

锋面气旋概念的缘起、发展和社会实践的关系

陶祖钰 闻新宇

(北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 回顾了19世纪气象学处于萌芽阶段时人们是如何逐渐认识中纬度气旋和锋面概念的, 并对20世纪初V. 皮叶克尼斯提出的极锋理论、当时的时代背景, 以及之后的不断改进进行了介绍和讨论, 最后指出极锋理论的出现和不断完善是人们在实践中不断创造和不断检验的结果, 是现代气象学最终成为一门科学的重要基石。

关键词: 极锋理论, 气旋, 锋面

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.021

A Study on the Evolution of Front Cyclone Theory and Its Relations with Weather Forecast Practice

Tao Zuyu, Wen Xinyu

(Department of Science of Atmosphere and Ocean, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: The basic concepts of frontal cyclone, which emerged in the late 19th century, and the polar front theory, which came from the Bergen School in the early 20th century, are comprehensively reviewed in this paper. The discovery and continuous development of the Norwegian cyclone model were resulted from the weather forecast practice and field work in meteorological research. It ultimately formatted meteorology as a kind of sciences.

Keywords: polar front theory, cyclone, front

0 引言

物理学家爱因斯坦说: “一切发现都不是逻辑思维的结果, 尽管这些发现看起来很接近逻辑规律。” 每一个新概念的提出和确立, 通常都经历过一段曲折的酝酿过程。这个过程有时可长达数十年, 甚至数百年, 中间还会有曲折与反复。而新概念被确立或获得公认后, 也并不意味已成为认识的终结, 它还可能会受到质疑, 需要不断修正和发展。“锋面气旋” 就是这样一个很好的事例。对锋面气旋这一科学概念, 从历史的角度进行一番回顾, 于今天的我们无疑是很有教益的。

本文结合作者阅读《气象科技进展》2014年第6期“气象科技史研究”专辑的一些感想和体会, 通过梳理锋面气旋概念的历史演进, 想着重强调: 社会实践在科学创新中占据第一位的重要性。不仅如此, 回望和溯源的最终目的是为了能够更好地继续前进, 本文谈及的一些实践中发现的新问题, 也可作为今后的研究重点。

为便于读者阅读, 下面先给出与锋面气旋概念模型相关的一些重要时间节点:

1854年法国巴黎天文台台长勒威耶 (Le Verrier) 首次发现风暴;

1863年英国菲茨罗伊 (Fitz-Roy) 绘出第一张风暴概念模型;

1895—1905年挪威V. 皮叶克尼斯 (V. Bjerknes) 倡导气团分析, 1905年在访问美国时介绍气团理论;

1898年V.皮叶克尼斯发表环流理论;

1917年V.皮叶克尼斯锋面分析成为地面图分析的常规工作;

1919年J.皮叶克尼斯 (J. Bjerknes, V.皮叶克尼斯之子) 提出锋面气旋概念模型^[1] (被称为挪威模型);

1990年夏皮罗 (M. A. Shapiro) 与凯瑟 (D. Keyser) 提出新的锋面气旋模型 (被称为S-K模型);

2011年舒尔茨 (D. Schultz) 与福奥翰 (G. Vaughan) 提出教科书中挪威气旋模型的“追赶 (catch-up)” 锢囚过程必须修改为“包卷 (wrap-up)” 过程。

1 极锋的发现

“锋面气旋” 这个概念中包含两个概念: 一是“锋面”, 二是“气旋”。要追溯“锋面气旋”, 就必须分别追溯“锋面” 和“气旋” 这两个概念。从

收稿日期: 2015年4月7日; 修回日期: 2016年3月16日
第一作者: 陶祖钰 (1939—), Email: taozuyu@pku.edu.cn
资助信息: 中科院战略先导专项 (XDA05080801); 北京市青年英才计划 (YETP0005)

1922年被认为是确立锋面气旋概念的论文——《气旋生命史和大气环流的极锋理论》^[2]的题目就可以看出，气旋这个概念是和作为大气环流的极锋理论紧紧联结在一起的。传统的地面天气图锋面分析，早在1917年V.皮叶克尼斯到挪威卑尔根大学开展天气学研究时就已开始，到1922年论文的发表，中间经过了5年的天气图锋面分析实践，该论文正是这一段实践的总结（详见文献[3]）。因此可以说是先有了极锋的概念，后才有锋面气旋的概念。

追溯锋面，还必须追溯极地气团的发现。杜钧等^[5]指出，气团学说是1895—1905年V.皮叶克尼斯在斯德哥尔摩大学完成的（1905年他受邀赴美介绍气团理论）。这表明对气团的分析更早，且持续时间更长。值得指出的是，人们对V.皮叶克尼斯的科学贡献往往强调他的环流理论，因为它是动力气象学的萌芽，同时也是数值预报思想的萌芽。但很少有人强调他在天气分析和预报方面的实践。叶鑫欣等^[4]叙述了V.皮叶克尼斯的环流理论发表于1898年，正处在做气团分析的十余年中。所以，V.皮叶克尼斯不仅仅是理论气象学家，而且是长期坚持天气分析的实践家。理论来源于实践，这点是在谈论气象发展史时万万不可遗忘的。

从地图上可看到，挪威地处格陵兰岛和冰岛两个大冰原的东南方，是欧亚大陆受极地气团影响最大的国家。极锋理论产生于挪威而不是别的国家有其天然的合理性。

2 气旋的发现

实际上，早在锋面分析成为常规天气分析之前人们就已经有了“气旋（cyclone）”这个概念，在西方的科技文献中常常与“风暴（storm）”混用。气旋的首次发现通常指1854年克里米亚战争期间法国军舰亨利四号沉没31天后，法国巴黎天文台台长勒威耶^[5]根据收集的气象资料查明沉没是由11月14日黑海的风暴所致。此风暴于11月12—13日已出现在西班牙和法国西部，两天后东移到黑海地区，如能及时发现风暴并预告风暴的移动，那么损失可能是可以避免的。因此，勒威耶提出的组织气象台站网、开展天气图分析和天气预报的建议均被法国政府采纳，并于1856年组织了气象观测网。从此，绘制天气图便成为一项日常业务，并陆续推广到其他国家。

最早将“锋面”和“气旋”两个概念结合起来的“迹象”可能是1863年英国的菲茨罗伊绘制的风暴概念模型（图1）^[6]。图中反时针旋转的涡旋就是风暴，他用实线和虚线矢线分别表示冷、暖两股气流，每个气旋都由冷、暖两股气流组成。前面已经介绍，

锋面分析和锋面概念开始于1917年V.皮叶克尼斯指导下的挪威卑尔根大学，也就是说菲茨罗伊将“气团”和“气旋”两个概念结合起来比锋面概念的确立早了半个多世纪。如文献[7]所介绍的，1934年英国气象学家肖氏就提出过，如果菲茨罗伊继续沿着他的道路前进，则气旋的锋面学说将出现在1870年而不是1919年^[1]。

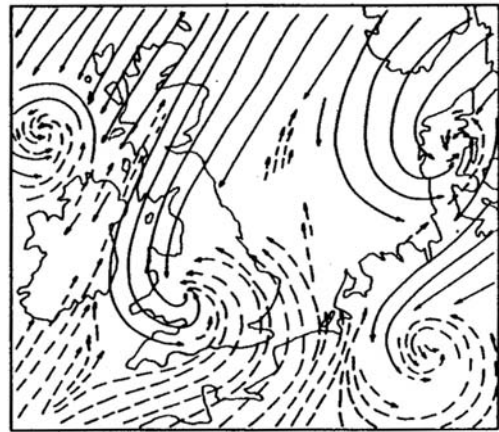


图1 1863年英国船长菲茨罗伊绘制的风暴概念模型：反时针旋转的涡旋，有冷（实线）暖（划线）两种气团^[6]

Fig. 1 Conceptual models of cyclone drawn by Fitz-Roy in 1863, anti-clockwise vortex with cold/warm air masses^[6]

对菲茨罗伊的生平，“气象科技史研究”专辑中有相当多的介绍。菲茨罗伊曾是19世纪50年代英国成立气象局时的首任局长，而且他的工作深受出海水手们的欢迎，他们不要求天气预报全对，大部分对就可以了。但当时英国社会的贵族们认为不太准的天气预报会妨碍他们的生活；守旧的科学大师们也不支持，一些英国皇家学会的科学家们用物理学、生物学的眼光看待大气科学，认为科学结论首先要在实验室做好才能应用。这导致19世纪60年代初期，英国气象局被取消，菲茨罗伊被调到英国皇家学会做资料统计员。

据《科学分类手册丛书》（英）天气和气候卷人物志介绍^[8]，菲茨罗伊是海军出身，其长期的航海生活使他特别关心气象，并随时记录风、温度和气压的变化。1831年他被任命为船长做环球考察，达尔文（C. Darwin）就是跟随这条船完成了环球考察并写出著名的《进化论》。在航行中，菲茨罗伊总是携带气压表来做航行中的天气预报。在担任气象局局长后，他倡导用气压表作为天气预报的利器。他发明的气压计被称为“菲茨罗伊”气压计。如图2所示，菲茨罗伊气压计中把980hPa以下标注为风暴（Storm），980~1005hPa标注为雨（Rain），1005~1025hPa标注为变化（Change），1025~1045hPa标注为晴好（Fair），

1045hPa以上标注为干燥（Very Dry）。菲茨罗伊气压计在英国各港口普遍应用，并于1861年做出了第一次风暴警报。至今还可以在很多菲茨罗伊气压计上看到，气压低于980hPa的区间被标注为风暴区。



图2 菲茨罗伊船用气压计

Fig. 2 FitzRoy barometer used in the ship of HMS Beagle

不难看出，菲茨罗伊的气旋模型是他长期进行气象观测和预报实践的总结，其中含有气团的概念，但他没有明确提出锋面的概念。

3 锋和气旋的关系

从1906年马古拉斯（M. Margules，亦译为马尔古斯）提出锋的坡度公式^①，1917年分析锋成为挪威天气图分析的基本内容，再到1922年挪威气旋模型的提出，可以看出，极锋概念的确立对锋面气旋学说的建立具有至关重要的意义，甚至可以说，锋是气旋学说的物理核心。这是因为，典型的锋面气旋，特别是北大西洋的气旋，都伴随着狂风，而这些巨大的动能（和强台风相当），来源于极锋中位能的转换。

极锋，是与极地冷气团相关联的锋。常年不化的格陵兰冰原，是极地气团的主要源地。极地气团南下，挪威首当其冲，深受其害。因此，极锋受到挪威气象学家的特别关注。马古拉斯认为，倾斜的锋面，意味着空气的重心偏高，表明存在一定数量的重力位势能可以释放为动能，其专业名词称为有效位能。锋面坡度越大，有效位能越大。按锋面坡度公式，极锋南下时纬度减小，锋面坡度也随之变小，有效位能变小就意味着有一部分位能转换为动能。所以，风暴的动能来源于极锋中位能的释放。

根据力管环流理论，极锋两侧，冷空气下沉、暖空气上升，使大气的重心降低，是位能转换为动能的动力学机制。

但是，锋作为一个倾斜的过渡带是在6年后的1922年才首次在观测上得到证实。当年J.皮叶克尼斯在瑞士气象学会同行的帮助下，在阿尔卑斯山地区居住了一年，并在3000m高度的空间范围内进行了观测，最终在还没有探空的情况下获得了锋区在空间是一个倾斜面的观测证据（如图3所示）。同年，J.皮叶克尼斯和索尔伯格发表了被后世称为挪威气旋模型和锋面气旋学说的经典论文——*Life cycles of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation*^[2]。

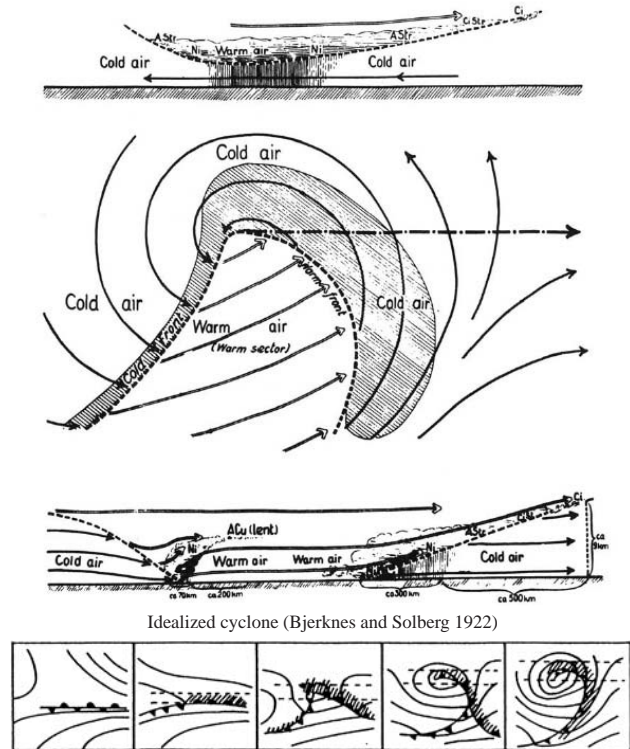


图3 挪威学派锋面气旋结构模型及生命史^[2]

Fig. 3 Frontal structure of Norwegian cyclone model and its life cycle^[2]

对于锋和气旋的关系，除了从能量的角度认为“锋是因，气旋是果”这种观点外，当时还有一种观点认为“气旋是因，锋是果”。这是因为在地面天气图分析中发现，锋是气旋内气流汇合的产物（即运动学锋生）^[4]。

在气旋生命史概念模型中，也是先有锋后有气旋，气旋是静止锋波动的产物。但是天气实践发现，很多气旋新生时并不存在锋^[9-10]，而是随着气旋的发生而锋生。后来佩特森（S. Petterssen）把它称为B类气旋^[6]。这是在实践的基础上对1922年挪威气旋模型做出的一次重要修正。锋和气旋之间还存在第三种关

① http://paoc.mit.edu/labguide_old/fronts/observations/polar.htm

系：二者同时发生，同时衰亡，即不是简单的因果关系，而是互为因果。那么引起两者同时发展的原因又是什么？互为因果的物理机理到底是什么？这个问题至今仍未解决，很值得研究^[11]。

4 经典锋面气旋模型一个没有被普遍注意的重要缺陷和新模型的发现

锋面气旋学说无论是结构还是生命史，其概念模型图（图3）都具有很突出的科学美：气旋中有冷、暖两种气团，冷、暖气团之间的界面是锋面，来自北方的冷空气南下楔入暖气团的下方是为冷锋，来自南方的暖气团在冷气团上方爬升称为暖锋。由于冷、暖锋的坡度不同，形成宽窄不同的冷、暖锋云带和雨区。锋面上的扰动使静止锋演变为冷锋和暖锋，随着气旋发展，地面暖区逐渐缩小消失，冷锋赶上暖锋，最后形成锢囚锋和锢囚气旋。

气团—锋面—气旋—云雨—水平环流—垂直运动各个方面，看起来配合完美、逻辑严密。不幸的是，这个概念模型存在重大的理论缺陷，即将锋面假设为物质面，以及用简单的机械运动——抬升和爬升来解释锋面垂直运动的机理。前者违背了连续性是流体的根本属性，流体中不存在密度的0阶不连续^[12]。锋是温度梯度不连续，即温度的1阶不连续。因此将锋当作物质面是一个严重的理论错误。后者，用简单的机械运动（质点动力学）代替流体动力学来解释与锋相联系的垂直环流，在动力学理论上是对环流定律的倒退。

挪威模型中包含的流体力学基本概念的错误（或者说是过度简化），还导致了对于锢囚过程和锢囚锋结构的错误认识^[11,13]。天气学教科书中，经典模型的锢囚过程是冷锋赶上暖锋的“追赶”过程（catch-up，也可翻译为“赶超”过程），锢囚锋的结构被解释成冷锋爬到暖锋之上，暖气团全部脱离地面被抬升到空中（图4）^[14]。因此在锢囚气旋内，低层全部被冷气团占据，锢囚锋两侧地面的温度对比很小（图5a）。卫星云图的出现使人们对经典锢囚锋的结构产生了怀疑。云图上常见北大西洋锢囚气旋中有很强的螺旋状锢囚锋云带（图5b）。1988年大西洋爆发性气旋外场科学试验观测资料表明，锢囚锋的结构和经典模型相反，其两侧的温度梯度非常大（甚至超过冷锋），它是冷暖气团相互“包卷（wrap-up）”形成的，锢囚气旋的中心部分反而是相对暖的，如图6所示。有意思的是，这个事实在1863年菲茨罗伊的风暴概念模型中却可以找到，它充分反映了实践在科学发现中具有第一位的重要性，而理论的解释往往由于过于追求形式上的“完美”反而可能导致错误。

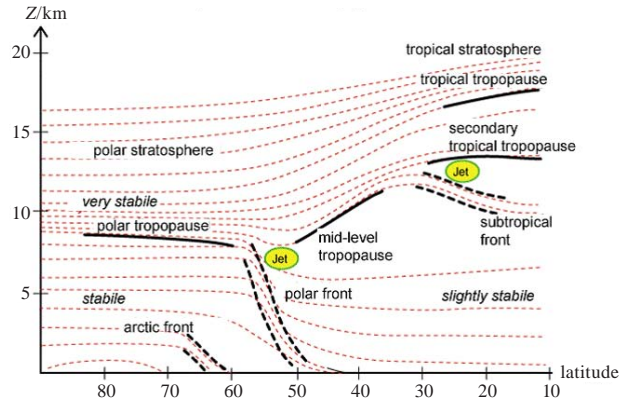


图4 北半球的锋^[14]

Fig. 4 Schematic diagram of the polar fronts in Northern Hemisphere^[14]

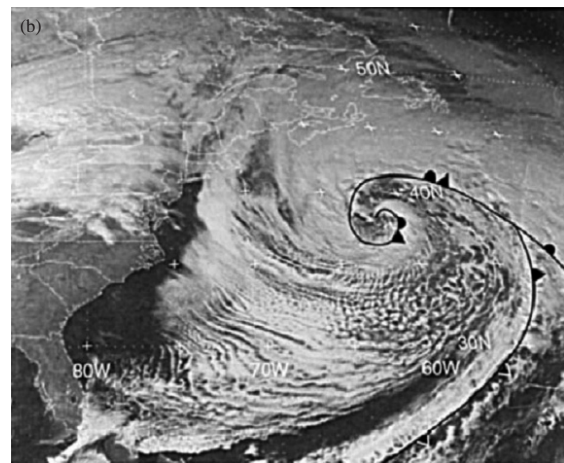
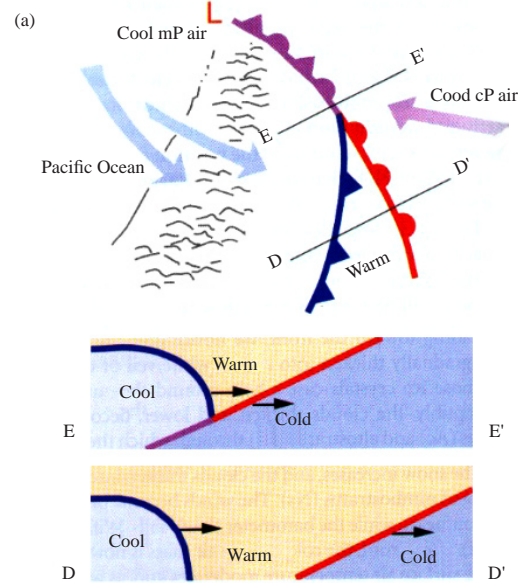


图5 教科书上的锢囚锋和锢囚过程（a）及1988年大西洋科学试验卫星云图上锢囚锋的包卷特征（b）^[8]

Fig. 5 Occluded fronts in classic textbook (a) and in real observations over North Atlantic in the cloud map from a satellite in 1988 (b)^[8]

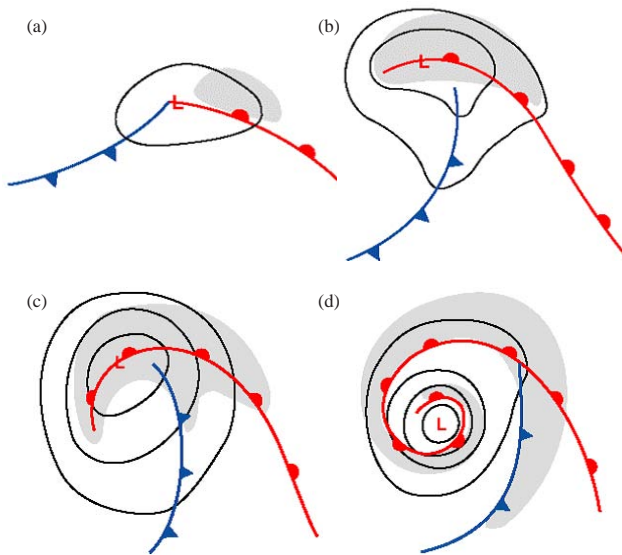


图6 S-K模型锋面气旋（外热带海洋性锋面气旋）生命史：
（a）初始锋面气旋，（b）锋面断裂，（c）后弯暖锋，
（d）暖核隔离（图中阴影为云区，黑实线为等高线，蓝色
线为冷气流，红色线为暖气流）^[14]

Fig. 6 Schematic illustration of Shapiro-Keyser extratropical cyclone model: (a) the forming of low pressure; (b) frontal fracture; (c) bent back warm front and frontal T-bone; (d) warm core frontal seclusion (the grey shading stands for frontal cloud areas; the black/red/blue lines are geopotential height/warm front/cold front)

1988年的科学发现虽然在1990年已经被总结在美国气象学会出版的《温带气旋——帕尔曼纪念文集》^[15]中，但直到20年后的2011年，舒尔茨与福奥翰才在美国气象学会会刊上对教科书上广泛使用的经典的锢囚概念提出了质疑，提出要对挪威气旋模式重新进行评估，并明确指出锢囚过程不是“赶超”过程（catch-up）及锋不是温度的0阶不连续，而是1阶不连续^[16]。该文还指出，“在挪威气旋模式中，锢囚是气旋加深过程终止的信号，因为当低压内部不存在暖区（warm sector）就意味着气旋失去了储存在气旋中的有效位能供给。”J.皮叶克尼斯和索尔伯格^[2]宣称，“当气旋尚未锢囚时，其动能都会增加”，“气旋一旦锢囚，气旋立即开始填塞”。但是，舒尔茨与

福奥翰指出：“观测经常发现，锢囚形成后，气旋还会持续加深好几个小时，中心最低气压会达到比锢囚形成时低许多百帕”。统计表明，通常在锢囚初始形成的12~24h后，气旋才达到它的最大强度。在统计的美国东北部91个气旋中，至少有29个气旋的地面分析显示，在锢囚形成12~24h后气旋继续加深了8~24hPa。最极端的例子是1972年2月19—20日，在锢囚锋形成后36h，气旋中心气压又降低了32hPa。

上面对锋面气旋学说的追溯表明，即使是已经成为“公认”并被编在教科书中的结论也必须要经受实践的检验。对于某些不符合客观事实的结论，不是千方百计为它寻找理由，而应观点鲜明地指出问题的症结所在，以此推动科学的向前发展。曾庆存在回忆20世纪50年代北京大学仇永炎教授天气学课程时指出，学习“经典”必须同时“直面实际”，敢于“突破成规”，并具体总结了东亚天气学有七个方面的问题值得研究^[9]，为我们做出了很好的榜样。

参考文献

- [1] Bjerknæs J. On the structure of moving cyclones. *Geophys Publ*, 1919, 1(2): 1-8.
- [2] Bjerknæs J, Solberg H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophys Publ*, 1922, 3: 1-18.
- [3] 杜钧, 钱维宏. 天气预报的三次跃进. *气象科技进展*, 2014, 4(6): 13-26.
- [4] 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. 伟大的卑尔根学派气象学家: J.皮叶克尼斯, H.索尔伯格和T.伯杰龙. *气象科技进展*, 2014, 4(6): 35-45.
- [5] 谢义炳, 陈受钧, 肖文俊. *天气学基础*. 北京: 高等教育出版社, 1959.
- [6] 佩特森. *天气分析和预报* (上册). 程纯枢, 译. 北京: 科学出版社, 1958.
- [7] 许小峰, 张萌. 气象科技发展历程及其对当代大气科学的启示. *气象科技进展*, 2014, 4(6): 6-12.
- [8] 迈克尔·阿拉贡. *科学分类手册丛书: 天气和气候卷*. 张春喜, 等, 译. 北京: 光明日报出版社, 2004.
- [9] 北京大学物理学院大气与海洋科学系. *勤勤恳恳教书育人: 纪念著名气象学家仇永炎教授*. 北京: 气象出版社, 2011.
- [10] 本书编委会. *开拓奉献, 科技楷模——纪念著名大气科学家顾震潮*. 北京: 气象出版社, 2006.
- [11] 陶祖钰, 熊秋芬, 郑永光, 等. 天气学的发展概要——关于锋面气旋学说的四个阶段. *气象学报*, 2014, 72(5): 940-947.
- [12] 顾震潮, 陈雄山, 许有丰. 锋面假相当位温图和它对中国寒潮冷锋上界变化分析的应用. *气象学报*, 1958, 29(1): 44-56.
- [13] 熊秋芬, 牛宁, 章丽娜. 陆地上爆发性温带气旋的暖锋后弯结构分析. *气象学报*, 2013, 71(2): 239-249.
- [14] Lehtonen A. *Textbook of Synoptic Meteorology*. Eumetrain, 2013.
- [15] Newton E C, Holopainen E O. *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*. Boston: Amer Meteor Soc, 1990.
- [16] Schultz D, Vaughan G. Occluded fronts and the occlusion process: a fresh look at conventional wisdom. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011: 443-466.