盛杰, 郑永光, 沈新勇, 等. 2020. 基于骨架的线状对流系统客观量化识别算法研究 [J]. 大气科学, 44(6): 1291−1304. SHENG Jie, ZHENG Yongguang, SHEN Xinyong, et al. 2020. Research on Skeleton-Based Objective Quantization and Identification Algorithm for Quasi-linear Convective Systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1291−1304. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19210

基于骨架的线状对流系统客观量化识别算法研究

盛杰[1,2] 郑永光[2] 沈新勇[1,3] 张小雯[2]

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044
2 国家气象中心，北京 100081
3 南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海），珠海 519082

摘 要 本文将计算机图形学骨架概念应用到气象学领域，发展了回波图像预处理、骨架修剪处理以及长宽比量化处理技术，该方法能自动识别出雷达回波拼图中符合气象学标准的线状对流系统（quasi-linear convective systems，QLCSs）。首先结合 2016 年黄淮地区一次双 QLCSs 过程给出了基于骨架的 QLCSs 客观量化算法的具体技术流程，然后利用该方法对 2016 年 6 月安徽地区的 QLCSs 进行客观筛选，并进一步量化识别 QLCSs 的移动特征，结合灾害天气实况与主观识别进行对比评估，结果表明：结合气象学标准改造的骨架图像识别算法，较好保留了气象回波形状信息，在准确量化对流系统长短轴的基础上，实现 QLCSs 的有效识别。而获得的量化移动矢量等特征，一方面可应用于致灾 QLCSs 的分类研究，为开展长序列统计及致灾机理分析提供个例识别方法和量化特征，另一方面也为 QLCSs 的短临监测预警业务提供新的思路。

关键词 线状对流系统 图像识别 骨架 雷达回波 量化特征
文章编号 1006-9895(2020)06-1291-14 **中图分类号** P409 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19210

Research on Skeleton-Based Objective Quantization and Identification Algorithm for Quasi-linear Convective Systems

SHENG Jie[1,2], ZHENG Yongguang[2], SHEN Xinyong[1,3], and ZHANG Xiaowen[2]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081
3 *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai)*, *Zhuhai* 519082

Abstract In this paper, we apply the skeleton concept from the field of computer graphics to meteorology and the development of echo image preprocessing, skeleton pruning, and length-width ratio quantization techniques. The quasi-linear convection systems (QLCSs) in radar echo mosaics that conform to meteorological standards can automatically be

收稿日期 2019-09-10；**网络预出版日期** 2020-05-09
作者简介 盛杰，男，1984 年出生，硕士研究生，高级工程师，主要从事强对流预报方法研究。E-mail: shengjie@cma.gov.cn
通讯作者 沈新勇，E-mail: shenxy@nuist.edu.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1506104、2018YFC1507506、2017YFC1502003，国家自然科学基金项目 41790471、41530427、41975054、41930967，中国科学院战略性先导科技专项 XDA20100304

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFC1506104, 2018YFC1507506, 2017YFC1502003), National Natural Science Foundation of China (Grants 41790471, 41530427, 41975054, 41930967), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20100304)

identified using this method. First, we introduce in detail the identification algorithm based on a double QLCSs process in the Huang–Huai area in 2016. Then, we use this method to objectively identify the QLCSs in the province of Anhui in June 2016 and quantify the moving characteristics of the QLCSs. We then compare weather disaster observations with their subjective identification. The results show that information about the shape of meteorological echoes is well preserved using the skeleton image identification algorithm and effective identification of QLCSs is realized base on the accurate quantification of the long and short axes of the convection system. Quantitative characteristics such as moving vectors can be applied to the classification of QLCS disasters to provide an identification algorithm and quantitative features for long–series statistics as well as an analysis mechanism for weather disasters. In addition, this concept provides a new technique for monitoring and warning by QLCSs.

Keywords Quasi-linear convective systems, Image identification, Skeleton, Radar echo, Quantitative features

1 引言

中尺度对流系统（mesoscale convective systems，MCSs）是造成灾害天气的重要影响系统，依据雷达回波图像形态，可分为线状对流系统（quasi-linear convective systems，QLCSs）和非线状对流系统（Trapp and Weisman, 2003）。Zheng et al.（2013）通过2007～2010年统计江淮和黄淮地区对流系统特征表明线状系统占到中尺度对流系统的55.3%。快速移动的QLCSs往往与我国大面积风雹灾害密切相关，如造成河南严重人员伤亡的2009年6.3风雹过程以及2018年3.4江南极端大风过程（孙虎林等, 2011; 盛杰等, 2019)。梅雨锋中移动缓慢的QLCSs易造成暴雨天气，如2003年单站雨量达380 mm滁州特大暴雨（孙建华等, 2006)。与大地形作用的QLCSs，镶嵌其中的对流单体列车效应明显，也会造成局地强降水事件，如2012年北京7.21特大暴雨过程（俞小鼎, 2012; 孙建华等, 2013; 孙继松等, 2015），可见QLCSs的移动特征与灾害性天气类型关系密切。国内外对QLCSs的雷达统计研究也有大量成果，ParkerandJohnson（2000）从线状回波的长度及生命史等提出了QLCSs的客观标准，并给出TS（trailing stratiform），LS（leading stratiform）和PS（parallel stratiform）三类QLCSs经典结构，王晓芳和崔春光（2012）在此基础上，进一步提出了我国梅雨期间长江中下游QLCSs的九种类型。Meng et al.（2013）通过2008～2009年中国中东部96条QLCSs的统计给出QLCSs发生发展的天气学特征。Yang and Sun（2018）对2010～2014年华北雷暴大风的对流组织利用雷达回波特征进行了分类研究。这些大样本统计研究，可以揭示中尺度系统发生发展的回波特征，有助于强对流天气的致灾机理研究。

上述统计研究有两个共同点：一是个例均采用主观筛选，人工识别效率低，标准无法严格统一，使得大范围长序列QLCSs气候特征研究比较困难；二是分类依据大都基于雷达回波形态的静态特征，即对流区和层状云区的相对位置（TS，LS和PS等），无法考虑其变化特点，但致灾天气与QLCSs的移动特征，如QLCSs移动方向、持续时间等密切相关（Doswell III et al., 1996; 孙继松等, 2013)。因此，QLCSs移动特征的量化统计也需要深入研究。从预报业务角度看，目前我国短临业务上还缺乏QLCSs自动识别算法（张小玲等, 2018），发展一套能够专门针对QLCSs的识别技术有助于提高我国强对流监测预警水平。

解决QLCSs自动识别的关键是借助客观算法来量化气象学标准的线状回波长度及长宽比。成熟的TITAN（thunderstorm identification tracking analysis and nowcasting）算法利用阈值识别出风暴体后（Dixon and Wiener, 1993），借助多边形拟合虽然可分辨出对流体，但目前不能自动识别是否是线状结构。近年来发展基于机器学习的雷达图像对流系统识别方法，能较好识别中纬度对流系统（Haberlie and Ashley, 2018）以及弓形回波（Kamani et al., 2018），但此类方法无法输出长宽比等信息，不能满足雷达气象学客观标准的筛选。为此，本文引入计算机图形学里骨架概念。骨架作为物体形状的表示方式，最早由Blum（1967）提出，从拓扑学的角度将二维甚至三维图形转化成简单的线条，去除冗余信息，有效的表达物体几何形状。几十年来，发展了很多经典求法（Zhang and Suen, 1984; Lee et al., 1994; Dey and Zhao, 2004），其中Lee et al.（1994）的方法优势是求得的骨架能保持较好联

通性不发生断裂，拓扑结构受噪声干扰小，有利于线状对流的稳定识别，所以本文将采取 Lee et al.（1994）方案求取骨架。但如何将骨架概念发展应用于气象领域中雷达图形 QLCSs 识别，尤其是结合气象学标准客观量化对流体的长短轴是本文的主要工作，方法介绍部分将详细展开讨论。

综上所述，QLCSs 自动识别技术是开展该类系统气候特征、机理研究和预报方法研究的基础，本文将在骨架识别的基础上结合气象学标准开展 QLCSs 的客观识别及特征的量化研究，共分四部分，第一部分介绍雷达数据以及 QLCSs 气象学标准，第二部分结合 2016 年 6 月 13 日的一次双 QLCSs 过程，介绍 QLCSs 的识别技术和过程。第三部分将客观算法用于 2016 年 6 月安徽区域发展的对流系统中 QLCSs 的自动识别，并在量化移动特征基础上，结合灾害天气实况与主观结果进行分析评估，最后是结论。

2　数据与中尺度线状对流系统定义

2.1　雷达数据介绍

本文使用的雷达数据为国家气象中心业务上使用的全国雷达组合反射率拼图数据，水平分辨率为 0.01°×0.01°，区域范围为（12.2°～54.2°N，73°～135°E），组合反射率阈值范围为 0～70 dB*Z*，精度为 1 dB*Z*，2016 年 6 月 14 日 06:40 之前隔 10 min 一张拼图，之后为 6 min 一张拼图，时间为全覆盖。本文所用时间不作特殊说明均为协调世界时。该数据集已经被广泛用于我国对流系统的研究（Meng et al., 2013; Zheng et al., 2013; Yang and Sun, 2018）。

2.2　QLCSs 的定义

表 1 给出近年来国内外定义 QLCSs 时所使用的标准。Parker and Johnson（2000）的研究工作基于中纬度地区的中尺度对流系统运动方程量纲分析，在中纬度地区使用相对较为合理。Meng et al.（2013）在统计中国中东部 QLCSs 时所用标准与 Parker and Johnson（2000）的标准类似，将长度在 100 km 以及以上，维持时间在 3 h 以及以上的对流系统定义为中尺度 QLCSs。Geerts（1998）和俞小鼎等（2006）则还考虑了长宽比。

我国大部分区域位于西风带中纬度地区，所以本文主要依据 Parker and Johnson（2000）的定义，再引入 5∶1 的长宽比标准，将中尺度 QLCSs 定义如下：大于 40 dB*Z* 的回波带长轴超过 100 km，长短轴比超过 5∶1，且持续时间超过 3 h 的准连续回波带。考虑到雷暴单体的尺度上限在 20 km 左右（Orlanski, 1975），Haberlie and Ashley（2019）在回波图像前处理时使用的闭运算半径为 24 km，本文选取 24 km 作为处理半径，将大于 40 dB*Z* 的回波带之间存在的小于 24 km 的断裂空隙连接成一个连续的 QLCSs。这里 24 km 强调的是准连续回波带，不考虑缝隙过大，断裂明显的对流系统，100 km 和 3 h 强调的是中纬度地区的中尺度对流系统，不考虑生命史短、尺度小的线状对流过程（如尺度小于 100 km 的孤立弓形回波）。

3　基于骨架的 QLCSs 识别技术

如引言所述，Lee et al.（1994）方法求得的骨架连通性好，可以准确保持形状原有的拓扑结构，为识别 QLCSs 提供有效的图像学基础，已经广泛应用于医学、生物学等复杂的图像识别领域（Cooper et al., 2003; Moudgalya et al., 2019），但在雷达图像上开展运用，还需结合 QLCSs 的气象标准对骨架技术发展改进，才能适用于 QLCSs 自动识别，主要涉及回波图像预处理技术、骨架修剪处理技术以及长宽比量化处理技术（图 1），详述如下：

回波图像预处理技术。首先需对雷达图像进行二值化计算，即将不小于 40 dB*Z* 的回波赋值为 255（白色）作为骨架提取对象，小于 40 dB*Z* 的回波赋值为 0（黑色），然后在二值化图像的基础上进行闭运算实现 QLCSs 气象学标准中的准连续性。闭运算是指先膨胀再腐蚀运算，韩雷等（2007）曾利用计算机图形学里的腐蚀、膨胀原理对风暴体识别结果进行优化，可以去除相邻风暴间的虚假连接，

表 1　相关文献中线状对流系统（QLCSs）标准

Table 1　Criteria used in the literature to define the quasi-linear convection systems (QLCSs)

Geerts（1998）	Parker and Johnson（2000）	俞小鼎等（2006）	Meng et al.（2013）
大于20 dBZ回波带超过100 km，持续时间4 h，大于40 dBZ长宽比5∶1，超过2 h。	大于40 dBZ回波带连续或者准连续大于100 km，时间超过3 h，并共有一个回波前缘。	线性多单体风暴中35 dBZ部分的长宽比超过5∶1，长度至少在50 km之上。	大于40 dBZ回波带呈现线性且大于100 km的时间超过3 h，并有共同移动前缘。

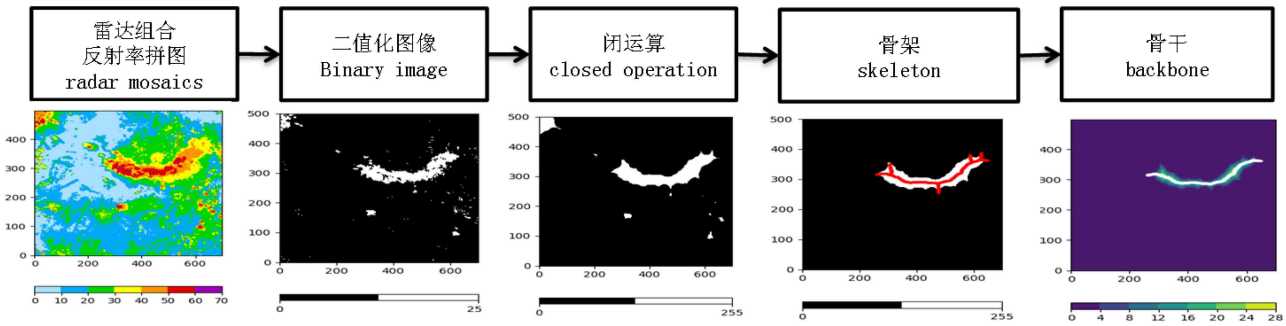

图 1 基于骨架的线状对流系统（QLCSs）识别算法流程示意图

Fig. 1 Flow diagram of skeleton-based identification algorithm for the quasi-linear convection systems (QLCSs)

同时尽可能多的保留风暴簇中子风暴的信息。如前文所述，准连续性参考 Haberlie and Ashley（2019）处理雷达回波图像的做法，选取 24 km 作为闭运算半径。如图 1“二值化图像”中白色对象，经过 40 dBZ 阈值筛选后的回波二值化图像内部分布有小间隙，它们尺度很小，但会对骨架的求取产生较大影响，经闭运算处理后，图 1“闭运算”后的二值化回波图像内部的小间隙被填充，边缘光滑连续，大大减少因小缝隙造成骨架识别结果的不确定性。此外，当回波带之间出现明显但小于 24 km 的断裂时，也会将其联通，具体效果详见下文人字形回波识别个例。

骨架修剪处理技术。骨架提取采用 Lee et al.（1994）的方法，但其生成的骨架并非是平滑的线条，有“骨刺”存在，结果还不能直接用于识别，需去除这些没有天气学意义的“骨刺”。采用 100 km 的标准去除骨架中小于 100 km 的骨刺得到骨干，骨干可以更科学有效的表达 QLCSs 最重要的形状信息，是后面对 QLCSs 进行量化处理的前提和基础。

长宽比量化处理技术。去除“骨刺”后的骨干长度可用来量化 QLCSs 的长轴长度，但宽度量化还需要进一步处理。提取的骨架除了可以保留形状信息外，还有一个特点就是具备中轴特性（Ivanov et al., 2000），中轴的数学含义（Kimmel et al., 1995）是图像内部各个最大内切圆中心的集合，利用骨干是中轴的特点，最大内切圆直径便可量化为 QLCSs 的宽轴。本文使用几何距离转换（Euclidean Distance Transform，EDT）技术，给出二值化图像中每一个非零点与其最近零点像素之间的最近距离，再根据骨干坐标可求出最大内切圆半径（Dimitrov et al., 2000）。由于回波宽轴长度在长轴方向上并不均匀，这里将骨干上所有点的宽度平均值作为最终 QLCSs 的宽度。

下面以 2016 年 6 月 13 日黄淮地区一次双 QLCSs 过程为例，给出识别算法的具体技术流程。此次过程系统尺度大，影响范围广，生命史长，结构演变复杂，两条 QLCSs 合并成人字形，尤其在山东造成了较强的区域性短时强降水和冰雹天气（张琴等, 2017）。图 2 分别给出了 QLCSs 的初始、成熟、合并及消亡阶段代表性时次的雷达回波特征，此个例有线状对流的合并，可以较好地检验算法的合理性和准确性。

3.1 回波图像预处理

首先对雷达组合反射率图像进行二值化处理，大于等于 40 dBZ 的区域将显示为白色（图 3）。注意到二值化图像中除一些孤立且面积很小的白色对象外，尺度较大的对流体中还有较多小干扰，如内部一些孔洞，微小断裂，边缘的扰动等，这些信息会给骨架提取结果造成较大不确定性。一方面在二值化图像的基础上，直接去除联通区域面积小于 100 km^2 的白色对象，消除一些杂波或者对识别意义不大的小尺度单体，另一方面单体内部的断裂则需要进行闭运算处理（Haberlie and Ashley, 2019），使得白色图形部分更加平滑和连续，识别结果有较好的连通性。

图 4 给出了闭运算后的结果，白色图像边缘处理后更为平滑。闭运算同时也实现了 QLCSs 气象学标准里关于准连续性的要求，联通距离小于 24 km 的对流体。在图 3 中，位于山东的 QLCSs 西端有新单体生成，离 QLCSs 主体小于 24 km。在图 4 中，可以看到经过闭运算后，新的单体与 QLCSs 主体被合并成一个整体。合并阶段时，有小断裂的两条 QLCSs 经过闭运算后也表现出联通的人字形特征。

3.2 骨架提取及修剪

经过预处理的白色图形对象，可用来进行骨架

提取。采用 Lee et al.（1994）的方法求取骨架。图 5 给出了各个时次骨架提取情况，结果显示其连通性较好没有发生断裂，保持了 QLCSs 原有形状信息，保证了识别结果的有效性。但还需要对骨架进行“剪枝”操作得到骨干才能得量化准确的长短轴信息。结合气象学标准，“骨刺”定义为骨架中线条交叉点到其对应的端点长度小于 100 km 的线条，只需去掉小于 100 km 的“骨刺”即得到骨干。

图 6 是经过修剪后的结果，可见骨干形态一般是一条没有分叉的线条，并保留了原本 QLCSs 的长轴信息。各个阶段的骨干形态与图 2 的原始雷达回波相比，准确识别出了对流体线状特点，去除骨刺后保留了最主要的形状信息，QLCSs 的弯折等特征也通过骨干合理的体现出来。即使合并阶段，两条 QLCSs 相连，由于各自长度超过 100 km，经过修剪处理后，骨干仍呈现出人字形特征，可见对

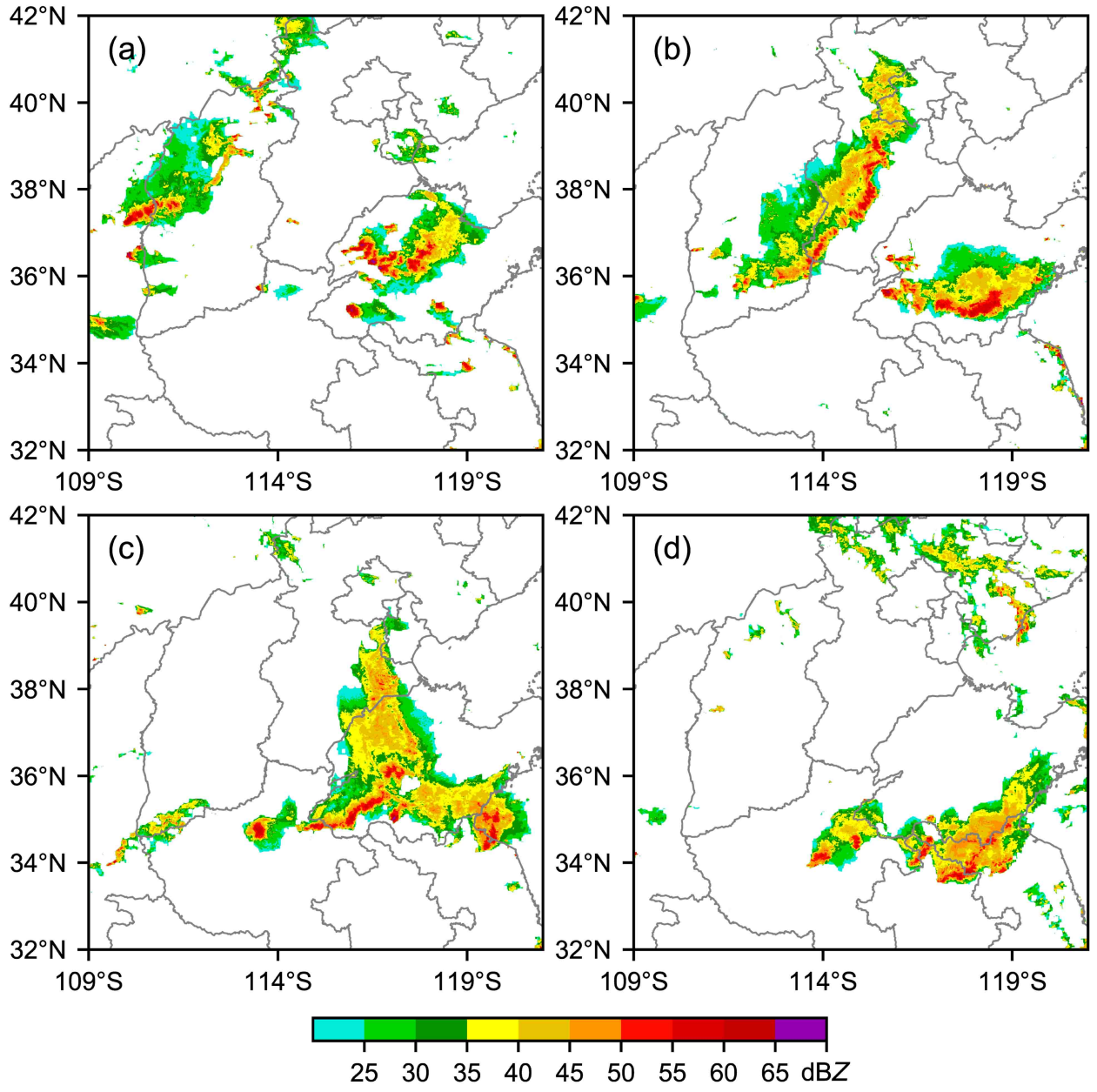

图 2　2016 年 6 月 13 日 QLCSs 组合反射率（单位：dBZ）：（a）初始阶段（10:50，协调世界时，下同）；（b）成熟阶段（14:30）；（c）合并阶段（17:40）；（d）消亡阶段（21:30）

Fig. 2　Composite reflectivity (units: dBZ) of QLCSs at (a) initiation stage (1050 UTC), (b) mature stage (1430 UTC), (c) merging stage (1740 UTC), and (d) dissipation stage (2130 UTC) on June 13, 2016

异形 QLCSs 也有很好的处理能力。

3.3 骨干长短轴量化

对 QLCSs 进行骨干识别和“剪枝”之后，提取的骨干可用来定量计算长短轴长度。如前文所述，QLCSs 长轴长度用骨干的长度衡量即可，短轴还需求出骨干（中轴）上点为圆心的最大圆直径，借助计算机图形学里（Dimitrov et al., 2000）的 EDT 技术，骨干（中轴）上点为圆心的最大圆半径为图 4 白色区域内骨干上的点到黑色边界的最短距离。图 6 的阴影部分为 EDT 结果分布，QLCSs 越宽，骨干上的 EDT 值越大，代表短轴越宽。取出骨干上所有点的 EDT 值 2 倍的平均值即可求得短轴长度。

最终按照长轴长于 100 km，长宽比比例大于 5∶1 的标准筛选骨干可得到单时次符合本文 QLCSs 客观标准的筛选结果（图 7）。图 6 中一些单体因不符合标准被删除，如合并期及减弱期河南北部的对流体。经过以上三个技术处理，在骨架提取的基础上，利用骨干中轴的特性以及准确有效保留线状

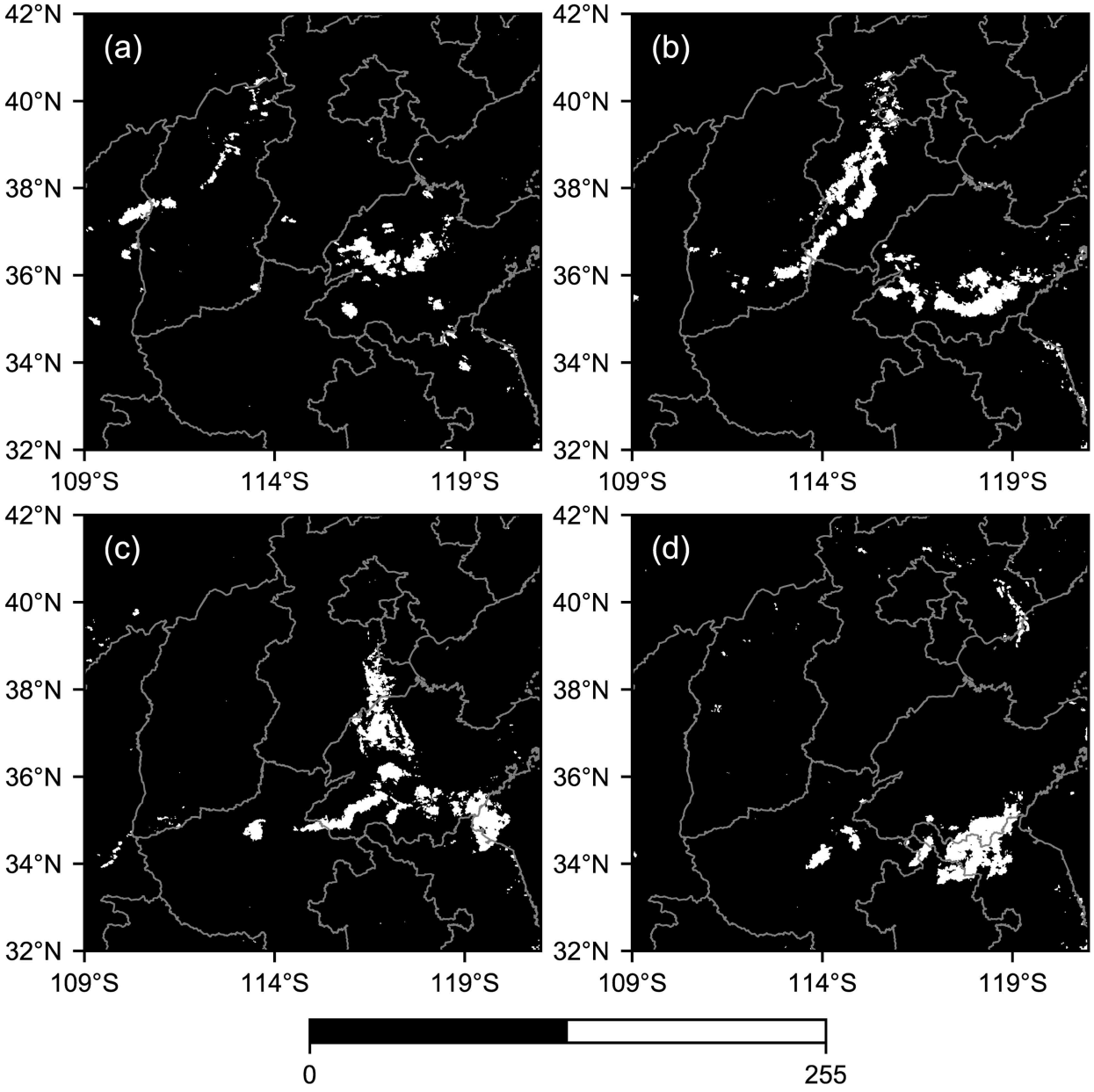

图 3 同图 2，但为不小于 40 dBZ 回波二值化图像（白色为不小于 40 dBZ 的区域，赋值为 255；黑色为小于 40 dBZ 的区域，赋值为 0）

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for binarized images of radar echoes not less than 40 dBZ (Radar echo value assigned 255 is not less than 40 dBZ, and radar echo value assigned 0 is less than 40 dBZ)

拓扑结构的优势，成功实现了符合气象学筛选标准的 QLCSs 识别。

最终在单时次识别的基础上将生命史超过 3 h 的对象筛选出来可确定为 QLCSs。2016 年 6 月 13 日双 QLCSs 过程多时次识别结果如图 8，清晰的辨识出这次双 QLCSs 的发生、合并及消亡过程。6 月 13 日 08:20 首次识别出山东北部的 QLCSs 并缓慢南压，随后另一条 QLCSs 从山西中部生成，尺度增大并迅速向东南方向移动，与山东的 QLCSs 在河北山东交界处附近合并成人字形结构，合并减弱后继续向东南方向移动至江苏北部最终于 13 日 17:30 消亡，维持时间 10 h 之多。

4　多样本识别及移动特征量化分析

6、7 月份正值江淮梅雨季节，也是 QLCSs 的高发时期（吴瑞姣等, 2019）。2016 年受准静止锋影响，苏皖等地线状对流活动造成的暴雨事件频发（曹艳察和张涛, 2016），为验证此方法对大量样本的识别效果，选定安徽地区（29°～35°N，114°～120°E）为试验区域，对 2016 年 6 月发生的对流过

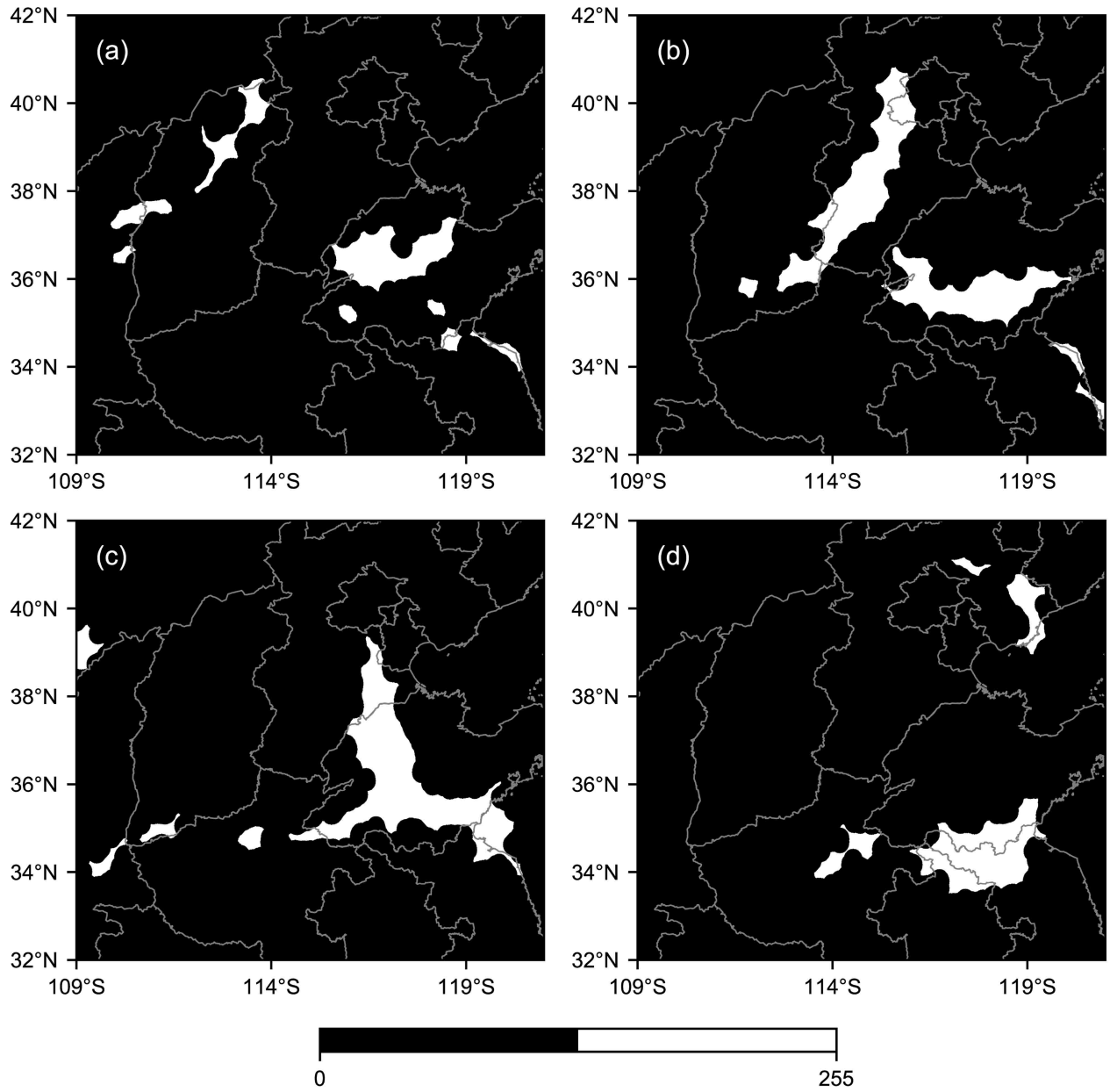

图 4　同图 2，但为回波二值化图像闭运算结果

Fig. 4　Same as Fig. 2, but for the closed operation of echo binarized images

程进行识别。为方便讨论该方法在科研及业务应用中的前景，还将结合灾害天气实况对识别结果进行移动特征的量化分析。孙继松等（2013）等根据单体传播方向和 QLCSs（雨带）移动特征将线状多单体风暴分为两类进行 QLCSs 的致灾机理研究，引言已经指出依据移动特征的 QLCSs 分类研究有重要意义，但大多数研究成果都缺乏定量分析。所以本文在骨干有效识别的基础上，将继续量化 QLCSs 移速、伸展方向等信息。此外，移动速度和方向的矢量化还可应用于 QLCSs 的监测及外推预报业务。

具体量化方法是在识别出各时次骨干的基础上，利用骨干的中心位置求得各时次的移动矢量，利用初始和结束时刻骨干中心位置的距离以及系统持续时间，计算 QLCSs 整体移动速度；然后利用各时次移动矢量和各时次骨干两端点，构成 QLCSs 伸展方向求得 QLCSs 移动方向与伸展方向的夹角；最后将多时次结果进行平均得到 QLCSs 移动方向和伸展方向的平均夹角。由于目前已有文献中尚未见到我国完整的 QLCSs 过程个例库作为参考标准，所以按照本文定义主观挑选出 2016 年 6 月安徽地区的 QLCSs（表 2），人工判断给出发生区域和始

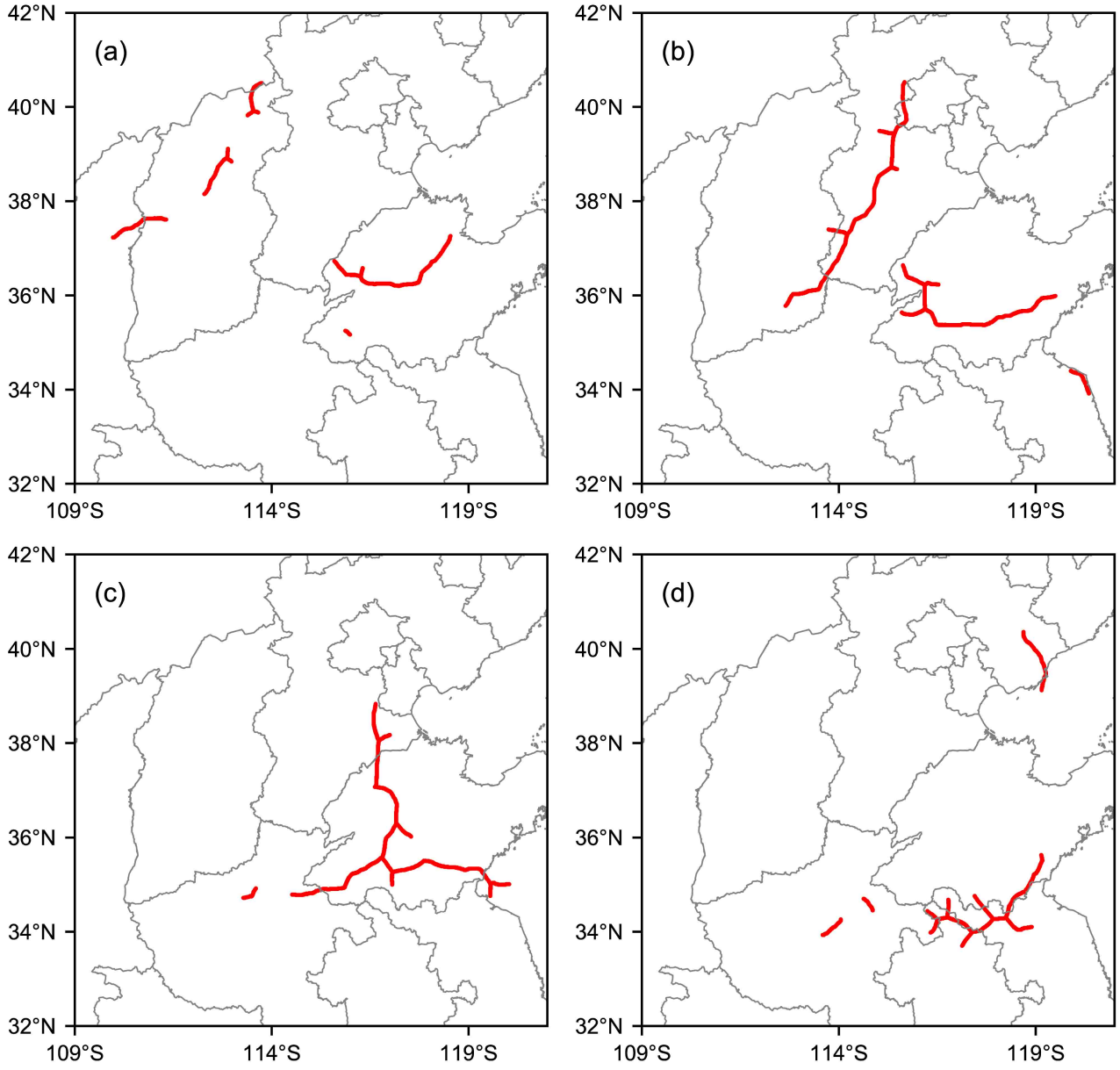

图 5 同图 2，但为回波二值化图像骨架

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the skeletons of echo binarized images

表 2　2016年6月安徽地区的QLCSs主、客观识别结果对比

Table 2　Comparison of subjective and objective identifications of QLCSs in June 2016 in Anhui Province

	QLCSs主观筛选结果			QLCSs客观识别及量化结果			
序号	发生时段	持续时间/min	发生区域	识别时段	持续时间/min	QLCSs整体移速/m s^{-1}	QLCSs移动方向和伸展方向平均夹角/(°)
1	2日02:20～09:00	400	安徽南部	02:50～08:50	360	13	14
2	5日01:20～09:40	500	安徽西北部	01:30～09:20	470	10	68
3	11日16:10～12日01:10	540	安徽中南部	16:20～01:40	560	6	50
4	19日19:10～23:40	270	安徽中南部	19:30～23:24	234	12	5
5	20日03:48～07:30	220	安徽中东部	03:12～07:30	256	3	12
6	20日22:36至21日07:30	534	安徽中北部	22:48～07:12	504	12	15
7	22日06:30～09:30	180	安徽西南部	06:12～09:30	198	12	49
8	24日10:18～19:00/	522	安徽中西部	10:24～19:24	540	4	65
9	26日14:12～18:00	228	安徽中东部	14:30～18:12	222	17	65
10	30日17:30至1日00:24	714	安徽中南部	17:36～01:00	744	2	47

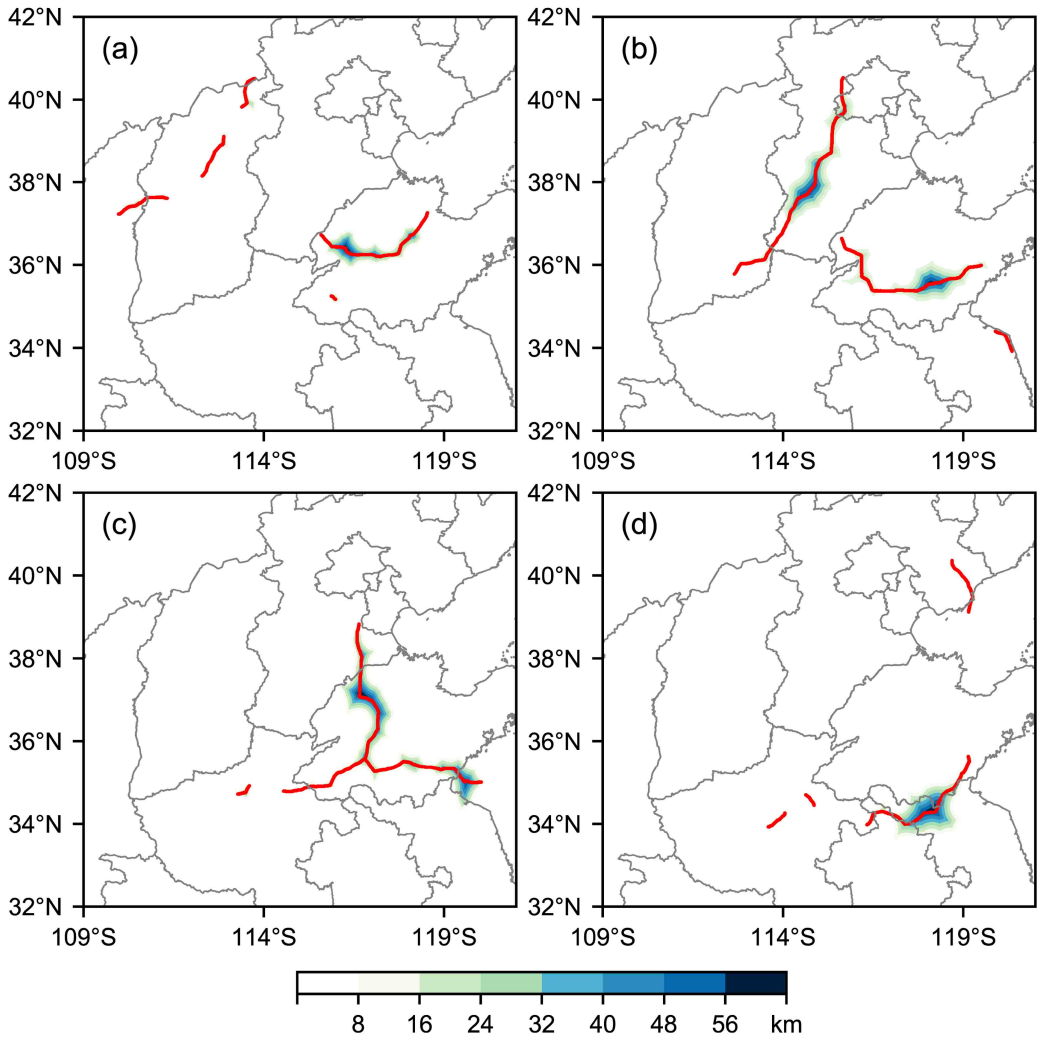

图 6　同图 2，但为回波二值化图像骨干和几何距离转换（EDT）结果分布。图中阴影表示图 4 中白色区域内的点到黑色边界的最短距离，单位：km

Fig. 6　Same as Fig. 2, but for the backbones of echo binarized image and distributions of Euclidean Distance Transform (EDT) results. Shadings represent the shortest distance from the point in the white area to the black boundary in Fig, 4, units: km

末时间。

根据骨架识别算法给出安徽地区 2016 年 6 月 QLCSs 过程轨迹图（图 9），叠加 QLCSs 生命史内出现灾害性天气大暴雨（>100 mm）和雷暴大风（>17.2 m s^{-1}）的站点，结合表 2 的人工和自动识别结果进行分析。

从识别结果看，客观方法得到的线状对流过程数目与主观判别一致，按照本文标准合理有效的识别出 10 个线状对流过程，没有出现漏报空报（表 2）。但生成、消亡时间上有所差别，最大误差为 30 min，从维持时间上来看，生命史最大误差为 40 min。人工选择时，100 km 及 5∶1 长宽比是很难用肉眼量化的，主观性较强，骨架量化算法会减少主观筛选的不确定性，结果相对更加客观。客观量化得到 QLCSs 生命史最长为 744 min（图 9j），大部分维持在 4～9 h 之间。两条大风为主的 QLCSs 过程（图 9b、g）均主要发生在下午时段，但是区域性暴雨为主的 QLCSs（图 9c、d、e、f、j）主要发生时段为夜间到上午时段，与降雨日变化的统计结果一致（Sun and Zhang, 2012; 宇如聪等, 2014; 孙建华等, 2018），可见系统发生时间的量化工作对于 QLCSs 致灾性机理研究有一定的应用价值。

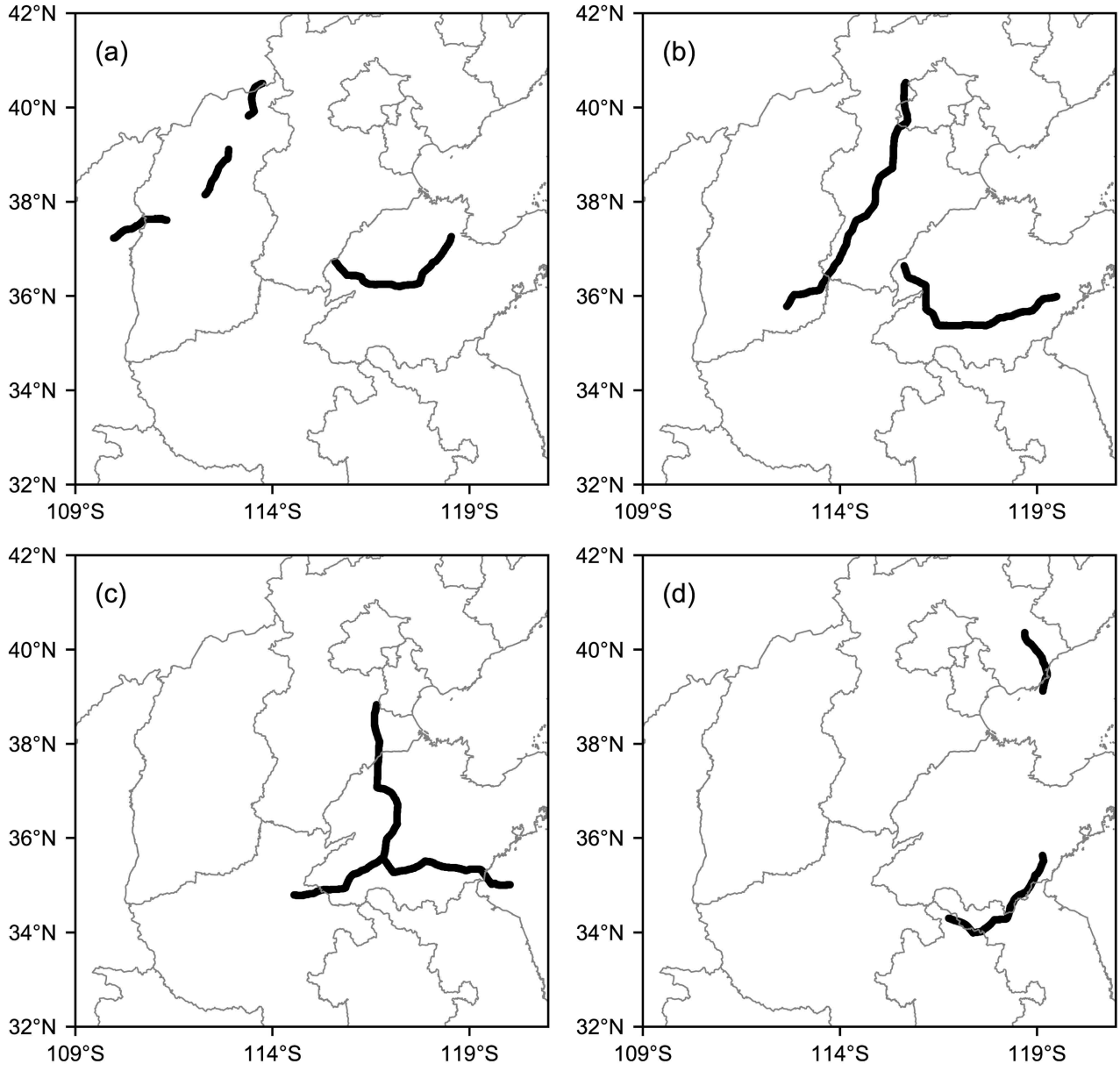

图 7 同图 2，单时次 QLCSs 识别结果

Fig. 7 Same as Fig. 2, but for single-time identification results of QLCSs

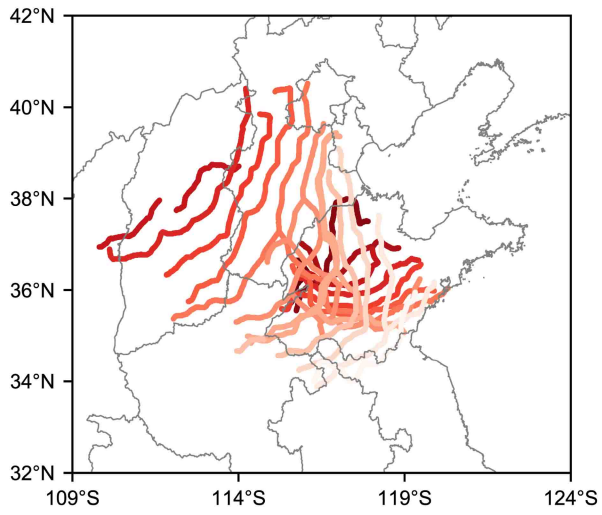

图 8　2016 年 6 月 13 日双 QLCSs 过程骨干图（1 h 间隔，颜色越深代表时间越早）

Fig. 8　Backbone map of double QLCSs on 13 June, 2016 (1-hour intervals, the darker the color, the earlier the time)

识别效果整体看，识别出的骨干较平滑，没有出现断裂现象，骨架提取合理，骨刺去除后较完整地保留了回波带的线状信息。图 9a、b、d、e、g、h、i 对流体形状结构相对简单，移动趋势显著。识别效果对比雷达原始图像可见，识别出的骨干结构清晰，直观准确地描述了 QLCSs 形态演变和移动特征。图 9f、j 为大尺度长生命史锋面降水回波带，回波形态相对复杂，图 9f 回波带后期出现转向和倒退等特征，也合理的识别出来。图 9j 中 QLCSs 东段 QLCSs 伸展方向发生明显改变，且整条 QLCSs 南北摆动，骨干较好的体现这些特征。图 9c 中 QLCSs 更为复杂，南北两条回波带相连，由于后向传播，形状多变，呈现出“工”字等形状，但本方法依然有较强的识别能力，对比上一节的双飑线人字形回波识别结果，都很好展示了本方法的合理性。

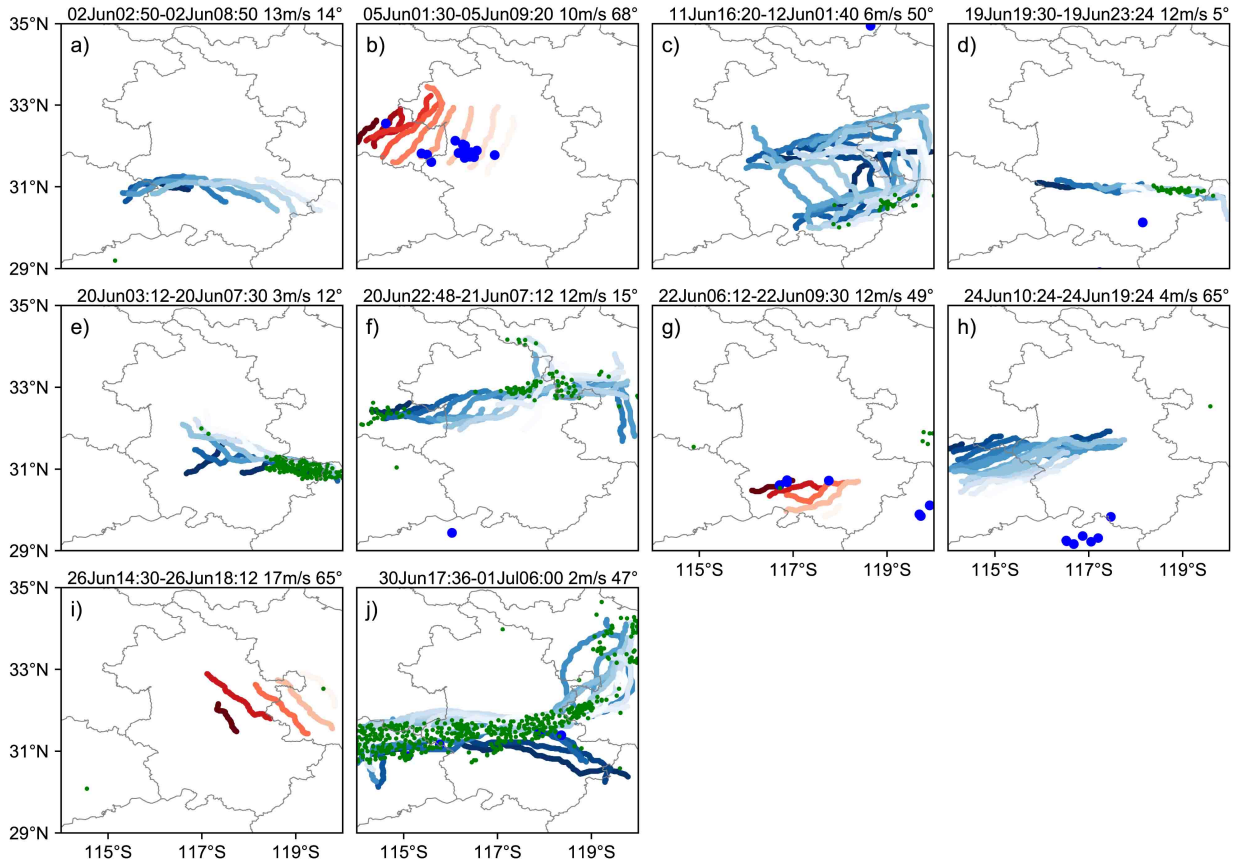

图 9　2016 年 6 月安徽地区 QLCSs 识别结果（轨迹线间隔均为 1 h，颜色越深代表时间越早，红色轨迹线表示 QLCSs 移动方向与伸展方向平均夹角大于 45°、移动速度快于 10 m s^{-1}。绿色点为 QLCSs 发生时段内累积雨量>100 mm 站点，蓝色点为瞬时风速>17.2 m s^{-1} 雷暴大风站点）

Fig. 9　Maps of QLCSs in June 2016 in Anhui Province (1-hour intervals, the darker the color, the earlier the time. The red lines indicate QLCSs with velocities greater than 10 m s^{-1}, and an angle between the moving vector and the direction of QLCS greater than 45°. The green dots indicate stations with accumulated rainfall > 100 mm and the blue dots stations with wind speeds > 17.2 m s^{-1})

移动特征量化与灾害天气关系来看，孙继松等（2013）的研究结果认为，QLCSs 中冷池驱动的单体传播方向与 QLCSs 伸展方向夹角大，移动速度快，易产生大风天气，当单体传播方向与 QLCSs 伸展方向一致时，列车效应明显，系统移速慢，则会产生强降水天气。本文识别的 QLCSs 的移动特征和发生天气现象的关系基本符合孙继松等（2013）的结果。图 9b、g、i 系统平均移速达到 10 m s^{-1}，QLCSs 伸展方向和移动方向夹角大于 45°，其中图 9b、g 监测到 8 级以上大风。图 9e、h、j 系统移速慢（不大于 5 m s^{-1}），其中两个过程（图 9e、j）发生区域性大暴雨。图 9a、d、f 的 QLCSs 移动方向与伸展方向夹角小（不大于 15°），有两个过程（图 9d、f）伴有暴雨天气。准静止锋面上 QLCSs 南北摆动且维持时间长（图 9j），量化移动特征显示系统平均移速为 2 m s^{-1}，QLCSs 移动方向与伸展方向夹角 47°，生命史 744 min，客观有效的表征了此类 QLCSs 的移动特点，站点监测显示 QLCSs 停滞的长江中下游地区发生了大范围大暴雨过程。

为更清晰阐述 QLCSs 移动方向与伸展方向夹角、QLCSs 移动速度、持续时间与致灾性天气的关系，可将 10 个过程分为四种类型（图 10），产生大风天气的过程分布在 B 区，夹角大，移速快。而大暴雨过程在 A、C、D 区域均有分布。上面分析可知夹角小、移速慢，持续时间长都有利于暴雨产生，显然 C 区夹角小、移速慢最易产生暴雨，且不一定需要较长持续时间。A 区移速慢，但夹角大，需配合较长的持续时间（如稳定少动的大尺度雨带）才可以产生大暴雨。D 区夹角小，容易发生

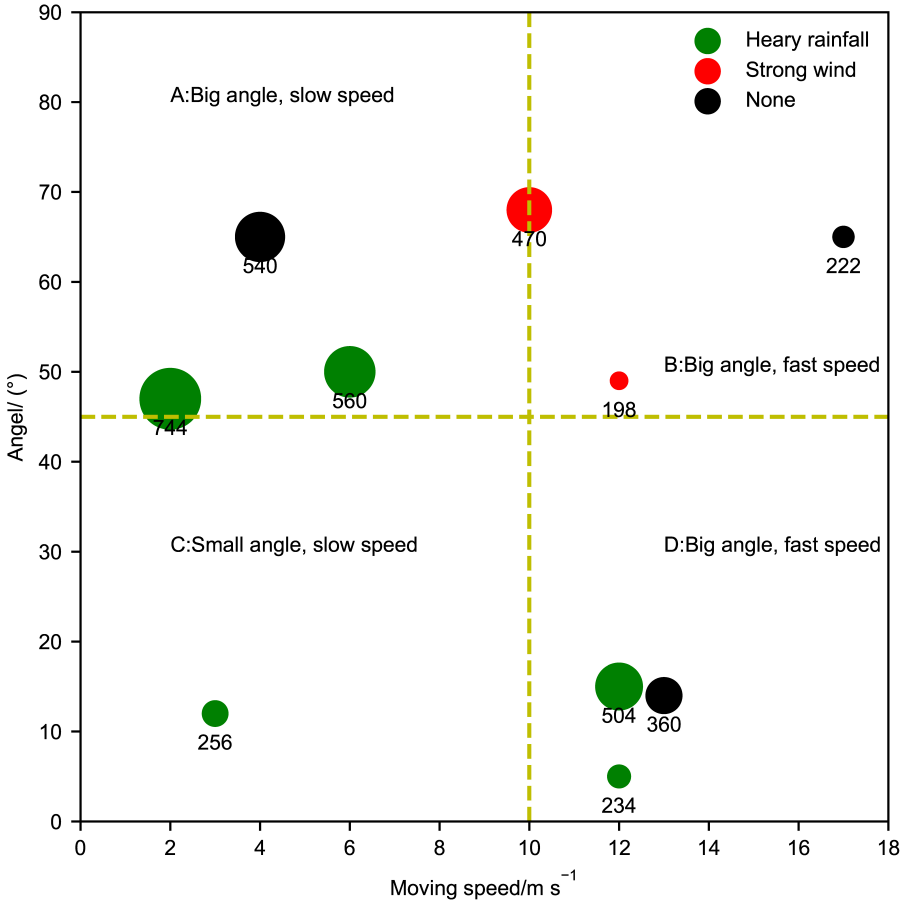

图 10 QLCSs 移动方向和伸展方向平均夹角与 QLCSs 移速散点图。绿点代表大暴雨过程；红点代表 8 级以上大风过程；黑点表征无上述两类天气发生的过程。持续时间（单位：min）用数字标在点的下方，并与点的面积成正相关

Fig. 10 Scatter diagrams of AMS (the angle between the moving vector and the extension direction of the QLCSs) and moving speed of the QLCSs, with green dots representing a large heavy rain process, red dots a gale process greater than force 8, and black dots a process without the above two kinds of weather; duration (units: min) is indicated as a number below the point and has a positive correspondence with the size of the dot

列车效应，即使移速快，且也不一定配合较长的持续时间，就可以发生大暴雨天气。可见四种类型的致灾天气过程背后的机制可能有所区别。当然这里只有 10 个过程，并不具备统计意义，作为简单的分类结论需要将来大样本的结果支持。

以上初步分析表明 QLCSs 移动特征与灾害天气密切相关，基于骨干的量化工作对于致灾天气分析有重要意义，未来结合量化结果和大气环境场进行灾害天气诊断有很好的应用前景。

5　结论

本文结合中尺度线状对流系统（QLCSs）的标准，对计算机图像学中的骨架提取算法进行改进并应用于 QLCSs 的识别。首先使用二值化、闭运算等手段对 40 dBZ 以上的回波图像进行预处理，在二值化图像基础上求得骨架并进行修剪，得到拓扑结构完整、连续性好的骨干，最后借助骨架中轴的特性量化长宽比，从而实现 QLCSs 的自动有效识别。

此方法最终识别出的对流系统骨干有较好的形状描述能力，无论是特殊形态的双 QLCSs、人字形，还是更为复杂多变的大尺度降水回波带，骨干都能合理准确的保留原回波图像的有效形状信息，对 QLCSs 转向、摆动有很好的描述能力。利用该方法对安徽地区 2016 年 6 月发生的对流系统进行自动识别，并给出量化的移动特征分析，结果表明该方法在有效识别的基础上，还可用于致灾性 QLCSs 移动特征的分类研究，为开展 QLCSs 的长序列统计及致灾机理分析工作提供个例的客观识别方法和定量分析指标，同时移动矢量的量化也为 QLCSs 的短临监测预警业务提供新的思路。

本文在自动识别 QLCSs 的方法上做了初步尝试，将有助于 QLCSs 的气象学致灾机理研究。未来将普查我国 QLCSs 较长时段的统计特征，建立 QLCSs 致灾过程个例库，为研究该类系统的发生发展机理打下基础。

参考文献（References）

Blum H. 1967. A transformation for extracting new descriptors of shape [M]//Walthen-Dunn W. Models for the Perception of Speech and Visual Form. Cambridge: MIT Press, 362–380.

曹艳察, 张涛. 2016. 2016 年 6 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 42(9): 1154−1160.　Cao Yancha, Zhang Tao. 2016. Analysis of the June 2016 atmospheric circulation and weather [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42(9): 1154−1160. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.013

Cooper D M L, Turinsky A L, Sensen C W, et al. 2003. Quantitative 3D analysis of the canal network in cortical bone by micro-computed tomography [J]. Anat. Rec., 274B(1): 169−179. doi:10.1002/ar.b.10024

Dey T K, Zhao W L. 2004. Approximating the medial axis from the Voronoi diagram with a convergence guarantee [J]. Algorithmica, 38(1): 179−200. doi:10.1007/s00453-003-1049-y

Dimitrov P, Phillips C, Siddiqi K. 2000. Robust and efficient skeletal graphs[C]//Proceedings of 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island, SC, USA: IEEE, 417–423. doi: 10.1109/CVPR.2000.855849

Dixon M, Wiener G. 1993. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 10(6): 785−797. doi:10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2

Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Wea. Forecasting,11(4):560−581.doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2

Geerts B. 1998. Mesoscale convective systems in the Southeast United States during 1994–95: A survey [J]. Wea. Forecasting, 13(3): 860−869. doi:10.1175/1520-0434(1998)013<0860:mcsits>2.0.co;2

Haberlie A M, Ashley W S. 2018. A method for identifying midlatitude mesoscale convective systems in radar mosaics. Part I: Segmentation and classification [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 57(7): 1575−1598. doi:10.1175/JAMC-D-17-0293.1

Haberlie A M, Ashley W S. 2019. A radar-based climatology of mesoscale convective systems in the United States [J]. J. Climate, 32(5): 1591−1606. doi:10.1175/JCLI-D-18-0559.1

韩雷, 郑永光, 王洪庆, 等. 2007. 基于数学形态学的三维风暴体自动识别方法研究 [J]. 气象学报, 65(5): 805−814.　Han Lei, Zheng Yongguang, Wang Hongqing, et al. 2007. 3D storm automatic identification based on mathematical morphology [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(5): 805−814. doi:10.11676/qxxb2007.076

Ivanov D, Kuzmin E, Burtsev S. 2000. An efficient integer-based skeletonization algorithm [J]. Comput. Graph, 24(1): 41−51. doi:10.1016/S0097-8493(99)00136-3

Kamani M M, Farhat F, Wistar S, et al. 2018. Skeleton matching with applications in severe weather detection [J]. Appl. Sof. Comput., 70: 1154−1166. doi:10.1016/j.asoc.2017.05.037

Kimmel R, Shaked D, Kiryati N, et al. 1995. Skeletonization via distance maps and level sets [J]. Comput. Vis. Image Und., 62(3): 382−391. doi:10.1006/cviu.1995.1062

Lee T C, Kashyap R L, Chu C N. 1994. Building skeleton models via 3-D medial surface axis thinning algorithms [J]. Comput. Vis. Image Und., 56(6): 462−478. doi:10.1006/cgip.1994.1042

Meng Z Y, Yang D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China [J]. Mon. Wea. Rev., 141(5): 1629−1647. doi:10.1175/MWR-D-12-00208.1

Moudgalya S S, Wilson K, Zhu X X, et al. 2019. Cochlear

pharmacokinetics-micro-computed tomography and learning-prediction modeling for transport parameter determination [J]. Hearing Research, 380: 46−59. doi:10.1016/j.heares.2019.05.009

Orlanski I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56(5): 527−530. doi:10.1175/1520-0477-56.5.527

Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. Mon. Wea. Rev., 128(10): 3413−3436. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<3413:omommc>2.0.co;2

盛杰, 郑永光, 沈新勇, 等. 2019. 2018 年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析 [J]. 气象, 45(2): 141−154. Sheng Jie, Zheng Yongguang, Shen Xinyong, et al. 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(2): 141−154. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.001

孙虎林, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 2009 年 6 月 3~4 日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析 [J]. 大气科学, 35(1): 105−120. Sun Hulin, Luo Yali, Zhang Renhe, et al. 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3–4 June 2009 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1): 105−120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.09

孙建华, 周海光, 赵思雄. 2006. 2003 年 7 月 3~5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析 [J]. 大气科学, 30(6): 1103−1118. Sun Jianhua, Zhou Haiguang, Zhao Sixiong. 2006. An observational study of mesoscale convective systems producing severe heavy rainfall in the Huaihe River basin during 3–5 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(6): 1103−1118. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.05

Sun J H, Zhang F Q. 2012. Impacts of mountain–plains solenoid on diurnal variations of rainfalls along the Mei-Yu front over the East China plains [J]. Mon. Wea. Rev., 140(2): 379−397. doi:10.1175/MWR-D-11-00041.1

孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. 大气科学, 37(3): 705−718. Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 705−718. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12202

孙建华, 卫捷, 傅慎明, 等. 2018. 江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型 [J]. 大气科学, 42(4): 741−754. Sun Jianhua, Wei Jie, Fu Shenming, et al. 2018. The multi-scale physical model for persistent heavy rainfall events in the Yangtze–Huaihe River valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 741−754. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17246

孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制 [J]. 大气科学, 37(1): 137−148. Sun Jisong, He Na, Guo Rui, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(1): 137−148. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12015

孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 2015. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征 [J]. 气象学报, 73(4): 609−623. Sun Jisong, Lei Lei, Yu Bo, et al. 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73(4): 609−623. doi:10.11676/qxxb2015.044

Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications [J]. Mon. Wea. Rev., 131(11): 2804−2823. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2804:lmwsla>2.0.co;2

王晓芳, 崔春光. 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I : 组织类型特征 [J]. 气象学报, 70(5): 909−923. Wang Xiaofang, Cui Chunguang. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: Organization mode features [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70(5): 909−923. doi:10.11676/qxxb2012.077

吴瑞姣, 陶玮, 周昆, 等. 2019. 江淮灾害性大风飑线的特征分析 [J]. 气象, 45(2): 155−165. Wu Ruijiao, Tao Wei, Zhou Kun, et al. 2019. General features of squall lines with disastrous gale in the Yangtze Huaihe area [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(2): 155−165. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.002

Yang X L, Sun J H. 2018. Organizational modes of severe wind-producing convective systems over North China [J]. Adv. Atmos. Sci., 35(5): 540−549. doi:10.1007/s00376-017-7114-2

宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 2014. 中国大陆降水日变化研究进展 [J]. 气象学报, 72(5): 948−968. Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72(5): 948−968. doi:10.11676/qxxb2014.047

俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 11–12. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2006. Doppler Weather Radar Principle and Business Applications [M]. Beijing: China Meteorological Press, 11–12.

俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析 [J]. 气象, 38(11): 1313−1329. Yu Xiaoding. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 38(11): 1313−1329.

张琴, 孟伟, 朱敏, 等. 2017. 2016 年 6 月 13–14 日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析 [J]. 海洋气象学报, 37(4): 101−112. Zhang Qin, Meng Wei, Zhu Min, et al. 2017. Characteristics and cause analysis of the strong convection weather processes in Shandong during 13–14 June 2016 [J]. J. Mar. Meteor. (in Chinese), 37(4): 101−112.

Zhang T Y, Suen C Y. 1984. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns [J]. Commun. ACM, 27(3): 236−239. doi:10.1145/357994.358023

张小玲, 杨波, 盛杰, 等. 2018. 中国强对流天气预报业务发展 [J]. 气象科技进展, 8(3): 8−18. Zhang Xiaoling, Yang Bo, Sheng Jie, et al. 2018. Development of operations on forecasting severe convective weather in China [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 8(3): 8−18. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.001

Zheng L L, Sun J H, Zhang L X, et al. 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China [J]. Wea. Forecasting, 28(5): 1081−1098. doi:10.1175/WAF-D-12-00088.1