

极区中层顶区域重力波谱的季节变化^{*}

吴永富^{1,2} 徐寄遥¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气学实验室 北京 100080)

²(武汉大学电子工程系)

摘要 使用 MAP/WINE 和 MAC/SINE 两次试验中测量的 25 m 高分辨率水平速度数据和 1 km 低分辨率温度数据, 研究极区中层顶区域重力波谱的季节变化. 温度的直接测量使计算的谱振幅和 Richardson 数更接近真实大气. 结果显示, 极区中层顶区域水平速度垂直波数谱的斜率和振幅存在相当大的变率, 这些大的观测变率用各种饱和模式及普适垂直波数谱不能解释. 然而平均垂直波数谱显示了明显的季节变化, 在夏季, 平均谱具有饱和特性; 在冬季, 平均谱具有非饱和特性. 这意味着饱和过程存在于夏季而不是冬季. 因此, 夏季比冬季应有更强的湍流. 这个结果与湍流季节变化的观测大致一致. 从 Brunt-Väisälä 频率 N 和水平风切变计算的 Richardson 数 Ri 剖面也显示出季节差异, $Ri < 1/4$ 的动力不稳定区出现在夏季, 而 $Ri > 0.4$ 的稳定区出现在冬季. 这些不稳定区与夏季谱结合很好, 而稳定区则与冬季谱结合很好.

关键词 Chaff 测量; 重力波谱; 季节变化; 动力不稳定性; 增强湍流

中图法分类号 P 351

Seasonal Variation of Gravity Wave Spectrum Near the Polar Mesopause

WU Yongfu^{1,2} XU Jiyao¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(School of Electronic Information, Wuhan University)

Abstract This paper utilizes horizontal velocity data with a high resolution of 25 m and temperature data with a low resolution of 1 km measured during the MAP/WINE and MAC/SINE campaigns to study seasonal variation of gravity wave spectrum near the polar mesopause. Direct measurement of the temperature allows accurate calculation of the spectral amplitude and Richardson number. Results show that there is considerable variability in the slope and amplitude of the vertical wavenumber spectra of the horizontal velocity near the polar mesopause, which is not consistent with the predictions of various saturation models and the universal vertical wavenumber spectrum. However, the mean vertical wavenumber spectra reveal a significant seasonal variation: the mean spectrum in summer has saturated features, whereas the mean spectrum in winter has unsaturated features. This implies that the saturation processes are present in summer rather than in winter. Enhanced turbulence layer can therefore be expected to occur in summer compared to winter. This result is in rough agreement with the seasonal variation of turbulent energy dissipation rates. Richardson

^{*} 国家自然科学基金项目 (40225011), 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000078407) 和中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-217) 共同资助

2004-09-30 收到原稿, 2005-03-09 收到修定稿

number Ri calculated from Brunt-Väisälä frequency N and horizontal wind shear S also reveals seasonal difference: dynamically unstable regions of Ri smaller than $1/4$ are observed in summer, whereas stable regions of Ri larger than 0.4 are observed in winter. These unstable regions are found to associate well with the summer spectrum, whereas stable regions are found to associate well with the winter.

Key words Chaff measurement, Gravity wave spectrum, Seasonal variation, Dynamical instability, Enhanced turbulence

1 引言

过去 20 年间, 重力波和它们的谱已被广泛研究. 观测研究已经表明不同大气层的水平速度扰动谱具有相当程度的普适及饱和特性^{[1]–[6]}. 然而, 这些水平速度谱仅仅来自几天的较短观测时间, 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重要课题^{[7],[8]}. 一方面, 虽然激光雷达已经提供了水平速度谱的季节特性^[9], 但是这些速度谱或者是间接测量(从密度谱导出), 或者是在中纬度测量, 对于高纬的直接测量, 目前还是相当缺乏的. 另一方面, 为了更好地从理论上解释这些观测谱, 几位学者提出了不同的理论模式. VanZandt 根据早期测量结果首先提出普适谱概念^[10], 受普适谱和观测谱的激励, Dewan 和 Smith 等提出线性不稳定理论^{[11],[12]}, 随后 Weinstock, Hines, Gardner 和 Dewan 提出非线性波扩散, 多普勒扩展, 扩散滤波和饱和串级理论^{[13]–[16]}. 尽管这些理论模式都预期垂直波数谱有 -3.0 的谱斜率, 但是这些理论模式所依据的基本物理过程仍然需要用观测数据检验^{[17]–[19]}.

MAP/WINE 和 MAC/SINE 两次野外试验, Chaff 和 Falling Sphere 火箭分别提供了垂直分辨率为 25 m 的极区冬季和夏季水平速度数据以及垂直分辨率为 1 km 的极区冬季和夏季温度数据. 本文的主要目的是使用这两次野外试验中获得的水平速度和温度数据, 研究水平速度谱在极区中层顶区域的季节特性, 用试验数据验证观测谱与哪个理论模式更接近, 并讨论极区中层顶区域的稳定性. 温度的直接测量使计算的谱振幅和大气稳定性更接近于真实大气.

2 数据的获得和谱分析

1984 年冬季和 1987 年夏季的 MAP/WINE 和 MAC/SINE 两次野外试验, 33 枚 Chaff 火箭和

68 枚 Falling Sphere 火箭在挪威的 Andøya (69°N , 16°E) 成功发射, 当 Viper-3 火箭接近顶点时, 火箭释放 Chaff, 一部高精度雷达自动跟踪 Chaff, 并完成每秒 50 组位置坐标测量. 从这些测量, 使用多项式平滑方法^[20], 得到 $71\text{--}90\text{ km}$ 和 $67\text{--}96\text{ km}$ 高度范围、高度分辨率为 25 m 的水平速度剖面. 表 1 给出两次野外试验中的 Chaff 火箭飞行概况.

因为各种饱和理论^{[11]–[16]}都预期水平速度垂直波数的谱振幅与 Brunt-Väisälä 频率的平方 N^2 成正比, 而 Richardson 数 Ri 也与 N^2 有关, 所以温度剖面的直接测量很重要. 在两次试验期间, 有 58 枚 Falling Sphere 火箭从 Andøya 发射, 其中 42 枚在 MAP/WINE 期间发射, 26 枚在 MAC/SINE 期间发射^{[21],[22]}, 提供了 $30\text{--}94\text{ km}$ 高度范围的温度数据. 然而, 在 $94\text{--}96\text{ km}$ 高度范围的温度没有测量, 因此这个高度范围的温度数据取自 COSPAR 国际参考大气 (1986) 模式. 最后得到的平均温度 T 和由平均温度剖面计算的 N^2 剖面分别示于图 1 和图 2. 从图 1(b) 和图 2(b) 所示的 N^2 剖面, 我们得到

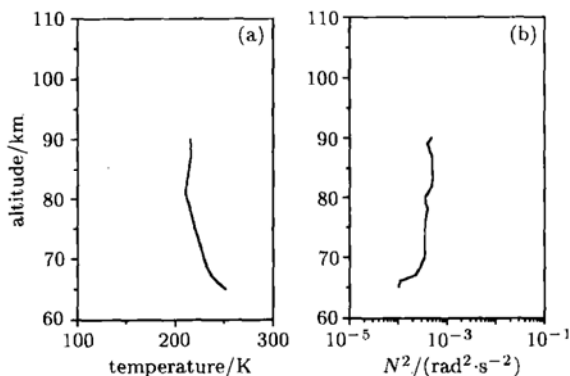


图 1 MAP/WINE 试验期间 42 枚 Falling Sphere 火箭测量的平均温度 T (a) 和 Brunt-Väisälä 频率平方 N^2 剖面 (b)

Fig.1 Mean temperature T (a) and Brunt-Väisälä frequency squared N^2 profiles (b) measured from 42 Falling Sphere rockets during the MAP/WINE campaign

表 1 Chaff 火箭飞行概要

Table 1 Summary of the Chaff rocket flights

火箭编号	日期和时间 /UT	测量高度范围 /km
MAP/WINE campaign in 1984		
M-C05	2052 06 January	89.9—77.0
M-C06	2210 06 January	84.1—78.7
M-C07	2018 13 January	86.7—78.0
M-C08	1131 21 January	83.8—72.5
M-C09	1308 21 January	81.4—72.2
M-C10	1349 21 January	84.7—80.3
M-C11	1731 31 January	85.7—72.9
M-C12	1920 31 January	84.9—72.6
M-C13	0216 09 February	87.9—77.6
M-C14	0151 10 February	84.8—71.8
M-C15	0420 10 February	84.3—71.5
M-C17	1238 18 February	86.0—76.5
MAC/SINE campaign in 1987		
S-C02	1230 22 June	82.7—74.3
S-C04	1120 24 June	92.0—82.5
S-C05	1153 24 June	93.0—80.1
S-C07	1240 24 June	94.6—82.4
S-C08	1333 24 June	95.6—83.9
S-C09	1127 26 June	93.3—81.0
S-C11	1244 26 June	94.0—82.5
S-C12	1336 26 June	85.1—80.0
S-C13	2128 01 July	93.9—83.0
S-C14	2215 01 July	76.8—70.5
S-C15	2334 01 July	92.8—87.3
S-C17	0852 14 July	92.8—80.0
S-C18	0943 14 July	94.4—81.6
S-C19	1019 14 July	79.5—66.8
S-C21	1203 14 July	93.1—80.3
S-C23	1306 15 July	94.8—83.6
S-C24	2030 15 July	93.8—79.5
S-C25	2117 15 July	94.8—83.5
S-C26	2201 15 July	94.7—81.9
S-C27	2230 15 July	93.7—80.5
S-C28	2254 15 July	90.8—80.5

71—90 km 和 67—96 km 高度范围 (相当于 12 个冬季水平速度谱和 21 个夏季水平速度谱的高度范围) N^2 的加权平均值分别为 4.1×10^{-4} 和 $5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$.

3 观测结果和讨论

对于极区夏季中层顶区域数据, 我们首先按文

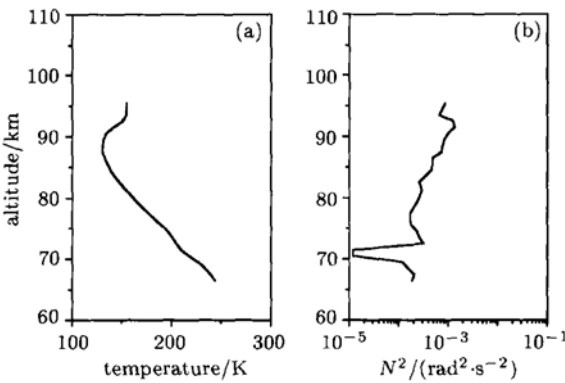


图 2 MAC/SINE 试验期间 26 枚 Falling Sphere 火箭测量的平均温度 T (a) 和 Brunt-Väisälä 频率平方 N^2 剖面 (b)

Fig.2 Mean temperature T (a) and Brunt-Väisälä frequency squared N^2 profiles (b) measured from 26 Falling Sphere rockets during the MAC/SINE campaign

献 [8] 叙述的谱分析步骤计算每个标量水平速度 $U = [u^2 + v^2]^{1/2}$ 剖面的功率谱, 然后对 21 个夏季标量水平速度功率谱作算术平均. 计算结果示于图 3. 图 3(a) 清楚地表明, 每发火箭测得的功率谱斜率和振幅是不同的, 为了能定量研究这些谱的变率, 我们计算波数为 $7.8 \times 10^{-5} \sim 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内的谱斜率和波数 $m = 1/4 \text{ km}^{-1}$ 处的谱振幅, 计算结果见表 2. 从表 2 可以看出, 平均谱斜率为 -3.02 , 最陡的谱斜率为 -3.70 , 最平的谱斜率为 -2.04 , 标准偏差为 0.09 ; 在波数 $m = 1/4 \text{ km}^{-1}$ 处, 平均谱振幅为 $1.77 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, 最大谱振幅为 $7.07 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, 最小振幅为 $1.97 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, 标准偏差为 $0.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, 清楚地表明了速度谱的谱斜率和谱振幅存在相当大的变率, 这些变率是现有理论模式不能解释的. 然而, 图 3(b) 的平均谱, 由于是 21 个个别谱的平均, 却显示出相当程度的平滑和连续. 这个平均谱, 在波数为 $7.8 \times 10^{-5} \sim 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内拟合的谱斜率为 -2.92 , 这个谱斜率与各种饱和理论预期的 -3 谱斜率很接近, 因此认为这个夏季谱是一个饱和重力波谱.

虽然各种饱和理论都预期有 -3 的谱斜率, 但由于讨论的物理机制不同, 所预期的谱振幅也各不相同. 例如, Weinstock 的扩散理论 [13] 预期的谱振幅比线性饱和理论 [11],[12] 预期的谱振幅约大 4 倍. 因此, 正确地确定饱和谱的谱振幅就能提供一种重要试验, 以验证该夏季谱与哪种饱和理论更接近.

首先考虑线性饱和理论. 这个理论的谱密度为

表 2 MAC/SINE 试验期间 21 枚 Chaff 火箭得到的谱斜率和谱振幅
Table 2 Spectral slope and amplitude obtained
from 21 Chaff rockets during the MAC/SINE campaign

火箭编号	斜率	振幅 / (m ³ ·s ⁻²)	火箭编号	斜率	振幅 / (m ³ ·s ⁻²)
S-C02	-2.04	2.23 × 10 ⁴	S-C04	-2.75	1.08 × 10 ⁵
S-C05	-3.13	1.37 × 10 ⁵	S-C07	-3.47	3.91 × 10 ⁴
S-C08	-3.40	1.10 × 10 ⁵	S-C09	-3.48	3.45 × 10 ⁴
S-C11	-3.12	5.07 × 10 ⁵	S-C12	-3.25	8.99 × 10 ⁴
S-C13	-3.70	5.30 × 10 ⁴	S-C14	-2.97	2.22 × 10 ⁵
S-C15	-3.28	1.40 × 10 ⁵	S-C17	-2.75	2.03 × 10 ⁵
S-C18	-2.47	1.97 × 10 ⁴	S-C19	-2.44	4.56 × 10 ⁵
S-C21	-3.18	9.53 × 10 ⁴	S-C23	-2.68	3.69 × 10 ⁵
S-C24	-3.11	4.24 × 10 ⁴	S-C25	-2.94	7.07 × 10 ⁵
S-C26	-3.43	1.25 × 10 ⁵	S-C27	-2.89	6.82 × 10 ⁴
S-C28	-2.85	1.70 × 10 ⁵			
平均斜率 -3.02(±0.09)			平均振幅 1.77(±0.40) × 10 ⁵		

$$F_U(m) = \alpha N^2 / m^3, \quad (1)$$

式中 N 为浮力频率, 已由图 2(b) 给出, m 为垂直波数, α 为系数. 文献 [12] 取 $\alpha = 1/6$, 而时间较近的文献 [16] 表明, 线性饱和模式 [11] 和饱和串级模式 [16] 也取 $\alpha = 1/6$, 因此我们将线性饱和模式和饱和串级模式简称为 S 或 D 模式. 图 3(b) 中的虚线表示 $\alpha = 1/6$ 和 $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 时的线性饱和模式或饱和串级模式. 其次, 考虑 Weinstock (简称 W 模式), Hines (简称 H 模式), Gardner (简称 G 模式) 提出的非线性饱和模式 [13]–[15]. Weinstock 提出的饱和谱密度为

$$F_U(m) = \frac{15}{4} \left[\frac{f}{N} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{N^2}{m^3}, \quad (2)$$

式中 f 为惯性频率. 图 3(b) 中的点划线表示 $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 和 $f = 2\Omega \sin 69^\circ$ 时的 W 模式. $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 时的 H 模式谱及 $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 和 $f = 2\Omega \sin 69^\circ$ 时的 G 模式谱分别位于虚线和点划线之间, 但是, 为了使图更清楚, 它们在图中没有表示出来. 该图清楚地表明观测谱与模式谱之间一致的程度, 即当线性饱和模式或饱和串级模式与观测谱一致时, 其他饱和模式却大大偏离了观测谱, 表明极区夏季中层顶区域观测到的重力波谱是一个与线性饱和模式或饱和串级模式一致的饱和重力波谱.

对于极区冬季中层顶区域数据, 我们采用与处理夏季数据相同的方法, 首先按文献 [8] 叙述的谱

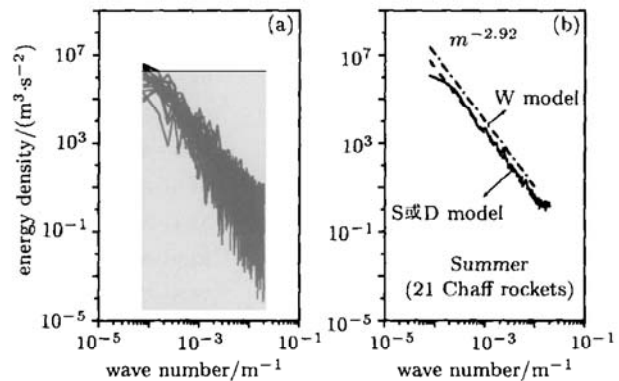


图 3 MAC/SINE 试验期间测量的 21 个水平速度垂直波数谱 (a) 及其平均谱 (b). 虚线表示 $\alpha = 1/6$ 和 $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 时由方程 (1) 表示的 S 或 D 模式, 点线表示 $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 和 $f = 2\Omega \sin 69^\circ$ 时由方程 (2) 表示的 W 模式

Fig.3 21 vertical wave number spectra of the horizontal velocity (a) and their mean spectrum (b) measured during the MAC/SINE campaign. The dashed line shows S or D model given by Eq.(1) with $\alpha = 1/6$ and $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$. The dot-dashed line indicates W model given by Eq.(2) with $N^2 = 5.9 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ and $f = 2\Omega \sin 69^\circ$

分析步骤计算每个标量水平速度 $U = [u^2 + v^2]^{1/2}$ 剖面的功率谱, 然后对 12 个冬季标量水平速度功率谱作算术平均. 计算结果见图 4. 12 个垂直波数谱的谱斜率和谱振幅给出在表 3. 从表 3 可以看出, 平均谱斜率为 -2.44, 最陡谱斜率为 -3.16, 最平谱斜

表 3 MAP/WINE 试验期间 12 枚 Chaff 火箭得到的谱斜率和谱振幅

Table 3 Spectral slope and amplitude obtained from 12 Chaff rockets during the MAP/WINE campaign					
火箭编号	斜率	振幅 / (m ³ ·s ⁻²)	火箭编号	斜率	振幅 / (m ³ ·s ⁻²)
M-C05	-3.16	1.37 × 10 ⁵	M-C06	-2.62	3.45 × 10 ⁴
M-C07	-2.73	3.52 × 10 ⁵	M-C08	-2.44	1.83 × 10 ⁵
M-C09	-1.99	2.20 × 10 ⁵	M-C10	-2.00	1.18 × 10 ⁴
M-C11	-2.04	5.33 × 10 ⁴	M-C12	-2.55	1.10 × 10 ⁶
M-C13	-2.56	5.62 × 10 ⁴	M-C14	-2.25	3.73 × 10 ⁵
M-C15	-2.11	4.77 × 10 ⁵	M-C17	-2.83	7.31 × 10 ⁴
平均斜率			平均振幅		
-2.44(±0.08)			2.56(±0.66) × 10 ⁵		

率为 -1.99, 标准偏差为 0.08; 在波数 $m = 1/4 \text{ km}^{-1}$ 处, 平均谱振幅为 $2.56 \times 10^5 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$, 最大谱振幅为 $1.10 \times 10^6 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$, 最小谱振幅为 $1.18 \times 10^4 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$, 标准偏差为 $0.66 \times 10^5 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$. 这些数据清楚表明冬季谱的谱斜率和谱振幅也存在相当大变率. 然而, 图 4(b) 表示的平均谱, 在波数 $7.8 \times 10^{-5} - 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内, 拟合的谱斜率为 -2.40, 图中虚线表示 $\alpha = 1/6$ 和 $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 时的线性饱和模式或饱和串级模式, 点划线表示 $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 和 $f = 2\Omega \sin 69^\circ$ 时的 W 模式谱. $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 时的 H 模式谱以及 $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 和 $f = 2\Omega \sin 69^\circ$ 时的 G 模式谱分别位于虚线和点划线之间, 但是, 为了使图更清楚, 它们在图中没有表示出来. 该图表明观测谱大大偏离了不同的饱和谱模式. VanZandt^[10] 在 Garrett 和 Munk^[23] 之后曾提出大气中的普适谱概念, 他认为大气中的垂直波数谱应该有 -2.4 的谱斜率 (Garrett 和 Munk 的海洋谱有 -2.5 的谱斜率). 我们的冬季平均谱, 在波数 $7.8 \times 10^{-5} - 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内, 拟合的谱斜率为 -2.40, 该谱斜率与大气中的普适谱的斜率完全一致, 因此认为极区冬季中层顶区域观测到的重力波谱是一个与普适谱一致的非饱和重力波谱.

比较图 3(b) 和图 4(b) 可以发现, 这两个图之间存在明显的季节变化, 在夏季, 平均垂直波数谱具有饱和特性, 而在冬季, 平均垂直波数谱具有非饱和特性. 这意味着饱和过程存在于极区的夏季, 而不是冬季. 因此, 夏季比冬季应有更强的湍流. 这个结果与湍流季节变化的观测比较一致^[24].

我们的观测已经表明, 一方面, 极区夏季中层顶区域的重力波谱是一个与线性饱和模式一致的饱和重力波谱. 另一方面, 线性饱和理论表明, 垂直

波数谱的饱和特性是由对流或动力不稳定引起的. 因此, 我们使用高度分辨率为 25 m 的水平速度数据和高度分辨率为 1 km 的温度数据讨论极区中层顶区域夏季和冬季大气的稳定性.

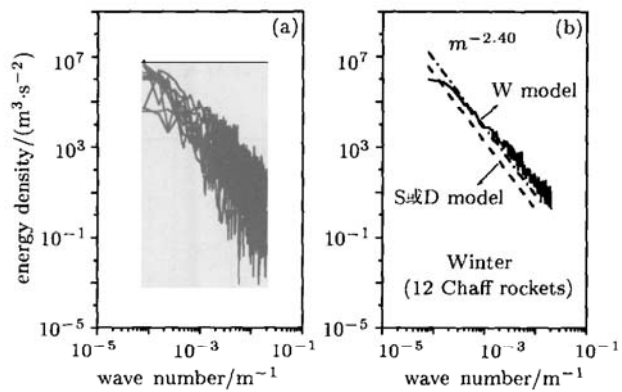


图 4 MAP/WINE 试验期间测量的 12 个水平速度垂直波数谱 (a) 及其平均谱 (b). 虚线表示 $\alpha = 1/6$ 和 $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 时由方程 (1) 表示的 S 或 D 模式. 点线表示 $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ 和 $f = 2\Omega \sin 69^\circ$ 时由方程 (2) 表示的 W 模式

Fig.4 12 vertical wavenumber spectra of the horizontal velocity (a) and their mean spectrum (b) measured during the MAC/SINE campaign. The dashed line shows S or D model given by Eq.(1) with $\alpha = 1/6$ and $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$. The dot-dashed line indicates W model given by Eq.(2) with $N^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ and $f = 2\Omega \sin 69^\circ$

衡量大气稳定性的一个重要参数是 Richardson 数 Ri , 由下式给出:

$$Ri = N^2 / [(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2], \quad (3)$$

式中, N^2 为 Brunt-Väisälä 频率平方, u 和 v 为水平风在纬向和经向的分量. 一般说来, 当 $Ri < 1/4$ 时, 大气动力是不稳定的; 当 $Ri < 0$ 时, 大气对流是不稳定的.

对夏季观测数据, 我们使用 3 次样条函数. 在 300 m 高度间隔内首先计算 $\partial u/\partial z$ 和 $\partial v/\partial z$, 并导出高度分辨率为 25 m 的水平风切变剖面, 然后将 21 个水平风切变剖面作算术平均, 并用 5 点滑动平均进行平滑, 以消除小尺度扰动. 计算的结果见图 5(a). 为增加平均切变剖面的可信度, 图 5(a) 中的切变剖面是 5 个或大于 5 个以上水平风剖面的平均. 其次, 由于水平风和温度数据的高度分辨率不同, 我们使用一个立方样条程序, 对图 1(b) 所示的 N^2 剖面按 25 m 高度进行内插, 就产生了垂直分辨率可以与水平速度相一致的 N^2 数据. 作为一种试验, 也可以使用图 1(b) 所示 N^2 剖面. 由这两种方法计算的 Ri 剖面差别很小. 为了计算上的方便, 本文使用内插的 N^2 剖面, 如图 5(b) 所示. 最后, 用公式 (3) 计算 Ri 剖面, 计算结果见图 5(c).

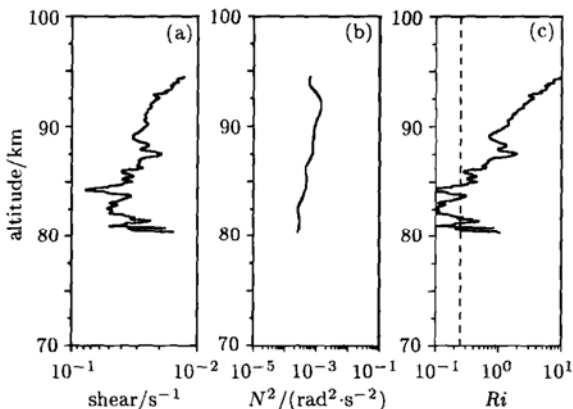


图 5 21 枚 Chaff 火箭在 MAC/SINE 试验期间测量的平均切变 (a), N^2 (b) 和 Ri 剖面 (c)

Fig.5 Mean shear (a), N^2 (b), and Ri profiles (c) measured from 21 Chaff rockets during the MAC/SINE

图 5 的主要特征如下.

(1) 图 5(a) 的平均切变表明, 在 84.3, 82.6, 81 和 80.6 km 高度, 最大平均水平风切变分别达到 0.077, 0.052, 0.05 和 0.035 s^{-1} , 这些平均切变值与最近在中纬观测到的约 50 s^{-1} 的切变值基本一致, 有些甚至更大 [25],[26], 表明极区夏季中层顶区域在某些高度上更为不稳定. 在这些大的平均切变的相应高度上, 图 5(b) 中的 N^2 值分别为 4.36×10^{-4} ,

2.60×10^{-4} , 2.75×10^{-4} 和 $2.68 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/s^2$. 这两个参数共同作用, 产生了如图 5(c) 所示 4 个 Ri 小于 1/4 的动力不稳定区, 表明极区夏季中层顶区域在这些高度上是动力不稳定的.

(2) 由于温度数据中缺乏超绝热递减率, 图 5(b) 所示的 N^2 剖面是一个非负剖面, 这一结果表明极区夏季中层顶区域大气不是对流不稳定的. 然而, 我们也指出, 温度数据中缺乏超绝热递减率有两种可能, 第一, 大气中确实不存在超绝热递减率. 第二, 超绝热递减率存在于大气中, 但是由于温度数据的分辨率较低而没有检测出来. 考虑到本文使用的温度数据的分辨率为 1 km, 因此, 第二种可能是存在的. 解决这一矛盾需要新的测量技术. 现在, 新的激光雷达能够测量垂直分辨率小于 100 m 的风和温度 [27], 如此的分辨率较好地解决了动力和对流不稳定的检测 [28],[29].

(3) 图 5(a) 中的水平风切变峰值与图 5(c) 中的最小 Ri 峰值之间存在一一对应关系. 相反, 在图 5(b) 和 5(c) 之间却没有如此清晰的关系, 说明最小 Ri 随高度的变化主要取决于水平风切变峰值.

我们的夏季数据已经表明, 图 3(b) 是一个与线性饱和模式一致的饱和重力波谱, 以及图 5(b) 缺乏超绝热递减率和图 5(c) 显示 4 个动力不稳定区, 这些观测表明夏季重力波谱是与切变引起的动力不稳定相结合的. 当然, 切变不稳定的发生不排除由于高分辨率温度数据引起的对流不稳定.

图 5(c) 显示的 4 个 Ri 小于 1/4 动力不稳定区分别位于 84.3, 82.6, 81 和 80.6 km 高度, 依据饱和机制, 在这些高度上, 夏季比冬季应有更强的湍流. 但文献 [24] 中的图 9 表明, 极区夏季湍流能量耗散率的峰值出在约 90 km 高度, 这个高度比我们观测到的不稳定层的高限 (84.3 km) 还要高大约 6 km. 并且我们观测到的不稳定层是分层的, 共有 4 层, 而文献 [24] 中的图 9 没有观测到湍流的层状结构. 一个可能的原因是文献 [24] 中的湍流能量耗散率的高度间隔为 1 km, 而我们的观测为 25 m. 因此, 需要更多的观测研究解决这些不一致.

对冬季观测数据, 我们采用与处理夏季数据相同的方法, 使用 3 次样条函数, 在 300 m 高度间隔内首先计算 $\partial u/\partial z$ 和 $\partial v/\partial z$, 并导出高度分辨率为 25 m 的水平风切变剖面, 然后将 12 个水平风切变剖面作算术平均, 并用 5 点滑动平均进行平滑, 以消除小尺度扰动. 其次, 对图 3(b) 所示的 N^2 剖面按 25 m 高度内插. 最后, 用公式 (3) 计算 Ri 剖面. 计

算结果示于图 6. 图 6(a) 中的切变剖面是 5 个或大于 5 个以上水平风剖面的平均, 图 6(a) 的最主要特征是小于是 0.03 s^{-1} 的较小切变存在于整个测量的高度范围内, 这个平均切变剖面与图 6(b) 所示的 N^2 剖面共同作用, 产生如图 6(c) 所示的 Ri 大于 0.4 的稳定区剖面, 认为极区冬季中层顶区域大气是较为稳定的. 这个稳定区剖面与图 4(b) 检测到的非饱和谱一道表明冬季重力波谱是与稳定层剖面相结合的.

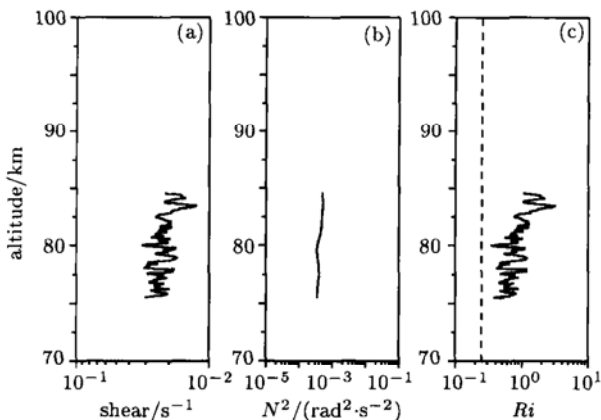


图 6 12 枚 Chaff 火箭在 MAP/WINE 试验期间测量的平均切变 (a), N^2 (b) 和 Ri 剖面 (c)

Fig.6 Mean shear (a), N^2 (b), and Ri profiles (c) measured from 12 Chaff rockets during the MAP/WINE

4 结论

(1) 我们使用水平速度和温度数据讨论了极区中层顶附近水平速度垂直波数谱的季节特性和大气稳定性, 并用这些数据验证了观测谱与哪个理论模式更接近. 温度的直接测量使计算的谱振幅和 Richardson 数更接近真实大气.

(2) 夏季谱和冬季谱都存在很大变率, 这些变率是现有理论模式不能解释的.

(3) 平均水平速度垂直波数谱存在明显的季节变化. 在波数 $7.8 \times 10^{-5} - 0.01 \text{ m}^{-1}$ 范围内, 夏季谱具有饱和谱特征, 而冬季谱具有非饱和谱特征. 这意味着饱和过程存在于夏季, 而不是在冬季. 因此, 夏季比冬季应有更强的湍流. 这个结果与湍流季节变化的观测结果大致一致.

(4) Richardson 数 Ri 剖面也显示季节差异. Ri 小于 $1/4$ 的动力不稳定区出现在夏季, 而 Ri 大于

0.4 的稳定区出现在冬季, 表明极区中层顶区域的重力波谱在夏季是与动力不稳定层相结合的, 而在冬季是与相对稳定层相结合的.

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 Lübken 教授提供的火箭数据.

参考文献

- [1] 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—683
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Fritts D C, Tsuda T, Sato T *et al.* Observational evidence of a saturated gravity wave spectrum in the troposphere and lower stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**:1741—1759
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Senft D C, Gardner C S. Seasonal variability of gravity wave activity and spectra in the mesopause region at Urbana. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:17 229—17 264
- [10] VanZandt T E. A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1982, **9**:575—578
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Weinstock J. Saturated and unsaturated spectra of gravity waves and scale dependent diffusion. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**:2211—2225

- [14] 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
- [15] Gardner C S. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:20 601—20 622
- [16] Dewan E M. Saturated-cascade similitude theory of gravity wave spectra. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 29 799—29 817
- [17] Gardner C S. Testing theories of atmospheric gravity wave saturation and dissipation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **56**:1575—1585
- [18] Gardner C S. Reply to Hines' comments on "Testing theories of atmospheric gravity wave saturation and dissipation". *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1998, **60**:663—665
- [19] Hines C O. Comments on the paper by C. S. Gardner, "Testing theories of atmospheric gravity wave saturation and dissipation". *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1998, **60**:655—662
- [20] Wu Y F, Widdel H U. Further study of a saturated gravity wave spectrum in the mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:9263—9272
- [21] Von Zahn U. The project MAP/WINE: an overview. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1987, **49**:607—620
- [22] Thrane E V. Studies of middle atmosphere dynamics: the research projects Middle Atmosphere Co-operation/Summer in Northern Europe (MAC/SINE), and MAC/EPSILON. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1990, **52**:815—825
- [23] Garrett C, Munk W. Space-time scales of internal waves: A progress report. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**:219—297
- [24] Lübken F J. Seasonal variation of turbulent energy dissipation rates at high latitudes as determined by in situ measurements of neutral density fluctuations. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:13 441—13 456
- [25] Hecht J H, Liu A Z, Bishop R L *et al.* An overview of observations of unstable layers during the Turbulent Oxygen Mixing EXperiment (TOMEX). *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D02S01, doi:10.1029/2002JD003123
- [26] Lui A Z, Roble R G, Hecht J H *et al.* Unstable layers in the mesopause region observed with Na lidar during the Turbulent Oxygen Mixing EXperiment (TOMEX) campaign. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, 2D02S02, Doi:10.1029/2002JD003056
- [27] Gardner C S, Papen G C. Mesospheric Na wind/temperature lidar. *Rev. Laser Eng.*, 1995, **23**: 131—134
- [28] Gardner C S, Zhao Y, Liu A Z. Atmospheric stability and gravity wave dissipation in the mesopause region. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2002, **64**:923—929
- [29] Zhao Y A, Liu A Z, Gardner C S. Measurements of atmospheric stability in the mesopause region at Atafire Optical Range, NM. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2003, **65**:219—232