

天气预报

——一个物理学的课题

[苏] A.C. 莫宁 著

科学出版社

天气预报—— 一个物理学的课题

〔苏〕A. C. 莫宁 著

林本达 王绍武 译

科学出版社

1981

内 容 简 介

本书简要地介绍了数值预报发展的历史。在本书的第一部分阐述大气压力场短期预报流体动力学理论的基本原理,并探讨了温度、风、云和降水等天气预报方法。本书的第二部分提出了描述地球和其它行星大气环流的物理原则,并讨论了根据预先计算大尺度大气过程动力学的非绝热因子来做长期天气预报的可能性。

本书可供数值预报工作者、气象科技人员以及大专院校有关专业的师生参考。

A. C. Монин

ПРОГНОЗ ПОГОДЫ КАК ЗАДАЧА ФИЗИКИ

Издательство «наука», 1969

天气预报—— 一个物理学的课题

[苏] A. C. 莫宁 著

林本达 王绍武 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 2 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1981 年 2 月第一次印刷 印张: 5 3/8

印数: 0001—4,200 字数: 120,000

统一书号: 13031 · 1483

本社书号: 2042 · 13—15

定价: 0.85 元

译 者 的 话

近二十年来,数值预报和数值试验方法在气象学领域有了迅速的发展.这种方法是数学和物理学的结合.在探讨各种更有效的数值计算方法的同时,近年来,人们对大尺度大气运动的物理原理也给予了更多的重视.莫宁所著的《天气预报——一个物理学的课题》一书就是这类的专著.

本书对1970年以前有关大尺度大气运动物理原理研究方面的发展做了很好的概括.作者以写基本思考方法的形式,把天气预报表述成物理学的课题,并对一些有争议的问题大胆地发表了自己的见解.本书所涉及的内容范围较广,除介绍短期天气预报流体动力学理论的发展外,还对长期天气变化的物理原因,如全球性、非绝热性、云的调节作用、海洋与大气的相互作用以及地球以外的影响等作了专门的讨论.此外还介绍了有关数值试验、大气环流的模拟、可预报性问题以及其它行星大气特性等方面研究的进展.书中还附有大量参考文献,便于查阅.对于从事数值天气预报、数值试验以及长期预报等有关的气象科研和数学工作的同志,这是一本有价值的参考书.

本书于1972年被译成英文出版.为了便于我国气象工作者了解有关的内容,我们把该书译成了中文.由于我们水平有限,译文难免有错误和不妥之处,希望读者给以指正.

译 者

前 言

几年前作者读到了著名的苏联地震理论家 В. И. Кейлис-Борок 的《地震学与逻辑》，书中阐明了地震学领域内可以完全自动控制地震的设想。与大气物理的状况作对比使作者得出结论，同样写一本《气象学与逻辑》是很有益的，而且目前自动控制还没有提到议事日程上来，对于气象学来讲，这个任务大概要比地震学工作量大几个量级，目前所能做的是，对现代气象学的主要问题给以逻辑的叙述。

每一个深思熟虑的科学工作者（我们希望这两个形容词经常是一致的）首先应该能提出问题，哪怕是对自己提出也好，并且不仅能提出“怎样？和为什么？”，而且能提出更难的“是什么？”和最难的“什么是主要的？”的问题。可以想像，这些按自然顺序依次提出的基本问题的总和，就是这门科学的逻辑。

按作者的意见，现代气象学的主要任务是长期天气预报。这个方面的主要问题（例如“多长时间的天气预报是长期预报？”或者“为什么会产生长期天气变化？”）只是在战后才提出来的，而且不是一下子提出来的。廿年来对这些问题的思考，一系列问题的报告和文章，与朋友和同事（苏联科学院的 А. М. Обухов, А. М. Яглом, Е. М. Фейгельс, Л. А. Дикий 和 Б. Л. Дзердзеевский, 水文气象局的 Е. Н. Блинова 和 И. А. Кибель）的讨论，以及与 J. G. Charney, N. A. Phillips, J. Smagorinsky, P. D. Thompson 和 Y. Mintz 的座谈，促使作者尝试写一本《气象学与逻辑》。结果就写了这本书。上述这些人

也和作者一样均致力于把数学物理思想应用于气象学中。

本书的某些部分是已经证明了的原理（如位涡度守恒原理），另一些内容只表示作者的意见，而且可能有争论（如不必回到原始方程，存在自由积云对流，数值试验方法的决定性作用，可预报性问题的的重要性，太阳活动对天气的影响很小等意见）。作者不怕对有争论的问题提出意见，而且认为科学争论进行得很少，要知道，这种争论最终会帮助我们揭示真理。

书中引了不少文献的来源，但并不想叙述历史和确定先后，或者完全给出或选出最重要的论文。

作者对 Л. А. Дикий 的有益帮助表示深切谢意，并感谢 Б. Л. Гаврина 读了手稿的一些章节，Г. С. Голицын 提供了其它行星大气的资料，А. Н. Гезенцвя, Л. М. Белова 和 Н. И. Солнцева 协助完成手稿。

目 录

第一章 引论.....	1
§ 1. 简要历史	1
§ 2. 天气过程的尺度	3
§ 3. 大气过程的谱	6
第二章 短期天气预报的流体动力学理论.....	11
§ 4. 绝热不变量	11
§ 5. 大气运动的分类	17
§ 6. 气象场的适应	23
§ 7. 准地转近似	25
§ 8. 准力管近似	32
§ 9. 原始方程	36
§ 10. 天气过程的垂直结构	39
§ 11. 差分格式	45
§ 12. 天气预报	50
第三章 长期天气变化的物理性质.....	66
§ 13. 全球性	66
§ 14. 全球观测	68
§ 15. 非绝热性	83
§ 16. 大气中的热流入量	86
§ 17. 云的调节作用	94
§ 18. 数值试验	100
§ 19. 海洋和大气的相互作用	112
§ 20. 可预报性	118
§ 21. 地球以外的影响	128
第四章 补充	134
§ 22. 行星环流的模拟	134
§ 23. 其它行星的大气	140
§ 24. 计划与预报	148
参考文献	153

第一章 引 论

§1. 简要历史

我们并不准备详细地叙述天气预报科学方法的历史（更不用说叙述不科学的，例如与勃柳斯历法类似的方法了），我们只提出五件事，按作者的意见，这些事件在现代天气预报理论的形成中起了最重要的作用（有兴趣的读者可以在例如 Хргиан 的著作^[1]中找到更详尽的历史报道）。

第一是巴黎天文台长 Le Verrier 组织了天气服务。他完成了法国政府于 1854 年 11 月 14 日在巴拉克拉瓦毁灭性的风暴之后交给他的任务，于 1885 年 2 月 19 日首次绘制了那一天的天气图。

第二是 Bjerknes 的《从数学及力学观点研究天气预报问题》（1904）论文的发表。在这篇论文中天气预报问题第一次被表示成斜压流体¹⁾ 流体力学方程的初值问题。在 J. Bjerknes 1917—1919 年发表的论文和随后所谓挪威学派的论文中发展了大气的锋，即不同气团之间的分界面的概念以及由

-
- 1) 如果流体的密度 ρ 只是气压 p 的函数，这种流体就称为正压流体，反之，就称为斜压流体。实际大气是斜压的。对于斜压大气， ρ 不只决定于 p ，而且还决定于温度 T ，若略去湿度，克拉珀龙方程 $p = \rho RT$ ($R \approx 0.287$ 焦耳/克·度是干空气的气体常数) 是正确的。对于位势力场中的非粘性流体，Bjerknes 的环流定理 $\frac{d\Gamma}{dt} = - \oint_L \frac{d\rho}{\rho}$ (这里 $\Gamma = \oint \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S}$ 是沿着闭合回路 L 的速度环流) 是正确的。由这个定理可知，斜压流体中， $p =$ 常数的面和 $\rho =$ 常数的面 (或 $p =$ 常数的面和 $T =$ 常数的面) 的相交将导致涡旋的形成。

于分界面上的波失去稳定性而形成气旋的概念，这些论文奠定了现代短期天气预报天气学方法的基础。但是这些概念目前对于数值预报方法还没有很大的意义，当然这只是由于纯技术性的原因。

数值预报中所应用的水平步长为几百公里的空间网格，所以考虑不了有很大流体动力场梯度的狭窄带，而大气的锋正是这样的带，要在数值预报中考虑它应该探讨其它的方法。

第三是 Richardson 《用数值方法做天气预报》(1922) 一书的出版，该书中叙述了像天文学家通过求解行星系动力学方程来预先计算行星的位置那样，通过求流体力学方程的数值解来估计未来的天气的最先尝试。这个尝试是不成功的，因为经过很长时间的计算才做出一天(1910年5月20日纽伦堡到奥格斯堡地区)的天气预报，这是令人不满意的。从今天来看，Richardson 失败的原因是很明显的：首先是初始资料不完整（那时只有地面资料，而且只有欧洲稀少台站网的地面资料）；其次是有限差分格式不完善（例如，没有遵守后来在1928年确定的关于空间及时间步长关系的库朗特-弗利德里赫斯-列维判据）；最后，第三个原因是所要积分的方程过分复杂，这些方程除描述了对天气重要的运动（所谓天气过程）之外，还描述了各种各样声波型的“噪音”、植物的呼吸等等。

在1940年，Кибель 的论文^[2]中克服了最后这个困难。Кибель 这篇文章的发表在我们所考察的历史中是第四件重要的事。在这篇文章中提出了简化流体力学方程组的基本原则——渐近的“准地转分解”，这种准地转分解能够从方程的解中“滤掉”对天气不重要的“气象噪音”。后来，这个原则成了建立短期天气预报流体动力学理论的基础。

Кибель 在1940年只限于计算大气的低层（对流层），对这个层的上界（对流层顶）引进了不是从流体动力学规律中得

到的人为条件。在战后的年代里，几乎同时发表了 Обухов^[3] 和 Charney^[4,5] 的文章，在这些文章中已经导出了没有这种限制的“准地转近似”方程组(这是我们提到的第五件事)。

这些方程立即就被应用于实际计算：天气预报成为 Von Neumann 设计快速计算机时所考虑到的课题之一。Von Neumann 成了用电子计算机计算准地转近似方程组的最早工作^[6]的合作者之一。气象场短期预报流体动力学理论的建立是战后年代大气物理最重大的成就。现在，这个理论已经在一系列专门讲天气预报的数值方法的著作^[7-10]中作了阐述。

至于长期天气预报的物理基础，它的研究历史就短得多了(可以从 1943 年发表的 Блинова 的文章^[11]开始算起)，并且至今还没有得到对这种物理基础的完全表述。按作者的意见^[12]，短期预报与长期预报的基本差别(这种差别也解释了它们的理论状况的差异)就在于，对于短期天气预报，绝热近似的流体动力学方程组就足够了，而非绝热过程则是长期天气变化的本质所在。

§ 2. 天气过程的尺度

现在我们对我们将应用流体力学方程组的对象——大气，引进几个对进一步讨论有益的定量特征。大气的质量为 5.3×10^{21} 克，大气运动总动能 E 的量级为 10^{21} 焦耳(粗略地讲，个别气旋的能量小两个量级；为了比较，我们指出，1 兆吨梯恩梯 $\approx 4 \times 10^{15}$ 焦耳)。据 Борисенков 的经验估计^[13]，北半球冬季 $E = 4 \times 10^{20}$ 焦耳，夏季为 1.9×10^{20} 焦耳，而南半球冬季为 7.1×10^{20} 焦耳，夏季为 3.9×10^{20} 焦耳；Pisharoty^[14] 和 Груза^[15] 进行了类似的估计(Груза 指出，在对流层，平均有 70% 以上的动能为纬向动能，即平行纬圈运动

的动能, 30% 以下为经向动能; 大约有一半的能量与平均纬向环流有关, 一半与对平均纬向环流的偏差有关)。单位质量的动能 E/M 的量级为 10^2 焦耳/千克 $= (10 \text{ 米/秒})^2$; 因此人们取 $U = 10 \text{ 米/秒}$ 作为天气过程中空气运动的特征速度。

大气过程的根本能源是太阳的热。这种能源在地球上的强度为 1.8×10^{14} 千瓦, 然而, 大约 40% 的太阳辐射立刻被反射到宇宙空间中去, 因此, 初始值应取 1×10^{14} 千瓦, 或者对单位地球表面积平均为 20 毫瓦/厘米²。这些能量只有不大的一部分转变成大气运动的动能: 据 Palmén 的经验估计^[16,17], 整个大气中位能转变成动能的速率 $\partial E / \partial t$ 大约等于 2×10^{12} 千瓦, 因此, “大气热机”的效率只有 2% 左右(在个别气旋中, $\partial E / \partial t \sim 1-2 \times 10^{11}$ 千瓦, 而在气旋之外平均而言发生动能向位能的缓慢逆转变)。根据这些数据, 单位质量的动能产生的平均速率 $\frac{1}{M} \frac{\partial E}{\partial t}$ 为 4 厘米²/秒³。由于摩擦动能耗散成热的平均比速率 ε 应有同样的量级; 实际上 Brunt^[18] 还在 1926 年就用另一种方法得到对流层中 $\varepsilon \sim 5$ 厘米²/秒²。

能量转换的特征时间

$$\tau = \left(\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial t} \right)^{-1} = \frac{10^{21} \text{ 焦耳}}{2 \times 10^{12} \text{ 千瓦}} = 5 \times 10^5 \text{ 秒},$$

亦即大约等于一星期。天气过程的能量因摩擦而耗散的特征时间有相同的量级。实际上, 在发生大尺度运动能量以常定(即不依赖于 L) 的速率 ε 爆发式地转变成小尺度运动能量的尺度 L 范围内, 有效“粘性”的形式为 $\nu(L) \sim \varepsilon^{1/3} L^{4/3}$ (即所谓的理查孙“四分之三定律”, 这个定律对从毫米到千公里的几乎所有大气运动尺度谱均适用, 见图 1), 而这种“粘性”所造

成的能量耗散时间为 $\tau(L) \sim \frac{L^2}{\nu(L)} \sim \varepsilon^{-1/3} L^{2/3}$. 据 Обыхов^[31] 估计, 天气过程的特征长度的量级为 $L_0 = c/l$, 这里 c 是声速, $l = 2\omega \cos \theta$, 即所谓的科氏参数 ($\omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ 秒}^{-1}$ 是地转角速度, θ 是到 $\frac{\pi}{2}$ 的余纬); 在中纬度, $L_0 \sim 3000$ 公里. 利用这个 L_0 值和上面给出的 ε 值, 对天气过程得到 $\tau(L_0) \sim \varepsilon^{-1/2} L_0^{2/3} \sim 3 \times 10^5 \text{ 秒}$. 需要指出, 天气过程的欧拉时间尺度 $\tau_1 = L_0/U$ 具有同样的大小(因为在中纬度西风带中, 大气平均层在几个星期内绕地球一周, 所以对整个大气而言, 欧拉时间尺度的量级为月).

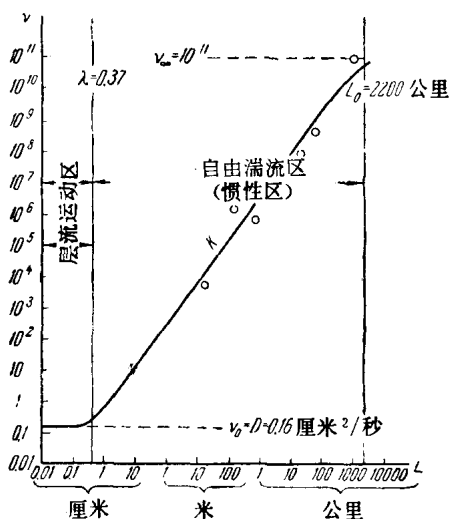


图1 垂直扩散系数 $\nu(L)$ 随湍流尺度 L 的变化(经验点据 Richardson^[191])

我们还引进一些关于湿空气能量作用的数据. 据 Rudloff^[20] 估计, 大气中平均包含 1.24×10^{19} 克水分 (Neik^[21] 得到相近的数据), 这相当于 24 毫米的降水量 (海洋中含

1.37×10^{24} 克水, 而冰川中含 2.91×10^{22} 克冰, 如果这些冰全部融化, 会使海平面升高 80 米)。地球上年平均降水量为 3.96×10^{20} 克 (2.97×10^{20} 克降在海洋上, 0.99×10^{20} 克降在陆地上), 这相当于 780 毫米的降水量(因此, 大气中的水汽在一年中更换了 $780/24 = 32$ 次或者每 11 天更换一次)。水分的年蒸发量也有同样的数量, 不过在海洋上为 3.34×10^{20} 克, 而在陆地上为 0.62×10^{20} 克, 陆地径流为 0.37×10^{20} 克; 如果取蒸发潜热为 2.4×10^3 焦耳/克, 那末蒸发的热量消耗率为 3×10^{13} 千瓦, 即为地球吸收太阳热量的 30%; 大气中这种热流入量比动能产生的速率大 15 倍!

§ 3. 大气过程的谱

气象要素——空气运动速度、温度、气压、湿度等等随时间的振动包含周期由几分之一秒到至少几万年的成分。振动周期的整个谱可以分成如下九个区间。

(1) 微气象振动, 其周期由几分之一秒到分。小尺度湍流在这种振动中有最大的贡献。在近地面空气层中这种湍流的能谱 $fS(f)$ (f 为频率, τ 为振动周期, $S(f)$ 为能量的谱密度) 在周期 $\tau \sim 1$ 分钟附近有最大值, 这相当于 $L = U\tau_{\max} \sim 600$ 米的水平湍流不均匀性的尺度, 这里 $\tau_{\max}$ 为最大周期。当 $f \gg \frac{1}{\tau_{\max}}$ 时, 风速谱满足柯摩格罗夫-奥布霍夫“三分之五定律” $S(f) \sim \frac{\varepsilon^{2/3}}{U} \left(\frac{f}{U}\right)^{-5/3}$ [22]; 温度谱也有类似的形式 $S_T(f) \sim \frac{N\varepsilon^{-1/3}}{U} \left(\frac{f}{U}\right)^{-5/3}$ 参看文献 [23], 这里 $N = \chi(\nabla T)^2$ 是温度不均匀性变均匀的速率, T 是温度, χ 是分子导温率。在湍流脉动最大频率 $f \sim U\varepsilon^{1/4}\nu^{-3/4}$ (ν 是分子

粘性系数)的区域,湍流谱有明显的 discontinuity.

除湍流之外,声波和短周期重力波也属于微气象振动之列(但振幅较小). 根据理论(见下面),重力波主要有大于 330 秒的周期,而声波主要有小于 300 秒的周期;这就说明了为什么根据 Голицын^[24] 的微压记录资料制作的气压脉动谱 $fS(f)$ 在 $\tau \sim 300$ 秒附近有最小值(见图 2, 其中取气压微脉动的离散度 σ_p^2 作为纵轴的尺度单位, 这里 $\sigma_p \sim 10^{-2}$ 毫巴).

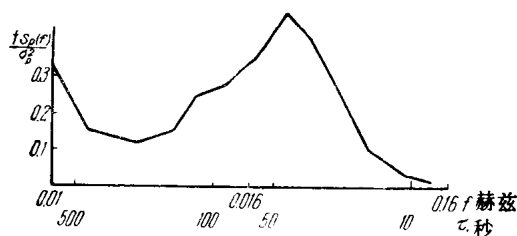


图 2 气压的微脉动谱(据 Голицын^[14])

(2) 中气象振动,其周期由分到小时. 在这种振动中,气象要素的强烈振动(例如,包含在雷暴中或者在大振幅重力波中气象要素的振动)相当少. 因此在 $fS(f)$ 谱的这个区间通常有宽而深的极小值. 关于这个区间资料的综合报道可以参看 Колесникова 和 Монин 的文章^[25]. 例如,图 3 是 Van der Hoven^[26] 根据在布鲁克海温 (Брукхейвен) 125 米气象塔上测量的数据而制作的水平风速谱,从图上可以很清楚地看到中气象的极小值. 这个极小值相当于周期 τ 为 20 分钟的量级和尺度 $L = U\tau$ 为大气有效厚度 $H \sim 10$ 公里(在 10 公里以下气层中含有 80% 的大气质量)的量级. 这个极小值把 $L \gg H$ 尺度的准二维(准水平)天气尺度不均匀性与 $L < H$ 尺度实质上是三维(各向同性)的微气象不均匀性分开了. 这个极小值的存在使得在微气象学中可以通过在中气象区间上对周期取平均(实践中取 $\tau = 10-20$ 分钟)来得到

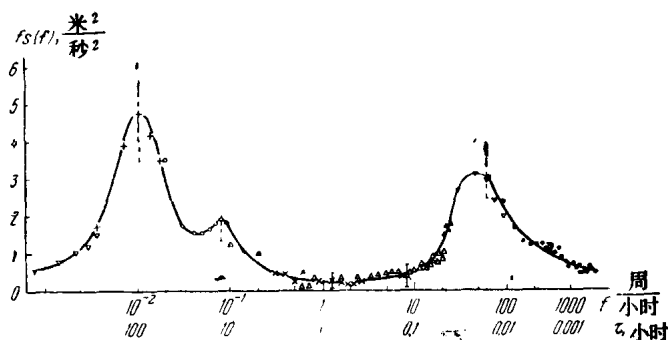


图3 水平风速谱(据 Van der Hoven, 图上指出了一些经验点, 见 [26])

风速、温度等等比较稳定的平均值。

(3) 天气振动, 其周期由几小时到几天。能谱的最大值在 $\tau = 4$ 天附近 (见图3) (部分最大值在 $\tau = 12$ 小时处, Van der Hoven 认为这是没有什么意义的)。这个区间还包含一天的振动, 例如, 在温度振动谱上显示出一天的谱线, 而在气压振动谱上显示出一天和半天的谱线。在天气区间的高频部分, 由于大雷诺数 $Re = \frac{UL}{\nu}$ 的准水平天气运动的流体动力学不稳定性而发生能量沿着谱由大尺度运动向小尺度运动的爆发式传递 (在天气区间的低频一端, 大概发生相反方向, 也就是由天气运动向更大尺度运动即向大气环流流动的能量传递^[27,28])。此外, 特别是在地表面和所谓的急流附近, 风速的垂直梯度有最大值, 这里由于风场的垂直不均匀性而造成的流体动力学不稳定性使所有天气尺度的运动直接地 (即越过任何中间尺度运动) 和不断地产生微湍流。

如果把微湍流看作天气尺度运动的耗散因子, 它就可以用有效粘性系数 ν_{TY} 来表征, 这里下标 TY 表示湍流。能够克服粘性的天气尺度运动的最小尺度等于 $L_{min} \sim \varepsilon^{-1/4} \nu_{TY}^{3/4}$ 。

中气象最小值的存在意味着 $L_{Min} \lesssim H^{[25]}$ 。

(4) 全球振动, 其周期由一星期到几个月。这是长期天气预报问题最感兴趣, 然而还很少被研究的振动。目前多少弄明白了, 大概只是所谓的“指数循环”, 也就是行星环流在有弱的经向混合的强纬向气流(东西向移动)和有强的经向混合的较弱纬向气流状态之间的振动循环。例如文献[29—31]

指出, 可以根据环流指数 $\alpha = \frac{u}{a \sin \theta}$, 也就是中纬度地区大气

相对于地表面的平均旋转角速度的振动来考察这种循环(这里 u 是沿纬圈取平均的纬向速度, a 是地球的半径)。“指数循环”的周期接近于两星期, 这可以参看图 4 中环流指数振动谱密度 $S(\tau)^{[30,31]}$, $S(\tau)$ 在 $\tau = 12$ 天处有明显的最大值(需要指出, 严格地讲, 环流指数的振动并不是定常的, 而是具有一年周期的周期性随机过程^[31])。

(5) 季节振动, 它是一年周期的振动及其谐振。

(6) 年际振动, 其周期的量级为几年。这种振动的谱几

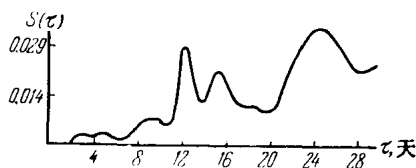


图 4 环流指数振动的谱密度
据 Монин^[30]

乎还没有被研究过(应该提到, 有些作者发现在赤道的平流层有 26 个月的振动韵律, 同样还有关于在地球的天气中出现太阳活动的 11 年振动循环的假说, 不过依我们的意见, 还没有令人信服的证据)。根据 Колесникова 和 Монин 的研究^[32], 温度和其它一些气象要素年平均值的年际振动振幅通常是这些要素的季节振动和不规则年内振动振幅的 15—30%。

还不应该把年际振动视为气候振动。如果把上面提到的(1)—(6)分析的所有振动称为短周期振动的话, 那末气候就

是气象场短周期振动的统计状况，而这种统计状况本身有着长周期的振动。长周期振动的谱可以区分成下列三个区间。

(7) 世纪内的振动，廿世纪前半期的变暖(现在，看来已经结束)就是这种振动的明显例子。人们在这种振动中发现了气候变化与大气环流特征的联系；例如，根据 Дзердзевский 的研究^[33]，在 1900—1930 年间北半球观测到的纬向环流型比 1930—1950 年间少，而观测到的经向环流型则比 1930—1950 年间多。解释廿世纪气候变暖的形成过程是气候物理理论已经成熟的课题。

(8) 世纪间的振动，其中已经知道的有^[34]，冰川期结束(公元前 65 世纪)后的变暖，这次变暖造成了公元前 40—20 世纪的所谓“气候黄金时代”。随后有在所谓“亚大西洋时期”(公元前 10 世纪到公元 3 世纪)的气候变坏，在公元 4—10 世纪气候变好¹⁾，在 13—14 世纪的重新变坏，在 15—16 世纪的变好以及在 17—19 世纪的变坏(所谓“小冰期”)。

(9) 更新世的冰川期；滚兹(公元前 500—475 千年)，明德(425—325 千年)，里斯(200—125 千年)，玉木(公元前 60—29 千年)。在这些时期，地球上近地面空气层的平均温度(现今是 $+15^{\circ}\text{C}$)大概降低了 10° 左右。地面冰冻的可能原因是如此之多(例如，其中有 Simpson 关于由于太阳辐射的增加而导致蒸发、云量和降雪增加的假说^[35])，以致于应该解释的可能倒不是冰冻的出现，而是为什么在寒武纪后的 90% 时期内没有冰川。

1) 在 8—10 世纪的“小黄金时代”期间，即冰岛和格陵兰沦为殖民地时期，据其年鉴记载，北极的冰很少。这否定了有人曾提出的认为北极的冰如果融化就不再结冰的假设，因为这种假设过高估计了局地反照率(下垫面的反射能力)对北极状况的作用。相反，考虑到在 72°N 纬圈内，北极只占地表总面积的 2.5%，因此自然要假设：北极的局地条件(包括极冰，因而也包括反照率)不是原因，而是大气环流状况的结果(指标)。