DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.1997.03.013

中高层大气重力波的研究
——辨明近地空间环境扰动的关键过程

易 帆

（中国科学院武汉物理与数学研究所，武汉 430071）

[摘要] 根据当前中高层大气重力波场的知识水平，我们重新考察了重力波的基本概念，讨论了重力波场的基本过程。

[关键词] 重力波场，中高层大气，基本过程

10 km 以上的地球大气称为“中高层大气”，它包括对流层的上部、平流层、中间层和热层。与 10 km 以下的对流层比较起来，中高层大气非常稀薄，但在其高度上存在复杂的光化和动力学过程，这些过程与人类的生存和发展密切相关。绝大部分臭氧位于低平流层内，它强烈地吸收了太阳的紫外辐射，保护着地球生物圈的安全；中层大气的暂态结构对飞行器的安全与准确入轨具有重要影响；高层大气的起伏引起电离层扰动，干扰无线电通讯。作为日-地系统的一个重要环节，中高层大气吸引了大气科学家和空间物理学家共同关心这一领域[1,2]。自 70 年代中期开始，国际科联日地科学委员会(SCOSTEP)先后组织了多项全球性的合作研究，目的在于弄清中高层大气中关键的光化和动力学过程，以及它们对空间环境的影响。

实验观测表明，任取一段中高层大气的观测数据，几乎都可以找到重力波的踪迹，因此重力波过程被认为是中高层大气中最重要的动力学过程之一(若考虑的是局部问题，可把潮汐看成其频率为地球自转频率整数倍的重力波)。重力波过程能够解释中高层大气参量的起伏变化，说明某些暂态现象的物理原因。目前国际上最好的卫星阻力计算模型只有约 15%的精度，这在很大程度上是因为难于估计重力波引起的中高层大气密度的暂态结构。在热层高度上，通过碰撞耦合，重力波引起电离层扰动。因而对重力波过程全面深入的理解，将可能导致一个实用的空间环境扰动预报模型，为航天活动的开展以及无线电通讯提供可靠的保障。重力波能量和动量从波的源区向空间输送，导致大气不同层区之间相互耦合，在全球中高层大气能量收支平衡中占有重要的地位。因为大气密度随高度指数性地下降，由对流层上传的重力波在中层顶附近获得了较大的扰动速度而破裂并产生湍流，从而改变全球的温度和环流结构，在中层顶产生一个明显的温度异常(夏季极区冷，冬季极区暖)。美国航天飞机在返回地球的过程中，通过中层顶时，出现轻度的抖动，这种抖动被认为是重力波破裂产生的湍流所致。从理论上分析，重力波破裂产生湍流对中高层大气的输运、光化平衡和微量成分也可能产生重要的影响。

深入和全面地理解重力波的产生、传播、内传输和耗散过程，是当今中高层大气科学的

本文于 1996 年 12 月 16 日收到.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一个重要目标，也是正在进行和正在规划的各种国际研究行动的促动因素。国际日地能量计划（STEP，'89—'95）中的一个重要内容就是辨明重力波在中高层大气能量传输和耦合过程中的作用。将在1998年再次启动的大气各区域耦合、能量学和动力学计划（CEDAR），以及热层、电离层和中层能量学和动力学计划（TIMED），是国际学术界为实现这一目标所作的进一步努力。国际上的研究热潮引起了国内学术界的高度重视。国家自然科学基金委员会1994年发表的关于大气科学发展战略的调研报告，公布了近期我国大气科学学科发展规划和政策，重力波过程的研究在其优先资助领域中层大气科学中占有重要的地位。1995年中国科学院建立的中层大气与全球环境探测开放实验室，把中层大气重力波特征、源汇和作用模式列入其课题指南。国家自然科学基金"八五"重大项目"日地系统能量传输过程"，也将重力波过程作为其子课题—热层电离层耦合中的关键内容。

人们主要采用三种手段，即实验观测分析、解析理论和数值模拟，对中高层大气的重力波过程进行研究。从对波过程理解的深入程度来看，理论研究目前占据了领先的地位。然而，对中高层大气内实际发生的波动过程的了解，很大程度上得益于探测技术的发展，其中，VHF雷达、MF雷达、激光雷达和非相干散射雷达等地面遥感手段起了关键的作用。数值模拟被用来研究较为复杂的波过程，在理论和实验观测之间架设相互沟通的桥梁。关于中高层大气重力波研究发展的历史和最新进展，国内外已有比较全面的综述报道[3~6]。本文将从物理概念的角度，归纳并评述当今中高层大气重力波的知识水平，试图为我国中高层大气重力波研究的进一步发展提供一个理论线索。

1 重力波的基本概念

重力波被定义为传播在稳定层结大气中的一种振荡运动，它是空气元受重力和各项同性热压力共同作用的结果。重力波的频率范围介于惯性频率 f 和浮力频率 N 之间，其空间尺度（波长）从几公里延伸到上千公里，这个谱范围处在行星尺度的运动和小尺度湍流之间。需要注意的是，处于重力波谱范围内的大气起伏并不都是重力波。人们通常所说的重力波是指满足下述色散方程（1）和偏振关系（2）的内重力波[7]

$$(N^2-\Omega^2)(l^2+m^2)+(f^2-\Omega^2)n^2=0 \tag{1}$$

$$\begin{cases}\mathbf{u}(\mathbf{r},t)=a(\mathbf{k})\mathbf{U}(\mathbf{k})\exp\{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)\}\\ \zeta(\mathbf{r},t)=a(\mathbf{k})(iU_3(\mathbf{k})/\Omega)\exp\{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)\}\\ p(\mathbf{r},t)=a(\mathbf{k})c(\Omega^2-f^2)\exp\{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)\}\end{cases} \tag{2}$$

这里 $\mathbf{k}(=l,m,n)$ 代表波矢量，$\Omega=\omega-\mathbf{k}\cdot\mathbf{u}_0$ 代表本征频率，ζ 是垂直位移，其他符号遵从大气动力学的惯例[7]。式（1）和（2）确定了内重力波的特征，它们可以用来检验实际观测的波状扰动是不是重力波。前面关于重力波的定义是在一个很宽意义下的描述，从事波动研究的人感觉这个定义太粗，于是借用海洋内波研究的成果，引入了一个更为详细的运动学定义[7]：内重力波是载波介质的线性扰动，一旦它们产生以后，将沿着其射线自由传播，非线性效应和支持它们的背景只会缓慢地改变它们的属性，强的非线性效应（如波破裂等），只是时空中非常局部的事件。这个定义划定了内重力波的运动学特性，即沿射线传播，同时将波属性的改变也纳入其中。这是当前从事重力波研究的人所喜爱的一种定义。许多的理论和观测分析工

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作都是建立在该定义基础之上。需要指出的是，这个定义的真实性从来没有在大气中进行过检验，因此我们只能暂时将它作为一个工作假定。

上面的定义都把垂直驻波排斥在外。事实上，中层大气的观测表明，驻波模也是经常出现的一种波结构。此外，VHF 雷达还常常观测到垂直消散波，这种波在垂直方向上也没有相位的变化，只是振幅呈现增长或衰减。根据内重力波的定义，我们不能从某一观测参量呈现正弦振荡就轻易地断定：这是重力波引起的。在做理论分析时，我们也不能随便写一个波函数，就将它作为重力波扰动代入某个方程进行计算，而宣称我们在研究重力波效应。

中高层大气观测表明，存在两种形式的内重力波：

(1) 随机重力波场。因为大气中存在大量不同种类的激发源，也因为非线性耦合，波场一般由大量的波群组合而成。这些波群离源区比较远，在长时间的传播过程中已失去了源的属性。这种波动可以用具有随机振幅和相位的线性波叠加来描述：

$$\mathbf{u}(\mathbf{r},t) = \int \mathrm{d}\mathbf{k} a(\mathbf{k}) \mathbf{U}(\mathbf{k}) \exp[i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)] \tag{3}$$

这种表述代表了中层大气背景重力波场的性质，可以采用统计方法来处理。近年 VHF 雷达的观测表明，中层大气中尺度起伏谱具有普适性。普适性的含意是，谱结构遵从的规律不随时间和地点而变。

(2) 与局地源相关的重力波波包。如果取一段观测数据做谱分析，通常会看到谱的总体变化趋势是遵从频率 $f^{-\lambda}$ 的幂规律。如果把 $f^{-\lambda}$ 当作重力波的背景谱，可以看到，背景谱上还叠加着许多“尖峰”。一般认为，这种“尖峰”是与局地源相关的重力波波包，它身上带有局地源的属性。因此，我们可以从“尖峰”的特性来推断源的方位。

3　重力波的产生

从能量角度来看，重力波的产生相当于波场从大气边界或大气内其他运动模态中抽取能量。重力波在中高层大气中普遍存在的事实使人们一直关注波源的确定，试图建立源和波之间的因果联系。注意到中高层大气重力波的等相面大都是向下运动的，预示着能量向上传播，人们首先在对流层的各种气象活动中找原因，发现中高层大气中的一些波状扰动似乎与剧烈的气象活动有关，如雷暴、穿透性对流、龙卷风和台风等。除了气象因素之外，其他形式的波源也陆续被提出来，如火山爆发、地震、核爆发、日食、背风波，等等。在上述众多的激发源中，只有两种激发机制的理论描述比较成功：一是核爆炸引起的重力波扰动；另一个是背风波。观测表明，极区和高纬的重力波活动比中低纬的更强烈更频繁，而且与磁暴相关的重力波能以超声速的水平传播速度从极区向赤道方向传播数千公里。因此，人们断定极区是重力波的一个重要源区。极区中可能的源机制是极光带电急流的扰动、粒子沉降和超声速运动的极光带电急流弧。

80 年代以来，随着观测数据的积累，人们认识到，在中高层大气上观测到的许多重力波活动都无法在对流层中找到相应的源机制。由此人们推测，中高层大气中的重力波活动在很大程度上来自其内部背景流动的不稳定性以及大尺度波动之间的相互作用等。针对这种情况，我们研究了剪切流动中短周期声重波的产生，解释了 VHF 雷达的观测结果。

通过电离层观测台阵获取重力波的传播参数，采用反向射线追踪方法决定对流层波源的位置，曾经是 70 年代兴旺了一段时间的研究课题。但随着人们对波传播过程和电离层响应方

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式的深入理解，以及中层大气观测数据的积累，对这个问题的求解失去了信心。因为一般的重力波从对流层传播到电离层观测高度（～250 km），通常要走相当长的时间，非线性耦合和背景场的影响会逐步消除源的印记。此外，中层大气的观测表明，重力波水平相速的典型值是 10—100 ms^{-1}。而通过电离层无线电探测得到的热层重力波的水平相速典型值，比中层的观测结果要大一个量级（250—1000 ms^{-1}）。我们会很自然地提出这样的疑问，如果热层高度上的重力波都是由对流层传播上去的，那么为什么在其必经之地中层大气中没有看到相应的结果呢？最近，我们分析 VHF 雷达观测资料，发现中层顶存在很强的能量下传的重力波[8]，表明波源在中层顶以上。总的来说，人们对重力波产生过程的理解还相当肤浅。

4 重力波的传播

重力波传播是人们研究得最多的问题，它把能量和动量从大气的一个区域输送到另一个区域，从而导致大气不同层区之间的耦合。由对流层的观测结果推算可知，低层大气上传的重力波对中高层大气的加热强度是太阳紫外辐射的数百倍。可见波动能量的传输对中高层大气能量的收支平衡相当重要。

关于重力波传播参数的测量，迄今人们能够直接获得的是频率和垂直波长这两个参数，而水平相速的获取通常采用相关分析方法或者通过偏振关系和色散方程推出。随着中间层大气雷达观测资料的积累，人们关于波参数的知识日益丰富起来。Vincent[9]归纳了中间层和低热层重力波的基本特征：重力波垂直波长的典型值是 3—40 km，水平相速的典型值范围是 10—100 ms^{-1}。VanZandt[10]根据海洋内波谱模型的思想，综合中层大气的各种观测结果，给出了随机重力波场频率和波数谱的表述形式。这些工作为重力波过程的研究奠定了最初步的基础。在内重力波的实验观测中，最能够反映现象背后物理本质的是准单色内重力波。因此，搜寻准单色内重力波做个例研究是各国学者努力追求的东西。日本学者从 MU 雷达的观测中，得到了几个单色性非常好的惯性重力波例子，能够清楚地看到重力波上传时的振幅增长，然后衰减的过程[11]。这种衰减是由于波振幅过大，导致对流不稳定性而产生的。通过分析 SOUSY VHF 雷达观测数据，我们注意到准单色内重力波进入随高度增加的背景风区域传播时，垂直波长收缩，振幅剧烈衰减。通过物理检验，判定这就是重力波的临界层现象[12]。

重力波传播理论研究方面的工作比实验观测要领先许多。在射线理论基础上，人们已建立了一套完整的内重力波运动学模型，描述重力波波包在中高层大气中的传播，即射线方程（4）和波作用量守恒方程（5）

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt}=\frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{k}},\qquad \frac{d\mathbf{k}}{dt}=\frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{r}},\qquad \frac{d\omega}{dt}=\frac{\partial\omega}{\partial t} \tag{4}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\nabla\cdot(\mathbf{v}_g A)=0 \tag{5}$$

其中，$\omega=\omega(\mathbf{k},\mathbf{r},t)$是局地色散方程。射线理论只能考虑 WKB 近似条件下的波演变，对于真实大气，背景参量（温度与风场）变化的特征尺度与重力波的波长大小相当，传播问题的精确解必须求助“全波计算”。关于中高层大气线性重力波传播的全波解，在 70 年代已有比较系统的研究工作。80 年代以来，人们对重力波在中高层大气中的非线性传播进行了数值模拟，但

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采用的模型都过于简单（平面单色波）。与其他方面比较起来，人们在重力波传播方面的知识水平要高一些。然而，从波的运动学结构上来说，理论和实验观测之间还缺乏深入细致的比较，特别是缺乏定量的比较，人们甚至还不能回答观测到的内重力波与现有的运动学模型差距有多大这样简单的问题。

5　传输过程

在重力波的传播过程中，有一些过程可使能量在波谱中进行再分配。这种在不同尺度的波谱成份中进行能量传递并保持总能量不变的过程称为传输过程，这种过程无疑是非线性相互作用产生的。

传输过程是当前重力波研究的一个热点。在过去十多年里，受海洋内波研究的启发，这方面的工作取得了一定的进展。人们采用共振相互作用近似，研究了固定相位的三波相互作用问题。发现，当一个强重力波通过中层大气传播时，倾向于激发尺度与它大小相当的两个重力波，这两个重力波一个上行一个下行。这似乎可以解释重力波谱的垂直对称性。鉴于目前有关固定相位三波相互作用的工作仅限于相互作用的初期发展，即参量不稳定性，我们考察了粘性大气中三波相互作用的完整演变过程[15]，给出了相互作用的特征时间，阐明了参量不稳定性的有效范围，揭示了粘性对相互作用过程的影响。通过比较特征时间和波周期，我们注意到主波尺度越大，共振相互作用近似的条件越容易满足，这是首次以实测的重力波参数对国际上广泛采用的共振相互作用理论进行检验。

由于固定相位的三波相互作用是一个可逆过程，它无法解释普适谱的成因。因此人们仿照海洋内波研究的方法，建立了随机重力波场的传输方程[14]。我们将这个工作推广到包含分子粘性的情况[15]。传输方程的数学形式相当复杂，求解的关键是计算传输积分。这个工作对于理解中高层大气背景重力波场具有极其重要的意义。目前看来，至少有三个重要问题可望从中得到解答：第一是求出传输方程的稳态解，比较它与普适谱的差别，确定普适谱的成因；第二是获取扰动谱的弛豫速度，确定谱受扰动后向平衡态恢复的快慢；第三是估计过谱的能流，确定共振相互作用能否导致能量从大尺度向小尺度串级传播。十分遗憾的是，迄今为止还没有人对中高层大气重力波的传输过程进行严格的数值计算。与此相比，从事海洋内波研究的科学家，在80年代就已有大约20人年的工作是计算各种谱模式情况下的传输积分。

6　耗散过程

耗散过程是指波动能量发生衰减的过程。通常可分为两类：一类是线性耗散，例如粘性效应，热传导和离子拖曳等，这类耗散的耗散率与波振幅无关。在70年代，人们对这个问题就进行了充分的研究；另一类是非线性耗散，如对流不稳定性和剪切不稳定性以及临界层吸收等。由对流层传播到中层的重力波，因为获得了较大的振幅，变得不稳定而破裂并产生湍流，因此，人们普遍认为在中层高度上，非线性耗散占支配地位。事实上，已观测到重力波相关的对流不稳定性和剪切不稳定性以及临界层吸收的例子。人们在理论上也给出了在单色波情况下，这类非线性耗散发生的判据。然而，对实际发生的非线性耗散过程还了解甚少，特别是对非线性耗散从重力波波谱中抽取能量的速率知道得相当少。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

7 结语

中高层大气重力波研究经过30多年的发展，人们已站在一个新的起点上。在运动学方面，人们正通过大量的观测分析和理论比较，着手建立定量的符合实际的波状态描述，以满足许多实际应用的需要。在动力学方面，人们正在探索影响大气重力波场的关键的动力学过程，寻求一些重要观测事实的合理解释。

参 考 文 献

[1] 黄荣辉．平流层、中间层大气动力学研究．大气科学，1985，**9**：413－422.

[2] Yeh K C，Liu C H，Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere. Rev. Geophys.，1974，**12**（2）：193－216.

[3] Killeen T L，Johnson R M，Upper atmospheric waves，turbulence，and winds：Importance for mesospheric and thermospheric studies. Rev. Geophys.，1995，Supplement：737－743.

[4] Hocke K，Schlegel K，A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances：1982－1985. Ann. Geophysicae，1996，**14**：917－940.

[5] 吕达仁，王英鉴．中国中层大气研究的近期进展．地球物理学报，1994，**37**（增刊）：74—84.

[6] 朱迅．中层大气重力波研究．气象学报，1989，**47**（2）：207—216.

[7] Olbers D J. Model of the oceanic internal wave field. Rev. Geophys.，1983，**21**：1567－1606.

[8] 张绍东，易帆，Klostermeyer J，Ruster R. 极区中层惯性重力波的VHF雷达观测．空间科学学报，1995，**15**（2）：156—163.

[9] Vincent R A. Planetary and gravity waves in the mesosphere and low thermosphere. Adv. Space Res.，1990，**10**（12）：93－101.

[10] Vanzandt T E，Spectral description of the gravity wave field，Adv. Space Res.，1990，**10**（12）：111－116.

[11] Muraoka Y，Sugiyama T，Kawabira K，et al. Formation of mesospheric VHF echoing layers due to a gravity wave motion. J. Atmos. Terr. Phys.，1988，**50**（9）：819－829.

[12] Yi F，Klostermeyer J，Ruster R. VHF rader observation of gravity wave critical layers in the mid-latitude summer mesopause region. Geophys. Res. Lett.，1991，**18**：697－700.

[13] Yi F，Xiao Z. Evolution of gravity waves through resonant and nonresonant interaction in a dissipative atmosphere. J. Atmos. Terr. Phys.，1997，**59**：305－317.

[14] Yeh K C，Liu C H. Evolution of atmospheric spectrum by processes of wave-wave interaction. Radio Sci.，1985，**20**：1279－1294.

[15] 易帆，肖佐．损耗大气中重力波场的传输方程．空间科学学报，1993，**13**（4）：278—285.

GRAVITY WAVES IN THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERES

Yi Fan

(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics*，*CAS*，*Wuhan* 430071)

Abstract A review of theoretical and observational results describing gravity waves field in the middle and upper atmospheres is presented. Based on the present state of knowledge about the morphology of atmospheric gravity wave field，the concept of atmospheric gravity wave field is reexamined. Foundamental processes about gravity wave field are discussed.

Key words gravity wave field，the middle and upper atmospheres，foundamental processes

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net