

冷空气堆积及其天气影响研究的主要进展

李婧华¹ 索渺清^{1,2} 唐盛³ 侯美亭¹ 张萌¹

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072; 3 云南省气象服务中心, 昆明 650034)

摘要: 冷空气堆积 (cold air damming, CAD) 是低层冷空气受地形阻挡产生的一种中尺度天气现象, 北半球通常发生在山脉的东侧, 造成云量增加、温度降低以及降水类型和降水落区的改变。CAD全年都会发生, 冷季常造成冻雨天气, 暖季往往会触发雷暴、大风、冰雹等强对流天气。在地形作用下地转适应关系的重新调整是CAD形成的动力基础, 但冷平流、绝热冷却和非绝热冷却等热力因子对CAD的形成和发展也至关重要。尽管中尺度数值模式显著提高了CAD事件的预测能力, 但这些模式仍有低估CAD影响和持续时间的倾向, 即便是快速更新的高分辨率中尺度模式也会低估太阳遮蔽的影响, 因此, CAD的预测对研究和预报人员来说一直是个棘手的世界性难题。主要从时空分布、天气影响、形成机理和预报预测等方面对其研究历程进行了回顾。

关键词: 冷空气堆积, 时空分布, 天气影响, 形成机理, 预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.01.008

Study on the Formation of Cold Air Damming and Its Synoptic Impacts

Li Jinghua¹, Suo Miaoqing^{1,2}, Tang Sheng³, Hou Meiting¹, Zhang Meng¹

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 2 Sichuan Key Laboratory of Rainstorm, Drought and Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610072 3 Yunnan Meteorological Service Center, Kunming 650034)

Abstract: Cold air damming (CAD) is a mesoscale weather phenomenon caused by low-level cold air blocked by terrain. In the Northern Hemisphere, CAD usually occurs on the eastern side of mountains, resulting in increased cloud cover, decrease in temperature, and changes in precipitation types and distribution. CAD develops throughout the year, and often causes freezing rain in cold season, and severe convective weather such as thunderstorm, wind and hail in warm seasons. The reshaping of geostrophic adjustment under the terrain effect is the dynamic basics of CAD formation, but the thermal factors such as cold advection, adiabatic and non-adiabatic cooling are also crucial to the formation and development of CAD. Although mesoscale numerical models have significantly improved the predictability of CAD events, these models still tend to underestimate their impacts and duration. Even the rapidly updated high-resolution mesoscale models still undervalue the effects of solar shading. Therefore, CAD prediction has always been a difficult worldwide problem for researchers and forecasters. This paper mainly reviews the CAD research history from spatial-temporal distribution, synoptic impacts, formation mechanism and prediction. There is an absence of research on the most significant CAD on the eastern Tibetan Plateau.

Keywords: cold air damming (CAD), spatial-temporal distribution, synoptic impacts, formation mechanism, prediction

0 引言

复杂的地形会对天气、气候产生较大影响。冷空气堆积 (Cold Air Damming, CAD) 是低层冷空气受地形阻挡所产生的一种中尺度天气现象, 北半球通常发生在山脉东侧^[1-3], 其在海平面气压场上呈“U形”或“楔形”高压倒脊, 垂直方向上呈拱顶状并伴随倾斜逆

温^[4-9]。当东亚冷空气爆发从青藏高原东侧南下, 常堆积在横断山脉以东、南岭山脉以北等大范围地区, 往往造成大范围层云覆盖、持续低温和冻雨天气。特别是2008年我国南方大范围冰冻雨雪极端天气气候事件, 引起了国内外政府部门、防灾减灾机构和科学界的高度关注。此外, 青藏高原东侧是全球中、低纬陆地上层状云出现最多的区域, 层云的强辐射冷却效应和较长的持续时间, 会对地气系统辐射收支造成较大影响^[10-11], 而东亚气候数值模拟能力因对其形成机理缺乏深入的认识而面临挑战^[12]。

本文主要针对国内外开展的冷空气堆积研究进行梳理, 从时空分布、天气影响、形成机理和预报预测

收稿日期: 2020年4月30日; 修回日期: 2021年8月24日
第一作者: 李婧华 (1987—), Email: lijinghua@cma.gov.cn
通信作者: 索渺清 (1968—), Email: ynsmq@foxmail.com
资助信息: 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目 (SZKT201704); 中国气象局气象干部培训学院科研项目 (重2021-015)

等方面对CAD研究历程进行了回顾，有助于了解CAD这一影响我国南方低温天气的天气系统，为未来数值预报模式发展提供借鉴和参考。

1 CAD的时空分布

筑坝的标志是山脉东坡海平面气压场上的高压鼻或脊，在1960年代，人们对此还知之甚少。Baker^[4]研究了高压迎风鼻理论，确认高压脊是一种真实的大气现象。Richwien^[11]提出了CAD的概念，大量研究集中在20世纪80年代，尤其是美国东部阿巴拉契亚山脉因频繁发生CAD而受到特别关注^[5-6,13-14]。Bell和Bosart^[6]利用主观识别方法，首次分析了阿巴拉契亚CAD的时间分布。Bailey等^[8]基于楔形特征开发了客观识别CAD的算法（简称B03）。为了较全面的识别CAD事件，Rackley和Knox^[15]不但改进了B03检测算法，还发展了一套客观的CAD空间范围算法。而Ellis等^[16]通过比较气团类型成功地识别出阿巴拉契亚山脉中部冷季由天气强迫造成的CAD事件。

上述研究发现，CAD是一种全年普遍存在的中小尺度天气现象，阿巴拉契亚山脉东部平均每年超过50天^[15]，每个冷季大约有3~5次强CAD事件^[6]。正如Rackley和Knox^[15]所述，“每年50天对于一种可能显著影响敏感天气预报的现象来说是非常重要的。”如果持续时间超过36小时，则认为是一次强CAD事件^[17]。Stauffer和Warner^[5]发现，CAD通常持续约30小时，而Bell和Bosart^[6]发现弱CAD事件持续约1天。虽然CAD全年都会发生，但冬季最为频繁和强烈^[5-6,15]，春季和夏季也有强CAD事件发生。

CAD一般发生在较大尺度的地形附近。事实上，在美国以外的世界上许多地区，尤其是地中海、东亚、东南亚、南亚和南美洲等区域都存在CAD并有相关研究，但对青藏高原东侧发生的CAD，目前认识非常有限（图1）。青藏高原东侧CAD较早被中国学者



图1 全球CAD分布（绿色椭圆代表CAD）^①

Fig. 1 Cold air damming localities worldwide (green ellipse represents known region of CAD)

① 引自COMET课件。

注意到，顾震潮^[18]在20世纪50年代初发现，在青藏高原东侧有一“死水”区形成，冬半年常有一层薄的冷空气存留在这个区域里。如果不是青藏高原的屏障作用，冷空气不可能经常停留在此。当北方寒潮向南侵袭时，因受到高原东部地形的屏障作用，冷空气逐渐堆积于高原的东侧^[19]。当地面冷高压南侵时，西南地区处于高压的西南侧，多属回流形式影响，冷空气势力较弱。加之经四川盆地的冷空气爬坡向南向西，又受到乌蒙山等山脉阻挡，难以翻越而产生停滞和堆积^[20]。许梓秀等^[21]发现冷空气进入华南以后，青藏高原以东往往在低空出现一层较薄的冷空气垫。丁一汇等^[22]指出，北方冷空气经西北、华北南下后在长江以南呈扇形展开并继续南下，当扇形冷空气的西南翼到达南北走向的横断山脉时，受其阻挡，在山脉以东的广大区域内不断堆积，在云、贵、川、桂、鄂西、湘西低空1500 m以下形成冷空气层，气象上称之为“冷垫”。影响云南的冷空气一定要在四川盆地或贵州有一个堆积的过程，云南当地的预报员称之为冷空气的“铺垫”过程。只有当冷空气“铺垫”到一定厚度时，再加入新的冷空气，才会使之翻越大、小凉山和乌蒙山进入云南滇中地区^[23]。曾明剑等^[24]通过地形敏感试验发现，横断山脉和南岭山脉及邻近山区易于产生CAD而形成倾斜锋区。可以看出，中国学者虽然早就发现在青藏高原东侧有CAD存在，但后续研究并不多。目前对青藏高原东侧CAD的识别和检测方法亟需取得突破，以期获得长时间序列的CAD事件，为青藏高原东侧CAD量化研究和气候分析奠定基础。

2 CAD天气影响

CAD常造成云量增加、持续低温以及降水类型和降水落区的改变。在Bailey等^[8]的CAD气候学研究中，大约4/5的经典CAD都对敏感性天气有显著影响。在沿海地区，CAD与海岸之间的温差可达20℃，当未冻结的降水通过CAD冻结或变得过冷时，CAD可能是区分雨、雨夹雪或冰冻事件的关键因素^[10,25-26]。

如图2所示，近地面CAD是否存在及其厚度和强度大小决定了降水的不同类型。当温度接近冰点时，温度递减率的细微差异将导致降水类型的显著不同。Okada^[27]指出次冻层存在时，容易形成“冰包水”物质在地面冻结。Ronald等^[28]发现，不同降水类型处于逆温层和次冻层的不同位置。Thériault等^[29]通过数值模拟研究了不同降水类型发生时的逆温层温度、厚度、次冻层厚度和地面温度等条件。漆梁波^[30]发现我国南方冻雨主要以暖雨机制为主，冰粒主要以融化机制为主。冰粒的暖层厚度和强度均小于冻雨天气。受地

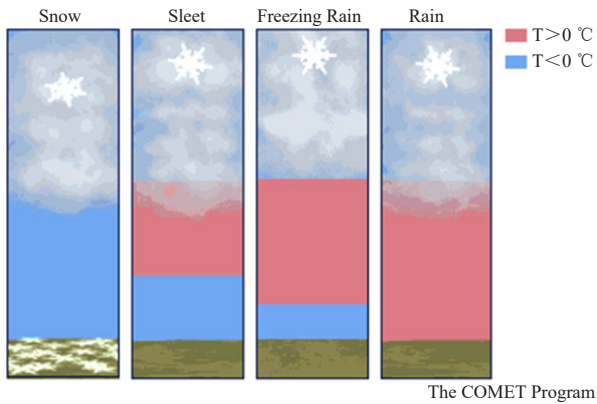
图2 雪、冰粒、冻雨和雨的温度垂直结构^①

Fig. 2 Vertical temperature structure of snow, sleet, freezing rain and rain

形影响, 海拔高的地区暖雨机制比冰相机制多^[31]。冻雨、冰粒及降雪天气的温度层结和锋区结构都存在差异^[32]。冬季, 冷丘内外温度的差异会在很大程度上影响降水类型^[13,17,33], 蒸发冷却加强了次冻结层, CAD有时会导致降水在冻结和液态降水之间多次转换^[34], 这类事件造成的预测不确定性需要进一步研究。

贵州发生冻雨次数多、持续时间长、影响范围广、灾害程度重, 是我国冻雨发生最频繁的省份^[35]。统计表明^[36], 贵州雨淞分布具有西部开始早而结束迟, 东部及南部开始迟而结束早的特点。贵阳气象台^[37]发现, 当冷空气变性或静止锋区向西移时, 锋面逆温抬高, 东部上空锋消, 西部仍可维持低温雨淞天气, 这是西部雨淞多的主要原因。贵州、湖南一带常形成地方性冻雨天气^[38]。张昕^[39]认为, 在长江以南、南岭以北和横断山脉以东, 存在西南高东北低的喇叭口地形有利于CAD形成, 受其影响, 贵州和湖南一带频繁发生具有明显地域性的冻雨天气。曾明剑等^[24]发现我国南方大范围冻雨主要集中在贵州、湖南和江西境内。2008年1月中旬以来, 湖南、贵州等地在1500~3500 m出现了明显的逆温层, 逐渐加强并维持近20 d。逆温层之下, 近地面气温长时间低于0 °C, 形成了有利于冰冻产生的深厚冷垫^[22]。Cloudsat星载雷达反射率表明^[40], 2008年1月中国南方冰雪灾害的融化层或降水过渡区十分宽广, 约在300 km以上, 而北美和北欧均不到100 km。关于强烈逆温及其成因, 早在1942年, 涂长望^[41]就指出贵州高原上空云层极为发达足证逆温甚为强大。空中如无逆温层, 则水汽及灰尘等无由集中, 难以成霾成云。贵州高原大气内逆温层的产生, 主要是由于副热带高压大气之下沉, 但一部分或由于机械扰动, 或由于西南信风行驶于东北季风之上, 或由于地面之强烈反射, 或由于极

地大陆气团大气之下沉。朱坤等^[42]利用中尺度模式模拟了2008年1月冰冻灾害环流形势以及降水带的分布、走向及落区, 分析了降雪及冻雨的云物理过程, 指出900~600 hPa逆温层与冻雨密切相关。东亚冷空气爆发从青藏高原东侧南下, 首先注入四川盆地, 然后呈扇形展开向西、向南爬上高原。由于地势西高东低, 东北风冷空气还常沿110 °E附近地势低洼地带南下并向西爬上云贵高原, 受地形阻挡在横断山脉以东和南岭山脉以北产生CAD, 造成我国南方大范围冻雨和低云覆盖。

近地面CAD的存在还会使降水落区发生改变。东风气流上滑时, 降水落区远在真实地形抬升出现之前。张迎新等^[43]通过MM5数值试验分析太行山喇叭口地形对降雪的影响, 发现东风回流冷空气遇山后减速, 在山前堆积形成冷垫, 气流在冷垫以东上升, 这可能是降雪中心在平原而不在山坡的原因(图3)。西风气流上滑时, 降水由山脉西侧迎风坡开始, 一直延伸到山脉的东部, 降水范围比没有冷垫时要更往东延伸。下坡风一般会削弱背风坡的降水, 但降水粒子落入冷垫后在未到达地面之前不会蒸发。因此, 当近地面有冷垫存在时, 高空西风气流中的扰动更容易地在东侧低海拔地区产生降水。

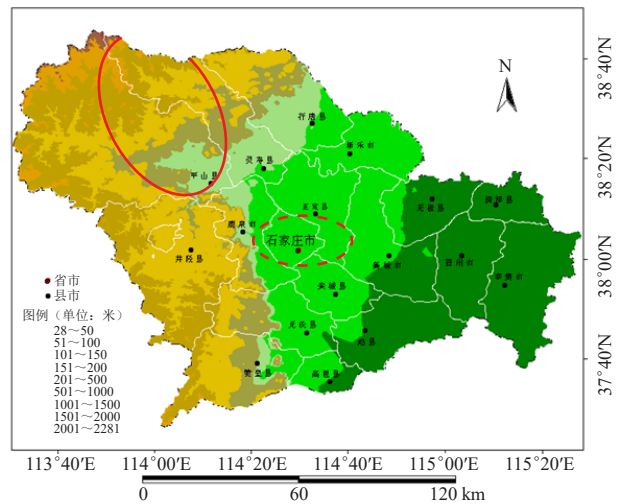


图3 石家庄地形图(实线)及暴雪(虚线)平均日数中心^[43]
Fig. 3 Topographic map and the center of annual mean rainstorm (solid line) and snowstorm (dotted line) days in Shijiazhuang^[43]

低层CAD的存在有利于气流上滑形成大范围层状云, 对地气系统辐射收支和数值模拟造成较大影响。张丙辰^[44]发现, 贵阳、四川、重庆等地总是阴暗、潮湿和寒冷, 覆盖着层状云, 有时有夜雨。如有新的冷空气补充, 天气变得阴沉, 甚至降雪。高增勇^[45]认为

① 引自COMET课件。

南下冷空气坡度逐渐变小，冷空气沿山坡的滑升产生的云系主要由雨层云和层积云组成，受其影响，多为阴天、冷性蒙雨天气，即所谓的克拉香天气。迄今为止，几乎所有的气候模式对东亚气候的模拟能力都有限，其原因之一可能是人们对高原以东层状云的形成机理和演变过程缺乏必要的了解^[12]。Klein等^[46]曾指出，中国地区是全球中、低纬陆地上层状云出现最多的区域。ISCCP-D2资料表明，中国是全球陆地上雨层云分布最大的地区^[47]。地面观测资料也表明，中国南方地区分布着大量的层状云系，使其成为冬春季同纬度温度最低的地区^[48]。李昉英等^[49]发现中国南方地区层状中、低云的形成与逆温层密切相关，其伸展高度也受逆温层所制约。

春季，在南岭附近时常出现持续几天的东西向雨带，并伴有雷暴。与雷暴相伴随的积雨云被低层云所遮掩，飞机穿过低空层云后遭遇这类积雨云而返航。许梓秀^[21]发现，沿南支西风急流带有低压槽在冷空气垫上东移，在地面高压区域中常有低压槽和锋生出现，引起复杂多变的天气，但对冷垫上空南支西风中的扰动如何引起复杂多变的天气，还缺少分析。当高空槽等天气系统造成大规模上升运动产生降水时，近地面冷垫的存在对降水性质和降水落区会产生较大影响。同时，冷空气堆积过程本身还会造成低层云量增加和地面温度降低。因此，在冷空气堆积的情形下，堆积过程和大尺度动力条件对天气的影响都需要考虑。

3 CAD形成机理

Bell和Bosart^[6]、Lackmann和Overland^[50]、Xu^[51]以及Xu和Gao^[52]指出CAD是一种地转适应过程。在阿巴拉契亚山脉、大西洋与大气环流之间存在着中尺度和天气尺度的独特相互作用^[33]。当反气旋在美国东北部或加拿大东部传播时，地面稳定的冷空气向西南方向输送，并在阿巴拉契亚山脉东坡堆积^[5,33]，非地转偏北风通过冷平流向筑坝区输入冷空气，从而形成了楔形高压脊^[5]（图4）。

筑坝区科氏力与气压梯度力保持地转平衡，在地面摩擦力作用下，气流垂直于阿巴拉契亚山脉^[51]并加深了筑坝的范围^[6]。冷丘内气压最大的地方气温最低，冷空气也最深厚，并与逆温高度相联系^[5]。上滑暖空气使逆温增强^[6]，同时，在蒸发冷却和绝热冷却作用下，山脉屏障附近的空气冷却并下沉^[5,53]。由于逆温层上部形成的云阻挡了太阳辐射，使得地面温度较冷丘外更冷^[17]。

CAD的形成和发展不仅仅是由动力学因子决定的，热力学因子也发挥着重要的作用。弗劳德数(Fr)间接描述了CAD动力学与热力学条件之间的关系，Mannis和Sawford^[54]提出可用Fr来表征大气水平动能

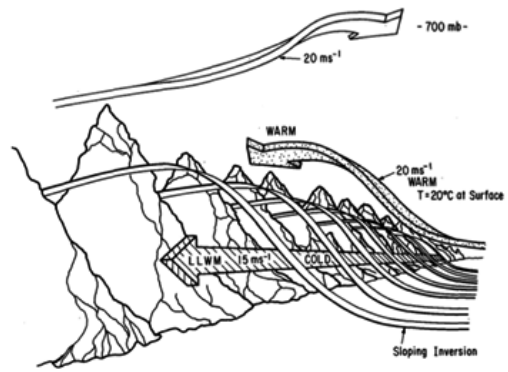


图4 冷空气堆积概念模型^[6]

Fig. 4 Conceptual model of CAD region^[6]

与气块抬升至山顶所需位能之比，Fr越大，冷空气越容易越过山脉。Fr值在0.5~2.3时均可能出现CAD事件^[54-55]。阿巴拉契亚山脉出现CAD事件时，Fr一般为0.3~0.4^[13]。在CAD事件中，非地转偏北风在山脉东侧堆积，不仅仅是动力因子造成了山脉东侧地面高压（脊）的形成和加强，冷平流、绝热冷却和非绝热冷却等热力学因子的作用，对CAD的形成和发展也至关重要。冷平流在低空形成稳定的大气层结是CAD形成的必要条件，而CAD的维持和发展还取决于绝热因子和非绝热因子。Bailey等^[8]研究了阿巴拉契亚地区的无降水CAD事件，指出来自北方冷高压的偏北气流沿阿巴拉契亚山脉东坡爬升产生的绝热冷却，是该类CAD事件形成和发展的主要原因。而对于有降水CAD事件，降水粒子的蒸发冷却等非绝热作用也能促进CAD的形成和发展。Fritsch等^[56]研究指出云对太阳辐射的阻挡及降水粒子的蒸发冷却作用，可使CAD地面高压脊的气压增加2 hPa，因此，在有降水的CAD事件中，非绝热因子的作用是促进地面冷高压脊快速南移的原因之一。云和降水造成的蒸发冷却也有利于加强CAD^[17]，这可能导致了约1/3的冷丘内冷却^[6]。在CAD开始建立时，蒸发冷却在冷丘加强中发挥的作用最大，通常随着低层空气变得饱和而减弱^[5]。

不少研究指出，世界上不同地区的CAD事件中，动力及热力因子所起到的贡献是不尽相同的，在阿拉斯加西南沿海地区、澳大利亚东南部沿海及美国西海岸地区，CAD的形成和发展机制就与阿巴拉契亚地区不同^[50,57-58]。就同一地区而言，不同时次的CAD形成和发展机制往往也不相同。在我国南方大范围冻雨过程中，青藏高原东侧冷空气常堆积在横断山脉以东和南岭山脉以北等大范围地区，其形成机制主要为源自蒙古冷高压的冷平流和地形抬升的绝热冷却，横断山脉地势较高地带降水粒子融化或蒸发造成的非绝热冷却也较明显^[59]。

4 CAD预报预测

为了更好地预报CAD, Kramer^[60]、Hartfield^[61]提出了CAD的主观分类方法,根据CAD空间尺度、天气尺度强迫及非绝热过程的相对重要性将CAD分为经典型、原地型和混合型三类。经典CAD最常见、最典型和最强烈,在这种情况下,冷高压中心位于加拿大东北部或东部,气压大于或等于1030 hPa^[8]。混合CAD,位于东北部的冷高压强度小于1030 hPa,并通过非绝热过程增强^[8]。原地CAD,冷高压位于大西洋以东天气尺度强迫较小^[8]。这种情况往往是由于经过的冷气团留下了寒冷的条件,并依赖于蒸发冷却和云覆盖的持续时间^[8,53]。为了将上述主观分类定量化, Bailey等^[8]提出了CAD的客观分类方法并将CAD类型扩展至六种,进一步帮助预报员理解和识别不同类型的CAD特征。

在过去半个世纪里,预报员预测天气的能力有了显著提高,然而CAD仍然是阿巴拉契亚山脉以东地区的预报难题^[12,53,62]。楔形的浅层性质,通常被850 hPa附近的逆温所覆盖,极大地限制了预报员可采用的工具^[6,53]。地面观测虽然在堆积过程中至关重要,但它提供的空间信息有限,迫使气象学家依靠CAD的概念模型来解决冷丘的发展过程^[5,53]。CAD的降水类型预报是最困难的任务之一,因为蒸发冷却会导致水凝物发生难以检测到的快速变化^[8,13,33]。另外,定量降水预报和最高温度预报也具有挑战性,因为即使在降水影响很小或没有影响的情况下, CAD仍然存在^[33-34]。在冬季,降水类型和量级的预报都至关重要,因为它影响如何做应急准备^[13]。另一方面,在暖季,可以沿CAD楔形边界触发强对流,导致难以预测的恶劣天气^[15]。虽然预报业务越来越依赖天气模式^[62],但模式预测CAD的能力较弱仍是预报员面临的一个障碍^[34]。

在解决CAD时空特征方面,中尺度天气模式被证明比全球模式更加有用^[33],因为它们能够生成更高分辨率的解决方案^[53]。尽管现代计算能力及水平和垂直分辨率不断提高,中尺度模式仍然会低估高压楔的持续时间和影响,小尺度和弱的CAD常常无法检测到。模式通常会过早地认为冷丘侵蚀而导致暖偏差,开始阶段对降水的过高估计而导致冷偏差。在主要由降水驱动的情况下,非绝热增强事件不能得到准确处理,强降水和有组织对流的参数化是模式预报误差的常见来源^[8,34]。高压楔内的边界层动力学、风预报和地面气压都表现出较大的模式误差,为了更好地解决这些参数,需要提高垂直分辨率^[5]。当数值天气预报模式对事件的解析不一致时,预报不确定性就会增加,这在CAD中很常见。CAD侵蚀参数化通常被认为是最难预测的部分。模式在CAD事件消亡过程中是不可靠

的,往往会过早地侵蚀高压楔^[17,53]。平滑的地形和垂直分辨率不足造成模式对侵蚀预报失败^[5,51,53]。此外,由于对太阳辐射和低层云量之间相互作用的解释存在问题,加之冷平流提前减弱,低温、降水和云量往往提前终止,模式也表现出过多的地面加热^[17]。

5 结论

国际上对CAD的研究集中在20世纪下半叶,尤其是对美国东部阿巴拉契亚CAD进行了较为深入的研究。CAD常常造成云量增加、持续低温以及降水类型和降水落区发生改变,并且大多数CAD事件对区域敏感性天气具有显著影响。虽然我国气象学者在20世纪50年代就发现青藏高原东侧存在CAD,但后续研究较少,更缺乏对CAD预测的相关研究,这也是导致我国南方冰冻灾害预报能力偏弱的重要原因之一。

在CAD的形成和发展过程中,动力学因子和热力学因子发挥了重要作用。在不同的地区,二者对CAD的贡献度不同。即便是同一地区,不同时次的CAD形成和发展机制也不相同。在地形作用下地转适应关系的重塑是CAD形成的动力基础,但冷平流、绝热冷却和非绝热冷却等热力因子对CAD的形成和发展也至关重要。青藏高原东侧CAD主要是源自蒙古冷高压的冷平流和地形抬升的绝热冷却。

在过去40年里,中尺度数值模式显著提高了CAD事件的预测能力,但这些模式仍有低估CAD影响和持续时间的倾向^[63],即使是快速更新的高分辨率中尺度模式也会低估太阳遮蔽的影响^[64]。此外,冬天降水类型的变化取决于近地面温度递减率的微弱变化,而基于中尺度模式捕捉这些特征依然是一大挑战。因此,CAD的预测对研究和预报人员来说一直是个棘手的世界性难题。同时,这也是我国预报领域亟待研究的前沿课题。

参考文献

- [1] Richwien B A. The damming effect of the southern Appalachians. *National Weather Digest*, 1980, 5(1): 2-12.
- [2] Smith R B. 100 years of progress on mountain meteorology research. *Meteorological Monographs*, 2018, 59: 20.1-20.73.
- [3] McCaffrey K, Wilczak J M, Bianco L, et al. Identification and characterization of persistent cold pool events from temperature and wind profilers in the Columbia River Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58: 2533-2551.
- [4] Baker D G. A study of high pressure ridges to the east of the Appalachian Mountains. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [5] Stauffer D R, Warner T T. A numerical study of Appalachian cold-air damming and coastal frontogenesis. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 799-821.
- [6] Bell G D, Bosart L F. Appalachian cold-air damming. *Monthly Weather Review*, 1988, 116: 137-161.
- [7] Koch S E. The role of an apparent mesoscale frontogenetic circulation in squall line initiation. *Monthly Weather Review*, 1984,

- 112: 2090-2111.
- [8] Bailey C M, Hartfield G, Lackmann G M, et al. An objective climatology, classification scheme, and assessment of sensible weather impacts for Appalachian cold-air damming. *Weather and Forecasting*, 2003, 18: 641-661.
- [9] Lackmann G M. *Midlatitude Synoptic Meteorology: Dynamics, Analysis, and Forecasting*. Boston: American Meteorological Society, 2011.
- [10] Yu R, Wang B, Zhou T. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2702-2713.
- [11] Zhang Y, Chen H, Yu R. Vertical structures and physical properties of the cold-season stratus clouds downstream of the Tibetan Plateau: differences between daytime and nighttime. *Journal of Climate*, 2014, 27(18): 6857-6876.
- [12] 张百超, 郭准, 周天军, 等. FGOALS2 两个模式版本对青藏高原东侧冬季层云的模拟特征. *大气科学*, 2020, 44(3): 487-502.
- [13] Forbes G S, Anthes R A, Thomson D W. Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 564-591.
- [14] Dunn L B. Cold air damming by the front range of the Colorado Rockies and its relationship to locally heavy snows. *Weather and Forecasting*, 1987, 2: 177-189.
- [15] Rackley J A, Knox J A. A climatology of southern Appalachian cold-air damming. *Weather and Forecasting*, 2016, 31: 419-432.
- [16] Ellis A W, Marston M L, Nelson D A. An air mass-derived cool season climatology of synoptically forced Appalachian cold-air damming. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(2): 530-542.
- [17] Stanton W M. *An analysis of the physical processes and model representation of cold air damming erosion*. Raleigh: North Carolina State University, 2003.
- [18] 顾震潮. 青藏高原对东亚环流的影响和牦底重要性. *气象学报*, 1951, 1: 43-44.
- [19] 罗四维. 高原上空大气环流的特点// 杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正, 等. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1960.
- [20] 徐裕华. 西南气候. 北京: 气象出版社, 1991.
- [21] 许梓秀, 王慕维. 春季华南在冷垫上空南支西风槽东移时的天气过程分析. *气象学报*, 1965, 35(2): 117-125.
- [22] 丁一汇, 王遵亲, 宋亚芳, 等. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. *气象学报*, 2008, 66(5): 808-825.
- [23] 秦剑, 琚建华, 解明恩, 等. 低纬高原天气气候. 北京: 气象出版社, 1997.
- [24] 曾明剑, 陆维松, 梁信忠, 等. 地形对2008年初中国南方持续性冰冻灾害分布影响的数值模拟. *高原气象*, 2009, 28(6): 1376-1386.
- [25] Penn S. The prediction of snow vs rain. *Forecasting Guide No.2*. U.S. Weather Bureau, 1957: 299.
- [26] Chaine P M. Glaze and its misery: the ice storm of 22-23 March 1972 north of Montreal. *Weatherwise*, 1973, 26: 124-127.
- [27] Okada T. Notes on the formation of glazed frost. *Monthly Weather Review*, 1914, 42: 284-286.
- [28] Ronald S E, Patrick K. Freezing precipitation in winter storms. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 1270-1279.
- [29] Thériault J M, Stewart R E, Milbrandt J A, et al. On the simulation of winter precipitation types. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D18202.
- [30] 漆梁波. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点. *气象*, 2012, 38(7): 769-778.
- [31] 欧建军, 周毓荃, 杨棋, 等. 我国冻雨时空分布及湿温结构特征分析. *高原气象*, 2011, 30(3): 692-699.
- [32] 杜小玲, 高守亭, 彭芳. 2011年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究. *大气科学*, 2014, 38(1): 61-72.
- [33] Keeter K, Businger S, Lee L G, et al. Winter weather forecasting throughout the eastern United States. Part III: The effects of topography and the variability of winter weather in the Carolinas and Virginia. *Weather and Forecasting*, 1995, 10: 42-60.
- [34] Mahoney K M, Lackmann G M. The sensitivity of numerical forecasts to convective parameterization: a case study of the 17 February 2004 east coast cyclone. *Weather and Forecasting*, 2006, 21: 465-488.
- [35] 杜小玲, 彭芳, 武文辉. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析. *气象*, 2010, 36(5): 92-97.
- [36] 刘坤维. 贵州雨凇的分布情况. *贵州气象*, 1963(12): 26-27.
- [37] 贵阳气象台预报组. 贵州雨凇天气的初步分析. *贵州气象*, 1976(增刊): 1-13.
- [38] 高守亭, 张昕, 王瑾, 等. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法. *大气科学*, 2014, 38(4): 645-655.
- [39] 张昕. 贵州冻雨形成的环境条件及其物理过程的数值模拟和诊断分析研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2014.
- [40] 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析. *气象学报*, 2008, 66(3): 405-422.
- [41] 涂长望. 何以贵州高原“天无三日晴”. *浙江大学文科研究所史地学部丛刊*, 1942(2): 1-3.
- [42] 朱坤, 刘华强, 丁守智, 等. 2008年1月一次强降雪冰冻过程的数值模拟与分析. *暴雨灾害*, 2009, 28(2): 10-17.
- [43] 张迎新, 姚学祥, 侯瑞钦, 等. 2009年秋季冀中南暴雪过程的地形作用分析. *气象*, 2011, 37(7): 857-862.
- [44] 张丙辰. 中国气团之分析. *气象研究所集刊*, 1948, 15(3): 23-31.
- [45] 高增勇. 试述昆明准静止锋的天气. *军事气象文选(1973-1982)*, 1984.
- [46] Klein S A, Hartmann D L. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *Journal of Climate*, 1993, 6: 1587-1606.
- [47] Yu R C, Yu Y Q, Zhang M H. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18: 1090-1102.
- [48] Jui-Lin F, Köhler M, Farrara J D, et al. The impact of stratocumulus cloud radiative properties on surface heat fluxes simulated with a general circulation model. *Monthly Weather Review*, 2002, 130: 1433-1441.
- [49] 李昉英, 宇如聪, 徐幼平. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析. *气象学报*, 2003, 61(6): 733-743.
- [50] Lackmann G M, Overland J E. Atmospheric structure and momentum balance during a gap-wind event in Shelikof Strait, Alaska. *Monthly Weather Review*, 1989, 117: 1817-1833.
- [51] Xu Q. A theoretical study of cold air damming. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47: 2969-2985.
- [52] Xu Q, Gao S. An analytic model of cold air damming and its applications. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 47: 2969-2985.
- [53] Koch S E. Real-time detection of split fronts using mesoscale models and WSR-88D radar products. *Weather and Forecasting*, 2001, 16(1): 35-55.
- [54] Manins P C, Sawford B L. Mesoscale observations of upstream blocking. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108: 427-434.
- [55] Baines P G. Observations of stratified flow past three-dimensional barriers. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84: 7834-7838.
- [56] Fritsch J M, Kopolka J, Hirschberg P A. The effects of subcloud-layer diabatic processes on cold air damming. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1992, 49: 49-70.
- [57] Colquhoun J R, Shepherd D J, Coulman C E, et al. The southerly buster of southeastern Australia: An orographically forced cold front. *Monthly Weather Review*, 1985, 113: 2090-2107.
- [58] Mass C F, Albright M D. Coastal southerlies and alongshore surges of the west coast of North America: evidence of mesoscale topographically trapped response to synoptic forcing. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 1707-1738.
- [59] 索渺清, 丁一汇, 鲁亚斌, 等. 中国南方准静止锋对冬季大范围冻雨的影响. *气象学报*, 2018, 76(4): 525-538.
- [60] Kramer D. *Real-time mesoscale model evaluation during Appalachian cold air damming*. Raleigh: North Carolina State University, 1997, 139.
- [61] Hartfield G. *Cold Air Damming: An Introduction*. National Weather Service Eastern Region Training and Evaluation Module 4, 1998.
- [62] Bosart L F. Tropopause folding: upper-level frontogenesis, and beyond. *American Meteorological Society*, 2003(31): 13-47.
- [63] Lindeman S A. *Assessment of Model Forecast Temperature Bias During Cold Air Damming in the Central Appalachian Mountains*. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2018.
- [64] Grumm R H. *Mid-Atlantic Ice Storm 4 March 2015*. National State College: Weather Service, 2015: 30.