

陈 炜,李跃清. 对流层重力波的主要研究进展[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 717-724, [CHEN Wei, LI Yueqing. Main Research Progress on Gravity Waves in the Troposphere[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5): 717-724], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0717

# 对流层重力波的主要研究进展

陈 炜<sup>1</sup>, 李跃清<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局成都高原气象研究所, 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

**摘 要:**重力波是一种普遍存在的大气波动,它对全球大气动量和能量的传播以及多种天气的激发具有重要作用。本文回顾了20世纪60年代初期以来国内外关于惯性重力波的研究进展,主要从以下四个方面简要总结了有关重力波的主要成果:重力波的基本定义和属性、激发源、现有的探测手段和分析方法,以及对暴雨、台风和大气环流的影响。在此基础上,初步讨论了重力波研究领域可能存在的问题,以及今后进一步开展的研究方向。

**关键词:**惯性重力波;研究进展回顾;展望

**文章编号:**1006-7639(2018)05-0717-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0717

**中图分类号:**P421.31

**文献标志码:**A

## 引 言

在稳定层结大气中,流体受到扰动而偏离平衡位置,并在浮力作用下产生的周期性振动,称为大气重力波。重力波是一种常见的大气波动,它与对流层内多种强对流灾害性天气(如暴雨、冰雹、飚线、台风等)的发生发展存在密切关系。研究表明,在适当的大气条件下,重力波可以通过触发积云对流而导致强对流等灾害性天气发生<sup>[1-5]</sup>。作为大气的基本扰动要素之一,重力波在天气和气候变化中发挥着不可替代的作用,其活动不仅深刻影响着各类中尺度天气系统,被认为是各种中尺度强对流系统的触发器<sup>[6-7]</sup>,同时在大气环流的调整和演变中也发挥重要作用。重力波的产生、传播和破碎引起的动量重新分配,对局地乃至全球的大气环流都有重要影响<sup>[8-9]</sup>。大气作为一个整体,各部分之间存在相互作用。如对流层内各种尺度波动在一定条件下能传到平流层,并对平流层的环流场产生影响。研究表明:对流层重力波活动传入平流层内,其对平流层大气准两年振荡、半年振荡和西风发展均有很大贡献<sup>[10-11]</sup>。随着航空航天技术的快速发展,对流

层内强烈天气活动产生的扰动对中高层大气的影响越来越受到重视,如强对流天气对航空运输的影响、电离层电子浓度总含量扰动对航天器的影响等。重力波作为低层大气与中高层大气联系的纽带,与多种天气活动的激发和发展关系密切。因此,开展对流层内重力波的研究意义重大,尤其是重力波波源和传播特征,以及波活动与周围环境的相互作用等问题。

本文回顾了20世纪60年代以来,有关重力波活动特征及其对天气活动影响的主要研究成果,包括重力波的基本属性、波源、观测手段和分析方法,以及重力波对暴雨、台风天气活动和大气环流的影响,探讨了目前存在的主要问题,并对今后重力波研究作了初步展望。

## 1 重力波的定义与基本属性

### 1.1 定义

广义来说,重力波是指不可压缩流体中一种以重力为恢复力的波。通常分为两种形式:一是存在于两种流体的分界面上,称为重力波外波,其波动沿表面传播,并且沿垂直于表面的方向衰减;二是存在

收稿日期:2018-01-30;改回日期:2018-04-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(91337215)、公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201406001)和四川省应用基础研究计划重点项目(2016JY0046)共同资助

作者简介:陈炜(1993—),女,硕士研究生,主要从事高原气象研究。E-mail:15528295771@163.com。

通信作者:李跃清,E-mail:yueqingli@163.com。

于内部密度连续分层变化的同一种媒质中,如大气,则是这种典型的媒质。大气密度随高度呈指数减小,当稳定大气受到某种扰动时,气块受力离开原来位置,随后气块在浮力或重力的作用下返回平衡位置。由此可见,密度分层的非均匀性提供了除弹性恢复力之外的另一种恢复力,即浮力。在大气中,对于某些波长大于大气标高(10 km)的波动,如果忽略弹性恢复力的作用而只考虑重力和浮力做功,则产生的大气周期性振动称为重力波内波。通常,大气中的重力波多属于重力内波(简称为“重力波”)。其中,不考虑地球旋转作用的重力波称为纯重力波,而考虑地球旋转作用的则称为惯性重力波<sup>[12-13]</sup>。

## 1.2 基本属性

重力波是大气中普遍存在的一种波动,其频域很广,波动频率主要介于惯性频率 $f(10^{-4} \text{ s}^{-1})$ 和浮力频率 $N(10^{-2} \text{ s}^{-1})$ 之间。从水平波长来看,重力波的水平波长从几公里至几百公里不等;就周期而言,波长较短的快波频率较高,周期一般为几分钟至几小时,而波长较长的慢波频率较低,周期可达几十小时<sup>[14-16]</sup>。纯重力波多为快波,其波长主要集中在几至十几公里范围内;而惯性重力波的波长主要集中在几十至几百公里,属于典型的中尺度重力波,其周期0.5~4 h,振幅0.5~15 hPa,相速度15~35  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。研究认为,惯性重力波具有组织带状降水的能力,能够直接影响中尺度雨带的活动<sup>[17-18]</sup>。

## 1.3 活动特征

关于重力波活动特征的研究,最早主要是基于对大气运动方程组的简化结果开展的分析讨论。在20世纪60年代初,国外学者首先提出大气波动的振幅满足KdV(Korteweg-de Vries equation)方程,基于重力波的非线性KdV方程,通过WKB(Wentzel-Kramers-Brillouin approximation)近似等方法,可以求得重力波的振幅解<sup>[19-20]</sup>。另外,为讨论重力波传播的波动性质,引入了波作用量及其密度等概念,并根据变分原理和Hamilton原理推导波作用量守恒原理<sup>[21-23]</sup>。ZENG<sup>[24]</sup>、陈英仪等<sup>[25-26]</sup>将波作用量与稳定度联系在一起,阐述了罗斯贝波和涡旋运动稳定性之间的一些关系。巢纪平等<sup>[17,27]</sup>分析了地转气流中重力波的动力学性质,在对重力波的不稳定性、相速度和群速度讨论中指出:当地转风速大于重力内波波速时,某些尺度的重力惯性内波产生不稳定性,这种不稳定性可以用来解释某些中尺度系统的发展;而对于群速度大于相速度的重力波,产生的“上游效应”使波动能量先于相位传播到下游。随后,讨论了在静力平衡状态下非均匀大气层结中

惯性重力波的发展机制,认为在不稳定大气中不只有对流,也存在惯性重力波。刘式达等<sup>[28]</sup>、刘式适等<sup>[29-30]</sup>从非线性大气运动方程出发,讨论了非静力平衡下惯性重力波的波作用量和稳定性,研究发现重力波振幅与传播速度成正比。赵平等<sup>[31]</sup>根据波作用量,讨论了非静力平衡下惯性重力波的能量增长与大气层结在时空上不均匀性的关系。贺海晏<sup>[18]</sup>研究表明,对于非均匀层结和流场切变大气,惯性重力波内波在非均匀介质中的折射特征与强对流天气落区可能存在关系。随着观测手段和仪器的提升,研究指出大气重力波有明显的季节及日变化,在无天气过程时晚上重力波强度强于白天<sup>[32]</sup>;夏季重力波主要沿极向方向传播,而冬季有向赤道方向和平行于赤道方向传播的趋势<sup>[33]</sup>。

## 2 重力波的激发源

### 2.1 地形对重力波的激发

许多研究表明,地形是对流层内重力波最重要的波源之一,如青藏高原、安第斯山脉、南极半岛,阿尔卑斯山等地区<sup>[34-35]</sup>。桑建国等<sup>[36]</sup>对小尺度地形引起的切变重力波研究指出,地形是产生重力波的重要来源,这一特征在夜间表现尤为明显。观测事实也表明,当稳定度随高度急剧减弱或风速随高度急剧增加时,在山脊背风坡经常出现一系列的波动活动。卫星数据对中层大气重力波的整体分布分析也发现,地形因素对重力波分布有显著影响,在较低高度,重力波的强弱明显与地形有关<sup>[37]</sup>,而在较高高度,这种相关性明显减弱。以上表明重力波的形成与地形有显著相关性,并且在传播过程中重力波的分布随高度有明显变化<sup>[38]</sup>。张云等<sup>[39]</sup>对全球热点区域重力波活动研究表明,绝大多数重力波活跃区域的重力波波源都与山脉或对流活动有关。具体表现为:气流流经山脉时受机械阻挡作用将激发产生重力波<sup>[40]</sup>。此外,高大地形激发的大尺度重力波,常在山后绕流气流的作用下产生扰动,导致重力波破碎,而破碎将释放波的能量并引起大尺度流场的耗散作用,这种耗散作用称为地形重力波拖曳。王宇虹等<sup>[41]</sup>利用模式研究了青藏高原地区地形重力波拖曳分布,发现地形重力波拖曳参数化方案对于强降水过程中风场和降水的模拟有优化作用。

### 2.2 急流对重力波的激发

大量观测表明,在高空急流出口区经常有重力波活动,尤其是急流出口区域和地面锋面系统的冷空气一侧。通过对大量重力波活动的统计分析,普遍认为这些波动是由于急流的非平衡调整过程而产生

生<sup>[42-43]</sup>。急流和锋面系统主要通过地转适应和切变不稳定机制产生重力波,地转调整过程通过激发不平衡流产生重力波,而切变不稳定机制使得 K-H 波通过非线性相互作用激发重力波<sup>[44-46]</sup>。FRITTS 等<sup>[47]</sup>讨论了急流附近在地转适应过程中激发的重力波特征,指出急流附近的非地转运动是惯性重力波的一个重要激发源。ZHANG 等<sup>[48-49]</sup>利用 MM5 中尺度模式对一次中尺度重力波活动进行模拟研究,并详细描述了重力波与非平衡流调整和锋面锢囚过程之间的关系,得出了类似的结论,即高空急流出口区是惯性重力波的源地之一。另外还发现,与急流相关的波动其水平波长约 100 ~ 200 km,固有频率近似为科氏参数的 3 ~ 4 倍。

### 2.3 对流对重力波的激发

对流是重力波的另一个重要激发源,尤其与强天气过程相关。UCCELLINI<sup>[50]</sup>通过对一次强对流风暴的观测分析指出,2.5 ~ 4 h 周期的重力波波动与对流的强度变化十分一致,最大降水位于重力波波脊位置,而当波槽靠近时,降水强度相应减弱。这一现象揭示出重力波是能够触发和加强对流发展的激发因子。后来研究发现,重力波与对流之间存在一种相互作用的反馈机制。在扰动生成初期,重力波脊区的上升运动有利于对流的发展;而对流发展旺盛以后,强烈发展的对流积云将会阻挡重力波的传播,同时带来的更强上升运动将激发出新的重力波。由于对流活动受诸多因素影响,对流激发出的重力波频谱较宽泛,其相速度、频率、垂直和水平尺度与地形激发的波动有所差别<sup>[51-54]</sup>。CLARK 等<sup>[55]</sup>研究发现,对流激发的对流层水平波长较短的重力波可认为是一种“瞬时地形”。MILLER 等<sup>[56]</sup>、FOVELL 等<sup>[57]</sup>观测分析了各种波源在中间层产生的重力波活动,指出深对流引起的重力波较为复杂,有的以同心圆环的形态出现,有的以半同心圆环的形态出现,这与背景风场以及关键层有关。

关于地形对重力波的激发作用,其详细的物理机制目前尚未十分清楚。不同的激发源激发出的重力波不尽相同,但除激发源本身以外,重力波的激发过程还受很多环境因素的影响。重力波的各种激发源可能存在的相互联系和影响,以及何种条件更容易产生何种形式的重力波等,仍是目前亟待研究的重要问题。

## 3 重力波对天气与大气环流影响

### 3.1 重力波对暴雨的影响

中尺度暴雨的发生需要一定的大尺度天气背

景,然而,实际中即使天气条件都已具备,也经常未出现暴雨。因此,中尺度暴雨除环境流场提供的必要条件外,可能还需要一些局地的动力性启动机制。观测发现,许多中尺度雨带的传播,从尺度、周期、传播速度和结构上均非常相似于重力波,故认为重力波可能与暴雨的发生发展有某种关联<sup>[58-60]</sup>。巢纪平<sup>[17]</sup>研究认为,中小尺度扰动的发展对于暴雨及一些天气系统具有重要意义,其中在产生暴雨的中小尺度扰动中,惯性重力内波是重要要素之一。李麦村<sup>[61-62]</sup>在线性绝热情况下求解重力波,得到在不稳定大气中重力波是暴雨的触发机制之一。此外,重力波对于飚线形成的非线性过程也提供了一种可能的解释:快速移动的重力波赶上慢速移动的重力波,使扰动轮廓发生变形,引起气象要素发生剧烈变化,从而形成飚线。丁德刚等<sup>[63]</sup>针对一次 2 个中尺度系统相向移动、合并而后加强形成暴雨的天气过程研究发现,此次暴雨过程是 2 个相向而行的大气重力内波叠加作用的结果,当 2 个重力波相向传播相遇后可使振幅增大,从而产生剧烈天气,这与李麦村的研究结果<sup>[61-62]</sup>一致。此外,研究还表明,暴雨中心位于辐合中心后部,靠近正扰动中心一侧,而辐散中心与扰动气压中心位相差  $\pi/2$ <sup>[63]</sup>。贺海晏<sup>[18]</sup>对非均匀层结和流场切变大气中惯性重力波分析发现,波在非均匀介质中存在折射特征,这为暴雨落区往往不位于大气不稳定能量的大值区,提供了一种可能的解释。程国华<sup>[64]</sup>针对晋西北地区一次雷阵雨天气过程中的重力波研究发现,小尺度强对流天气系统引起的非地转平衡所激发出的周期小、水平波长短且群速快的重力内波与雷阵雨过程关系密切。

### 3.2 重力波对台风的影响

台风是热带地区生成的一种重要的灾害性天气系统,其危害之大、影响范围之广,使得对台风的研究为气象界所重视。研究表明,台风与大气重力波存在密切联系,惯性重力波的不稳定发展可能是台风形成的启动机制之一<sup>[65]</sup>。台风外围的螺旋雨带实际上是一种重力波,它可以在台风边缘由外部强迫产生<sup>[66]</sup>。李麦村<sup>[67-68]</sup>对热带地区大气的纬向超长波和长波研究指出,混合的 Rossby 重力波是热带湿大气长波和经向超长波的一个重要特性。李志楠等<sup>[69]</sup>研究发现,在台风外围,低空急流的非地转运动产生的重力波触发台风云团的发生发展。徐祥德等<sup>[70]</sup>研究指出,台风系统存在涡旋螺旋波动力特征,这种重力波列传播可能与台风涡旋基本态波流有关。吴建飞<sup>[71]</sup>对 2004 年西太平洋台风“蒲公英”

活动期间激发的重力波进行研究,发现台风活动期间平流层内有激发出的重力波现象,并且波动在平流层中主要向上和向东传播,而大部分西向传播的重力波则被背景风场过滤掉。由此可见,重力波对台风产生影响的同时,台风也激发出空间尺度更大的重力波。

### 3.3 重力波对大气环流的影响

许多研究表明,重力波的激发源大多位于对流层内,但波动可以垂直传播到中高层,并影响中层大气环流动量和能量平衡以及整层大气的物质交换与分布<sup>[72-74]</sup>。重力波在上传过程中,其振幅与大气密度的平方根成反比,重力波上传至中层顶附近时,由于振幅急剧增大产生不稳定而破碎,产生的湍流扩散将影响中层的大气温度场和环流结构。重力波破碎过程是中高层大气内小尺度湍流混合过程的重要驱动源,对平流层与对流层之间的物质交换和高层大气成分的空间分布具有重要意义<sup>[75]</sup>。重力波对平流层大气温度场和风场变化的影响尤其重要。对低纬度地区重力波研究发现,近赤道区域下平流层重力波活动除季节变化外,还存在显著的年际变化,且年际变化与赤道 QBO (quasi-biennial oscillation) 密切相关,即重力波活动与平流层年际变化中的最强信号 QBO 有关。此外,通过影响物质分布尤其是参与并决定中层大气热力状态的痕量物质,进而对平流层能量平衡产生作用来影响大气温度场<sup>[76-77]</sup>。因此,重力波是一种不可忽视的中、低层大气动量与物质耦合的重要媒介<sup>[78-80]</sup>。熊建刚等<sup>[81]</sup>讨论了 Rossby 波包与惯性重力波包在非线性相互作用下的演变特征和形成机制,发现 Rossby 波与惯性重力波可以相互传递能量,初始振幅为零的 Rossby 波包可从较小尺度的背景噪声中吸收能量而逐渐增大,同时又将能量反馈回背景噪声,对于大气能量谱的形成和变化有重要意义。ERN 等<sup>[82]</sup>通过 2005—2008 年赤道附近 (10°S—10°N) 高分辨率 HIRDLS (high resolution dynamic limb sounder) 卫星资料,提取重力波通量并计算重力波拖曳,探讨了重力波与高层大气半年振荡 (semiannual oscillation, SAO) 之间的关系,发现平流层爆发性增温时,重力波活动明显增加,且对流层重力波活动对平流层爆发性增温起到十分重要的促进作用。

## 4 重力波的观测手段与分析方法

目前,研究重力波的观测资料主要来自无线电探空观测、卫星遥感探测、雷达探测、飞机观测和火箭探测等。由于重力波在大气中的频谱很宽,上述

各种观测方法针对不同波段的探测各有所长,因此,针对不同波长的重力波开展研究时,应当选取适合的观测资料。无线电探空观测属于气象部门的常规观测业务,主要用于天气预报以及模式资料订正等,其特点是局地性强、垂直分辨率高,适合研究局地的重力波活动<sup>[15,83]</sup>。雷达探测主要包括常规的天气雷达、高空气象探测雷达、激光气象雷达和风廓线雷达等,雷达观测资料不仅直观真实,且有较高的垂直分辨率<sup>[84]</sup>。随着航空航天技术的发展,气象卫星观测逐渐成为一种重要的观测手段。卫星观测能够获取空间大范围的重力波特征、波源信息及其传播特征。卫星搭载的观测仪器有:中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、微波大气垂直探测器 (advanced microwave sounding unit, AMSU)、高光谱红外大气探测器 (atmospheric infrared sounder, AIRS)、掩星探测 (global navigation satellite system, GNSS) 和高分辨率动力学临边探测器 (HIRDLS)<sup>[85-86]</sup>。相对以上探测方式,飞机和火箭探测等由于成本较高,一般不作为常规探测。

对于重力波的识别与分析,常用的方法是:利用气象观测资料直接绘制相关的流场图(如气压场、散度场和垂直速度场等),当物理量场中存在正负中心链式交替的分布,则认为有重力波存在,如散度场的辐合、辐散交替,垂直速度场的上升、下沉运动交替分布<sup>[61,87]</sup>。另一种通过无线电探空资料研究重力波的方法,理论上是根据单色重力波的极化 (polarization) 性质,采用速矢图方法 (hodograph method) 识别和估计重力波参数,即当水平风矢端轨迹为一偏振椭圆时,表示大气中有惯性重力波存在,且在北半球水平风矢量随高度顺转,重力波传播方向向下,能量传播方向向上,而在南半球则相反。其中,偏振椭圆长短轴之比等于固有频率与科氏参数之比,该方法适用于局地重力波活动特征以及波垂直传播引起的能量输送等研究。此外,王丽吉等<sup>[88]</sup>利用高分辨率无线电探空资料,结合扩展的正交经验函数,可对热带下平流层的行星波和重力波扰动进行分离,是一种提取热带地区重力波扰动的有效方法。由于上述现有观测资料的时空分辨率相对较低,不足以深入地研究重力波活动。随着数值模式的不断发展,中尺度数值模式已成为研究重力波结构、产生和维持机制的强有力工具<sup>[89-94]</sup>。

## 5 总结与展望

重力波多发生于大气对流层,不仅对于对流层

内的各种天气活动有一定激发和促进作用,还与大尺度环流的破坏与重建等关系密切,其影响可涉及到对流层上层甚至平流层。与重力波垂直传播相关的物质能量交换使得重力波被视为对流层中、低层大气的重要媒介。目前,关于重力波的相关研究已取得了很多有意义的成果,但仍有不少科学问题尚待解决。

(1) 重力波属性和活动规律的研究早期主要是从大气运动方程组出发,在一定约束条件下(如正压无辐散、准地转运动等),通过推导波动方程并采用WKB近似法,求其波动的特征解,此种方法虽然能对重力波的一些运动规律进行描述,但由于约束条件并不能很好地反映大气的真实状况,以及方程中一些重要的非线性项无法求解,以致计算结果过于理想化,难以揭示重力波的真实运动及演变规律。因此,还需对大气运动方程组开展更精确、包含更多信息的优化方法研究,以便进一步获得重力波在天气活动中的具体影响。

(2) 重力波的波源主要包括山脉地形以及地转调整而激发出的急流、对流活动、风切变等。目前,小地形对重力波的激发已有许多研究,通过水槽实验和数值模拟等都取得了较好成果,但对于大地形激发的重力波还有很多问题亟待研究。如青藏高原大地形影响下,在高原附近产生的重力波活动特征如何?以及它对高原一带西南涡和高原涡等天气系统是否存在一定影响?此外,青藏高原是数值模式中十分关键却又存在很大不确定性的区域之一,开展大地形激发的重力波研究,有助于深入揭示大地形对周围大气的动力作用,对于改善模式性能有一定意义。

(3) 早期通过理论推导,根据大气运动基本方程讨论了特定条件下重力波对天气和大气环流的激发和影响,得到大气中惯性重力波在适当条件下可触发积云对流,从而导致暴雨、台风等强对流灾害性天气。然而,对于重力波在天气过程中具体作用,如能量的转化、波动的传播、对系统移动的引导等过程,还无法详细刻画,还需利用高新技术手段获取更多精确观测资料,以及不断完善数值模式。

(4) 重力波的观测手段主要包括无线电探空观测、雷达观测、卫星观测等,无线电探空观测适用于局地重力波活动的研究,而卫星探测和雷达观测具有明显的空间优势,适用于获取大范围的重力波特征。随着数值模式的不断发展完善,其在重力波研究中的作用逐步突出,然而由于模式对重力波的刻画仍不够全面,尤其是在重力波对高低层大气之间

的物质和能量传输,以及复杂地形下重力波的活动特征等方面。因此,今后需加快对重力波波动理论框架的完善,以及提升数值模式对重力波的反映能力。

#### 参考文献:

- [1] BOSART L F, SANDERS F. Mesoscale structure in the megapolitan snowstorm of 11 - 12 February 1983. Part III: A large amplitude gravity wave[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 42(10):1050 - 1061.
- [2] KOCH S E, GOLUS R E. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part I: multiscale statistical analysis of wave characteristics[J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(12):2527 - 2544.
- [3] LIN Y L, GOFF R C. A study of mesoscale solitary wave in the atmosphere originating near a region of deep convection[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(2):194 - 206.
- [4] BOSART L F, BRACKEN W E, SEIMON A. A study of cyclone mesoscale structure with emphasis on a large amplitude inertia - gravity waves[J]. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(6):1497 - 1527.
- [5] 张灵杰. 青藏高原上空重力波的观测和模拟分析[D]. 北京:中国气象科学研究院,2010.
- [6] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(1):1003, doi:10. 1029/2001RG000106.
- [7] MCFARLANE N A. The effect of orographically excited gravity - wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, 44(14):1775 - 1800.
- [8] FRITTS D C. Gravity waves saturation in the middle atmosphere: A review of theory and observations[J]. *Review of Geophysics*, 1984, 22(3):275 - 308.
- [9] MCLANDRESS C, SHEPHERD T G, POLAVARAPO S, et al. Is missing orographic gravity wave drag near 60°S the cause of the stratospheric zonal wind biases in Chemistry - Climate models[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(3):802 - 818.
- [10] BALDWIN M P, GRAY L J, DUNKERTON T J, et al. The quasi - biennial oscillation[J]. *Review of Geophysics*, 2001, 39(2):179 - 230.
- [11] SHU J C, TIAN W S, HU D Z, et al. Effects of the quasi - biennial oscillation and stratospheric semiannual oscillation on tracer transport in the upper stratosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(5):1370 - 1389.
- [12] GOSSARD E E, HOOKEW H. *Waves in the Atmosphere*[M]. Amsterdam:Elsevier, 2001.
- [13] LIGHTHILL J. *Waves in Fluids*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- [14] 陆汉城,杨国翔. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [15] 卞建春,陈洪滨,吕达仁. 用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2004, 34(8):748 - 756.

- [16] 白志宣, 卞建春, 陈洪滨, 等. 中国地区下平流层惯性重力波参数分布特征的资料分析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2016, 46(12): 1646 – 1657.
- [17] 巢纪平. 非均匀层结大气中的重力惯性波及其在暴雨中的初步应用[J]. 大气科学, 1980, 4(3): 230 – 235.
- [18] 贺海晏. 大气中惯性重力波的传播[J]. 热带气象, 1991, 7(1): 1 – 7.
- [19] LONG R R. Solitary waves in the westerlies[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1964, 21(2): 197 – 200.
- [20] BENNEY D M. Long nonlinear waves in fluid flows[J]. *Studies in Applied Mathematics*, 1966, 45: 52 – 63.
- [21] BRETHERTON F P, GARRETT C J R. Wavetrains in inhomogeneous moving media[J]. *Proceedings of the Royal Society of London; Mathematical and Physical Sciences*, 1968, 302(1471): 529 – 554.
- [22] WHITHAM G B. A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a Lagrangian[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22(2): 273 – 283.
- [23] WHITHAM G B. Variational methods and applications to water waves[J]. *Proceedings of the Royal Society of London; Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1967, 299(1456): 6 – 25.
- [24] ZENG Q C. The evolution of a Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(1): 73 – 84.
- [25] 陈英仪, 巢纪平. 螺旋 Rossby 波的波作用守恒和稳定性[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 1983, 34(7): 89 – 98.
- [26] 陈英仪. 涡旋运动中的波作用密度守恒及稳定性[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 1984, 35(5): 92 – 99.
- [27] 巢纪平, 章光锷, 袁孝明. 二层模式中小地形对于气压跳跃形成的初步研究[J]. 气象学报, 1964(2): 233 – 241.
- [28] 刘式达, 刘式适. 大气非线性波动方程的解[J]. 气象学报, 1982, 40(3): 279 – 287.
- [29] 刘式适, 刘式达. 正压模式中的非线性波动[J]. 大气科学, 1983, 7(2): 125 – 135.
- [30] 刘式适, 刘式达. 半地转近似下的非线性波[J]. 气象学报, 1987, 45(3): 257 – 266.
- [31] 赵平, 孙淑清. 非均匀大气层结中大气惯性重力波的发展[J]. 气象学报, 1990, 48(4): 397 – 403.
- [32] 覃卫坚, 寿绍文, 李启泰, 等. 影响惯性重力波活动规律的动力学因子研究[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 519 – 524.
- [33] 王翠梅, 李钦增, 徐寄遥, 等. 基于多台站 OH 全天空辉成像仪观测的中国中纬地区重力波传播特性[J]. 地球物理学报, 2016, 59(5): 1566 – 1577.
- [34] KLEMP J B, LILLY D K. The dynamics of wave-induced downslope winds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32(2): 320 – 339.
- [35] GARY B L. Observational results using the microwave temperature profiler during the Airborne Antarctic Ozone Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research; Atmospheres*, 1989, 94(D9): 11223 – 11231.
- [36] 桑建国, 李启泰. 小尺度地形引起的切变重力波[J]. 气象学报, 1992, 50(2): 227 – 231.
- [37] KCKERMANN S D, PREUSSE P. Global measurements of stratospheric mountain waves from space[J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1534 – 1537.
- [38] 朱业玉, 潘攀, 张方. 河南大气稳定度的分布特征[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(1): 19 – 22.
- [39] 张云, 熊建刚, 万卫星. 中层大气重力波的全球分布特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1711 – 1717.
- [40] HOFFMANN L, ALEXANDER M J. Retrieval of stratospheric temperatures from atmospheric infrared sounder radiance measurements for gravity wave studies[J]. *Journal of Geophysical Research; Atmosphere*, 2009, 114(D7): 1291 – 1298.
- [41] 王宇虹, 徐国强. 青藏高原地形重力波拖曳的初步分析及数值模拟研究[J]. 气象学报, 2017, 75(2): 275 – 287.
- [42] UCCELLINI L W, KOCH S E. The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbances[J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(3): 721 – 729.
- [43] PLOUGONVEN R, TEITELBAUM H, ZEITLIN V. Inertia gravity wave generation by the tropospheric midlatitude jet as given by the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment radio soundings[J]. *Journal of Geophysical Research; Atmosphere*, 2003, 108(D21), doi:10.1029/2003JD003525.
- [44] FRITTS D C. The transient critical-level interaction in a Boussinesq fluid[J]. *Journal of Geophysical Research; Oceans*, 1982, 87(C10): 7997 – 8016.
- [45] FRITTS D C. Gravity wave saturation in the middle atmosphere: A review of theory and observation[J]. *Review of Geophysical*, 1984, 22(3): 275 – 308.
- [46] GALL R L, WILLIAMS R T, CLARK T L. Gravity waves generated during frontogenesis[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 45(15): 2204 – 2220.
- [47] FRITTS D C, LUO Z. Gravity wave excitation by geostrophic adjustment of the jet stream. Part I: two-dimensional forcing[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1992, 49(8): 681 – 697.
- [48] ZHANG F Q, DAVIS C A, KAPLAN M L, et al. Wavelet analysis and governing dynamics of a large-amplitude gravity-wave event along the East Coast of the United States[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(577): 2209 – 2245.
- [49] ZHANG F Q, WANG S G, PLOUGONVEN R. Uncertainties in using the hodograph method to retrieve gravity wave characteristics from individual soundings[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): 373 – 374.
- [50] UCCELLINI L W. A case study of apparent gravity waves initiation of severe convective storms[J]. *Monthly Weather Reviews*, 1975, 103(6): 497 – 513.
- [51] LINDZEN R S. Stability of a Helmholtz velocity profile in a continuously stratified infinite Boussinesq fluid applications to clear air turbulence[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31(6): 1507 – 1514.
- [52] PFISTER L, SCOTT S, LOEWENSTEIN M, et al. Mesoscale disturbances in the tropical stratosphere excited by convection: Observation and effects on the stratospheric momentum budget[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50(8): 1058 – 1075.
- [53] PFISTER L, CHAN K R, BUI T P, et al. Gravity waves generated

- by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: A case study [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 1993, 98(D5):8611 – 8638.
- [54] PIANI C, DURRAN D, ALEXANDER M J, et al. A numerical study of three – dimensional gravity waves triggered by deep tropical convection and their role in the dynamics of the QBO[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(22):3689 – 3702.
- [55] CLARK T L, HAUF T, KUETTNER J P. Convectively forced internal gravity waves: Results from two – dimensional numerical experiments[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1986, 112(474):899 – 925.
- [56] MILLER M J, PALMER T N, SWINKBANK R. Parameterization and influence of subgridscale orography in general circulation and numerical weather prediction models[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1989, 40(1):84 – 109.
- [57] FOVELL R, DURRAN D, HOLTON J R. Numerical simulations of convectively generated stratospheric gravity waves[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1992, 49(16):1427 – 1442.
- [58] 陶诗言. 有关暴雨分析预报的一些问题[J]. *大气科学*, 1977, 1(1):66 – 74.
- [59] 木村龟治. 地球流体力学入门[M]. 东京:东京出版社, 1983.
- [60] 赵玉春. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究[J]. *大气科学*, 2011, 35(1):81 – 94.
- [61] 李麦村. 飊线形成的非线性过程[J]. *中国科学 A 辑:数学*, 1976(6):592 – 601.
- [62] 李麦村. 重力波对特大暴雨的触发作用[J]. *大气科学*, 1978, 2(3):201 – 209.
- [63] 丁德刚, 王树芬. 相向而行的重力波与暴雨[J]. *大气科学*, 1994, 18(4):451 – 455.
- [64] 程胡华. 晋西北地区一次雷雨天气过程中重力波参数演变特征[J]. *干旱气象*, 2016, 34(5):811 – 819.
- [65] 陈秋士. 惯性波的对流不稳定和台风形成初期阶段的物理分析[J]. *气象学报*, 1964(4):433 – 442.
- [66] WILLOUGHBY H E. A possible mechanism for the formation of hurricane rainbands [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(5):838 – 848.
- [67] 李麦村. 海气相互作用的随机 – 动力理论[J]. *海洋学报(中文版)*, 1981, 3(3):382 – 389.
- [68] 李麦村. 大气中飊线形成的非线性过程与 KDV 方程[J]. *中国科学 A 辑:数学*, 1981(3):341 – 350.
- [69] 李志楠, 郑新江, 赵亚民, 等. 9608 号台风低压外围暴雨中尺度云团的发生发展[J]. *热带气象学报*, 2000, 16(4):316 – 326.
- [70] 徐祥德, 张胜军, 陈联寿, 等. 台风涡旋螺旋波及其波列传播动力学特征:诊断分析[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(1):33 – 41.
- [71] 吴建飞. 热带气旋重力波的激发和传播机制研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.
- [72] BRETHERTON F P. Momentum transport by gravity waves[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1969, 95(404):213 – 243.
- [73] HOLTON J R. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, 39(4):791 – 799.
- [74] 黄荣辉. 平流层与中间层大气动力学的研究[J]. *大气科学*, 1985, 9(4):413 – 422.
- [75] VINCENT R A, ALEXANDER M J. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: An observational study of seasonal and interannual variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 105(D14):17971 – 17982.
- [76] ALEXANDER M J, VINCENT R A. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: A model study of seasonal and interannual variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D14):17983 – 17993.
- [77] HOLTON J R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(10):2497 – 2507.
- [78] 吴少平, 易帆. 三维可压大气中重力波波包非线性传播的数值模拟[J]. *中国科学 E 辑:技术科学*, 2002, 32(2):176 – 183.
- [79] 陈丹, 陈泽宇, 吕达仁. 台风“麦莎”(Matsa)诱发平流层重力波的数值模拟[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2011, 41(1):1 – 9.
- [80] 陈丹, 陈泽宇, 吕达仁. 台风重力波的谱结构和动量通量特征分析[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2013, 43(5):874 – 882.
- [81] 熊建刚, 易帆, 李钧. 中层大气 Rossby 波与惯性重力波的非线性相互作用(I)相互作用方程[J]. *地球物理学报*, 1995, 38(2):150 – 157.
- [82] ERN M, TRINH Q T, KAUFMANN M, et al. Satellite observations of middle atmosphere gravity wave activity and dissipation during recent stratospheric warnings[J]. *Atmosphere Chemistry & Physics*, 2016, doi:10.5194/acp-2016-276.
- [83] ZHANG S D, YI F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114°E) China[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(3):665 – 673.
- [84] SWALES D J, YOUNG G S, SIKORA T D. Synthetic aperture radar remote sensing of shear – driven atmospheric internal gravity waves in the vicinity of a warm front [J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(6):1872 – 1882.
- [85] 徐凯, 姚志刚, 韩志刚, 等. 临近空间重力波强扰动的卫星观测研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(1):66 – 74.
- [86] 魏栋, 田文寿, 陈泽宇, 等. 青藏高原上空 UTLS 区域一次地形重力波过程中的物质上传[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(3):791 – 802.
- [87] ZHANG F. Generation of mesoscale gravity waves in the upper – tropospheric jet front system [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(4):440 – 457.
- [88] 王丽吉, 杨程. 热带平流层多尺度波动分离方案的研究:多站点高分辨率无线电探空联合[J]. *气象学报*, 2018, 76(1):62 – 77.
- [89] POWERS J G, REED R J. Numerical model simulation of the large – amplitude mesoscale gravity – wave event of 15 December 1987 in the central United States [J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(8):2285 – 2308.
- [90] KIM Y J, ARAKAWA A. Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 52(11):1875 – 1902.
- [91] LANE T P, REEDER M J, CLARK T L. Numerical modeling of gravity wave generation by deep tropical convection [J]. *Journal of*

- the Atmospheric Sciences, 2001, 58(10):1249 - 1274.
- [92] 覃卫坚, 寿绍文, 高守亭, 等. 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5):1039 - 1049.
- [93] 李子良. 三维多层流动过孤立山脉产生的山脉重力波的数值试验[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(3):351 - 356.
- [94] 艾凯, 郑益群, 陈浩伟. WRF 模式中地形重力波参数化方案应用及不同拖曳力试验[J]. 干旱气象, 2016, 34(1):125 - 135.

## Main Research Progress on Gravity Waves in the Troposphere

CHEN Wei<sup>1</sup>, LI Yueqing<sup>2</sup>

- (1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225, China;  
2. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Heavy Rain and Drought - Flood Disaster in Plateau and Basin  
Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Gravity wave is a common phenomenon in the atmosphere, and it plays an important role in the transmission of atmospheric momentum and energy and the stimulation of mesoscale weather systems. This article reviews the progress of inertia - gravity wave research at home and abroad since the early 1960s, and briefly summarizes the main research achievement from the following aspects: the definition and property of inertia - gravity waves, excitation source, detection means and research methods and the impact of gravity waves on atmospheric circulation and weather system such as rainstorm and typhoon. Furthermore, the possible problems in gravity wave research field and the research orientation in the future are preliminarily discussed.

**Key words:** inertia - gravity wave; review of research progress; prospect