

# 郭晓岚教授对大气科学的杰出贡献 ——悼念郭晓岚先生逝世\*

钱永甫<sup>1</sup> 陈月娟<sup>2</sup> 王谦谦<sup>3</sup> 巢纪平<sup>4</sup>

1 南京大学大气科学系,南京大学灾害性天气气候研究所,南京,210093

2 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥,230026

3 南京信息工程大学大气科学系,南京,210044

4 国家海洋局海洋环境预报中心,北京,100081

## 摘 要

2006 年 5 月 6 日我国旅游著名学者郭晓岚因病在芝加哥逝世,享年 91 岁。文中简要介绍郭晓岚的生平,并根据收集到的郭先生 70 多篇重要论文,总结了他数十年来在大气科学领域辛勤耕耘的成果。介绍了他对大气动力学中的不稳定理论、大气环流形成和大尺度热力环流理论、中尺度对流动力学和涡旋动力学理论以及低纬和热带动力学理论等方面的引导性和创新性贡献,还介绍了他的模式物理过程参数化方案以及青藏高原等大地形动力和热力作用对天气气候影响的数值模拟结果。从该文可以看出郭先生对大气科学研究和教育所作出的杰出贡献。他是我们后辈学习的楷模。

关键词: 郭晓岚,大气动力学,模式物理过程,参数化,青藏高原,数值模拟。

## 1 郭晓岚简要生平和事迹

郭晓岚,1915 年 2 月 7 日生于保定市满城县张辛庄村,幼时家境贫寒,高小毕业后就辍学回家参加农业劳动。1929 年,考入保定第二师范。1937 年清华大学毕业后,入浙江大学攻读硕士学位,师从涂长望教授。其后,在南京中央研究院气象研究所(北极阁)工作。1945 年作为公费留美生到美国芝加哥大学学习,师从著名气象学家 Rossby 教授。1948 年获芝加哥大学博士学位。1949 年—1961 年,在麻省理工学院(MIT)研究飓风,任职从助理研究员、高级科学家到研究项目主任。1962 年,郭先生回到芝加哥大学,成为新成立的地球物理科学系的教授。为表彰他对大气科学的突出贡献,在 1970 年被授予美国气象界最高荣誉奖——罗斯贝(Carl-Gustaf Rossby)研究奖章,并获选为美国气象协会(American Meteorological Society)院士。郭先生热爱祖国,关心中国气象事业的发展和人才的培养。在临退休前的 5—

6 年中,培养了朱伯承博士,指导了作者中的前三位访问学者。郭先生曾 4 次(1973,1979,1986 和 1992 年)应中国科学院邀请回国讲学或参加国际学术会议。在 1979 年北京讲学期间,他为研究生讲课,其讲稿后由朱伯承整理并经他本人校订,由江苏科学技术出版社以《大气动力学》为书名出版。该书简洁明了和严格地阐明了大气动力学中的许多基本理论问题,其中在涡动理论中提出的广义郭晓岚位涡方程及其简化形式的应用,在众多的位涡方程形式中很具特色。1985 年退休后,郭先生仍从事气象科学的研究工作不辍。

郭晓岚逝世后,美国芝加哥大学新闻办公室发布长篇文告,给予极高评价。文告指出,郭先生从二战时期的中国,飘洋过海来到美国,以很少的奖学金在芝加哥大学攻读学位。但是,仅仅几年的时间,他就在学术界崭露头角,且一直保持重要影响。他的研究成果是动力气象学许多分支中的重要理论基础之一。他推广了瑞利(Rayleigh)爵士的工作,在数

\* 初稿时间:2006 年 8 月 15 日;修改稿时间:2006 年 8 月 19 日。

作者简介:钱永甫,1938 年生,浙江省诸暨市人,教授,主要从事大气环流和气候数值模拟的教学和研究。

学上导出了大气和海洋中平滑基流转变为不稳定扰动的必要条件,被称为瑞利—郭晓岚原理(Rayleigh-Kuo Theorem),在气象界久负盛名。

郭先生的历史和文学知识也十分渊博,在1979年夏季他和夫人等访问敦煌时,作者之一有幸一路陪同,曾被其丰富的历史和宗教知识折服。

## 2 郭晓岚杰出的学术成就

### 2.1 大气动力学

郭晓岚对大气动力学方面的贡献,包括大气不稳定理论、大气环流形成和大尺度热力环流理论、中尺度对流动力学和涡旋动力学理论、低纬和热带动力学理论以及地气相互作用动力学理论等。

#### 2.1.1 大气不稳定理论

郭晓岚有关大气不稳定理论的论文有很多<sup>[1-6]</sup>。他研究了“正压大气中二维无辐散流的动力不稳定”,指出当强西风气流随纬度变化时,沿强西风运动且相速度在西风最大和最小速度之间的普通波长的波动和气旋波可能会发生不稳定。当波动为不稳定时,在最小绝对涡度点以南的槽线由东南向西北倾斜,在最大涡度点以北的槽线由西南向东北倾斜。在“热带大尺度扰动的不稳定理论”研究中,郭晓岚解释了热带对流层和低层平流层中探测到的几种大尺度波动的存在原因。即波状扰动处于热带大气中条件性不稳定的辐合场中,并有源源不断的地面蒸发提供水汽,从而变得不稳定之故。郭晓岚还研究了热带地区既有水平切变又有垂直切变的切变带和急流型平均流的不稳定。结果表明,不稳定的主要来源是水平切变,平均垂直切变和稳定的层结无论在高层还是低层都限制扰动的发展。在距离赤道 $6^{\circ}$ — $10^{\circ}$ 的地带,急流型廓线最不稳定,扰动的最大强度发生在平均流绝对涡度较小的急流一侧,从而决定了ITCZ的平均位置。在“大气中线性切变和急流型廓线的斜压不稳定”一文中,研究了冬季 $45^{\circ}\text{N}$ 和 $60^{\circ}\text{N}$ 间盛行的双急流和单急流廓线的斜压不稳定。发现这些廓线对所有对流层波动都不稳定。双急流廓线的不稳定特征几乎完全取决于对流层高层的切变。至于在 $60^{\circ}\text{N}$ 平流层的单急流廓线,只有在急流最大速度超过 $40\text{ m/s}$ 时才是充分不稳定的。这种高层的不稳定超长扰动会使温度发生大的变化,因此,很可能是平流层晚冬突发性增暖的原因。郭晓岚对 $U$ 分量随高度线性变化或有不同

切变、低层 $V$ 分量有急流形式的大气中的不稳定现象进行研究后指出, $U$ 分量不稳定时激发出的中尺度扰动在 $x$ 方向的波长很大,有对称性,在 $y$ 方向波长很小。低层 $V$ 分量不稳定性激发的波动有两个分隔的最不稳定扰动。

除了大气不稳定,郭晓岚还讨论了赤道地区海气耦合系统中缓慢波动的不稳定性质。结果表明,在海洋和大气中快速运动的重力波和混合Rossby重力波都几乎不受海气耦合作用的影响,只有慢速运动的Rossby波受影响很大,东西向的SST平流使所有海洋Rossby波不稳定,而南北向的平流使大气和海洋中的Rossby波均不稳定。指出,在海气相互作用中,涌升流和平流是十分重要的。

#### 2.1.2 大气环流形成和大尺度热力环流

凭借深厚的数学功底,郭晓岚先生在此领域的理论研究中作出了杰出的贡献,接连发表了多篇高水平论文<sup>[7-16]</sup>,深入研究了东西风带、大尺度槽脊系统和平均经圈环流等的形成原因及其与涡度和动量的涡动输送、摩擦耗散、垂直风切变和温度层结等影响因子的关系。他在研究大气中的涡旋运动时发现,在北半球,涡旋周围流体中的涡度分布会产生一个水平的力施加于涡旋,使气旋性涡旋向绝对涡度较高的地区运动,反气旋向绝对涡度较低的地区运动。因此,气旋向北移动,反气旋向南移动。但是,水平力在某些地区会在相反方向上起作用,在对流层高层形成切断的低压和高压。他还发现辐散的影响比起上述提到的涡度分布作用力的效应要小。这些效应与总角动量守恒原理,解释了为何大气中存在西风带和东风带。他还从大气扰动对涡度输送的观点,讨论了大气带状流发展和维持的机制。由于扰动本身有涡度集中区,不能在一个不均匀的绝对涡度场中处于平衡态,它们会被其它纬度来的气团所挤走。造成反绝对涡度梯度的涡度输送,在扰动活跃的地区内涡度的经向梯度增加,其外减小,使相应地区分别产生西风气流和东风气流。并估算出强带状流建立所需的时间约需3周,与观测结果相符。通过对斜压纬向流中扰动的振幅和位相角的稳定性特征和垂直变化的研究,他发现,忽略摩擦作用时,大气中扰动的波长有一个临界值,比其短的波动都不稳定,并且存在最不稳定波长,两者都取决于垂直风切变和静力稳定度因子。因此,很长的波动主要存在于高层,很短的波动仅限于大气低层,且振幅随

高度很快衰减。

为了解释大气中平均经圈环流的产生原因,郭晓岚研究了总非绝热加热和热量涡动输送的经向变化和总摩擦耗散和动量涡动输送的垂直变化。发现当平均温度的经向对比大于某个临界值时,强迫运动转变为更加剧烈的自由对流。在相对静止的大气中,平均非绝热加热只能产生很弱的单圈直接环流,最大经向速度只有每秒几个厘米。相反,纬向动量的涡动输送和摩擦耗散能在对流层中产生三圈环流。从理论上提出了 Hadley 环流形成的一种机制。

在大尺度热对流的研究方面,他用简单方法找到了用 Richardson 数表示的热对流判据,其中包括了旋转、静力稳定性、粘性、导热率、径向温度对比以及平均纬向流的相对涡度等的联合作用。检验了各种物理因子对旋转流体中加热不均匀造成的运动的影响。发现,旋转和静力稳定性增加了阻力,会抑止对流运动。加热不均匀产生的有效位能通过经向和纬向的垂直运动转换成动能。指出,在研究大尺度运动时,应当包含较不稳定的快速发展的小尺度运动,即包含非线性扩散的作用。

### 2.1.3 中尺度对流动力学和涡旋动力学

郭晓岚研究了大气对流和龙卷形成的机制<sup>[17]</sup>,他从简化的但足够精确的方程组,解出两个相似解,分别为双泡和单泡。当给定合适的物理参数值时,得到了与龙卷中观测到的气流分布有很好相似性的双泡型解。在研究有摩擦的切变流中涡旋和旋转圆柱的运动时发现<sup>[18]</sup>,摩擦和由施加在圆柱或涡旋上的压力造成的旋转力的联合作用,可使圆柱或涡旋在与平均流呈一定角度的平均方向上移动。他利用一个边界层模式,研究了边界层中的非对称流<sup>[19]</sup>,为积云对流参数化的合理性提供了依据。

为了研究地面日变化加热作用造成的低层大气中对流的发展过程,郭晓岚提出了一个非线性数值模式<sup>[20]</sup>。结果表明,在通常存在的高层稳定层结和相对强的对流活动作用下,总会形成三个相互隔离的垂直层次,即超绝热地面薄层、混合层和薄逆温层。与观测资料比较后发现,模拟结果与实测资料相符很好。

### 2.1.4 低纬和热带动力学

郭晓岚提出了热带 ITCZ 形成的非线性理论<sup>[21]</sup>。他指出,热带大气中条件性不稳定和对流性活跃的大尺度纬向对称扰动的自激发行为是热带

ITCZ 形成的原因,这些扰动的本质可用非线性的准地转模式来描述。由此理论给出的风系的垂直和水平廓线与现有的观测廓线相象。论文还给出了产生这种廓线所要求的垂直扩散系数和辐射冷却率。在赤道行星边界层和球面稳定大气中的行星边界层流的研究中<sup>[22-23]</sup>。郭晓岚指出,当边界层方程中包括了温度和气压的扰动,并且总体 Richardson 数为 1 或更大时,稳定的大气层结会抑止稳定的 Ekman 流型。但若气流是振荡的,即使是低频的振荡,则在中高纬度,稳定层结对气流的抑止作用也会被大大减弱。而在低纬度,边界层流衰退。在地面存在温度异常时,温度层结也可激发出热力驱动的边界层流。边界层流的最大垂直速度刚好位于地面边界层以上,在 10° 附近具有最大值,在赤道具有最小值。可以解释为何 ITCZ 常常发生在 10° 附近,而赤道上对流活动很少。

### 2.1.5 地气相互作用和陆面过程动力学

郭晓岚很早就注意到地表面附近显著的气象场日变化现象。他利用一个修正的热传导模式,通过方程求解,研究了以日变化热量波动形式表现出来的大气和下垫面之间的热力相互作用<sup>[24]</sup>。结果表明,即使平均的垂直温度递减率是稳定的,向上的平均热量输送也可由输送过程的日变化维持。他的研究不但解决了一个长期困扰学术界的问题,即在平均位温分布下,为何仍有湍流热量的垂直输送,并且为日变化在地表面向大气的通量输送中的作用提供了理论根据,成为数值模式中必须考虑日变化的理由。同时指出,当热扩散率  $K$  的垂直梯度很大时,在地气边界上可维持很陡的温度梯度。地面长波辐射的效应有助于温度极值的前移。大气最低的几百米内的温度波受到太阳辐射吸收和热扩散率  $K$  与其相互作用的影响。将模式结果与 O'Neill 夏季和冬季进行的观测试验做了比较,相符甚好。

## 2.2 模式物理过程

### 2.2.1 积云对流参数化

郭晓岚对数值模式中物理过程参数化的最大贡献,莫过于积云对流的参数化。他的积云对流参数化方案曾被广泛地用于各种尺度的大气数值模式,尤其是在中期天气预报和大气环流模式中,被称为 Kuo 方案。有不少学者,根据 Kuo 方案的原理设计出不少修正的 Kuo 方案。至今, Kuo 方案仍在一些数值模式中使用。

郭晓岚最初提出积云对流参数化方案是在1962年美国气象学会的年会上,1965年,他以“积云对流潜热释放造成的热带气旋的形成和加强”为题,正式发表了有关积云对流参数化方案的论文<sup>[25]</sup>。这篇论文研究了条件性不稳定大气中深对流潜热释放对大尺度运动的影响。在此方案中,积云的存在要求有3个条件,即地面有摩擦引起的辐合上升运动、整个气柱有净水汽辐合和对流性层结不稳定。积云内部的温度和水汽的垂直分布根据云底的温度和比湿,用相当位温守恒原理求得。积云面积根据气柱净辐合的水汽量和云生成所需的总水汽量之比求得,积云的凝结降水量根据积云面积和云内外温度差确定。气柱的各层温度和湿度的变化,由云内值和环境值加权平均得到。此参数化方法由他本人首先成功地用于飓风形成问题的研究。

进而,郭晓岚于1974年发表了“积云对流对大尺度气流影响的进一步研究”<sup>[26]</sup>。该文是对他1965年积云对流参数化方案的补充和发展。新方案中给出了更为严格的数学推导。将气柱的净水汽辐合量分为两部分,一部分用于湿润环境大气,使其达到积云内的湿度而成云,另一部分用于产生积云降水,使云体内的原环境温度升至云温。潜热释放量及其垂直分配以及积云输送的感热,均惟一地由云内和环境大气的温差以及大尺度气流的水汽辐合所确定。下沉气流中的压缩增热自动地包含在公式中。计算结果与实况相符甚好。这篇论文认为,环境大气的增热是由积云外的环境下沉气流自动完成的。从此,该方案被称为1974年的Kuo方案。

1980年,他利用一个准一维、非对称、准拉格朗日和准稳态的模式,研究了积云对流特性<sup>[27]</sup>。结果发现,对半径大于1000m的云,云外下沉干空气的压缩加热使云内空气变暖并稍稍减小了上升气流的速率,下沉湿空气冷却云内空气并且也减小上升运动。最有意义的是,在较小不稳定的中纬度环境下,模拟的降水率从半径<1000m云的<0.7cm/h到半径>2000m云的5.4cm/h,反映了对流层中部稳定层结对较小积云穿透能力的抑止作用。当云的半径达到8km时,上升速度达到最大。同时发现,积云对流的主要加热是在潜热释放区,但环境空气的压缩加热也重要,尤其是在云顶附近。可见,这篇论文是用“有云”模式的模拟结果来证明1965年“瞬时积云模型”参数化方案的合理性,强调了积云体大小

和垂直伸展范围对积云降水影响的重要性。

### 2.2.2 大气中太阳短波辐射和长波辐射的计算方法

在太阳短波辐射的计算中,郭晓岚提出了将经验公式和分谱段计算相结合的方法<sup>[28-30]</sup>。首先将太阳光谱分为三部分,即波长<0.3 $\mu$ 的紫外波段、波长在0.3 $\mu$ —0.7 $\mu$ 之间的可见光波段和0.7 $\mu$ 的红外波段。紫外波段的吸收物质主要是臭氧和氧气分子,在高层大气中几乎被完全吸收。可见光波段只受大气散射,基本没有吸收。红外波段主要受大气中水汽和二氧化碳的吸收影响,散射可以不计。因此在3个波段中可以找到它们各自的辐射计算公式,并被证明有较高精度和计算省时。

同样的分波段计算辐射通量的思想,也用来计算长波辐射。根据辐射传输理论,可以得到大气任何高度层上向上和向下长波辐射通量应满足的方程。给出上下边界条件,可以得到它们分别与该高度层以下和以上辐射通量的递推表达式,计算十分省时。计算通量所需的平均面透射率,用分谱段合成,有很高的精度。根据光谱资料,水汽分为12个基本波段,CO<sub>2</sub>分为2个基本波段。

郭晓岚辐射参数化方法的最大优点是将复杂的波谱分段后,得到解析的通量密度计算公式,因而计算简单,速度快。同时不失计算精度。

### 2.3 数值模拟-青藏高原动力学

郭晓岚不仅是一位杰出的理论气象学家,而且对建立天气气候和大气环流数值模式,并用以模拟青藏高原的天气气候效应,也非常有兴趣。他发展的模式物理过程参数化方案,尤其是积云对流参数化方案,虽然被他人广为应用,但当时主要用于热带气旋发展的理论研究中,还没有被他本人用于天气气候和大气环流数值模式。因此,他也很想将他提出的参数化方案引入数值模式进行检验。

1979年9月,作者之一作为访问学者到达芝加哥大学,在郭晓岚指导下进行研究工作,将 $p$ -混合坐标系的二层初始方程数值模式<sup>[31]</sup>改进为五层模式。在新模式中,引进了水汽方程及与水汽有关的物理过程,如大尺度水汽凝结和Kuo1974对流参数化方案,还进行了改进,将积云生命史划分为两个阶段,即成云和降雨阶段,在不同阶段,降水量与总水汽辐合量的比值用不同方法计算<sup>[32]</sup>。郭晓岚的辐射参数化方案被全部引入新模式,在短波部分,包含了太阳辐射的季节变化和日变化,而在当时的其

它大气环流数值模式中是没有日变化的。短波辐射日变化的加入,会大大破坏模式的计算稳定性,为此,又设计了干对流调整和垂直扩散系数随大气稳定度变化等方案,使模式能稳定积分较长时间,并得到合理的模拟结果。新模式中还加入了海洋混合层模式。因此,是一个包含地气相互作用和简单海气相互作用的初始方程数值模式,能模拟大地形的动力和热力作用以及地面和海面热力异常所产生的天气气候效应。

新模式首先被用于模拟青藏高原和落基山等大地形对气象场日变化的影响以及日变化对降水量和降水分布的影响<sup>[32]</sup>。模拟结果显示,气象场明显的日变化主要源于青藏高原地形对太阳辐射区域分布的特殊影响。这种影响形成了地方时 18 时,在 90°E 整个高原及其周边地区除了高原东边缘的狭长区域外,从地面直到 100 hPa 的上升运动区。在地方时 6 时,在上述地区从地面直到 300 hPa 形成下沉运动区。300 hPa 以上仍为上升区。日夜平均为上升运动区。模拟的降水率与观测也相当一致,且在热带地区,对流降水量占 3/4。与观测相符很好。

利用新模式,研究了 7 月平均季风环流的发展过程<sup>[33]</sup>。做了 8 个敏感性数值模拟试验。分别设定太阳辐射有日变化和无日变化、有地形和无地形、气象场初值纬向均匀和非纬向均匀以及无辐射加热和无对流加热等条件。结果发现,非绝热加热和气象场的区域分布受海陆分布和地形的影响明显,但与大气的初始状态几乎无关。位于阿拉伯半岛和东北非以及中南半岛和印度半岛沿岸的两个海平面低压槽以及索马里低空急流,即使没有地形,也不管使用何种初始场,在所有包含非绝热辐射加热和积云对流加热的试验中都能模拟出来。相反,如果去除这两种加热,这些系统就模拟不出来。太阳辐射加热日变化的引入加快了低层气压系统的发展速度,其原因是积云对流的发展主要在日间。辐射加热、地形和初始条件对降水量及其区域分布都有至关重要的影响,没有地形,最大降水出现在东亚沿岸区,而非孟加拉湾一带,且大陆和海洋上的降水量都大大减小。可见,日变化在季风环流的发展中起着“加速”作用,地形对辐射和对流加热,从而对降水场起着“分配”作用,而大气的初始态对东亚季风环流型的形成没有本质的影响。

### 3 结 语

本文简要地介绍了郭晓岚先生的生平。可以看到,他虽然出身贫寒,但从小就胸怀大志,对数学、中国古典文学和中国历史倍感兴趣。他对科学的兴趣和孜孜不倦的学风,使他很快成为有影响的青年学者和当时芝加哥学派的重要成员。他对学业的态度和对事业的追求,是年轻学子们学习的楷模。

郭晓岚先生的聪明才智和他的敬业精神,使他成为大气动力学中诸多理论研究的开创者,正如芝加哥大学新闻办公室文告中所说,他在理论研究中的杰出成就为气象学的很多分支领域奠定了数学和物理的理论基础,因此影响着相关学科和领域的发展。除了大气动力学理论研究,他还研制了模式物理过程参数化方案,其中的积云对流参数化方法不仅具有理论意义,更具有实际应用价值。关于青藏高原等大地形的动力和热力作用,尤其是太阳辐射日变化对天气气候影响的数值模拟研究,是具有首创性的。1985 年退休后,郭先生仍致力于气象科学研究,在 ENSO 长期振荡、地转适应过程和 Walker-Hadley 环流与 ITCZ 的形成机制等方面作出了新的理论贡献<sup>[6,34-35]</sup>。

郭晓岚先生不仅是一位国际著名的学者,也是一位爱国者。他对中国气象事业的发展十分关注,生前曾 4 次访问中国,并为中国培养了气象人才。

郭晓岚先生的逝世,是国际气象界的重大损失,也使我们失去了一位循循善诱的导师。是我们后辈学习的楷模。愿郭晓岚先生安息吧!

### 参考文献

- [1] Kuo H L. Dynamic instability of two-dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. *J Atmos Sci*: 1949, 6(2):105-122
- [2] Kuo H L. Instability theory of large-scale disturbances in the tropics. *J Atmos Sci*, 1975, 32(12):2229-2245
- [3] Kuo H L. A two-layer model study of the combined barotropic and baroclinic instability in the tropics. *J Atmos Sci*, 1978, 35(10):1840-1860
- [4] Kuo H L. Baroclinic instabilities of linear and jet profiles in the atmosphere. *J Atmos Sci*, 1979, 36(12):2360-2378
- [5] Kuo H L, Seitter K L. Instability of shearing geostrophic currents in neutral and partly unstable atmospheres. *J Atmos Sci*, 1985, 42(4):331-345

- [6] Kuo H L. Long-term oscillations in the coupled atmosphere-ocean system and El Niño phenomenon. *J Climate*, 1989, 2(12): 1421-1437
- [7] Kuo H L. The motion of atmospheric vortices and the general circulation. *J Meteorology*, 1950, 7(4): 247-258
- [8] Kuo H L. Vorticity transfer as related to the development of the general circulation. *J Meteorology*, 1951, 8(10): 307-315
- [9] Kuo H L. The stability properties and structure of disturbances in a baroclinic atmosphere. *J Meteorology*, 1953, 10(4): 235-243
- [10] Kuo H L. Symmetrical disturbances in a thin layer of fluid subject to a horizontal temperature gradient and rotation. *J Meteorology*, 1954, 11(10): 399-411
- [11] Kuo H L. Forced and free meridional circulations in the atmosphere. *J Meteorology*, 1956, 13(12): 561-568
- [12] Kuo H L. Forced and free axially-symmetric convection produced by differential heating in a rotating fluid. *J Meteorology*, 1956, 13: 521-527
- [13] Kuo H L. Energy-releasing process and stability of thermally driven motions in a rotating fluid. *J Meteorology*, 1956, 13: 82-101
- [14] Kuo H L. Further studies of thermally driven motions in a rotating fluid. *J Meteorology*, 1957, 14: 553-558
- [15] Kuo H L. Finite-amplitude three-dimensional harmonic waves on the spherical earth. *J Meteorology*, 1959, 16: 524-534
- [16] Kuo H L. On the controlling influences of eddy diffusion on thermal convection. *J Atmos Sci*, 1962, 5: 236-243
- [17] Kuo H L. On the dynamics of convective atmospheric vortices. *J Atmos Sci*, 1966, 23(1): 25-42
- [18] Kuo H L. Motions of vortices and circulating cylinder in shear flow with friction. *J Atmos Sci*, 1969, 26(3): 390-398
- [19] Kuo H L. Axisymmetric flows in the boundary layer of a maintained vortex. *J Atmos Sci*, 1971, 28(1): 20-41
- [20] Kuo H L, Sun W Y. Convection in the lower atmosphere and its effects. *J Atmos Sci*, 1976, 33(1): 21-40
- [21] Kuo H L. 1973: Nonlinear theory of the formation and structure of the intertropical convergence zone. *J Atmos Sci*, 30(6): 969-983
- [22] Kuo H L. On the planetary boundary layer at the equator. *J Atmos Sci*, 1973, 30(1): 153-154
- [23] Kuo H L. Planetary boundary layer flow of a stable atmosphere over the globe. *J Atmos Sci*, 1973, 30(1): 53-65
- [24] Kuo H L. The thermal interaction between the atmosphere and the earth and propagation of diurnal temperature waves. *J Atmos Sci*, 1968, 25(5): 682-717
- [25] Kuo H L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci*, 1965, 22(1): 40-63
- [26] Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J Atmos Sci*, 1974, 31(5): 1232-1240
- [27] Kuo H L, Raymond W H. A quasi-one-dimensional cumulus cloud model and parameterization of cumulus heating and mixing effects. *Mon Wea Rev*, 1980, 108(7): 991-1009
- [28] Kuo H L. On a simplified radiative-convective heat transfer equation. *Pure and Applied Geophysics*, 1973, 109(8): 1870-1876
- [29] Kuo H L. Infrared cooling rate in a standard atmosphere. *Contrib Atmos Phys*, 1979, 52: 85-94
- [30] Kuo H L. Analytic infrared transmissivities of the atmosphere. *Beitr Phys Atmos*, 1977, 50: 331-349
- [31] 钱永甫, 颜宏, 骆启仁等. 一个有大地形影响的初始方程数值模式. *大气科学*, 1978, 2(2): 91-102  
Qian Yongfu, Yan Hong, Lu Qiren, et al. A primitive equation numerical model with large scale topography. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 1978, 2(2): 91-102
- [32] Kuo H L, Qian Y F. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer. *Mon Wea Rev*, 1981, 109(11): 2337-2356
- [33] Kuo H L, Qian Y F. Numerical simulation of the development of mean monsoon circulation in July. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(12): 1879-1897
- [34] Kuo H L. A new perspective of geostrophic adjustment. *Dyn Atmos Oceans*, 1998, 27(1): 413-437
- [35] Kuo H L. Simple model for the steady Walker-Hadley circulation and mean ITCZ in equatorial Pacific. *Contributions to Atmospheric Physics*, 1993, 66(1-2): 107-117

## CREATIVE AND GREAT CONTRIBUTIONS OF PROFESSOR GUO XIAOLAN (HSIAO LAN KUO) TO THE ATMOSPHERIC SCIENCES

——A Memorial of Professor Guo Xiaolan

Qian Yongfu<sup>1</sup> Chen Yuejuan<sup>2</sup> Wang Qianqian<sup>3</sup> Chao Jiping<sup>4</sup>

1 *Department of Atmospheric Sciences, Institute of Severe Weather and Climate, Nanjing University, Nanjing 210093*

2 *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

3 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044*

4 *Prediction Center for Oceanic Environment, National Oceanography Bureau of China, Beijing 100081*

### Abstract

Professor Guo Xiaolan (Hsiao Lan Kuo), a worldwide famous scholar in atmospheric sciences, originally came from China in 1940's, passed away on May 6, 2006 at his age of 91 in Chicago, the USA. Professor Guo's brief biography and contributions to atmospheric sciences in the several decades with his hard work are summarized on the basis of his more than 70 representative papers selected by the authors. His main creative and leading achievements introduced include the theory of dynamic instability in the atmosphere, theories of the formation of the general circulation and the large scale thermally driven circulation, dynamic theories of mesoscale convection and vortex, and low latitude and tropical dynamics. The parameterization schemes for physical processes in numerical models developed by Prof. Guo, and the results of the numerical modeling of topographic dynamic and thermal effects of the Tibetan Plateau on weather and climate are also introduced. It is evidently seen from those introductions that Prof. Guo made superexcellent contributions to atmospheric sciences and education. Prof. Guo is our model, from whom we, his posterity, can learn a lot of things. May Prof. Guo rest in peace!

**Key words:** Guo Xiaolan (Kuo, Xiao Lan), Atmospheric dynamics, Physical parameterization schemes, Numerical modeling, Tibetan Plateau.