

昆明准静止锋的发现和研究的发现和研究

索渺清¹ 丁一汇²

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 昆明准静止锋也称西南准静止锋, 早在20世纪40年代已被中国学者所发现。这是在东亚冷空气爆发并向南扩展时, 受西南高原地形阻挡形成的一种独特的锋面系统。在北美等地虽然也有类似现象, 但昆明准静止锋在形成原因、活动规律和天气影响上都十分不同。在青藏高原大地形、低纬高原和横断山脉的作用下, 昆明准静止锋沿地形呈准南北走向, 具有东西摆动和跳跃式西进的独特活动规律。若静止锋转变成冷锋西进, 往往伴随着西南地区寒潮等转折性天气出现; 若静止锋长期稳定维持, 不仅在冬季会造成冻雨等灾害性天气, 还会在春季带来雷暴、冰雹、大风等强对流天气。从昆明准静止锋的发现开始, 全面的回顾和总结相关的研究进程, 对该领域研究的未来方向从以下几个方面做出展望: 1) 昆明准静止锋的定义仍需明确; 2) 锋区强烈逆温的成因和水汽来源; 3) 昆明准静止锋的气候结构和环流特征; 4) 昆明准静止锋的气候变率及其影响因子; 5) 昆明准静止锋的维持和进退机理; 6) 昆明准静止锋的可预报性和数值预报能力研究。

关键词: 昆明准静止锋, 发现过程, 形成原因, 活动规律, 天气影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.001

The Discovery and Study of Kunming Quasi-Stationary Front

Suo Miaoqing¹, Ding Yihui²

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 2 National Climate Centre, Beijing 100081)

Abstract: Kunming Quasi-Stationary Front, also known as Southwest Quasi-Stationary Front, which was found by Chinese meteorologists in 1940s, is a unique frontal system which forms when the cold air outbreaks in East Asia expanding southward, and is obstructed by the terrain in southwest China. Although similar phenomenon has been found in North America, Kunming Quasi-Stationary Front is very unique in terms of formation mechanism, activity patterns and its impact of weather. Under the influence of the Tibetan Plateau, the low-latitude plateau and the Hengduan Mountains, the Kunming Quasi-Stationary Front appears in a north-south direction along the terrain. It has a unique movement pattern of east-west direction and leaping towards west. If it turns into a cold front moving west, turning weather such as cold wave in the southwest part of China is often accompanied. If it remains stable for a long period, it will not only cause disastrous weather such as freezing rain in winter, but also severe convection weather such as thunderstorm, hail and gale in spring. This article begins with the discovery of Kunming Quasi-Stationary Front, followed by a comprehensive review and summary of relevant research progress, and provides some outlooks for future research direction as follows: 1) The definition of the Kunming Quasi-Stationary Front has to be clear; 2) The cause of strong frontal inversion and water vapor sources; 3) The climate structure and the circulation characteristics of the Kunming Quasi-Stationary Front; 4) The climate variability and its impact factors of the Kunming Quasi-Stationary Front; 5) The mechanism of the maintenance and the back-and-forth swinging of the Kunming Quasi-Stationary Front; 6) The predictability and the numerical weather forecast capability of the Kunming Quasi-Stationary Front.

Keywords: Kunming Quasi-Stationary Front, discovery, formation, activity, weather

0 引言

在全球变暖的总趋势下, 全球气候变化的幅度变大, 小概率、高影响天气气候事件发生的机会增加, 极端天气事件出现的概率在增加。在中国, 连续

21a暖冬的大背景下, 2008年1月10日—2月2日中国南方经历了历史上罕见的大范围低温、雨雪和冰冻灾害, 灾害持续时间长, 影响严重, 致使南方近20个省(区、市)1亿多人受灾, 引起了国内外政府部门、防灾减灾机构和科学界高度的关注^[1]。2011年1月1日—2月5日, 中国南方再次出现严重的低温雨雪冰冻灾害。两次灾害都和昆明准静止锋系统相关, 而该系统作为冬半年影响中国西南地区的重要天气系统, 尽

收稿日期: 2015年10月19日; 修回日期: 2016年3月31日
第一作者: 索渺清(1968—), Email: ynsmq@foxmail.com
资助信息: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-89)

管被中国气象界认知已有数十年的历史，但其中一些关键性的问题还亟待研究。

1 昆明准静止锋的发现

1930年，高空观测开始在我国出现：1935年，朱炳海^[2]提出研究锋面的生消与活动，进而阐明天气演变的机理应从分析气团入手。赵九章^[3]、黄厦千等^[4]和Tu^[5]等学者开展了东亚气团分析以及不同气团对天气影响的研究，揭示了中国天气独有的一些特征。第二次世界大战期间，高空测候站增加并扩展到我国西南一带，获得的记录中反映四川盆地和云贵高原天气变化的信息，受到更多气象学者的关注^[6-10]。张丙辰将中国气团分为五大类，进而论及不同气团间所发生的交绥作用，与其相因而生的天气现象，由此发现中国气团之交绥，可分昆明准静止锋等六大类型。据《中国科学家辞典》^[11]记载：“张丙辰在大学读书时，曾听过吕炯《巴山夜雨》的报告，引起他对西南地区天气的浓厚兴趣。他积三年搜集、整理的资料，于1946年写成《昆明准静止锋》一文，得到原大学老师涂长望教授的赞许，至今国内天气学教材中涉及此锋，其名即自彼时始”。1947年，《科学》上刊登了张丙辰“吾国西南之气团及准静止面”^[12]论文提要。1949年，《科学》又刊登了张丙辰《昆明准静止锋面之再探讨》^[13]等3篇论文提要，1950年，他的英文论文“The Kunming quasi-stationary front (昆明准静止锋)”在Journal of the Chinese Geophysical Society (已更名为Chinese Journal of Geophysics)上发表^[14]。除《中国科学家词典》的记载外，目前可获取的相关文献最早只追溯到1947年发表在《科学》上的论文摘要，但从各主要气象和科学刊物的摘要和评述来看，张丙辰是最早系统地研究和总结昆明准静止锋的学者当无疑问。1956年，樊平^[15]根据昆明气象台的经验和

多次昆渝航线飞机报告，加以综合后提出昆明准静止锋的预报指标和锋面分析原则，对昆明准静止锋在实际业务应用起到了积极地促进作用。夏平^[16]在总结我国解放十年来在锋面系统的分析研究中取得的成就时，肯定了张丙辰和樊平先后对昆明准静止锋的发现所做出的贡献。

昆明准静止锋也称西南准静止锋，是指在东亚冷空气爆发并向南扩展时，受西南高原地形阻挡形成的一种独特的锋面系统。如图1所示，在北美等地也有类似现象，但其发生在中高纬地区；而昆明准静止锋的主要活动区域在30°N附近的低纬区域，因此其在形成原因、活动规律和天气影响上都与其他类似系统有显著区别，只是在冷空气活动和山脉对冷空气的阻挡作用等方面有相似性。

2 昆明准静止锋的形成原因

2.1 独特的地形作用

Jong^[14]指出昆明准静止锋是地形的产物。在我国西南地区，青藏高原东南部与云贵高原相连，伴有南北走向的横断山脉。顾震潮^[17]和叶笃正等^[18]的研究表明，青藏高原是西风带中最大的障碍，足以使西风带产生极大的扰动，引起分支、会合、屏障及跳跃的现象。当西风带处于青藏高原的纬度带时，对流层下部的西风分成南北两支，在高原北边生成高压脊，南部生成低压槽。冬季，新疆、蒙古上空的这个高压脊和地面蒙古高压相关联，孟加拉湾的地形槽更对锋前暖气团的属性有很大影响。由于青藏高原大地形的影响，东亚冬季反气旋活动路径偏北偏东，很少能够直接到达西南地区。Murakaim等^[19]首次用数值模拟的方法发现，高原的动力作用有利于低层的冷高压沿地形东部边缘迅速南下到达高原的东南方。数值试验研究^[20]进一步表明，由于高原的存在大大加强了低层冷

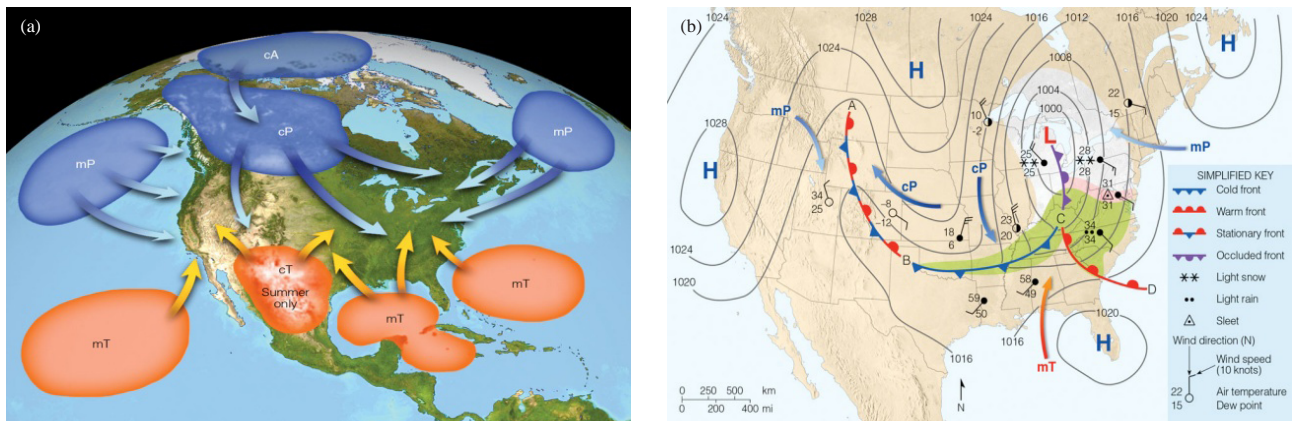


图1 北美的气团 (a) 和锋面系统 (b) (来源：美国天气学课件)

Fig. 1 The air masses and front of North America (from synoptic courseware, USA)

空气的绕流作用,使高原东侧的降温增强,降雨增多,冷锋南下加快。罗四维^[21]发现,当冷空气由高原北边经过时,经常有较薄的冷空气绕高原边缘迅速南下。卫星云图对在高原上追踪系统移动、确定系统结构和判断系统发生、发展是一种有用的工具。丁一汇^[22]通过卫星云图分析发现,一般情况下冷锋不容易到达高原内部,但当高原上或高原西北有高空槽引起高原上一次寒潮过程时,冷锋可以进入高原,即使夏季在高原上也可以出现寒潮天气,卫星云图上表现为一条冷锋云带侵入高原,并引起高原上降水天气。段旭等^[23]认为昆明准静止锋是地面冷高压沿青藏高原东侧运动遇高原阻挡而形成。王曼等^[24]利用2008年1月MM5中尺度数值模拟结果,通过地形减半的敏感性数值试验,定量分析得到高原地形阻挡作用是昆明准静止锋形成和维持的必要条件。

1997年,秦剑等^[25]把纬度低于30°N、海拔高度在2km左右的地区称为低纬高原,考虑到北方寒潮在到达华中、华南时的厚度不过2km左右,因此低纬高原有效地阻挡了北方南下冷空气的侵袭。青藏高原东南侧的横断山脉,是中国最长、最宽和最典型的南北向山系,山脉南北走向,纵向岭谷相间,具有独特的“通道—阻隔”效应。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,难以翻越而停滞、堆积,形成准静止锋^[26]。乌蒙山和哀牢山成为云南重要的气候分界线。一般北方南下冷空气进入四川、贵州两省后,只有强冷空气才能翻越乌蒙山,爬上低纬高原。而由于哀牢山的进一步阻挡,其西侧几乎常年没有冷空气活动^[27]。罗四维^[28]指出,昆明准静止锋是高原东部特殊地形的产物,它是北方寒潮跟高原南边南支西风间的界面。当北方的寒潮向南侵袭时,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,并与南支西风气流相遇形成一条准静止的界面。

我国西南地区地势自西向东自西南向东北倾斜,有利于冷空气在高原东侧堆积,形成冷空气堆(cold air damming, CAD)。CAD一般发生在障碍地形附近,世界上许多地区,如地中海、远东、北美都有这种现象的发生。顾震潮^[29]发现,青藏高原东侧也有利于CAD形成。这层经常存在的冷空气与所谓的“昆明准静止锋”有密切关系,而这正是造成贵州一带坏天气的直接原因。要不是青藏高原的屏障作用,冷空气不可能经常停留在那里,准静止锋也不可能这样长期存在。丁一汇等^[1]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1500m以下形成的冷空气层,气象上称之为“冷垫”。许梓秀等^[30]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。沿南支西风急流带,有低压槽在冷空气垫上东移,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。当冷空气堆积到一定厚度爬上高原向西扩张时,又受到横断山脉纵向岭谷的层层阻挡,使得昆明准静止锋沿山脉呈准南北走向,并具有东西摆动和跳跃式西进的独特活动规律^[31]。

2.2 冷暖气团之交绥

Jong^[14]指出,冬季云南高原常为西南暖流所盘据,此暖流与沿高原北坡上爬之冷而干变性极地大陆气流交绥于昆明、贵阳间,故称之为昆明准静止锋。冬季数月,整个中国之天气,受变性极地大陆气团支配。此种大陆气团,自西伯利亚源地向南爆发,在华西山地与云贵高原,西伯利亚冷气流能沿山坡上升,而侵入昆明、贵阳等地。然而,南下的冷空气是干冷的,又是如何造成贵州“天无三日晴”的呢?涂长望^[7]指出地形是贵州高原云多雨丰的主要原因。贵阳冬季,东北风极占优势且来自变性较深的极地大陆气团,此气团沿贵州高原徐徐上升,至适当高度,空中水汽即开始凝结成云。赵恕^[32]认为变性极地大陆气团进入贵州,沿山坡上滑膨胀绝热冷却,使得温度降低湿度增大。张君龙^[33]发现正北路径的冷空气经四川盆地南下,沿途不断增湿,在爬上云贵高原的过程中,绝热冷却而凝结成云雾,形成锋下云系。偏东路径的冷空气从中西伯利亚经蒙古国、华北平原南下到两湖盆地转向,从贵州东北部入侵云贵高原。这类冷空气入侵更为缓慢,准静止锋自东向西推移。当北方有小股冷空气不断补充时,准静止锋才能翻越乌蒙山。由于冷空气以偏东回流形式入侵云贵高原,湿度比较大,爬升所凝成的云滴也较大。

卢鋈^[34]在《中国之寒潮》中指出,“寒潮至西南高原一带,已无形迹可寻。云南高原及西南大峡谷区域,则几无影响”。实则不然,随着气象台站的增加,气象探测手段的不断改进,大量事实说明低纬高原也是寒潮多发区,如1983年12月和1999年1月的寒潮,滇中昆明等地完全是一片银装素裹。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,哪怕是很弱的冷空气,才会使之翻越大、小凉山和乌蒙山进入云南滇中地区,这也是成就“浩浩荡荡的冷空气往往不会影响,而偷偷摸摸的却造成云南寒潮”的独特天气现象。秦剑等^[27]认为,入侵云南的寒潮冷空气大致分为四路,除了从青藏高原直接南下的冷空气外,其他北路、东北路、东路冷空气加强时都会推动昆明准静止锋移向滇中,给昆明等地带来阴冷雨雪天气。所以,人们常说昆明准静止锋是昆明的晴雨锋。段旭等^[23]则认为,冷空气影响云南一般只有西北、东北和偏东三条路径。西北路径的冷空气来自青藏高原,当冷空气南下时冷气团受到大地形作用产生动力下沉,造成剧烈的辐散,不会形成准静止锋。东北和偏东路径的冷空气,当冷空气不太强或影响云南的强冷空气减弱东退时,受云贵高原地形阻挡,极易形成昆明准静止锋。

关于暖气团的源地及属性,张丙辰^[35]认为,冬季控制中国西南高原的西南暖流源自中南半岛及东京湾(现北部湾)。炎夏时即为热带太平洋气团,与源自南半球之赤道气团所代替。而Tu^[36]在1938年根据飞机和风筝记录,探讨了我国气团的分类及其不同季节的属性,发现冬半年控制西南高原的热带大陆气团是中国冬季最暖的气团,也是最干燥的气团。他推断此气团的源地当在北缅与北印,或远至阿拉伯沙漠。Simpson^[37]认为印度西部高空确有热燥空气存在,沙漠地带尤为显著。樊平^[38]指出冬半年控制云南的气团是热带大陆气团,是从阿拉伯、伊朗、巴基斯坦、印度半岛北部等沙漠或大陆地区平流过来的,昆明准静止锋是控制云南干暖大陆气团的北界。

张君龙^[33]根据锋前西南气流的源地,把昆明准静止锋分为干湿两种类型。当高空高原南部为平直西风时,锋前的偏西南气流来自伊朗高原,锋前和锋面上为干暖气流,这时准静止锋只有锋下云系,锋面上干暖无云,称为干型准静止锋,降水甚微。当孟加拉湾有低槽建立时,槽前西南暖湿气流沿锋面(或冷垫)滑升,在锋附近和锋后引起较大的降雪和降雨天气,称为湿型准静止锋。杜小玲等^[39]也发现,造成贵州强冻雨的准静止锋具有锋上暖湿云,锋下冷湿云的特点。赵恕^[32]指出,在冬半年,昆明准静止锋有时是变性极地大陆气团与变性热带海洋气团的界面;有时是与副热带大陆气团的界面。在夏半年,主要是变性极地大陆气团和变性热带海洋气团的界面。

在青藏高原的动力作用下,孟加拉湾一年四季都有槽存在,但冬半年南支槽是副热带性质的,夏半年印缅槽是热带性质的^[40]。伴随孟加拉湾地形槽冬夏性

质的转换,昆明准静止锋前暖气团的干湿属性也出现季节变化。但就是在冬半年,南支槽的干湿属性也会发生变化。当南支冷空气沿高原南缘到达孟加拉湾使南支槽形成和维持,此时南支槽位置偏北,槽前有干暖平流输送;当上游西风扰动沿南支西风传播到孟加拉湾使南支槽加深发展时,槽前有暖湿平流输送^[41]。丁一汇等^[1]指出,南支槽向中国南方冰雪区输送大量水汽,主要水汽辐合位于横断山脉以东,而且南支槽前源自孟加拉湾水汽输送要明显大于南海和中印半岛的水汽输送。这也许正是低空水汽通道绕过青藏高原东南角向下游输送所致^[43]。

综合以上研究成果,初步得到昆明准静止锋概念模型(图2)。冬半年,由于青藏高原的动力作用,冷空气分为南北两支,南支冷空气到达孟加拉湾使南支槽形成和维持,北支冷空气从高原东侧南下与南支槽前干暖空气相遇形成干型准静止锋。若南支槽加深发展或副热带高压外围有西南暖湿气流输送,则为湿型准静止锋。夏半年,西南季风北上受青藏高原阻挡形成印缅槽,槽前西南暖湿气流与南下冷空气相遇,形成湿型准静止锋。

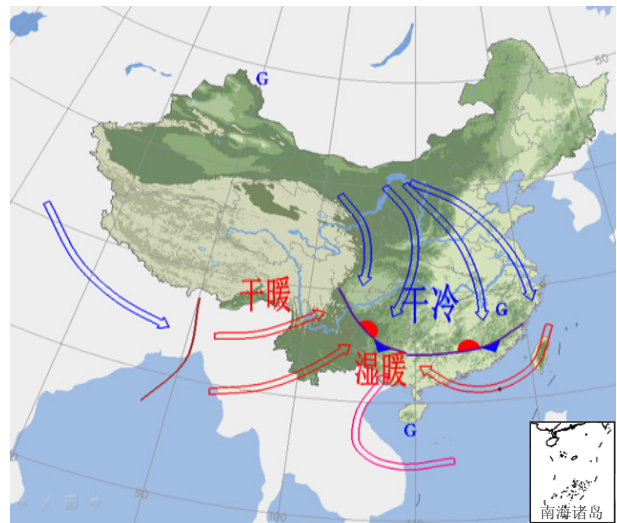


图2 昆明准静止锋概念模型

Fig. 2 The conceptual model of Kunming quasi-stationary front

3 锋面结构

从Jong^[14]最早给出的锋面结构(图略)可以看出,锋面自西南向东北倾斜,锋面坡度较暖锋要小,影响范围包括了巴蜀盆地、云贵高原、广西山地与湘西丘陵一带。樊平^[15]根据昆明气象台的经验和多次昆渝航线飞机报告,提出了西南准静止锋垂直结构的五个经典指标。罗四维^[28]认为锋面位于地面冷高压和云南热低压之间(图3),高空锋区自西(西南)向东(东北)倾斜,锋面坡度在1/250以下,云系和降水的

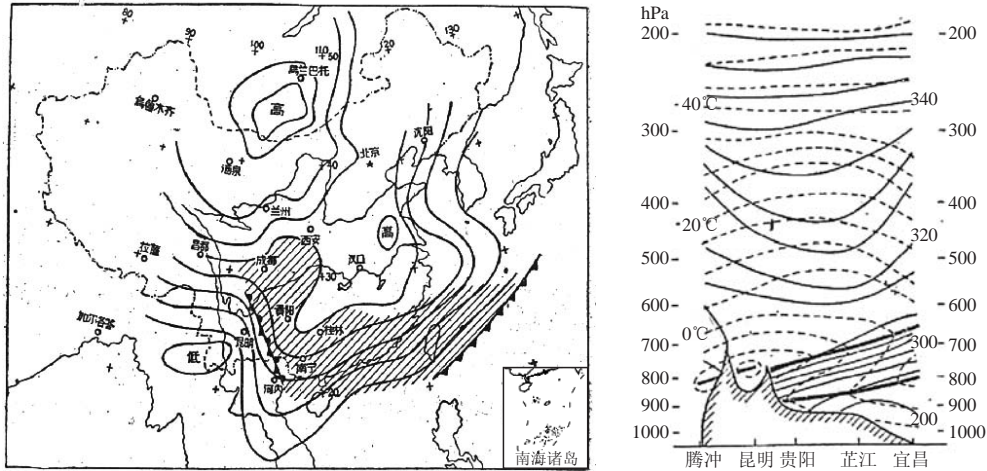


图3 昆明准静止锋结构^[26]
Fig. 3 The structure of Kunming quasi-stationary front^[26]

范围很广。川黔两省冬季多阴沉天气，大多是由于昆明准静止锋活动的结果。

锋面强天气是云南冬半年日常预报工作中的重点和难点。李英^[44]通过个例分析，给出了有南支槽等系统配合时，产生强天气的昆明准静止锋结构。段旭等^[23]选取1993—1995年冬、春10个典型个例做合成分析，进一步给出无南支槽配合时昆明准静止锋结构，发现昆明准静止锋低层的温度场、湿度场和风场等结构与一般冷锋有明显差异。锋面向东倾斜，不仅锋面为一湿区，锋后还有较宽向东延伸的湿区。杜小玲等^[45]对比分析了冻雨和强对流天气的锋区结构，以及冻雨和冰粒及雪等不同相态降水的不同锋区结构。

图4是美国和加拿大东部地区冻雨形成条件示意图^[46]。可以看到，受西部山脉的阻挡，在近地面和低层形成一个CAD，其上有一暖空气层。这可使落入此暖层的冰晶或雪花融化成水滴，再落入近地面的浅薄冻结层，形成冻雨。其中，图4a为冷平流层位于暖平流层之下，西侧为山脉，阻挡了冷空气的向西扩展。

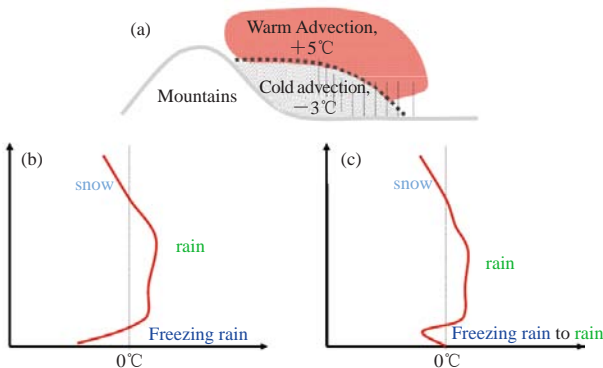


图4 冻雨形成条件示意图^[46]
Fig. 4 Idealized freezing-rain schematics^[46]

图4b与4c是冻雨形成时的温度垂直分布（图4b为近地面只有冻雨，图4c为近地面冻雨与雨共存）。冷垫之上的暖层（又称融化层）^[47-49]，是降水类型过渡层，也是雨雪分界区，有多种相态粒子相互作用，包含微物理、热力和动力过程的复杂耦合。

2008年1月中旬以来，湖南、贵州等地在1500~3500m出现了明显的逆温层，逐渐加强并维持近20d。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。Cloudsat卫星雷达反射率表明^[50]，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300km以上，而北美和北欧皆不到100km。关于强烈逆温及其成因，早在1942年，涂长望^[9]就指出贵州高原上空层云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。

总体而言，以往较多通过个例和统计分析研究冬季昆明静止锋结构。对于昆明准静止锋气候结构及其环流特征，以及锋区强烈逆温的形成机制，虽然不同研究均有所涉及，但完整的认识还有待进一步研究。

4 活动规律

4.1 空间分布

1950年代，潘菊芳^[51]发现昆明准静止锋的东段常与华南准静止锋相连接，但它们在性质上有很大差异。后者除南岭山脉的作用外，主要为南下冷高压

与副热带暖性高压在华南对峙的结果。华南准静止锋的消长和锋面降水天气与菲律宾暖高压紧密相关。而昆明准静止锋则主要是高原大地形以及北方西风带系统与南支天气系统共同作用的结果。从气候锋分布^[52]可以看出(图5), 昆明准静止锋除夏季基本不存在外, 冬、春、秋均与华南准静止锋相连。1月,

昆明准静止锋呈准南北走向, 4月和10月呈西北东南走向。华南准静止锋一般呈准东西走向并有两个准定常位置, 一个位于南岭附近, 一个位于南海北部。当冷空气活动强时, 锋面越过台湾和海南静止在南海北部; 当冷空气活动不很强时, 锋面受南岭等山脉的阻挡静止于华南北部^[53]。

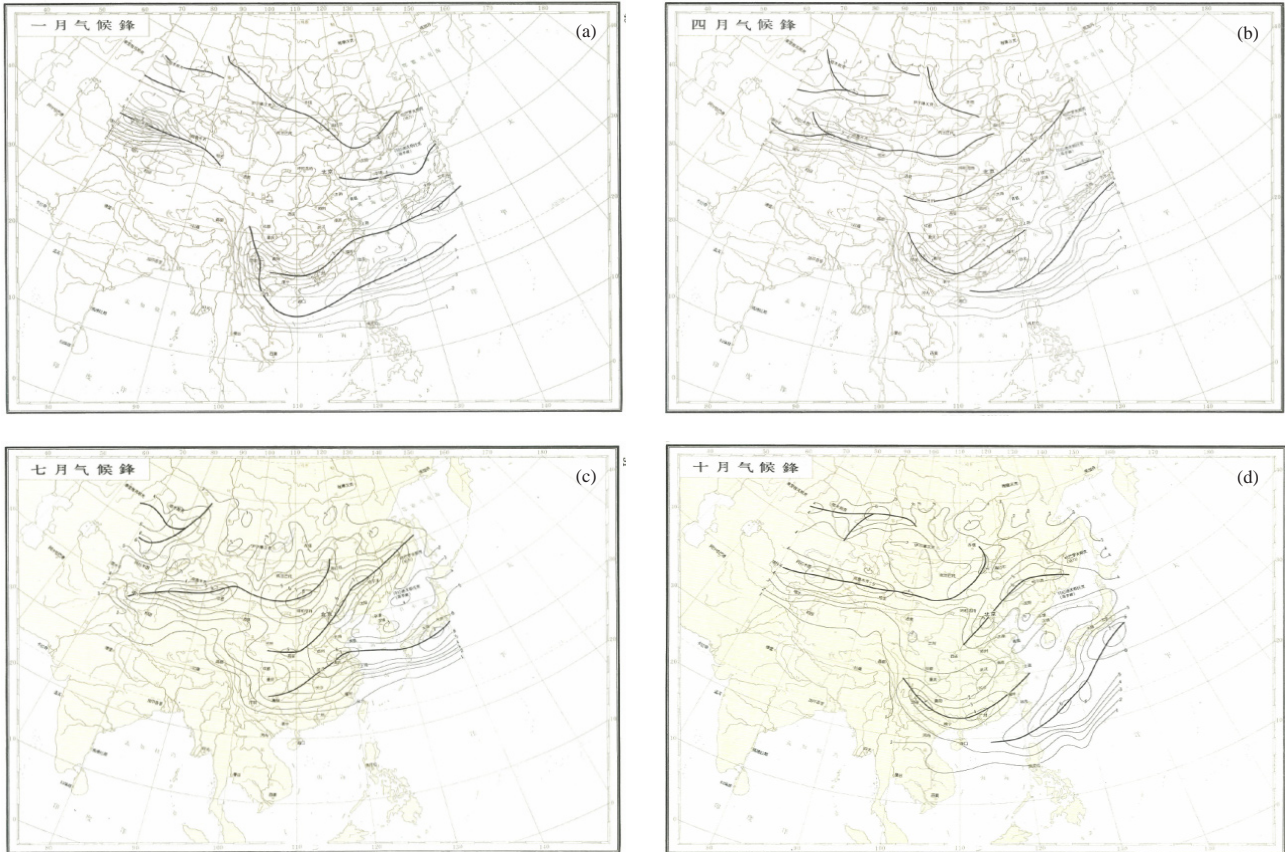


图5 我国的气候锋^[52]

Fig. 5 The climate front of China^[52]

Jong^[14]也指出, 昆明准静止锋移动于昆明、贵阳间之机会为64.5%; 当冷气流强时, 此锋一如冷锋, 西移至昆明以西, 然其机会仅18.2%; 反之如暖流势盛, 则锋面类似暖锋移至贵阳以东, 唯其机会更少仅3.9%。樊平^[15]则认为昆明准静止锋的平均地理位置在沾益、威宁以西、昭通以南、昆明和会泽的东北方。四川九龙以北的准静止锋, 因海拔高很少有人注意, 但在冬半年中, 锋线以西恒为碧空或少云, 而在锋线以东则为阴沉天气, 分界线也十分明显。周帮利等^[54]将准静止锋分为三类: 第一类在贵阳与昆明之间, 北端在西昌以北, 南端在广南附近与南岭准静止锋相连; 第二类傍哀牢山沿红河河谷静止在昆明以南, 对滇南影响较大; 第三类在贵阳以北, 具有副热带高压

脊和南支西风急流强盛、地面热低压发展等特点。

高增勇等^[31]认为昆明准静止锋的位置随季节及冷空气的强弱而不同, 其北端可在西昌以北, 南端可达到长山山脉南端, 南北跨度达19个纬距(10°—29°N)。徐裕华^[26]指出, 除7月外, 昆明准静止锋位于川西南、滇东北、黔西一带, 是我国锋面活动频数最高的地带。潘里娜等^[55]利用1989—1998年冬春季(11—4月)逐日云南气候图资料, 统计了22°—28°N, 100°—106°E范围内昆明准静止锋的频数分布、分类和强度, 发现高频区位于昭通和宣威一带。段旭等^[23]通过合成分析发现, 冬季昆明准静止锋呈准南北走向, 平均位于103.5°—104°E附近, 通常位于四川宜宾、贵州兴仁和云南广南一带。杜

正静^[56]根据实际预报经验,将准静止锋分为4种类型,发现II型准静止锋出现日数最多,是准静止锋影响云贵地区的主要方式。张精华^[57]参照上述方法,以昆明、沾益、贵阳来划分昆明准静止锋的位置,从樊平的经典定义出发,同时结合实际预报经验作为判据,统计分析了1970—2009年冬季(12—1月)昆明准静止锋的变化特征,发现C类(沾益与贵阳之间)发生最为频繁。杜小玲^[58]统计分析时,选取了103°—108°E作为昆明

准静止锋的平均位置。而查书瑶^[59]又将23°—27°N, 106°—118°E作为华南准静止锋的关键区。可见,以往研究常结合樊平的经典定义和预报经验进行统计分类,和华南准静止锋没有明确的界定,常以经向剖面来讨论昆明准静止锋的垂直结构(图6),存在称谓不统一的现象,除了“昆明准静止锋”外,还有“西南准静止锋”、“云南准静止锋”、“滇黔准静止锋”、“贵州静止锋”和“云贵准静止锋”等不同叫法。

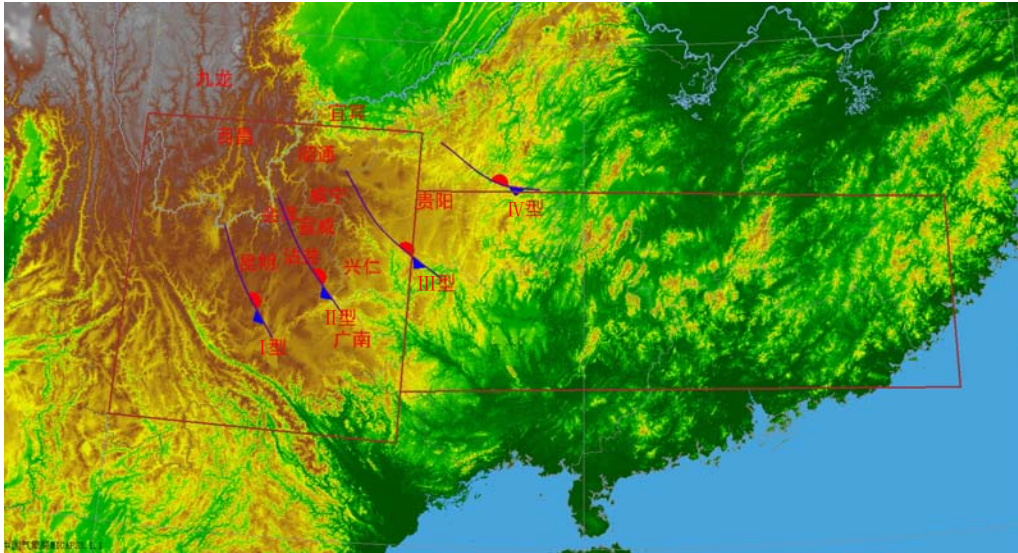


图6 昆明和华南准静止锋空间范围

Fig. 6 The space distribution of Kunming and South China quasi-stationary front

4.2 时间分布

昆明准静止锋具有夜间西南进、日间东北退的显著日变化,并在几十千米至近百千米范围内做东西摆动^[31]。张丙辰最早在冬季发现了昆明准静止锋,后来一些研究^[15, 26, 31, 60]发现静止锋全年都可出现,只是冬春季(11—4月)偏多,夏秋季(5—10月)偏少。在春夏和秋冬交替季节存在骤降弱升的突变^[56]。黄更生^[61]统计了1969—1974年5个冬半年影响昆明地区的冷锋静止锋,发现冬半年的两头(11、12、4月)锋面影响次数较多,并以夜间开始影响,白天结束为多。许美玲等^[60]统计分析了1982—2008年昆明与贵阳之间准静止锋的时空分布特征,发现昆明准静止锋出现天数的年际变化呈下降趋势,20世纪80年代出现的天数偏多,90年代前期出现的天数偏少,90年代中期以后基本在平均值附近变化。

在全球变暖背景下,锋面西侧暖气团控制之下的云南出现了气温升高、降水减少、极端天气气候事件增多增强的气候变化^[62]。郑建萌等^[63]发现滇中、滇南增温最大,滇东降水减少,且滇东北减少幅度最大。

张精华^[57]发现昆明冬季变暖显著,雨日数趋于减少,贵州冻雨总体减弱与昆明准静止锋活动明显减少有关。在厄尔尼诺年的第二年冬季,昆明准静止锋无论过程次数还是影响日数均比厄尔尼诺年多;而拉尼娜年相反。但ENSO对昆明准静止锋年际变化影响到底有多大,昆明准静止锋的气候变率及影响因子如何,有待进一步了解。

5 天气影响

5.1 气候特征

昆明准静止锋两侧的天气气候迥然不同。丁一汇^[64]指出,准静止锋活动频繁是我国天气的主要特色之一。昆明准静止锋造成在冷空气一侧的贵州“天无三日晴”,暖空气一侧的云南“四季如春”,一旦准静止锋西进南下,云南便“一雨成冬”。张丙辰^[65]发现,昆明及锋面以西,在暖气团控制之下天气晴朗,温暖、明亮和舒适。贵阳、四川、重庆等地正好处于锋面影响之下,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。樊平^[38]认为昆明准静止锋是云南的

气候锋, 经过高度订正后的平均最高气温、最多风向和年平均总云量等气候要素的显著不连续, 是这条气候锋存在的反映。段旭等^[23]发现昆明准静止锋的存在使该地区气候出现明显差异, 就年平均日照时数来看(图7), 昆明为2528.2h, 贵阳为1412.6h。

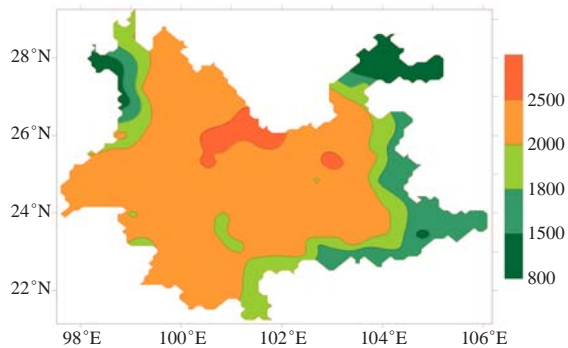


图7 云南省1971—2000年平均日照时数分布(单位:h)^[23]
Fig. 7 The sunshine hours of Yunnan Province averaged from 1971—2000 (unit: h)^[23]

受昆明准静止锋和华南准静止锋影响, 贵州、湖南一带常形成地方性冻雨天气^[66]。贵州冻雨次数多、持续时间长、影响范围广、灾害程度重^[67], 是我国冻雨发生最频繁的省份^[39]。统计表明^[68], 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^[69]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。

5.2 锋面天气

高增勇^[70]认为水汽含量、垂直运动和稳定度是决定锋面天气的基本因素。冬半年, 昆明准静止锋位于干湿交界处, 干区位于暖空气一侧, 湿区位于冷空气一侧。因南下冷空气坡度逐渐变小, 垂直运动主要表现为冷空气沿山坡的滑升, 而锋上暖空气既很干燥又爬升很缓慢, 产生不了大规模云系, 故云系主要在锋下冷空气里, 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。夏半年, 准静止锋天气有较大不同, 天气较不稳定, 锋线附近经常有雷阵雨产生, 冷空气一侧为小阵雨天气, 主要原因是暖空气性质发生了较大变化, 即由原来冬半年的干暖空气变成夏半年的暖湿空气, 即使有不大的垂直运动, 也可产生不稳定性天气。

单一的准静止锋天气比较单调、稳定, 如与南支槽等其他系统结合, 极易产生剧烈的天气, 造成冬季强降水^[71], 还有春季的暴雨、冰雹和大风天气^[72-82]。赵恕^[32]发现如果有低涡或低槽从云南向贵州移动时, 顺着槽后过来的冷空气会在静止锋上形成高空冷锋,

可出现冬雷和冰雹。一些研究^[56, 79-80]发现, 春季贵州中西部带状降雹区是由低涡切变和静止锋所造成; 寿绍文等^[81]认为高空低涡发展、准静止锋锋生、斜升气流以及低空急流加强是贵州暴雨发生发展的有利机制。段旭等^[23]认为, 在高原动力下沉作用下, 锋面上空为下沉气流控制。但若有南支槽存在, 槽前上升气流与锋后的上升气流叠加使锋面上形成较强的上升运动, 极易在准静止锋附近产生大风、冰雹天气。而静止锋上不同相态的降水过程, 上升运动也有较大差异^[46]。

昆明准静止锋作为地形的产物, 一般只在其平均位置附近摆动。当静止锋转为冷锋向西南移动, 常会引起锋前天气突变, 带来降温、降雨等转折性天气, 云南的寒潮和倒春寒天气多与昆明准静止锋增强西进有关^[83-85]; 当静止锋转变为暖锋向东北移动, 锋面东侧出现大片降压区, 雨区突然加强北扩^[86]。昆明准静止锋维持和进退机理, 以及锋面垂直运动是否受到行星尺度辐散环流和急流次级环流的影响^[40], 值得进一步探讨。

6 锋面分析和预报

6.1 锋面分析

我国西南地区地形复杂, 地面温度不能直接反映锋的基本性质, 加上地形对锋的阻挡, 锋面分析有很多困难。樊平^[15]指出, 从温度场来定义昆明准静止锋时, 应以日间温度分布为依据, 因夜间锋前多碧空, 辐射冷却强盛, 锋前气温往往比锋后来得低; 从气流场来定比较容易, 锋后偏北风, 锋前西南风, 特别是日间午后云南高原西风增强时更为显著; 从云系和天气看也很清楚, 锋后阴而有雨, 锋前晴好; 变压和变温也可作参考, 当锋后冷平流加强且锋面有南下趋势时变压变温明显, 当趋弱或后退时变压变温就不明显; 850hPa有一西北东南向的气压槽, 锋后冷空气愈强, 等高线密度也愈大; 700hPa切变线与地面锋的位置, 两者相距愈近, 锋面愈强, 两者相距愈远, 锋面愈弱。周帮利等^[54]认为, 在用温度定锋面时, 应掌握“白天好用, 夜间不行, 强时好用, 弱时不行”的原则。24h变温一般锋前为正, 锋后为负, 变温零线略趋于锋前与静止锋相重合。地面气压场上, 一般位于变性极地大陆冷高压左侧和地面热低压北侧或东北侧。当锋面过境时, 风向会有较大转变; 3h变压当锋后冷平流加强才较为明显。静止锋北段, 锋后阴云密布且有成片降水, 锋前晴朗少云。南段天气不及北段差异明显, 但锋后天气较锋前严重且范围广大。850hPa锋区呈西北东南走向, 锋面较强时700hPa也有明显锋区。

6.2 锋面预报

黄更生^[61]统计分析了1969—1974年5个冬半年资料,发现影响云南的准静止锋具有独特的活动规律,预报上引入不少新问题。要正确预报昆明准静止锋南下、静止或减弱北退,首先要对昆明准静止锋垂直结构有正确的了解并对其未来发展做出正确的判断。樊平^[15]提出了昆明准静止锋垂直结构的五个指标,它不仅是预报昆明准静止锋的主要着眼点,也是预报寒潮、冷锋是否南下的着眼点。高增勇等^[31]认为,准静止状态只是锋面生命史中的一个阶段,它随时都在向其他阶段转化。摆动可能与它常呈南北走向有关。一般都出现在形势稳定少变、准静止锋处于成熟期之后,云南热低压及日变化作用才明显。昆明准静止锋形成主要有速成和缓成两种,速成的环流背景是东亚大槽的重建,由南下冷锋转变而成。缓成是在中纬度纬向环流下,由长江流域以南锋生西伸而成;昆明准静止锋转为冷锋向西(南)移动,一般呈两种形式:一种是准静止锋与其后的冷锋合并南下,另一种是700hPa西南涡加强东移。锋消基本上也有两种形势,一种是大陆变性冷气团继续变性,锋两侧温差减小致使两气团混合而锋消;另一种是500hPa大槽过后,高脊与锋面叠加,气流下沉而锋消。林国民等^[87]采用最优化方法,建立了准静止锋转变成冷锋西进(南下)的非线性统计预报模式;李英等^[88]以 Q 矢量和锋生公式为基础,研究了昆明准静止锋锋生及其移动过程,建立了人机交互的短期预报系统^[89]。

在冬季各种降水类型中,冻雨预报是其中最具有难度、也最具挑战的一种^[66]。黄继用^[90]在统计方法的基础上,提出了冷舌与凝冻分片预报方法。许炳南^[91]根据6个预测信号建立的两类贵州凝冻短期气候预测模型,是目前贵州气象台冬季冻雨气候预测的重要方法。汪卫平等^[92]发现锋消过程中,尽管850hPa已转为偏南风,但近地面仍保持弱冷空气的注入,使得低温阴雨的天气继续维持,为转折性天气提供了重要参考。孙建华等^[93-94]和赵思雄等^[95]根据中尺度模式输出的层结、地面条件及降水状况得到冻雨发生的范围。朱坤等^[96]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900~600hPa逆温层与冻雨密切相关。杜正静等^[97]认为产生凝冻天气准静止锋表现为湿度锋,极涡、东亚大槽异常偏南以及准静止锋维持是造成贵州重级冰冻天气的重要原因。杜小玲等^[42, 45, 58]利用2000—2009年12次强冻雨过程分析和归纳了中高纬阻塞形势下强冻雨的预报着眼点及概念

模型。张昕^[98]发现冻雨中心通常位于广义湿位涡的异常高值区,广义湿位涡能够较好地反映出冻雨系统的发展变化。高守亭等^[66]探索性地提出一套冻雨的诊断预测方法,即“动力因子”和“三步判别法”相结合的方法,使贵州冻雨预报精度和速率有明显的提高。

虽然数值预报对冷空气的预报能力已明显提高,但地面图停发天空状况,卫星云图时次滞后,雷达覆盖不全,使锋线附近降温等转折性天气预报还是难以把握。而且从环境场、动力和数值模拟上对昆明准静止锋的研究相对薄弱,如何在模式中恰当地描写锋面,使模式能考虑到锋面对天气发展的影响是模式预报中的难点。因此,应大力加强对昆明准静止锋可预报性和数值预报能力的研究。

7 小结与展望

从昆明准静止锋的发现至今已近70年,中国气象学者取得了很多重要并具有开创性的成果,这大大丰富了经典的锋面理论,对天气学尤其是中国天气学是一个重大的贡献。2008年极端天气气候事件和近年来我国南方冬季低温雨雪冰冻天气的频发,极大地推动了静止锋数值模拟及其预报等相关业务的发展。并且,利用遥感资料和高分辨率数值模式探讨冻雨的微物理结构,研究气候变暖背景下昆明准静止锋的变化规律,表明对昆明准静止锋的研究不仅限于传统的天气尺度,而是深入到锋面降水形成的微物理机制及其多尺度变率方面。为了提高昆明准静止锋的可预报性,必须充分研究锋面的具体性质。昆明准静止锋的一些关键问题,例如,锋区强烈逆温的成因和水汽来源、昆明准静止锋的气候结构和环流特征、昆明准静止锋的气候变率及影响因子以及昆明准静止锋维持和进退机理等,更是最终提高数值预报能力不可避免的问题。

参考文献

- [1] 丁一汇,王遵娅,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.
- [2] 朱炳海.分析气团以论天气变化.气象杂志,1935(11): 35-43.
- [3] 赵九章.中国东部气团之分析.中央研究院气象研究所集刊第六号,1935.
- [4] 黄厦千,顾钧禧.华北气团之几中范式.气象学报,1936,12(1): 31-36.
- [5] Tu C W. The air masses of China. Mem Inst of Met, 1938, 12(2): 33-51.
- [6] 高仕功.昆明气团之分析.天气,1941(1): 21-33.
- [7] 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.
- [8] 吕炯.巴山夜雨.气象学报,1942,16(12): 36-53.
- [9] 白祥麟.昆明天气之初步分析.地学集刊,1943,1(4): 358-371.
- [10] 卢釜,史以恒.遵义天气分析.气象学报,1947,19: 28-33.
- [11] 中国科学家辞典编委会.中国科学家辞典.济南:山东科学技术出版社,1982.
- [12] 张丙辰.吾国西南之气团及准静止面.科学,1947,29(11): 339.

- [13] 张丙辰. 昆明准静止锋面之再探讨. 科学, 1949, 31(2): 48.
- [14] Jong P C. The Kunming quasi-stationary front. J Chinese Geophy Soc, 1950(2): 87-103.
- [15] 樊平. 昆明准静止锋. 天气月刊(附刊), 1956(3): 14-16.
- [16] 夏平. 中国的锋面系统的分析研究. 天气月刊. 1959(9): 21-24.
- [17] 顾震潮. 西藏高原对东亚环流的动力影响和它的重要性. 中国科学, 1951, 2(3): 283-303.
- [18] 叶笃正, 顾震潮. 西藏高原对于东亚大气环流及中国天气的影响. 科学通报, 1955(6): 29-33.
- [19] Murakami T, Nakamura H. Orographic effects on cold surges and lee-cyclogenesis as revealed by a numerical experiment. Part II: Transient aspects. J Meteor Soc Japan, 1983, 61: 547-567.
- [20] 罗四维, 陈玉春, 于学泉. 青藏高原对冷空气爆发影响的个例分析(一). 高原气象, 1988(3): 234-245.
- [21] 罗四维. 有关青藏高原天气和环流研究工作的回顾. 高原气象, 1989, 8(2): 121-126.
- [22] 丁一汇. 从气象卫星看青藏高原的天气系统.// 叶笃正, 高由禧, 等. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979.
- [23] 段旭, 李英, 孙晓东. 昆明准静止锋结构. 高原气象, 2002, 21(2): 205-209.
- [24] 王曼, 段旭, 李华宏, 等. 地形对昆明准静止锋影响的数值模拟研究. 气象, 2009, 35(9): 77-83.
- [25] 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.
- [26] 徐裕华. 西南气候. 北京: 气象出版社, 1991.
- [27] 秦剑, 解明恩, 刘瑜, 等. 云南气象灾害总论. 北京: 气象出版社, 2000.
- [28] 罗四维. 高原上空大气环流的特点.// 杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正, 等. 西藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1960.
- [29] 顾震潮. 西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.
- [30] 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.
- [31] 高增勇, 铁步连. 昆明准静止锋的结构与特征. 军事气象文选(1973-1982), 1984.
- [32] 赵恕. 贵州静止锋云系的特点. 贵州气象, 1981(3): 11-12.
- [33] 张君龙. 对昆明准静止锋的一点认识. 贵州气象, 1980(3): 9-10.
- [34] 卢釜. 中国之寒潮. 气象杂志, 1936(12): 651-679.
- [35] 张丙辰. 中国气团之分析. 气象研究所集刊, 1948, 15(3): 23-31.
- [36] Tu C W. The air masses of China. Mem Inst of Met, 1938, 12(2): 33-51.
- [37] Simpson G C. The South-West Monsoon. Quar J Roy Meteor Soc, 1921, 47: 151-172.
- [38] 樊平. 云南气候概论. 天气月刊, 1956(11): 26-44.
- [39] 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.
- [40] 索渺清, 丁一汇, 王遵娅. 冬半年南支西风中Rossby波传播及其与南支槽形成的关系. 应用气象学报, 2008, 19(6): 731-740.
- [41] 索渺清, 丁一汇. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究. 大气科学, 2009, 33(3): 425-442.
- [42] 杜小玲, 蓝伟. 两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析. 高原气象, 2010, 29(5): 1183-1195.
- [43] 索渺清, 丁一汇. 南支槽与孟加拉湾风暴结合对一次高原暴雪过程的影响. 气象, 2014, 40(9): 1033-1047.
- [44] 李英. 伴随强天气的昆明准静止锋结构和动力学诊断. 南京: 南京大学, 2001.
- [45] 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.
- [46] Lackmann G. Midlatitude synoptic meteorology: dynamics, analysis and forecasting. Amer Meteor Soc, 2011.
- [47] 王绍武. 中国冷冬的气候特征. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 68-72.
- [48] Rafa G B, Stewart R E, Donaldson N R. Microphysical characteristics through the melting region of a midlatitude winter storm. J Atmos Sci, 1991, 48: 844-855.
- [49] Stewart R E. Precipitation types in the transition region of winter storms. Bull Amer Meteor Soc. 1992, 73: 287.
- [50] 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.
- [51] 潘菊芳. 冬半年华南的准静止锋. 天气, 1953(3): 1-9.
- [52] 中央气象局. 中国气候图集. 北京: 地图出版社, 1966.
- [53] 陶祖钰, 郑永光, 张小玲. 2008年初冰雪灾害和华南准静止锋. 气象学报, 2008, 66(5): 850-854.
- [54] 周帮利, 刘正明. 昆明准静止锋的初步探讨. 军事气象文选(1973-1982). 昆明: 八零三零三部队司令部, 1984.
- [55] 潘里娜, 李英. 冬春季昆明准静止锋若干统计特征. 云南气象, 1999(4): 37-40.
- [56] 杜正静. 滇黔准静止锋对贵州地区天气的影响. 南京信息工程大学, 2007.
- [57] 张精华. 近四十年冬季昆明准静止锋的变化特征及成因探讨. 昆明: 云南大学, 2011.
- [58] 杜小玲, 高守亭, 许可, 等. 中高纬阻塞环流背景下贵州强冻雨特征及概念模型研究. 暴雨灾害, 2012, 31(1): 15-22.
- [59] 查书瑶. 冬季华南准静止锋的变化特征及其与降水的关系. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
- [60] 许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 云南省预报员手册. 北京: 气象出版社, 2011.
- [61] 黄更生. 冬半年影响昆明地区的冷锋静止锋. 云南气象, 1984(4): 4-11.
- [62] 《云南未来年气候变化预估及其影响评估报告》编写委员会. 云南未来10-30年气候变化预估及其影响评估报告. 北京: 气象出版社, 2014.
- [63] 郑建勋, 任菊章, 张万诚. 云南近百年来温度雨量的变化特征分析. 灾害学, 2010, 25(3): 24-31.
- [64] 丁一汇. 中国气候. 科学出版社, 2013.
- [65] 张丙辰. 中国气团之交接与中国天气. 气象学报, 1949, 20(1): 32-37.
- [66] 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.
- [67] 张昕, 高守亭, 王瑾. 2008年1月贵州冻雨的数值模拟和层结构分析. 高原气象, 2015, 34(2): 368-377.
- [68] 刘坤维. 贵州雨淞的分布情况. 贵州气象, 1963(12): 26-27.
- [69] 贵阳气象台预报组. 贵州雨淞天气的初步分析. 贵州气象, 1976(增刊): 1-13.
- [70] 高增勇. 试述昆明准静止锋的天气. 军事气象文选(1973-1982), 1984.
- [71] 李英, 段旭. 倾斜涡度的发展与云南冬季强降水. 南京气象学院学报, 1999, 22(4): 705-710.
- [72] 杜正静, 何玉龙, 熊方, 等. 滇黔准静止锋诱发贵州春季暴雨的锋生机制分析. 高原气象, 2015, 34(2): 357-367.
- [73] 段旭, 李英, 周毅. 春季滇南大风冰雹天气的大尺度环境特征. 气象, 1998, 24(6): 40-44.
- [74] 李英, 段旭. 冰雹大风天气下昆明准静止锋的结构分析. 云南气象, 1998(4): 35-39.
- [75] 李英. 春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析. 南京气象学院学报, 1999, 22(2): 164-169.
- [76] 李英. 条件性对称不稳定与昆明准静止锋风雹. 热带气象学报, 1999, 15(3): 273-279.
- [77] 李英, 段旭. 湿位涡在云南冰雹天气分析中的应用. 应用气象学报, 2000, 11(2): 242-248.
- [78] 李英, 舒智. 云南春季冰雹、大风天气的中尺度扰动特征. 气象, 2000, 26(12): 16-19.
- [79] 李英, 徐银梓, 段旭. 云南一次持续性风雹过程中低空急流的若干特征. 气象科学, 2000, 20(4): 503-510.
- [80] 杜正静, 丁治英, 熊方. 一次滇黔准静止锋大暴雨天气过程的物理量场特征分析. 贵州气象, 2006, 30(6): 7-10.
- [81] 寿绍文, 王祖锋. 1991年7月上旬贵州地区暴雨过程物理机制的诊断研究. 气象科学, 1998, 18(3): 231-238.
- [82] 李英, 段旭, 潘里娜. 昆明准静止锋的准地转 Q 矢量分析. 气象, 1999, 25(8): 6-10.
- [83] 尤红, 曹中和, 郭文华, 等. 昆明静止锋下的云南强倒春寒天气分析. 气象, 2006, 32(3): 56-62.
- [84] 尤红, 周泓, 杨红, 等. 云南倒春寒天气过程的分析研究. 气象, 2013, 39(6): 738-748.
- [85] 尤红, 周泓, 白学文, 等. 2011年3月云南连续两次强倒春寒天气过程对比分析. 暴雨灾害, 2013, 32(2): 167-175.
- [86] 陈谋, 陈辅平. 云贵暖锋的个例分析. 高原气象, 1984, 3(3):

- 97-101.
- [87] 林国民, 贾星星. 昆明准静止锋转变成冷锋的非线性统计预报. 四川气象, 1994(2): 18-21.
- [88] 李英, 段旭. 昆明准静止锋锋生和移动过程分析. 云南气象, 1999, 19(4): 31-36.
- [89] 李英, 段旭, 周国莲. 昆明准静止锋天气预报及系统. 云南气象, 2003, 23(1): 18-26.
- [90] 黄继用. 冷舌分片预报研究. 贵州省气象台培训教材, 1999.
- [91] 许炳南. 贵州冬季凝冻预测信号和预测模型研究. 贵州气象, 2001, 25(4): 3-6.
- [92] 汪卫平, 陈余明. 低层资料在冬季云贵静止锋预报中的应用. 贵州气象, 2005, 29(5): 15-16.
- [93] 孙建华, 赵思雄. 2008年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结构分析. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 368-384.
- [94] 孙建华, 赵思雄. 2008年初南方雨雪冰冻灾害天气的大气层结和地面特征的数值模拟. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 510-519.
- [95] 赵思雄, 孙建华. 2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 351-367.
- [96] 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.
- [97] 杜正静, 熊方, 何玉龙, 等. 贵州严重冰冻天气过程典型模型及环流特征分析. 贵州气象, 2009, 33(1): 7-10.
- [98] 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.

清华大学开设大气科学（全球变化方向）本科辅修专业

■ 戴洋

为了推动教育教学主体向“以学为主”转变、在本科人才培养中促进“通专融合”、提升学生“多样化成长”的自主性、自信心和开放性，清华大学提出要增加高质量的、面向全校的、多样化课程，推动二学位、双学位、辅修和交叉学科认证课程项目。2015年，清华开设了3个本科辅修专业：计算机应用、互联网金融与创业、金融学；2016年再接再厉增加了大气科学（全球变化方向）、统计学、马克思主义理论、智能硬件、机器人和智能交通辅修专业。目前，辅修专业的招生工作正在进行之中。辅修专业主要面向清华大二大三在校本科生招生，学生在完成第一学年主修专业规定学分后，成绩优良、学有余力者可申请从第二学年开始同时修读辅修专业，每名学生只能同时申请修读一个辅修专业。2016年，清华大学紧贴当下国际上正在实施一系列全球变化研究计划这一热点，将大气科学（全球变化方向）专业设为本科辅修专业之一，令气象人为之振奋。该专业由清华大学地球系统科学研究中心（以下简称地学中心）开设。

根据地学中心新近公布的培养方案，该辅修专业培养目标是为了培养具有全球变化科学理论基础、掌握全球变化领域核心研究方法、了解国际学科发展前沿、具备独立思考与自学能力的研究和管理人才，使得学生在未来从事科研与管理工作时具备相关的基础知识和视野。专业将面向土木、水利、环境、计算机、物理、化学和生物等相关专业2014级全日制在校本科生招生，2016年拟招生

20~30人，学习时间为1.5年。修满规定学分，成绩合格并获得第一学位者，可获得辅修专业证书。

为了做好教学工作，地学中心为大气科学（全球变化方向）辅修专业配备了强大的课程设置和师资队伍。设置的8门课程详见表1。可以看到，这些课程具有视野广、质量高、前瞻性强、内容丰富和学科交叉突出等特点，密切结合当下全球变化相关热点领域，并体现了清华地学中心的学科特色。授课教师基本为副教授及以上职称，搭建了一支由相关领域的知名专家学者、学科带头人和优秀青年骨干教师组成的师资梯队，师资力量非常强大。

表1 大气科学辅修专业课程安排

课程名称	授课教师	学分	授课学期
全球变化导论	宫鹏、杨军	3	2016秋季
气候变化	罗勇、张建松	3	2016秋季
气候变化经济学	王灿、蔡闻佳	3	2016秋季
全球变化生态学	林光辉	3	2017春季
全球变化大数据分析	黄小猛、付昊桓、徐世明	3	2017春季
大气科学概论	林岩奎、彭怡然	3	2017秋季
大气污染及其影响	张强	3	2017秋季
生物地球化学循环	喻朝庆	3	2017秋季

目前我国内地共有北京大学、南京大学、南京信息工程大学、成都信息工程大学等13所高校设有大气科学类学科。百年名校清华大学设立了大气科学（全球变化方向）本科辅修专业，将为我国大气科学类青年人才培养增添一抹亮丽色彩，也令人对清华大学地学学科发展充满更多期待。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）