

冬季中层顶区域重力波谱特性^{*}

吴永富 徐寄遥

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

使用 DYANA 试验期间 19 枚 Chaff 火箭在 81—105 km 高度范围测量的高分辨率水平速度数据, 研究标量水平速度垂直波数谱在冬季的谱特性. 分析结果显示冬季平均垂直波数谱有 -3.02 的谱斜率, 这与各种饱和理论预测的 -3 谱斜率很一致, 提供了饱和重力波谱在冬季的观测证据. 与各种饱和理论比较表明, 这个冬季谱的谱振幅与线性饱和理论预测的谱振幅完全一致, 但是总是小于非线性饱和理论预期的、激光雷达测量的谱振幅. 这个冬季谱与最近得到的夏季饱和重力波谱一道, 共同表明我们的观测结果支持了线性饱和理论, 而不管季节, 地理位置和高度范围的不同. 由这个冬季谱估计的盛行垂直波长为 15 km, 它比夏季的 12.8 km 盛行垂直波长稍大.

关键词 水平速度; 饱和重力波谱; 饱和理论; 盛行垂直波长

1 引言

过去 20 年间, 重力波和重力波谱已被广泛研究. 为解释水平速度垂直波数谱, 研究者提出了几种理论, 包括重力波谱的“普适”理论^[1]和饱和理论^{[2]—[6]}. 另外, 观测也表明大气水平速度扰动谱的谱形状有近似的“普适”和饱和特性^{[7]—[11]}. 尽管这些速度谱具有明显的“普适”和饱和特性, 但是这些水平速度谱的大部分仅仅来自一个较短的观测时间. 对重力波谱季节特性的了解, 目前还是较少的. 因此, 大气扰动谱的统计特性和变率仍然是正在研究的课题^{[12],[13]}. 虽然激光雷达也提供水平速度谱的季节特性^[14], 但是这些速度谱是在一定假设下从大气密度谱导出的, 而不是直接从速度场得到, 这会导致不确定性. 况且, 这些导出的速度谱还决定于 Brunt-Väisälä 频率平方 (即 N^2), 因此还比必须进行同时的 N (即温度 T) 测量. 在中层顶区域, 同时的速度和温度测量在目前还是相当缺乏的.

Chaff 火箭能提供垂直分辨率为 25 m 的水平速度数据. 在一篇最近发表的文章中, 我们使用 MAC/SINE, Sodium 88 和 NLC 试验中的数据, 讨论了水平速度谱在极区夏季中层顶区域的平均特性^[13]. 本文使用 DYANA (DYNamics Adapted Network for Atmosphere) 试验中获得的数据, 讨论水平速度谱在中纬度冬季中层顶区域的平均特性.

^{*} 国家自然科学基金项目 (40225011), 国家重点基础研究项目 (G2000078407) 和中国科学院支持项目 (KZCX3-SW-217) 共同资助

2003-09-22 收到原稿, 2004-07-09 收到修定稿

2 数据的获得和谱分析

在1990年冬季的DYANA试验中, 19枚Chaff火箭在法国的Biscarrosse(44°N, 1°W)成功发射, 试验的科学目标和某些观测结果文献[15]已有叙述. 当Super-Loki火箭接近顶点时, 火箭释放Chaff, 两部高精度雷达自动跟踪Chaff, 并完成每秒20组位置坐标测量. 在这些测量中, 使用多项式平滑方法[16], 得到81—105 km高度范围、高度分辨率为25 m的水平速度剖面. 图1(a)给出了水平速度剖面的一个例子. 这个剖面表明, 有两个小尺度、大振幅波存在, 一个在88 km高度以下, 纬向速度剖面有一约3 km的表观垂直波长, 另一个在87 km高度以上, 经向速度剖面有一约9 km的表观垂直波长. 与潮汐波相比, 这两个小尺度波的波长显得太短, 认为是重力波的垂直尺度范围. 为研究这两个波的偏振特性, 我们将图1(a)中的纬向和经向速度分量在去掉线性趋势项后的速度矢量端迹表示在图1(b)中. 图1(b)显示了两个椭圆形运动, 一个位于88 km高度以下, 从椭圆的长轴与短轴比, 这个波的本征周期约为3 h; 另一个位于87 km高度以上, 从椭圆的长轴与短轴比, 这个波的本征周期约为8 h. 在整个测量高度范围内, 这两个波的水平速度矢量运动方向随高度的增加而作顺时针运动, 这可以被认为是两个向上传播的惯性重力波[17]. 其他每发火箭也有类似情况, 这里不再一一表述. 这表明本文讨论的是惯性重力波.

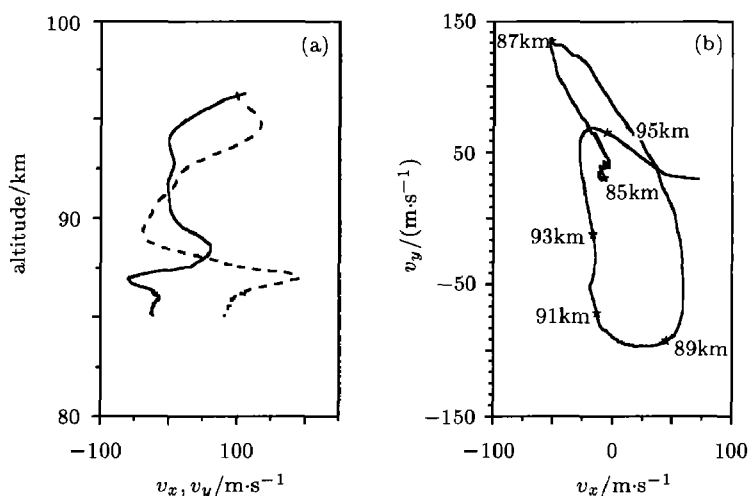


图1 从Chaff火箭得到的水平速度剖面(a)和水平速度矢量端迹图(b)

Fig.1 Horizontal velocity profile derived from a Chaff rocket (a) and hodograph of the horizontal velocity vectors. The solid and dashed lines show the zonal and meridional components.

因为各种饱和理论[2]—[6]都预期水平速度垂直波数的谱振幅与 N^2 成正比, 所以温度剖面的测量很重要. 在这次试验期间, 有19枚Falling Sphere火箭从Biscarrosse发射, 提供了30—95 km高度范围温度数据[15]. 然而, 在95—105 km高度范围的温度没有测量, 因此这个高度范围的温度取自COSPAR国际参考大气(1986)模式. 最后得到的平均温度和由平均温度剖面计算的Brunt-Väisälä频率平方剖面分别示于图2(a)和2(b). 从 N^2 剖面, 得到81—105 km高度范围(相当于19个水平速度谱的高度范围) N^2 的加权平均值为

$4.55 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$. 取加权是为了减少 95 km 以上高度的模式温度对 N^2 的影响.

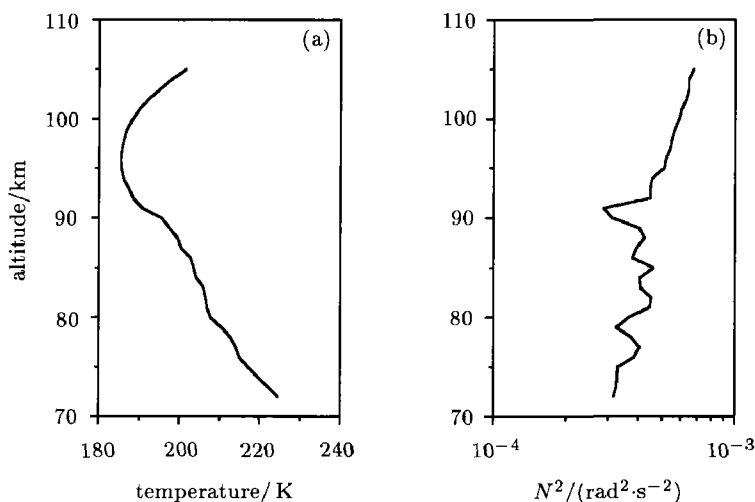


图 2 从 19 枚 Falling sphere 火箭得到的平均温度 (a) 和 Brunt-Väisälä 频率平方 (b) 剖面
Fig.2 Profiles of (a) mean temperature obtained from 19 falling sphere rockets and (b) Brunt-Väisälä frequency squared

3 观测结果和讨论

我们首先按文献 [13] 叙述的谱分析步骤计算每个标量水平速度 $v_x = [u^2 + v^2]^{1/2}$ 剖面的功率谱, 然后对 19 个标量水平速度功率谱作算术平均. 计算结果表示在图 3(a) 和图 3(b). 图 3(a) 表明每发火箭测得的功率谱是不同的, 在波数 $7.8 \times 10^{-5} - 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内, 拟合的谱斜率在 -2.66 到 -3.78 之间变化, 拟合的谱振幅在波数 $m = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 处, 在 5534 到 $491012 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} / \text{m}^{-1}$ 之间变化, 清楚显示这些谱在时间上的变率. 然而, 图 3(b) 的平均谱, 由于是 19 个个别谱的平均, 表明了相当程度的平滑和连续. 因此, 它可以近似看成冬季的平均谱. 这个平均谱, 在波数 $7.8 \times 10^{-5} - 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内, 拟合的谱斜率为 -3.02 , 这个谱斜率与各种饱和理论预期的 -3 谱斜率非常一致, 表明这个冬季谱是一个饱和重力波谱. 一篇最近的文章 [13], Chaff 火箭已经提供了饱和重力波谱在极区夏季的观测证据, 本文则进一步提供了饱和重力波谱在中纬冬季的观测证据.

虽然各种饱和理论都预期有 -3 的谱斜率, 但是, 由于讨论的物理机制不同, 它们预期的谱振幅却各不相同. 如 Weinstock 的扩散理论 [4] 预期的谱振幅要比线性饱和理论 [2],[3] 预期的谱振幅约大 4 倍. 因此, 正确确定饱和谱的谱振幅, 能够提供一种重要试验来验证这个冬季谱与哪个饱和理论更接近.

首先考虑线性饱和理论, 这个理论的谱密度由下式给出:

$$F^s(m) = N^2 / 6m^3 \quad (1)$$

式中 N 为浮力频率, 已由图 2(b) 给出, m 为垂直波数. 图 3(b) 中的虚线表示 $N^2 = 4.55 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ 时的线性饱和理论谱. 从表观上看, 这个冬季谱与线性饱和理论有好

的一致。但是,为能定量地将观测谱与不同饱和理论谱作比较,我们计算了在波数 $m = 2.5 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 处,这个冬季谱的谱振幅和不同饱和理论预期的谱振幅,结果列在表 1。为了比较,表 1 还列出了 MST 雷达, MU 雷达, 激光雷达和夏季的 Chaff 火箭测量值。从表 1 可以看出,我们的冬季谱,在波数 $m = 2.5 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 处的拟合谱振幅是 $1.3 \times 10^5 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} / \text{m}^{-1}$, 它与线性饱和理论预期的谱振幅完全一致,但是分别小于 Weinstock^[4], Hines^[5] 和 Gardner^[6] 的非线性饱和理论预期的 4.8×10^5 , 2.4×10^5 和 $3.0 \times 10^5 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} / \text{m}^{-1}$ 谱振幅。表 1 还表明, Smith 等^[8], Tsuda 等^[10] 和 Wu 等^[13] 使用 MST 雷达, MU 雷达和 Chaff 火箭在中层顶区域测量的平均谱振幅,在波数 $m = 2.5 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 处,分别为 2.0×10^5 , 1.4×10^5 和 $1.8 \times 10^5 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} / \text{m}^{-1}$, 这些谱振幅与我们的冬季谱比较一致。相反, Senft 等^{[14],[18]}, Hosteler^[19] 和 Collins 等^[20] 使用激光雷达在中层顶区域测量的平均谱振幅,在波数 $m = 2.5 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 处,分别为 4.4×10^5 , 3.1×10^5 , 3.7×10^5 和 $3.1 \times 10^5 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} / \text{m}^{-1}$, 这些谱振幅均大于我们冬季谱的谱振幅。但是,令人惊奇的是, Chaff 火箭, MST 雷达和 MU 雷达测量的平均谱振幅始终小于激光雷达测量的谱振幅,也小于各种非线性饱和理论的谱振幅。这些由 Chaff 火箭, MST 雷达和 MU 雷达测量的较小谱振幅与由激光雷达测量的较大谱振幅之间是否存在显著差异,我们用 F-试验作检验^[13]。根据表 1 中全部测量的谱振幅,我们有 $F = 40.27$ 以及自由度 $n_1 = 1$ 和 $n_2 = 6$, 在 5% 显著水平下,发现它们之间存在显著差异。因此,激光雷达与其他方法之间存在的测量上的不一致,需要作进一步的分析和研究。

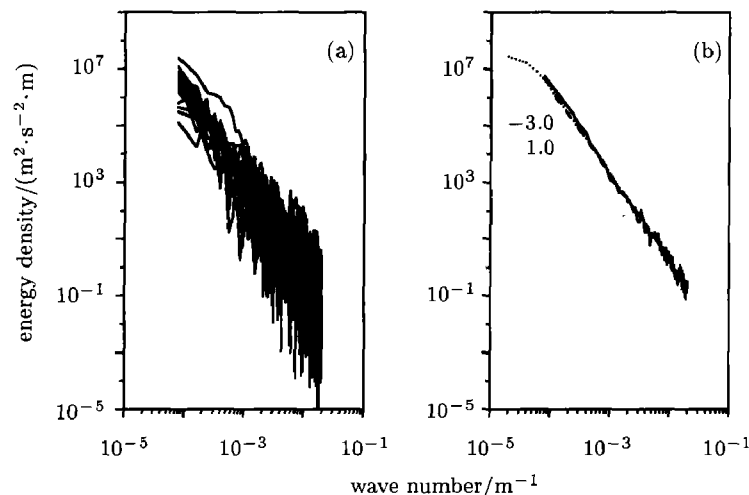


图 3 DYANA 试验期间得到的 19 个标量水平速度垂直波数谱 (a) 和它们的平均谱 (b)。图 3(b) 中的实线, 虚线和点线分别为观测谱, 当 $N^2 = 4.55 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ 时由公式 (1) 给出的线性饱和谱和 $m_* = 0.000084 \text{m}^{-1}$ 时由公式 (2) 给出的最佳拟合线

Fig.3 Superposition of 19 vertical wave number spectra of scalar horizontal velocity obtained during the DYANA campaign (a) and their mean spectrum (b). The solid, dashed, and dotted lines in Fig.3 (b) show the observed spectrum, the linear saturation spectrum given by (1) with $N^2 = 4.55 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$, and the best fit of a spectrum of the form given by (2) with $m_* = 0.000084 \text{m}^{-1}$, respectively

表 1 垂直波数谱的振幅比较

Table 1 Amplitude comparison of vertical wavenumber spectra

测量方法	高度范围 /km	波数 $m = 2.5 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 处 的谱振幅 $/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m})$	资料来源
Chaff 火箭	80—105	1.3×10^5	本文
Chaff 火箭	67—103	1.8×10^5	[13]
MST 雷达	82—88	2.0×10^5	[8]
MU 雷达	65—85	1.4×10^5	[10]
激光雷达	85—105	4.1×10^5	[14]
激光雷达	84—103	3.1×10^5	[18]
激光雷达	83—102	3.7×10^5	[19]
激光雷达	80—105	3.1×10^5	[20]
线性理论		1.3×10^5	[2], [3]
非线性理论		4.8×10^5	[4]
非线性理论		2.4×10^5	[5]
非线性理论		3.0×10^5	[6]

我们已经使用不同季节 (夏季), 不同地理位置 (69°N) 和不同高度范围 (67—103 km) 的 Chaff 火箭数据, 在极区夏季中层顶区域发现一个夏季饱和重力波谱 [13]. 这个夏季饱和重力波谱, 与本文发现的冬季饱和重力波谱一道, 共同表明我们的观测支持了线性饱和理论, 而不管季节, 地理位置和高度范围的不同.

最后, 我们从图 3(b) 这个冬季谱估计盛行垂直波长. 使用如下公式拟合观测谱 [21]:

$$F^s(m) \sim 1/[1 + (m/m_*)^3]. \quad (2)$$

其中, m_* 为特征垂直波数. 采用与文献 [13] 相同的方法估计盛行垂直波长, 我们发现, 当 $m_* = 0.000\,084 \text{m}^{-1}$ 时, 拟合线与观测谱最接近, 这相当于盛行垂直波长 $\lambda_* = 2^{1/3}/m_* \approx 15 \text{km}$. 这条拟合线用点线表示在图 3(b) 中. 这个 15 km 的盛行垂直波长比从极区夏季中层顶区估算的 12.8 km 略大.

4 结论

(1) 我们的观测谱在波数 $7.8 \times 10^{-5}—0.01 \text{m}^{-1}$ 范围内, 有 -3.02 的谱斜率, 这个谱斜率与各种饱和理论预期的 -3 谱斜率很一致, 提供了饱和重力波谱在冬季中层顶区的观测证据.

(2) 这个冬季谱的谱振幅与线性饱和理论预期的谱振幅完全一致, 但是总是小于非线性饱和理论和激光雷达测量的谱振幅.

(3) 虽然我们的冬季谱和夏季谱来自不同的季节, 不同的地理位置和不同的高度范围, 但是它们却都支持线性饱和理论.

(4) 从冬季谱得到 15 km 的盛行垂直波长, 它比夏季 12.8 km 的盛行垂直波长稍大.

致谢 感谢德国马普高层大气物理研究所的 Widdel 博士和德国 Rostock 大学的 Lubken 教授提供的火箭数据.

参 考 文 献

- [1] VanZandt T E. A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1982, **9**:575—578
- [2] Dewan E M, Good R E. Saturation and the “universal” spectrum for vertical profiles of horizontal scalar wind in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:2742—2748
- [3] Smith S A, Fritts D C, VanZandt T E. Evidence for a saturated spectrum of atmospheric gravity wave. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**:1404—1410
- [4] Weinstock J. Saturated and unsaturated spectra of gravity waves and scale dependent diffusion. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**:2211—2225
- [5] Hines C O. The saturation of gravity waves in the middle atmosphere, II. Development of Doppler-spread theory. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**:1360—1379
- [6] Gardner C S. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:20601—21622
- [7] Dewan E M, Grossbard N, Quesada A F, et al. Spectral analysis of 10 m resolution scalar velocity profiles in the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1984, **11**:80—83
- [8] Smith S A, Fritts D C, VanZandt T E. Comparison of mesospheric wind spectra with a gravity wave model. *Radio Sci.*, 1985, **20**:1331—1338
- [9] Fritts D C, Chou H G. An investigation of the vertical wavenumber and frequency spectra of gravity wave motions in the lower stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**:3610—3624
- [10] Tsuda T, Inoue T, Fritts D C et al. MST radar observations of a saturated gravity wave spectrum. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**:2440—2447
- [11] Wu Y F, Widdel H U. Observational evidence of a saturated gravity wave spectrum in the mesosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, **51**:991—996
- [12] Wang D Y, Ward W E, Solheim B H et al. Wavenumber spectra of horizontal wind and temperature measured wind WIND II, Part I: observational results. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2000, **62**:967—979
- [13] Wu Y F, Xu J Y, Widdel H U et al. Mean characteristics of the spectrum of horizontal velocity in the polar summer mesosphere and lower thermosphere observed by foil chaff. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2001, **63**:1831—1839
- [14] Sent D C, Gardner C S. Seasonal variability of gravity wave activity and spectra in the mesopause region at Urbana. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:17229—17264
- [15] Offermann D. The DYANA campaign: A survey studies of middle atmosphere dynamics. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**:1639—1658
- [16] Wu Y F, Widdel H U. Further study of a saturated gravity wave spectrum in the mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:9263—9272
- [17] Gossard R R, Hooke W H. Waves in the Atmosphere. New York: Elsevier, 1975. 111—121
- [18] Senft D C, Hostetler C A, Gardner C S. Characteristics of gravity wave activity and spectra in the upper stratosphere and upper mesosphere at Arecibo during early April 1989. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**:425—439
- [19] Hostetler C A, Gardner C S. Observations of horizontal and vertical wave number spectra of gravity wave motions in the stratosphere and mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:1283—1302
- [20] Collins R L, Tao X, Gardner C S. Gravity wave activity in the upper mesosphere over Urbana, Illinois: lidar observations and analysis of gravity wave propagation models. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**:1905—1926

- [21] Desaubies Y J F. Analytical representation of internal wave spectra. *J. Phys. Oceanogr.*, 1976, 6:976—981

CHARACTERISTICS OF GRAVITY WAVE SPECTRUM IN THE WINTER MESOPAUSE REGION

WU Yongfu XU Jiyao

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

This paper utilizes horizontal velocity data with high resolution measured by 19 chaff rockets in the 80—105 km region during the DYANA campaign to study characteristics of vertical wavenumber spectrum of scalar horizontal velocity in winter. Results show that the mean vertical wavenumber spectrum in winter has a spectral slope of -3.02 , which is quite consistent with the -3 spectral slope predicted by various saturation theories, therefore, this provides an observational evidence of a saturated gravity wave spectrum in winter. Comparison with various saturation theories shows that spectral amplitude of the winter spectrum is perfectly consistent with that spectral amplitude predicted by the linear saturation theory, but it is always lower than those spectral amplitudes predicated by the nonlinear saturation theories and measured by lidars. The winter spectrum, together with a saturated gravity wave spectrum in the polar summer obtained recently, shows collectively that our observational results support the linear saturation theory regardless of different seasons, different geographical locations, and different height regions. Dominant vertical wavelength of the winter spectrum is estimated to be 15 km, which is slightly larger than the dominant vertical wavelength of 12.8 km measured in summer.

Key words Horizontal velocity, Saturated gravity wave spectrum, Saturation theories, Dominant vertical wavelength.