

云贵高原锋线的动态特征*

宇如聪¹ 李建^{1,2} 原韦华³
YU Rucong¹ LI Jian^{1,2} YUAN Weihua³

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
 2. 横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 昆明, 650034
 3. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京, 100029
1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorology Sciences, Beijing 100081, China*
2. *Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, China Meteorological Administration, Kunming 650034, China*
3. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmosphere Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
- 2021-06-21 收稿, 2021-09-02 改回.

宇如聪, 李建, 原韦华. 2021. 云贵高原锋线的动态特征. 气象学报, 79(6): 889-901

Yu Rucong, Li Jian, Yuan Weihua. 2021. The moving characteristics of frontal lines on the Yunnan-Guizhou Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(6):889-901

Abstract A method to approximate the surface frontal line on the Yunnan-Guizhou Plateau by linear fitting is proposed. Through comprehensive analysis of the frontal line position, the spatial distribution and temporal variation of meteorological elements around the frontal line, as well as changes in the position and direction of the frontal line for long-lasting frontal line events, the movement characteristics of the frontal line on the Yunnan-Guizhou Plateau are systematically revealed. The cold (warm) frontal lines are concentrated in 102.5°–105°E (104.5°–105.75°E) and the maximum cooling (heating) zone is located on the eastern (western) side of the frontal line. The changes in meteorological elements around the frontal line are closely related to the movement of the frontal line. The westward moving frontal line usually brings cooling condition, increases surface air pressure, and reduces sunshine hours around the frontal line, while the eastward-moving frontal line often leads to opposite changes. According to the movement of long-lasting frontal line events, frontal line events can be divided into three types: Stationary, westward and eastward. The stationary frontal lines are the most in all the three types. The westward moving frontal line can advance continuously and quickly and is accompanied by a clockwise swing of the frontal line. The eastward moving frontal line has a lower frequency and a relatively low speed. Overall, with the objective and quantitative description of the frontal line, especially its dynamic characteristics, the above results can provide an important reference for the fine forecast of various meteorological elements on the Yunnan-Guizhou Plateau.

Key words Frontal line on the Yunnan-Guizhou Plateau, Spatial-temporal features, Moving characteristics, Long-duration frontal line

摘要 面向精细化的气象服务需求, 为做到对云贵高原锋面系统变化的精准把控, 深入认知其动态演变规律, 基于 50 a (1971—2020 年) 逐日台站观测资料, 提出了一种利用线性拟合近似判定云贵高原地面锋线的方法, 并通过综合分析锋线位置和锋线周边气象要素的空间分布和时间变化特征以及长持续锋线事件的锋线位置、走向变化, 系统揭示了云贵高原锋线的移动特征, 展现了云贵高原准“静”止锋的“动”态特征。结果表明, 冷性锋线集中在 102.5°—105°E, 最大降温区在锋线东侧, 暖性锋线集

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018FYC1507603)。

作者简介: 宇如聪, 主要从事云和降水特征及数值模式研发等方面研究。E-mail: yrc@cma.gov.cn

中在 104.5°—105.75°E, 最大升温区位于锋线西侧; 锋线附近气象要素的变化与锋线的移动紧密相关, 西进的锋线一般会伴随锋线附近的降温、升压和日照减少, 东退的锋线则相反; 根据长持续锋线事件的连续演变过程, 可将锋线事件区分为静止、西移和东移 3 类, 静止型出现次数最多, 西移型可连续快速推进并伴随锋线南部的顺时针摆动, 东移型出现频次较低且移速相对较慢。上述结果通过对云贵高原锋线, 特别是其动态特征的客观定量描述, 为该地区在锋线影响下各气象要素的精细化预报提供了重要参考。

关键词 云贵高原锋线, 时空特征, 动态特征, 长持续锋线

中图法分类号 P441

1 引言

云贵高原是中国南北走向的横断山脉、东西走向的南岭山脉和二级地形阶梯东部的东北—西南走向山脉群的“三脉”交汇处, 大致位于(22°—30°N, 100°—111°E), 特殊的地理位置和地形强迫决定了其特别的天气和气候特征, 而云贵高原上冷、暖气团交叠的锋面系统是其独特气候的最本质体现。要充分把握云贵高原的天气、气候规律, 必须全面认识其锋面系统的结构特征和演变机理。因而, 围绕云贵高原锋面的科学研究一直受到较广泛的关注(索渺清等, 2016)。

20 世纪 40 年代, 张丙辰(1947)就提及了西南地区的准静止面和相关气团。罗四维(1960)指出, 寒潮向南推进时受云贵高原东部地形的阻挡, 冷空气逐渐堆积, 并与南支西风气流相遇而形成一条准静止的界面。回流的冷空气在向南向西推进过程中, 受到乌蒙山等山脉阻挡而停滞、堆积, 形成了云贵高原上的准静止锋(徐裕华等, 1991; 丁一汇等, 2008), 锋后地区易形成低温雨雪冰冻天气(陶祖钰等, 2008; 杨贵名等, 2009; 杜正静等, 2015)。段旭等(2002)指出, 准静止锋是南下冷气团受云贵高原地形阻挡形成的产物, 锋面呈准南北向, 锋前晴空少云, 锋后有大量中低云。云贵高原的准静止锋可与华南准静止锋相连, 但两者性质有所不同(潘菊芳, 1953; Egger, et al, 1992; 查书瑶等, 2015)。从锋线的空间分布来看, 樊平(1956)指出昆明准静止锋的平均地理位置在沾益和威宁以西、昭通以南、昆明和会泽的东北方, 张精华等(2016)以昆明、沾益、贵阳 3 站来划分准静止锋位置, 指出沾益与贵阳之间是静止锋出现最为频繁的区域。昆明准静止锋全年均可出现, 但冬、春季较多, 夏、秋季相对较少(樊平, 1956; 黄更生, 1984; 许美玲等, 2011; 段旭等, 2017)。在天气预报业务和天气个例分析

中, 昆明准静止锋锋面位置通常基于人工辨识方法主观确定(李英等, 1999; 杜小玲等, 2014; 杨静等, 2018); 在针对昆明准静止锋的长时段统计分析中, 人工辨识方法(潘里娜等, 1999; 杜正静, 2007; 张精华等, 2016)和客观分析方法(段旭等, 2017; 段旭等, 2018; 张亚男等, 2018; Zhao, et al, 2019)均用于锋面位置的确定。

从上述研究可以看出, 因锋面常态化存在, “静”是云贵高原锋面系统的主体特征, 早期研究工作也主要围绕“云贵准静止锋”(或“昆明准静止锋”)的“静”开展。然而, 云贵高原锋面系统在“静”背景下的移动往往会伴随转折性天气甚至引发暴雨、冰雹和大风等灾害天气(陈谋等, 1984; 李英等, 2000; 尤红等, 2006; 张腾飞等, 2006; 杜正静等, 2007)。面向精细化的气象服务需求, 做到对云贵高原锋面系统变化的精准把控, 须基于长期统计分析, 着眼于“动”, 深入认知其动态的演变规律, 为对其精细精准的预报提供科学支撑。

基于云贵高原及其周边的地面气象台站观测资料, 文中提出了一种基于线性拟合的地面锋线判定方法, 可便捷判定出云贵高原地面主要锋线的存在并近似确定处于锋线位置上的台站。进而通过分析锋线的基本特征及其与地面气象要素变化的关联, 系统研究云贵高原锋面在地表的“动”态特征和规律。

2 资料说明

文中使用了中国气象局国家气象信息中心提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据和定时值数据, 数据均已进行严格质量控制。所用的要素包括日最高气温、日照时数和 14 时(北京时, 下同)的气温、风速、风向、本站气压等, 所用台站为中国西南地区的 588 个地面气象站(图 1 圆点所示), 分析时段为 1971—2020 年。

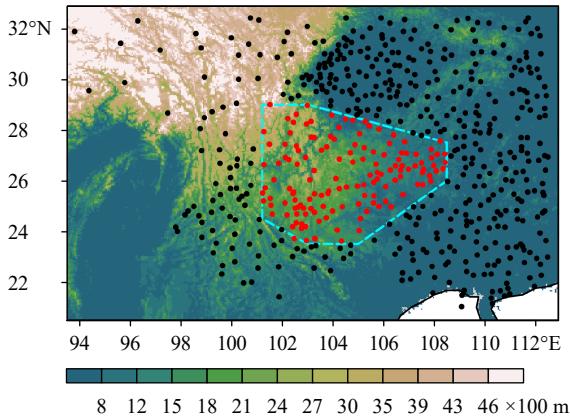


图1 中国西南部 588 个国家级地面气象站(黑色和红色圆点均代表台站位置,虚线框出重点关注区域,红色圆点为重点关注区域内台站;色阶为地形高度,单位:100 m)

Fig. 1 Locations of 588 weather stations over southwestern China (black and red dots represent the locations of stations, the region of focus is outlined by dashed lines and red dots denote stations inside the region of focus; the shading indicates the elevation, unit: 100 m)

3 云贵高原地面锋线的客观判定方法

考虑到云贵高原地面锋线多呈南—北或西北—东南走向,文中提出了一种对锋线台站位置(经度、纬度)进行线性拟合的方法,并依据云贵准静止锋的气候态特征给出了一系列客观判据,以客观判定锋线的位置和走向。

具体的判定方法包括如下 4 个步骤。

(1)确定重点关注区域的台站:利用图 1 所示范围内的各台站 1971—2020 年观测结果,分别计算日最高气温的旬平均和相对于旬平均的日最高气温标准差以及日最高气温相较于前一日降温幅度超过(不小于,后同)5℃的年均频次,依此框定重点关注区域和台站(图 1 中虚线框和红色圆点)。

(2)初选可能位于锋线的台站:对上述重点关注区域台站基于 14 时气温计算位温(后文提及的位温均为基于 14 时气温的位温);计算各台站与其周边邻近台站(1 经/纬度范围内)的位温梯度和 14 时气温梯度;考虑到绝大多数云贵高原地面锋线两侧存在很大温度梯度且表现为西暖东冷或南暖北冷,若台站与至少一个邻近台站的位温梯度大于 12 K/(经/纬度)且气温梯度大于 6℃/(经/纬度),同时暖的台站位于南侧或西侧,则判定此台站为可能位于锋线的初选台站。

(3)拟合初选锋线:若初选台站数不少于 6,对其经度和纬度进行迭代线性拟合,从距离拟合线大于 2.5 经/纬度的台站开始逐步剔除距离拟合线较远的台站,然后以 0.1 经/纬度为步长逐步缩小阈值,每次剔除后均重新拟合,确定新的拟合线,直至距离阈值减小至 0.5 经/纬度,并认定最终位于拟合线两侧各 0.5 经/纬度范围内的台站为处于初选锋线上的台站,对这些台站的经度和纬度的拟合线则近似代表初选地面锋线的位置。

(4)判定初选锋线有效性:分别计算初选锋线两侧 1—3 经/纬度范围的平均位温和平均 14 时气温,若锋线两侧平均位温差超过 12 K 且 14 时气温差超过 6℃,锋线沿经向或纬向的长度超过 3 经/纬度,则判定初选锋线有效,即当日存在地面锋线。

对应步骤(1),图 2a 给出了日最高气温相对于其旬平均的标准差(黑色等值线),相邻日的日最高气温降幅超过 5℃的年均频次(色阶),两者间有很好的空间一致性,在图 2a 所示范围内空间相关系数达到 0.833,大值区均位于云贵高原,呈西北—东南向分布。图 2a 中白色虚线为年平均的日最高气温,在 26°—27°N 呈现明显的东(冷)西(暖)对峙,冷暖分界线位于日最高气温标准差和日最高气温变幅大值区的西缘,其西侧日最高气温可高于 24℃,而东侧可低于 18℃。基于上述 3 个变量的空间分布,确定重点关注区域如图 2a 深粉色线框所示,图 1 中用红色圆点标示出重点关注区域内的台站,共 138 个。

以 2015 年 4 月 7 日为例,进一步说明判定方法的(2)至(4)步。2015 年 4 月 7 日,重点关注区域中共有 22 个台站同时满足位温梯度大于 12 K/(经/纬度),气温梯度大于 6℃/(经/纬度),且暖的台站位于南侧或西侧,判定这 22 个台站为初选台站(图 2b 中红色圆点)。接下来按照步骤(3),对初选台站的空间位置按照 $\text{lon} = a + b \times \text{lat}$ 进行迭代线性拟合(lon 为台站经度, lat 为台站纬度),其中 b 可表征锋线斜率,是锋线的一个关键特征, $b = 0$ 表征南北向锋线, $b < 0$ ($b > 0$) 为西北—东南(东北—西南)向锋线;第一次拟合后 $a = 115.65$, $b = -0.44$;迭代逐步剔除远离拟合线的台站,当距离阈值减到 0.5 经/纬度后保留 14 个台站,再次拟合确定初选锋线($a = 114.55$,

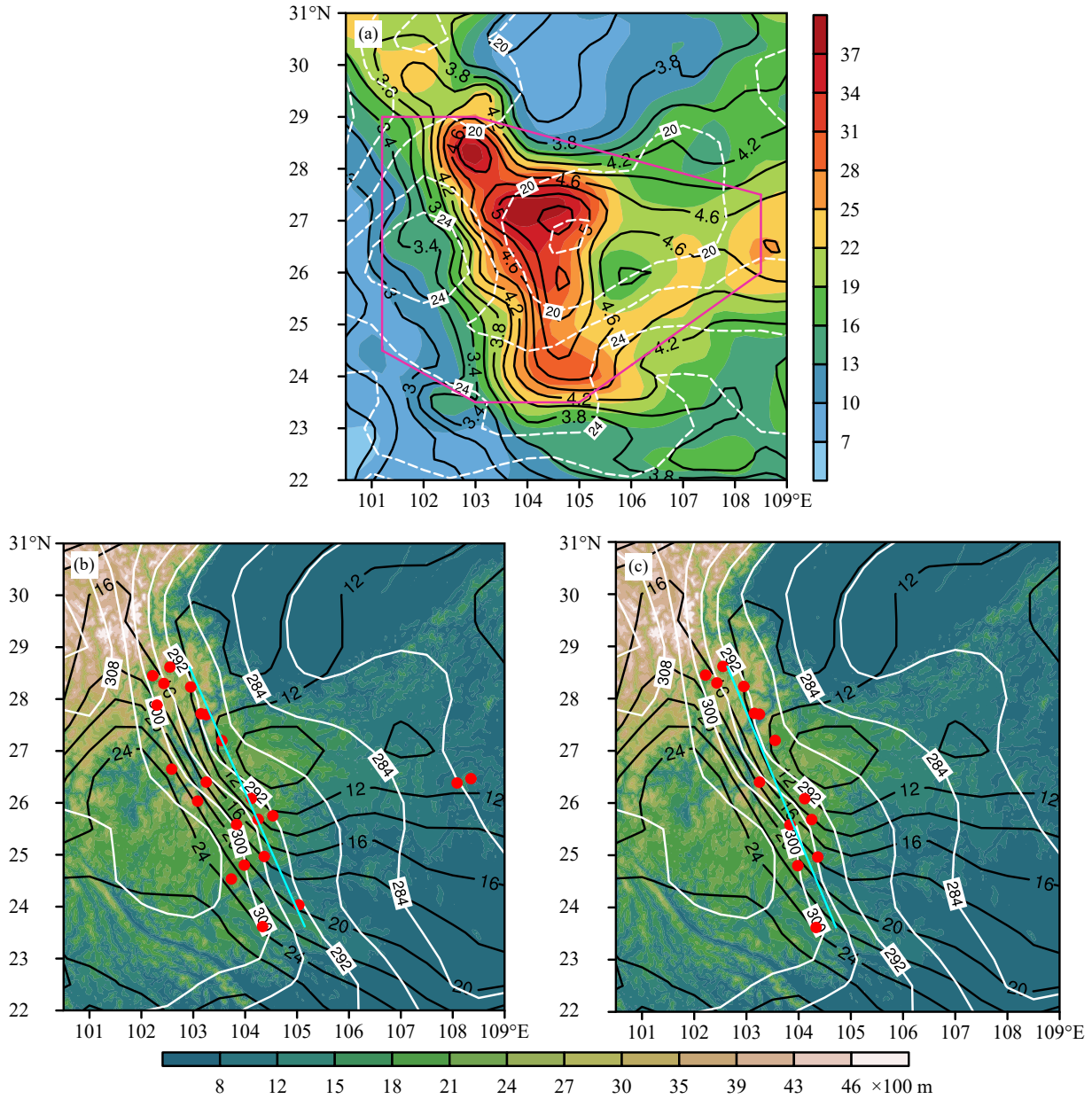


图 2 (a) 云贵高原地区年平均气象要素空间分布和 (b、c) 2015 年 4 月 7 日锋线判别示例 (图 a 色阶为日最高气温较前一日降幅超过 5℃ 的年平均频次, 黑色等值线为日最高气温相对于其旬平均的标准差, 白色虚线等值线为年平均日最高气温, 单位: ℃; 深粉色实线框标示重点关注区域。图 b 和图 c 色阶为地形高度; 白色等值线为 2015 年 4 月 7 日 14 时位温分布, 单位: K; 黑色等值线为 14 时气温分布, 单位: ℃。图 b 红点为位温梯度超过 12 K/(经/纬度) 且气温梯度大于 6℃/(经/纬度) 的初选台站, 浅蓝色实线为初选台站的拟合线。图 c 红点表示锋线站, 浅蓝色实线为拟合锋线)

Fig. 2 (a) Spatial distributions of annual means of meteorological elements over the Yunnan-Guizhou Plateau. (b, c) Example of the procedures to obtain the surface frontal line that occurred on 7 April 2015 (the shading in (a) shows the annual occurrence frequency of larger than 5°C decrease of daily maximum temperature when compared with that of the day before (unit: times), black contours are standard deviations of daily maximum temperature relative to the dekad mean of the daily maximum temperature, white dashed contours indicate annual mean of daily maximum temperature (unit: ℃), dark pink lines outline the focus region; the shadings in (b) and (c) indicate the elevation (unit: 100 m), white contours are potential temperature at 14: 00 BT 7 April 2015 (unit: K), black contours show temperature at 14: 00 BT (unit: ℃); red dots in (b) are stations with potential temperature gradient greater than 12 K per longitude/latitude and temperature gradient greater than 6°C per longitude/latitude, the light blue line is the fitting line; red dots in (c) denote stations on the front line and the light blue line is the fitting front line)

$b=-0.42$)。按步骤(4)确定初选锋线有效性,此初选锋线长度为 5.3 经/纬度,其两侧的位温差达到 19.31 K, 14 时气温差达到 11.16℃, 满足步骤(4)的要求,判定该日存在锋线。

4 云贵高原锋线的基本特征

基于 1971—2020 年的 50 a 地面观测资料,使用上述线性拟合方法和标准,判定 4639 d 存在地面锋线,每年平均约 92.8 d。统计逐旬出现锋线的平均天数(图 3a)可见,与已有的相关研究结果类似,锋线主要集中在冷半年,11 月至次年 4 月出现的锋线日数占总锋线日数的 90.7%;1—2 月的锋线日数最多,这两个月中 65.0% 的日数会出现锋面。根据锋面日的连续性判定锋线事件,共有 1136 次事件;扣除单日锋线后,共有 725 次事件。统计历次锋线事件的持续时间,图 3b 中给出了不同持续日数的锋线事件频次分布。每年约 8.2 d 为单日锋线,随持续日数的增加事件数快速减少。在这 50 a 中,持续时间超过 30 d 的事件有 9 次(表 1),持续超过 15 d 的有 48 次,持续超过 10 d 的有 108 次,持续超过 7 d 的有 203 次,持续超过 5 d 的有 310 次,最长持续时间为 48 d。

图 4 给出了锋面日中各台站被判定为锋线台站的百分率(色阶)。高频锋线台站总体呈西北—东南走向,在北部有一较凸出的大值区;锋线出现频次在北部相对集中,向南则逐渐发散。为了更直观地显示这一特征,图 4b 中给出了近 5 年(2016—2020 年)锋线的分布情况,可以看到北部(27°—29°N)锋线有很高的集中度,而锋线南端则

表 1 持续不少于 30 d 的锋线事件
Table 1 Frontal events with duration equal to or longer than 30 d

开始	结束	持续天数(d)
1976年12月23日	1977年1月21日	30
1984年1月15日	1984年3月2日	48
1984年12月12日	1985年1月16日	36
1988年2月8日	1988年3月10日	32
1990年12月27日	1991年1月30日	35
2008年1月12日	2008年2月14日	34
2010年12月31日	2011年2月4日	36
2011年12月17日	2012年2月2日	48
2020年11月21日	2020年12月20日	30

随斜率变化明显离散。这种分布与锋线运动中北端移动距离相对较小、南端移动距离大的特征是一致的。关注图 4a 中锋面日合成的气象要素场:位温(黑色实线)的等值线走向与地形分布有明显对应关系,随海拔升高位温升高,位温与海拔高度的空间相关系数达到 0.83;从 14 时气温(白色虚线)的空间分布可清晰看到锋线西侧的暖中心(高于 20℃)和东侧的冷中心(低于 8℃),且两个中心的连线略偏向东北—西南向。合成锋线(深蓝色线段)的斜率为-0.64,处于位温和气温的高梯度区,且也基本处于西南和东北风(灰色箭头)的分界线上,表明了合成锋线的合理性。

除了锋线两侧大气状况的对峙外,锋线附近气象要素的变化也是锋线的关键特征,同时也是公众对气象的具体关切。全体锋线日合成的锋线附近 14 时气温相较于前一天的变化(简称为变温)仅为 -0.84℃,但这并不意味着云贵高原锋线附近气温

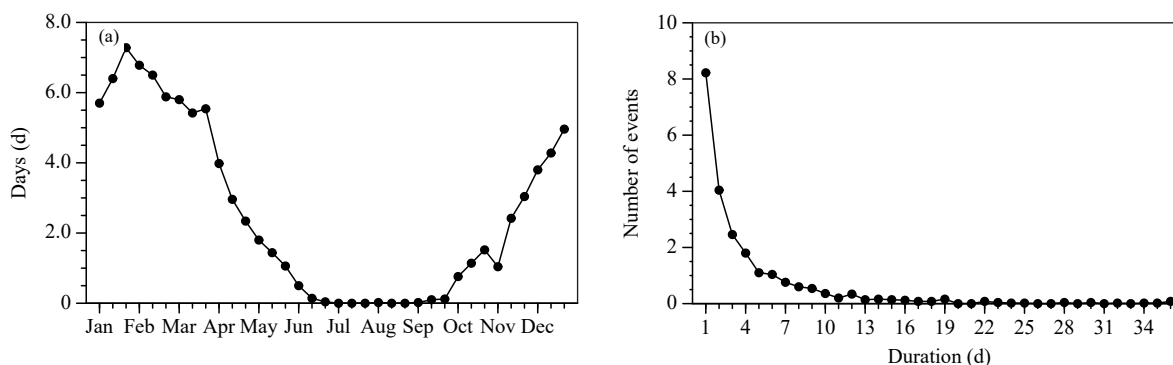


图 3 (a) 年平均锋面日数的逐旬变化和 (b) 年平均不同持续日数的锋线事件频次分布

Fig. 3 (a) Dekad mean of annual frontal days and (b) annual mean of the numbers of frontal events with different durations

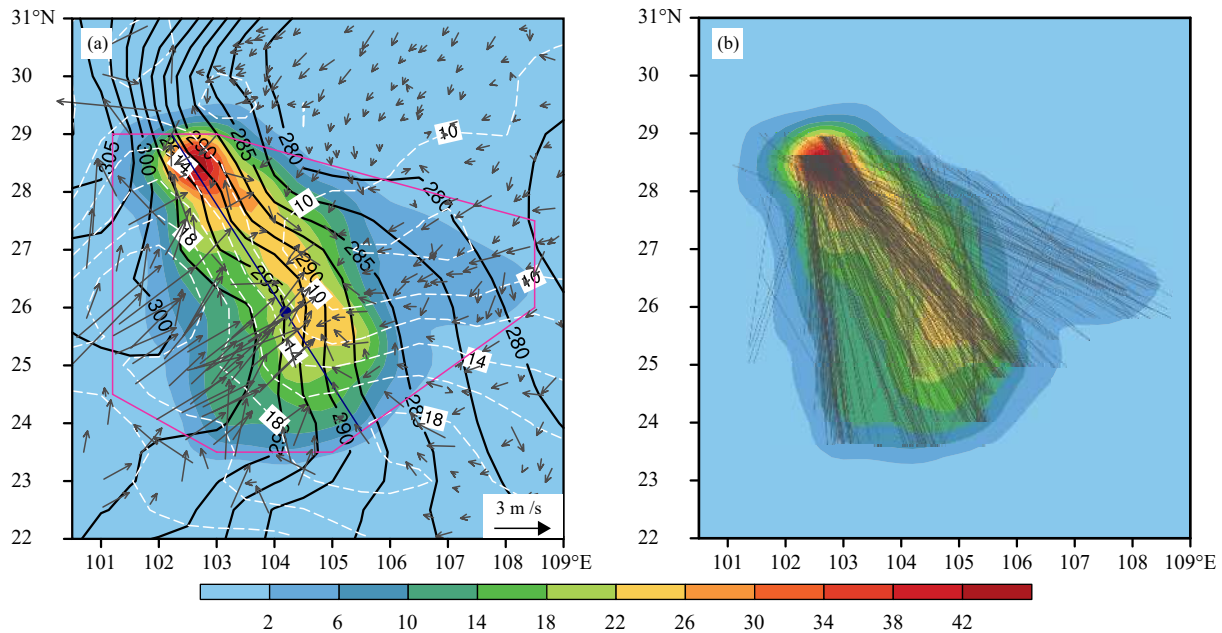


图 4 (a) 4639 d 锋面日合成的气象要素空间分布和 (b) 2016—2020 年锋线分布 (色阶为锋面日中各台站被判定为锋线站的百分率, 单位: %)。图 a 中黑色等值线为锋面日的平均位温, 单位: K; 白色虚线等值线为锋面日的平均 14 时气温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 深灰色矢量箭头表示锋面日平均风场, 单位: m/s; 深蓝色线段表示锋面日合成锋线; 深粉色实线框标示重点关注区域。图 b 中深灰色细线表示锋线)

Fig. 4 (a) Spatial distributions of meteorological elements composed by 4639 frontal days. (b) Frontal lines in 2016–2020 (gray lines). (a) and (b) The percentages of the days being a frontal station to total frontal days at each station (shading, unit: %). (a) Black contours are potential temperature averaged in frontal days (unit: K). White dashed contours are temperature at 14:00 BT averaged in frontal days (unit: $^{\circ}\text{C}$). Gray vectors are surface winds averaged in frontal days (unit: m/s). Dark blue line is the composed frontal line. Dark pink lines outline the focus region)

变化小, 其原因在于全体锋线合成使得正、负变温相互抵消。以锋线周边站点相较于前一天的变温为标准, 可区分出冷性(负变温)和暖性(正变温)锋线。变温为正、负的锋线日数分别为 1996 d 和 2643 d, 平均变温分别为 1.83 和 -2.63°C ; 为方便讨论, 后文分别简称为“暖锋”“冷锋”。图 5a 给出了 1996 条暖锋和 2643 条冷锋在不同经度上与 26°N (重点关注区域的南北向中线附近)相交的次数占总锋线数的百分比。两类锋线主要出现在 102°E 至 106°E , 暖锋频次最大值出现在 105°E 附近, 冷锋频次在 102.5°E — 105°E 均较高。冷锋总日数多于暖锋, 在 104.5°E 以西出现更频繁; 在 104.5°E — 105.75°E , 暖锋数量占优。图 5b 为两类锋线的平均斜率随经度的变化, 两条线的走势基本一致, 冷、暖锋斜率均呈现自东向西线性增大的特征, 即自东向西锋线由西北—东南向顺时针旋转至南北向, 这一特征在图 4b 中有直观体现。图 5c 中以锋线与 26°N 的交点表征锋线经度, 给出了锋线在不同经度时锋线附近的变温分布。冷锋的负变温在 102°E

最大, 达到 -5.66°C ; 暖锋正变温的最大值出现在 105.75°E , 锋线附近相邻日的 14 时气温平均升幅达 2.82°C 。

图 6 给出了两类锋线分别合成的气象要素相较于前一日的变化。冷锋日的变温大值区出现在锋线东侧(图 6a), 平均最强降温超过 3.25°C 。如图 6b 所示, 伴随着锋线附近的降温, 日照时数相较于前一天减少, 邻近锋线的平均最大降幅超过 1.8 h; 整个区域均为正变压, 最强正变压位于锋线的北端以东, 锋线中南部以东也有一局地正变压中心, 正变压幅度自东北向西南逐步减弱; 锋线西侧的风场变化以垂直于锋线的异常东北风为主。暖锋日的平均正变温最大可达 3.3°C , 大值区基本平行于锋线, 位于锋线西侧(图 6c)。相应地, 日照增加的大值区也位于锋线以西(图 6d), 平均最大值可大于 1.8 h; 锋线附近及两侧气压均降低, 锋线东侧变压幅度最大, 向西南逐步递减; 锋线西侧的风场变化表现为异常西南风, 指向锋线。另外, 从两类锋线的空间分布来看, 冷锋和暖锋均在北端存在一个集

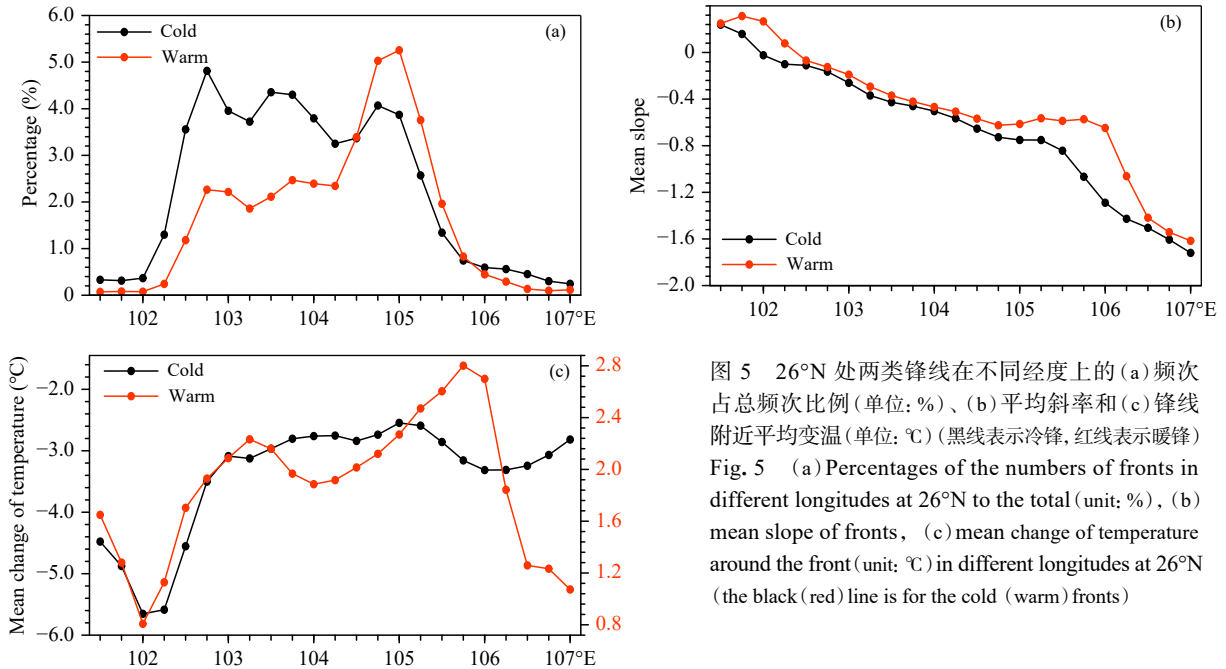


图5 26°N处两类锋线在不同经度上的(a)频次占总频次比例(单位: %)、(b)平均斜率和(c)锋线附近平均变温(单位: °C)(黑线表示冷锋, 红线表示暖锋)
 Fig. 5 (a) Percentages of the numbers of fronts in different longitudes at 26°N to the total (unit: %), (b) mean slope of fronts, (c) mean change of temperature around the front (unit: °C) in different longitudes at 26°N (the black (red) line is for the cold (warm) fronts)

中的大值区,但冷锋分布型在此大值区以南很快分散,而暖锋则相对集中,这与图5a中所示结果一致。

上述两类锋线附近气象要素的明显变化与锋线的移动紧密关联。为了定量考察锋线移动特征并分析其与周边气象要素变化的关联,这里给出锋线移动的客观标定方法。考虑到锋线北端移动相对较小,南端移动相对较大,在相邻两天都存在锋线时,以两条锋线南端1/3点间的距离作为锋线的移动距离,向西移动时定义距离为负,向东移动时定义距离为正。以图7a为例,图中分别给出了相邻2d的位温场和按照文中方法判定的锋线,红色点为南端1/3点的位置,红色线段为定义的锋线移动距离。此例中锋线以北端为轴顺时针旋转,移动距离为-2.84经/纬度。对照位温场的空间分布,这种对锋面移动的定量化描述可合理刻画两日间位温梯度大值区的变化。

利用这一移动定义,对4639个锋线日中前一天已存在锋线的3502d,统计了地面锋线移动的基本特征。图7b给出不同移动距离的锋线占3502d的百分比,总的来看,西移锋线数大于东移锋线数。从移动的绝对距离来看,相对前一天的锋线平均移动约0.90经/纬度。有29.7%的锋线移动在0.5经/纬度以内,63.6%的锋线移动在1经/纬度以内,这进一步表明,“静”的确是云贵高原锋线的突出特征。但从图7b也可看出,有相当比例的锋线

移动大于1经/纬度,与之相关联的锋线周边的温度、气压和天气现象可能发生明显变化。

考察锋线移动距离与锋线附近气象要素变化的联系,图8a—c分别给出锋线附近的变温、变压和变日照对应于历次锋线移动距离的散点分布。3个要素均与锋线移动呈很好的线性关系,变温、变压和变日照与移动距离的线性相关系数分别为0.75、-0.69和0.68。总的来看,当锋线自东向西推进时,移动距离越远则降温幅度越大、正变压越大、日照时数减幅越大;当锋线向东移动时,移动距离越远则升温越高、负变压越大、日照时数增幅越大。这种高相关证实了锋线附近气象要素变化与锋线移动间的紧密关联。

5 云贵高原锋线事件的演变特征

由前文分析已知,50a内持续7d及以上的锋线事件共有203次,取这些事件的前7d进行合成,并考察合成后的逐日演变特征。从斜率变化(图9a)来看,从-1.0逐步演变为-0.47,即7d内均为西北—东南向。图9b为合成锋线最南端点的位置演变,纬度和经度均呈总体减小的趋势,即该端点在由东北向西南逐步移动。图9c直观给出了第1至7天的合成锋线位置,可以清楚地看到锋线的顺时针旋转过程。

在了解203次事件整体特征的基础上,进一步

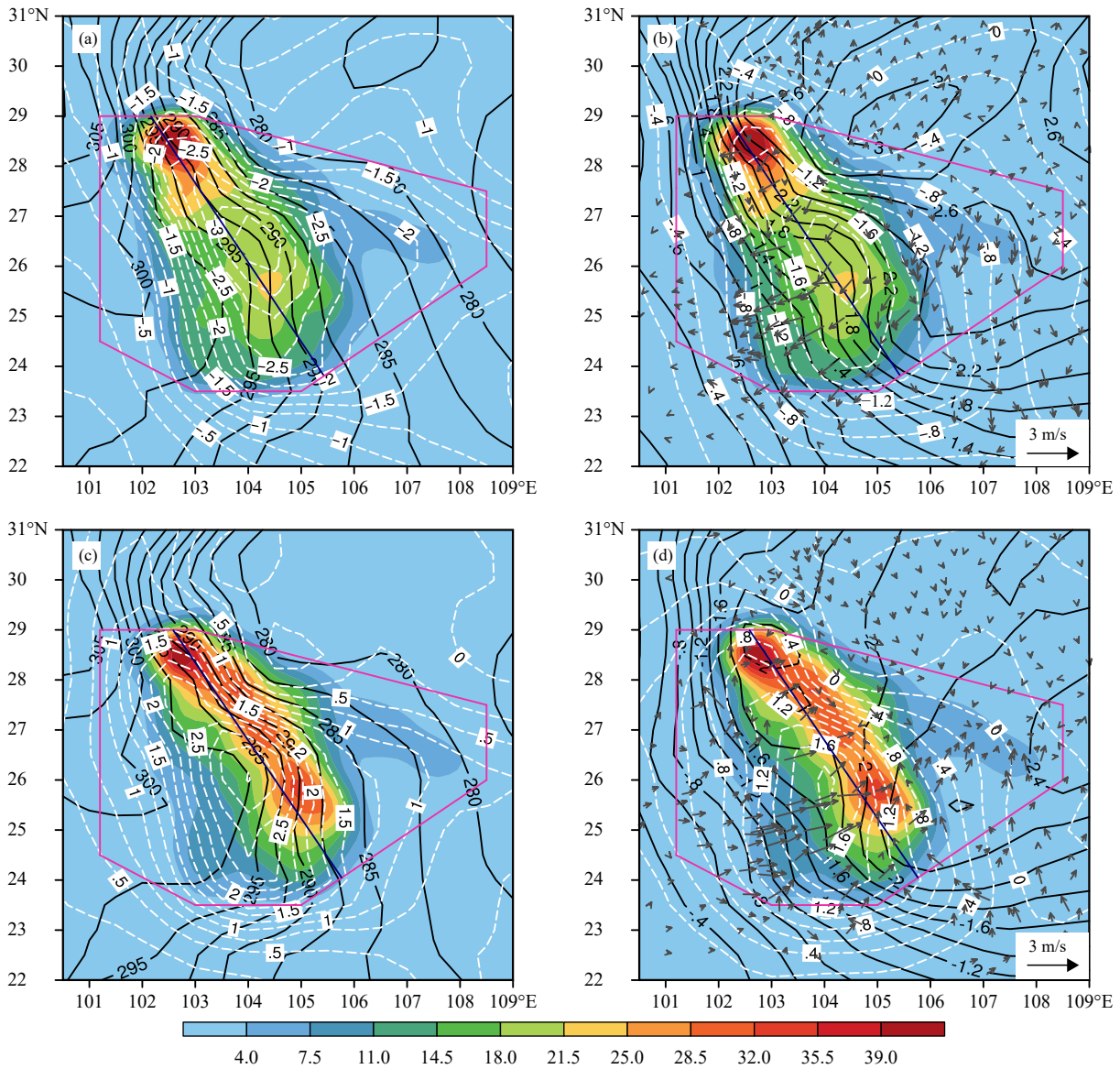


图 6 (a, b) 冷锋和 (c, d) 暖锋周边气象要素空间分布 (色阶为总冷锋 (暖锋) 日中各台站被判定为冷锋 (暖锋) 锋线站的比例, 单位: %; 深蓝色线段为冷锋 (暖锋) 合成锋线; 深粉色实线框标示重点关注区域。图 a, c 黑色等值线分别为冷锋、暖锋锋面日合成位温, 单位: K; 白色等值线分别为冷锋、暖锋锋面日相较于其前一天 14 时气温的变化, 单位: $^{\circ}\text{C}$ 。图 b, d 黑色等值线、白色等值线以及灰色矢量箭头分别为冷锋、暖锋锋面日相较于其前一日气压 (单位: hPa)、日照 (单位: h) 以及风场 (单位: m/s) 变化)

Fig. 6 Spatial distributions of meteorological elements composed in (a, b) cold and (c, d) warm frontal days (the shading is the percentages of the days being a frontal station to total (a, b) cold and (c, d) warm frontal days at each station (unit: %); dark blue lines are the composed frontal line; dark pink lines outline the focus region; potential temperature (black contour, unit: K) and deviation of temperature at 14: 00 BT of the frontal day to the day before (white dashed contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) averaged in (a) cold and (c) warm frontal days; deviation of daily mean surface pressure (black contour, unit: hPa), sunlight (white dashed contour, unit: h) and winds (gray vector, unit: m/s) of frontal day to the day before averaged in (b) cold and (d) warm frontal days)

分析了其中不同类型事件的差异。针对连续演变的锋线事件, 统计锋线前 7 d 的平均移动情况, 203 次事件平均绝对移动距离为 0.28 经/纬度。以前 7 d 的平均移动情况为分类依据, 可大致分为 3 类: (1) 移动的绝对距离在 0.3 经/纬度之内的, 为

静止型; (2) 向西移动大于 0.3 经/纬度的, 为西移型; (3) 向东移动大于 0.3 经/纬度的, 为东移型。静止型事件共有 117 次, 西移型事件有 75 次, 东移型事件有 11 次; 从比例分配来看, 稳定少动是云贵高原持续性锋线生成后 7 d 内的主要特征, 西移次之,

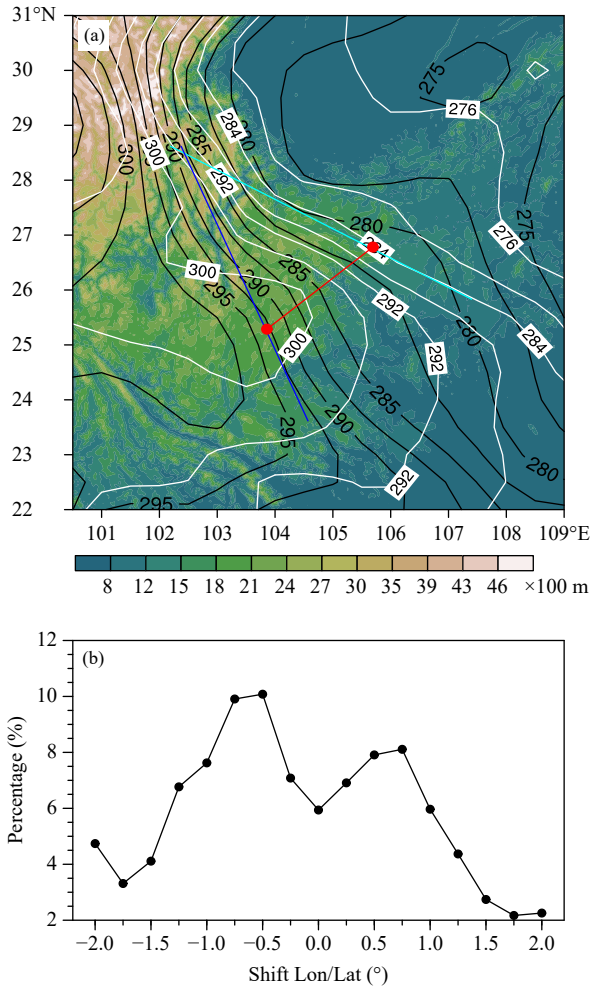


图 7 (a) 2016 年 12 月 25—26 日锋线分布、移动(图 a 中色阶为地形高度, 单位: 100 m; 白(黑)色等值线分别为 25 (26) 日位温, 单位: K; 浅(深)蓝色线段为 25 (26) 日锋线位置; 锋线上红点标示锋线南端 1/3 处的位置; 红线为 26 日相较于 25 日锋线移动距离)及 (b) 不同移动距离的锋线占总移动锋线的比例(单位: %)

Fig. 7 (a) The front lines on 25 (the light blue line) and 26 (the dark blue line) December 2016 (the potential temperature (unit: K) on 25 (the white contour) and 26 (the black contour); red dots are the 1/3 to the most south point of the front lines and red line represents the distance of the movement of the front line between the 25 and 26; the shading is the topography (unit: 100 m)) and (b) percentages of the front lines with different moving distances to the total (unit: %)

东移最少。从 2—7 d 逐日的移动距离演变(图 10a)来看, 静止型前 3 d 向西, 后 3 d 略向东, 主要特征是很小幅度的东西向摆动; 而合成的西(东)移型则体现为持续的向西(东)移动, 且移动的绝对距离大于静止型。用与 26°N 交点的经度表征锋线位置(图 10b), 静止型维持在 104.26°E 至 105.03°E 间不足 0.8 经

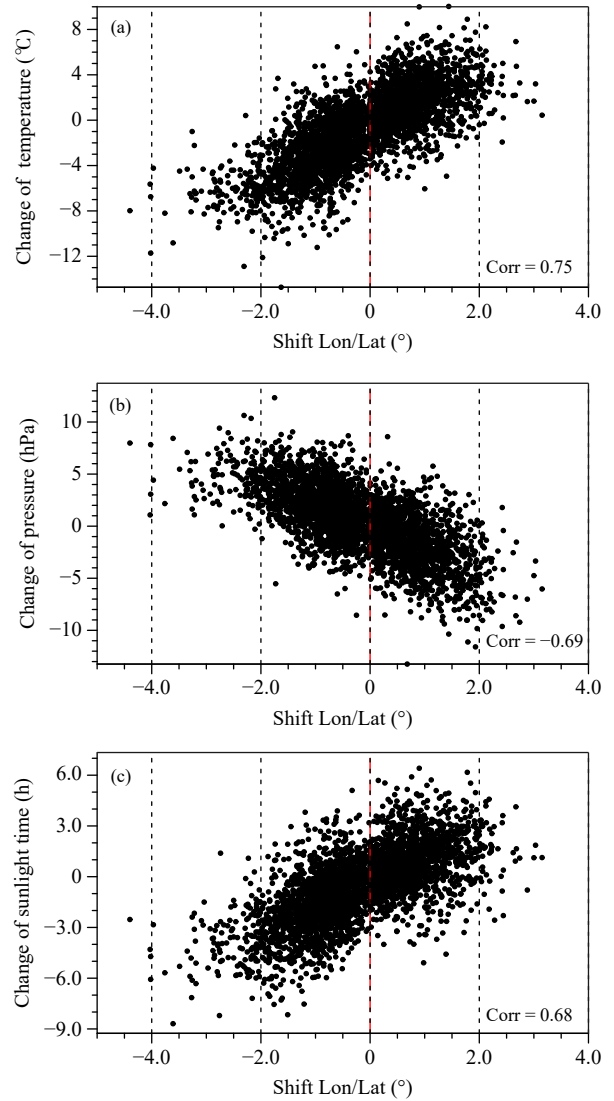


图 8 锋线移动距离与锋线附近 (a) 变温(单位: °C)、(b) 变压(单位: hPa) 和 (c) 变日照(单位: h) 的散点分布(红色虚线表示移动为 0, 右下角标示移动距离与各气象要素变化的相关系数)

Fig. 8 Scatter plots of the shifted degrees of front lines and the change of (a) temperature (unit: °C), (b) pressure (unit: hPa) and (c) sunlight time (unit: h) (red dashed lines represent zero, the correlation coefficients are given on the down right)

度的范围内; 西移型跨度最大, 从 106.81°E 向西推进至 103.37°E; 东移型活动范围介于前两者之间, 从 103.49°E 向东至 106.45°E。从气象要素演变(图 10c、d)来看, 静止型锋线附近的变温和变日照幅度最小; 西移型连续 7 d 均为降温 and 日照减少, 合成的最大降温幅度可达 3.04°C, 日照减少的最大值可达 1.81 h; 东移型有 6 d 为正变温, 其中 4 d 日照

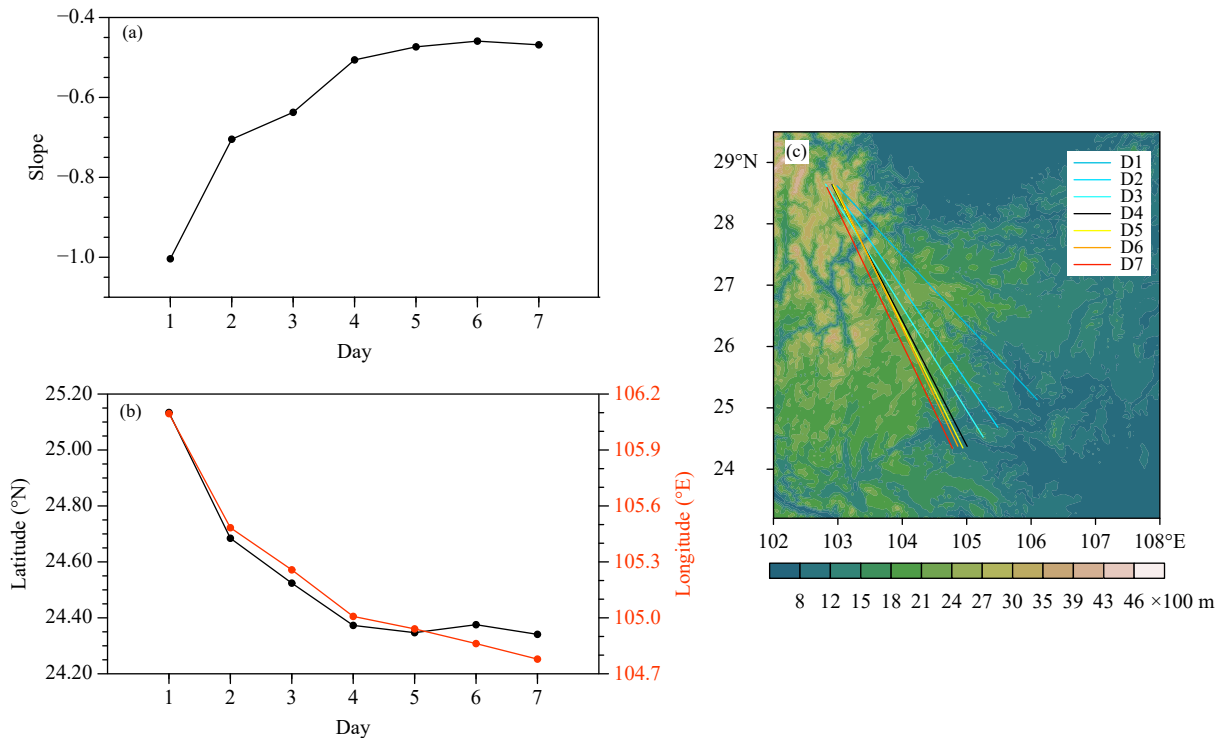


图9 持续7 d以上的锋线事件前7 d逐日合成的(a)斜率,(b)锋线南端位置(黑(红)线表示锋线南端纬(经)度变化),(c)锋线的空间分布(色阶为地形高度,单位:100 m;7条彩色线分别标示7日锋线的空间分布)

Fig. 9 (a) The slope, (b) the southmost points (latitudes, the black line, longitudes, the red line) of the front lines in the first 7 days averaged for the frontal events lasting longer than 7 d and (c) spatial distribution of the frontal lines in the first 7 days composed in the frontal events lasting longer than 7 d and the topography (shading, unit: 100 m)

增加,最大升温可达 2.31°C ,日照增加可达1.16 h。

3类事件在锋线分布上也有差异,图11为逐日合成的3类事件锋线位置。静止型锋线集中,位置和斜率均少动,7 d间斜率变化范围仅为 -0.83 至 -0.48 (图11a)。西移型锋线(图11b)为典型的北部少动,南端顺时针摆动,同时存在锋线整体的西移和斜率的明显变化(-1.35 至 -0.31)。相较于西移型,东移型锋线的轨迹基本相反,前3 d在西部局地小幅移动,后3 d以北端为轴快速逆时针摆动,斜率变化范围为 -0.37 至 -1.32 (图11c)。

6 结论和讨论

(1) 初步提出了一种基于线性拟合的简单地面锋线客观判别方法,并运用该方法识别出过去50 a(1971—2020年)的4639个锋线。锋线的基本气候特征与此前对该地区锋线的认知基本一致,验证了方法的合理性。比如,段旭等(2017)判定出一次始于2008年1月12日,结束于2月15日的持续35 d的长持续锋线事件。文中方法判定为1月

12日至2月14日存在持续34 d的长持续锋线(表1)。比较图12a和段旭等(2017)的图3和表1可见,两者方法确定的锋线在 26°N 的经度位置变化基本一致。两者仅有的主要差别是锋线事件的结束时间。由2月15日(图12b)14时位温和气温分布可知,在 26°N 附近当日无明显锋线,因此判定此次锋线事件持续至14日。

(2) 基于锋线附近气温的24 h变化,将锋线分为冷、暖两种类型。冷性锋线日共2643 d,出现频次在 102.5° — 105°E 均较高,最大降温区在锋线东侧;暖性锋线日为1996 d,锋线多集中在 104.5° — 105.75°E ,最大升温区位于锋线西侧。

(3) 给出了一个锋线移动的客观标定方法。相对前一天,锋线平均移动的绝对距离约0.90经/纬度,63.6%的锋线移动的绝对距离在1经/纬度以内。锋线的移动距离与锋线附近气象要素的变化紧密相关。

(4) 示范了3种类型锋线的移动特征。对203次持续7 d以上的锋线事件的前7 d演变进行

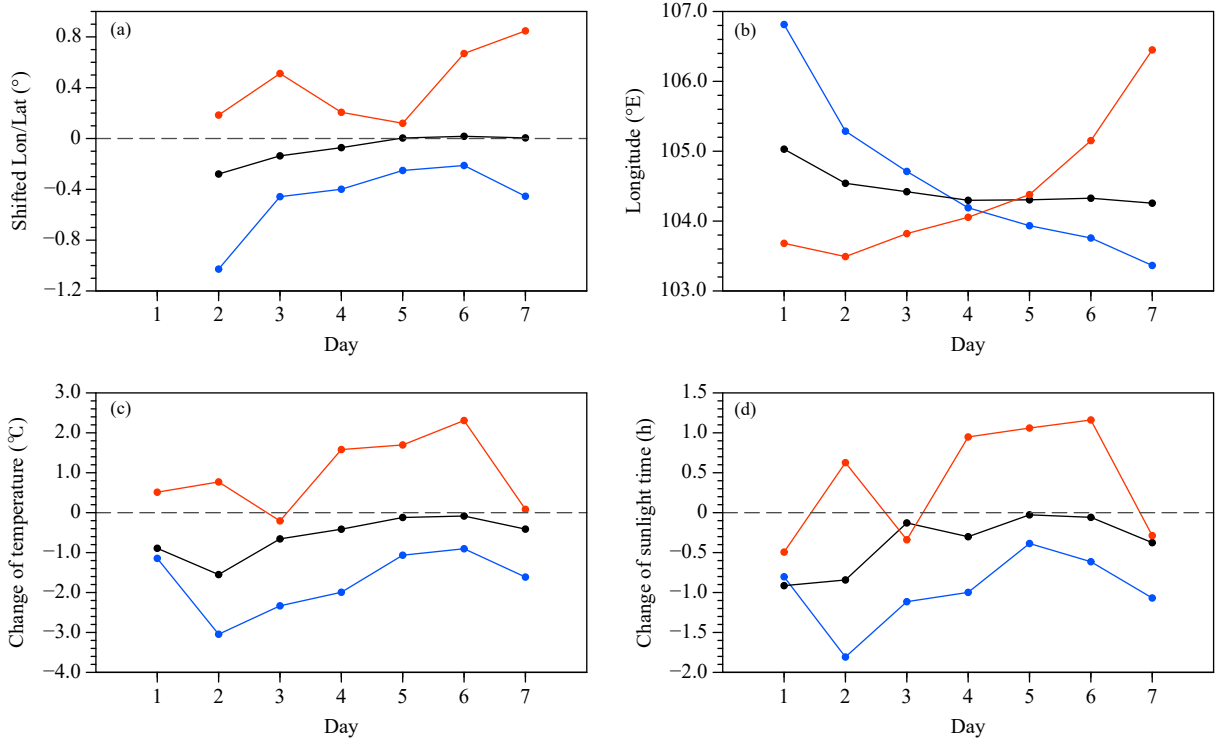


图 10 三类长持续锋线事件前 7 d 的 (a) 移动距离、(b) 与 26°N 相交的经度、(c) 变温 (单位: °C) 和 (d) 变日照 (单位: h) 的逐日演变 (蓝色表示西移型锋线事件, 黑色表示静止型锋线事件, 红色表示东移型锋线事件)

Fig. 10 (a) The shifted Lon/Lat (°), (b) the longitude crossing 26°N, (c) temperature change (unit: °C) and (d) sunlight time change (unit: h) of the westward moving (blue line), the eastward moving (red line) and the stationary (black line) frontal lines in the first 7 days averaged in the frontal events lasting longer than 7 d

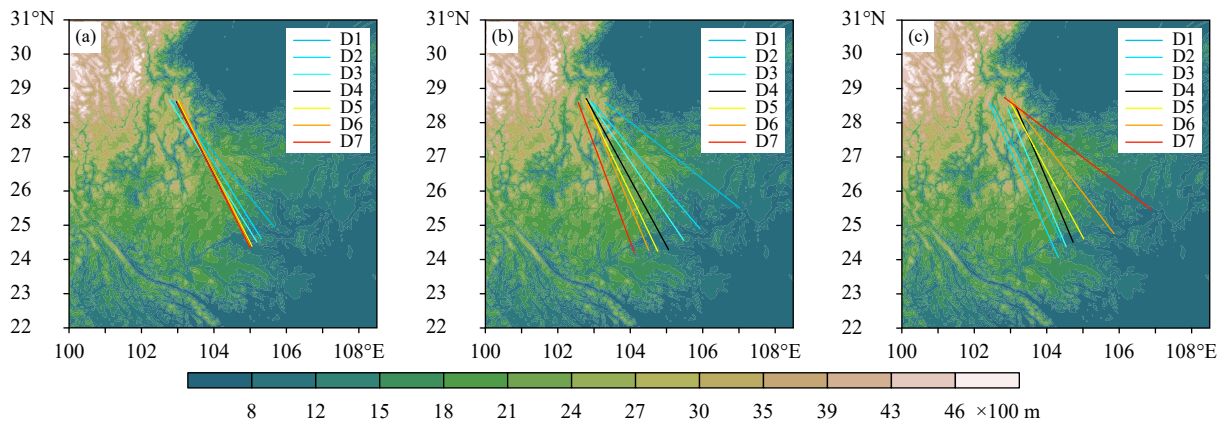


图 11 (a) 静止型、(b) 西移型和 (c) 东移型持续性锋线事件前 7 d 逐日合成的锋线位置 (色阶为地形高度, 单位: 100 m)

Fig. 11 Spatial distributions of the frontal lines in the first 7 d composed in the (a) stationary, (b) westward moving and (c) eastward moving frontal events lasting longer than 7 d (the shading is the topography, unit: 100 m)

合成, 表明锋线总体呈西移且顺时针转动的特征。依据锋线的移动情况将这些事件划分为静止、西移和东移 3 类。静止型占比最大, 西移型可快速向西推进且伴随锋线附近的强降温, 东移型次数最少, 锋线附近气温上升。

云贵高原锋面系统是这一区域的主导天气系统, 特别是在冬、春季。但由于对云贵高原锋面系统的研究不足, 对其演变过程的认知不深入, 因而对其精准预报的能力仍然有限。目前对开展云贵高原锋面系统演变规律的深入和细化研究还缺乏

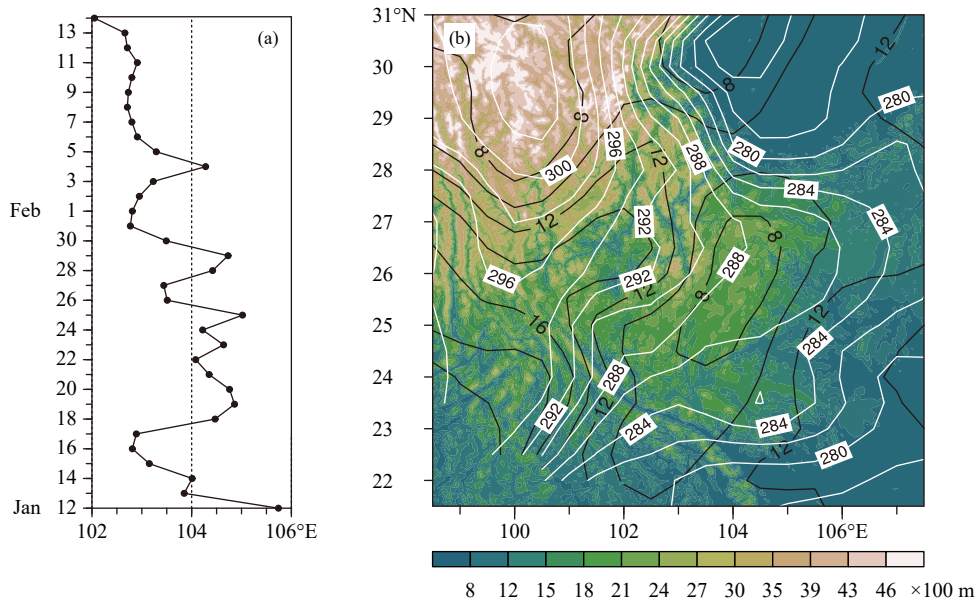


图 12 (a) 2008 年 1 月 12 日至 2 月 14 日锋线与 26°N 相交的经度, (b) 2008 年 2 月 15 日 14 时温度和位温分布 (色阶为地形高度, 单位: 100 m; 黑(白)色等值线表示温度(位温), 单位: °C (K))

Fig. 12 (a) The longitude crossing with 26°N for the frontal lines from 12 January to 14 February 2008, (b) the potential temperature (the white contour, unit: K) and temperature (the black contour, unit: °C) at 14: 00 BT 15 February 2008 (the shading indicated the elevation, unit: 100 m)

有效的方法和技术路线。本研究提出的云贵高原地面锋线客观判别方法适用于各类台站和格点资料, 既可应用于实时资料分析, 也可用于各类数值预报产品。相较于此前的锋面分析方法, 该方法通过线性拟合确定地面锋线, 可在客观给出每一条锋线的走向和位置的基础上, 客观给出锋面的移动、冷暖等特征。一方面, 有助于客观表述“准静止”锋的“动”态演变规律; 另一方面, 通过综合分析锋线的移动状况、锋线附近变温、变压等多种因素, 为合成分析三维环流结构, 更全面、系统地了解锋面的完整结构、类别特征和相关联的精细化天气演变奠定了基础。

目前本方法还很初步, 比如, 云贵高原地区最突出的特征就是复杂地形的多尺度影响, 当前的拟合和客观判定方法需要在结合地形影响等方面做进一步的调整和优化。所以, 文中主要关注的是方法和技术路线, 而不是具体哪一天是否被判定为地面锋线。在后续工作中, 将在进一步完善锋线拟合和相关客观判别方法的基础上, 对锋线进行更细致地分类分型, 以揭示更精细的锋线移动和演变特征, 并结合不同类型锋线的三维环流场合成分析, 深化云贵高原锋面形成和演变的机理研究, 为与锋

线相关的地面气象要素的精细化预报提供更有效的前期判据和预报着眼点。

参考文献

陈谋, 陈辅平. 1984. 云贵暖锋的个例分析. 高原气象, 3(3): 97-101. Chen M, Chen F P. 1984. Case analysis of the Yungui warm front. Plateau Meteor, 3(3): 97-101 (in Chinese)

丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳等. 2008. 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, 66(5): 808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming. Acta Meteor Sinica, 66(5): 808-825 (in Chinese)

杜小玲, 高守亭, 彭芳. 2014. 2011 年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究. 大气科学, 38(1): 61-72. Du X L, Gao S T, Peng F. 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou. Chinese J Atmos Sci, 38(1): 61-72 (in Chinese)

杜正静. 2007. 滇黔准静止锋对贵州地区天气的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学. Du Z J. 2007. The effect on weathers of Guizhou of quasi-stationary front over Yunnan and Guizhou Provinces[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

杜正静, 丁治英, 张书余. 2007. 2001 年 1 月滇黔准静止锋在演变过程中的结构及大气环流特征分析. 热带气象学报, 23(3): 284-292. Du Z J, Ding Z Y, Zhang S Y. 2007. Analysis of atmospheric circulation and structure of Yunnan-Guizhou quasi-stationary front during its evolution. J Trop Meteor, 23(3): 284-292 (in Chinese)

- 杜正静, 何玉龙, 熊方等. 2015. 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*, 34(2): 357-367. Du Z J, He Y L, Xiong F, et al. 2015. Analysis on the frontogenesis mechanism of Dian-Qian quasi-stationary front inducing spring rainstorm in Guizhou Province. *Plateau Meteor*, 34(2): 357-367 (in Chinese)
- 段旭, 李英, 孙晓东. 2002. 昆明准静止锋结构. *高原气象*, 21(2): 205-209. Duan X, Li Y, Sun X D. 2002. The structure of Kunming quasi-stationary front. *Plateau Meteor*, 21(2): 205-209 (in Chinese)
- 段旭, 段玮, 邢冬. 2017. 昆明准静止锋客观判识方法研究. *气象学报*, 75(5): 811-822. Duan X, Duan W, Xing D. 2017. A study of objective determination method for the Kunming quasi-stationary front. *Acta Meteor Sinica*, 75(5): 811-822 (in Chinese)
- 段旭, 段玮, 邢冬等. 2018. 冬春季昆明准静止锋与云贵高原地形的关系. *高原气象*, 37(1): 137-147. Duan X, Duan W, Xing D, et al. 2018. The relationship between Kunming quasi-stationary front and Yunnan-Guizhou Plateau terrain. *Plateau Meteor*, 37(1): 137-147 (in Chinese)
- 樊平. 1956. 昆明准静止锋. *天气月刊*, 6(S1): 14-16. Fan P. 1956. Kunming quasi-stationary front. *J Weather*, 6(S1): 14-16 (in Chinese)
- 黄更生. 1984. 冬半年影响昆明地区的冷锋静止锋. *云南气象*, (4): 4-11. Huang G S. 1984. The cold stationary front influencing Kunming in winter. *Yunnan Meteor*, (4): 4-11 (in Chinese)
- 李英, 段旭, 潘里娜. 1999. 昆明准静止锋的准地转 Q 矢量分析. *气象*, 25(8): 6-10. Li Y, Duan X, Pan L N. 1999. A quasi-geostrophic Q -vector analysis of Kunming quasi-stationary front. *Meteor Mon*, 25(8): 6-10 (in Chinese)
- 李英, 舒智. 2000. 云南春季冰雹、大风天气的中尺度扰动特征. *气象*, 26(12): 16-19. Li Y, Shu Z. 2000. The mesoscale disturbance features of high wind and hail event over Yunnan in spring. *Meteor Mon*, 26(12): 16-19 (in Chinese)
- 罗四维. 1960. 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. Luo S W. 1960. The characteristics of air circulation over the Tibetan Plateau//Yang J C, Tao S Y, Ye D Z, et al. Meteorology on the Tibetan Plateau. Beijing: Sciences Press (in Chinese)
- 潘菊芳. 1953. 冬半年华南的准静止锋. *天气*, (3): 1-9. Pan J F. 1953. The south china stationary front in winter. *Weather*, (3): 1-9 (in Chinese)
- 潘里娜, 李英. 1999. 冬春季昆明准静止锋若干统计特征. *云南气象*, (4): 37-40. Pan L N, Li Y. 1999. The statistical features of the Kunming quasi-stationary fronts in spring and winter. *Yunnan Meteor*, (4): 37-40 (in Chinese)
- 索渺清, 丁一汇. 2016. 昆明准静止锋的发现和认识. *气象科技进展*, 6(3): 6-16. Suo M Q, Ding Y H. 2016. The discovery and study of Kunming quasi-stationary front. *Adv Meteor Sci Technol*, 6(3): 6-16 (in Chinese)
- 陶祖钰, 郑永光, 张小玲. 2008. 2008 年初冰雪灾害和华南准静止锋. *气象学报*, 66(5): 850-854. Tao Z Y, Zheng Y G, Zhang X L. 2008. Southern China quasi-stationary front during ice-snow disaster of January 2008. *Acta Meteor Sinica*, 66(5): 850-854 (in Chinese)
- 许美玲, 段旭, 纪明辉等. 2011. 云南省天气预报员手册. 北京: 气象出版社. Xu M L, Duan X, Qi M H, et al. 2011. Weather Forecast Manual of Yunnan Province. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 徐裕华, 王宗德, 王明. 1991. 西南气候. 北京: 气象出版社. Xu Y H, Wang Z D, Wang M. 1991. Climate of Southwest China. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 杨贵名, 毛冬艳, 孔期. 2009. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析. *气象学报*, 67(4): 652-665. Yang G M, Mao D Y, Kong Q. 2009. Analysis of the frontal characteristics of the cryogenic freezing rain and snow weather. *Acta Meteor Sinica*, 67(4): 652-665 (in Chinese)
- 杨静, 吴哲红, 汪超等. 2018. 云贵准静止锋雾的中尺度环境场分析及短期预报着眼点. *中低纬山地气象*, 42(3): 1-10. Yang J, Wu Z H, Wang C, et al. 2018. The meso-scale environment analysis and the forecast starting point of the Yunnan-Guizhou Quasi-stationary front fog. *Mid-Low Latitude Mountain Meteor*, 42(3): 1-10 (in Chinese)
- 尤红, 曹中和, 郭文华等. 2006. 昆明静止锋下的云南强倒春寒天气分析. *气象*, 32(3): 56-62. You H, Cao Z H, Guo W H, et al. 2006. Analysis of Yunnan severe coldness in the late spring under Kunming quasi-stationary front. *Meteor Mon*, 32(3): 56-62 (in Chinese)
- 查书瑶, 伊兰, 赵平. 2015. 冬季华南准静止锋的结构和类型特征研究. *大气科学*, 39(2): 513-525. Zha S Y, Yi L, Zhao P. 2015. Structure and type characteristics of the winter quasi-stationary front in South China. *Chinese J Atmos Sci*, 39(2): 513-525 (in Chinese)
- 张丙辰. 1947. 吾国西南之气团及准静止面. *科学*, 29(11): 339. Zhang B C. 1947. The air mass and quasi-stationary front over southwestern China. *Science*, 29(11): 339 (in Chinese)
- 张精华, 张万诚, 郑建萌等. 2016. 1970—2009 年冬季昆明准静止锋的变化特征及其影响分析. *高原气象*, 35(5): 1298-1306. Zhang J H, Zhang W C, Zheng J M, et al. 2016. Variation of Kunming quasi-stationary front and its effect analysis in winter during 1970—2009. *Plateau Meteor*, 35(5): 1298-1306 (in Chinese)
- 张腾飞, 鲁亚斌, 张杰等. 2006. 一次低纬高原地区大到暴雪天气过程的诊断分析. *高原气象*, 25(4): 696-703. Zhang T F, Lu Y B, Zhang J, et al. 2006. Diagnostic analysis of a heavy snowstorm process in lower latitude plateau of China. *Plateau Meteor*, 25(4): 696-703 (in Chinese)
- 张亚男, 段旭. 2018. 冬季 1 月昆明准静止锋进退及维持的结构特征. *高原气象*, 37(5): 1375-1387. Zhang Y N, Duan X. 2018. Structural characteristics of the advance, retreat and maintenance of Kunming quasi-stationary front in January. *Plateau Meteor*, 37(5): 1375-1387 (in Chinese)
- Egger J, Tao Z Y. 1992. A note on the dynamics of the quasi-stationary Kunming front. *Meteorol Atmos Phys*, 48(1): 225-229
- Zhao D, Yang R W, Tao Y, et al. 2019. Objective detection of the Kunming quasi-stationary front. *Theor Appl Climatol*, 138(3): 1405-1418