边界层 Scorer 参数对背风波波长的影响

臧增亮[1,2] 张 铭[2] 吴海燕[2]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 解放军理工大学气象学院，南京 211101

摘 要 利用一个中层 Scorer 参数较大，上、下层 Scorer 参数较小的 3 层背风波模型，讨论了边界层（下层）Scorer 参数对背风波波长的影响。结果表明，当边界层 Scorer 参数减小时，波长增大，反之波长减小；当中高层的 Scorer 参数较小时，背风波波长对边界层的 Scorer 参数敏感。利用该结果结合观测事实分析后发现，由于地表加热的日变化影响了边界层的 Scorer 参数，故造成了背风波波长在夜间缩短，在午后增加；此外还发现，因夏季的 Scorer 参数要比冬季小，这可导致波长变化率在夏季比冬季更大。

关键词 边界层 背风波 Scorer 参数

文章编号 1006-9585（2006）02-0209-06 **中图分类号** P433 **文献标识码** A

Analysis of the Influence of the Boundary Layer on the Wavelength of Trapped Lee Waves

ZANG Zeng-Liang[1,2], ZHANG Ming[2], and WU Hai-Yan[2]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100029
2 *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101

Abstract A three-layer theoretic model, in which the Scorer parameter is larger in the middle layer and smaller in the upper and boundary layer, is established. Using this model, the influence of the variation of the Scorer parameter in the boundary layer on the wavelength of trapped lee waves is studied. The conclusion shows that if the Scorer parameter in the boundary layer decreases, the wavelength will increase. On the contrary, the wavelength will decrease. And, the smaller the Scorer parameter in the middle and upper layer is, the more sensitive of the wavelength to the Scorer parameter of the boundary layer is. By use of theoretic conclusions and observational results, we found that the wavelength usually decreasing in the night and increasing in the afternoon is due to diurnal heating which effect wavelengths by the variation of the Scorer parameter in the boundary layer. We also found that changes in wavelength in summer may larger than that in winner since that the Scorer parameter is smaller in summer than that in winner.

Key words boundary layer, trapped lee wave, Scorer parameter

1 引言

在一定层结条件下气流越过山脉后可在其背风坡形成波动，特别当大气层结稳定度和风速满足某种条件时，这些波动在垂直方向上可被拦截，称为拦截背风波，这就是通常所说的背风波。背

收稿日期 2004-10-27 收到，2005-09-16 收到修定稿

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数值模拟国家重点实验室开放课题和国家自然科学基金资助项目 40575023、40505023

作者简介 臧增亮，男，1977 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：zzlqxxy@163.com

风波是一个经典的气象和流体力学问题，很多气象学者从理论分析、实验室模拟和数值模拟方面进行了广泛的研究[1~4]。早在20世纪40年代，Scorer[1]第一次把Scorer参数引入背风波的理论模型中，导出了经典的2层模式下背风波的波长公式和存在条件。后来的许多工作都把该参数作为衡量和研究背风波的一个重要参数，但这些工作大部分都建立在2层模式的基础上[3~5]。

2层模式给出了背风波发生的必要条件，若忽略风切变的影响，则要求低层的层结稳定度较大，而高层的较小。但在实际大气中，背风波发生时，边界层的层结稳定度经常较小，即Scorer参数也较小。以前的理论研究常略去边界层这部分层结呈弱稳定或不稳定的层次，而仅考虑边界层之上的Scorer参数的变化。虽然背风波并不出现在边界层中，但观测发现边界层对背风波仍有重要影响。很多探空记录表明，背风波波长的增长一般发生在午后，而波长缩短一般发生在夜间[6~9]。实际上由于边界层受日变化的影响较大，在一天以内其层结稳定度和风速都会有较大变化，相应地Scorer参数也有较大的改变，而中高层Scorer参数的改变则相对较小。对背风波这种中尺度环流而言，其在几小时或十几小时时间尺度内的演变必然会与边界层Scorer参数的变化密切有关。近年来，随着观测资料的丰富和数值模拟技术的发展，对背风波随时间演变方面的研究逐步深入[9]，但关于这方面的理论研究还不多见。虽然也有一些气象学家考虑到边界层Scorer参数较小的情况，在2层的基础上增加了一个中性边界层，即认为边界层的Scorer参数为0，或者将边界层的Scorer参数设计与最上层的相同；但这些理论模型并不能随意调整边界层的Socrer参数，不方便讨论边界层变化对背风波的影响[10~12]。

在文献［13］中我们设计了一个3层的理论模型，并用其来分析Scorer参数（l^2）对背风波波长的影响，对一个理想个例的研究表明，波长对下层（可看作边界层）Scorer参数的大小和符号都不敏感，但同时指出这一层次在计算背风波波长时不可忽略。本文中将把理论模型中对下层Scorer参数的约束条件放宽，使用更丰富的个例对该问题进行深入研究，并用计算和模拟的结果解释实际中的观测事实。

2 计算分析

在文献［13］中已得到3层背风波模型中背风波波数k（根据$L=2\pi/k$易求得波长L）与各层的Scorer参数满足以下关系式：

$$\cot(\gamma_2 h)+\frac{(\mu_1\mu_3/\gamma_2)-\gamma_2\,\mathrm{th}(\mu_1 h)}{\mu_1+\mu_3\,\mathrm{th}(\mu_2 h)}=0, \quad (1)$$

这里$\mu_i=\sqrt{k^2-l_i^2}$，$i=1, 2, 3$；l_i^2是各层的Scorer参数，下标1、2、3分别表示下、中、上3层；h则为下层与中层的厚度，k为背风波波数，$\gamma_2=\sqrt{l_2^2-k^2}=-i\mu_2$。且在本文中假定有：

$$l_2^2>l_1^2, \quad (2)$$

$$l_2^2>l_3^2, \quad (3)$$

和文献［13］相比，这里我们对l_1^2的约束条件有所放宽，l_1^2可以比l_3^2大。为方便，在该模型中这两层的厚度取得相同，并把下、中层的分界面放在$z=0$处，地面则在$z=-h$处。注意Scorer参数

$$l^2=\frac{N^2}{U^2}-\frac{1}{U}\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}, \quad (4)$$

在此N为Brunt-Vasala频率，U为水平风速，一般该式中第2项较小，本文在各层中将其略去并取U为常数，这样各层的Scorer参数将与该层的层结参数N^2成正比。

我们利用（1）式研究下层（可看作边界层）中Scorer参数l_1^2对背风波波长L的影响。虽然（1）式为超越方程，不能求出波数k的解析表达式，但当给出各层的Scorer参数l_i^2（$i=1, 2, 3$）和下、中层的厚度h时，则通过数值计算易求得波数k的值，从而得到背风波波长L的值，并可变化l_1^2，以分析边界层Scorer参数对该波长的影响。

下面通过计算具体的个例来给出l_1^2和L的关系。我们设计两组试验，每组试验分为3个。每个试验中取l_1^2的值在$-0.1\sim0.5\ \mathrm{km}^{-2}$的范围内变化，而$l_2^2$和$l_3^2$不变（参见表1、2）。两组试验的Scorer参数分别列于表1、2，并假定其下、中层的厚度均为2.0 km。利用（1）式可计算这些

理想个例的背风波波长，计算结果见图 1、2。由图 1、2 可以看出，随着 l_1^2 的增大，波长都呈减小趋势，这说明背风波波长与边界层 Scorer 参数的变化呈反相关。

表 1　第 1 组试验的参数及计算结果

Table 1　The parameters and the results of the first group experiments

	l_1^2/ km^{-2}	l_2^2/ km^{-2}	l_3^2/ km^{-2}	ΔL/ km
试验 1.1 Experiment 1.1	−0.1～0.5	1.0	0.3	−0.53
试验 1.2 Experiment 1.2	−0.1～0.5	1.5	0.3	−0.24
试验 1.3 Experiment 1.3	−0.1～0.5	2.0	0.3	−0.12

表 2　第 2 组试验的参数及计算结果

Table 2　The parameters and the results of the second group experiment

	l_1^2/ km^{-2}	l_2^2/ km^{-2}	l_3^2/ km^{-2}	ΔL/ km
试验 2.1 Experiment 2.1	−0.1～0.5	1.5	0.0	−0.29
试验 2.2 Experiment 2.2	−0.1～0.5	1.5	0.5	−0.19
试验 2.3 Experiment 2.3	−0.1～0.5	1.5	1.0	−0.07

我们知道，在大气边界层，受地表加热日变化的影响，午后因地面温度升高会使得边界层的稳定度降低，同时由于湍流运动增强使得边界层的水平风速增大，这都会使得边界层的 Scorer 参数减小。根据以上分析，背风波的波长将会增加。观测资料也表明，很多背风波在午后波长会明显增长，如在美国 Colorado 州的落基山背风坡，1967 年 1 月 28 日的一次背风波过程[6]，在午后 1.4 h 内，波长从 11 km 增加到 12 km。相反，在日落以后或夜间经常有背风波波长变短的记录，如 1985 年 10 月 16 日发生在 Macquarie 岛的一次背风波过程，波长在夜间从 15.4 km 减小到了 10 km[7]。不少学者很早也发现了与日变化相关的背风波波长的变化，例如 Gerbier 和 Berenger[8]根据法国阿尔卑斯山背风波的在午后经常发生波长增加，振幅减小的记录，提出这种现象可能与地表加热的日变化相关。Ralph 和 Neiman[9]利用 24 个背风波的统计个例研究发现，大部分的波长增长发生在白天，并提出加热的日变化作用可能是导致很多个例中波长变化最重要的机制。但对于该现象在理论上一直没有较好的解释，而从本文可

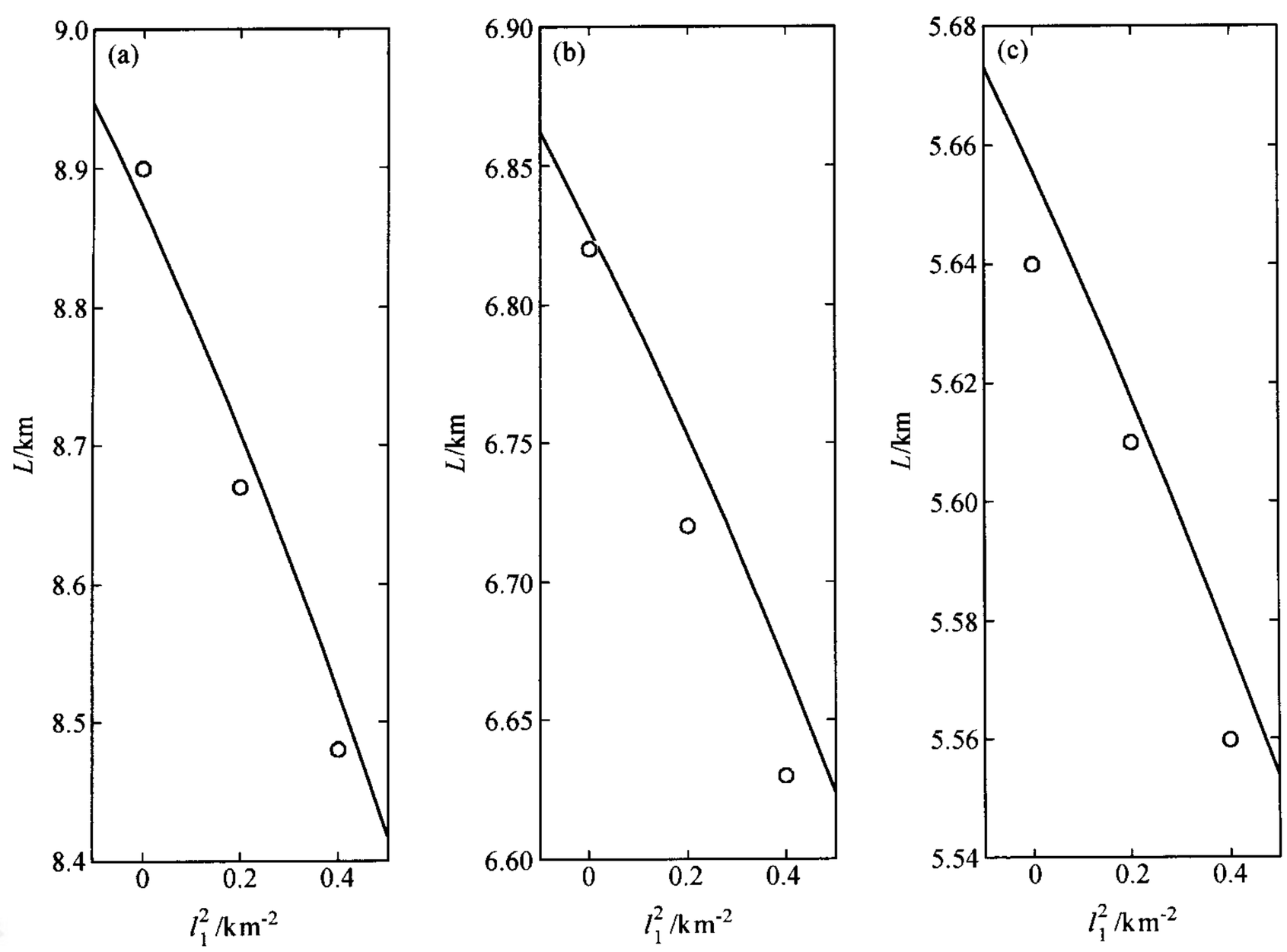

图 1　第 1 组试验背风波波长随 l_1^2 的变化：(a) 个例 1.1；(b) 个例 1.2；(c) 个例 1.3

Fig. 1 Variation of wavelength with l_1^2 in the first group experiments: (a) Example 2.1; (b) Example 2.2; (c) Example 2.3

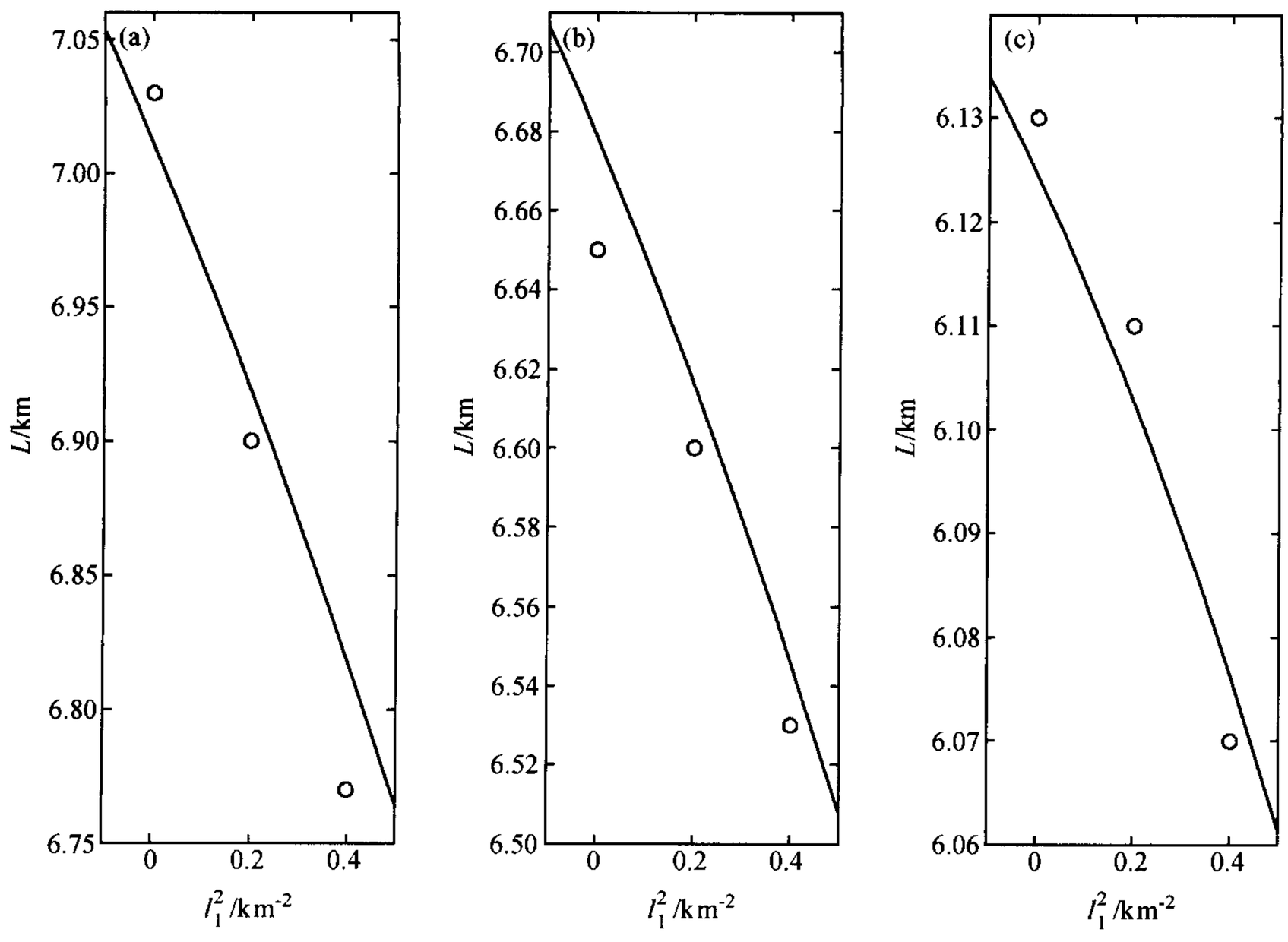

图 2 第 2 组试验背风波波长随 l_1^2 的变化：(a) 个例 2.1；(b) 个例 2.2；(c) 个例 2.3

Fig. 2 Variation of wavelength with l_1^2 in the second group experiments: (a) Example 2.1; (b) Example 2.2; (c) Example 2.3

见，地表加热的日变化可通过影响边界层附近 Scorer 参数的大小，从而改变背风波的波长。

从图 1、2 中还可以看出，在各组试验中，l_1^2 的变化范围是相同的，但波长 L 的变化范围却有很大差异。如在图 1 a 中，l_1^2 从 -0.1 km^{-2} 增加到 0.5 km^{-2}，波长从 8.94 km 减小至 8.41 km，变化了 0.53 km，而在图 1c 中，波长只减少了 0.12 km。下面把 l_1^2 取最小值（-0.1 km^{-2}）和最大值（0.5 km^{-2}）时相应的波长相减，可得差值 δL，其也列在表 1、2 中。分析在各组试验中 ΔL 的变化可见，随着 l_2^2 或 l_3^2 的增大，波长对 l_1^2 的变化越来越不敏感，也即要使波长对 l_1^2 的变化较敏感，则 l_2^2 和 l_3^2 要足够小。为验证该结论，设计了第 3 组试验，其基本参数列于表 3。从波长随 l_1^2 的变化图（图略）中可见，在第 3 组的 3 个试验中，ΔL 随 l_1^2 的增大而减小，而且其减小程度依次增大。在试验 3.3 中，l_2^2 为 1.0 km^{-2} 和 l_3^2 为 0.0 km^{-2} 时，波长的变化达到 -0.83 km（参见表 3）。这说明若边界层以上的大气层结稳定度比较小（即对应的 Scorer 参数也较小），此时背风波波长对边界层Scorer参数的改变会更敏感。国外在

表 3 第 3 组试验的参数及计算结果

Table 3 The parameters and the results of the third group experiments

	l_1^2/ km^{-2}	l_2^2/ km^{-2}	l_3^2/ km^{-2}	ΔL/ km
试验 3.1 Experiment 3.1	$-0.1\sim0.5$	2.0	0.5	-0.10
试验 3.2 Experiment 3.2	$-0.1\sim0.5$	1.5	0.25	-0.25
试验 3.3 Experiment 3.3	$-0.1\sim0.5$	1.0	0.0	-0.83

研究背风波波长随时间的变化时常用到“rate of wavelength change”这个概念[9]，本文中我们称之为波长的变化率。可用波长变化率随大气稳定度的变化来解释背风波波长在不同时间、不同地点有较大差异的现象。例如在夏季大气的中低层常处于不稳定或弱的稳定层结条件下，中、高层的层结稳定度在夏季也比冬季偏小，故可判断夏季因边界层变化而引起的背风波波长变化率要比冬季大。我们对文献［9］中 Ralph 和 Neiman 所收集的 24 个背风波个例进行了分类，以 4～10 月作为夏半年，其他月份作为冬半年。统计表明，在夏半年发生的个例（共 13 个）波长的平均变化

率为 2.33 km·h^{-1}，而冬半年发生的个例（共 11 个）波长的平均变化率为 1.35 km·h^{-1}（这里的变化率均取绝对值进行平均）。这个统计结果可很好地佐证以上我们的计算结果。

3　数值模拟

以上的计算分析均基于公式（1），下面将用数值模拟对此进行验证。我们选用的数值模式是美国 Oklahoma 大学风暴分析预报中心开发的 ARPS（Advanced Regional Prediction System）模式。ARPS 是一个适合于尺度从几米到几百公里的非静力预报模式，此模式在过山气流的模拟方面有着广泛的应用[14,15]。

利用该模式进行二维的理想场试验，地形设为二维钟形山脊，山高 $H=50$ m，半山宽度 $a=10$ km。考虑平均风速 U 不随高度变化并取 $U=10$ m·s^{-1}。由于 Scorer 参数的第 2 项（风切变项）为零，故由 $N_i^2=l_i^2U^2$（$i=1, 2, 3$）可计算出 3 层的层结参数，再利用 $\overline{\theta}(z)=\theta_0 e^{N^2 Z/g}$ 还可计算出位温的垂直分布。模式水平取 161 个网格点，水平格距 $\Delta x=1\ 000$ m，垂直取 113 个网格点，垂直格距 $\Delta z=100$ m。上边界在 9 000 m 以上设置为 Rayleigh 阻尼层，其可有效防止波的反射。模式高度、位温、水平风速的初始场则以单点探空的形式给出。

因计算条件有限，我们仅在图 1、2 中的每条曲线上取 3 个有代表性的点进行数值模拟，模拟结果在这两个图中用“o”标出。由图可见，数值模拟得到的背风波波长与以上的计算结果十分接近，这证明以上关于边界层 Scorer 参数对波长影响的分析是正确的。

4　结语

本文用 3 层背风波模型中背风波波数 k 与各层 Scorer 参数的关系，探讨了边界层 Scorer 参数对背风波波长的影响，得到了以下结论：

（1）背风波波长与边界层（下层）Scorer 参数的大小成反比。

（2）当中、上层 Scorer 参数较小时，背风波波长对边界层（下层）Scorer 参数的变化更为敏感。

结论（1）可解释为何背风波波长经常在午后增长，而在夜间减小的现象。结论（2）则表明，由边界层的变化引起的背风波波长的改变在夏季会更明显。此外，我们还利用 ARPS 数值模式对以上结论作了验证，得到了肯定的结果。

最后要指出，本文的研究只是初步的，仅讨论了边界层 Scorer 参数对背风波波长的影响，尚有更多工作等待我们今后的深入研究。

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] Gao Shouting, Ping Fan. Laboratory studies of the stratified rotating flow passing over an isolated obstacle. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20** (7): 1094～1097

[3] Durran D R, Klemp J B. The effects of Moisture on trapped mountain lee waves. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 2490～2506

[4] 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* (Ser. D) (in Chinese), 1997, **27** (6): 560～565

[5] 刘辉志，洪钟祥，桑建国，等. 地形引起的重力内波的水槽实验. 气象学报，2001，**59** (1): 59～65
Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, Sang Jianguo, et al. A fliud experiment of gravity internal wave induced by terrain. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (1): 59～65

[6] Vergeiner I, Lilly D K. The dynamic structure of lee wave flow as obtained from balloon and airplane observations. *Mon. Wea. Rev.*, 1970, **98**: 220～232

[7] 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

[8] Gerbier N, Berenger M. Experimental studies of lee waves in the French Alps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1961, **87**: 13～23

[9] Ralph F M, Neiman P J. Observations, simulations, and Analysis of Nonstationary trapped·lee waves. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 1308～1333

[10] Scorer R S. Theory of airflow over mountain. Part II: The flow over a ridge, *Quart. J. Roy. Meteor.* Soc., 1953, **79**: 70～83

[11] Sawyer J S. Gravity waves in the atmosphere as a three di-

mensional problem, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1962, **88**: 412～425

[12] Marthinsen T. Three-dimensional lee waves. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 569-580

[13] 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

[14] 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

[15] 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 Huizhi, 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

万方数据 WANFANG DATA