

全国寒潮中期预报文集

寒潮中期预报文集编委会 编

气象出版社

全国寒潮中期预报文集

COLLECTIVE WORKS ON THE
MEDIUM-RANGE FORECASTS
OF COLD WAVE

寒潮中期预报文集编委会 编

气象出版社

内 容 简 介

本文集收集了近年来我国寒潮中期预报方法和理论研究的主要成果。包括三个方面的内容：寒潮中期预报方案的研制；寒潮中期过程的数值预报试验；大气环流中期变化一些方面的诊断分析、理论研究和数值模拟。此外还包括一篇本课题组四年来的研究成果总结。

本文集的这些研究成果，对我国从事理论研究和实际工作的气象工作者颇有参考价值，特别是寒潮中期预报方案，可供广大气象台站试用。同时也可供其他专业人员和有关院校的师生参考。

全 国 寒 潮 中 期 预 报 文 集

寒潮中期预报文集编委会 编

责任编辑 庞小琪 陆 勇

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

* * *

开本：787×1092 1/16 印张：12 字数：304千字

1987年8月第一版 1987年8月第一次印刷

印数：1—1000

统一书号：13194·0370 定价：2.85 元

前 言

自1982年9月青岛会议以后，寒潮中期预报方法和理论研究课题组围绕着会议上所确定的三个方面的工作目标：寒潮中期预报方案的建立，机制研究的补充以及寒潮天气过程的数值预报试验开展了工作。因而，去年11月初又在湖北省武汉市召开了学术论文讨论会。会上共收到论文73篇，其中预报方案的内容最多，它主要包括：根据前两年寒潮机制研究论点所研制的预报方案、天气统计的方案、数值预报产品的分析和释用、我国南北方一些省份的预报方法等。由这些方案以及过去的研究结果，可以组成一个综合预报系列，预报寒潮的时效可以达到两周左右。有的论文介绍的试报效果是令人鼓舞的。

其他方面，如指数循环、非线性共振、非线性相互作用的特征，寒潮的数值试验、温度场对形势场的影响，动力过程的数值模拟等等研究，比起两年前又有所提高和深入。

本文集因篇幅所限，还因有的论文在别处刊登，只能从会议论文中选出40篇，以全文、短论和摘要的形式发表。

此外，文集还收集了课题组四年来的研究成果总结，该文系统而又完整地阐述了我们关于寒潮中期过程和大气环流中期变化的认识和观点。

本文集的编辑小组由下列同志组成：仇永炎（组长）*，周一鹤*，姜达雍，许有丰，余鹤书，温市耕*，董官臣*，缪锦海，王淑静，张培忠，张敬业，徐葵慧。

本文集的编辑如有不妥之处，请同志们批评与指正。

仇永炎

1985年5月

*参加较多的具体工作。

目 录

论 著

- 一、寒潮中期预报方法和理论研究的总结 (1981—1984)仇永炎等 (1)
- 二、寒潮中期过程分波动能的统计特征及其应用徐羹慧 (31)
- ✓ 三、南方寒潮若干问题探讨及其预报南方寒潮课题组 (36)
- 四、10—20天波扰传播型与山西寒潮周一鹤、裴巨才 (41)
- 五、寒潮的波谱分类余鹤书、李晓东 (46)
- 六、寒潮预报专家系统郑祖光、潘漱六 (50)
- ✓ 七、我国历史上重大寒潮特例分析石定朴 (58)
- 八、ECMWF中期数值预报产品的检验及其应用问题的讨论徐羹慧等 (68)
- 九、非线性相互作用的诊断分析董官臣、缪锦海 (73)
- 十、亚洲地区和欧洲地区指数循环的正压能量学分析杨舒婷、叶谦、朱亚芬 (79)
- 十一、东亚寒潮爆发“上游效应”的物理过程分析董官臣、樊凤皋、陈秋士 (85)
- 十二、大气波动动力过程的数值模拟试验姜达雍、张杰英、杨梅玉 (89)
- 十三、用正压原始方程模式作寒潮中期预报的试验许有丰、袁重光 (96)
- 十四、东亚寒潮的数值试验刘瑞芝 (101)

短 论

- 一、有限区域内纬向状态和扰动状态的动能方程仇永炎 (108)
- 二、华北秋季寒潮的聚类分型和预报余鹤书、王泳亮、王同庆、王洁颖 (113)
- ✓ 三、南方寒潮的若干特征及其预报谢齐强 (120)
- 四、1983/84年冬季平流层环流演变特征及其与自然天气周期的关系蔡承侠 (124)
- 五、甘肃寒潮中期过程分析和预报刘还珠 王传玫 (128)
- 六、500百帕纬圈谐波功率谱分析与陕西寒潮方建刚、王淑静 (131)
- ✓ 七、对南方寒潮演变规律的初步认识黄祖岳、王树连 (135)
- 八、判别秋季寒潮的完全预报法毛贤敏、张瑞莲 (140)
- 九、罗斯贝波的非线性共振相互作用缪锦海 (145)
- 十、温度场初值对阻高崩溃横槽转竖影响的数值试验阎书源 (148)
- 十一、大尺度环流的波谱预报误差余鹤书、李晓东 (156)
- 十二、欧洲、日本 500 百帕数值预告滤波后的分型及其对我省春季中期降水、气温趋势的预报郑秀雅、丁士晟、李永顺 (163)

摘 要

- (一) 大地形对大气环流指数循环过程的影响许有丰 (167)
- (二) 100百帕极地涡旋分裂和重建的能量机制张培忠 缪锦海 (168)
- (三) 西西伯利亚阻高类寒潮的中期过程分析王传玫 刘还珠 (169)
- (四) 亚洲L型与广西寒潮蒙远文 (170)
- ✓ (五) 春季南方寒潮的基本特征及其预报赵勤炳 (171)

(六) 二层ECMWF形势预告图在寒潮预报中的应用·····	陆帼英 (172)
(七) 强冷空气中期预报质量的评价·····	余鹤书、张芬复 (173)
(八) 宁夏中期寒潮预报的一些尝试·····	张正洪 (174)
(九) 一种应用数值产品的寒潮综合预报模式·····	邓子凤 (175)
(十) 欧洲中期数值预报产品在预报广东低温阴雨过程中的应用·····	屈翠虹 (176)
(十一) 寒潮个例中非热成风涡度的分析·····	阎书源 (178)
(十二) 寒潮个例的数值预报试验·····	阎书源 (179)
(十三) 吉林省春季(3—5月)寒潮大风预报模型·····	蔡慧芹、田雨斌 (180)
(十四) 上海市12月到2月寒潮分析和预报·····	王皎明 沈美恩 (181)

寒潮中期预报方法和理论研究的

总结(1981—1984)

仇永炎等·

(北京大学地球物理系)

一、前 言

寒潮是我国冬半年的重要灾害性天气之一，为了预防其灾害，我们不仅要作好5天左右的预报，预报时效也常需延长到十天左右或十天以上。冬半年天气的中期预报效果，在很大程度上取决于寒潮中期预报的准确与否。所以寒潮中期预报方法的研究，是很重要的。一方面，可以满足寒潮预报的需要；另一方面，又可以带动冬半年中期预报方法的建立。

在本课题开始之前，关于寒潮的研究国内已做了很多工作，然而关于十天左右或十天以上的寒潮过程的理论研究是很少的，而且也不够系统。至于台站的实际业务工作，更是缺乏预报方法。国外关于寒潮中期预报的研究就更显得薄弱。其预报途径由四、五十年代的天气图方法正转向于数值预报，但是数值预报的有效时段比较短，不能满足实际的需要。就欧洲中期数值天气预报中心而论，它的模式是目前世界上预报时效最长、效果最好的预报模式，其可用时效也只有四、五天。在这种情况下，为适应我国天气预报服务的需要，研究在寒潮爆发十天前或更长一些时间提供预报信息，是非常重要的。十天左右的中期预报是极其困难，一方面，十天左右的天气过程是与大气的非线性运动有关，因而具有某些怪引子的混沌特征，另一方面，又与非绝热加热、地形等强迫作用有关。因此，必须在充分认识冬半年大气环流中期变化和寒潮中期过程的物理机制基础上，才能得到较好的预报方案。本课题的目的，就在于研究十天左右的寒潮中期天气过程和物理过程，为十天前或更长一些时间的寒潮预报，提供有物理依据的预报方法。

首先，我们是采用天气学方法，弄清寒潮中期过程的事实，并用统计方法概括出共同特征。这方面的工作见本总结第一部分。第二步为要弄清最常见的寒潮中期天气过程（即倒Ω流型）各个阶段的物理联系，以及过程开始的物理意义，我们开展了波数域能量学的诊断研究。这种研究需要半球范围内的多层资料，同时为了弄清具有共性的特征，需要较多的例子。当时，网格点资料很缺乏，有不少例子是直接从天图上读取数据作为选例的基本资料。有些计算是在五机部西门子7760计算机上实现。通过十七个例子的分析，查清了主要天气过程的物理过程，并确定出几个关键参数，供制定预报方法之用。这部分机制研究见本总结第二部分。有了寒潮中期过程的可靠事实，又有了具有物理依据的参数，这样就可以考虑研制寒潮中期预报方法。所设计的方法分时段，在寒潮爆发前15天提供有无寒潮的信息，6—10天前提供较为准确的寒潮消息，3—5天前提供更为具体的寒潮预报。前两个时段主要由谱能量参数提供。今后，在数值预报广泛采用谱模式的情况下，可以大量输出谱能量特

*参加这篇总结工作的同志，尚有王淑静、张敬业、缪锦海、姜达雍、许有丰、徐夔慧、董官臣、余鹤书。

征。因而，所设计的在谱能量物理机制基础上的逐步订正预报方案将会具有较强的生命力。预报方法的研究总结在第五部分。

除了上面三部分工作外，并开展两项基础性研究，即大气环流中期变化和中期数值预报试验。

大气环流的中期变化构成寒潮中期过程的环流背景，或者就是寒潮中期过程的一部分。所以，有必要进行大气环流中期变化的研究。这方面的工作国内外在六十年代初期和七十年代末期有不少理论性研究，例如Lorenz[1960, 1963]、Charney [1979]、曾庆存 [1979]、朱抱真[1980]等人的工作。在以上工作的基础上，本课题比较全面地揭示了大气环流中期变化的能量学特征；多方面地进行了大气环流中期变化的数值模拟和进行了中期变化的非线性动力学的研究。

天气预报的最终途径是数值预报。本课题组在我国现有设备条件下，设法用正压模式和多层斜压模式开展了不少中期数值预报的试验工作，结合寒潮中期过程某个特定阶段做72小时数值预报，并与能量学诊断结果进行了比较，并进行过一些与寒潮有关的数值试验。

本文是以上五个方面研究结果的总结，绝大部分属于1980年以后的工作，为了历史的延续性，对1980年以前的工作只是略加叙述。

二、天 气 事 实

参照中央气象台的有关寒潮标准规定：冬半年冷空气影响时，全国2/3的代表站在过程期间内日平均气温共降低 10°C 以上（负距平 5°C 以上），定为全国性寒潮；若北方达到降温标准，就定为北方寒潮；南方达到标准，就定为南方寒潮。但由于各地地理条件和服务内容不一，标准也不尽相同。为此，我们也考虑了各省、市、自治区的标准。^[1,2,8]

从气候背景来看，全国性寒潮平均每年2—3次，地区性寒潮平均每月可出现一次。春秋季节寒潮活动的次数一般比严冬多，而且给农牧业带来的危害也大。

（一）寒潮中期过程

寒潮是大范围的强冷空气在一定环流形势下向南爆发的现象，是一种大型天气过程。在其整个生命史中，往往与半球范围的超长波、长波活动有密切关系，又在这些不同尺度系统的相互作用中，表现出阶段性的特点，这些阶段性的有机关系，构成了导致寒潮的中期天气过程，简称为寒潮中期过程。

寒潮中期过程有两大类，其中主要的一类是倒 Ω 流型；另一类是极涡偏心型。

据近十年的统计，全国性寒潮70—80%属于倒 Ω 流型^[4]。按其演变可把这种流型的寒潮分为三个阶段，即初始阶段、酝酿阶段和爆发阶段^[1,5,6,8,9]。

（1）初始阶段 在两大洋北部有脊向极区发展，作为整个过程的开始。常常是太平洋东部的阿拉斯加脊已经存在，尔后大西洋脊向西欧、向极地发展时，阿拉斯加脊也向西、向极地发展（有时两个脊在极地打通），极涡分裂为二，伸向东、西两半球（或极涡偏于东半球）。从东半球天气形势看，两大洋脊钳制着一个大极涡，很象大写的倒“ Ω ”。自两大洋脊发展到这种大倒 Ω 流型的建立和维持称为初始阶段。

（2）酝酿阶段 大倒 Ω 流型向亚洲地区收缩，乌拉尔山和鄂霍茨克海建脊，亚洲极涡加强并南压。从形势上看，高纬东伸的乌拉尔山脊和西伸的鄂霍茨克海脊挟持着亚洲极涡，形

成了东亚地区倒 Ω 流型。极涡底部有一支强西风,伴随着一支强锋区,锋区上常有长波发展,或横槽缓慢南压,形成强冷空气酝酿形势。

(3) 爆发阶段 其特征为中纬长波急速发展,或横槽转竖,冷空气侵袭我国。最后东亚大槽加深并重建,有时在冷空气向南方爆发过程中,当低纬有孟加拉湾槽配合时,常促使寒潮前锋在长江流域或以南有锋生过程,造成剧烈的天气过程或持续阴雨天气^[8,7-11]。

整个寒潮中期过程,由两大洋脊发展—寒潮爆发—东亚大槽重建,一般为期2—3周。

上述三个阶段是全国性寒潮的典型模式,畸变的情况也是常见的。如东半球极涡位置、强度不是固定不变的,所以挟持极涡的脊也不一定就在乌拉尔山和鄂霍茨克海地区,有时是欧洲脊,甚至西伯利亚脊和北太平洋中部脊。切断极涡内有时也不是单一的低压中心,有时有2—3个低压,造成寒潮的只是其中之一。演变情况也较复杂,常有极涡替换,然而同上面所给的流型和演变过程对照,就整体来看,是很相似的。

这几个阶段是从环流形势演变,而且是从全国类寒潮来划分的,但因我国幅源广大,各个地区划分有所出入。其中尤以寒潮爆发阶段各地区划分出入最大,因为这个阶段的开始日要涉及寒潮爆发日。按照我们现在的划分,寒潮爆发日一般是指寒潮前锋自 45°N 活动而后开始迅速南下的那一天。从这个划分来看,西北地区如新疆寒潮到达要提前1—2天,而在长江流域或以南要后延2—3天不等。由于寒潮爆发(日)南北方不一致,其酝酿阶段也略有出入。

另一类是极涡偏心型^[1,4]。初始阶段表现为大洋北部暖脊已发展,极涡已偏心于东半球。酝酿阶段:两大洋脊再次强烈发展,并迅速向东亚收缩,乌拉尔山脊已移到西西伯利亚上空,亚洲极涡强度较强。爆发阶段:西西伯利亚上空高压脊发展东移,导致寒潮爆发。

还有一类可以称为大型波动东移型^[6]。这种类型的槽一般来自东欧或乌拉尔山附近。这种槽在东移过程中时强时弱,有时并不显示有寒潮的迹象。当其移到西伯利亚地区,接近蒙新高原西界附近,槽才显著加强。而后每天约以5个经距东移,造成全国大部分地区出现寒潮。这类寒潮从槽发展很强到全国寒潮爆发为期只有5—7天,所以预报时效短。由于这类不常出现,而且强度也较弱,我们未作进一步研究。

(二) 寒潮中期过程与超长波

中期天气过程常与超长波的活动有着密切关系,揭示超长波活动的最简单办法是分解纬圈谱。本课题刚开始的几年,就做了一些检验哪一类系统属于超长波以及超长波移动规律的工作^[66-68]。但当时受到资料条件的限制,选例并不多。1981年以后,可以用较多的例子进行统计工作。由于这项工作是分散进行的,因而出现纬圈范围选择不一,对照前述中期过程也有差别,时间间隔取法也不同。然而,尽管如此,基本结果却相当一致^[1,3,12-15]。这些结果是:

(1) 寒潮中期过程初始阶段以2波占优势,爆发阶段以3波占优势。如中央气象台应用1971—1981年冬半年(9—4月)57次寒潮例子,考察500百帕 40° — 75°N 纬度带在寒潮爆发前15天的优势波(波振幅最强的波),为2波的例子占总数54%。考察 40° — 55°N 纬度带在爆发阶段优势波以3波为最多,占总数的39%。又如辽宁省气象台和兰州大学的统计得出,在寒潮爆发前9—14天,2波为优势波,其次为3波;寒潮爆发时以3波占优势。初始阶段2波占优势显然是对应着两大洋脊发展的天气形势,爆发阶段3波占优势显然是对应东亚大槽重建构成环

球三槽稳定形势。

(2) 寒潮中期过程中, 优势波的转换较为复杂, 不是简单地由初始阶段的优势波, 直接转换为爆发阶段的优势波, 这显然同寒潮爆发前15天内要经过一段复杂天气过程有关。然而比较多见的是2波转3波。

利用分波动能表示天气形势自然比纬圈谱较为优越。关于中期过程中分波动能的统计结果我们放在预报方法中讨论^[4]。

(三) 寒潮中期过程与西风指数

西风指数在一定程度上反映了大气环流经、纬向的特征。根据东亚地区中纬度(40—60°N)西风指数变化统计, 北方寒潮的酝酿阶段有80—90%发生在经向环流里, 而南方寒潮只有40—50%。这是由于我们所取的度量指数的纬度带偏北, 所以反映不出中低纬的环流特征。因此对于寒潮来说, 仅分析中高纬度的西风指数变化是不够的, 必须对高、中、低纬度的指数做统一考虑, 利用三天平均的地转西风 $\bar{u}$ 作时间—纬度分布图表征了大气基本气流结构。^[1,95]分析发现, 约在寒潮爆发前十天与东亚倒 Ω 流型相对应的东亚基本气流特征同时具备三点: ①60—70°N有 ≥ 4 米/秒的东风; ②低纬度强西风区减弱或消失, 中纬度出现强西风区与高纬度强东风区之间有强的气旋式切变。③这种气流结构具备了线性气流不稳定条件($-\partial\bar{u}/\partial y$ 有最大值), 同时也具备了正压不稳定的必要条件($\beta - \partial^2\bar{u}/\partial y^2 = 0$), 说明寒潮爆发时正压过程有一定的作用。由于这些特征具有指标性, 一些台站已直接用它作预报指标, 收到了很好的效果。

从上面讨论可知, 在寒潮的酝酿阶段, 我们已研究过西风指数的一些特征, 但是初始阶段在西风指数上有什么反映, 过去由于资料的限制, 还未探讨过, 有待今后研究, 以便了解全过程, 延长预报时效。

(四) 寒潮中期过程与行星尺度系统

中期过程与短期过程的区别主要在于: 前者是由行星尺度波动的活动或者由一群不同尺度系统的活动而决定的, 而后者主要由单一的天气尺度系统决定。研究寒潮中期过程也是如此。前面我们把寒潮过程划分为三个阶段或四个阶段(如包括衰退阶段), 就是按照中期的特点进行的, 而不是只研究与寒潮相联系的低槽的演变。但是我们也要考察一下, 组成中期过程中的主要成员的特点, 以便了解它们在整个寒潮过程中的作用。^[3,6-11,99]这里只就形势演变来讨论, 物理机制的联系放在以后讨论。

(1) 两大洋脊 上面已经提到, 研究中期过程不能只注意低槽的发展, 而应该抓脊的演变。就预报时效短的预报, 常把乌拉尔山脊(有包括鄂霍茨克海脊)作为关键系统来抓。但就中期过程来说, 关键系统应放在两大洋脊, 这点已在划分寒潮过程时谈到。不仅如此, 而且有不少在倒 Ω 流型演变过程的事例中, 乌拉尔山脊和鄂霍茨克海脊或者是由两大洋脊演变而来, 或者因其他原因而加强。这点由下面讨论可知。

(2) 乌拉尔山脊 在倒 Ω 流型演变过程中, 乌拉尔山脊发展有如下四种形式:

- ①由大西洋暖脊加强并东移, 而后在乌拉尔山发展成强大的脊。
- ②从阿拉斯加脊中切断出来高压体, 西移到泰米尔半岛与乌拉尔山弱脊合并而成。
- ③由高纬大西洋脊发展东移, 同乌拉尔山弱脊叠加而成。

④黑海脊发展而成，但这种是少数。

(3) 鄂霍茨克海高压(脊) 在倒 Ω 流型中其发展和维持主要有三种形式:

①阿拉斯加脊直接后退到鄂霍茨克海而成。

②阿拉斯加脊分裂出来的闭合高压体，西移与鄂霍茨克海弱脊合并而成。

③由太平洋西部暖脊发展而成，但这种是少数。

(4) 副热带高压 当寒潮的初始阶段—酝酿阶段，北支行星尺度系统演化的同时，也常见西太平洋副热带高压加强西伸到华南或中南半岛。分析指出，它是由两种方式完成的，一是南海有台风活动，另一是洋中槽加深促使付高分裂，西边的一环西移加强。这样就促使南支急流北推，造成南北两支急流合并，亚洲倒 Ω 流型底部锋区更强。

(5) 新疆暖脊 新疆暖脊通常是中亚(或伊朗)暖脊发展东移来的，但也有乌拉尔山脊南溃形成，也有西藏高原脊向北发展形成的。这个暖脊的时间尺度约3—5天，对北方寒潮和全国类寒潮并不重要，但对南方寒潮有作用，容易在脊前形成一支强西北急流，引导冷空气从110°E以东地区南下造成35°N以南广大地区的迴流天气，是南方阴雨、大雪的有利形势。

(6) 孟加拉湾槽 此槽常由上游地中海地区的槽演变而成，它在整个寒潮中期过程中并不重要，但对南方寒潮爆发有着特殊贡献。主要作用在于提供暖湿气流，一方面加强锋前地区回暖；另一方面，暖湿气流沿寒潮冷锋上爬，暖区一侧上升运动所释放的潜热，有利于冷锋锋生和锋后低温持续。

根据前面几节天气系统研究，可以归纳如下几点:

①寒潮中期的过程，主要的是一种大倒 Ω 流型的演变，其发展有阶段性。

②这种流型是从两大洋脊共同向极区发展开始，所以从预报时效短的预报来说关键系统是乌拉尔山脊，而从中期角度考虑，关键系统应抓两大洋脊。

③寒潮整个过程可以纬圈谱或谱函数能量参数来描述，酝酿阶段还可用西风指数等来描述。

④南方爆发寒潮还应该注意低纬系统的配合。

三、寒潮中期过程的能量学研究

在前一部分已经讨论到，常见的寒潮中期过程是倒 Ω 流型的演变过程。如不包括衰退阶段，可将其划分为三个阶段，即：初始阶段、酝酿阶段和爆发阶段。现在的问题是：在这几个阶段中哪些超长波在起作用，两大洋脊发展的物理意义何在，通过哪些物理过程使各个阶段发生联系，寒潮爆发受哪些物理过程控制，等等。对这些问题的认识，既可以为我们提供寒潮中期预报的物理基础，又可以使我们了解冬季风强活跃期的物理过程。

亚洲是最强的季风区。冬季风也和夏季风一样，有所谓活跃期和间歇期。寒潮发生在冬季风最活跃的时期，导致寒潮的环流变化是冬季风最主要的中期过程。所以研究寒潮中期物理过程有助于认识冬季风的中期物理过程，自然后者还会包括更多的物理过程，比如海陆加热和大地形的作用，但这些物理过程可以作为进一步研究的问题。

寒潮虽然是东亚局部地区的现象，而控制其中期过程的却是相当广大区域内的环流，寒潮中期过程实质上是属于大气环流中期变化的一个方面，因此可以用研究大气环流的办法去研究它。同时，支配寒潮中期过程的物理因素很复杂，既有正压过程，又有斜压过程，有时

这两者又是相互激发的^[18]；既有波-纬相互作用，又有波与波之间的相互作用，而且后者更为重要；既有绝热过程又有非绝热过程。为此，我们认为利用波数域能量方程进行诊断研究，可能是个较好的途径。我们也正是沿着这个途径进行研究的。

(一) 波数域能量方程、方法与资料

在波数域能量方程组中，有限纬度带单位质量的平均动能 $K(0)$ 、 n 波动能 $K(n)$ 、平均有效位能 $P(0)$ 、 n 波有效位能 $P(n)$ 四者的变化率可写为^[124,135]

$$\frac{\partial K(0)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} M(n) + C(0) - D(0) + BK(0) \quad (1)$$

$$\frac{\partial K(n)}{\partial t} = -M(n) + L(n) + C(n) - D(n) + BK(n) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P(0)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} R(n) - C(0) + G(0) + BP(0) \quad (3)$$

$$\frac{\partial P(n)}{\partial t} = -R(n) + S(n) - C(n) + G(n) + BP(n) \quad (4)$$

其中 $M(n)$ ， $R(n)$ 为 n 波能量与纬向平均状态之间的相互作用；

$C(0)$ ， $C(n)$ 为有效位能与动能之间的转换函数；

$L(n)$ ， $S(n)$ 为波与波之间的相互作用；

$G(0)$ ， $G(n)$ 为非绝热制造率；

$D(0)$ ， $D(n)$ 为摩擦耗损率；

$BK(0)$ 和 $BK(n)$ 分别为引起 $K(0)$ 和 $K(n)$ 变化的净边界通量项，其中主要贡献者分别为： BF 为波动与平均气流之间相互作用的贡献， $BL(n)$ 为波与波相互作用的贡献。

$BP(0)$ 和 $BP(n)$ 分别为引起 $P(0)$ 和 $P(n)$ 变化的净边界通量项，其中主要贡献者分别为：

$\sum_{n=1}^{\infty} BFP(n)$ 为 n 波与纬向平均状态之间相互作用的贡献， $BS(n)$ 为波与波相互作用的贡献。

选了5个例子，利用五层 20°N 以北地区 $5^\circ \times 5^\circ$ 经纬距高度资料，除非绝热制造项和摩擦耗损项由余差法决定外，计算了上面方程组的全部项。4个例子资料直接从北半球天气图上读取，资料前后共取30天；1例取自NMC资料，前后共90天。计算结果的可靠性，在文献[25]有所讨论。

为了减少获取资料的困难，能计算更多的例子，还利用500百帕一层网格点资料，计算动能方程中的正压项，并进行综合平均。(1)、(2)两式可以变为

$$\frac{\partial K(0)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} M(n) + \sum_{n=1}^{\infty} BP(n) + Re(0) \quad (5)$$

$$\frac{\partial K(n)}{\partial t} = -M(n) + L(n) + Re(n) \quad (6)$$

两式的最后一项为余差项。根据摩擦切应力和平均动能与涡动动能的比值的平均资料^[101,102]，可以由余差项的正负，间接判断斜压转换的方向。当 $Re(0) \gg 0$ 表示 $P(0) \rightarrow K(0)$ ，反之亦然。当 $Re(n) \gg 0$ ，表示 $P(n) \rightarrow K(n)$ ，反之亦然。

为了将一层资料计算与五层的相区别，将前者暂称为正压分析，后者称为斜压分析。前

一种分析大多用 $17.5-77.5^{\circ}\text{N}$ 的积分值, 动能单位取 10^{21} 尔格/百帕, 转换率取 10^{15} 尔格/百帕·秒¹⁾。后一种的能量和能量转换率的单位分别为米²/秒²和 10^{-6} 米²/秒³。正压分析结果总结在文献[21]中, 斜压分析可见文献[22—28]。由于正压分析是12个例子综合平均的结果, 共性比较清楚, 在下面的讨论中有些是用正压分析的结果来说明。其中用到余差项间接估计的斜压转换结果都经过斜压分析的结果核对。

(二) 各个阶段特征波的能量变化

在未讨论各个阶段的能量转换之前, 先给出各个阶段的特征波。所谓特征波是指在该阶段动能最强的分波, 或者是将发展为最强的波。根据17个例子的统计, 得到如下结果: 在初始阶段两大洋脊发展大多对应于2波动能增长, 其次是3波。在寒潮爆发阶段, 大多对应于3波发展, 其次是2波。在这两个阶段之间, 乌拉尔山脊和鄂霍茨克海脊的发展或者对应于3波或者对应于4波。临近寒潮爆发, 即在寒潮大举南下的前1—2天, 有一长波段的波发展, 暂称为脉冲波。

由于在整个寒潮中期过程中, 大多数例子是以2波增长型为开始, 以3波盛行型为告终。2、3波动能的变化是应该注意的, 其总的特点是: 在初始阶段2波动能先增长, 有时增长很迅速。维持了很强的强度以后, 有时下降、增长再下降, 但总的趋势是下降的。在2波增长的同时, 3波动能开始下降, 以后有时增长、下降再增长, 但要到寒潮爆发阶段才迅速增长到整个过程的最强强度。爆发阶段是以3波增长到最大强度。2波衰退到最低强度为特点。

1. 初始阶段的能量变化

初始阶段的特征波, 不论是2波型, 还是3波型, 其增长主要是由于斜压过程, 而不是正压过程; 其衰退主要是由于正压输出, 特别是由于正压非线性输出。这部分输出主要输送给同乌拉尔山脊(鄂霍茨克海脊)相对应的3、4波。根据斜压分析的个例来看, 引起初始阶段²波或3波发展的斜压过程同非绝热制造有关。

现以2波增长型来说明, 其正压综合平均结果为

$$\frac{\partial K(n)}{\partial t} = -M(n) + L(n) + Re(n).$$

$$2\text{波增长:} \quad 539 = -134 \quad -15 \quad +688$$

$$2\text{波衰退:} \quad -891 = -358 \quad -453 \quad -80$$

1976年11月例子的斜压分析结果^[25]为

$$\frac{\partial K(2)}{\partial t} = -M(2) + L(2) + C(2) + \dots$$

$$2\text{波增长:} \quad 8.0 = -18.2 + 15.0 + 26.0 + \dots$$

$$2\text{波衰退:} \quad -33.7 = -5.7 - 25.2 + 55.0 + \dots$$

两者结果基本一致。至于 $C(2)$ 在2波衰退期为很大正值这一点, 正如蔡清彦等人^[100]所述, 是个很特殊而又难于解释的现象。

考察中纬2波和高纬2波的动能变化以后, 还看到^[27], 中纬2波动能增长时, 通过波与波之间非线性相互作用而引起的净边界通量项, 有使高纬2波发展的趋势。根据天气实践, 高纬2

1) 1尔格 = 10^{-7} 焦耳。

波发展有利于极涡分裂,倒 Ω 型建立,有时还会出现极地高压,因此这部分通量项是有重要意义的。

2. 乌拉尔山脊的建立与东亚倒 Ω 流型的能量变化

在倒 Ω 流型演变过程中,乌拉尔山脊的建立几乎与鄂霍茨克海脊的发展是同时的,而且也是东亚倒 Ω 型形成时期。因此这里研究乌拉尔山脊的建立也即相当于研究东亚倒 Ω 型的形成。对应于乌拉尔山脊建立的特征波有时为3波有时为4波。这种对应关系,既经过纬圈谱脊线位置和脊的振幅验证^[25],又经过综合图的验证^[24]。

乌拉尔山脊的建立,不论是正压综合平均分析,还是斜压个例分析,都表明正压过程比斜压转换较为重要,而且正压过程中以波与波相互作用更为重要些,主要来自于两大洋脊在衰退时期所输出的动能。

现以3波为特征波来说明。正压分析结果为

$$\frac{\partial K(n)}{\partial t} = -M(n) + L(n) + Re(n) + \dots$$

$$458 = 208 + 334 - 116 + \dots$$

1976年11月2—4日例子的斜压分析为

$$\frac{\partial K(3)}{\partial t} = -M(3) + L(3) + C(3) + \dots$$

$$9.9 = -9.0 + 11.9 + 8.2 + \dots$$

而 $L(3)$ 中主要来自于 $1*2$ 和 $1*3$,可见与乌拉尔山脊建立相对应的波动,其增长主要来自于2、3波动能。

3. 长波脉冲的能量变化

在寒潮爆发前1—2天有一长波段的波突然增长、随即衰退下去,其增衰在3天内完成。这种脉冲式的波可在60%的倒 Ω 型寒潮例子中见到。无论正压综合平均分析,还是斜压个例分析都表明:这种波的增长主要是由于波动有效位能向动能的转换,而衰退主要是将其本身能量输送给了2波和3波。而2、3波是寒潮爆发阶段的特征波,这是很有意义的一点。

这里用8个例子正压综合平均分析的结果来说明,因为这些例子都是用较严格的定义确定的。

$$\frac{\partial K(n)}{\partial t} = -M(n) + L(n) + Re(n)$$

脉冲波增长: $1100 = -95 - 284 + 1479$

脉冲波衰退: $-1433 = -124 - 794 - 515$

这里再举1969年例子来说,这里7波定为脉冲波,其增长与衰退结果如下

$$\frac{\partial K(7)}{\partial t} = -M(7) + L(7) + C(7) + \dots$$

7波增长: $74 = 25 + 80 + 145 + \dots$

7波退衰: $-98 = 6 - 40 + 81 + \dots$

这些数值结果都说明了上面的结论。

说明一点,脉冲波比较明显的例子,对应的天气形势,大都属于横槽转竖槽的情况。在有的例子里,脉冲波并不明显,这大多属于横槽缓慢南压的情况。在极个别的例子里,比如

1) $n, *n$, 表示 n 波和 n 波相互作用对于另一个波的能量得失

1979年4月的例子^[28]，在爆发阶段以前，有一种所谓“长波反串级的发展过程”，即：先是8波发展，随后既通过 $C(n)$ 又通过 $L(n)$ 依次为7波、6波、5波发展。这种过程的作用今天还难以说明。

4. 寒潮爆发阶段的能量变化

寒潮爆发时期，波动动能增长率最快的波，一般情况是这个阶段的特征波，暂称其为爆发波。最常见到的爆发波是3波，其次是2波。这里只要讨论促进3波发展的物理过程就可以了。3波例子的综合平均结果如下：

$$\frac{\partial K(3)}{\partial t} = -M(3) + L(3) + R_e(3)$$

$$519 = -72 + 379 + 212$$

由此可以看到，3波发展主要是通过波与波的相互作用项，以 $R_e(3)$ 所反映出来的绝热过程和斜压转换略居于次要地位，2波例子也有类似的情况。

现在考察通过哪些波供给3波动能，使其发展的，就选例平均情况来说，有如下结果：

1*2	1*4	2*5	3*6	4*7	5*8	6*9	7*10	8*11
152	48	136	-33	89	-76	-17	3	-28

由此可以看到 $L(3)$ 主要是来自1、2、4、5波之间的相互作用，这是寒潮爆发阶段几天的平均结果，我们已可以看到4、5波的作用。为了避免平均掩盖的一些现象，考察寒潮刚刚爆发时 $L(3)$ 的来源，脉冲波的作用会更清楚些。

就一些个例来看，大概是这样的情况，有的例子是脉冲波在爆发波增长的初期输送较多动能给爆发波，而有的例子是脉冲波先输送给1波、2波动能，而后通过这些波再转手输送给爆发波。这里举1979年12月下旬的寒潮例子来说明，例中4波是脉冲波，3波是爆发波。在12月19日4波因 $L(4)$ 为很大负值（-2718）而衰退，其中输送给同3波有关的数值为-1221。在20—22日三天期间3波处于增长阶段，它从同4波有关的分量获得的动能为751，可见3波主要是从4波获得大量动能。

综上所述可知，爆发波通过 $L(n)$ 方式所获得的能量来源有二：或者直接来自于脉冲波，或者通过1、2波的转手从脉冲波得到动能。

(三) 中纬度动能和位能的聚集

根据实践经验，在寒潮爆发前一段时期内，中纬度有急流和锋区增强的过程，而且这种增强自两大洋脊发展就已开始。当大型倒 Ω 流型向东亚地区收缩，到东亚倒 Ω 流型形成和维持时，急流和锋区有一段减弱再增强的过程。到寒潮爆发时，中纬度的急流和锋区因南移而减弱。从能量学观点来说，中纬度急流和锋区的增强与减弱，就是平均动能和平均有效位能在中纬度的聚集与转移。因此，可以通过研究平均动能和平均有效位能的变化来了解中纬度急流和锋区增强和减弱的物理过程。

1. 中纬度平均动能的变化

根据寒潮爆发前后二十多天，中纬度平均动能资料进行综合平均，所得到的相对变化曲线如图1所示。这条变化曲线已经过平滑，它是由7个小阶段 I—VII 组成，前三个小阶段，大致属于初始阶段，自两大洋脊发展开始，到大型倒 Ω 型向东亚地区收缩为止，其次两个小阶段属于东亚倒 Ω 型建立阶段，VI大致对应于爆发阶段，VII处于寒潮后期并进入衰退阶段。其总的变化趋势同上述急流变化相一致。特别值得注意的一点是：在两大洋脊发展时期，中纬

度平均动能迅速增长到整个寒潮中期过程的高水准。

将平均动能变化率方程 (5) 应用于中纬度 (32.5—57.5°N) 地区, 并对 9 个例子进行综合平均, 所得结果见表 1。根据表中资料, 虽然有些结果不很规律, 但有两点还是比较清楚的。其一是中纬度平均动能的增长和维持是同很大的净边界通量正值相联系, 比如 I、II、IV、V 阶段; 其二是, 平均动能的衰退是同大的 $R_e(0)$ 负值相联系, 但同小的净边界通量值相联系, 特别是 III、VI 阶段。

表 1 中纬度平均动能变化的综合平均, 单位为 10^{15} 尔格/百帕·秒^[21]

项 目 \ 阶 段	I	II	III	IV	V	VI	VII
$\partial K(0)/\partial t$	1678	-148	-1791	1548	38	-1925	1555
M	228	333	-45	65	99	20	-48
F	1671	1207	893	1018	1338	755	1539
$R_e(0)$	-221	-1689	-2634	465	-1339	-2700	-64

中纬度平均动能的增长主要是由于净边界通量的贡献, 这一点很重要。按照净边界通量的表达式

$$BF = \frac{1}{ba} \left\{ (\overline{u} \overline{u'v'} \cos \varphi)_{\varphi_s} - (\overline{u} \overline{u'v'} \cos \varphi)_{\varphi_N} \right\}$$

表明, 南边界向北涡动动量通量与北边界向南通量的配合, 会出现大的 BF 正值。在低纬度, 一般情况都是将动量向中纬输送。北边界向南通量是要同一定天气形势相联系, 在两大洋脊向极区发展时, 就能提供这种条件。我们查了少数例子属于这种情况。

$R_e(0)$ 为很大的负值, 根据前面讨论, 相当于 $C(0)$ 为负值, 表明中纬度逆环流盛行。因此, 在平均动能衰退阶段, 由于逆环流的作用, 将其一部份能量转换为平均有效位能。这对平均有效位能起到补充作用, 不致使其迅速地释放到最低水准。

2. 中纬度平均有效位能的变化

根据五个寒潮例子, 对于自两大洋脊发展开始共三十天的中纬度平均有效位能 $P(0)$ 进行综合平均, 其变化曲线如图 2 所示^[22]。由图中 a 曲线可以看到, 在初始阶段 $P(0)$ 一直是上升的, 并上升到整个过程的最高水准, 到东亚倒 ω 流型建立以前略有下降, 随着倒 ω 流型建立而又回升, 到寒潮爆发前 1—2 天才不断下降到低的水准, 寒潮过后又逐渐回升。为了反映 $P(0)$ 这种变化是寒潮前后所特有的特点, 可以采用同环球无寒潮期间 $P(0)$ 的变化相比较的方式来原因。图 2 中 b 曲线为 1980 年 12 月—1981 年 1 月无寒潮时的 $P(0)$ 变化。比较曲线 a 和 b, 突出的差异在于: 在有寒潮的前期, $P(0)$ 处在较高的水准上变化, 而在整个无寒潮期间 $P(0)$ 是在较低水准上变化着。这就清楚地表明, 在寒潮爆发前期, 中纬度大气已聚集了大量的平均有效位能, 而且这种聚集从两大洋脊发展开始。

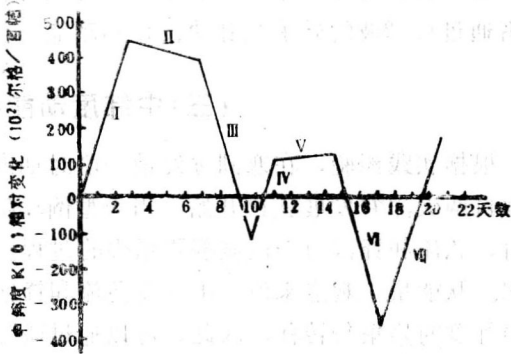


图 1 中纬度平均动能相对变化的综合平均曲线
按 9 个寒潮中期过程平均^[27]

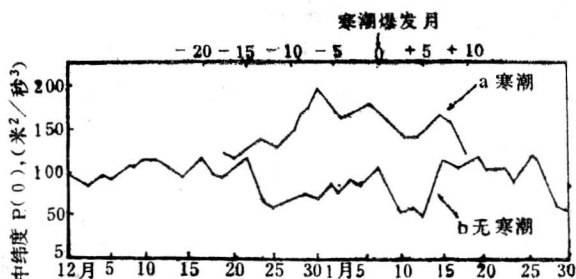


图 2 五次寒潮过程 (a) 和无寒潮过程 (b) 中纬度平均有效位能的变化曲线
 上面的横坐标为寒潮过程日序, 0 代表寒潮爆发日, 下面的横坐标为 1980 年 12 月至 1981 年 1 月的日期^[22]
 注: 图中上横坐标为寒潮爆发日

将平均有效位能变化率方程 (3) 的各个项按四层资料取平均值, 相对于四次寒潮例子进行综合平均, 再选其中数量级较大的项, 其结果如下^[22]

$$\frac{\partial P(0)}{\partial t} = \Sigma R(n) - C(0) + G(0) + \Sigma BFP(n) + \dots$$

初始阶段:	7.1 = -70.8 + 7.8 + 9.5 + 63.0 + \dots
酝酿阶段:	3.0 = -69.0 + 4.5 + 7.3 + 57.8 + \dots
爆发阶段:	-10.6 = -69.3 + 1.0 + 1.3 + 51.3 + \dots

这里的数值单位为 $10^{-5} \text{米}^2/\text{秒}^2$, 该资料由于取四层平均, 同时是由于取整个阶段平均, 特别是酝酿阶段 (即东亚倒 Ω 流型建立阶段), 许多细节看不清楚, 但还是可看出如下几点主要结果。

(1) 在初始阶段, 由于净边界通量项 $\Sigma BFP(n)$ 为大的正值, 加上 $-C(0)$ 和 $G(0)$ 的配合, 超过了平均有效位能向涡动有效位能的转换率 $\Sigma R(n)$, 使得在这个阶段 $P(0)$ 迅速增长。在酝酿阶段 (即东亚倒 Ω 流型建立阶段) 也有类似情况, 净边界通量项起着很重要的抵消 $\Sigma R(n)$ 负值的作用。如果再考虑到 $\Sigma R(n)$ 在三个阶段都是同等大小的负值, 更显得净边界通量项在初始阶段的重要性。

(2) 在寒潮爆发阶段, $P(0)$ 大幅度下降, 主要是由于平均有效位能向涡动输送能量占优势。

(3) $-C(0)$ 和 $G(0)$ 两项, 始终都为正值, 而且以初始阶段为最大, 这表示在初始阶段的中纬度逆环流转换和非绝热加热制造率对 $P(0)$ 的增长也有一定的贡献。

3. 边界通量对中纬度平均有效位能的贡献

上一小节是用综合平均的结果讨论 $P(0)$ 的增长, 并指出净边界通量项起着重要的作用。这一小节应用个例研究的结论, 进一步阐述这个问题。

按涡动感热输送所引起的净边界通量项的表达式为

$$\Sigma BFP(n) = -\frac{C_p \gamma}{ba} \left\{ (\bar{T}'' \bar{T}' v' \cos \varphi)_{n,N} - (\bar{T}'' \bar{T}' v' \cos \varphi)_{n,S} \right\}$$

在中纬度的北边界, 一般情况 $\bar{T}'' < 0$, 南边界一般 $\bar{T}'' > 0$, 但绝对值大小相当。所以南北边界通量的贡献大小, 主要决定于感热输送。

根据选例研究, 表明北边界向北感热输送起着重要作用。现以 1969 年 1 月倒 Ω 型例子来说明^[32]。这例初始阶段定在 14—19 日, 酝酿阶段定在 20—26 日。这两个阶段 500 百帕上 $P(0)$