

文章编号: 2096-1618(2023)06-0740-08

合肥“4·30”冰雹天气的多源资料分析

范裕祥, 魏春璇, 陈健, 刘汉武, 李欣, 翟振芳
(合肥市气象局, 安徽合肥 230031)

摘要:2021年4月30日夜,合肥出现大范围冰雹天气,冰雹最大直径约3 cm。为研究这次冰雹天气的形成机制,利用常规观测资料、自动气象站、多普勒天气雷达、风廓线雷达、葵花8卫星和ERA5再分析资料,对此次冰雹天气的环流背景、环境条件和中尺度系统特征进行分析。结果表明:冰雹天气发生在深厚的东北冷涡背景下,地面午后增温,中层东北冷涡携带冷空气南下,温度直减率加大,中低层垂直风切变加大,均为强对流天气的发生提供了有利的热力和动力条件。降雹云团由数个分散的对流云合并,冰雹发生于TBB低于-52℃强对流核附近。垂直累积液态水跃增时间较地面降雹时间提前了22 min。边界层强垂直风切变和1200 m高度的风向不连续线,有利于触发新的对流单体。

关键词:冰雹;中尺度对流系统;成因分析;多源资料

中图分类号:P458.1+21.2

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcu.2023.06.017

0 引言

冰雹是致灾性极强的中小尺度天气,具有局地性强、时间短、破坏力大等特点,做好冰雹预报和预警是防震减灾的前提条件,也是预报的难点之一。很多气象学者研究了产生冰雹的环流背景和对流环境条件,形成了冰雹天气概念模型,对冰雹的潜势预报有明显改善^[1-3]。俞小鼎等^[4-5]对强冰雹产生的环境背景和雷达特征进行总结,冰雹的发生需要大气层结不稳定、水汽、抬升机制、较大的垂直风切变和适宜的零度层高度。指出45 dBZ或50 dBZ的回波扩展到-20℃等温线高度之上,有界弱回波区与回波悬垂,垂直累积液态水(VIL),三体散射和强烈风暴顶辐散是预警强冰雹的主要指标。利用新一代天气雷达观测资料及其产品对冰雹监测、预警和分析已经取得较多成果。黄晓龙等^[6]对冰雹天气发生的中尺度天气系统进行了分析。江玉华等^[7]对伴随冰雹的超级单体风暴的流场、结构和雷达回波特征进行了分析。谢启玉等^[8]研究了西宁地区冰雹VIL变化特征。近年来,风廓线雷达开始应用到强对流天气的监测和分析研究中,风廓线雷达可以24 h不间断获得测站上空每几分钟、几十米层距的大气风场、垂直气流随高度分布和随时间的变化^[9-11],能揭示天气尺度系统的存在及影响过程^[12]。黄志勇等^[13]利用风廓线雷达分析了湖北咸宁一次冰雹天气,发现在降雹前约0.5 h,0~4 km垂直速度大小随高度的波动明显增大,不同高度垂直速度的最大差值可达 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在对流风暴中大气的不同层次之间

热力或动力差异较大。周志敏等^[14]利用风廓线雷达资料对一次冰雹过程进行了分析。李聪等^[15]利用风廓线雷达、雨滴谱仪和微波辐射计等观测资料,对发生在南京的一次冰雹天气进行了分析,探讨新型探测仪器在冰雹监测预警中的应用。

2021年4月30日夜,合肥市区及所辖的巢湖市、肥西县和肥东县出现冰雹天气,冰雹最大直径约3 cm。2021年中国气象灾害风险普查结果表明,合肥市有气象记录以来,春季、夏季出现冰雹占全年总数分别为40%、58%,可见合肥市冰雹天气主要出现在夏季。合肥市大范围出现大冰雹天气也多在夏季,如1987年8月10日合肥市区、肥东县、肥西县和庐江县出现冰雹,其中合肥市区、肥西县和庐江县冰雹最大直径4 cm。合肥市2021年春季出现如此大范围且最大直径达3 cm的冰雹天气,较为罕见。因此有必要研究此次冰雹天气的环流背景、环境条件和中尺度系统特征。

所用资料为探空、自动气象站、气象卫星、多普勒天气雷达、风廓线雷达等监测数据和ERA5再分析资料。其中探空数据的时间分辨率为12 h,自动气象站数据为1 h;气象卫星数据采用葵花8卫星TBB资料,时间分辨率为10 min,空间分辨率为2 km;合肥多普勒天气雷达(31.85°N,117.23°E)时间分辨率为6 min,反射率因子空间分辨率为1 km,径向速度分辨率为0.25 km,距离肥西不足50 km,在有效探测范围内;巢湖风廓线雷达(31.58°N,117.83°E)是WP6000-LT边界层风廓线雷达,时间分辨率为6 min,垂直分辨率60 m(1200 m以上为120 m),距离合肥多普勒雷达约60 km;ERA5再分析资料的时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

1 天气实况和环流背景

1.1 天气实况

2021年4月30日20–24时(北京时),合肥市、马鞍山市和宣城市等自西北向东南先后出现强对流天气(图1),合肥市20:50出现直径6 mm冰雹,20:56肥西境内出现最大直径约3 cm的冰雹,其后合肥市所辖肥东、巢湖先后出现直径不足1 cm的冰雹。21–24时芜湖、宣城先后出现雷雨大风,宣城市广德县独山最大

风速达11级($28.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。过程累计降水量普遍小于10 mm。本文重点分析合肥市冰雹天气的成因和中尺度特征。

1.2 环流背景和触发机制

2021年4月29–30日贝加尔湖以东到中国东北地区有一深厚的东北冷涡,该低涡气旋性环流自925 hPa延伸至100 hPa。500 hPa上,30日08时(图2a)冷涡中心盘踞在内蒙古科尔山附近,20时(图2b)冷涡中心略有南落。东北冷涡使安徽出现冰雹典型环流形势,冷涡后部偏北风携带中层冷空气南下,这次过程中冷涡后部西北风较大,黄淮至江淮地区建立一支急流核风速超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏北急流,有利于中低层垂直风切变的加强,形成强对流天气发生的有利环境。850 hPa上,08时(图2c)湖北有一超过 $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的暖中心,湖北至安徽以偏西气流为主,合肥存在明显的暖平流,20时(图2d)合肥处于西北风与西南风的辐合线上,辐合线南北两侧的风力较08:00明显增强,强烈的辐合有利于上升运动的发展。合肥持续数天晴好天气,地面增温明显,最高气温接近 $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$,地面为热低压(图略)。

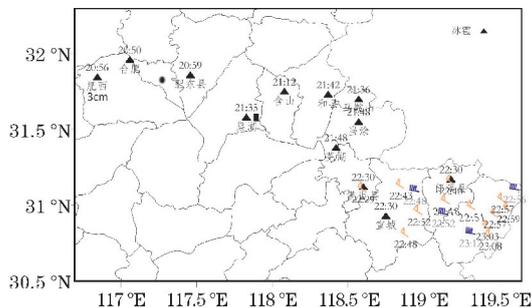
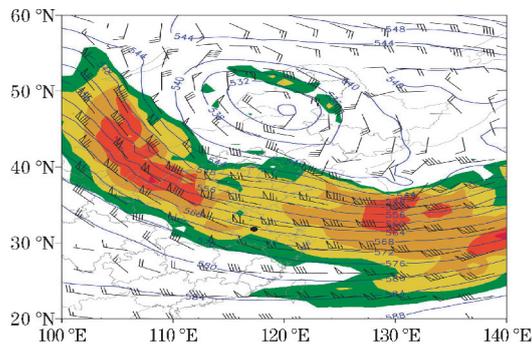
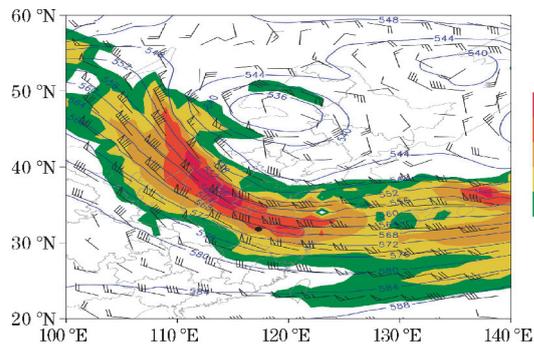


图1 2021年4月30日冰雹和雷雨大风实况

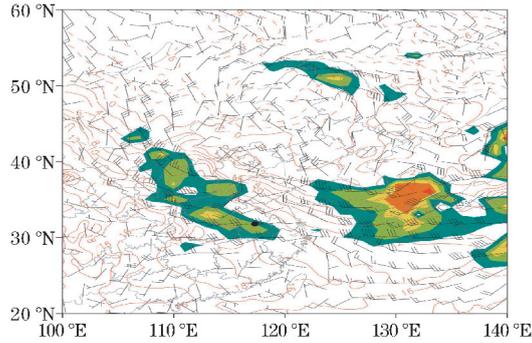
(图中黑色圆圈为合肥多普勒雷达位置,黑色方框为巢湖风廓线雷达位置)



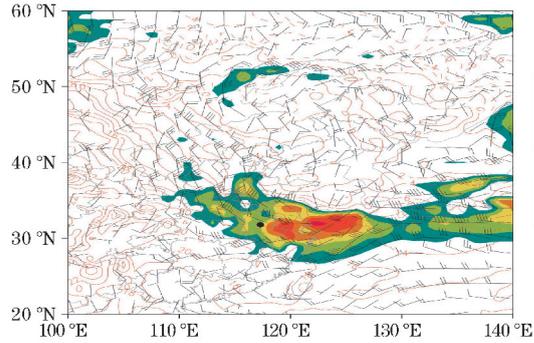
(a) 08时500 hPa位势高度、风场



(b) 20时500 hPa位势高度、风场



(c) 08时850 hPa温度场、风场



(d) 20时850 hPa温度场、风场

图2 2021年4月30日系统配置500 hPa位势高度、风场和850 hPa温度场、风场(黑色实心圆圈为合肥所在位置)

30日17–20时地面一直存在一条近东西向中尺度辐合线(图3),辐合线北侧为偏北风,南侧为西南风,位置少动。20时925 hPa也有一条近东西向中尺度辐合线(图略),该辐合线北侧为东北风,南侧为西南风形成气旋性旋转辐合,而且925 hPa辐合线与地面辐合线位置基本重叠,边界层形成强烈的辐合。强对流

天气最初出现在辐合线北侧附近。

可见这次合肥大冰雹出现在安徽冰雹典型的环流背景下,低层和地面的辐合为大冰雹天气提供了触发条件。地面午后增温,中层东北冷涡携带冷空气南下,温度直减率加大,中低层垂直风切变加大,均为强对流天气的发生提供了有利的热力和动力条件。

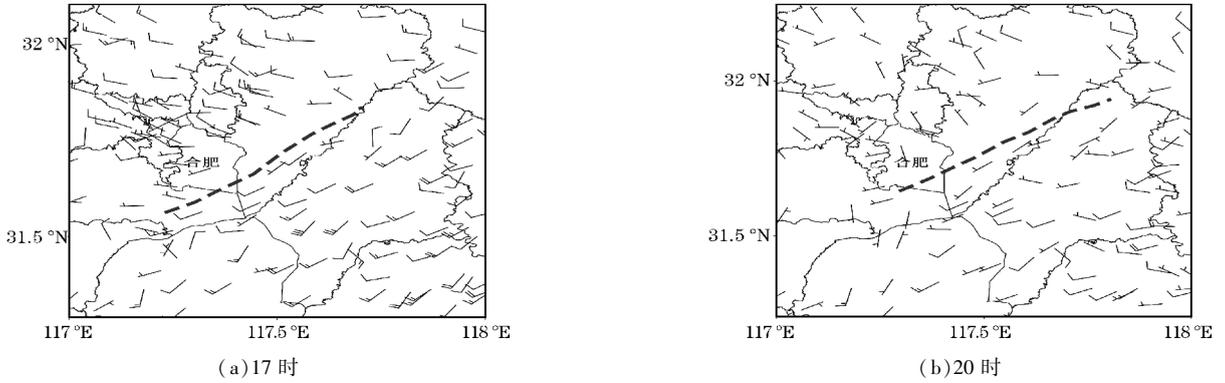


图3 地面中尺度辐合线

2 物理量分析

2.1 不稳定潜势分析

通过分析中低层温度直减率,可以判断大气层结的热力不稳定。选择与合肥接近的安庆和南京的探空资料(表1)发现,2021年4月30日08:00-20:00,安庆和南京上空对流层中低层 $t_{850-500}$ 均大于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 尤其20:00 安庆 $t_{850-500}$ 接近 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 远远超过热力不稳定的阈值。08:00 对流有效位能(CAPE)安庆和南京均为零,20:00 都超过了 1500 J/kg , 为中等对流不稳定,表明夜间适合对流发展。20:00 强天气威胁指数(SWEAT)超过400,最大抬升指数(BLI)低于 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, TT 都超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明适合强雷暴发展。以上指数表征合肥地区有较好的对流潜势。0~6 km 垂直风切变均大于 26 m/s , 属于深厚的强垂直风切变,而且 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿球温度高度位于 3100 m 左右, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿球温度高度位于 6300 m 左右。由上可知,合肥存在有利于发生冰雹的环境条件^[16]。

表1 2021年4月30日安庆和南京探空站物理量资料

探空物理量参数	安庆		南京	
	08:00	20:00	08:00	20:00
CAPE/(J/kg)	0	1683.8	0	2004.8
TT/ $^{\circ}\text{C}$	52.6	58.5	51.4	57.1
BLI	-1.9	-8.5	-0.5	-7.4
SWEAT	237.4	403.4	211.2	421.6
$t_{850-500}/\text{ }^{\circ}\text{C}$	32.8	34.8	30.5	32.7
0~6 km 垂直风切变/(m/s)	29.0	26.7	34.2	35.9
抬升凝结高度/m	1061.4	1518.8	952.5	1485.8
$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿球温度高度/m	3701	3127.8	3412	2972.4
$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿球温度高度/m	6492.7	6312.7	6387.6	6226.1

2.2 涡度和散度

30日08:00冰雹发生地($31\text{ }^{\circ}\text{N} \sim 32\text{ }^{\circ}\text{N}$)低层有向南倾斜的 950 hPa 附近出现 $21 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的正涡度中心(以下简称南方正涡度中心)并伴随着 $-0.5\text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 上升气流(图4a), $33\text{ }^{\circ}\text{N} \sim 33.5\text{ }^{\circ}\text{N}$ 850 hPa 附近有一

中心为 $9 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的垂直的正涡度柱(简称北方正涡度柱)。08:00后南方正涡度中心强度逐渐减弱,北方正涡度柱则呈范围增大、强度增强并且向对流层高层延伸态势。16:00北方正涡度柱(图4b)南北范围增大为 $33\text{ }^{\circ}\text{N} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{N}$, 高度达 200 hPa , 垂直方向有多个正涡度中心,强烈的上升气流两侧为下沉气流,正涡度柱开始向南移动。此时,南方正涡度中心仅为 $12 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。18:00(图4c)北方正涡度柱南移至 $32.5\text{ }^{\circ}\text{N} \sim 34\text{ }^{\circ}\text{N}$ 附近,强度略减,南北两个正涡度中心水平距离越来越接近,二者在 $31.5\text{ }^{\circ}\text{N} \sim 32\text{ }^{\circ}\text{N}$ 对流层低层负涡度开始加强。20:00(图4d)南方正涡度中心强烈发展,顶部上升到 200 hPa , 形成正涡度柱(简称南方正涡度柱),南北正涡度柱之间负涡度从低层延伸到 200 hPa , 300 hPa 附近负涡度中心低于 $-18 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。负涡度对应反气旋旋转,有利低空辐散,与 $31.5\text{ }^{\circ}\text{N} \sim 32\text{ }^{\circ}\text{N}$ 地面至 800 hPa 散度为正(图4f)相对应,因此有最大达 $1.4\text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强烈下沉气流,该下沉气流在低层产生强烈辐散,对南北两个正涡度柱有正反馈作用,有利于对流的发展维持和传播移动。21:00(图4e)北方正涡度柱中心达 $27 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 并伴随强烈的上升气流(最大 $-2.2\text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)。合肥位于边界层正负涡度相邻梯度大值区,此时合肥市出现冰雹天气。

3 中尺度特征分析

3.1 TBB 分析

葵花8号卫星资料具有较高的时空分辨率,在监测对流云团活动方面具有一定的优势^[17]。本文采用葵花8号卫星的TBB图像分析中尺度对流系统的演变^[18]。图5给出对流云团自西北向东南移动过程中每10 min的TBB分布。30日20:00,安徽无对流云发展(图略),20:10,合肥西北侧有数个呈东西向排列的 γ 中尺度对流云(γ _MCS)新生发展,20:20这些 γ _MCS开始合并,20:30 γ _MCS完全合并形成东西向 β 中尺度对流系统(β _MCS),尺度增大,中心镶嵌低于 $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的强对流核,上冲云顶的出现,表明对流云团发展到旺盛状态。20:40, β _MCS进一步发展呈“哑铃

状”并开始影响合肥市区,部分地区出现了雷电和阵性降水。21:00 对流云团发展成为 α 中尺度对流系统 (α _MCS), 合肥市区处于系统中心, 四周均是低于 -52°C 的强对流核, 合肥多地出现雷雨和冰雹天气。21:30 对流云团进一步发展呈椭圆形, 22:00 该 MCS

继续向东南方向移动, 对合肥地区的影响结束。

由上分析可见, 此次影响合肥的降雹天气与中尺度对流系统关系密切, 是由数个分散的东西向对流云合并, 合并后尺度增大、TBB 强度增强, 冰雹发生于 TBB 低于 -52°C 强对流核附近。

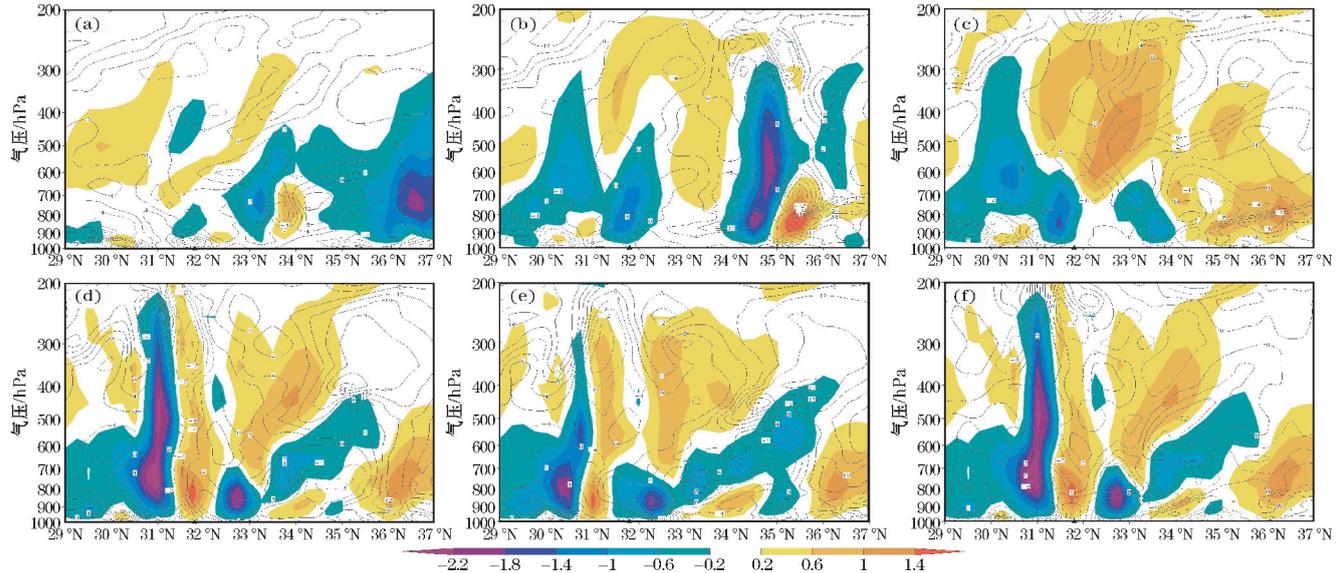


图 4 2021 年 4 月 30 日湿度和垂直速度沿 117.2°E 垂直剖面 (a) 08:00、(b) 16:00、(c) 18:00、(d) 20:00、(e) 21:00 (等值线为涡度、色斑为垂直速度); (f) 20:00 散度和垂直速度沿 117.2°E 垂直剖面 (等值线为散度、色斑为垂直速度)

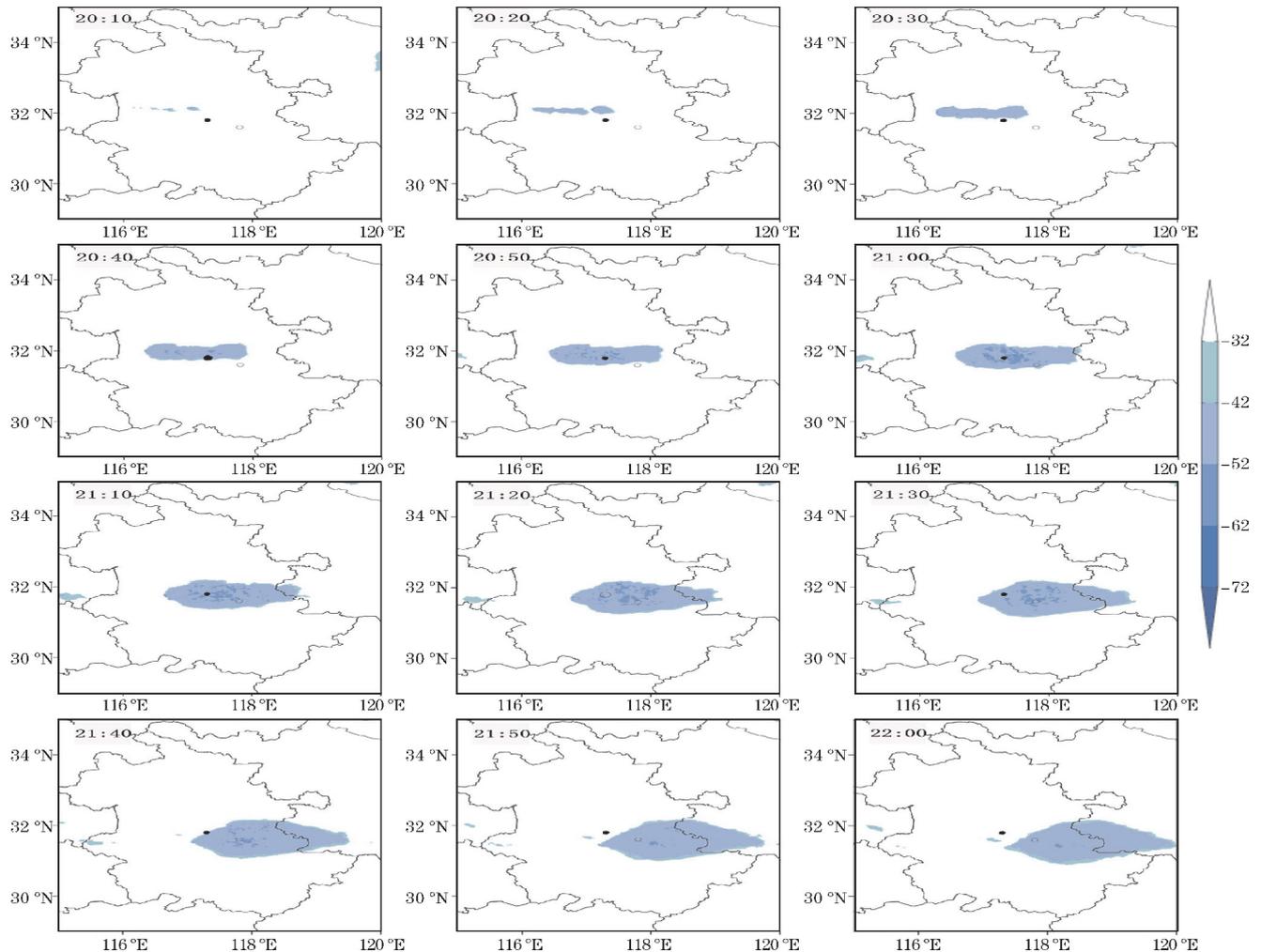


图 5 2021 年 4 月 30 日 20:10-22:00 葵花 8 卫星云顶黑体亮温 (实心圆圈为合肥所在位置, 空心圆圈为巢湖所在位置)

3.2 雷达回波分析

3.2.1 对流风暴触发阶段

图6是合肥多普勒天气雷达20:11–21:59组合反射率因子演变特征图。30日20:11(图6a),在地面中尺度辐合线和925 hPa辐合线的北侧有分散、孤立的对流单体生成。

3.2.2 对流风暴发展成熟阶段

20:22(图6b)对流单体逐渐弥合,反射率因子增强至48 dBZ,回波顶高抬升至11 km,并形成一条东西向的对流回波带,在高空西北引导气流下向东南方向移动。20:39对流单体进一步合并,其中风暴A在 $2.4^\circ \sim 6.0^\circ$ 仰角出现三体散射长钉,由图7(a)、(c)可见20:45, 6° 、 2.4° 仰角反射率因子三体散射长钉。20:45(图6c)回波带中对流单体基本合并,风暴A最大反射率因子达到65 dBZ,沿P1($116.48^\circ\text{E}, 31.94^\circ\text{N}$)和P2($116.7^\circ\text{E}, 31.79^\circ\text{N}$)两点(图6c)作反射率因子垂直剖面(图7d),可见,强回波呈前倾悬垂结构,强回波右

下侧有弱回波区,表明存在强垂直风切变,斜上升气流强烈,因而风暴A得以持续发展,这点在前面物理量分析中得到印证。回波顶高基本伸至10~12 km,最高达15 km,强回波已及地,表明风暴A已达成熟阶段。 6.0° 仰角径向速度图(图7b)上,风暴A人工去速度模糊后转动速度为 $23.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且维持3个体扫,距离合肥69 km,属于强中气旋,因此风暴A为超级单体风暴。20:56肥西县境内出现3 cm大冰雹,三体散射回波出现时间早于地面降雹17 min。探空显示,湿球零度层高度3100 m左右, -20°C 湿球温度高度位于6300 m左右,60 dBZ强回波伸展至9 km以上,远超 -20°C 度层高度,因此易产生冰雹天气。

21:13(图6d)对流回波移出合肥市,回波带中对流单体开始分散,但对流单体核心强度仍可达65 dBZ。21:36(图6e)回波带西半段对流单体呈减弱消散趋势,东半段对流单体尺度呈增大趋势并在巢湖市形成雨夹冰雹天气。21:59(图6f)对流回波移出合肥,至此,合肥境内本轮强对流天气结束。

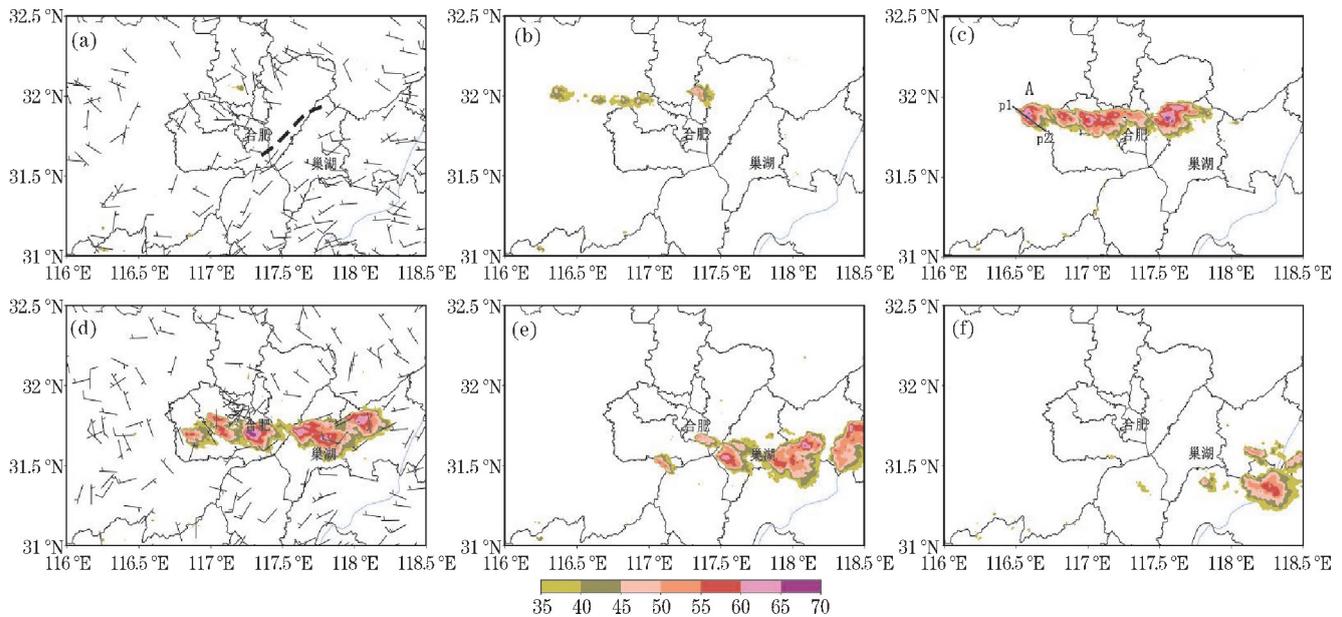


图6 2021年4月30日合肥多普勒天气雷达组合反射率因子和地面风场叠加(a)20:11 雷达回波和20:00 地面风场,(b)20:22 (c)20:45,(d)21:13 雷达回波和21:00 地面风场,(e)21:36,(f)21:59(图中隐去35dBZ以下的回波)

对流风暴A在发展过程中,VIL出现连续跃增现象。30日20:11–20:22风暴处于初生阶段,VIL维持在 $1 \sim 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。20:28–20:45,VIL连续跃增(图8),VIL由20:22的 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到20:28的 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,20:33跃增到 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,维持2个体扫后,20:45跃增至 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,此时VIL最大,反射率因子最强(65 dBZ)。20:51降为 $65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,其后快速下降。可见,20:28 VIL开始跃增,合肥市降雹时间为

20:50,VIL跃增时间较地面降雹时间提前了22 min。VIL跃增时间对应着冰雹云发展的跃增阶段,此时冰雹云内的冰雹粒子在生长区迅速碰并长大^[19],VIL跃增能作为预警冰雹的一个重要依据。从图8还可以看到,随着VIL的增大,反射率因子随之增强,但随着风暴减弱,VIL减小,但反射率因子最大值仍保持55 dBZ或以上的高值,这与罗菊英等^[20]的分析结果较为一致。

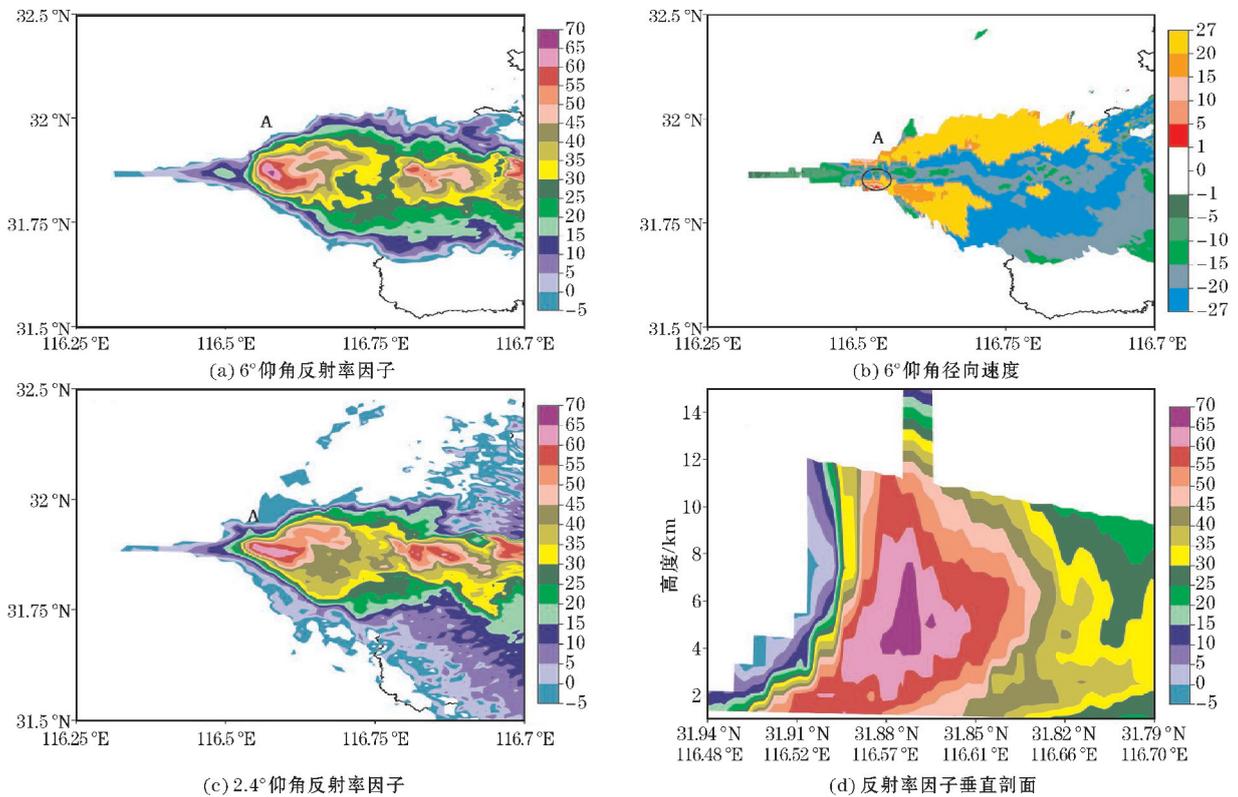


图7 2021年4月30日20:45合肥多普勒天气雷达

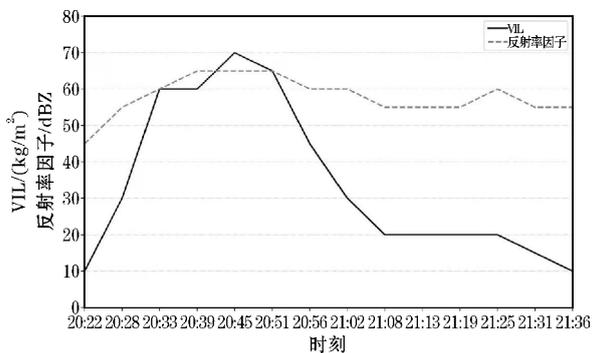


图8 2021年4月30日20:22–21:36风暴A的VIL和最强反射率因子随时间变化

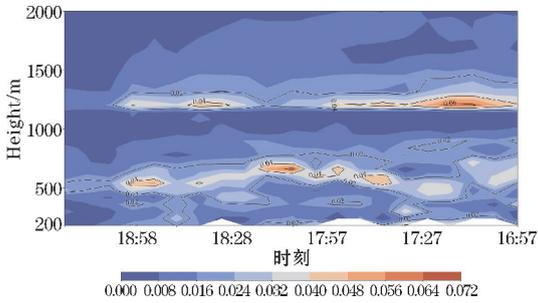
综上所述,地面中尺度辐合线和925 hPa中尺度辐合线对此次对流风暴起触发作用,对流单体经过合并而加强,3 cm大冰雹发生在超级单体成熟阶段。三体散射回波出现时间早于地面降雹17 min,三体散射长钉可以作为强冰雹预警的一个重要辅助指标^[21]。VIL跃增时间较地面降雹提前22 min, VIL跃增能作为预警冰雹的一个重要依据。

3.3 风廓线雷达分析

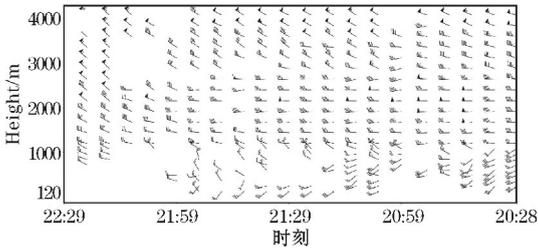
大气边界层是指直接受地球表面的影响,并与地表进行热量、动量和水汽及其他物质成分的交换,其厚度一般是从地面至500 m到1.5 km,湍流运动是该层大气的最基本特征。在巢湖风廓线雷达垂直风切变的

时间-高度剖面(图9a)上,17:00–19:00垂直风切变大值区出现在1200~1300 m、500~700 m,极大值达到 0.06 s^{-1} 。可见在强对流开始前的数小时,巢湖边界层有2个垂直风切变强中心,低层垂直风切变增大,不仅加速高、低空冷暖气流混合,利于大气不稳定,而且加强了低层的气流辐合抬升,非常有利于对流的发展。Rasmussen等^[22]通过研究指出,当有强对流存在时0~4 km的平均垂直风切变会达到 0.015 s^{-1} 左右,而本文中垂直风切变极值达到了 0.06 s^{-1} ,表明冰雹发生前,局部垂直风切变会大得多。

利用4月30日巢湖风廓线雷达资料(图9b)对巢湖上空风场变化进行分析。20:34–21:35,1200 m高度以上为西风,其下风场明显转向,从20:34的西南风到20:40转为西北风,并且西北风高度逐渐向下延展,1200 m高度风向不连续一直持续到21:35,该不连续线印证了前文所提的925 hPa辐合线。1200 m以下西北气流为雷暴冷池出流和北方冷空气共同影响所致(图6d),冷空气在边界层向巢湖伸展形成冷垫,并与地面南风入流在雷暴东南侧产生强辐合,暖湿斜升气流沿冷垫爬升,潜在不稳定的气团迅速上升至自由对流高度(LFC)以上,不断触发新的对流单体,21:35巢湖出现雨夹冰雹天气。



(a) 16:57-18:58 垂直风切变的时间-高度剖面



(b) 20:28-22:29 风羽

图9 2021年4月30日巢湖风廓线雷达

4 结论与讨论

(1) 此次冰雹天气发生在深厚的东北冷涡背景下,500 hPa黄淮至江淮地区一支超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏北急流,急流携带冷空气南下进一步促进大气层结不稳定,增强中低层垂直风切变,构建了强对流天气发生的有利环流背景条件。

(2) 冰雹发生在强的温度直减率、中等强度对流有效位能、深厚的强垂直风切变、较低的湿球零度层高度环境条件下。地面中尺度辐合线和925 hPa的辐合线共同触发了此次强对流天气。

(3) 卫星云图显示,降雹云团由数个分散的东西向对流云合并,冰雹发生于TBB低于 $-52 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 强对流核附近。雷达回波表明VIL跃增时间较地面降雹时间提前了22 min,三体散射回波出现时间早于肥西降大冰雹时间17 min。巢湖风廓线雷达显示强对流发生前边界层有两个垂直风切变强中心,1200 m高度的风向不连续线触发了巢湖新的对流单体。

此次冰雹过程分析使用的新型探测资料不多,今后将采用双极化雷达、相控阵雷达、云雷达、微波辐射计等新资料对冰雹过程进行研究,探索冰雹最新预警预报指标。应用高分辨率数值模式模拟冰雹单体,分析超级单体内部结构,研究降雹的具体位置和时间。

参考文献:

[1] 顾光芹,史印山,池俊成,等. 河北省冰雹气候特

征及其与环流异常的关系[J]. 高原气象,2011, 30(4):1132-1138.

[2] 闵晶晶,曹晓钟,段宇辉,等. 近30年京津冀地区冰雹的气候特征和突变分析[J]. 气象,2012, 38(2):189-196.

[3] 陈力强,张立祥,杨森. 东北冷涡诱发的一次连续强风暴环境条件分析[J]. 气象与环境学报, 2008,24(5):38-41.

[4] 俞小鼎. 强对流天气临近预报[M]. 北京:中国气象局培训中心,2012:32-37.

[5] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,2005,24(3): 456-464.

[6] 黄晓龙,高丽. 2014年3.19台州冰雹过程中尺度分析[J]. 气象,2016,42(6):696-708.

[7] 江玉华,刘娟,何跃,等. 一次伴随冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. 气象科技,2011,39(2): 172-181.

[8] 谢启玉,魏国财. 西宁地区冰雹VIL变化特征[J]. 气象科技,2018,46(3):539-544.

[9] 张雯雯,刘黎平,阮征,等. 风廓线雷达回波参量估计算法验证及其地杂波抑制方法研究[J]. 高原气象,2011,30(4):1096-1101.

[10] 王俊,朱君鉴,任种冬. 利用双多普勒雷达研究强飑线过程的三维风场结构[J]. 高原气象, 2007,26(2):241-251.

[11] 黄钰,阮征,葛润生,等. 风廓线雷达探测零度层亮带的试验研究[J]. 高原气象,2011,30 (5):1376-1383.

[12] 顾映新,陶祖钰. UHF多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用[J]. 气象,1991,17(1):29-33.

[13] 黄治勇,周志敏,徐桂荣,等. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用[J]. 高原气象,2015,34(1):269-278.

[14] 周志敏,万蓉,崔春光,等. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用[J]. 暴雨灾害, 2010,29(3):351-356.

[15] 李聪,姜有山,姜迪,等. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象,2017,43(9): 1084-1094.

[16] 余波,鲍文中,王东勇. 安徽天气预报业务基础与实务[M]. 北京:气象出版社,2013:1-308.

[17] 汤欢,傅慎明,孙建华,等. 一次高原东移MCS与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究[J]. 大气科学,2020,44(6):1275-1290.

- [18] 张夕迪, 孙军. 葵花8号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1245-1254.
- [19] 蔡寿强, 牛生杰, 郭彬, 等. 湖北保康两次冰雹天气过程的综合分析[J]. 大气科学学报, 2014, 37(1): 108-118.
- [20] 罗菊英, 谭江红. 鄂西山区一次早春局地强冰雹过程分析[J]. 气象科技, 2019, 47(6): 976-985.
- [21] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [22] Rasmussen E N, Blanchard D O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters [J]. Wea Forecasting, 1998, 13: 1148-1164.

Multi-source Data Analysis of Hail Weather on April 30 in Hefei

FAN Yuxiang, WEI Chunxuan, CHEN Jian, LIU Hanwu, LI Xin, ZHAI Zhenfang
(Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230031, China)

Abstract: On the night of April 30, 2021, a large-scale hailstorm occurred in Hefei and the maximum diameter of the hail reached three centimeters. To study the formation mechanism of this hailstorm, this paper analyzes the circulation background, environmental conditions and mesoscale system characteristics using conventional observations, automatic weather stations, doppler weather radar, wind profile radar, Sunflower 8 satellite and ERA5 reanalysis data. The results show that: the severe convective weather occurred under the background of a deep northeast cold vortex. The surface temperature increase in the afternoon, the increase in vertical lapse rate of temperature caused by the northeast cold vortex carrying cold air, and the change of vertical wind shear in the middle and lower layers provide favorable thermal and dynamic conditions for the occurrence of severe convective weather. Satellite cloud images show that the hailfall clouds consist of several scattered convective clouds merging. The hail occurs near the strong convective nucleus with TBB below $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$. Radar echoes showed that the rapid increase of vertical accumulated liquid water (VIL) was 22 min earlier than the time of ground hail. Strong vertical wind shear in the boundary layer and wind direction discontinuity at the height of 1200 m are conducive to triggering new convective cells.

Keywords: hail; mesoscale convective system; cause analysis; multi-source data