

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

# 中尺度大气动力学

*Mesoscale Atmospheric Dynamics*

寿绍文 励申申 寿亦萱 姚秀萍 编著



高等教育出版社

**研究生教学用书**

教育部学位管理与研究生教育司推荐

# 中尺度大气动力学

Mesoscale Atmospheric Dynamics

寿绍文 励申申 寿亦萱 姚秀萍 编著

高等教育出版社

## 内容提要

中尺度大气动力学是研究中尺度天气系统和与其相联系的严重灾害性天气(如雷暴、暴雨、冰雹、龙卷、下击暴流等)发生、发展的动力学机制和预报理论及方法的学科。它是当代大气科学中最受人们关注的研究领域之一,在大气科学中占有重要的地位。本书是对这一领域知识的概要介绍。全书共十章,从第一章至第十章依次讨论的内容为:中尺度运动的特征及控制方程组;中尺度地形性机械和热力强迫环流;自由大气中的重力波;中尺度大气运动的不稳定性;中尺度对流风暴动力学;中尺度对流涡旋;锋和急流;中尺度天气的诊断分析;中尺度数值模拟;中尺度天气过程实例的模拟和分析。内容广泛涉及当今中尺度研究中的主要问题和研究领域。每章后都附有参考文献,以便于查阅和进一步的探究。

本书内容充实,简明扼要,说理清楚,讨论深入,可作为高等学校大气科学本科生及研究生教材或气象及相关学科的研究人员及业务人员研究、学习和工作的参考材料。

## 图书在版编目(CIP)数据

中尺度大气动力学/寿绍文等编著. —北京:高等教育出版社, 2009. 2

ISBN 978 - 7 - 04 - 020848 - 1

I. 中… II. 寿… III. 中尺度 - 大气动力学 - 高等学校 - 教材 IV. P433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 207613 号

---

|      |                |      |                                                                   |
|------|----------------|------|-------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社        | 购书热线 | 010 - 58581118                                                    |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街 4 号 | 免费咨询 | 800 - 810 - 0598                                                  |
| 邮政编码 | 100120         | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>         |
| 总 机  | 010 - 58581000 |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>         |
|      |                | 网上订购 | <a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>       |
| 经 销  | 蓝色畅想图书发行有限公司   |      | <a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a> |
| 印 刷  | 北京四季青印刷厂       | 畅想教育 | <a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>         |
| 开 本  | 787 × 960 1/16 | 版 次  | 2009 年 2 月第 1 版                                                   |
| 印 张  | 24.75          | 印 次  | 2009 年 2 月第 1 次印刷                                                 |
| 字 数  | 420 000        | 定 价  | 39.60 元                                                           |

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20848 - 00

# 前 言

中尺度大气动力学是研究中尺度天气系统和与其相联系的严重灾害性天气(如雷暴、暴雨、冰雹、龙卷、下击暴流等等)发生、发展的动力学机制和预报理论及方法的学科。它是当代大气科学中最受人们关注的研究领域之一,在大气科学中占有重要的地位。本书是对这一领域的知识的概要介绍。全书共十章,从第一章至第十章依次讨论的内容为:中尺度运动的特征及控制方程组;中尺度地形性机械和热力强迫环流;自由大气中的重力波;中尺度大气运动的不稳定性;中尺度对流风暴动力学;中尺度对流涡旋;锋和急流;中尺度天气的诊断分析;中尺度数值模拟;中尺度天气过程实例的模拟和分析。内容广泛涉及当今中尺度大气动力学研究中的主要问题和领域。每章后都附有大量参考文献,以便于查阅和进一步的探究。

本书是在《中尺度天气动力学》(寿绍文编著,气象出版社,1993年出版)一书的基础上编写而成的,该书十多年来一直在很多高校和科研及业务单位广泛使用。本书于2006年被教育部学位管理与研究生教育司推荐为“研究生教学用书”。值此出版的机会,我们将原书内容作了大量的调整、修改、更新和充实,编写成研究生教学用书使其更适应研究生教学以及科研及业务工作的需要。限于水平,书中难免有错误和不足之处,热忱希望大家指教,以便今后改正和改进。

本书在编写过程中得到有关领导和同事们以及很多专家学者和高等教育出版社编辑们的关心、支持、鼓励与帮助,在此谨向他们表示诚挚的感谢。

编著者

2008年5月于南京

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第一章 中尺度运动的特征及控制方程组</b> .....      | 1   |
| § 1.1 大气运动系统的尺度划分 .....              | 1   |
| § 1.2 中尺度大气运动的基本特征 .....             | 8   |
| § 1.3 包辛尼斯克 (Boussinesq) 近似方程组 ..... | 11  |
| § 1.4 滞弹性近似方程组 .....                 | 19  |
| 参考文献 .....                           | 21  |
| <b>第二章 中尺度地形性机械和热力强迫环流</b> .....     | 23  |
| § 2.1 地形波 .....                      | 23  |
| § 2.2 尾流中的环流 .....                   | 40  |
| § 2.3 城市热岛环流 .....                   | 43  |
| § 2.4 海陆风 .....                      | 43  |
| § 2.5 山谷风 .....                      | 54  |
| § 2.6 复杂地形影响的数值模拟 .....              | 58  |
| 参考文献 .....                           | 60  |
| <b>第三章 自由大气中的重力波</b> .....           | 63  |
| § 3.1 重力波的观测特征及天气背景 .....            | 63  |
| § 3.2 重力波的动力学性质 .....                | 66  |
| § 3.3 重力波的结构及其对天气的影响 .....           | 70  |
| § 3.4 重力波的发生发展 .....                 | 73  |
| 参考文献 .....                           | 84  |
| <b>第四章 中尺度大气运动的不稳定性</b> .....        | 87  |
| § 4.1 位势不稳定 .....                    | 87  |
| § 4.2 第二类条件性不稳定 .....                | 93  |
| § 4.3 波动型第二类条件性不稳定 .....             | 98  |
| § 4.4 惯性不稳定 .....                    | 102 |
| § 4.5 对称不稳定 .....                    | 106 |
| § 4.6 条件性对称不稳定 .....                 | 110 |
| § 4.7 开尔文 - 赫姆霍茨不稳定 .....            | 119 |
| 参考文献 .....                           | 124 |
| <b>第五章 中尺度对流风暴动力学</b> .....          | 126 |
| § 5.1 描述大气对流的理论模式 .....              | 126 |
| § 5.2 风垂直切变对对流风暴传播和发展的作用 .....       | 134 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| § 5.3 环境热力和动力条件对对流风暴的综合影响 .....         | 140        |
| § 5.4 风垂直切变对雷暴的组织 and 分裂作用 .....        | 144        |
| § 5.5 龙卷风暴的结构和生成 .....                  | 152        |
| § 5.6 飚线的结构及理论模型 .....                  | 157        |
| § 5.7 雷暴对大尺度环境的反馈作用 .....               | 167        |
| 参考文献 .....                              | 181        |
| <b>第六章 中尺度对流涡旋 .....</b>                | <b>184</b> |
| § 6.1 中尺度对流涡旋的卫星和雷达观测 .....             | 184        |
| § 6.2 MCV 的结构和特征 .....                  | 188        |
| § 6.3 MCV 发生发展的条件 .....                 | 196        |
| § 6.4 垂直切变与 MCV 的关系 .....               | 197        |
| § 6.5 MCV 的概念模型 .....                   | 200        |
| 参考文献 .....                              | 202        |
| <b>第七章 锋和急流 .....</b>                   | <b>204</b> |
| § 7.1 锋的结构 .....                        | 204        |
| § 7.2 运动学和热力学锋生 .....                   | 207        |
| § 7.3 动力学锋生 .....                       | 209        |
| § 7.4 制约锋生的因子 .....                     | 215        |
| § 7.5 锋面横向次级环流 .....                    | 218        |
| § 7.6 急流 .....                          | 223        |
| § 7.7 边界层中尺度锋 .....                     | 229        |
| 参考文献 .....                              | 242        |
| <b>第八章 中尺度天气的诊断分析 .....</b>             | <b>245</b> |
| § 8.1 中尺度诊断分析基础 .....                   | 245        |
| § 8.2 中尺度诊断和预报方程 .....                  | 253        |
| § 8.3 $\bar{Q}$ 矢量分析 .....              | 262        |
| § 8.4 位涡分析 .....                        | 273        |
| § 8.5 螺旋度分析 .....                       | 284        |
| § 8.6 大气稳定度分析 .....                     | 291        |
| 参考文献 .....                              | 301        |
| <b>第九章 中尺度数值模拟 .....</b>                | <b>307</b> |
| § 9.1 中尺度数值模拟概述 .....                   | 307        |
| § 9.2 中尺度数值模式 MM5 简介 .....              | 313        |
| § 9.3 WRF 模式简介 .....                    | 323        |
| § 9.4 ARPS 模式简介 .....                   | 331        |
| 参考文献 .....                              | 338        |
| <b>第十章 中尺度天气过程实例的模拟和分析 .....</b>        | <b>340</b> |
| § 10.1 2003 年 7 月 5 日江淮暴雨过程的模拟和分析 ..... | 340        |

---

|        |                                      |     |
|--------|--------------------------------------|-----|
| § 10.2 | 2002 年 8 月 16 日启东局地暴雨过程的模拟和分析 .....  | 346 |
| § 10.3 | 2004 年 7 月 12 日南通强对流天气过程的模拟和分析 ..... | 351 |
| § 10.4 | 台风“麦莎”北上变性及降水过程的模拟和分析 .....          | 360 |
| § 10.5 | 2005 年 12 月山东半岛强降雪过程的模拟和分析 .....     | 367 |
| § 10.6 | 2006 年 4 月 9—11 日北方沙尘暴天气的模拟和分析 ..... | 375 |
| 参考文献   | .....                                | 383 |

# 第一章 中尺度运动的特征及控制方程组

不同尺度的大气运动具有不同的特征,并遵循不同的规律。本章将讨论中尺度大气运动系统的定义、中尺度运动的基本特征以及中尺度运动的控制方程组。

## § 1.1 大气运动系统的尺度划分

大气环流是极为复杂的,它包含着从湍流微团到超长波等各种尺度的运动系统。不同尺度的系统具有不同的物理性质,因此为了便于研究须将它们进行分类。尺度分类通常有经验、理论和实用(或几何)三种分类方法。

人们在早期主要按经验分类,并得出了经典的三段分类,即把天气系统划分为大尺度、中尺度和小尺度三类(其空间尺度分别为  $10^6\text{m}$ 、 $10^5\text{m}$  和  $10^4\text{m}$ ,时间尺度分别为  $10^5\text{s}$ 、 $10^4\text{s}$  和  $10^3\text{s}$ )。对于小尺度系统(如雷暴、龙卷等)和大尺度系统(如气旋、反气旋、锋等)人们根据长期的单站观测和常规天气图分析的经验,很早就有了明确的概念。而关于中尺度系统(如飑线、中气旋等)的概念则是在进行了很多比较细致的天气图分析,特别是在有了雷达等探测工具之后才建立起来的。Ligda(1951)最早提出“中尺度”这一概念。他根据对降水系统进行雷达探测所积累的经验指出,有些降水系统太大以致不能由单站观测全,有些又太小以致即使在区域天气图上也不能显现。他建议把具有这种尺度的系统称为“中尺度”系统。自此以后,“中尺度”这一介于大尺度和小尺度之间的特殊尺度的名称和概念便逐渐得到公认。目前,“中尺度”一般被描述性地定义为时间尺度和水平空间尺度比常规探空网的时空密度小,但比积云单体的生命期及空间尺度大得多的一种尺度。也就是说,其水平尺度约为几十千米至几百千米,时间尺度约为几小时至十几小时。

近代很多人致力于从理论上对天气系统进行分类。有人试图用功率谱分析方法对天气系统进行客观分类,例如,Vinnichenko(1970)对自由大气和地面附近气层中的东西风分量的平均动能作了功率谱分析,给出了如图 1.1 所示的不同时间尺度的动能谱。在图 1.1 中,纵坐标为能量

密度,横坐标为时间尺度。由图可见,在 1 min、1 d 至数日,1 月及 1 a 等时间尺度上分别有能量密度的峰值,这些峰值分别反映了边界层湍流,昼夜变化、季节变化的影响。而在几十分钟至十几小时的时段(即中尺度时段)上,则为能量密度的低谷,或称为中尺度区间(mesoscale gap)。这种谱分析结果反映了不同尺度的客观存在性。中尺度运动具有较低的能量密度,但它在大气度和小、微尺度运动之间的能量交换过程中起着重要的作用。关于中尺度区间成因的一种可能的解释将在 § 3.2 中给出。

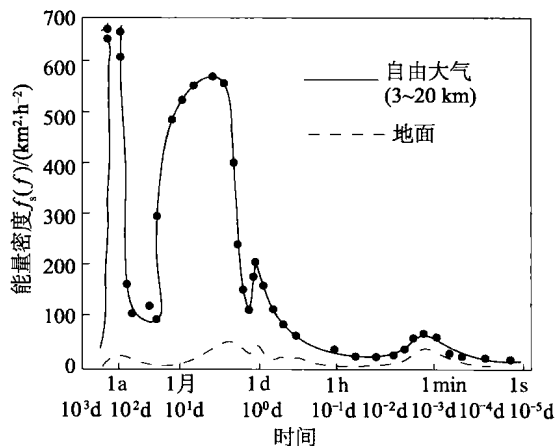


图1.1 自由大气和近地面的东西风分量的平均动能功率谱分析

(Vinnichenko, 1970)

不少人还试图从物理性质上对天气系统进行分类。我们知道,大气是一个流体动力和热力学系统,它可以由运动方程、连续方程、状态方程、热力学方程和水汽方程等(方程(1.3.1)~(1.3.5)和方程(1.3.33))来描述。运动方程表明,当空气质点受力不同时,其运动方式也是不同的。例如,当科里奥利力项大大超过加速度项和摩擦力项,气压梯度力项与科里奥利力项近于平衡时,就形成“地转风”;当科里奥利力项与摩擦力项小于加速度项,加速度项与气压梯度力项近于平衡,就形成“欧拉风”;当摩擦力项超过科里奥利力项与加速度项,则摩擦力必须由气压梯度力来平衡,这就形成“摩擦风”,此时风沿着气压梯度力方向吹,而摩擦力则阻止风速不断增长;当加速度项与科里奥利力项占主要地位而气压梯度力项可以略去时,则产生“惯性圆”运动。当浮力项大于重力项则产生“对流”运动。而方程中各项的大小与天气系统的尺度大小是紧密关联的。所以可以从分析各种作用力的相对重要性入手来对天气系统进行分类。

各种力的相对重要性,常常用各种量纲参数表征。表 1.1 列出了一些常用的量纲参数的名称及其形式和特征比。我们将在 § 1.2 中进一步讨论不同尺度的大气运动所对应的某些量纲参数的特征。在这里我们要介绍 K·Emanuel(1983)根据罗斯贝数( $Ro$ )作出的尺度分类。为了进行尺度分类,Emanuel 应用了两个无量纲数:拉格朗日时间尺度( $T$ )和罗斯贝数  $Ro$ 。这里,“拉格朗日时间尺度( $T$ )”对不稳定气流来说,是指在特定天气系统中,气块速度从零加速至典型值所需的时间;而对稳定气流而言,则是指气块穿过一个波长距离所需的时间。罗斯贝数( $Ro$ )定义为  $U/\Omega L$ ,即相对于旋转坐标惯性力与科里奥利力之比,或加速度与地转偏向力之比,即  $Ro = |du/dt|/|fu| = |u(\partial U/\partial x)|/|fu| = U/fL$ ,所以罗斯贝数表示科里奥利力的相对重要性或地转偏差的相对大小。罗斯贝数  $Ro$  和拉格朗日时间尺度( $T$ )也是相关的,它可以用  $T$  表示,即  $Ro = 2\pi/fT$ ( $f$  为科氏参数),所以知道罗斯贝数  $Ro$ ,就可求出拉格朗日时间尺度( $T$ )。各种大气现象均有相应的  $T$  和  $Ro$  值,表 1.2 列出了一些典型大气现象的  $T$  和  $Ro$  值。如果将各种现象按其所具有的典型的  $Ro$  值的大小排列起来(图 1.2 所示),则可得到一个尺度序列。尺度愈大, $Ro$  愈小;尺度愈小, $Ro$  愈大。

表 1.1 量纲参数(表中均为常用符号)(阿特金森,1987)

| 参数          | 形式                           | 特征比                    |
|-------------|------------------------------|------------------------|
| 弗劳德数 $Fr$   | $U^2/gL(\Delta\rho/\rho)$    | 惯性力/浮力                 |
| 雷利数 $Ra$    | $gL(\Delta\rho/\rho)a\nu$    | 浮力/耗散力                 |
| 雷诺数 $Re$    | $UL/\nu$                     | 惯性力/黏滞力                |
| 里查森数 $Ri$   | $(\Delta\rho/\rho)/L(u/z)^2$ | 静力稳定度/(切变)             |
| 罗斯贝数 $Ro$   | $U/\Omega L$                 | 相对于旋转坐标惯性力/科里奥利力       |
| 斯特劳哈尔数 $Sr$ | $U/fL$                       | 对流加速度/相对于一个固定观测者的局地加速度 |

注: $\nu$  为运动黏滞性。

从图 1.2 可见,按  $Ro$  的数量级大小,可将行星纬向气流分成四类基本的运动形式,即斜压波动、倾斜对流、积云对流以及边界层湍流。表 1.3 列出了四种运动的垂直尺度、水平尺度、时间尺度和罗斯贝数,同时还给出了它们在地球大气中出现的频率。上述四类运动的尺度相当于通常所说的大、中、小和微尺度。其中倾斜对流的垂直尺度为  $D$ ,水平尺度  $L$  为  $U_z D/f$ ( $U_z$  为风速垂直切变),所以状态比(即水平尺度与垂直尺度之比)  $L/D = U_z/f$ 。Emanuel 把具有状态比  $L/D = U_z/f$  和时间尺度  $T = f^{-1}$  的运

动定义为“中尺度”运动。水平尺度  $L = U_e D/f$  和时间尺度  $T = 1/f$ , 正与“对称不稳定”的尺度一致, 这说明对称不稳定是一种中尺度不稳定。而斜压波动和积云对流则分别和斜压不稳定及重力不稳定相对应。由此可见, 这种尺度分类法把运动尺度和大气稳定性相联系起来了(关于稳定性理论将在第四章讨论)。

表 1.2 量纲参数(表中均为常用符号)(阿特金森, 1987)

| 现 象            | $T$                         | $Ro = 2\pi/fT$     | 备 注                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 纬向平均环流         | $2\pi a/U$                  | $U/af$             | $a$ = 地球半径; $U$ = 平均<br>纬向速度尺度; $f$ = 地转<br>参数; $\beta = f$ 的经向梯度;<br>$U^*$ = 摩擦速度尺度;<br>$h$ = 行星边界层(PBL)<br>深度; $N$ = 平均浮力频<br>率尺度; $N_w$ = 湿浮力频<br>率尺度; $Ri$ = 里查逊<br>数 = $N^2/U_z^2$ ; $R$ = 最大风<br>尺度半径; $V_T$ = 最大切<br>向风尺度; $\varphi$ = 纬度;<br>$D$ = 不稳定层深度;<br>$U_z$ = 纬向风垂直切变<br>尺度 |
| 行星(静止)罗斯贝波     | $2\pi/\sqrt{u\beta}$        | $\sqrt{u\beta}/f$  |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 气旋、反气旋         | $2\pi\sqrt{Ri}/f$           | $1/\sqrt{Ri}$      |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 经典的锋           | $2a\sqrt{Ri}/f$             | $1/\sqrt{Ri}$      |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 海陆风            | 1 d(天)                      | $1/(2\sin\varphi)$ |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 倾斜对流           | $1/f$                       | $2\pi$             |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 热带气旋           | $2\pi R/V_T$                | $V_T/Rf$           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 惯性重力波          | $2\pi f^{-1} - 2\pi N^{-1}$ | $1 - N/f$          |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 雷暴和积云          | $N_w^{-1}$                  | $2\pi N_w/f$       |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 开尔文-赫姆霍茨(K-H)波 | $2\pi N^{-1}$               | $2\pi N/f$         |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 行星边界层(PBL)湍流   | $2\pi h/U^*$                | $U^*/fh$           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 龙卷             | $2\pi R/V_T$                | $V_T/fR$           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

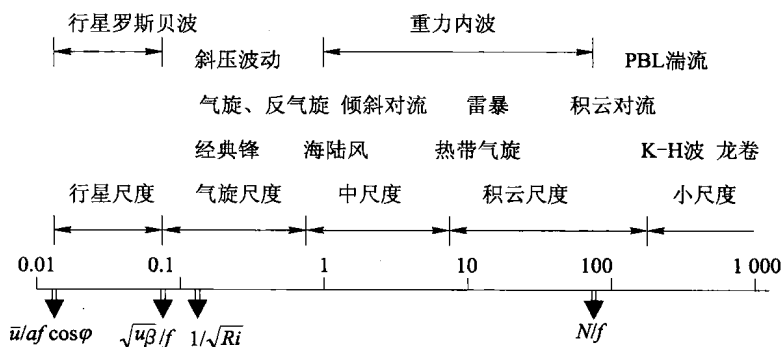


图 1.2 按拉格朗日罗斯贝数作出的尺度分类

(Emanuel, 1986)

表 1.3 各类气流的特征值 (Emanuel, 1986)

| 类型    | 垂直尺度                   | 水平尺度               | 时间尺度               | 罗斯贝数              | 在地球大气中出现的频率          |
|-------|------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 斜压波动  | $f^2 U_z / (N\beta^2)$ | $f U_z / (N\beta)$ | $2\pi N / (f U_z)$ | $1/\sqrt{Ri}$     | 从极地到 30° 纬度几乎普遍存在    |
| 倾斜对流  | $D$                    | $U_z D / f$        | $f^{-1}$           | $2\pi$            | 高度间歇性的               |
| 积云对流  | $D$                    | $D$                | $N^{-1}$           | $2\pi N / f$      | 在热带海洋上空普遍存在并到处间歇性地发生 |
| 边界层湍流 | $h$                    | $h$                | $h / U^*$          | $2\pi U^* / (hf)$ | 在边界层普遍存在             |

注: 符号说明同表 1.2。

由于天气系统可以看做是各种大气波动, 所以天气系统的尺度也常可按各种波动参数来进行分类。一般用波长  $L$ 、周期  $T$ 、波数  $k$ 、频率  $\omega$ 、波速  $c$  等波动参数来描述波动。它们之间有以下相互关系

$$c = \omega/k, \quad k = 2\pi/L, \quad \omega = 2\pi/T$$

由于地球大气层结性和地球的自转以及地转参数随纬度变化 ( $\beta$  效应) 等原因, 使大气具有三种基本频率。即 Brunt-Väisälä 频率  $N^2 = (g/\Theta)(\partial\Theta/\partial z)$ ; 惯性频率  $f = 2\Omega\sin\phi$ ; 以及行星频率  $P = (U\beta)^{1/2}$ , 它们所对应的周期分别为分、时、天。Brunt-Väisälä 频率描述层结大气的垂直振荡产生的重力(浮力)波, 与“云尺度”运动相联系; 地转参数  $f$  表示地球的自转作用, 是形成地转气流的关键因子; 行星频率源自地转参数随纬度变化, 即  $\beta$  效应, 它们只影响行星尺度大气运动。以上三种频率的性质、大小、特征和物理意义等分别列于表 1.4 中。给定频率和相速(粗略地以风速  $U$  近似), 则可得到波长和波数。

用频率  $F$  划分大气振荡可以得到下列四种分类:

$$F > N \quad f < F < N \quad P < F < f \quad F < P$$

$$L < 2\pi U/N \quad 2\pi U/N < L < 2\pi U/f \quad 2\pi U/f < L < 2\pi(U/\beta)^{1/2} \quad L > 2\pi(U/\beta)^{1/2}$$

$$\text{小尺度} \quad \text{中尺度} \quad \text{天气尺度} \quad \text{行星尺度}$$

$N$  和  $f$  两种频率反映了浮力(或重力)以及地球自转(地转偏向力)是支配大气运动的两种基本恢复力。当浮力或重力较强时, 大气产生重力波, 而当惯性力起支配作用时, 就会引起地转适应。两种作用的相对重要性取决于大气扰动的尺度的大小。而对于斜压大气而言, 还必须考虑风的垂直切变  $\partial U/\partial z$ 。里查森数  $Ri = N^2/(\partial U/\partial z)^2$  包含了  $N$  和  $\partial U/\partial z$  的

共同作用。由上分析可知,不同尺度的运动各有其不同的频率范围。其中,“中尺度”是指频率大于  $f$ ,但是小于  $N$  的尺度。浮力和旋转是决定中尺度环流的两个基本变量。这和上面说的中尺度是由“对称不稳定”(即重力-惯性不稳定)支配的理论是相一致的。

表 1.4 各种频率的性质、大小、特征和物理意义

|      | Brunt-Väisälä 频率<br>$N^2 = (g/\Theta)(\partial\Theta/\partial z)$               | 惯性频率<br>$f = 2\Omega\sin\phi$ | 行星频率<br>$P = (U\beta)^{1/2}$ |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 波动方程 | $dw/dt = -(\theta'/\theta_0)g$<br>$d\theta'/dt = -w\partial\theta_0/\partial z$ | $du/dt = -fv$<br>$dv/dt = fu$ | $d(\zeta + f)/dt = 0$        |
| 频率   | $10^{-3} \text{ s}^{-1}$                                                        | $10^{-4} \text{ s}^{-1}$      | $10^{-6} \text{ s}^{-1}$     |
| 周期   | min                                                                             | h                             | d                            |
| 尺度   | 云尺度                                                                             | 地转气流                          | 行星尺度                         |
| 物理意义 | 重力(浮力)波                                                                         | 涡旋惯性波                         | 地球曲率 = 罗斯贝波                  |

以上介绍了尺度分类的一些理论,将理论结果用大气典型值代入,可以发现,理论分类结果与经验分类的结果是基本一致的。但实际大气中天气系统的尺度谱更复杂,从实用的角度来说常常需要更细致的分类,一般称为实用分类或几何分类。Orlanski(1975)根据观测和理论的综合分析结果,提出了一个比较细致的尺度划分方案,得到了比较普遍的采用。按他的方案,天气系统可粗分为大、中、小尺度三类,其中大尺度系统可再分为  $\alpha$ 、 $\beta$  两类。中尺度和小尺度系统则可分别分为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三类,相邻两类的空间尺度相差 1 个数量级(图 1.3)。按这种划分,中尺度成了一个范围很宽的尺度(即  $2 \sim 2000 \text{ km}$ )。小至某些通常称为小尺度的系统(如雷暴单体等),大至某些通常称为大尺度的系统(如锋、飓风或台风等)都可包括在中尺度的范围内。但其“核心”则尺度为  $20 \sim 200 \text{ km}$  的典型的中尺度系统,即  $\beta$  中尺度系统。 $\beta$  中尺度系统具有典型的中尺度特性,而较大和较小的中尺度系统(即  $\alpha$  和  $\gamma$  中尺度系统)则分别兼有大尺度和小尺度的特性。

Orlanski 的尺度划分是根据时间和空间长度同时作出的,注意图 1.3 中沿着时间尺度这一排的括弧中的物理参数。正是这些参数控制着每一个特定的时间尺度范围。其中  $(\beta L_R)^{-1}$  即地转参数随纬度的变化( $\beta$ )与罗斯贝变形半径  $L_R = (H/f) \left[ (g/\theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$  的乘积的倒数(其中  $H$  为均质大气的厚度),1 个月至 1 d 之间的尺度受此参数控制。对于尺度为 1 d 至几小时的运动来说,则受参数  $f^{-1}$  的控制。而生命期为几小时的运动受

| 尺度的定义 |       |         |           | 生命期<br>水平尺度      | 1个月 $(\beta L_R)^{-1}$ | $1d(f)^{-1}$ | $1h(\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz})^{-\frac{1}{2}}$ | $1\min(\frac{g}{H})^{-\frac{1}{2}}(\frac{L}{u})$ | 1s           |
|-------|-------|---------|-----------|------------------|------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|
| 大尺度   | A     | 大尺度     | 10 000 km | 驻波超长波            | 潮汐波                    |              |                                                          |                                                  | $\alpha$ 大尺度 |
| 中间尺度  | B     | 中间尺度    | 2 000 km  | 斜压波              |                        |              |                                                          |                                                  | $\beta$ 大尺度  |
| 中尺度   | C     | 中尺度     | 200 km    | 锋飓风              |                        |              |                                                          |                                                  | $\alpha$ 中尺度 |
| 中尺度   | B     | 中尺度     | 20 km     | 夜发性低空急流          |                        |              |                                                          |                                                  | $\beta$ 中尺度  |
| 中尺度   | C     | 中尺度     | 20 km     | 雷暴重力内波湍流晴空湍流城市效应 |                        |              |                                                          |                                                  | $\gamma$ 中尺度 |
| 小尺度   | D     | 小尺度     | 2 km      | 龙卷深对流短重力波        |                        |              |                                                          |                                                  | $\alpha$ 小尺度 |
| 小尺度   |       | 小尺度     | 200 m     | 尘卷热旋风            |                        |              |                                                          |                                                  | $\beta$ 小尺度  |
| 小尺度   |       | 小尺度     | 20 m      | 卷流粗糙度湍流          |                        |              |                                                          |                                                  | $\gamma$ 小尺度 |
| 日本的命名 | 欧洲的命名 | GATE*命名 | 美国的命名     | 大气科学委员会          | 气候尺度                   | 天气尺度行星尺度     | 中尺度                                                      | 小尺度                                              | 尺度           |

\*GATE=全球大气研究计划大西洋热带试验。

图 1.3 Orlanski 的尺度划分(右)及几种主要的尺度定义的对照

(Orlanski, 1975)

浮力频率的倒数  $N^{-1} = [(g/\theta)(d\theta/dz)]^{-1/2}$  所控制。至于时间尺度为分和秒的外重力波和湍流运动的平流时间则分别由参数  $(g/H)^{-1/2}$  和  $L/u$  所决定。

关于大气运动系统的尺度划分标准以及各种尺度的名称至今仍是不完全统一的。在图 1.3 中左部列出了当前世界上的几种有代表性的尺度划分标准与 Orlanski 的尺度划分之间的相互对照关系。在日本的尺度划分中,包含一个“中间尺度”。它相当于 Orlanski 所定义的  $\alpha$  中尺度。中间尺度或  $\alpha$  中尺度也相当于通常所说的“次天气尺度”,而  $\beta$  大尺度则相当于通常所说的“天气尺度”。对于  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三种中尺度,有时也有人分别称它们为“大的中尺度”、“典型中尺度”和“小的中尺度”。

除了图 1.3 中所列的各种尺度划分外,还有一些别的尺度划分和名称。例如,藤田哲也(Fujita)等按英文的五个元音字母 A、E、I、O、U 的次序,把天气系统按大小分别给以 maso、meso、miso、moso、及 muso 等前缀,把天气系统划分为 5 个等级,前四个等级又分别划分为  $\alpha$ 、 $\beta$  两个次尺

度。Fujita 除了作了上述尺度分类外,为了在研究下击暴流、微下击暴流和龙卷吸管涡旋等特殊的小尺度天气现象时,进行测站布局和观测及研究方法的设计等实用目的,又对小尺度现象作了更进一步的分类,即除了将小尺度划分成  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三类外,还增加了  $\delta$  和  $\varepsilon$  两类尺度。

## § 1.2 中尺度大气运动的基本特征

通过 § 1.1 的讨论,我们已经知道中尺度是一个比较特殊的尺度,归纳起来可以从以下几个方面来认识其基本特征:

### (1) 尺度

按 Orlanski 的划分标准,中尺度系统的水平尺度在  $2 \times 10^0 \sim 2 \times 10^3$  km 之间,时间尺度在几十分钟至几天之间。这是一个很宽的范围,因此中尺度系统不仅区别于大、小系统,而且大小不同的中尺度系统之间也具有性质的差别。一般来说,水平尺度为 20 ~ 200 km 的  $\beta$  中尺度系统是中尺度系统的核心,具有典型的中尺度系统特性,而  $\alpha$  和  $\gamma$  中尺度系统则分别兼有大、小尺度系统的特性。

### (2) 垂直速度

从连续方程可得:  $W \leq HV/L$  (其中  $W$ 、 $V$  分别表示空气的垂直和水平速度,  $H$ 、 $L$  分别表示垂直和水平尺度)。取  $V$  为 10 m/s,  $H$  为 10 km,则对  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  中尺度系统,  $W$  分别可为  $10^{-1}$  m/s、 $10^0$  m/s 和  $10^1$  m/s,这都比大尺度垂直运动大 1 到几个量级。相应的,中尺度的散度、涡度也要比大尺度的散度、涡度大 1 到几个量级。

### (3) 地转偏向力和浮力的作用

在大尺度运动中,地转偏向力的作用相对重要,浮力可以忽略。在小尺度运动中,浮力的作用相对重要,地转偏向力可以忽略。而在中尺度运动中,地转偏向力和浮力的作用都必须考虑。这种性质可以用罗斯贝数  $Ro$  和里查森数  $Ri$  来表示。对三种基本尺度而言,  $Ro$  和  $Ri$  数的典型值为:

|                  | 大尺度   | 中尺度 | 小尺度   |
|------------------|-------|-----|-------|
| $Ro = V/fL$      | 0.1   | 1.0 | > 1.0 |
| $Ri = N^2/U_z^2$ | 100.0 | 1.0 | < 1   |

由此可见,尺度愈大,  $Ro$  数愈小,  $Ri$  数愈大;反之,尺度愈小,  $Ro$  数愈大,  $Ri$  数愈小。而  $Ro$  数与地转偏向力成反比,  $Ri$  数与浮力成反比。所以尺度愈大,地转偏向力作用愈大,浮力作用愈小;反之,尺度愈小,地转偏

向力作用愈小,浮力作用愈大。对较小的中尺度运动,地转偏向力项相对较小,运动具有非地转性,而对较大的中尺度运动,地转偏向力项相对较大,运动具有一定的地转性。Phillips (1963) 引入了 Burger 数  $B$  ( $B = Ro^2 Ri$ ), 并定义了两类地转运动: 当  $B \approx 10^{-2}$  时, 称为第二类地转运动;  $B \approx 1$  时称为第一类地转运动。较大的中尺度运动正好具有  $B \approx 1$  的关系, 因此也说明它具有地转性。不过虽然大、中系统都可能出现  $B \approx 1$  的情况, 但由于两类运动的  $Ro$  和  $Ri$  数明显不同, 因此两类运动仍有明显差别。通过地转偏向力及浮力相对重要性的分析可见, 大尺度运动是地转和静力平衡的运动, 小尺度运动是非地转、非静力和湍流运动, 而中尺度运动则介于两者之间。大的中尺度运动可为准地转和准静力平衡运动, 小的中尺度运动则可为非地转和非静力平衡运动; 而典型的中尺度运动, 则可能是非地转和准静力平衡的。因此典型的“中尺度”也可以定义为符合以下判据的一种特殊尺度: (1) 其水平尺度足够大, 以致可以适用静力平衡关系; (2) 其水平尺度足够小, 以致地转偏向力项相对于平流项和气压梯度力项是小项 (Pielke, 1984)。这时形成的流场, 即使在没有摩擦作用的情况下 (在行星边界层以上), 也与梯度风和地转风关系有本质的不同。所以在中尺度分析中, 用地转风和梯度风作为实际风的近似已不合适, 而流体静力近似一般仍能有效地表示气压的垂直分布。但是要强调指出, 流体静力假设的正确性同时与天气系统的尺度和大气的稳定度以及风速大小有关。当大气比较稳定, 风速较小时, 流体静力假设对较小尺度的系统也是适用的。但是当风速增大, 热力稳定度减小时则流体静力假设的正确性便减小, 以致不适用。

#### (4) 质量场和风场的适应过程

对大尺度运动而言, 一般是风场适应质量场, 而中尺度运动中则为质量场适应风场。对于这一点可作一些简单的解释。考虑一个初始无界海洋, 在水平范围为  $2A$ , 深度为  $H$  的水柱中加上动量, 从而破坏了地转平衡。最后通过在自由表面形成波状, 使地转平衡重新恢复 (图 1.4)。此时速度由初始时刻的  $V_i$  变成最终状态的  $V_f$ 。在这个过程中, 动量耗散率为  $\lambda^{-1} = \sqrt{gH}/f = L_R$ ,  $L_R$  称为罗斯贝变形半径, 它是由重力、地球自转以及流体深度所决定的空间尺度。

在地转平衡时, 速度  $V$  可写成  $V = \frac{g\Delta\eta}{fL}$ , 其中  $L$  为地转水流的尺度, 它和初始扰动的尺度相同,  $\eta$  为自由表面高度 ( $\eta \propto e^{-\lambda x}$ )。因此, 每单位长度的地转水流的动能  $E_{\text{geo}}$  为

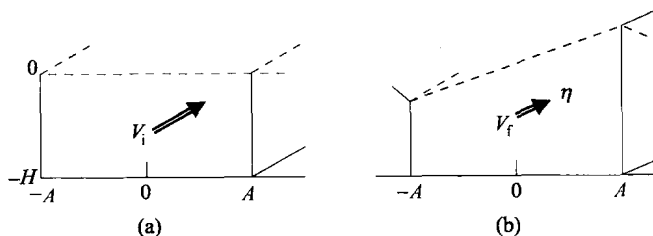


图 1.4

(a) 初始状态; (b) 最终状态

$$E_{\text{geo}} = \frac{1}{2} \rho H g^2 \Delta \eta^2 / (fL)^2 \quad (1.2.1)$$

类似地, 位能应为

$$P_{\text{geo}} = \frac{1}{2} \rho g \Delta \eta^2 \quad (1.2.2)$$

总能量为

$$T_{\text{geo}} = E_{\text{geo}} + P_{\text{geo}} \quad (1.2.3)$$

由(1.2.1)式及(1.2.2)式可得

$$(E/P)_{\text{geo}} = \frac{Hg}{f^2 L^2} = \frac{L_R^2}{L^2} \quad (1.2.4)$$

由(1.2.4)式可见, 当  $L \gg L_R$  时, 有  $E_{\text{geo}} \ll P_{\text{geo}}$ 。由此可知当增加动能时, 必须发生很大的位能才能使地转平衡恢复。但当增加位能时, 则只需发生很小的动能便能适应。显然后一种情况容易成功。因此, 对于水平尺度大于  $L_R$  的扰动而言, 一般是速度场适应质量场。而当  $L \ll L_R$  时, 情况正好相反。所以对中小尺度扰动而言, 一般是质量场适应速度场。上述由罗斯贝首先得出的结果, 适用于均匀海洋, 也可近似地反映大气的情况。Bolin(1953)(SMHI, 1983)已将上述讨论推广到层结海洋, 在这种情况下, 动能和位能的比率为

$$(E/P)_{\text{geo}} \approx \frac{H^2 N^2}{f^2 L^2} = \frac{R_N^2}{L^2} \quad (1.2.5)$$

式中:  $R_N = HN/f$ ;  $N = \left( \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $\theta$  为位温,  $N$  称为 Brunt-Väisälä 频率。

(1.2.5)式还可写成

$$(E/P)_{\text{geo}} = \frac{V^2 N^2}{f^2 L^2 \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2} = R_o^2 Ri = B \quad (1.2.6)$$

式中:  $B$  即为上面提到的 Burger 数。