流次数(单位:次)

次数 月份	影响系统	南风	热带系统	切变	其他
7月		2 520 550	816 421	444 642	265 686
8月		1 456 462	1 656 089	860 282	336 182
9月		282 145	800 719	2 512 936	477 492

2.5 850 hPa 不同引导风下对流传播情况

根据龙岩上空850 hPa层风向进行引导风分类,分为南风、东南风、东风、东北风、北风、西北风、西南风、西风八方位,剔除受台风、切变、高压等影响的天数,其中南风有25 d,西南风78 d,东南风4 d,东风4 d,北风2 d,东北风18 d,未出现西风天数,东风下未统计出对流个例。如图2所示,其中西南风和南风个例太多,只给出风暴持续1 h以上的个例传播路径情况,850 hPa层的风向引导作用明显,大部分对流单体移动方向基本都是和引导风向一致,西南风和南风下出现的对流个例最多,对流持续时间长并且传播路径远,其他风向引导下对流传播路径较短。在日常预报服务中,可根据850 hPa风向大致推算风暴传播方向。此外,在西北风和东北风引导下,在龙岩东部一带存在对流传播的大值区,正好是玳瑁山脉及以东地区,这和倪婷等^[10]指出的大别山及其东部地区是强降水的频发区的结论基本一致;在南风引导下,龙岩市的南部地区存在密集区,此为山脉以南的地势较低的河谷地带,为喇叭口地形,这和王婷等^[11]研究的重大短时强降水发生频次与地形有关,在迎风坡、边界层偏南风与地形辐合的地方易出现重大短时强降水结论也基本一致。

2.6 对流起源分布情况

对流起源(初生对流)分布情况,7月主要分布在漳平、新罗南部、永定北部及长汀以北地区。8月主要分布在武平、上杭、永定、新罗南部、漳平南部。9月主要分布在漳平北部、连城东部、新罗北部、永定。7—9月总体来看也是龙岩东部多于西部,主要集中在永定、漳平、新罗南部、连城东部。初生对流频次的分布情况和对流频次的分布情况类似,说明副高影响下龙岩地区的对流大多是本地发展和传播。

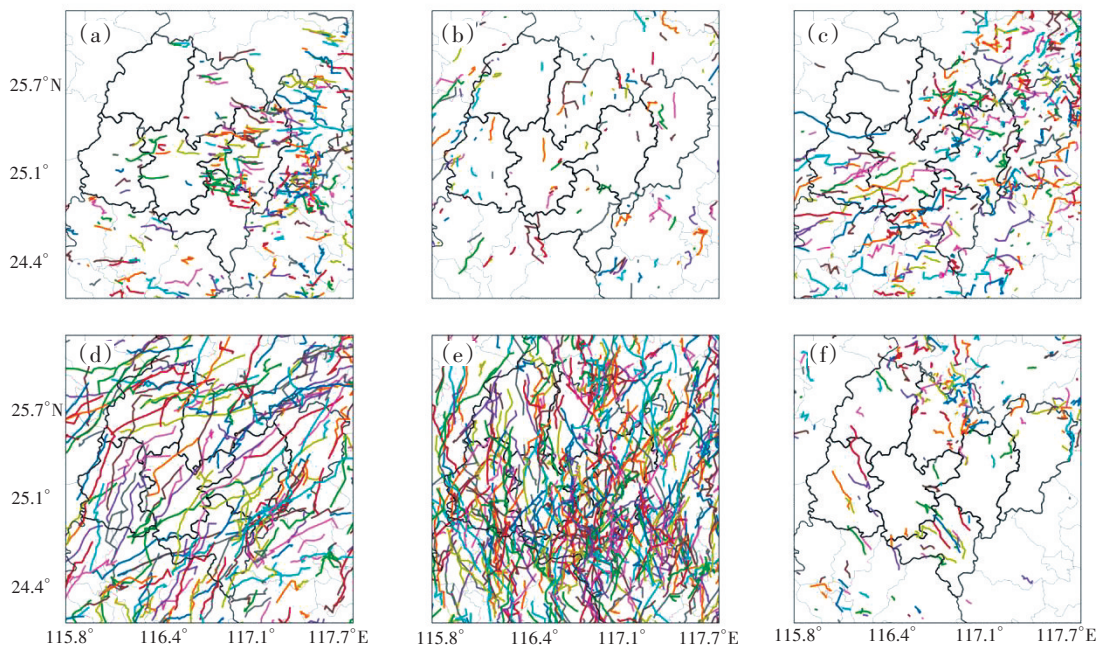


图2 850 hPa不同引导风下风暴传播路径

(a)西北风;(b)北风;(c)东北风;
(d)西南风;(e)南风;(f)东南风

3 模式检验情况

本文选取龙岩范围 2017—2021 年 7—9 月的 ECthin 模式 08 时和 20 时起报的最近时次分别为 3、6、9、12 小时 $CAPE$ 、 K 、 $TCWV$ 、 $Q_{850\text{ hPa}}$ 、 $W_{500\text{ hPa}}$ 的预报数据进行检验,将对应时次龙岩地区有对流和无对流进行区分,得到有对流和无对流的物理量平均值,选取对流旺盛的 200 个时次做物理量的箱线图(略)。有对流时次平均 $CAPE$ 值在 $700\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,无对流时平均 $CAPE$ 值在 $500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,有对流时 $CAPE$ 中位数在 $800\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 附近,最大值能达到 $3000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,最小值 0 也出现过。有对流时平均 K 值在 36°C 以上,中位数为 38°C 左右,最大值在 42°C 左右,最小值在 32°C 附近,无对流时平均 K 值在 32°C 以下。有对流时平均 $Q_{850\text{ hPa}}$ 在 $14.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,中位数为 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 附近,最大值为 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,最小值为 $13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,无对流时平均 $Q_{850\text{ hPa}}$ 在 $13.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下。有对流时平均 $TCWV$ 大多在 $49\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,中位数为 $51\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最大值为 $55\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值为 $47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 附近;无对流时平均 $TCWV$ 大多在 $47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下。有对流时 $W_{500\text{ hPa}}$ 平均值在 $-0.45\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,中位数为 $-1\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,最大值为 $6\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值为 $-8\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,无对流时

$W_{500\text{ hPa}}$ 平均值在 $0.32\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。从 ECthin 预报的各物理量值可见,有对流和无对流时次还是有较为明显的区分,各要素的平均值都会略小于中位数值,在日常预报当中,可以取各物理量的平均值作为对流预报指数。

为进一步检验 ECthin 预报各物理量的空间分布情况,挑取 50 个龙岩地区对流旺盛的时次,截取覆盖龙岩区域 81 个格点进行预报场与实况场的对比检验,实况场采用 ERA5 逐日 4 次再分析资料,分辨率 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ 。 K 值检验结果中,相关系数 0.6 以上强相关的有 21 次,0.4 到 0.6 之间中等相关的为 17 次,0.2 到 0.4 之间弱相关为 7 次,5 次为不相关。 $CAPE$ 值检验结果中,相关系数 0.6 以上强相关的有 5 次,0.4 到 0.6 之间中等相关的为 15 次,0.2 到 0.4 之间弱相关为 15 次,15 次为不相关。 $Q_{850\text{ hPa}}$ 值检验结果中,相关系数 0.6 以上强相关的有 16 次,0.4 到 0.6 之间中等相关的为 23 次,0.2 到 0.4 之间弱相关为 6 次,5 次为不相关。 $TCWV$ 值检验结果中,全部个例相关系数都达到 0.6 以上强相关,并且相关系数平均值达到 0.93。 $W_{500\text{ hPa}}$ 值检验结果中,相关系数 0.6 以上强相关的没有,0.4 到 0.6 之间中等相关的为 5 次,0.2 到 0.4 之间弱相关为 9 次,其余为不相关。

4 结论与讨论

副高影响下龙岩地区 7—9 月对流频次和对流起源频次都是龙岩东部多于西部, 龙岩地区的对流大多是本地发展, 各月的对流峰值集中在午后到上半夜之间, 下半夜到上午对流发展频次较少; 7 月的对流大多是由南风影响形成, 8 月的对流大多由热带系统引起, 9 月的对流大多由切变系统引起; 对流传播方向大多和 850 hPa 引导风向一致, 在西北风和东北风引导下, 在龙岩东部一带存在对流传播的大值区, 在南风引导下, 龙岩市的南部地区存在对流传播密集区。

ECthin 预报的各物理量在有对流和无对流时次有较为明显的区分, 在日常预报当中, 可以取各物理量的平均值作为对流指数, $CAPE$ 取 $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 取 $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{850 \text{ hPa}}$ 取 $14.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $TCWV$ 取 $49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $W_{500 \text{ hPa}}$ 取 $-0.45 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $TCWV$ 、 $Q_{850 \text{ hPa}}$ 、 K 的预报与实况空间分布较一致, $CAPE$ 、 $W_{500 \text{ hPa}}$ 的预报与实况空间分布对应较差。预报员对 $TCWV$ 值空间分布可以高度信任, 对 Q 值、 K 值空间分布可以较好地信任, 对 $CAPE$ 值和 $W_{500 \text{ hPa}}$ 值的空间分布上可以结合其他模式加以判别, 对降水落区进行修正。

参考文献:

- [1] 钟中, 王晓婷. 夏季西太副高和中国东部降水关系的模拟检验[C]//第 26 届中国气象学会年会全球和区域气

候模式及极端天气气候时间的模拟研究分会场论文集. 南京: 解放军理工力学气象学院, 2009.

- [2] 孙齐颖. 北半球及局地夏季对流性降水特征的对比[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [3] 侯淑梅, 唐巧玲, 史茜, 等. 2020 年 5 月山东强对流天气特点及成因[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(4): 47–61.
- [4] 史文丽, 闵锦忠, 费建芳, 等. 全球变暖背景下对流性降水变化特征及影响因子分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 32–42.
- [5] 李向红, 伍静, 曾毓琳, 等. 2021 年 6 月 27 日–7 月 4 日桂东北连续暴雨成因分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(3): 45–49.
- [6] 王盛繁. 2017 年 7 月初广西极端暴雨过程诊断分析[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(3): 18–21.
- [7] 张树民, 吴海英, 王坤, 等. 江苏副高型强对流天气特征及环境参数分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8489–8495.
- [8] 赵欢. 2013 年 5 月南海夏季风爆发前后华南两次强降水过程的多尺度特征分析[J]. 中国气象科学研究院硕士电子期刊, 2016(3): 11–12.
- [9] 沈晓玲, 黄海迅, 章丽娜. 2010–2019 年浙江暖季短时强降水特征分析[J]. 气象科技, 2022, 50(1): 103–113.
- [10] 倪婷, 黄勇, 凌新锋, 等. 大别山区地形降水特征分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 556–562.
- [11] 王婷, 唐桥义, 王娟, 等. 桂林重大短时强降水时空分布特征[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(3): 57–61.

A study on the characteristics of summer convective precipitation in Longyan under the influence of subtropical high

XIE Yuhua¹, HE Qingfang², CHEN Xiaona¹, LI Le¹

(1.Xinluo Meteorological Bureau, Fujian Longyan 364000, China 2. Longyan Meteorological Bureau, Fujian Longyan 364000, China)

Abstract: To better understand the summer convective precipitation characteristics in the Longyan region under the influence of the subtropical high, this study selected the period from July to September each year between 2017 and 2021 when the subtropical high had an impact. Using radar base data, ECthin forecast data, and 6-hourly ERA5 reanalysis data with a resolution of $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, the study analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of convective precipitation, convective initiation and convective movement tracks under different steering winds in Longyan, as well as the forecast performance of the ECthin model. The results indicate show that: (1) the convective frequency and convective initiation frequency are higher in the eastern part of Longyan than in the western part from July to September, and the peaks for each month are concentrated between the afternoon and before midnight. (2) The main convective influence systems in each month vary under the control of different subtropical high positions. (3) The direction of convective propagation mostly aligns with the direction of the steering winds at 850 hPa. (4) The reliability of various physical quantities predicted by ECthin is high, while the spatial distribution of individual physical quantities corresponds poorly to that of the actual conditions.

Key words: subtropical high; convection precipitation; convective initiation; ECthin; model testing