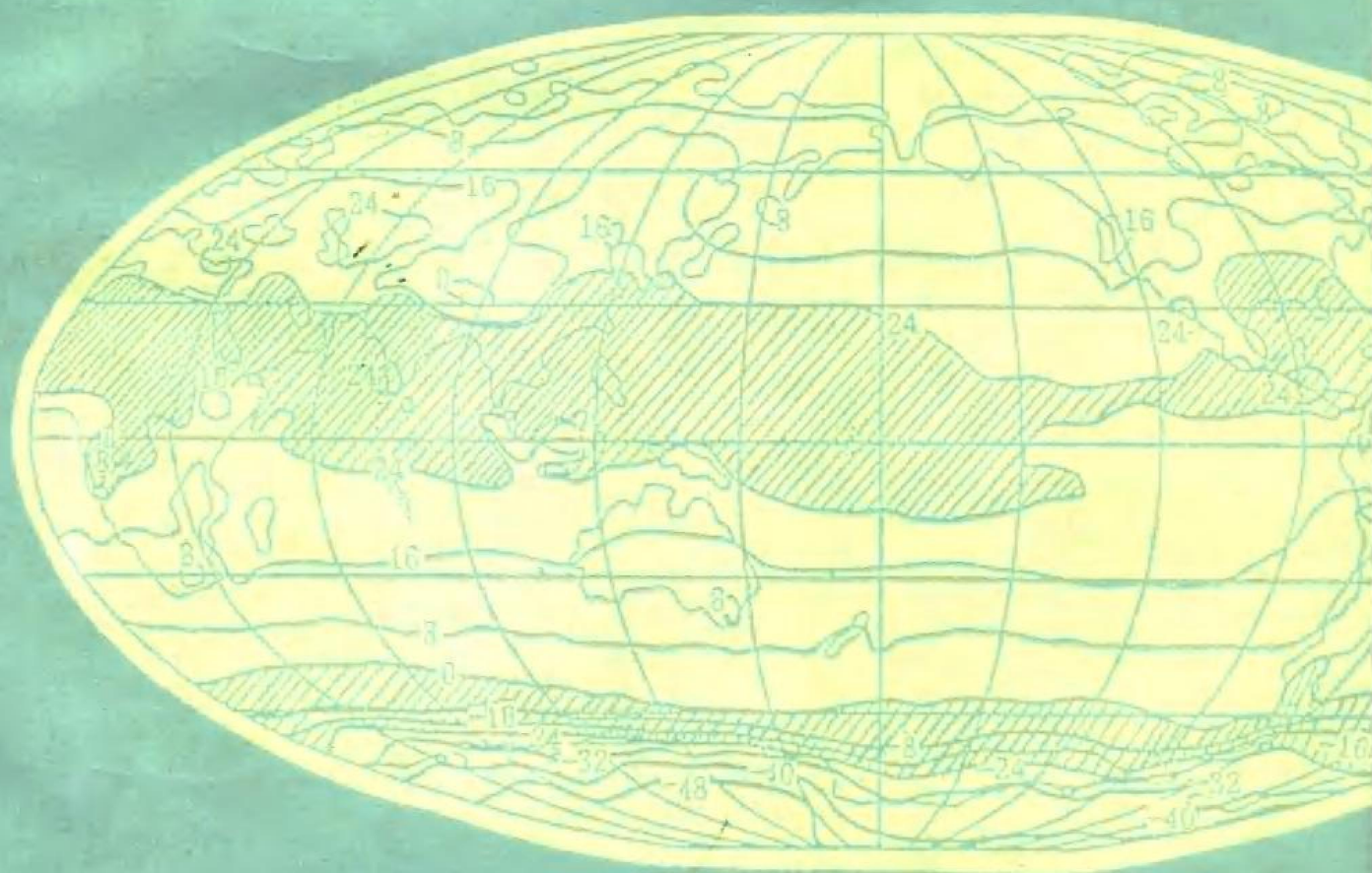




# 大气 环流 概论

〔日〕新田 尚



气象出版社

# 大气环流概论

〔日〕新田 尚 著

吴贤纬 侯宏森 米志新 译

殷显曦 侯宏森 校

气象出版社

## 内 容 简 介

本书是一本大气环流理论性专著，其内容涉及的范围比较广泛，包括大气环流理论发展总结、大气环流观测事实、数值试验与模拟、大气环流与气候以及大气环流研究工作的展望等，是一本比较实用的参考书。

本书可供广大的气象科技工作者以及高等院校有关气象专业的师生参考。

新 田 尚

大 气 大 循 环 论

东 京 堂 出 版 1980

\* \* \*

大 气 环 流 概 论

〔日〕新 田 尚

吴 贤 纬 侯 宏 森 米 志 新 译

殷 显 曦 侯 宏 森 校

责 任 编 辑 庞 小 琪 陆 勇

高 等 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路46号)

常 熟 文 化 印 刷 厂 排 版 燕 华 营 印 刷 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行 全 国 各 地 新 华 书 店 经 售

\* \* \*

开 本：787×1092 1/16 印 张：16.5 字 数：409 千 字

1987 年 11 月 第 一 版 1987 年 11 月 第 一 次 印 刷

印 数：1—1,500 定 价：3.90 元

ISBN 7-5029-0024-1/P·0015

## 译 者 的 话

日本新田 尚编著的《大气环流概论》的中译本，今天问世了。我们趁此机会对新田 尚先生慨然允诺翻译此书，并为此书的中译本撰写了中文版序言，深表谢意。

《大气环流概论》是一本理论性专著，它包括了大气环流理论发展过程的总括、大气环流的观测事实、数值试验与大气环流模拟、大气环流与气候以及大气环流研究工作的展望等内容，涉及到十分广泛的领域，具有一定深度，而且在结构上也表现出较好的系统性，是一本较为实用的参考书。我们愿意把它奉献给大气环流理论的研究工作者，特别是活跃于第一线的从事天气、气候等业务技术工作的广大科技人员和气象院校有关专业的师生，我们相信会从中得到某些助益。

本书在总结大气环流理论研究的发展史实方面，提供了十分丰富的材料，旁征博引了各家之说，可以为读者进一步深入钻研下去，构筑出一条前进的阶梯。

作者十分重视观测事实的积累。第三章实际上就是有关大气环流的资料汇编，而且在资料的取舍，特别是南半球的资料方面，颇费苦心，进行了填补某些空白的努力，为研究全球大气环流提供了条件。

此外，作者在本书中还为读者介绍了丰富的参考文献，并提出了进一步探讨大气环流问题的若干途径和展望，这些也是十分有益的。

当然，本书的第二章和第五章等部分的内容，尚嫌简略了一些，正如作者在中文版序言中所谈到的那样，有待再版时予以补充和修订。

### 本书翻译分工如下：

译者的话、原书著者序

侯宏森

第一章

吴贤纬

第二章

吴贤纬

第三章

米志新、侯宏森

第四章

侯宏森

第五章

侯宏森

第六章

吴贤纬

第七章

吴贤纬

第八章

吴贤纬

第九章

吴贤纬

名词解释

吴贤纬

本书中译稿草成之后，曾蒙朱抱真同志帮助审阅，在此谨致谢意。

译 者

1985年7月

## 原书著者为中译本写的序言

### 中文版序言

新田 尚

最近听到拙著《大气环流概论》将译成中文出版，我感到责任十分重大。这本书是我半生学习的成果，也是我对大气环流这种大规模的大气现象所具有的炽热之情的产物，这种兴趣至今不衰。虽然这本书就自己来说是倾注了最大的努力而写成的作品，但今日反复阅读仍然发现存在各种缺陷，这是当时我力所不及的。如果可能，我十分愿意花些时间加以修订。不过，在中国把这本书翻译出版，自然是觉得它还有一定的需要和使用价值，因此尽管内容还有一些局限，只要现在还有用处，我愿意暂以本书的初版献给中国的各位读者。

因此，在这篇序言里，我稍微陈述一些现在的想法，希望对上述缺陷起到弥补的作用。大气环流理论和气象学的其它领域的理论一样，都在不断地发展着。可否也将本书看作是这些发展中的一个里程碑，我希望各位读者不断地超过这个里程碑，在增长学识的过程中前进。如果本书能成为前进的一块奠基石，那么我作为本书的作者将不胜欣喜。

我们究竟为什么关心大气环流理论并不断学习呢，其理由大致可以区分为以下三种类型：

(1) 没有什么特殊的理由，只是对大气环流感兴趣而予以关心的；

(2) 认为大气环流作为气象学和气候学的一个综合性研究领域十分重要，也颇饶兴趣，因此希望更详细地了解其内容；

(3) 想专门学习大气环流理论的。

因此，作为读者来说，有必要首先考虑一下自己的阅读目的，并明确属于上述区分的哪一种类型。

如果您是属于第一种类型的读者，那么我想只简单地阅读本书的重要章节就够了，不必过多地思考那些比较繁难的部分，可以粗读本书，舍去那些内容虽然重要但却难懂的地方。尽管这样，如果您能觉得“探讨大气环流问题是很有趣的”，那么对作者来说就已充分达到了目的。在这种情况下，由于第一章写出了全书的要点，因此能够理解其内容就可以了。虽说是要理解内容，当然不是讲要百分之百地理解而是大致掌握大气环流的梗概即可。我希望第一种类型的读者重视掌握事物的梗概，而不去涉及它的细节，这不仅仅是对学习大气环流而言，学习气象学其它领域的内容也是如此。在反复学习这些内容的过程中，自然而然地就可以掌握气象学的基本结构。此外，通过这样的学习还会进一步加深兴趣，可能有些原来属于第一种类型的读者转变为第二种类型的读者。

至于第二种类型的读者则有必要在阅读本书之前作些准备。沿着本书的结构顺序而言，首先希望通过第一章牢固地掌握住基本梗概。在这个阶段，要明确自己可以接受的程度，详细内容可以放到以后去学，这一点是重要的。于是希望您去阅读第二章。不过，由于篇幅所限，第二章阐述的内容有的地方写得稍嫌简单。因此，如果读者感到自己的准备尚不充分时，请您这时先复习一遍气象动力学和气象热力学的基本内容。复习时不在过细的部分多下功夫，只对基本内容有重点的复习，这一点很重要。复习过后，回过头来再一次阅读第二章。我想

您是可以明了在探讨大气环流时从理论上阐述湿润大气是必要的，因此将气象动力学和气象热力学结合起来的观点是重要的。如果已弄清楚了这一点，希望再一次考虑：地球大气所受到的各种物理影响以及因之而在大气中产生的物理反应是如何表现的。

希望读者也可以把第三章作为资料汇编来利用。在撰写这一章时，很为某些内容（譬如北半球的气压场、气温场）资料过多，而另外一些内容（譬如南半球的气象要素分布图）却很少有可靠的资料（归根到底是观测值少）而颇费苦心。不过，由于我始终试图写出全球的内容，因此进行了填补空白的努力。另外，过多的资料的取舍选择也并非简单易行之事。今天再回过头来看，我认为将来有机会再对资料进行一次认真的分析研究，和新获得的资料（特别是全球大气研究计划第一次全球试验的资料）一起再定结构。

第二种类型的读者应最认真地阅读第三章。气象学问题和其它自然科学问题一样，都是以自然界的“事实”为研究出发点的。因此希望充分掌握这些“事实”，从而努力区别出哪些现象是第一位的，哪些现象是第二位的。这也许要花费一些时间，但这种努力一定会获得实效。

对于第二种类型的读者来说，第三章以后可以接着读第四、第五章，而第六章则有选择的余地。如果是只想掌握模拟试验一般常识性知识的读者，则可在阅读第四、第五章和第六章中的6.1和6.2两节后即移向下一章。如果感到不够充分，则可再阅读6.3和6.4两节以掌握其基本内容。在这里还想强调一下，那就是必须舍去那些微细的枝节问题，掌握最重要的内容。

第七章前半部分关于历史的回顾一段，如果是想加深理解的读者可以仔细阅读，如果对此不是那么关心的读者则可简单地看一看，或者跳过去不看也行。这一部分对作者来说也是处于尝试性谈论阶段，几乎是按照Lorenz的看法叙述的，因此将是今后研究的课题。那么，可以从7.2节再仔细阅读。在阅读时，如果是理论上感到有困难的读者，开始可以跳过这一章不读。到进一步加深了对大气环流认识的阶段，可以一边复习第二章一边再阅读第七章。

第八章的编写目的在于提出存在的问题。本章的内容是探索大气环流理论某一个发展方向。希望以这种理解去阅读。气候学问题有若干研究方法，而气候模式问题是今后重要的研究方法之一。

第二种类型的读者在读完一遍本书以后，如果产生了一股“干劲”，想更加认真地学习，那么请阅读本书附录“写给进一步学习大气环流理论的读者”中所介绍的参考书（在本序言末尾，还列出了一些在本书发行后出版的参考书，也供读者参考）。

最后是第三种类型的读者。我首先想说的是这些读者不久的将来都是必须依靠自己前进、发展的，所以尽可能不要依赖别人，在自己脚踏实地的前进过程中，不断提高对问题的认识。如果能够这样做，则应追溯到一篇一篇的原著论文亲自学习，通过艰辛的努力与不断摸索，掌握住一个一个的问题，从而建立起自己的观点与见解。但是为了防止主观独断，须要经常与第三者一起研讨，通过讨论及明确自己的观点，并得到客观的评价。

对于第三种类型的读者阅读本书，本来已经没有什么多余的话说。不过希望对第二章采取分析的态度，以自己的观点为基础进行阅读，并自己给予补充。对第三章暂时保留本书初版的内容予以使用。对第五章可以做些补充，譬如中国科学院大气物理研究所叶笃正先生所领导的研究组使用旋转水槽进行室内试验取得的最新成果，在本书中完全没有涉及，特别是增加了与喜马拉雅山形状相似的障碍物所进行的旋转水槽试验的结果，尤其值得注意。

对于第六章，最近积累了一些本书出版以后的新内容，尤其是在遥相关（teleconnection）

和大气敏感性(sensitivity)的理论及数值试验方面已有许多有趣的成果。最近的将来希望能将这部分内容予以补充。

第七章的内容写起来要用许多篇幅,作者在执笔过程中也感到有些犹豫不定,最后才以数值模拟为重点写成现在的样子。我想今后有机会再一次从理论上予以总括,是很必要的。

第八章说起来只不过是一篇导论,表明大气环流理论发展的一种趋势,第三种类型的读者不要性急,希望扎扎实实地学习。此外,在本书中虽然全未涉及有关长期预报问题,但对其进展自然也应充分考虑。就这种意义来说希望利用参考文献和附录所介绍的内容,亲自查阅原著文献。在本序言的最后,对本书出版后发表的文献也做了一些介绍。

对于作者来说,大气环流确实是一个充满魅力的课题,是取之不尽的有趣的学问源泉。它是如此的宽广和深邃。如果有的读者怀有与作者相同的关心,那么我希望您个人写出具有特色的“大气环流论”。Bertrand Russell先生曾就物理科学说过如下的话:

“在物理学里,我们所熟悉的物理世界,不是数学的阐述;而不太了解的物理世界却是属于数学范畴的。我们在物理学中之所以能够有所发现,只是因为不涉及到它的数学性质而已。”

这种观点虽然可以说是过谦了,但对于自然界的真理来说,作者甚愿经常保持谦虚态度。这对大气环流理论也是适用的。作者在此表述了自己的观点,就此搁笔。

1983年6月



## 本书使用的非法定计量单位换算表

1ft (英尺) = 0.3048 m (米)

1mile (英里) = 1609.344m (米)

1mmHg (毫米汞柱) = 133.322 Pa (帕)

1cal (卡) = 4.1868 J (焦)

1erg (尔格) =  $10^{-7}$  J (焦)

1ly (兰) = 4.187 J/cm<sup>2</sup> (焦/厘米<sup>2</sup>)



# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 序言——什么是大气环流        | 1  |
| 1.1 大气绕着地球循环流动         | 1  |
| 1.2 大气环流论的历史           | 1  |
| 1.3 观测事实的累积            | 4  |
| 1.4 气象理论的发展            | 7  |
| 1.5 最近的环流问题            | 8  |
| 第二章 用于理解大气环流的理论气象学入门   | 10 |
| 2.1 什么是环流理论?           | 10 |
| 2.2 气象辐射学与热平衡、水分平衡     | 10 |
| 一、气象辐射                 | 10 |
| 二、辐射的传输                | 11 |
| 三、太阳短波辐射               | 12 |
| 四、地球-大气系统的长波辐射         | 14 |
| 五、气象辐射与大气运动            | 14 |
| 2.3 气象热力学与热能           | 16 |
| 一、热力学过程                | 16 |
| 二、热力过程的方程              | 17 |
| 三、热力方程的利用              | 18 |
| 2.4 气象动力学与动能           | 19 |
| 一、大气运动及其方程             | 19 |
| 二、动力不稳定性与大气中的扰动        | 22 |
| 三、大气的数值模式              | 24 |
| 2.5 气象热力学与气象动力学结合及能量框图 | 27 |
| 2.6 参数化与湿大气动力学         | 29 |
| 第三章 大气环流的观测事实          | 30 |
| 3.1 观测大气环流             | 30 |
| 3.2 天气系统的观测事实          | 31 |
| 一、大气的层结结构              | 31 |
| 二、风场                   | 32 |
| 三、气压场                  | 48 |
| 四、温度场                  | 56 |
| 五、湿度场                  | 59 |
| 六、物质循环                 | 60 |
| 七、大气振荡谱                | 62 |
| 八、海面水温与海冰分布            | 64 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 九、高层大气的观测事实 .....             | 65  |
| 十、热带辐合带 (ITCZ) .....          | 69  |
| 3.3 从物理学角度看到的观测事实 .....       | 71  |
| 一、平衡状态和物理量的收支 .....           | 71  |
| 二、角动量收支 .....                 | 73  |
| 三、平均纬向风的维持 .....              | 82  |
| 四、热源和冷源 .....                 | 82  |
| 五、热量平衡 .....                  | 88  |
| 六、蒸发与降水 .....                 | 98  |
| 七、水汽收支 .....                  | 99  |
| 八、能量收支 .....                  | 102 |
| 九、大规模扩散过程 .....               | 112 |
| 3.4 古气候的观测事实 .....            | 113 |
| 3.5 通过观测事实调查到的大气环流问题 .....    | 114 |
| <b>第四章 大气环流的模拟试验</b> .....    | 116 |
| <b>第五章 转盘试验</b> .....         | 117 |
| <b>第六章 数值模拟与数值试验</b> .....    | 121 |
| 6.1 引言 .....                  | 121 |
| 6.2 历史沿革 .....                | 124 |
| 6.3 第三期的数值模拟与数值试验 .....       | 125 |
| 6.4 第四期的数值模拟与数值试验 .....       | 155 |
| 一、环流的季节变化 .....               | 155 |
| 二、海洋-大气耦合模式 .....             | 170 |
| 三、平流层-对流层的质量交换与大尺度大气扩散 .....  | 173 |
| 四、大气灵敏度测试 .....               | 181 |
| 五、研究环流控制机制的数值试验 .....         | 191 |
| 六、小结 .....                    | 202 |
| <b>第七章 解释大气环流的理论</b> .....    | 203 |
| 7.1 理论解释的历史沿革 .....           | 203 |
| 7.2 环流的统一理论 .....             | 217 |
| 7.3 环流形成的理论 .....             | 218 |
| 7.4 环流维持理论 .....              | 226 |
| 一、热平衡的维持 .....                | 227 |
| 二、角动量平衡的维持 .....              | 228 |
| 三、能量循环的维持 .....               | 229 |
| 7.5 环流变动理论 .....              | 231 |
| 7.6 环流效率理论 .....              | 231 |
| <b>第八章 气候与气候变迁和气候变化</b> ..... | 233 |
| 8.1 大气环流与气候 .....             | 233 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 8.2 气候系统.....              | 233 |
| 8.3 气候、气候变迁、气候变化的物理过程..... | 236 |
| 一、问题所在 .....               | 236 |
| 二、大气-海洋的相互作用 .....         | 237 |
| 三、外因与历史气候 .....            | 238 |
| 四、气候、气候变迁、气候变化的一般定义 .....  | 239 |
| 五、气候变化的特点 .....            | 240 |
| 8.4 气候模式与气候预报 .....        | 241 |
| 一、气候模式的研制 .....            | 241 |
| 二、气候模式的性能 .....            | 241 |
| 三、气候预报的可能性 .....           | 242 |
| 四、二氧化碳与气候问题 .....          | 242 |
| 第九章 结语——今后的大气环流理论 .....    | 244 |
| 参考文献 .....                 | 244 |
| 补充参考文献 .....               | 248 |
| 名词解释 .....                 | 249 |

# 第一章 序言——什么是大气环流

## 1.1 大气绕着地球循环流动

早在哥伦布发现美洲大陆的航海时代, 船员就已经知道在太平洋及大西洋上存在着定常吹动的风——信风。虽然, 暴风雨常常袭击他们, 赤道无风带也为难他们, 但是在大洋上劲吹并推动帆船的风, 使他们深信不久必能到达目的地。然而, 对于这种风(信风只是绕着地球循环流动的大规模风系的一部分), 他们大概并不了解它, 也并不认为是有什么神秘的。

图 1.1(a) 表示 1 月份(代表冬季)月平均地面风的气流情况。例如, 发源于西伯利亚的气流在北极一侧从东面向南流到日本及中国东海, 西面则流向阿拉伯一侧。这种气流还横渡太平洋, 有时越过赤道与其他气流合并。因此可知, 大气是向东南西北各方遍及整个地球表面循环流动的。图 1.1(b) 表示 7 月份(代表夏季)的情况, 同样也是自由地在地球上劲吹的。以上是地面风, 那末, 高空情况如何呢?

第二次世界大战中, 空袭日本的美空军 B29 轰炸机在日本上空遇到了强西风。这可以说是发现急流(中纬度西风带)的一个开端。另外, 二次大战中, 日军施放气球炸弹也是利用西风的例子。从那时起开始充实了无线电探空的高空观测网。大战以后, 确认了在对流层顶附近高度存在几乎围绕整个中纬度高空的强气流(图 1.2)。最近根据定高气球记录, 又直接确认了这个事实(图 1.3)。这是一种设计在对流层顶 200 hPa 等压面(高度约 12 km)附近漂流的气球, 按美国的全球水平探测技术计划(GHOST)施放的。图 1.3 表示从新西兰的克赖斯彻奇岛施放的气球围绕地球 4 圈多的轨迹(这是人造卫星追踪的)。从图可知, 气球是一面波动一面随着气流从西向东始终绕着南半球漂流的(气球绕地球一圈约需 11 天左右, 因此, 每一次轨迹的差异就表示大气 10 天左右的变化。若将这些轨迹平均, 波动就会消失, 成为与图 1.2 的急流相似的轨迹)。

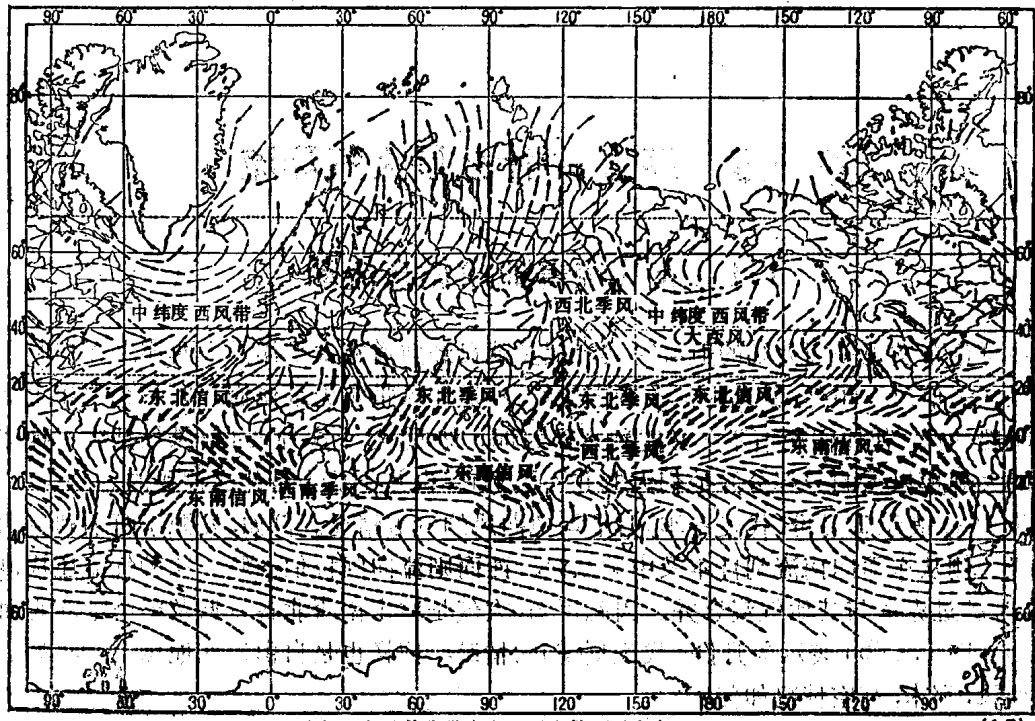
这样把包围地球的大气在全球规模进行的环行运动称为大气环流。一般在说大气环流(general circulation)时是指根据每天的运动情况, 以一个月左右为单位进行的平均运动。

## 1.2 大气环流论的历史

处理大气环流的学科分支称为大气环流论。回顾一下人类是如何建立大气环流理论的, 这可为我们考察大气环流问题提供宝贵的教材。

日本的冈田武松在从事气象学史工作中, 也回顾了环流理论, 而近年 E.N.Lorenz (1967) 正式地总结了详细的环流理论。关于这一点, 在以下的章节(第七章 7.1) 将再次详细谈到, 这里只作大体叙述。

即使在没有高空观测的 17 世纪, 学者们也已经被信风的存在所吸引, 他们仅仅根据地面观测资料就想解释为什么经常在赤道北侧有东北风、赤道南侧有东南风向赤道吹来。也就是, 在赤道低层加热的空气上升之后, 补充这部分空气而吹来的气流就是信风。Hadley (1735) 从

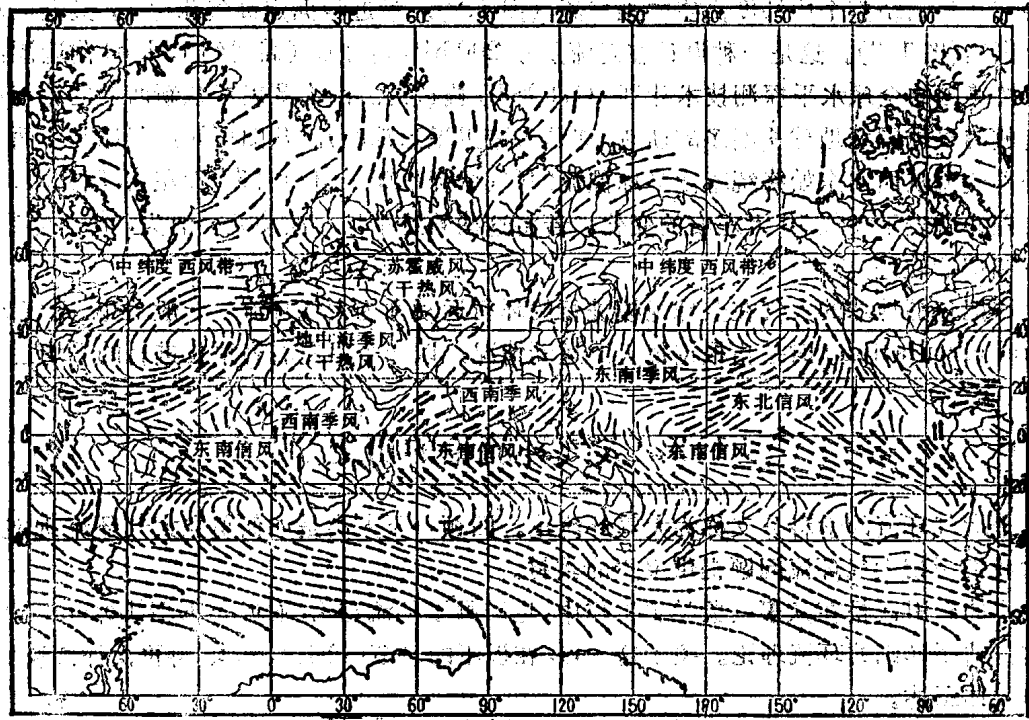


盛行风向及其次数占全观测次数的百分率

(1月)

→25%—40%    →40%—60%    →60%—80%    →80%以上    →次数不确定

图 1.1 (a) 1 月份世界地面风分布



盛行风向及其次数占全观测次数的百分率

(7月)

→25%—40%    →40%—60%    →60%—80%    →80%以上    →次数不确定

图 1.1 (b) 7 月份世界地面风分布

(据《气象辞典》)

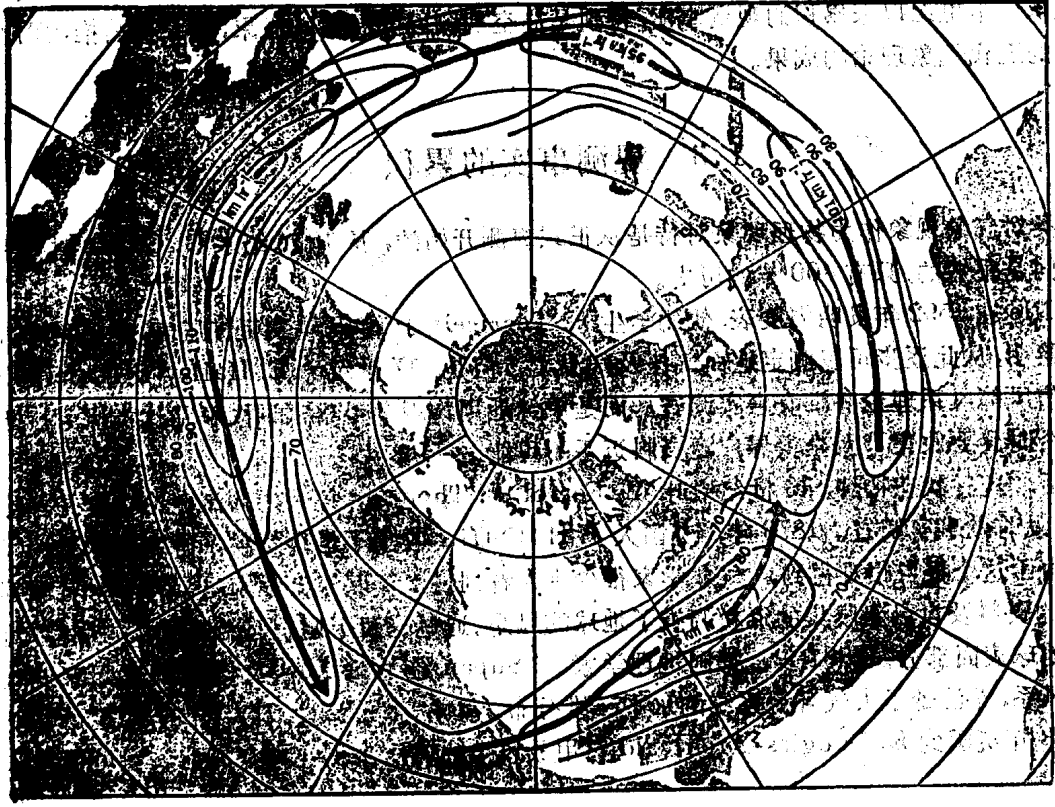
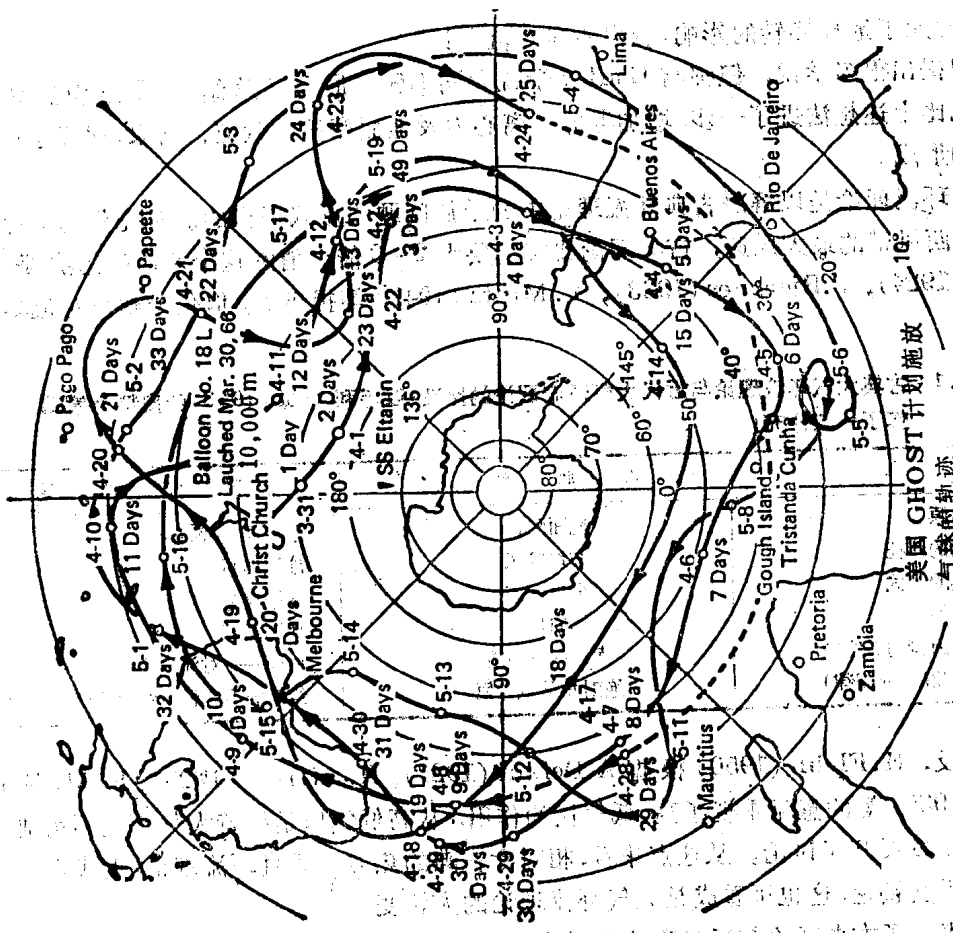


图 1.2 1月份北半球高度10到12 km上急流的平均位置及风速  
(据 Namias; 图源自 Trewartha, 1968)



美国 GHOST 计划施放  
气球的轨迹  
1966年3月30日施放第18号气球  
(根据 Lusignan 及 Kiely, 1970)

图 1.3 美国 GHOST 计划施放的气球在南半球经过的轨迹

这里开始,考虑了地球旋转的影响,提出古典对流学说。

其后曾提出很多学说,但都与 Hadley 学说大同小异。最后以总结形式出现的 Rossby (1945) 学说比上述想法进了一步,增加考虑了离心力及地面摩擦的效应。结果,解释了中纬度间接环流的形成。

现代的环流理论是以解决古典环流理论中的矛盾问题的形式提出的。首先作为问题考虑的是中纬度西风带的最大风速,古典理论比实况要大 2—3 倍。消除这个矛盾的想法是由 F. M. Exner (1924), V. Bjerknes (1933), Y. Mintz (1947) 等提出的,但仍未超出对流学说的范围。

表 1.1 古典大气环流理论与近代大气环流理论比较(以毛利、松本(1956)的资料为基础作了一些补充)

|             | 古 典 理 论 | 近 代 理 论        |
|-------------|---------|----------------|
| 环流的起源       | 地面附近    | 对流层、平流层        |
| 运动形式的特征     | 非地转风    | 准地转风           |
| 南北交换的形式     | 垂直环流    | 水平交换           |
| 环流的结构       | 纬向型     | 环流圈型           |
| 作为主要因素的温度差  | 赤道—极地   | 地面—对流层顶及赤道—极地  |
| 主要动力效应(或规律) | 绝对角动量守恒 | 绝对涡度守恒及湿润大气动力学 |

与此相反, H. Flohn (1950) 根据 A. Defant (1921), H. Jeffreys (1926), F. M. Exner, H. Lettau (1939) 等的意见重视了高、低气压的作用,从高低气压是维持大气环流不可缺少的因素的观点出发展开了讨论。从这点来看,相对于古典的热力学垂直环流理论,近代理论可以说是动力水平交换论,这也可看成是大气环流理论的大转变。

表 1.1 表示了古典理论与近代理论的对比。在这里想强调一下,支持这种环流理论发展的是进入二十世纪以来累积的观测事实,特别是高空观测网开辟后的成果,以及受其推动而发展起来的近代气象理论的成果。

### 1.3 观测事实的累积

人类对气象现象作为物理现象对待是从正式观测开始的,从 16 世纪末 G. Galile 时代到近代时间是很短的,只有 400 年的历史。

Galile 在 1592 年发明温度表,他的学生 E. Torricelli 于 1648 年发明气压表,这是科学气象学的黎明,从此逐步可以测定地面气压及气温了。但是,17 世纪的 E. Halley 及 Hadley 所论及的信风等风系理论并没有事实调查,而是单纯地用物理学考察来试图解释这类风系。想来在那个时代要收集涉及全世界广泛资料近乎不可能。

尔后,这种状态持续,19 世纪中叶 W. Ferrel, J. Thomson 等人的环流理论也全是理论上考察,没有做事实调查。1876 年,美国人 J. H. Coffin 收集了已存资料,研究地球上的风系。但由于这个报告很难得到,气象学家很少有人看到过。苏联气象学家 A. Woeikow 根据 Coffin 的资料及自己新收集的资料调查了地球的风系。通过这两个调查,大致搞清了大气环流系统的地球表面部分。1881 年,德国地理学家 A. Supan 继 Woeikow 及 Coffin 之后又调查了地面风系,弄清楚了大气环流系统的水平二维分布。

1883 年英国的 E. Douglas-Archibald 试用放风筝的方法来测定高空风速,但可惜无法



广泛地在各地进行。同一年，爪哇的喀拉卡多亚(Krakatau)岛火山发生大喷发，微尘飘上高空，世界各国发生如异常晚霞等气象光学现象。根据这种情况，可以间接地推断高空大气在相当广泛范围内的运动状态。当时的推断认为，喀拉卡多亚火山喷发的灰尘平均以34.5 m/s的速度自东向西绕赤道一周。根据这个事实，将赤道上空的平流层东风称为喀拉卡多亚风(或高空信风)。

1889年H. H. Hildebrandsson收集了在地球上若干地点观测的上、中、下三层云向资料，调研了大气环流系统的实际情况。此外，在1891年L. Teisserenc de Bort根据地面等压线推算了400 m高度的等压线。又用箭头标示了卷云的走向，以这些资料来推断高空风系。

如前所述，Hildebrandsson及Teisserenc de Bort以上述观测结果及1896, 1897年IMO[国际气象组织略称，为现在的WMO(世界气象组织)的前身，1961年在发展中解散，成为WMO]组织的国际性的云运动观测计划成果为基础，指出了Ferrel及Thomson描述的环流系统的矛盾，论证了应该放弃他们的想法。

J. Hann根据高山观测为基础的资料，研究了低气压及高气压的结构，结果他也感到高空气象观测的必要性，这样，在气象界产生了在自由大气中进行高空气象观测的计划。

1892年，法国的G. Hermite及G. Besançon首次施放探测气球，以后逐步普及，各国都分别展开了。这是在橡胶气球上携带自记气象仪器，上升的气球达某一高度就破裂落下，再研究落下来的仪器记录。气球可达到1600 m高空。此外，用测风经纬仪追踪施放的小型气球，这是只测高空风向、风速的测风气球，也是从1900年左右开始广泛使用的。德国、英国、日本的高空气象台也使用过风筝，但由于不如气球那样适合高空观测，自然就不怎么普及。

从那时开始的高空气象观测业务的第一位的收获就是发现了平流层。法国的托勒普高空气象观测站所施放的气象探测气球测定了高空大气的温度。结果，弄清了从地面到10 km左右高度的气温是随高度而降低的。并发现11 km以上高度的气温则大体恒定，即使高度增加也几乎不降低，而且还发现略有增高的趋势。这种大体恒温的气层定名为平流层(Stratosphere)。另一方面，从地面到平流层以下的气层定名为对流层(Troposphere)。

不久，就弄明白了，高纬度的平流层的开始高度较低，而在低纬度则较高，也就是平流层的气温在高纬度地区较高，低纬度较低。此外，两层的界面并不是分明的几何学平面，而是有一定厚度的气层，这就是对流层顶(Tropopause)。

由于发现了平流层，在逐步正确得到大气环流图象的同时也了解到比以前所抱概念更为复杂的情况，气象学家的谜也更深入一层。

进入20世纪以后，气象学飞跃进步与无线电探空(以后是雷达测风)的发明关系极大。在此之前的探测气球方法，是在拾到坠落仪器以后再进行研究，无法及时知道当时大气状态如何，也不时有发生不知仪器落下地点而无法回收的情况。与此相反，使用无线电探空仪能及早得到表示当时高空大气状态的资料，而且观测也容易进步，所以观测点也迅速增加了。

关于无线电探空仪的发明者和发明年份无法明确确定，1930年左右，法国、德国、苏联都在研究试制，然后芬兰和美国的研究也有进展，逐步确立了基础技术，约在1936年开始在世界各国实际应用。

这样，对大气状态进行了正式的、三维的观测(高空天气图诞生)，观测范围也从地区性扩大为北半球。此外又开始逐步进行由飞机搭载观测仪器进行的观测，也旨在增加高空气象观测资料。

第二次世界大战以后，高空观测网大为充实，海洋上(岛屿及观测船)及南半球也设置了高

空观测点。观测次数也统一为一天两次(格林威治时间的0时与12时,观测次数多的国家达每6个小时一次,一天共4次),这对大气环流的研究来说具备了较充分的资料。

高空观测网扩展的结果,使大气环流的观测(分析)研究有了进展,特别有名的有:继Rossby之后的美国芝加哥学派的急流研究及UCLA(加利福尼亚大学)的J. Bjerknes与Mintz的平均场分析、V. P. Starr为首的MIT(麻省理工学院)小组的物理量分析研究。MIT小组收集的一组系统的高空观测资料是非常宝贵的,以至直到今天仍作为研究的原始资料。

这类研究有三维大气运动场的平均结构、能量平衡、角动量平衡、热量平衡、平均场及扰动场的相互作用及各种波相互间的能量转换等等,显示环流机制的观测事实逐步明显了,这是大约30年间的累积之功。

近年还进行了超高层气象观测,逐步了解了平流层以上的超高层大气的情况。本世纪初

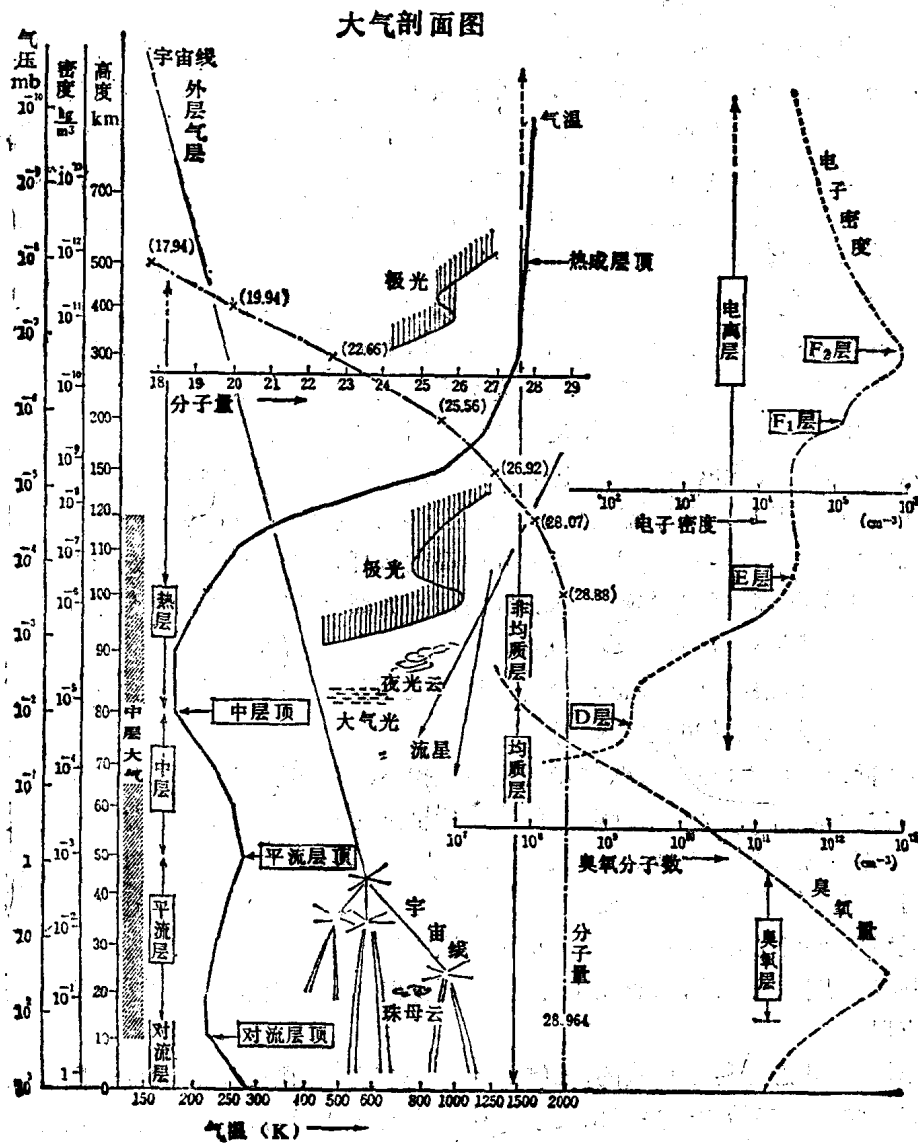


图 1.4 大气的垂直结构  
据《气象辞典》