

为了龙卷风预警：从约翰·芬利到藤田哲也

■ 闻新宇（本刊特约撰稿人）

朱清照 贾喆

龙卷风在广阔的美国中部地区十分常见。美国空军气象学家厄尔尼斯特·法布什与罗伯特·米勒上尉最早于1952年首次使用“龙卷风走廊”（Tornado Alley）一词来形容龙卷风经常光顾这里。美国国家气象局（NWS）至今未对“龙卷风走廊”的空间范围给出明确定义，但广义上可理解为西起落基山脉、东至阿巴拉契亚山脉、南到墨西哥湾、北至美加边界的广大美国中部地区，狭义上可理解为从德克萨斯州到南达科达州的南北向狭长地带（图1）。在这里，从墨西哥湾来的暖湿空气与从落基山脉、加拿大来的干冷空气相交汇，容易形成各种雷暴和超级单体，而龙卷风就是这些强对流天气系统在平移过程中低压中心接地产生的极具破坏力的现象。“龙卷风走廊”里的各个州，每年都会经历数十个龙卷风，其中德克萨斯州、俄克拉荷马州和堪萨斯州是遭受龙卷风袭击最严重的州。这3个州从1950—2009年共计遭遇了8049次、3443次和3809次龙卷风袭击，成为名副其实的“龙卷风之乡”。

一、芬利：超越时代的努力（1870s—1940s）

美国人征服龙卷风的历史可以追溯到150年前。随

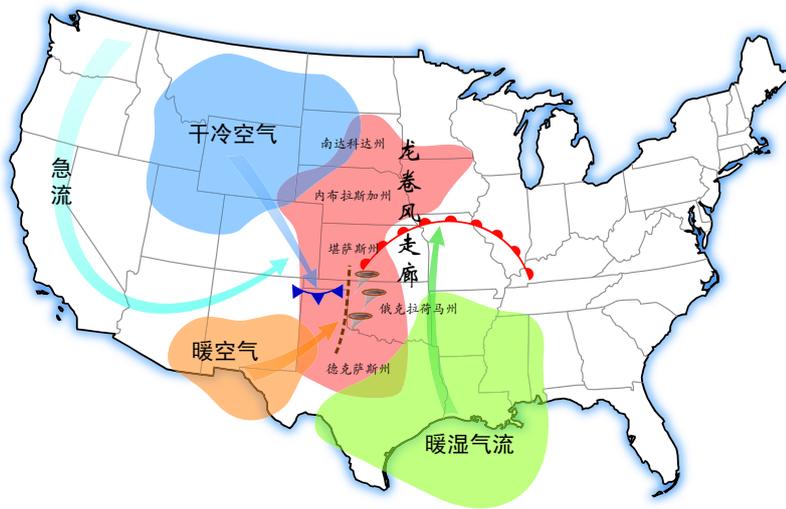


图1 美国的“龙卷风走廊”示意图^①

^① 摘译自维基百科，http://en.wikipedia.org/wiki/Tornado_Alley

【编者语】

2013年5月20和31日，两场EF5级龙卷风（Moore Tornado和El Reno Tornado）先后袭击了俄克拉荷马城。前者扫过人口稠密地区，导致包括7名儿童在内的24人死亡、377人受伤，建筑损毁不计其数；后者也造成18人死亡的惨剧。最为不幸的是，美国探索频道“追风者”节目主持人蒂姆·萨马拉斯——曾无数次站在距龙卷风仅几英里的地方向观众现场报道龙卷风发展实况的著名追风者，却在后一次龙卷风中意外罹难。为了纪念这名为探索自然而不幸死去的勇士，全球各大主流媒体都纷纷报道此事，《美国国家地理》甚至毫不吝惜地将萨马拉斯收录到“探索者”名单中，以表彰他带给人类的勇气。本文作者受到此次事件的触动，着手撰写这篇文章，为读者讲述龙卷风预警工作的发展历程。

着当时西进运动的展开和美国内战的结束，大量东海岸的白人开始向中西部移民并定居。但龙卷风这种恶魔般的天气却始终困扰着这个年轻的国家。越来越多的新移民在精心挑选的定居点安顿下来后，房屋却在毫无准备的情况下被无情的龙卷风瞬间摧毁。当时哪怕是气象学家也不知道这种令人恐怖的风暴究竟从何而来，是如何形成的。因此，人们只能蒙昧地怀疑是西进运动中修建铁路、架设电线和大面积开荒导致的。很多人因此退出了西进征程，甚至离开了这个国家。

当时美国的气象部门隶属于美国陆军通信兵团，在每次接到龙卷风袭击的报告后，他们会派人去记录龙卷风的轨迹、现场破坏程度等，这些数据被忠实地记录并归档，成为早期最原始的龙卷风观测记录。约翰·芬利（John P. Finley，图2）第一次奉命去调查1879年5月29—30日横扫堪萨斯州、内布拉斯加州和爱荷华州的龙卷风群时，就对这种神秘的、极具破坏性的天气现象产生了巨大的兴趣和责任感。他对灾难带给人们的惨重伤亡（这场龙卷风共造成42人死亡，262栋房屋被摧毁）和心理阴影都留下了深刻的印象。这次调查工作将芬利的一生都与龙卷风紧紧地联系在一起。

芬利于1854年生于密歇根州的安娜堡市，他研究生期间在密歇根州立农机学院研究气象和气候对农业的影响，并因此获得了硕士学位。后来他用一年时间在密歇根大学学习法律。1877年，



图2 约翰·芬利 (John P. Finley)

芬利被陆军通信兵团录取并完成了入职培训后，又到约翰·霍普金斯大学学习了一段时间，期间他深入研究龙卷风和气旋。

芬利是个不折不扣的工作狂。1882年，他新婚不到一个月，就因为精神过度紧张住进了位于华盛顿的军方医院。当时医生的诊断结果是：神经衰弱，有癌变风险，是脑力活动过多所致。药方就是多多休息。芬利之所以如此投入地工作，大概是因为在历次龙卷风灾难中，有很多人、很多瞬间都曾深深触动了芬利的灵魂深处，以至于他怀着巨大的使命感，用了10年时间专心研究龙卷风，并积极倡导为普通民众提供龙卷风预警，让他们脱离苦难。

在没有得到陆军通信兵团领导支持的情况下，芬利用几年的时间靠收集数据组建了一个龙卷风监测网，最多的时候包含2400多个测站。他曾于1884年春天很认真地试验了龙卷风预警，但他所声称的“成功”并没有获得公众认可。同年，威廉·戴维斯 (William M Davis) 在《科学》周刊上撰文专门介绍了芬利有关龙卷风预警的工作，他乐观地表示了对芬利的支持：“将龙卷风定义为大陆性气旋的一种，将再次点燃人们的希望！这意味着通过一段时间的深入研究，也许再过几年，这些小尺度的气旋风暴（龙卷风）就能被成功地预报出来，其准确性就跟现在预报大尺度气旋风暴一样。”

1884年春季预报试验之后，芬利总结出了龙卷风早期预警的经验，发表在1888年的《美国气象学报》(American Meteorological Journal) 上。芬利最重要的观点是：龙卷风是与中纬度气旋紧密联系在一起；龙卷风总是发生在低压中心的东南象限。芬利的研究首次指出了龙卷风是按西南—东北路径移动的，这与冷锋后的高空西北冷气流有关，干冷空气下沉插入南风吹来的暖湿

空气对龙卷风的形成至关重要。他还首次给出了促成龙卷风形成的一整套地表气象条件，这是最早的有关龙卷风预警的科学结论，至今仍对强风暴预警具有指导意义。芬利将这些经验概括为15条规则，即著名的“芬利15条规则”(Finley's 15 Rules)。

1885年，芬利希望再次尝试在龙卷风季开展预警试验。他动议在堪萨斯城建一个专门用于观测龙卷风的台站，用于给大平原地区的人们提供实时的龙卷风预警，但这个建议最终没有被保守的陆军通信兵团所采纳。更糟的是，陆军通信兵团在1885年中发布了一项彻底禁止发布龙卷风预警的禁令，甚至连“龙卷风”这个词都不许再提，理由是“不论是当前气象科学的发展水平，还是国家对龙卷风预报的实际需求，都无法支持进行这种预报。龙卷风预报一旦错误，所带来的损失比龙卷风本身造成的损失还要大。”

通信兵团对龙卷风预警的禁令，彻底斩断了科学界开展龙卷风研究的可能性。到了1886年，经美国国会的特别调查，气象服务的重任从陆军通信兵团转移到了农业部，使得美国的气象业务终于摆脱了保守的、军人与科学家长期争斗的军事化管理。但即使这样，新成立的农业部气象局仍然没有解除禁止龙卷风预警的禁令。科学界在龙卷风研究上就这样被人为停滞了长达60年之久，直到二战结束时这项禁令才被取消。

1885年之后，芬利因在龙卷风方面的科研经费逐渐枯竭而不得不转到其他工作上去。尽管这样，芬利仍然绘制了1760—1885年美国的龙卷风分布图(图3)。到了1891年，陆军通信兵团彻底失去了对国家天气服务的控制，芬利在通信兵团中的位置也走到了风雨飘摇的一天。像所有兵团中的军人一样，他可以选择留下来继续供职于军队，也可以选择退役后以平民身份加入农业部气象局。尽管芬利一生都热爱龙卷风的研究，但他最终还是选择保留通过辛苦晋升才获得的军衔，继续为通信兵团服务。

芬利对龙卷风的研究究竟效果如何？1925年3月18日，美国历史上最强的一次龙卷风袭击了密苏里州、伊利诺伊州和印地安那州，后称“三州大龙卷”。这次龙卷风的移动路径长达219英里，共造成695人死亡、2000多人受伤。事后，气象学家奥弗雷德·亨利 (Alfred J Henry) 在《每月天气评论》(Monthly Weather Review) 上撰文指出：“在这次三州大龙卷发生之前，芬利的15条规则中有9条都是正确的。芬利的工作显然可以帮助预报员识别龙卷风出现的可能性，尽管并不能用来提前做出精确的龙卷风预报。”

1943年底，约翰·芬利在遗憾中走完了自己的一生，他没有在生前看到龙卷风预警体系的建成。而就在这一年，美国气象局在将近60年之后决定重启龙卷风研究工作，在堪萨斯州和密苏里州搭建了试验性的龙卷风预警系统。

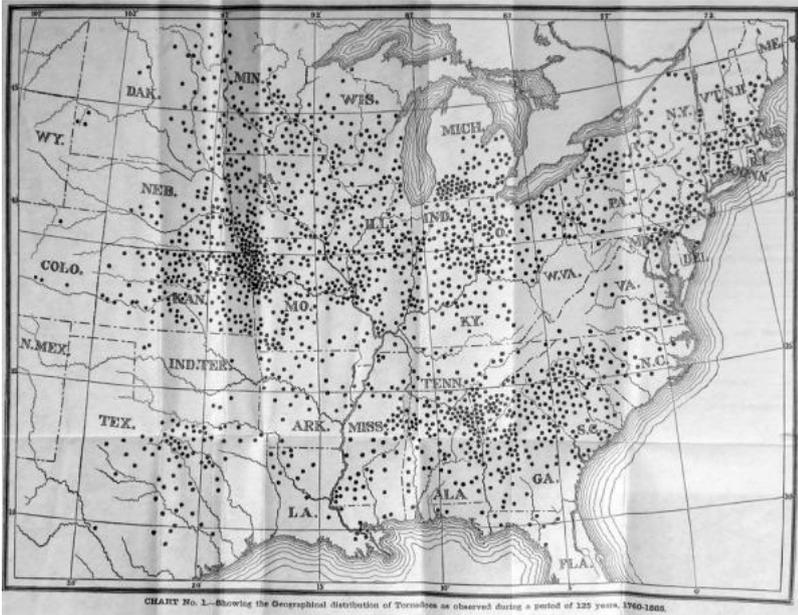


图3 芬利于1887年汇编并绘制出版的1760—1885年美国龙卷风分布

二、重启龙卷风预警（1940s—1970s）

1942年美国中部地区经历了一连串的龙卷风袭击，前后共132个龙卷风造成223人死亡和700多万美元的经济损失。这促使美国气象局开始认真考虑重启龙卷风项目的必要性。1943年，气象局在堪萨斯州的威奇托市、密苏里州的堪萨斯市和圣路易斯市建立了试验性龙卷风预警系统，并在1944年6月进一步要求全国各地的气象员在常规业务气象观测中加入对龙卷风、强雷暴、冰雹、闪电和强风几种天气现象的记录。

到了1940年代后期，两名军方科学家对龙卷风预警的大胆尝试进一步增强了人们对龙卷风预警的热切期盼。1948年3月20日，一个龙卷风毫无征兆地突然袭击了位于俄克拉荷马城的Tinker空军基地，造成32架飞机和1000万美元的巨大损失。5天之后，空军气象学家法布什和米勒再一次观测到与5天前高度相似的天气形势，于是他们勇敢地发布了第一个龙卷风预警，并在Tinker空军基地启动了“龙卷风安全预案”，当天晚上6时，龙卷风如期而至，但这一次只造成了600万美元的损失，除此之外无一伤亡。这件事极大地激励了美国媒体和美国气象局，人们热切期望气象局能借鉴米勒二人的方法，为广大的美国中部地区做出有时效性的龙卷风预警。

在二战中发展起来的雷达技术，则为龙卷风预警提供了技术上的可能性。在第二次世界大战中，美国使用先进的雷达探测技术监测纳粹敌军的飞机和舰艇，但战时，人们常常困扰于雷达回波中杂波的干扰，这是扫描方向上降水对无线电波的影响。战后，人们把雷达回波中的杂波当作信号，为实时监测降雨提供了可能。

最终，出于现实的需要，以米勒等军队科学家的成功实践为模板，再加上雷达等新探测设备的应用，美国

气象局于1950年正式推出了“龙卷风计划”。该计划在堪萨斯州和俄克拉荷马州实施，共有134个正规气象站和34个合作台站参与其中。雷达由气象局和美国空军气象部共同支持，包括气象局在堪萨斯州威奇托市和内布拉斯加州的诺福克市的雷达；美国空军气象部在Offutt空军基地（奥马哈市，内布拉斯加州）、Sherman空军基地（莱文沃斯市，堪萨斯州）和Vance空军基地（伊尼德市，俄克拉荷马州）的雷达。通过“龙卷风计划”的顺利实施，美国气象局成功开启了以常规气象观测外加雷达实时探测为基础的业务的龙卷风预警工作。

1953年6月，美国气象局在“龙卷风计划”的基础上进一步成立了全新的部门——局地强风暴中心（Severe Local Storms Center, SELS）。SELS建立后系统地总结了芬利和米勒等人的预报经验，

强调了抬升指数（Lifted Index，指定气压层上环境温度与气团温度之差，正指数表示大气稳定，负指数表示大气不稳定）的重要性，并于1955年整合了当时若干个与强风暴有关的科研成果，第一次发布了具有指导性的官方技术文档《预报指南第一辑：龙卷风和强雷暴的预报》（*Forecasting Guide No.1: Forecasting Tornado and Severe Thunderstorm*）。

到1972年时，美国空军气象学家米勒也陆续出版了一系列与龙卷风预警有关的指导手册，后人把书中复杂的结论称为“米勒规则”（Miller's Rules）。米勒这一系列手册中，不仅总结了做龙卷风和强风暴预警必须注意的大气参数，解释了这些参数的物理意义，还定义了完整的与之配套的符号体系。这使得“米勒规则”在强天气预报业务中很快被推广，许多追风者和气象爱好者至今都以熟练掌握“米勒规则”为基本技能。

美国气象部门自二战后重启的龙卷风工作，很快就解决了现实中人们对预警问题的需要。但由于没有任何仪器可以直接测量龙卷风的实际风速，很多进一步的分析、研究工作（从定性到定量的工作）都难以展开，给龙卷风的量化记录和归档也带来了很大麻烦。直到1970年以后，一把用于衡量龙卷风的“尺子”被创造出来，它把龙卷风的风速和事后的破坏程度联系起来，把龙卷风研究推到了可以量化的新阶段。

三、藤田哲也：测量龙卷风（1970s—2010s）

气象学家藤田哲也（Tetsuya Theodore Fujita，简称Ted Fujita，图4）于1920年生于日本北九州市，大学时在九州工业大学工学院就读，毕业后留校任教。1953年他获得博士学位后买了一台英文打字机，把自己的研究成

果打成英文稿，寄给芝加哥大学气象系主任赫拉斯·拜尔斯（Horace Byers）。由于拜尔斯刚刚完成一个美国政府资助的研究强雷暴的科研项目，他仔细阅读了藤田发来的文稿并对其印象深刻，于是当即决定邀请藤田哲也来芝加哥大学任教。



图4 气象学家藤田哲也（Tetsuya Theodore Fujita）

藤田初到芝加哥大学时工作十分努力，工作时间很长，以至于气象系的研究生们私下里称他为“超级藤田”。1957年，藤田对北达科达州遭遇的一场龙卷风进行了细致深入的研究，以至于这项工作后来成为中尺度分析的经典个例。到1971年时，藤田与他妻子藤田纯子一起发展了“藤田级别”，即F-Scale（Fujita Scale），用于描述龙卷风分级与风速和破坏力之间的对应关系（表1）。“藤田级别”把龙卷风分成6级，从风速最小的F0到风速最大的F5。通过对龙卷风事后建筑物的损毁程度进行归类，就可以为龙卷风定级，从而大体确定龙卷风的极值风速。这项研究成为藤田哲也早期标志性的工作，获得广泛认可，他因此获得“龙卷风先生”的雅号。

1974年，美国国家强风暴预报中心（National Severe Storms Forecast Center）雇佣了大批学生，收集整理1950年以来有关龙卷风的各种报刊文献资料，把所有的龙卷风都按照藤田的标准定了级。对1950年之前的龙卷风由

于缺少足够的原始文献而暂时搁置。

2007年时，NOAA庆祝自己200年的历史，“藤田级别”又一次被更新，也称为“增强藤田级别”，即EF-Scale（Enhanced Fujita Scale）。这次只对6个藤田级别的风速做了微调，以更准确地反映龙卷风破坏力与风速之间的对应关系（表1）。在这一年之后，所有的龙卷风便都以最轻的EF0至最强的EF5来进行分级。

藤田哲也从1970年代后期开始，专注于下击暴流、强风暴微结构、雷达弓形回波的研究。其对下击暴流的研究成为了他最重要的科学发现。藤田70岁从芝加哥大学退休后，仍坚持工作，甚至病痛使他无法下床时，他仍在助理的帮助下继续研究。藤田哲也于1998年11月19日在芝加哥的家中逝世，享年78岁。藤田哲也对于龙卷风分级的工作，使得被现有气象观测网漏下的龙卷风仍可以被准确记录和评估，为准确量化现实中难以器测的龙卷风树立了重要的科学基准。

四、新起点

从1970年代以来，众多新的探测技术和计算手段被引入到强天气预报业务中，为不断改进龙卷风预警提供了可能。最典型的莫过于气象卫星的加入、计算机和数值模式的出现以及雷达技术的不断进步。

以雷达为例，目前的龙卷风预警（即所谓的即时预报）高度依赖雷达系统。1973年5月，一个龙卷风袭击了俄克拉荷马城，美国国家强风暴预报中心使用10cm波段多普勒雷达第一次记录了龙卷风整个生命周期的回波形态，这其中不仅包含降水信息，还包含了细致的风结构信息。这一成果促使美国气象部门认识到多普勒雷达是极好的龙卷风和强风暴预警设备。于是1974年多普勒雷达的研究就获得了空前的资金支持。到1988年，美国开始正式进行在全国范围内架设10cm波段的多普勒雷达网。加拿大的多普勒天气雷达网也在1998—2004年间逐渐建成。法国和其他欧洲国家则直到20世纪90年代末至21世纪初才逐步更换为多普勒雷达。我国也在最近10年间建成了基本覆盖全国的多普勒雷达网。在现有的多普勒雷达基础上，双偏振技术于2000年之后也开始进入实用化。将双偏振技术引入多普勒雷达为探测雨滴的几何形态和性质提供了可能，有利于获得多样化的降水类型信息，这是对多普勒雷达的进一步改进。

从2003年起，NOAA开始着手研究用相控阵雷达取

表1 龙卷风的分级

藤田级别 F Scale			增强藤田级别 EF Scale		业务化的增强藤田级别 Operational EF Scale	
F级别	最快1/4英里段的风速 (mph)	最快3秒的风速 (mph)	EF级别	最快3秒的风速 (mph)	EF级别	最快3秒的风速 (mph)
0	40~72	45~78	0	65~85	0	65~85
1	73~112	79~117	1	86~109	1	86~110
2	113~157	118~161	2	110~137	2	111~135
3	158~207	162~209	3	138~167	3	136~165
4	208~260	210~261	4	168~199	4	166~200
5	261~318	262~317	5	200~234	5	200以上

代传统的以抛物线天线为特征的多普勒雷达。这将为龙卷风和强风暴探测提供超高时间分辨率的观测结果，而这些高密度的扫描回波数据，恰恰是预测寿命极短的龙卷风和强雷暴生成、发展及消亡过程所必需的最重要的实时信息。下一代相控阵雷达的组网，将在今后几十年的时间范围内，为进一步提高龙卷风预警的时效性和准确性带来新希望。

经过战后60多年的不断发展，在所有这些新技术的帮助下，今天的龙卷风预警已经可以做到提前15分钟的平均水平（以美国为例）。通过综合使用多普勒雷达的回波信号、气象卫星图像、常规气象观测的同化（分析）数据和数值天气预报产品，并借助发达的预警信息传递网络（如电话、短信、电视、广播和移动互联网等），龙卷风预警已经变成了瞬息之间就可完成的、具有相当高准确性的日常天气服务。在50年前还需要很多预报员手动处理几个小时的数据计算、绘图和决策过程，今天只要不到1秒就能完成。如此迅捷的响应和预警速度，为拯救人民生命财产极大地争取了有效时间。例如，1925年的“三州大龙卷”由于缺少预警一共死亡700多人；而2007年5月4日的EF5级大龙卷，虽然几乎摧毁了堪萨斯州西南部的格林斯堡市，但由于当地气象部门提前39分钟发布了龙卷风预警，美国国家气象局提前10~12分钟向当地所有居民传达了龙卷风警报信息，绝大多数居民都在避难所或地下室躲过了一劫，只造成11人死亡。2013年5月20日的EF5级“穆尔龙卷风”扫过俄克拉荷马城人口稠密地区，美国国家气象局提前44分钟发布了强雷暴预警，提前16分钟拉响了龙卷风警报，最终将死亡人数控制在24人。由此可见，现代化的龙卷风预警对保障人民生命财产安全具有明确而清晰的现实意义。

在过去的150年间，以芬利、米勒和藤田哲也为代表的科学前辈，为了征服龙卷风而不懈努力。今天，尽管在龙卷风预警方面，以美国为代表的许多国家都取得了长足进步，但面对新时代条件下的挑战——如何从有效的监测型预警转变到精确的预报型预警，我们仍然有更长的路要走。为了确保人民的生命财产安全，也为了不辜负曾经为龙卷风预警付出毕生精力的前辈科学家们的努力，我们仍需不断探索。

（作者单位：北京大学）

本文由国家自然科学基金（41005035, 41130962）和中科院战略先导专项（XDA05080801）共同资助。

深入阅读

- Cox J D. 2002. Storm Watchers: The Turbulent History of Weather Prediction from Franklin's Kite to El Niño. Hoboken : John Wiley and Sons Inc.
- Forbes G S, Bluestein H B. 2001. Tornadoes, tornadic thunderstorms, and photogrammetry: A review of the contributions by T. T. Fujita. Bull Amer Meteor Soc, 82: 73-96.
- Galway J G. 1985. J.P. Finley: The first severe storms forecaster. Bull Amer Meteor Soc, 66: 1389-1395.
- Galway J G. 1992. Early severe thunderstorm forecasting and research by the United States Weather Bureau. Weather and Forecasting, 1992, 7: 564-587.
- McDonald J R. 2001. T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita Scale. Bull Amer Meteor Soc, 82: 63-72.
- Schaefer J T. 1986. Severe thunderstorm forecasting: A historical perspective. Weather and Forecasting, 1: 164-189.

（上接71页）

三、结果讨论

“卫星定标”研究的学科领域很广泛，气象学与大气科学是其中涉及较多的领域。美国在“卫星定标”领域具有巨大的研究优势，中国在该领域的研究虽然在近些年有较强劲的势头，但研究质量和学术影响力还与美、德等国存在较大差距。

然而值得一提的是，本文仅分析了大气科学领域内有关“卫星定标”的文献，但是从国内整个“卫星定标”领域来看，国家卫星气象中心的发文量为77篇（其中属于大气科学的文章为42篇）；一些国家卫星气象中心的主要研究者在该领域的发文量也远大于表4给出的数

据。这充分说明国家卫星气象中心本身的研究实力也不容忽视。

除了在卫星定标对气象卫星的应用方面有较大成就外，对卫星定标技

术本身的研究实力也不容忽视。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

表5 SCI-E和CNKI数据库中刊载大气科学领域“卫星定标”主题文献较多的期刊

SCI-E期刊	刊载数量(篇)	CNKI期刊	刊载数量(篇)
Journal of Geophysical Research Atmospheres	217	气象科技进展	12
Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	156	气象	10
Advances in Space Research	154	应用气象学报	10
Atmospheric Chemistry and Physics	48	气象科技	6
Atmospheric Measurement Techniques	37	中国工程科学	2
Journal of Applied Meteorology	35	光谱学与光谱分析	2
Journal of Climate	31	气象学报	2
Radio Science	30	解放军理工大学学报	2
Bulletin of the American Meteorological Society	27	气象科学	2
Journal of the Atmospheric Sciences	21	气候与环境研究	2
Journal of Applied Meteorology and Climatology	17	国土资源遥感	2
Journal of Hydrometeorology	15	红外与毫米波学报	2
Atmospheric Research	14	光学学报	2