

段旭, 张亚男, 梁红丽. 2018. 三种温湿参数下昆明准静止锋锋面位置及锋生函数诊断的对比分析 [J]. 大气科学, 42 (2): 301–310. Duan Xu, Zhang Ya'nan, Liang Hongli. 2018. A comparative analysis of the Kunming quasi-stationary frontal position and frontogenesis function with three different temperature and humidity parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 301–310, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17116.

三种温湿参数下昆明准静止锋锋面位置及 锋生函数诊断的对比分析

段旭¹ 张亚男² 梁红丽³

1 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

2 云南大学大气科学系, 昆明 650500

3 云南省气象台, 昆明 650034

摘 要 针对 2008 年 1~2 月昆明准静止锋天气过程, 讨论了位温、相当位温和广义位温三个温湿参数及其对应的锋生函数, 对比分析结果表明: (1) 广义位温因其湿度因子权重过大, 不适用于分析以温度梯度定义的昆明准静止锋锋面位置和强度; (2) 理想状态下的干大气位温和饱和大气相当位温仅与气压和温度有关, 均能较好地反映大气温度场特征, 适用于昆明准静止锋的分析, 比较而言相当位温对温度锋区的描述更为显著; (3) 用位温或相当位温计算锋生函数所得结果直接表达了因温度场变化导致的锋面生消状况, 而用广义位温计算锋生函数所得结果同时包含温度锋生(消)和湿度锋生(消)两种情况, 不能简洁地判断昆明准静止锋锋面生消状况。

关键词 位温 相当位温 广义位温 昆明准静止锋 锋生函数

文章编号 1006-9895(2018)02-0301-10

中图分类号 P441

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17116

A Comparative Analysis of the Kunming Quasi-stationary Frontal Position and Frontogenesis Function with Three Different Temperature and Humidity Parameters

DUAN Xu¹, ZHANG Ya'nan², and LIANG Hongli³

1 Meteorological Institute of Yunnan Province, Kunming 650034

2 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650500

3 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

Abstract This paper discusses potential temperature (PT), equivalent potential temperature (EPT), generalized potential temperature (GPT), and corresponding frontogenesis function during the weather process of Kunming quasi-stationary front (KQSF) in January and February 2008. Results are as follows. (1) Due to the large weighting factor of humidity in the GPT, it is not appropriate for analyzing the position and intensity of the KQSF, which is determined by temperature gradient. (2) In an ideal state, the dry atmospheric PT and the saturated atmospheric EPT are only related to temperature and pressure, and can better describe the characteristics of the atmospheric temperature field. Thus both PT and EPT can be applied for analyzing the KQSF, while the EPT can better describe temperature frontal zone. (3) Frontogenesis

收稿日期 2017-01-25; 网络预出版日期 2017-10-24

作者简介 段旭, 男, 1960 年出生, 正研级高级工程师, 主要从事低纬高原天气研究。E-mail: ynmox@sina.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41365006、41665004

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41365006 and 41665004)

function calculated from PT or EPT can directly represent the situation of frontogenesis and frontolysis caused by changes in temperature, while the result of the GPT is able to indicate the temperature frontogenesis (frontolysis) and humidity frontogenesis (frontolysis) at the same time, yet it cannot be simply adopted to determine the front frontogenesis or frontolysis situation of the KQSF.

Keywords Potential temperature, Equivalent potential temperature, Generalized potential temperature, Kunming quasi-stationary front, Frontogenesis function

1 引言

锋生函数是定量描述锋面生、消趋势的物理量。Petterssen (1936) 和 Miller (1948) 等用干绝热过程位温 θ 梯度的个别变化来讨论锋面的强度变化; Hoskins and Bretherton (1972) 提出了锋生的半地转理论模式, 研究中把梯度 θ 的个别变化作为锋生消的依据; 杨洋和俞佚名 (1995)、李英等 (1999)、池再香等 (2010) 等在研究昆明准静止锋准地转锋生函数、准地转矢量 \mathbf{Q} 、冰冻天气锋生场时, 也使用了 θ 特征量。但实际研究中发现, 锋面附近水汽梯度常常较大, 空气运动并非理想化的干绝热形态, 更多的人 (李振军和赵思雄, 1997; 段旭等, 2002; 杜正静等, 2007, 2015; 郭英莲等, 2009; 杨贵名等, 2009; 杜小玲和蓝伟, 2010; 蒙伟光等, 2012; 吴古会等, 2012; 高守亭等, 2014; 查书瑶等, 2015) 使用假绝热过程中的相当位温 θ_e (或假相当位温 θ_{se}) 特征量来诊断锋面附近大气温湿特征。

实际大气既非完全是干空气, 也不是处处达到饱和的湿空气, 而是处于含有水汽但又不饱和的湿空气状态。曹洁和高守亭 (2008) 从热力学第一定律出发证明了广义位温 θ^* 的物理基础及其守恒性, 完善了 Gao et al. (2004) 提出的非均匀饱和大气动力学的理论基础, 研究表明: 非均匀饱和大气中的广义位温与位温和相当位温一样具有守恒性, 被认为更能体现实际大气的非均匀饱和特性。基于这样一种湿大气状态, 在湿大气中广义位温定义的基础上, 周玉淑和朱科锋 (2010) 对不同暴雨类型的广义位温与干大气的位温及饱和湿大气的相当位温做了比较, 分析表明, 即使是在暴雨系统中, 湿空气的相对湿度也不一定达到 100%, 饱和湿空气相当位温的适用性受到限制。而引入广义位温的概念后, 干空气、未饱和湿空气以及饱和湿空气这 3 种大气状态的位温均可以描述, 位温和相当温则是广义位温的特殊情况。当大气比湿为零时, 广义位温就变成位温; 当大气比湿达到饱和后, 广义位温就

变成相当位温。这样, 广义位温包含了水汽由干到湿再到饱和的变化过程, 更好地体现了大气中水汽的实际分布和变化特征。段廷扬等 (2007) 探讨了广义湿位涡理论及其倾向方程在暴雨落区预报方面的可应用性, 指出非均匀饱和大气中的广义湿位涡虽然不具有守恒性, 但由于其体现了实际大气的非均匀饱和特性, 尤其是水汽梯度效应的引入, 使得广义湿位涡的异常在对流层低层能比较清楚地反映出暴雨发生时期的高水汽集中的特性和机制, 有效地反映出暴雨区以及暴雨落区的变化。

无论是使用干绝热的 θ 、还是湿绝热的 θ_e 来描述实际大气, 从理论上讲都存在一些缺陷, 广义位温 θ^* 的提出, 在一定程度上消减了对实际大气的理想假定, 为大气的诊断分析提供了一种新的方法。 θ^* 与 θ 、 θ_e 的差异主要体现在对大气的非均匀饱和和特征的描述上, 对暴雨分析而言大气的饱和程度极为重要, θ^* 能较好地反映这一点。昆明准静止锋东侧冷气团湿度较大, 西侧暖气团如果无显著西南水汽输送则湿度较小, 这种情形下, 锋面附近不仅温度梯度较大, 湿度梯度也较大。鉴于此, 本文尝试用能体现大气非均匀饱和状态的 θ^* 来描述锋面, 比较 θ^* 、 θ 、 θ_e 谁更适用于昆明准静止锋锋面分析。

2 2008 年昆明准静止锋形成及长时间维持的环流背景

本文利用 2008 年 1~2 月昆明准静止锋长时间维持过程为例, 讨论 θ^* 、 θ 、 θ_e 三种温湿参数对锋面的描述。关于此次锋面长时间维持的环流背景, 许多学者已做过分析 (顾雷等, 2008; 陶诗言和卫捷, 2008; 王东海等, 2008; 王亚非等, 2008; 杨贵名等, 2008; 赵思雄和孙建华, 2008), 归纳起来主要结论有:

(1) 从 2008 年 1 月中国气温月平均距平分布看, 淮河以南、云贵高原东部以东的中国南方大部分地区气温异常偏低, 气温负距平为 2~4°C, 而云贵高原中西部和青藏高原地区气温异常偏高, 气温正距平为 3~5°C。东西部地区巨大的温差造成了冷

暖气团在云贵之间形成对峙，导致昆明准静止锋的形成及长时间维持。

(2) 500 hPa 北半球亚欧区域中高纬度的乌拉尔山地区、俄罗斯远东地区、中低纬度的伊朗高原至青藏高原地区和西太平洋副热带地区有 4 个范围较大的异常环流。中高纬度欧亚地区的大气环流异常表现为西高东低的分布，乌拉尔山阻塞高压稳定存在，有利于脊前西北气流不断引导北方冷空气经西伯利亚南下。东亚槽活动区域位置偏东偏北，造成了影响中国的冷空气活动频繁。中低纬度欧亚地区的大气环流异常则表现为西风槽和副热带高压异常偏强，西风槽活跃偏强会增加中国南方地区的降水量和冷空气活动频率。同时，西风槽在东移过程中受青藏高原大地形阻挡，分裂为北支槽和南支槽，北支槽在东移过程中与中高纬系统叠加，槽后西北气流引导冷空气南下，南支槽则在东移过程中途经北印度洋和孟加拉湾，槽前形成暖湿气流。另一个异常环流是西太平洋副热带高压，中国东部、南部至日本海、东海、南海北部 500 hPa 高度场距平值异常偏高，阻挡了南下的冷空气继续南下，使得冷气团长时间滞留在中国南方地区，导致该地区持续的低温。

依据实际天气经验，昆明准静止锋大多数情况下呈准南北向（许美玲等，2011）。作者最新研究了昆明准静止锋锋面位置客观识别方法（段旭等，2017），统计了 1961~2010 年逐日资料，客观确定了 50 年全部昆明准静止锋锋面位置，统计结果表明，超过 80% 的锋面为西北（方位 330°~360°）至东南（方位 150°~180°）向，其余为东西向或东北西南向。2008 年 1 月 12 日至 2 月 15 日昆明准静止锋共持续存在了 35 天，锋面位置与该时段云南、贵州之间气温距平零线对应，呈准南北向，与统计特征一致。考虑准静止锋的准南北向特征，下面涉及的垂直剖面分析，取与之垂直的纬向剖面来进行。

3 三种温湿参数对昆明准静止锋的描述

非均匀饱和湿空气的广义位温定义（高守亭，2007）为

$$\theta^* = \theta \exp \left[\frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right], \quad (1)$$

其中， θ 、 L 、 c_p 、 T 、 q_s 、 q 分别为位温、凝结潜热、干空气定压比热、气温、饱和比湿和比湿， $b = (q/q_s)^k$ 是与湿度有关的权重函数，也称凝结几率函数，在王兴荣等（1999）的数值试验中给出了大气在凝结核的作用下有可能发生凝结时需要的相对湿度为 $f=78\%$ ，为保证 $b \leq 0.1$ ， k 取值为 9。

θ^* 的两种极端情况，当 $q=q_s$ 或 $q=0$ 时， $(q/q_s)^k = 1$ 或 $(q/q_s)^k = 0$ ，式（1）退变为饱和湿空气相当位温和干空气位温：

$$\theta_e = \theta \exp \left(\frac{Lq_s}{c_p T} \right), \quad (2)$$

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{c_p}}, \quad (3)$$

其中， R_d 是干空气比气体常数， p 、 p_0 分别表示本站气压和标准气压（一般取 1000 hPa）。

在实际大气中，湿度场总是介于绝对干和完全饱和之间。因此广义位温的引入，充分表达了大气为非均匀饱和湿空气的特征。

以 2008 年 1~2 月几次典型昆明准静止锋天气过程为例，比较三种温湿参数对锋面的描述，资料选用 ERA-Interim (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts interim reanalysis) 0.125° × 0.125° 再分析数据。

2008 年 1 月 15 日一股新的冷空气补充南下，使控制在中国南方地区的低层冷气团增强并向西推进，受云贵高原阻，挡冷气团滞留在云贵高原东部地区，与云贵高原西部暖气团对峙形成昆明准静止锋，锋面位于云贵之间，呈准南北走向（图略）。图 1 给出了 15 日 14 时（北京时，下同）850 hPa 位温、相当位温和广义位温分布，从中可看出三种温湿参数都反映了准南北向的锋面和锋区密集等值线特征，比较而言相当位温和位温对锋区的描述更简洁直观（图 1a、b），而广义位温显然受湿度场影响更多一些，除云贵之间有锋区外，云南南部也表现出较强的锋区，削弱和影响了对准静止锋锋面位置的判定（图 1c）。如果准静止锋较弱，温度梯度变小（图 2a、b），广义位温基本上只能反映出湿度场分布（图 2c）。

前面给出的两个例子均为锋前干暖气团、锋后湿冷气团分布，干湿界面分明。图 3 给出了一个冷暖气团干湿界面不分明例子。显然可以看出，位温和相当位温主要描述温度锋区（图 3a、b），锋面

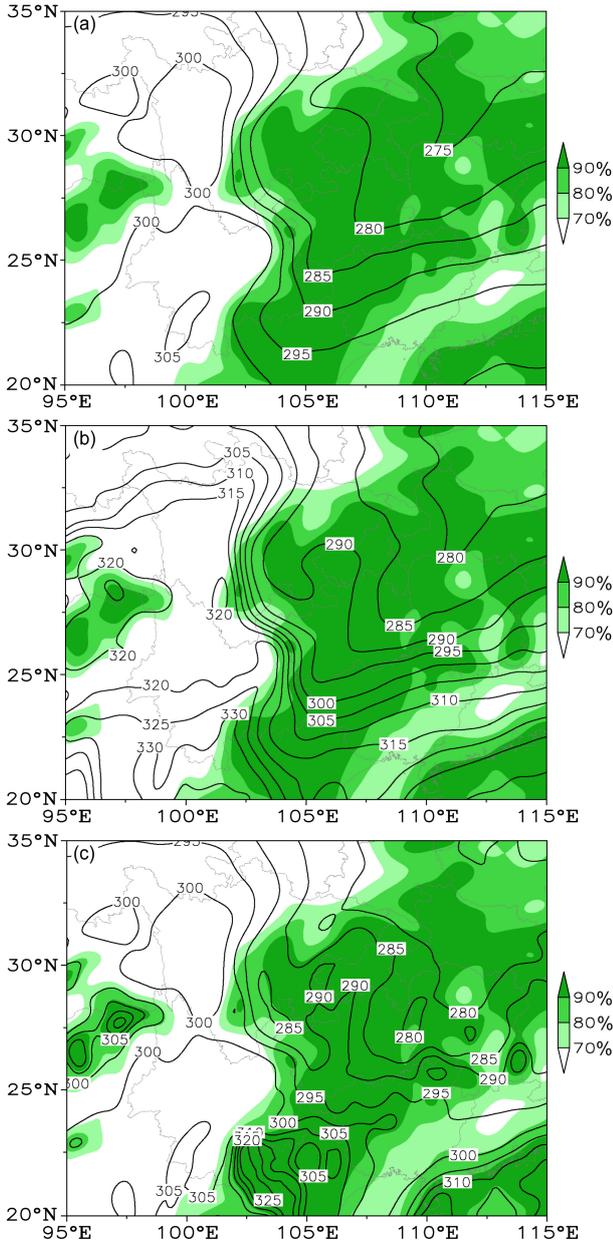


图1 2008年1月15日14时850 hPa (a) 位温、(b) 相当位温和 (c) 广义位温的水平分布 (单位: K)。阴影表示相对湿度
Fig. 1 Horizontal distributions (units: K) of (a) potential temperature, (b) equivalent potential temperature, and (c) generalized potential temperature at 850 hPa at 1400 BJT (Beijing time) 15 January 2008. Shaded areas represent relative humidity

位置较好识别; 而广义位温则同时描述了温度锋区和湿度锋区 (图 3c), 两个锋区混合叠加, 锋面位置的不易确定。

广义位温对温度锋区特征的弱化, 主要原因是该变量对湿度场变化过于灵敏, 下面通过一个单点试验来证实这一问题。式 (1) 可以改写为

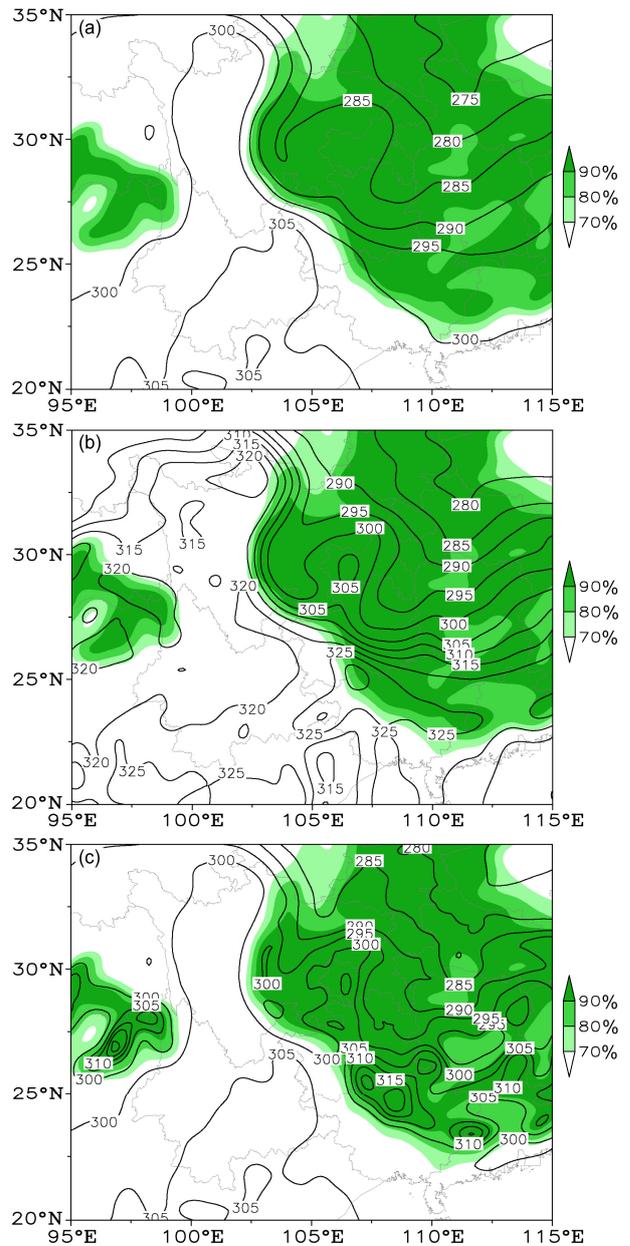


图2 2008年1月12日14时850 hPa (a) 位温、(b) 相当位温和 (c) 广义位温的水平分布 (单位: K)。阴影表示相对湿度
Fig. 2 Horizontal distributions (units: K) of (a) potential temperature, (b) equivalent potential temperature, and (c) generalized potential temperature at 850 hPa at 1400 BJT 12 January 2008. Shaded areas represent relative humidity

$$\theta^* = \theta(e^a)^b, \tag{4}$$

其中, $a = Lq_s / c_p T$ 、 $b = (q / q_s)^k$ 。结合式 (2)、式 (4) 可继续改写为

$$\theta^* = \theta \left(\frac{\theta}{\theta} e^a \right)^b = \theta \left(\frac{\theta_e}{\theta} \right)^b. \tag{5}$$

当某点空气中温度 (T) 和气压 (p) 不变、湿度 (q)

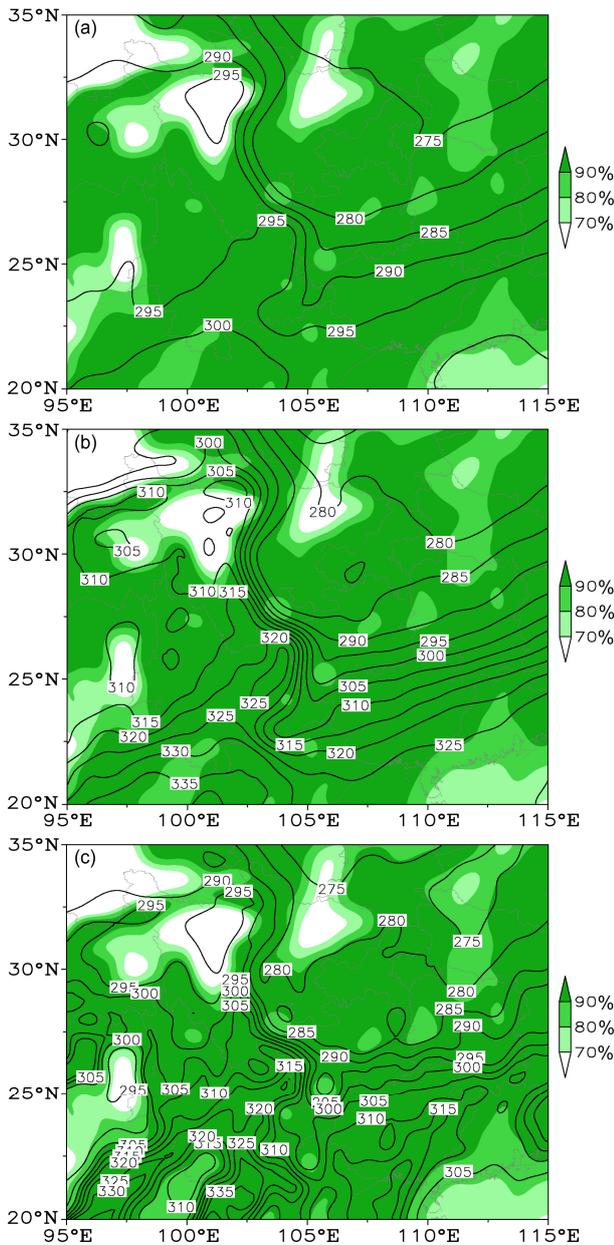


图3 2008年1月28日08时850 hPa (a) 位温、(b) 相当位温和 (c) 广义位温的水平分布 (单位: K)。阴影表示相对湿度
Fig. 3 Horizontal distributions (units: K) of (a) potential temperature, (b) equivalent potential temperature, and (c) generalized potential temperature at 850 hPa at 0800 BJT 28 January 2008. Shaded areas represent relative humidity

可变的情况下, 式 (5) 中 θ 和 θ_e 为确定值, θ^* 值依赖于 b 的变化。 $b = (q/q_s)^k \approx f^k$ 为凝结几率函数。

假设 $\theta=300$ K、 $\theta_e=320$ K、 $k=9$, f 从 0 变化到 100%, θ^* 的分布如图 4。从中可知, 当相对湿度小于 60% 时, 广义位温几乎等同于干大气的位温; 相

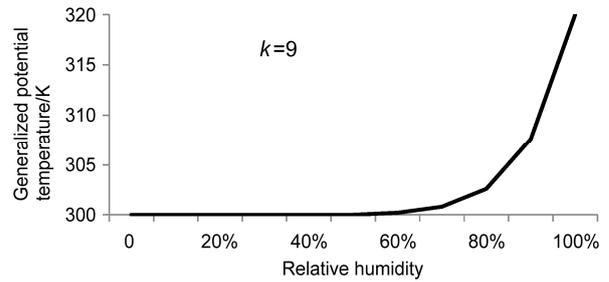


图4 广义位温 (单位: K) 随相对湿度 (单位: %) 的变化分布 ($k=9$)
Fig. 4 Distribution ($k=9$) of generalized potential temperature (units: K) with relative humidity

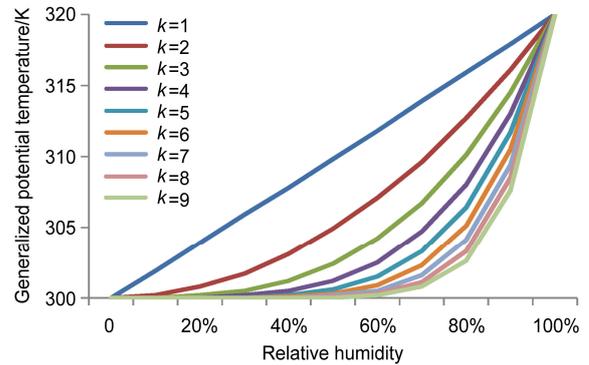


图5 广义位温 (单位: K) 随相对湿度变化的分布 ($k=1, 2, \dots, 9$)
Fig. 5 Distributions ($k=1, 2, \dots, 9$) of generalized potential temperature (units: K) with relative humidity

对湿度大于 80% 后, 广义位温陡峭式上升, 大气的干、湿过渡带似乎只有相对湿度为 60%~80% 的区间。由此导致图 1c、4c、5c 中广义位温等值线在高湿区过密, “掩盖”了温度密集区的特征。

如果降低 k 值 (值 k 过小, 会影响凝结几率函数引入湿大气时的许多假设 (王兴荣, 1999)), 广义位温描述大气的干、湿过渡带会有所增大 (图 5)。 $k=7$ 时, 干、湿过渡带为相对湿度 50%~80% 的区间; $k=4$ 时, 干、湿过渡带为相对湿度 40%~80% 的区间。但绝对干大气区域和陡峭饱和湿大气区域仍然存在, 没有从本质上改变湿度因子权重过大的特征。

从广义位温水平场分布看, $k=4$ (图 6) 与 $k=9$ (图 1c、图 4c、图 5c) 基本没有本质的差异。

另外, 再来比较一下位温和相当位温。 θ 和 θ_e 分别表示大气的绝对干和饱和两种极端情况, 从式 (2) 和式 (3) 的定义中, θ_e 和 θ 与湿度无关, θ_e 中虽有饱和比湿项 (q_s), 但它也仅是温度和气压的函数, 与湿度无直接关联, 所以他们对温度锋面的描述相同。尽管如此, 由于 θ_e 在定义中比 θ 多了大

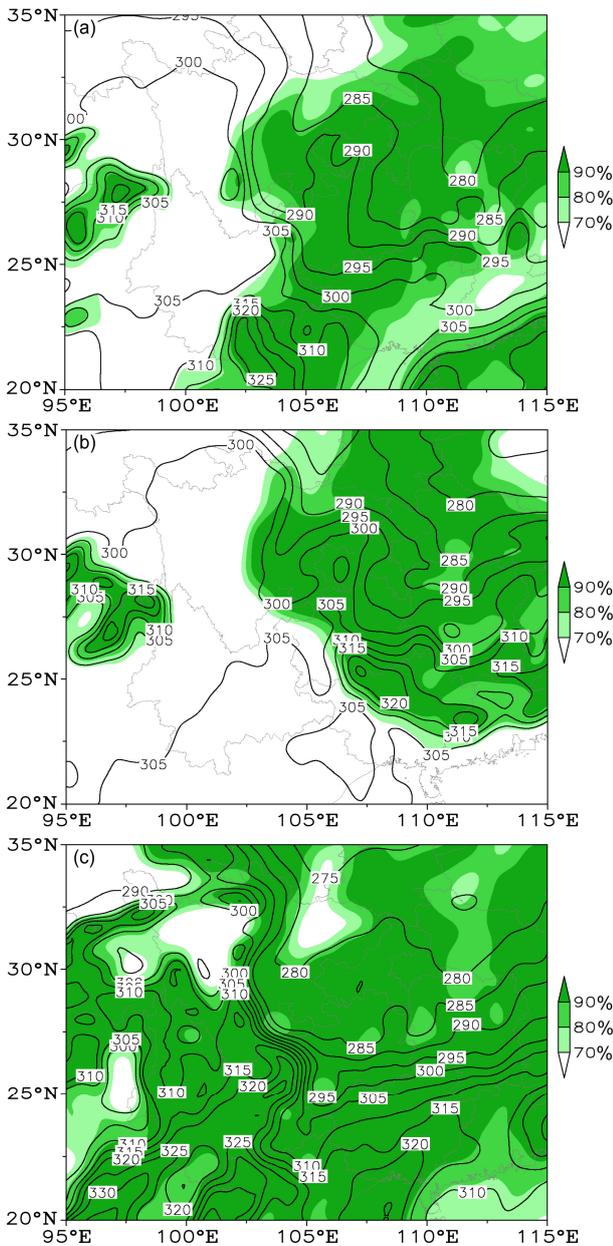


图 6 850 hPa 的广义位温 (单位: K) 的水平分布 ($k=4$): (a) 2008 年 1 月 15 日 14 时; (b) 2008 年 1 月 12 日 14 时; (c) 2008 年 1 月 28 日 08 时

Fig. 6 Horizontal distributions ($k=4$) of generalized potential temperature (units: K) at 850 hPa at (a) 1400 BJT 15 January, (b) 1400 BJT 12 January, and (c) 0800 BJT 28 January in 2008

气膨胀压缩和蒸发凝结过程, 使得它在相同的温度区间内数值增大, 表现的温度梯度比较显著, 因此 θ_e 比 θ 更适合描述温度锋面位置。

4 三种温湿参数的锋生函数诊断分析

假设水平热力场为 T , 标量锋生函数 F 公式如

下 (朱乾根等, 2007):

$$F(T) = \frac{d}{dt} |\nabla T| = -\frac{1}{|\nabla T|} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - \frac{1}{|\nabla T|} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{1}{|\nabla T|} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dT}{dt} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dT}{dt} \right) \right], \quad (6)$$

式 (6) 可分解为非绝热加热、垂直运动倾斜、水平辐散和水平变形等 4 项, 本文仅分析总的锋生函数, 4 个分项就不具体讨论了。当 $F > 0$ 表示锋生, 反之为锋消。用 θ 、 θ_e 和 θ^* 分别替换式 (6) 中的 T , 得到三种形态的锋生函数 $F(\theta)$ 、 $F(\theta_e)$ 和 $F(\theta^*)$ 。

以 2008 年 1 月 28 日 08 时的锋面天气为例, 图 7 给出了 $F(\theta)$ 、 $F(\theta_e)$ 、 $F(\theta^*)$ 以及温湿场沿 26°N 垂直剖面分布。根据图 7d 温度分布情况, 近地层 104°~105°E 区域等温线呈垂直分布, 是昆明准静止锋锋面所在位置。从 $F(\theta)$ 、 $F(\theta_e)$ 、 $F(\theta^*)$ 垂直剖面分布 (图 7b-c) 看, 锋面位置所在区域均为正值区 (锋生), 比较可知: (1) 锋面位置的 $F(\theta_e) > F(\theta)$ 和 $F(\theta^*)$, $F(\theta_e)$ 对热力场梯度变化表现的最为显著; (2) $F(\theta_e)$ 和 $F(\theta)$ 分布形态完全, 反映了热力场主导的锋面生消; (3) $F(\theta^*)$ 然也反映了热力场主导的锋面生消分布, 但同时还有许多湿度场导致的锋面生消分布, 如果仅分析图 7c, 难以识别昆明准静止锋锋生位置; (4) 对比图 7c 与图 7d 发现, $F(\theta^*)$ 的正负分布过于偏重湿度场, 在干湿界面尤为突出, 如 97°E 以西区域、103°E 附近、106°~114°E 冷湿气团中湿度相对偏小的区域等, 锋面生消转换均比较显著。

图 8 给出了整个准静止锋过程, 850~700 hPa 层 $F(\theta_e)$ 和 $F(\theta^*)$ 沿 26°N 经向—时间剖面分布。从中可以看出, 两种参数的锋生函数对锋面生消的诊断大致相似, 但两者之间对锋生强度上有显著差异, 在锋生区 $F(\theta_e)$ 一般都大于 $12 \times 10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (图 8a), 而 $F(\theta^*)$ 则在 $8 \times 10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 左右 (图 8b), 在一些时间节点上, $F(\theta^*)$ 对准静止锋的生消诊断也有偏差。

1 月 17 日准静止锋稍有东退, $F(\theta_e)$ 在 104°E 附近表现为弱的锋消, 时间较短, 而 $F(\theta^*)$ 的锋消强度则较大, 时间也略长, 产生这一差异的主要原

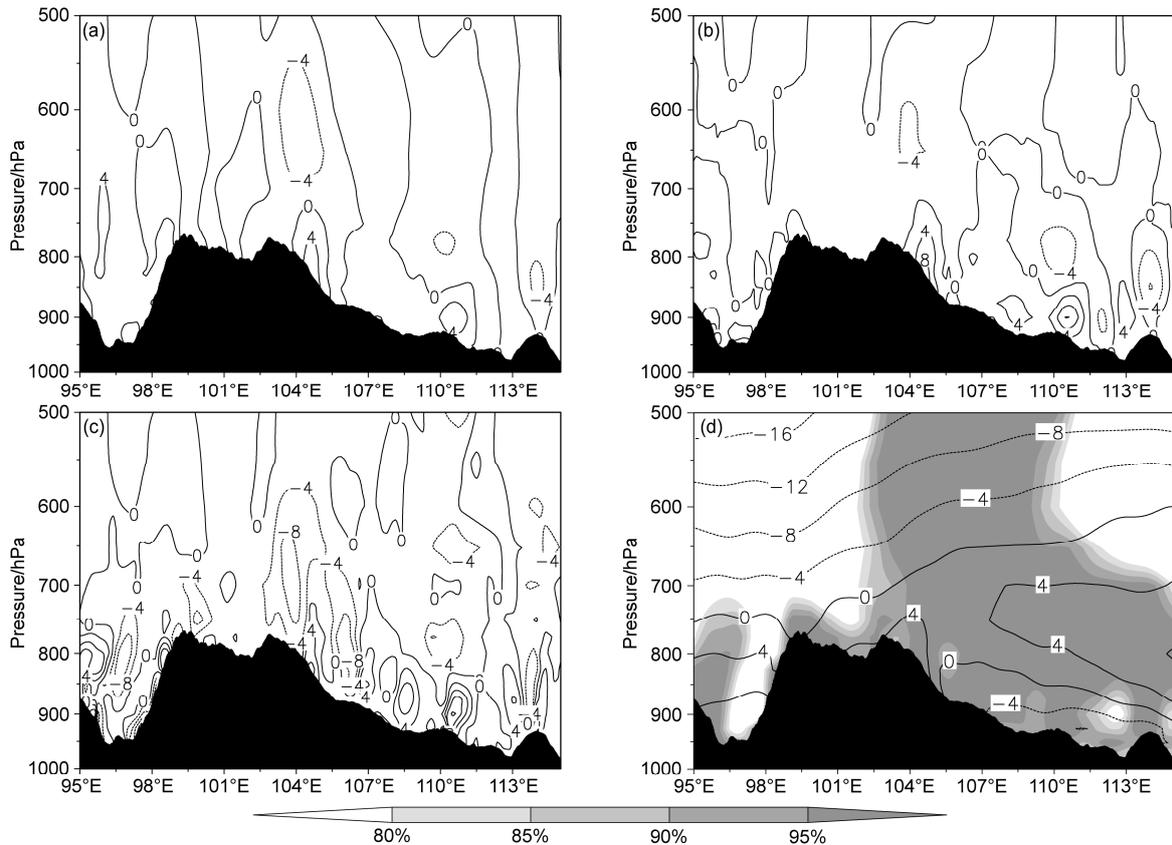


图7 2008年1月28日08时(a)位温、(b)相当位温、(c)广义位温的锋生函数($k=9$, 单位: $10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), 以及(d)温度(单位: $^{\circ}\text{C}$, 浅色阴影表示相对湿度)沿 26°N 垂直剖面。深色阴影区表示地形

Fig. 7 Vertical cross sections ($k=4$) of frontogenesis function (units: $10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) calculated from (a) potential temperature, (b) equivalent potential temperature, (c) generalized potential temperature, and (d) temperature (units: $^{\circ}\text{C}$, light shaded areas represent relative humidity) along 26°N at 0800 BJT 28 January 2008. The dark shaded areas indicate the terrain

因是当天 08~14 时锋面附近相对湿度有一个明显的下降(图略)。结合上一节分析的结果可以认为, 湿度场的消减降低了等 θ^* 线的密集程度, 因而导致锋消。同样的情况还有1月25日、28日和2月4日。

1月26~27日准静止锋势力较强, $F(\theta_e)$ 在 $104^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$ 之间呈现较大的正值区(锋生)(图8a)。在同一区域 $F(\theta^*)$ 也呈现正值区, 但并非唯一的显著锋生区, 在 $100^{\circ}\sim 102^{\circ}\text{E}$ 之间还存在一个明显的锋生区(图6b), 如果仅用此图来判断准静止锋锋生位置显然有问题, 还需要其他图来配合识别锋生区域(如图9)。在图9中, 相当位温密集区(图9a)表现了昆明准静止锋的位置, 无论其强度、准南北走向特征均是唯一的, 而广义位温密集区(图9b)则比较分散。 $(23^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 103^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E})$ 区域相对湿度比周围小, 无等 θ^* 密集线。云南西部和南部区域相对湿度较大, 出现了多处等 θ^* 密集区,

在26~27日的非唯一锋生区就反映了等 θ^* 线密集区分布特点(图8b), 2月9日的与1月26~27日的情形相似, 这里就不重复分析了。

5 小结与讨论

广义位温概念的引入, 从理论上对实际大气提供了新的诊断方法, 避免了位温或相对位温把大气当做绝对干或饱和的理想状态, 使诊断结果更接近实际大气的非均匀饱和状态。但该变量中湿度因子权重较大, 对湿度锋区的描述较好、温度锋区较为弱化, 甚至会被“掩盖”。因此, θ^* 在暴雨、强对流等依赖于湿度场变化的天气分析诊断中比较理想(符长锋等, 2006; 段廷扬等, 2007; 周玉淑和朱科锋, 2010), 在本文讨论的温度锋面效果不理想。

从图5给出的试验结果中可以发现, 虽然 θ^* 中定义了一个反映实际大气湿度的权重因子

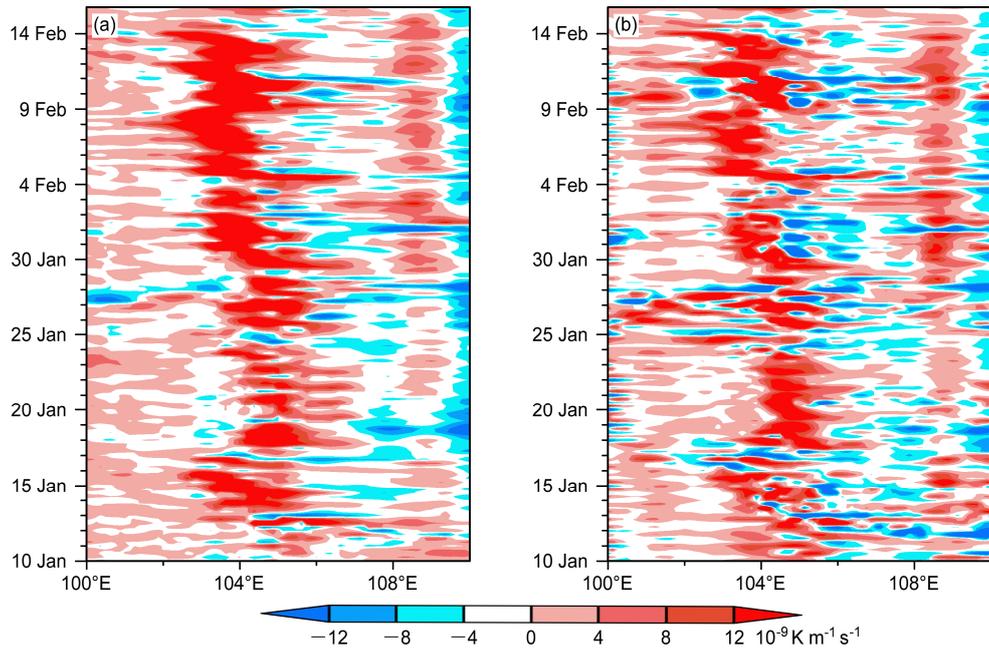


图 8 2008 年 1 月 12 日至 2 月 15 日 850~700 hPa 层 (a) 相当位温锋生函数和 (b) 广义位温锋生函数沿 26°N 经度—时间剖面 ($k=9$, 单位: $10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 8 Longitude-time cross sections of frontogenesis function ($k=9$, units: $10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) calculated from (a) equivalent potential temperature, (b) generalized potential temperature over the layer from 850 hPa to 700 hPa along 26°N during the period of 10 January to 15 February in 2008

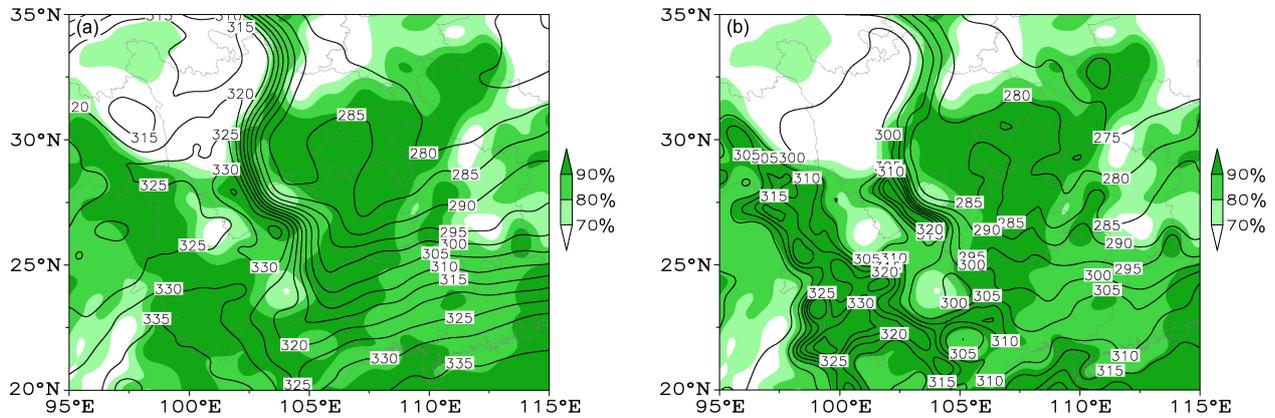


图 9 2008 年 1 月 26 日 14 时 850 hPa (a) 相当位温和 (b) 广义位温的水平分布 (单位: K)。阴影表示相对湿度

Fig. 9 Horizontal distributions of (a) equivalent potential temperature and (b) generalized potential temperature at 850 hPa (units: K) at 14 BJT 26 January 2008. Shaded areas represent relative humidity

$(q/q_s)^k$, 但其指数函数的性质决定了非线性特征 ($k \neq 1$)。即 θ^* 在大气处于中低湿度的一个较大区间内几乎等同于干大气 θ , 而在高湿度的一个较小区间内突然陡变为饱和湿大气 θ_s , 中间过渡带区间极小。当湿度锋区和温度锋区重合或处于干大气时, θ^* 还能较好反映温度锋面位置, 否则基本上只反映湿度场特征。

理想状态下的 θ 和 θ_s 与湿度无直接关系, 仅与

气压和温度有关, 他们均能较好地反映温度锋面特征, 对温度锋区的表达简洁、直观。由于 θ_s 数值比 θ 大, 在相同的锋区内等 θ_s 线比等 θ 线更为密集, 锋面的表现力更强。

用 θ 或 θ_s 计算锋生函数得到的锋生或锋消结果完全取决于温度场的变化, 等温线密集时出现锋生, 稀疏时锋消。用 θ^* 计算锋生函数得到的锋生或锋消结果情况就有所不同了, 锋生或锋消不仅依赖

于温度场、同时还与湿度场有密切关。在高湿区或湿度锋区(干湿界面)附近,湿度作用甚至超过温度,易产生高湿区锋生、干区锋消的情况,温度锋面的锋生或锋消还需通过温度场和湿度场的分布来判断。

参考文献 (References)

- 曹洁, 高守亭. 2008. 非均匀饱和大气中的广义位温 [J]. 地球物理学报, 51 (6): 1651–1656. Cao Jie, Gao Shouting. 2008. Generalized potential temperature in non-uniformly saturated atmosphere [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (6): 1651–1656, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2008.06.004.
- 池再香, 杜正静, 龙先菊, 等. 2010. 2008年初贵州冰冻天气锋生场诊断分析 [J]. 气象科技, 38 (5): 558–564. Chi Zaixiang, Du Zhengjing, Long Xianju, et al. 2010. Analysis of frontogenesis field for early 2008 frozen weather in Guizhou Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 38 (5): 558–564, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2010.05.005.
- 杜小玲, 蓝伟. 2010. 两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析 [J]. 高原气象, 29 (5): 1183–1195. Du Xiaoling, Lan Wei. 2010. Contrastive analysis on frontal structure of quasi-stationary front in two precipitation processes of Yunnan–Guizhou [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (5): 1183–1195.
- 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 [J]. 热带气象学报, 23 (3): 284–292. Du Zhengjing, Ding Zhiying, Zhang Shuyu. 2007. Analysis of atmospheric circulation and structure of Yunnan–Guizhou quasi-stationary front during its evolution [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (3): 284–292, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.03.011.
- 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 [J]. 高原气象, 34 (2): 357–367. Du Zhengjing, He Yulong, Xiong Fang, et al. 2015. Analysis on the frontogenesis mechanism of Dian–Qian quasi-stationary front inducing spring rainstorm in Guizhou Province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (2): 357–367, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00176.
- 段廷扬, 邓国, 王东海. 2007. 广义湿位涡与暴雨落区预报的诊断分析 [J]. 大气科学, 31 (6): 1301–1307. Duan Tingyang, Deng Guo, Wang Donghai. 2007. Diagnostic analysis of generalized moist potential vorticity and forecast of torrential rain region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1301–1307, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.24.
- 段旭, 李英, 孙晓东. 2002. 昆明准静止锋结构 [J]. 高原气象, 21 (2): 205–209. Duan Xu, Li Ying, Sun Xiaodong. 2002. The structure of Kunming quasi-stationary front [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (2): 205–209, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.02.014.
- 段旭, 段玮, 邢冬. 2017. 昆明准静止锋客观判识方法研究 [J]. 气象学报, 75 (5): 811–822. Duan Xu, Duan Wei, Xing Dong. 2017. Research of objective judgment method about Kunming quasi-stationary frontline [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75 (5): 811–822, doi:10.11676/qxxb2017.055.
- 符长锋, 李任承, 赵振东, 等. 2006. 广义相当位温及其扩展应用 [J]. 气象, 32 (3): 11–17. Fu Changfeng, Li Rencheng, Zhao Zhendong, et al. 2006. Generalized potential equivalent temperature and its extended application [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (3): 11–17, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.03.003.
- 高守亭. 2007. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 67–77. Gao Shouting. 2007. Dynamic Basis and Forecast Method of the Mesoscale Motion in Atmospheric (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 67–77.
- 高守亭, 张昕, 王瑾, 等. 2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法 [J]. 大气科学, 38 (4): 645–655. Gao Shouting, Zhang Xin, Wang Jin, et al. 2014. The environmental field and ensemble forecast method for the formation of freezing rain over Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 645–655, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13250.
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (12): L12113, doi:10.1029/2003GL019152.
- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 2008年1月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 405–418. Gu Lei, Wei Ke, Huang Ronghui. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asian monsoon system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 405–418, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.06.
- 郭英莲, 王继竹, 李才媛, 等. 2009. 2008年冬季准静止锋与1998年夏季梅雨锋的异同 [J]. 暴雨灾害, 28 (4): 349–356. Guo Yinglian, Wang Jizhu, Li Caiyuan, et al. 2009. The similarities and differences between the quasi-stationary front in the winter of 2008 and the Meiyu front in the summer of 1998 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 28 (4): 349–356.
- Hoskins B J, Bretherton F P. 1972. Atmospheric frontogenesis models: Mathematical formulation and solution [J]. J. Atmos. Sci., 29 (1): 11–37, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<0011:AFMMFA>2.0.CO;2.
- 李英, 段旭, 潘里娜. 1999. 昆明准静止锋的准地转 Q 矢量分析 [J]. 气象, 25 (8): 6–10. Li Ying, Duan Xu, Pan Lina. 1999. A quasi-geographic Q -vector analysis of Kunming quasi-stationary front [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (8): 6–10, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.08.002.
- 李振军, 赵思雄. 1997. 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究 II. 动力学诊断研究 [J]. 大气科学, 21 (1): 91–98. Li Zhenjun, Zhao Sixiong. 1997. A structure and dynamics of cold fronts observed in East Asia during spring. Part II: Dynamics of strong spring cold front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (1): 91–98, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.01.10.
- 蒙伟光, 戴光丰, 张艳霞, 等. 2012. 华南局地锋生及对流系统发展的模拟分析研究 [J]. 气象学报, 70 (3): 387–401. Meng Weiguang, Dai Guangfeng, Zhang Yanxia, et al. 2012. Analysis and simulative study of the local frontogenesis and convection development over South China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (3): 387–401, doi:10.11676/qxxb2012.034.
- Miller J E. 1948. On the concept of frontogenesis [J]. J. Meteor., 5 (4): 169–171, doi:10.1175/1520-0469(1948)005<0169:OTCOF>2.0.CO;2.

- Petterssen S. 1936. Contribution to the theory of frontogenesis [M]. *Geophys. Publ.*, 11 (6): 6–27.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 337–350. Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 337–350, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.01.
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 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 [J]. *气象学报*, 66 (3): 405–422. Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the southern China in January 2008 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66 (3): 405–422, doi:10.11676/qxxb2008.038.
- 王兴荣, 吴可军, 石春娥. 1999. 凝结几率函数的引进和非均匀饱和湿空气动力学方程组 [J]. *热带气象学报*, 15 (1): 64–70. Wang Xingrong, Wu Kejun, Shi Chun'e. 1999. The introduction of condensation probability function and the dynamic equations on non-uniform saturated moist air [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 15 (1): 64–70, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1999.01.008.
- 王亚非, 李琰, 李萍云, 等. 2008. 2008 年初中国南方雪灾大尺度环流背景分析 [J]. *气象学报*, 66 (5): 826–835. Wang Yafei, Li Yan, Li Pingyun, et al. 2008. The large scale circulation of the snow disaster in South China in the beginning of 2008 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 826–835, doi:10.11676/qxxb2008.075.
- 吴古会, 彭芳, 崔庭, 等. 2012. 2011 年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析 [J]. *气象*, 38 (3): 291–299. Wu Guhui, Peng Fang, Cui Ting, et al. 2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (3): 291–299.
- 许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 2011. 云南省天气预报员手册 [M]. 北京: 气象出版社, 30–47. Xu Meiling, Duan Xu, Qi Minghui, et al. 2011. *Weather Forecast Manual of Yunnan Province (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 30–47.
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析 [J]. *气象学报*, 66 (5): 836–849. Yang Guiming, Kong Qi, Mao Dongyan, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 836–849, doi:10.11676/qxxb2008.076.
- 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 [J]. *气象学报*, 67 (4): 652–665. Yang Guiming, Mao Dongyan, Kong Qi. 2009. Analysis of the frontal characteristics of the cryogenic freezing rain and snow weather [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 67 (4): 652–665, doi:10.11676/qxxb2009.065.
- 杨洋, 俞佚名. 1995. 一次西南静止锋的准地转锋生函数分析 [J]. *高原气象*, 14 (3): 365–372. Yang Yang, Yu Yiming. 1995. The quasi-geostrophic frontogenesis function analyses for a stationary cold front in the southwest of China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 14 (3): 365–372.
- 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 [J]. *大气科学*, 39 (3): 513–525. Zha Shuyao, Yi Lan, Zhao Ping. 2015. Structure and type characteristics of the winter quasi-stationary front in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (3): 513–525, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14123.
- 赵思雄, 孙建华. 2008. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 351–367. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January–February 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 351–367, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.02.
- 周玉淑, 朱科锋. 2010. 湿大气的广义位温与干大气位温及饱和湿大气相当位温的比较 [J]. *气象学报*, 68 (5): 612–616. Zhou Yushu, Zhu Kefeng. 2010. Comparisons between the generalized potential temperature in the moist atmosphere and the potential temperature in the dry atmosphere and the equivalent potential temperature in the saturated moist atmosphere [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 68 (5): 612–616, doi:10.11676/qxxb2010.060.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. *天气学原理和方法* [M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 95–106. Zhu Qiagen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. *Principles and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese)* [M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 95–106.