

谢义炳对大气环流系统研究的贡献^{* 1}

陈受钧 陶祖钰

(北京大学物理学院 大气科学系, 北京, 100871)

摘 要

对谢义炳在大气环流系统方面所做出的科学贡献作了简要的全面回顾。其中包括:

- (1) 北美切断低压的生命史;
- (2) 东亚高空锋和急流的多层结构;
- (3) 中国降水系统的结构和演变规律(包括梅雨锋、西南低涡等), 热带和中纬度扰动相互作用在暴雨过程中的重要性;
- (4) 西北太平洋的台风形成在 ITCZ(赤道辐合带)/季风槽中; 印度西南季风的低频变化;
- (5) 降水系统的湿斜压动力学理论及其在天气预报中的应用;
- (6) 大气环流的中期变化理论。

谢义炳的这些贡献为我们更好地理解大气环流系统并改善了中国的暴雨预报。

关键词: 大气环流系统, 暴雨, 台风形成, 低频变化, 湿斜压动力学。

1 引 言

谢义炳院士的科学研究工作始于 20 世纪 40 年代, 二次大战后高空探测记录大量增加, 为研究大气环流系统提供了很好的条件。1945—1950 年, 谢义炳在美国芝加哥大学攻读博士学位, 当时芝加哥大学气象系集合了一批气象精英, 在 Rossby 和 Palmén 的领导下, 在大尺度环流系统方面取得很多重要成果, 称为“芝加哥学派”。谢义炳就是在这样的学术环境下从事他的北美冷涡与切变线研究工作的。1950 年, 谢义炳回国后, 在东亚上空急流与多层锋区、热带环流与台风、中国降水系统、暴雨与湿斜压大气动力学、大气环流基本理论等方面作了很多开创性工作。本文简要地叙述了他在大气环流系统研究的主要成果, 以纪念谢义炳先生 90 寿辰。

2 高空冷涡, 切变线研究

20 世纪 40 年代, 对流层上层高空急流和锋区上的扰动——大尺度冷和暖的涡的形成和发展是一

个主要的研究领域。谢义炳的博士论文“高空冷涡的个例研究”^[1]是继 Palmén 的工作^[2]后的一个对高空冷涡的形成、结构、发展及其降水的一个较全面研究。高空冷涡的形成是由于在高空冷槽的北部, 冷空气因下沉而绝热增温; 在南部, 冷空气因上升而绝热降温, 从而形成一个孤立冷涡。图 1 为高空冷涡的形成过程的示意图。谢义炳注意到在高空槽西侧的脊区, 建立起一个水平的力管场, 这个力管场将引导出一个正环流, 使槽中北部的冷空气下沉, 而与冷空气相联系的低涡加强导致的辐散, 产生上升运动, 使冷空气堆加强, 从而形成一个孤立的冷涡, 给出了冷涡形成的一个动力学上的解释。

切断低压冷气堆在地面表现为一个弱高压, 这个高压逐渐演变为低压, 最终形成一个有锋面的气旋。这个过程与在锋面上发展的气旋完全不同, 它是由地面上浅薄的冷高压转变成低压的。谢义炳应用倾向方程和涡度方程分析, 指出地面低压的形成是由于大气内部摩擦曳力导致的正涡度下传形成的, 并给出了冷涡内的垂直环流与降水分布。随着

* 初稿时间: 2007 年 6 月 26 日; 修改稿时间: 2007 年 8 月 12 日。

资助课题: 国家重点基础研究专项经费(2004CB418300)资助。

作者简介: 陈受钧, 主要从事数值预报和数值模拟及中尺度气象研究。E-mail: chensj@pku.edu.cn

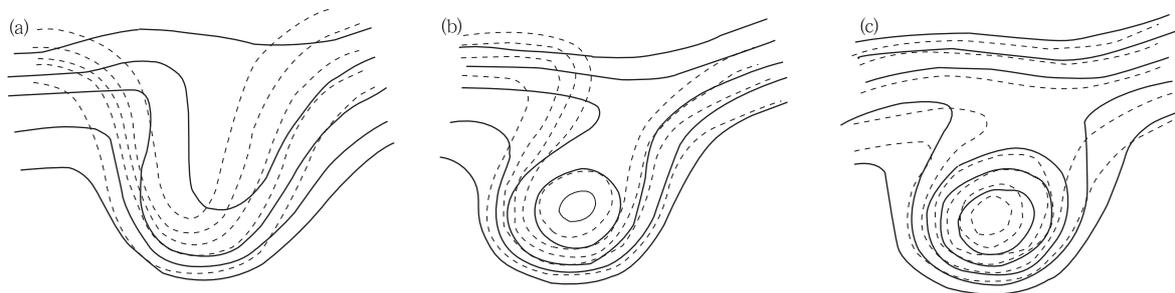


图1 对流层中部等压面上冷涡发展过程的示意图^[2]

(实线代表等压面上的等高线,虚线代表等温线)

Fig. 1 Schematic representation of the development of a cold vortex as shown by the height contours

(solid lines) and isotherms (dashed lines) on an isobaric surface in the middle troposphere^[2]

冷涡环流的加强,质量场将调整以适应风场,因此产生一个净辐散,这个辐散使地面冷高压减弱并转变成低压。图2给出了冷涡的垂直环流。显示冷空气堆中的低层辐合,高层辐散形成的上升运动和对流层顶附近的下沉运动。

高空大尺度扰动(冷槽)演变的另一种形式是冷槽的宽度逐渐变窄,最终形成一条切变线,图3是谢义炳提出的高空切变线形成的示意图^[3],高空切变线形成之初,力管场导致槽西部的脊发展,同时有暖空气的流入,伴随着下层冷空气的扩展,形成的正环流。最终高空冷槽演变成高空切变线。图4为通过高空切变线的垂直运动和垂直环流示意图。与高空冷涡形成过程的主要差别在于槽的南部。高空冷涡为准平衡运动(某些情况下甚至为“反环流”)而高空切变线过程为正环流(与图2比较)。

3 东亚上空急流与多层锋区

高空急流是二次世界大战后的重要发现之一。1948年Palmén和Newton^[2]应用北美高空记录,给出了在平直西风气流下平均风场与温度场。得到极锋激流风场与温度场的结构。他们发现在极锋上存在一个深厚的斜压带,但没有作进一步解释。谢义炳回国后的第一个研究成果(冬季西太平洋与东亚上空流场与温度场)发表于1951年^[4]。他分析了东亚上空3个个例。图5是其中的一个个例,对此他写道:

(a) 位于东亚高空槽前的中纬度西风急流比欧洲和北美都强,最大风速可达80 m/s到160 m/s……。

(b) 东亚高空急流有时可以在不同高度上存在2个甚至是3个急流中心,它们分别位于不同的力管场集中区的上方。在欧洲和北美也有双急流,但在所有的个例中,急流位于同一高度,而只有主要急流位于最大力管场区上空。……在本例中,有不同的急流与不同的力管场最大集中区相对应。各急流所在高度的气压相差100到150毫巴……。

(c) 急流与最大力管场集中区有明显的对应关系。……与欧洲和北美的湿度场比较,我们可以得到剖面图中第二个锋区是和极锋相对应,而主要锋区是与Palmén和牛顿(1948),谢义炳(1950)指出的欧洲和北美极锋上强的力管场相对应,……这个主要锋区在以后的讨论中可称为“热带锋”^①中间的为“极锋”而最低层的是“北极锋”。

东亚多层锋区与多个急流的发现;“极锋—极锋急流”,“副热带锋—副热带急流”,增加了我们对东亚大气环流的认识,并成为研究环流系统演变与天气的基础。

4 中国降水系统和降水过程的研究

1953年谢义炳受当时中央气象局局长涂长望委托,研究夏季中国降水系统(包括梅雨锋、西南涡等)^[5]。他应用同时考虑温度与水汽的假相当位温(θ_{sc})作为分析的一个手段,揭示了东亚降水系统的三维结构。谢义炳指出:“在夏季,水平温度场微弱而有强大的凝结降水过程情况下,由剖面图鉴别气团决定锋区时,如仅用等温线或等位温线,实在是很难的。应用等假相当位温线于剖面图上,不仅锋

① 现在称为“副热带锋”。

区清楚,并且当有降水现象发生时,锋区上界经常出现明显的极大值。湿空气上升的物理现象也被刻画出来了。”图 6 为谢义炳分析的一个夏季降水的个例,梅雨锋(切变线)呈现为等 θ_{se} 密集区。在锋的上

界有极大值,表明梅雨锋上界是潜势不稳定的,有利于强降水发生。剖面图上等 θ_{se} 线分析方法自谢义炳为始在国内广泛用于降水系统分析。

谢义炳、曾庆存研究了冷锋、阻塞高压和冷涡、

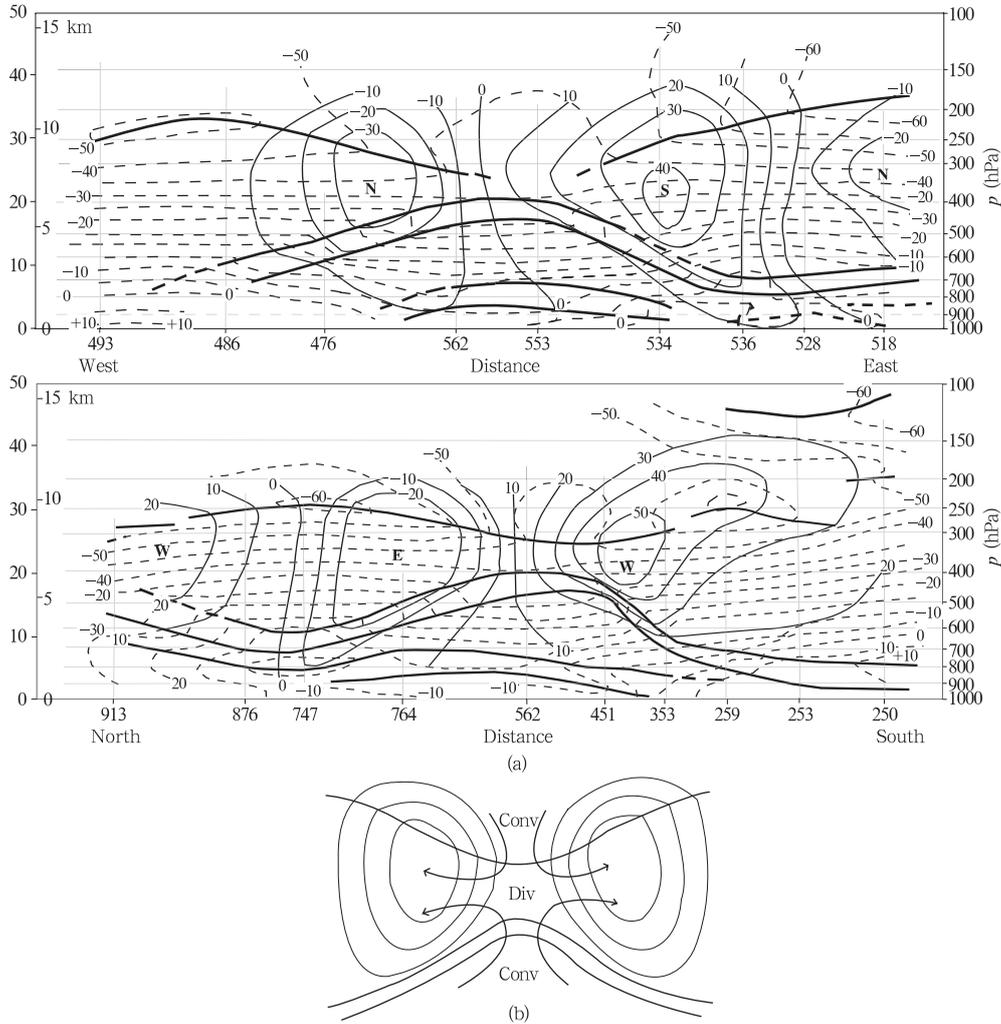


图 2 1948 年 3 月 7 日冷堆的东西方向和南北方向的垂直剖面(a)和一个上升冷堆运动场的垂直剖面示意图(b)^[2]

(图中粗实线是对流层顶和冷堆的边界;细实线为风向与剖面垂直的风的等风速线(单位:m/s);虚线是等温线(间隔 5℃);矢线表示由水平辐合、辐散导致的叠加在上的横向环流方向)

Fig. 2 Approximately west-east (above) and north-south cross section (a) through the center of the vortex at 03:00 GCT 7 March 1948, and schematic representation in vertical cross section of the field of motion above a rising cold dome (b)^[2]

(Heavy lines indicate the tropopause and the boundaries of the cold dome, the light lines are isolines of wind speed normal to the cross section, thin dashed lines are isotherms (°C) at 5 °C intervals and the arrows show the direction of the superimposed transverse circulation resulting in the indicated regions of horizontal convergence and divergence)

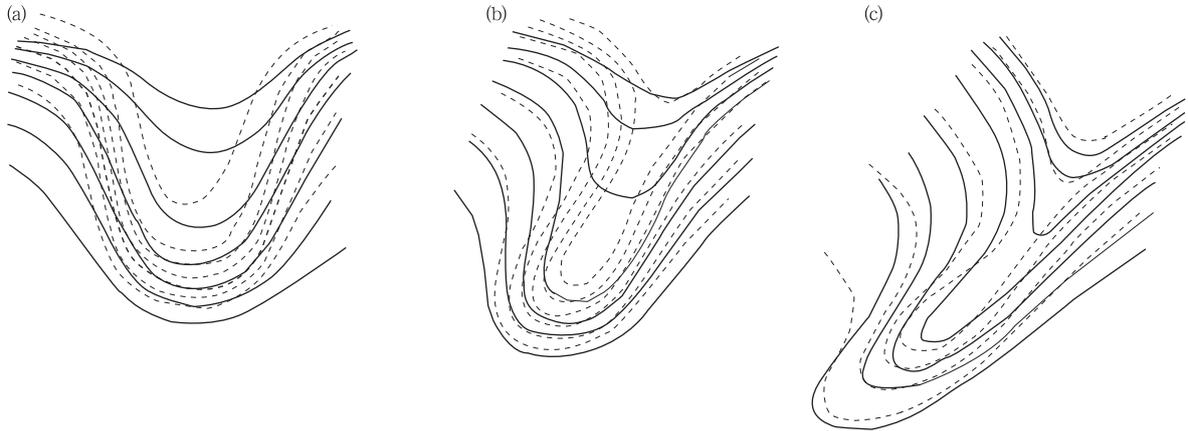


图 3 对流层中层等压面上高空切变线发展过程的示意图^[3]
(实线,等压面上的等高线,虚线:等温线)

Fig. 3 Schematic representation of development of an upper shear-line, as shown by contours (solid lines) and isotherms (dashed lines) on an isobaric surface in the middle troposphere^[3]

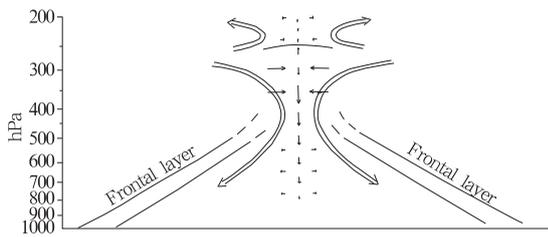


图 4 冷气堆下沉、扩散,形成高空切变线过程中垂直剖面图上的垂直运动和水平散度^[3]
(矢量长度正比于垂直和水平速度)

Fig. 4 Schematic representation in vertical cross section of vertical motion and horizontal divergence during processes of descent and spread of cold dome and formation of upper shear-line
(The vertical and horizontal velocities proportional to the lengths of vectors)^[3]

季风热低压、暖锋等各类降水过程及其天气模型,这些模型针对降水过程认识起着重要作用。在“亚洲及西太平洋大型天气与中国降水”的论文中^②,提出大型天气控制因素——斜交纬圈气候带的概念。应用这一概念对(1)副热带大陆热高压的建立和稳定过程,(2)东南沿海登陆台风,(3)副热带大陆热高压与西太平洋副热带高压,(4)季风低压等一系列大型环流系统与中国降水过程的分析大大增加了对中国降水系统发生、发展的认识。

以前,对降水过程研究着重在西风带扰动。根据实例分析,特别是卫星云图。70年代,谢义炳和张懋等^[6]提出降水过程中热带环流系统的重要性。

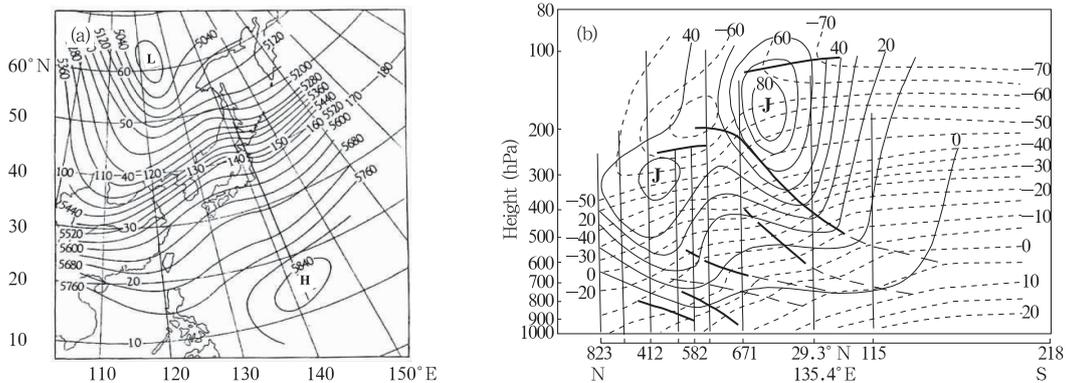


图 5 位于不同高度的双急流实例^[4]

(a. 1950年12月15日15:00 GMT 500 hPa等压面等高线(m), b. 直线为锋区的边界或对流层顶,虚线是等温线,细实线是垂直于剖面的地转风风速的等风速线(m/s))

Fig. 5 Example of a double jet stream located at different levels^[4]

(a. Height contour (m) of the 500 hPa surface, 15:00 GMT, 15 Dec 1950; b. Heavy lines indicate the boundaries of front zones as well as the tropopause. Thin dashed lines are isotherms (°C). Thin solid lines are isotaches of geostrophic wind (m/s))

② 谢义炳,曾庆存. 盛夏亚洲及西太平洋大型天气与中国降水. 中央气象局中央气象科学研究所气象论文集. 1957,3:1-18

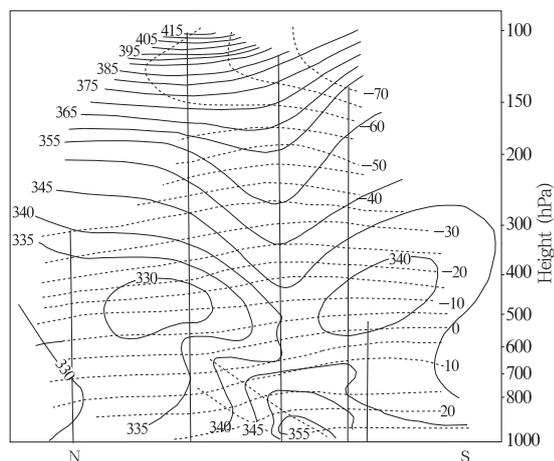


图 6 中国冷涡梅雨天气剖面图^[6]
(虚线:等温线,间隔 5 °C;实线:等假相当位温线,间隔 5 K;
粗线:锋区的上、下边界后对流层顶;细垂直线:探空)

Fig. 6 The cross section of a meiuyu case under the cold vortex situation of China^[6]

(Dashed lines are isotherms in 5 °C interval. Solid lines are the contours of pseudo-equivalent potential temperature in 5 K interval. Heavy lines indicate the boundaries of front as well as tropopause. Thin straight lines indicate the locations of sounding)

他们指出大部分强降水是由于西风带和热带辐合带环流的相互作用产生的。图 7 和 8 是总的环流模型图。西风带云系和热带辐合带云系这两条云系经常连成一长条,西风带云系向东移动,偏转,且与纬圈斜交,其最南端可缓慢的向西伸展并入到热带辐合带云系中去。谢义炳总结出 6 种中—低纬环流系统相互作用产生强降水的类型,对于北方暴雨预报有重要的参考价值。

5 西太平洋台风与热带环流

20 世纪 50 年代,谢义炳和陈秋士等^[7]得到了表征大气涡旋运动的普遍方程组,对台风的引导气流给出了理论解释。60 年代,他发现在西太平洋绝大多数台风发生在赤道西风(现称为西南季风)和西太平洋东北信风之间的赤道辐合带(现通称为“季风槽”)^[8]。这一工作为以后国内外工作所证实,并有很大的发展^[9]。值得指出的是他发现赤道西风(西南季风强度)呈现出 1—1.5 月的振荡,当赤道西风增强,季风槽东移时,有较多的西太平洋台风发生。

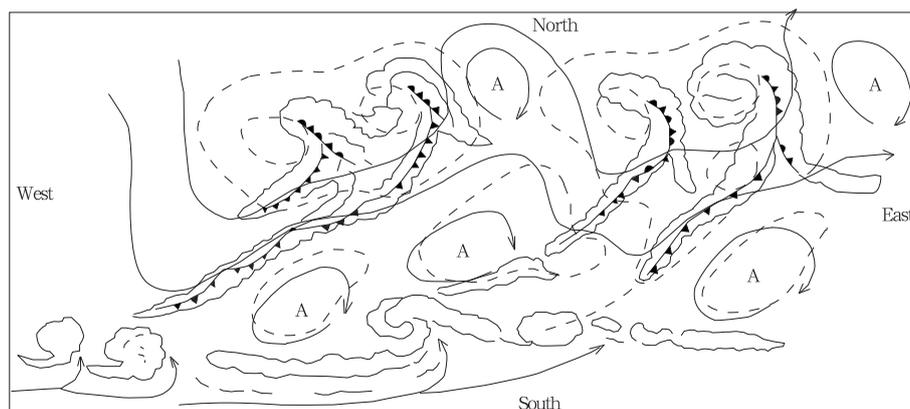


图 7 总环流模型图 西风带(云系)和热带辐合带(云系)的配置^[6]

(实线:高空流场,虚线:地面气压场)

Fig. 7 Schematic representation of general circulation for the association of the cloud systems related to the westerly circulations and tropical circulation^[6]

(Solid lines represent the flow pattern of upper level. Dashed lines represent the pressure pattern of sea level)

图 8 是 1958 年 6—9 月由印度到中太平洋赤道附近 700 hPa 上的实测风时间剖面图。绝大多数台风(14 次中的 10 次)发生在季风槽中,同时可以看到赤道西风与赤道辐合带(季风槽)的 1—1.5 个月的振动。西南季风强度的 1—1.5 月振荡与印度季风的爆发与减弱有关。这是最早发现的低纬环流的低

频振荡。

赤道辐合带(季风槽)中台风的发生可能和切变线不稳定有关,谢义炳和黄寅亮^[10]对 3 种模式(正压扰动层、相当正压层、三维扰动)的情况下,对赤道辐合带上的扰动切变不稳定进行了理论分析,分别给出了他们的分析解和数值解的方法,得到最不穩

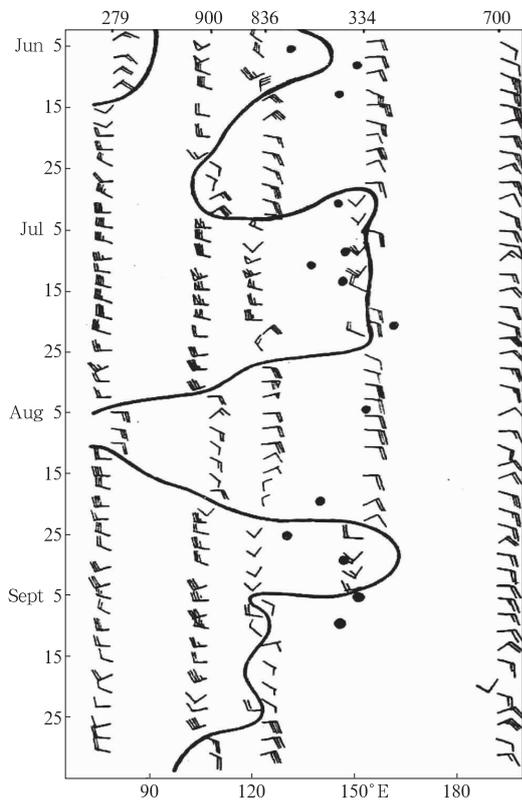


图 8 1958 年 6—9 月印度南端到太平洋赤道附近 700 hPa 东西风分界线与台风发生的关系^[8]

Fig. 8 Relation between the occurrences of typhoon and the boundaries of the Easterly and Westerly of 700 hPa level from southern end of India to the equatorial Pacific Ocean, June—Sept 1958^[8]

定波长与纬度和水平风速切变的关系,对辐合带上的台风发生因子提出一个可能的解释。

6 北方暴雨与湿斜压天气动力学研究

1975 年 8 月,3 号台风登陆后在河南驻马店地区带来了历史上罕见的特大暴雨造成罕见的灾难,但它也引起了一波北方暴雨研究的热潮^[11-12]。谢义炳先生是这波暴雨研究的推动者和学术指导人。在此过程中谢义炳深感现有的斜压天气动力学水汽对大气运动和天气系统发展的作用没有得到应有的注意,阻碍了暴雨分析及预报实践的进步。为了使北方暴雨研究上升到一个更高的理论水平,于 1978 年提出了“湿斜压天气的天气动力学问题”^[13-14]。此文讨论了当考虑了大气中水汽天气动力学各个基本方面的新特点,如湿空气的能量守恒问题、湿力管和湿有效位能问题、湿斜压不稳定问题、湿位涡和湿倾向方程等问题。“湿急流”是其中关于暴雨过程中低空水汽输送的一个大胆的科学设想,“即湿空气在湿不稳定大气中按湿绝热过程上升,将得到加速”而形成的,并认为“在我国探空网密集的地区,也许可能用事实揭示湿空气上升、转向和加速的过程,即湿急流的形成过程”。图 9 为两年后根据发生在河北、北京和辽宁的一次大暴雨过程的探空和高空风观测资料的分析所发现的湿急流^[15]。它是一条在三度空间中的大风速轴线,并将低层的偏南风急流和高空的偏西风急流连接起来。

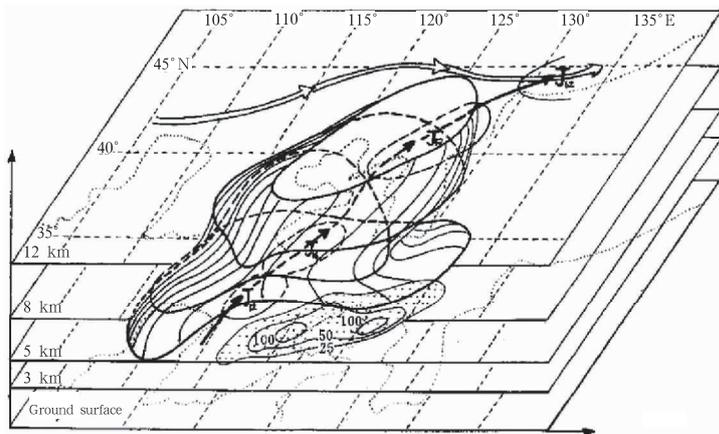


图 9 根据 1977 年 8 月 3 日 08 时实测资料绘制的一个暴雨个例的三度空间中的湿急流^[15]

(双实线、粗实矢线和粗虚矢线分别为高空急流、低空急流和湿急流的轴线;阴影区为日雨量大于 25 mm 以上的区域;由许多曲线网络构成的空间体为饱和凝结区)

Fig. 9 3-dimensional graph of moist jet stream of a heavy rainfall case based on sounding data of 08:00 BST 3 Aug 1977^[15]

(Double arrow line; axis of upper level jet stream; heavy arrow line; axis of lower level jet stream; dashed heavy arrow line; axis of moist jet stream, shaded area: daily precipitation > 25 mm; 3-dimensional volume: saturation and condensation region)

但某一瞬时的三维风场不能揭示湿空气的上升、加速和转向过程。近年来中尺度数值模式的发展使得借助可视化软件来观察模式大气(也可称为虚拟大气)中的这一过程成为可能。图 10 为 1996 年台风贺伯登陆后在 8 月 5 日给河北带来特大暴雨的实况和数值模拟结果。利用 PC-Vis5D 可视化软件^[16],可以清楚地展示出中尺度数值模式 MM5 的模拟大气中与暴雨相联系的湿急流^[17]。在瞬时的三维风场中,位于低层的大风速区和高空的大风速区在暴雨云团中是上下贯通的,和图 9 非常类似。利用模式输出计算出的湿空气块轨迹(图 10 中的彩色飘带)展示出,来自河南的低层湿空气自南向北进入暴雨云团(图中黄色的空间区域),在云团中迅速上升到云团上部(图中红色和绿色的空间区域),然后向东流出。从轨迹飘带在暴雨云团中接近垂直和在高空水平伸展很远,显示出与暴雨相关联的湿空气块的运动速度很快。图中模式大气中与暴雨相关联的湿空气块的轨迹展示出与湿急流猜想中描述的“湿空气上升、转向和加速”有令人惊讶的相似性。

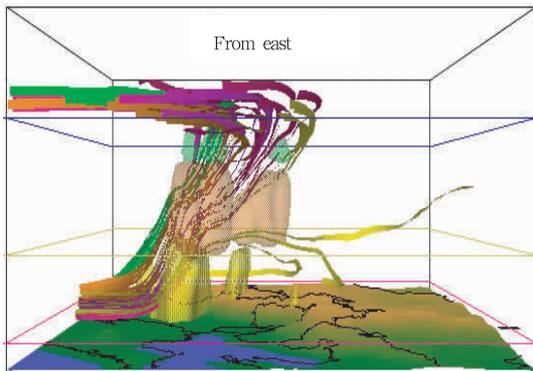


图 10 在中尺度数值模式模拟的 1996 年 8 月 4 日河北特大暴雨过程中观测到的湿急流分别为从南和从东观测的湿空气块轨迹^[17](用飘带表示)

Fig. 10 Trajectories of moist air parcel (represented by flying belts, east-to west view) associated with the moist jet stream of a torrential rainfall case of Heibei Province of 4 Aug 1996 based on the meso-scale modeling^[17]

7 大尺度环流系统的基础理论研究

20 世纪 60 年代,谢义炳从 Rossby“水平湍流”概念出发,应用两层模式在给定热源的情况下,得到

了平均纬向风速分布和三圈环流^[18],80 年代,他从不作平直西风气流的假定出发而从实际环流场出发,引进空间不稳定概念,探索行星波的时间稳定性^[19-20],从而修改和发展了传统的斜压不稳定理论。他从大气是准涡旋运动的观点发展出环流指数的中期变化理论^[21-22],对中高纬大气环流中期变化作出重要贡献。

8 结 语

谢义炳院士的科学研究有下列几个特点:

(1) 从资料分析出发,发现大气环流系统发生发展的事实及其可能的机理。谢义炳十分重视天气学分析,他的天气分析,得自 Palmen 所创立的传统,严格考虑每一个观测资料,充分利用每一个资料,在当时中国探测记录不多的情况下,分析出有意义的结果。

(2) 科学研究工作与社会需要紧密结合,科研成果为国民经济建设服务。谢义炳从 20 世纪 50 年代开始就把自己的科学研究主要集中在我国降水问题研究,包括梅雨、台风、暴雨等,它们都是影响中国的重大灾害性天气。

(3) 研究成果提升到理论高度。70 年代后他在暴雨的研究中开创了“湿斜压天气动力学”为暴雨预报提供理论基础。

谢义炳严谨的科学作风,“实际—理论—实际”的研究方法,永远值得我们学习。

参考文献

- [1] Hsieh Y-P (谢义炳). An investigation of a selected cold vortex over North America. *J Meteor*, 1949, 6:401-410
- [2] Palmén E, Newton D W. A study of the mean wind and temperature distribution in the vicinity of the polar front in winter. *J Meteor*, 1948, 5: 220-226
- [3] Hsieh Y-P (谢义炳). On the formation of shear lines in the upper atmosphere. *J Meteor*, 1950, 382-387
- [4] Hsieh Y-P (谢义炳), Chen Y-J (陈玉樵). On the wind and temperature fields over Eastern Asia in winter. *J Chinese Geophy Soc*, 1951, 2:279-297
- [5] 谢义炳. 中国夏半年几种降水天气系统的分析研究. *气象学报*, 1956, 27(1):1-23
- [6] 谢义炳,张镔. 初论西风带和热带辐合带环流系统的相互作用. *大气科学*, 1977, 1:132-137
- [7] 谢义炳,陈秋士. 斜压大气中涡旋运动方程及其在天气预报中

- 的应用. 气象学报, 1956, 27: 283-305
- [8] 谢义炳, 陈受钧, 张一良等. 东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计与分析. 气象学报, 1963, 33(2): 206-217
- [9] Lander M A. Description of a monsoon gyre audits effects on the tnoptcod cydones in Western North Pacific during August 1991. Wea Forecasting, 1994, 9: 640-653
- [10] 谢义炳, 黄寅亮. 赤道辐合带上扰动不稳定性的简单理论分析. 气象学报, 1964, 34: 198-210
- [11] 谢义炳, 谢安. 动力分析及其在天气预报中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 1978, 3: 1-9
- [12] 谢义炳, 谢安, 张镗. “75.8”河南特大暴雨的动力学分析. 气象学报, 1979, 37: 45-55
- [13] 谢义炳. 湿斜压大气的动力学问题//暴雨文集编委会. 暴雨文集. 长春: 吉林人民出版社, 1980: 1-15
- [14] Xie Y-P (谢义炳). Observational and theoretical studies of the moist bar clinic atmosphere. Adv Atmos Sci, 1984, 2: 141-149
- [15] 陶祖钰. 湿急流的结构和形成过程. 气象学报, 1980, 38(4): 331-340
- [16] 王洪庆, 张炎, 郑永光. 气象信息科学视算环境及其若干问题. 气象学报, 2004, 62(5): 708-713
- [17] 刘伟, 张庆红. 登陆台风中的中尺度对流系统的数值研究. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(1): 73-79
- [18] 谢义炳, 陈受钧. 在给定热源与大型水平湍流影响下自由大气中的平均纬向风速与经圈环流. 气象学报, 1964, 34(4): 424-432
- [19] 谢义炳. 纬圈平均大气运动特征的振动. 气象学报, 1980, 38(2): 111-121
- [20] 谢义炳. 稳定的和不稳定的斜压行星波. 气象学报, 1981, 39(1): 44-58
- [21] 谢义炳. 地球斜压大气纬圈平均运动特征的振动(一). 气象学报, 1986, 44(2): 149-157
- [22] 谢义炳. 地球斜压大气纬圈平均运动特征的振动(二). 气象学报, 1987, 45(4): 408-415

ACADEMICAN XIE YIBING'S CONTRIBUTION OF THE ATMOSPHERIC CIRCULATION SYSTEMS——A REVIEW

Chen Shoujun Tao Zuyu

Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract

Academican Xie Yibing's main contribution of the atmospheric circulation systems is reviewed briefly. Which include:

- (1) The life cycle of the upper cut-off low over North America.
- (2) The multi-layer structure of the upper front and jet stream over East Asia.
- (3) The structure and evolution of rain-bearing systems (Meiyu front, South-west vortex, etc) over China. The importance of the interaction between tropical and middle latitude disturbances in the heavy rain fall.
- (4) Formation of typhoon over Northwestern Pacific along the ITCZ/monsoon trough, and the low-frequency variation of the southwest Indian monsoon.
- (5) Theory of moist-baroclinic dynamics of the rain fall system and apply to weather forecasts.
- (6) The theory of medium-rang variation of the general circulation.

Xie Yibing's contribution gave us a better understanding of the atmospheric circulation systems and improve the heavy rainfall forecasting over China.

Key words: Atmospheric general circulation system, Heavy rainfall, Typhoon formation, Low-frequency variation, Moist-baroclinic dynamics.