

三维三层背风波的理论 and 数值研究

臧增亮^{1, 2} 张铭² 张瑰³

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 解放军理工大学理学院, 南京 211101

摘 要 建立了一个三维三层背风波的理论模型, 求出当 Scorer 参数满足中间层大, 上、下两层小的情况下, 三维三层背风波的理论波长和扰动分布。利用该理论模型对一个实际的背风波个例进行了计算, 得到的理论波长与实际波长十分接近。理论结果还表明波动的最大扰动振幅在中层附近。利用 ARPS (The Advanced Regional Prediction System) 模式对此个例模拟的结果表明, 模拟得到的波长、楔角及波动位相的分布都与理论模型的结果较为一致。

关键词 三维背风波 理论模型 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2007) 03-0547-06

中图分类号 P433

文献标识码 A

Theoretical and Numerical Research on Three-Dimensional Three-Layer Lee Wave

ZANG Zeng-Liang^{1, 2}, ZHANG Ming², and ZHANG Gui³

1 State Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101

3 Institute of Science, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101

Abstract The problem of stratified flow over a mountain has been the subject of observational, theoretical and numerical researches since the discovery of mountain lee waves at the beginning of last century. However, three-dimensional lee waves have received little study compared with the two-dimensional case. Except for some laboratorial or numerical simulations, a few theoretical works that have been known about are Scorer and Wilkinson (1956), Blumen and McGregor (1976), Marthinsen (1980), and Sang Jianguo (1997) etc. These works are mainly theoretical studies using two-layer model, and the results are not to be compared with observations. Because the inversion layer is often above the boundary layer, the vertical profile of static stability often appears in such a pattern, in which a small value appears in the boundary layer, a larger value in the inversion layer, and a smaller value again above the inversion layer. If the change of horizontal wind speed with height is not sharp, the Scorer parameter profile will also show this three-layer structure. In this paper, the authors will study the three-layer lee wave model in two-dimensional case.

Adopting the boundary condition of perturbation equation, the relation curve between the wavenumbers in the x and y directions, can be obtained. Then the disturbance solution of the trapped lee waves can be deduced by integra-

收稿日期 2006-01-10 收到, 2006-05-08 收到修改稿

资助项目 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室开放课题, 国家自然科学基金资助项目 40505023、40575023

作者简介 臧增亮, 男, 1977 年出生, 博士, 讲师, 主要从事中尺度动力学和数值模拟的研究。E-mail: zzlqxy@163.com

tion along the relation curve. Using this model, an actual lee-wave case was analyzed, which happened in Macquarie Island of Australia on 17 October 1985. The theoretical wavelength calculated by this model is 10.1 km, which is quite close to the observational wavelength (9.8 ± 0.6 km) estimated from the satellite image. The theoretical results show that the wavelength, phase and wedge angle are identical in the three layers, but the amplitudes are different, which is maximum on the middle layer and becomes smaller in the upper and lower layers. The case is simulated by ARPS (The Advanced Regional Prediction System) model, which is developed by the Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS) at the University of Oklahoma (Xue et al. 1995). The numerical simulated wavelength is about 10.0 km, which are consistent with the theoretical results. In addition, the simulated wedge angle and phase are all similar to the theoretical results. But the simulated results are all less than the theoretical results in a few percent. This may result from friction and damping and low grid resolution considered in the model.

Key words three-dimensional lee waves, theoretic model, numerical simulation

1 引言

过山气流的背风波问题是一个经典的气象和流体力学问题,在理论和模拟方面的研究内容十分丰富^[1~5],但大部分的理论研究都是在二维假设的前提下进行的,而对于三维背风波大多是建立在实验室模拟和数值模拟的基础之上^[6~10],对三维背风波的理论研究则很少。早期的三维理论研究均采用单层模式^[11, 12],假定大气的环境参数不随高度变化,但这种单层模式并不能得到通常所说的拦截背风波,即波动被局限在某一层大气内,在此层次之上和之下都衰减很快。Scorer 等^[13]首先利用一个二层的模式得到拦截背风波,发现波列以地形为中心,在一个楔形的区域内向下游传播,与水面上的船舶波十分类似,故三维背风波也常被称为大气内船舶波,这个区域的半角被称为楔角。之后,一些气象学家在此基础上从多个角度对二层模式中的三维背风波进行了探讨,例如 Sawyer^[14]研究了二层模式中水平风切变对波结构的影响,Blumen 和 Mgregor^[15]分析了二层大气中风切变对波动拖曳力的影响,桑建国^[16]则较为系统地讨论了三维波动中拦截波部分和非拦截波部分受地形、层结及风切变的影响情况。

虽然,二层模式可以有效地解释大气中内船舶波的产生机制,并可以用来进行一些理论和模拟研究,但实际的大气是复杂的,实际中很多三维背风波问题难以符合三维二层背风波理论模型的情况,所以二层理论模型在描述实际三维背风波问题时很难与观测结果相一致。在实际大气中,背风波出现时近地面层的层结稳定度常较小或为负值;在近地面层之上常有逆温层,这一层的稳定度较大;在逆

温层之上又减小,即稳定度在对流层中呈现三层结构。如果略去 Scorer 参数 $[l^2 = N^2/U^2 - (1/U)(\partial^2 U/\partial z^2)]$ 中后一项风切变的作用,则 Scorer 参数廓线也呈现三层的结构,即 Scorer 参数在中层较大,而在高、低层较小。此时,由于理论上求解的困难,故三层模式方面的研究很少, Sawyer^[14] 和 Smith^[5] 曾讨论过一种特殊的三层模式,令最高层和最低层的 Scorer 参数相同,且下面二层的厚度也相同,在该假定下推导出了与二层模式相似的数学模型 Marthinsen^[17] 则对最低层 Scorer 参数为零的情况进行了研究。由于这些特殊的三层模式对某些大气参数进行了限制,不方便对这些参数作敏感性试验,也难以与实际的背风波进行对比分析, Gjevik 等^[18] 曾指出,由于三维背风波的理论模式都是为一些极其特殊的波动类型而设计的,故理论研究成果与实际观测有较大的出入。我们曾在文献^[19] 中建立一个适用性较强的三层背风波模型,并讨论了边界层对背风波波长的影响^[20], 但仅对二维情况下的背风波进行了研究。本文在此基础上进一步研究三维情况下三层背风波模型的理论问题,并用实际观测个例和数值模拟验证该理论结果。

2 理论模型

绝热、无粘、定常的气流越过一个三维的山脉,其线性化的扰动方程^[14]可写为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} + (k_1^2 + k_2^2) \left(\frac{l^2}{k_1^2} - 1 \right) \xi = 0, \quad (1)$$

其中, ξ 为流线的扰动, k_1 、 k_2 分别表示水平和垂直方向上的波数, $l^2 = N^2/U^2$ 为大气的 Scorer 参数。

本文讨论 Scorer 参数分为三层的情况,为求解方便,把第一、二层的分界面放在 $z=0$ 处,第二、

三层的分界面放在 $z=h_2$ 处, 地面则取在 $z=-h_1$ 处。三层大气的 Scorer 参数则分别记为 l_1^2 、 l_2^2 、 l_3^2 , 并假定水平波数 k_1 满足:

$$l_1 \leq k_1 < l_2, \quad (2-1)$$

$$l_3 \leq k_1 < l_2, \quad (2-2)$$

则方程 (1) 的解可写为

$$\xi_1 = A_1 e^{\mu_1 z} + B_1 e^{-\mu_1 z}, \quad (3-1)$$

$$\xi_2 = A_2 \cos(\gamma_2 z) + B_2 \sin(\gamma_2 z), \quad (3-2)$$

$$\xi_3 = A_3 e^{\mu_3 z} + B_3 e^{-\mu_3 z}. \quad (3-3)$$

这里,

$$\mu_1 = \sqrt{(k_1^2 + k_2^2)(1 - l_1^2/k_1^2)}, \quad (4-1)$$

$$\mu_3 = \sqrt{(k_1^2 + k_2^2)(1 - l_3^2/k_1^2)}, \quad (4-2)$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(k_1^2 + k_2^2)(l_2^2/k_1^2 - 1)}. \quad (4-3)$$

与二维情况一样, 利用边界条件可以求出方程 (3.1)~(3.3) 各式中系数之间的关系, 设 $B_3=A$, 类似于文献[19]中的求法, 可得到方程 (1) 的解为

$$\begin{aligned} \xi_1 = & \frac{Ae^{-\mu_3 h_2 + \mu_1 z}}{2\mu_1 \gamma_2} [(\mu_1 \mu_3 + \gamma_2^2) \sin(\gamma_2 h_2) + \\ & (\mu_1 \gamma_2 - \mu_3 \gamma_2) \cos(\gamma_2 h_2)] + \\ & \frac{Ae^{-\mu_3 h_2 - \mu_1 z}}{2\mu_1 \gamma_2} [(\mu_1 \mu_3 - \gamma_2^2) \sin(\gamma_2 h_2) + \\ & (\mu_1 \gamma_2 + \mu_3 \gamma_2) \cos(\gamma_2 h_2)], \end{aligned} \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \xi_2 = & \frac{Ae^{-\mu_3 h_2}}{\gamma_2} [\mu_3 \sin(\gamma_2 h_2 - \gamma_2 z) + \\ & \gamma_2 \cos(\gamma_2 h_2 - \gamma_2 z)], \end{aligned} \quad (5-2)$$

$$\xi_3 = Ae^{-\mu_3 z}. \quad (5-3)$$

在地面 $z=-h_1$ 处, $\xi_1=0$, 利用 (5-1) 式可得:

$$\cot(\gamma_2 h_2) + \frac{(\mu_1 \mu_3 / \gamma_2) - \gamma_2 \tanh(\mu_1 h_1)}{\mu_1 + \mu_3 \tanh(\mu_1 h_1)} = 0. \quad (6)$$

虽然 (6) 式和二维的三层模式得到的方程形式^[19]是相同的, 但实际上, 在此由于 μ_1 、 μ_3 、 γ_2 中都包含 k_1 、 k_2 两个未知数, 故不能像二维中那样得到满足方程的唯一波解, 而是在 k_1 、 k_2 的相平面内得到一组或多组波解, 且 k_1 要在 (2) 式所约束的范围内。

设三维地形廓线为

$$H(x, y) = h_m \frac{a^2}{x^2 + a^2} \frac{b^2}{y^2 + b^2}, \quad (7)$$

其中, h_m 为山脉高度, a 为山脉在 x 方向上的半宽, b 为山脉在 y 方向上的半宽。利用 Fourier 积分 $H(x, y)$ 还可以表示为

$$H(x, y) = \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} G(k_1, k_2) e^{i(k_1 x + k_2 y)} dk_1 dk_2, \quad (8)$$

其中,

$$G(k_1, k_2) = \begin{cases} h_m a b e^{-(ak_1 + tk_2)}, & k_2 > 0, \\ h_m a b e^{-(ak_1 - tk_2)}, & k_2 < 0, \end{cases} \quad (9)$$

则可利用二维中的处理方法, 得到三维背风波流扰动表达式为

$$\xi(z) = \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} G(k_1, k_2) \frac{\xi_z(k_1, k_2)}{\xi_{-h_1}(k_1, k_2)} e^{i(k_1 x + k_2 y)} dk_1 dk_2. \quad (10)$$

积分项中的 $\xi_z(k_1, k_2)/\xi_{-h_1}(k_1, k_2)$ 可由 (5) 式得到。对 k_1 积分并利用留数定理可得到波动项部分为

$$\begin{aligned} \xi(z) = & 2\pi \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} G(k_1, k_2) \frac{\xi_z(k_1, k_2)}{\frac{\partial}{\partial k_1} \xi_{-h_1}(k_1, k_2)} \\ & e^{i(k_1 x + k_2 y)} dk_2. \end{aligned} \quad (11)$$

将 (9) 代入上式, 得到:

$$\begin{aligned} \xi(z) = & -2\pi h_m a b \int_0^{\infty} \frac{\xi_z(k_1, k_2)}{\frac{\partial}{\partial k_1} \xi_{-h_1}(k_1, k_2)} e^{-(ak_1 + tk_2)} \\ & \sin(k_1 x + k_2 y) dk_2 - 2\pi h_m a b \int_{-\infty}^0 \frac{\xi_z(k_1, k_2)}{\frac{\partial}{\partial k_1} \xi_{-h_1}(k_1, k_2)} \\ & e^{-(ak_1 - tk_2)} \sin(k_1 x + k_2 y) dk_2, \end{aligned} \quad (12)$$

其中, ξ_{-h_1} 表示 $-h_1$ 高度上的扰动。在对 (12) 式进行具体计算时, 可以用前面相平面内求出的波解代入后叠加作为积分的近似结果, 从而得到扰动数值解。

3 个例分析

下面, 应用上述模型对发生在澳大利亚 Macquarie 岛上的一次背风波个例进行分析。Macquarie 岛位于澳洲大陆的东南方向约 700 km, 岛屿近似呈东北-西南走向, 长约为 32 km, 宽约 4 km。沿岛屿的长轴方向上分布着数个小山峰, 高度约在 300~400 m 左右。该岛屿及附近海面是背风波的多发地区, 澳大利亚气象局曾多次在这里进行观测试验, 本文选用的资料取自文献[21]。这次背风波过程发生在 1985 年 10 月 17 日, 由卫星云图 (图略) 可见, 波列呈西北-东南走向, 与 Macquarie 岛的长轴近似垂直, 波长约为 9.8 ± 0.6 km, 从卫星云图上亮温的数值可以大致估计其所显示的高度约为 3.2 ± 0.2 km^[21]。

利用探空资料可以计算得到 Scorer 参数的廓线,从 Scorer 参数随高度的分布(图略)可见,Scorer 参数明显呈三层分布,最低层的 Scorer 参数最小,中间层的 Scorer 参数最大。但这里各层的 Scorer 参数并不是相等的,对各层进行平均可以得到一个符合理论模型的三层结构,其三层的 Scorer 参数及第一、二层的厚度列于表 1。表 1 中同时列出了地形参数。

将表 1 中的值代入(6)式,可求出 k_1 、 k_2 的关系曲线(图 1)。由图 1 可见, k_1 和 k_2 所构成的曲线有二组,分别定义为 S_1 (虚线)和 S_2 (实线), S_1 和 S_2 都关于 $k_2=0$ 对称,其中 S_1 与 $k_2=0$ 交点的位置在 0.618 km^{-1} ,这与二维模型中波数公式所计算出来的波数相一致,可见在三维模型中,包含了二维模式中的波解。

利用(12)式可得到各高度上的扰动分布,再用 $w=\overline{U}\partial\xi/\partial x$ 可得到各高度上的垂直速度场。为与下面的数值结果相比较,这里仅给出了垂直速度场。图 2 给出了 $z=-0.1 \text{ km}$ 、 $z=1.7 \text{ km}$ 、 $z=3.0 \text{ km}$ 三个层次上的扰动图像(注意:这里的 z 是理论模式中的高度, $z=0$ 为第一、二层的分界面),其分别对应于 Scorer 参数的三层。比较图 2a~c 可见,背风波在三个层次上的波长、位相等波结构是一致的,波长约为 10.1 km ,这与卫星云图中所显示的波长 $(9.8\pm 0.6 \text{ km})$ 十分接近。三个层次上波动

表 1 Macquarie 岛背风波个例的参数

Table 1 Parameters of the lee wave case occurring in Macquarie Island

l_1^2/km^{-2}	l_2^2/km^{-2}	l_3^2/km^{-2}	h_1/km	h_2/km	a/km	b/km	H_0/km
0.09	1.33	0.26	0.22	1.75	1	3	0.3

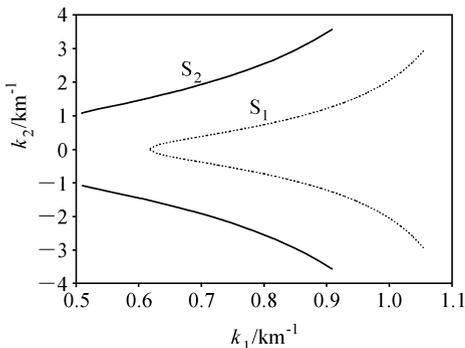


图 1 由(6)式求出的 k_1 、 k_2 的关系曲线

Fig. 1 Relation between k_1 and k_2 from Eq. (6)

的楔角也一致,约为 11.5° 。在这三个层次上波动振幅的强度则相差较大,在中间层($z=1.7 \text{ km}$)最大的垂直上升运动中心可达到 2.9 m/s ,而在下层($z=-0.1 \text{ km}$)仅为 0.37 m/s ,在最上层($z=3.0 \text{ km}$)则为 1.6 m/s 。其与二维模型得到的结果相一致^[19],即波动的最大振幅在中层附近,这也与本次个例的观测结果吻合^[21]。

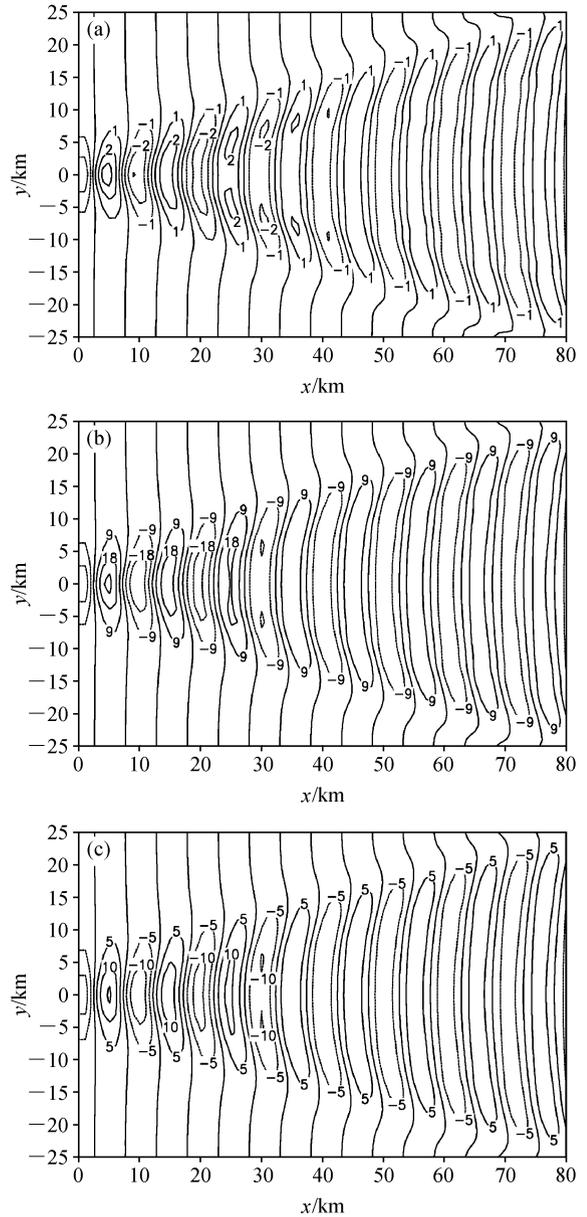


图 2 理论计算的垂直速度场(单位: 10^{-1} m/s): (a) $z=-0.1 \text{ km}$; (b) $z=1.7 \text{ km}$; (c) $z=3.0 \text{ km}$

Fig. 2 Theoretical value of vertical velocity field (10^{-1} m/s): (a) $z=-0.1 \text{ km}$; (b) $z=1.7 \text{ km}$; (c) $z=3.0 \text{ km}$

4 数值模拟

很多中尺度模式都把对理想背风波的模拟作为检验模式的标准, 同时也有很多气象学家把背风波发生时的背景场资料放入模式中, 从数值模拟的角度研究背风波^[22, 23], 但这些工作一般都是针对二维背风波进行试验的, 关于三维背风波数值模拟的文献并不多见^[24]。本文选用美国俄克拉荷马大学风暴分析预报中心研制的有限区域预报系统 (ARPS), 该模式以三维完全可压缩大气为研究对象, 采用地形追踪坐标系, 适用于研究尺度为几米到几百公里尺度的天气系统, 有关该模式的详细说明参见文献^[25]。该模式在中小尺度局地环流的模拟中有着广泛的应用^[26~29], 这里用来验证以上个例的理论结果。

本文采用的是 ARPS5.0 版本, 水平网格数 $N_x = 151$ 、 $N_y = 64$, 水平格距为 800 m, 垂直网格数 $N_z = 53$, 并采用不等距分层, 其最大间距为 250 m, 最小间距为 50 m。时间积分大时步取 10 s, 小时步取 2 s。模拟中不考虑湿过程和地表参数化。水平侧边界采用辐射开边界条件, 垂直方向在下边界考虑地形, 上边界设置为 Rayleigh 吸收阻尼层。模式初始场通过读取探空资料得到分析场, 为使探空资料中体现出 Scorer 参数在三层大气中取不同的数值, 考虑到环境场的平均风速 U 不随高度变化, 则可由层结参数 N^2 随高度的变化反算出位温垂直分布, 即有

$$\bar{\theta}(z) = \theta_0 e^{N_i^2 z/g}, \quad (13)$$

其中, $N_i^2 = l_i^2 U^2$ ($i=1, 2, 3$)。设 $U=10$ m/s, l_i 取表 1 中的数值, 由 (13) 式可得位温的垂直分布。ARPS 模式中理想地形的设置与 (7) 式一致, 地形的高度和半宽都取表 1 中的数值。但因 ARPS 模式中用的是地形坐标系, 只能给出修正的 z 坐标系中的物理量场, 故以下仅给出垂直速度的分布情况来与理论的结果进行比较。为方便比较, 以下高度 z 仍取理论模型中的标准。

图 3a 给出了 $z=1.7$ km 上的垂直速度场, 从图中可以看出, 模拟结果中背风波的波长约为 10 km, 与理论波长 (10.1 km) 及观测数据 (9.8 ± 0.6 km) 均基本相同。模拟结果中的楔角约为 12.4° , 与理论结果中的楔角 (11.5°) 也比较接近。图 3a 中扰动位相的分布与理论结果也基本一致, 但在强度上

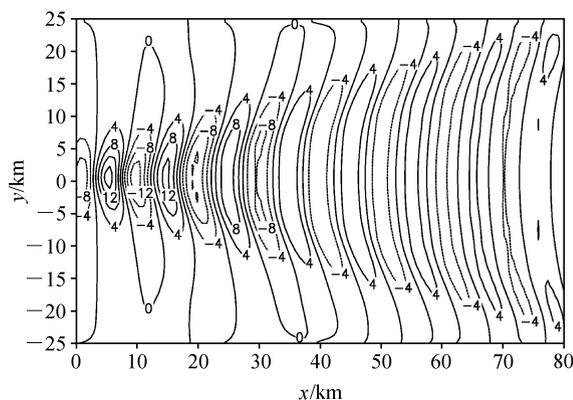


图 3 $z=1.7$ km 高度上 ARPS 模拟的垂直速度场 (单位: 10^{-1} m/s)

Fig. 3 Vertical velocity field (10^{-1} m/s) simulated by ARPS at $z=1.7$ km

比理论计算的结果要偏小。这是因为本文所用的水平和垂直分辨率相对地形而言比较粗, 模式实际计算时地形的高度和宽度都要比给定值小, 另外模式中的摩擦和阻尼作用也可能导致波动的强度减小。在 $z=-0.1$ km 和 $z=3.0$ km 高度上的模拟结果 (图略) 也与理论计算值接近, 但也存在强度偏小的问题。

5 结语

本文建立了三层模式下三维背风波 (大气内船舶波) 的理论模型, 并用此模型对一个实际的背风波个例进行了计算。理论计算的结果表明, 波动在各层中的波长、位相和楔角是相同的, 但振幅相差较大, 中间层次的振幅最大。理论波长与观测数据基本一致, 而振幅随高度的变化也与观测结果是吻合的。本文还利用 ARPS 模式对该个例进行了数值模拟, 模拟结果无论在波长、楔角还是波动位相的分布都与理论结果有较好的一致性。

最后要指出的是, 本文在这方面的的工作只是初步的, 对该理论模型还有许多值得改进和研究之处, 如水平风速的方向和大小可随高度变化, 还可以通过改变层结参数、地形参数等探讨大气内船舶波对这些参数的敏感性问题。

参考文献 (References)

- [1] Scorer R S. Theory of waves in the lee of mountains. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1949, **75**: 41~56
- [2] Corby G A, Wallington C E. Airflow over mountains: The

- lee-wave amplitude. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1956, **82**: 266~274
- [3] Atkinson B W. *Mesoscale Atmospheric Circulations*. London: Academic Press, 1981. 23~80
- [4] Grubišić V, Smolarkiewicz P K. The effect of critical levels on 3D orographic flows: Linear regime. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 1943~1960
- [5] Smith R B. *Environmental Stratified Flows*. R. Grimshaw, ed. Kluwer Academic Publishers, 2001. 121~159
- [6] Long R R. Some aspects of the flow of stratified fluids, II: Experiments with a two fluid system. *Tellus*, 1954, **6**: 97~115
- [7] Nance L B, Durran D R. A modeling study of nonstationary trapped mountain lee waves. Part I: Mean-flow variability. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 2275~2291
- [8] Ralph F M, Neiman P J, Keller T L, et al. Observations, simulations, and analysis of nonstationary trapped lee waves. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 1308~1333
- [9] 高守亭, 陈辉. 大地形背风波的转槽实验研究. *气象学报*, 2000, **58** (6): 653~665
Gao Shouting, Chen Hui. The studies of lee waves over a big topography through the rotating tank experiments. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (6): 653~665
- [10] Gao Shouting, Ping Fan. Laboratory studies of the stratified rotating flow passing over an isolated obstacle. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20** (7): 1094~1097
- [11] Wurtele G M. The three-dimensional lee wave. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1957, **29**: 242~252
- [12] Crapper G D. A three-dimensional solution for waves in the lee of mountains. *J. Fluid Mech.*, 1959, **6**: 51~76
- [13] Scorer R S, Wilkinson M. Waves in the lee of an isolated hill. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1956, **82**: 419~427
- [14] Sawyer J S. Gravity waves in the atmosphere as a three dimensional problem. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1962, **88**: 412~425
- [15] Blumen W, McGregor C D. Wave drag by three-dimensional mountain lee-waves in nonplanar shear flow. *Tellus*, 1976, **28**: 287~298
- [16] 桑建国. 大气中的内船泊波. *中国科学 (D辑)*, 1997, **27** (6): 560~565
Sang Jianguo. Inner ship waves of atmosphere. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 1997, **27** (6): 560~565
- [17] Marthinsen T. Three-dimensional lee waves. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 569~580
- [18] Gjevik B, Marthinsen T. Three-dimensional lee-wave pattern. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1978, **104**: 947~957
- [19] 臧增亮, 张铭. 三层模式背风波的理论研究. *气象学报*, 2004, **62** (4): 395~400
Zang Zengliang, Zhang Ming. Theoretical study on trapped lee waves on three-layer model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (4): 395~400
- [20] 臧增亮, 张铭, 吴海艳. 边界层 Scorer 参数对背风波波长的影响. *气候与环境研究*, 2006, **11** (2): 209~214
Zang Zengliang, Zhang Ming, Wu Haiyan. Analysis of the influence of the boundary layer on the wavelength of trapped lee waves. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (2): 209~214
- [21] Mitchell R M, Cechet R P, Turner P J, et al. Observation and interpretation of wave clouds over Macquarie Island. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1990, **116**: 741~752
- [22] Xue M, Thorpe A J. A mesoscale numerical model using the nonhydrostatic pressure-based sigma-coordinate equations: Model experiments with dry mountain flows. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 1168~1185
- [23] Chu C M, Lin Y L. Effects of orography on the generation and propagation of mesoscale convective systems in a two-dimensional conditionally unstable flow. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 3817~3837
- [24] 李子良. 水汽空间分布对大气船舶重力波影响的数值试验. *气象学报*, 2006, **64** (3): 308~314
Li Ziliang. Effects of moisture on atmospheric ship waves. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (3): 308~314
- [25] Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. ARPS Version 4.0 User's Guide. Center for Analysis and Prediction of Storms. University of Oklahoma, 1995, 311~322
- [26] 刘辉志, 洪钟祥, 桑建国. 对流边界层中过山气流的数值模拟. *气候与环境研究*, 2001, **6** (3): 305~311
Liu Hui zhi, Hong Zhongxiang, Sang Jianguo. Numerical simulation of the flow over terrain on the convective boundary layer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (3): 305~311
- [27] Fei Shiqiang, Tan Zhemín. On the helicity dynamics of severe convective storms. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 67~86
- [28] 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. *大气科学*, 2006, **30** (1): 93~107
Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 93~107
- [29] 贝耐芳, 赵思雄, 高守亭. 1998年“二度梅”期间武汉-黄石突发性暴雨的模拟研究. *大气科学*, 2003, **27** (3): 399~418
Bei Naifang, Zhao Sixiong, Gao Shouting. A numerical simulation of sudden heavy rainfall occurred in Wuhan and Huangshi during July of 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (3): 399~418