

短期天气预报的 新方法和问题

М. И. 尤金 著

科学出版社

短期天气预报的新方法和问题

M. И. 尤金 著

朱永禔等译

科学出版社

М. И. Юдин
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ
КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

Гидрометеиздат

1963

內 容 簡 介

本书总结了短期天气数值预报领域中的研究现状。书中首先阐述了大气运动的一般规律,并对数值预报的物理基础作了详细的论述,其中包括大气动力学方程、涡度方程、位势场的预报、地转偏差模式与准无辐散模式、下垫面的影响以及凝结条件的预报等等。最后,还论述了数值预报的实际方法、客观分析和评分等方面问题。

目前,随着数值预报方法的迅速发展,在很多国家,数值预报方法已广泛应用于实际业务工作。因此,本书不仅对于气象研究工作者,对于业务工作者亦有很大参考价值,同时亦可供高等院校有关专业师生阅读参考。

参加本书译出的有朱永禔、杜行运、廖洞贤、周紫东、黎光清、纪立人、赵明哲、李麦村、刘春葵、陈雄山、王宗皓、丑纪范和张锡福等同志,由朱永禔同志负责总校订。

短期天气预报的新方法和问题

[苏] М. И. 尤金 著

朱 永 禔 等 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可出字第 061 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

*

1965 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1965 年 9 月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 0001—2,300 字数: 331,000

统一书号: 13031·2176

本社书号: 3310·13-15

定价: [科七] 2.10 元

序 言

以大气过程的物理理論为基础的天气预报新方法的拟定和試驗，在近年来已获得了很多重要的結果。許多气象要素的数值预报方法已运用到实际业务工作中去。但是目前对能批判地概述研究工作現况的綜合性著作的迫切需要，远非业已問世的专著所能完全滿足。从內容和叙述的特点来看，本书与过去的专著相比有很重要的差別。首先，书中的結論在很大程度上是以对实际方法和预报結果的分析为基础的。本书主要供气象学家和高等气象院校的高年級学生閱讀。但作者也为自己提出了一个任务：使希望获得天气分析和预报新方法的一般概念的边缘学科的专家，讀起来也并不困难。为了便于这些讀者閱讀，我們在书中几乎对所有的气象术语都作了簡短的說明。

对問題的考虑和概念上的邏輯性与物理論据的闡述，占了本书的主要部分，正是应用了这些概念，才建立了大尺度大气运动的理論及其预报方法。本书也很注意大气运动的統計性質，按作者的看法，这种知識在評價各种预报模式的內容时是必需的。对各种形式的大气动力学基本方程，也給出了足够詳細的推导。

关于这些方程的数学解法，我們只在第九章中进行論述。許多計算方案的技术細節，在本书中几乎完全沒有討論，即使其中不少对于专家來說很重要，但它們沒有普遍意义。

关于数值预报的誤差来源及其消除途徑的問題，亦作了比較詳細的討論。用电子計算机对气象資料进行客观分析的問題專門有一章进行討論。并給出了我們所知的关于主要气象要素预报准确率的最新估計。

本书的主要目的，不在于論述作者的工作，而极大部分帶有批判、綜合的性質。但是，对作者所在的地球物理观象总台 (Главная

геофизическая обсерватория) 动力气象組同事們的工作, 自然就討論得比較詳細些, 尤其是为本书所首次闡述的有关大气动力学方程綫性与非綫性項的譜密度的推导, 关于与平滑作用有关的一些問題, 关于地轉偏差涡度方程的物理解释和地轉偏差模式与准无輻散¹⁾ 模式之間的物理关系的說明, 关于正压模式的各种方案等等。

在一本篇幅不多的专著中, 不可能涉及数值預报的全部基本研究方向。在选择材料时沒有考虑三个大的專門課題, 按作者的意見, 最好在專門的书中分別予以闡述。这三个課題就是: 流体力学方法的长期預报, 大气边界层中气象要素的数值預报, 統計預报的方法。

作者对讀过本书全部或部分草稿, 并且提出建議, 从而改进了本书的全部同志, 表示深切的謝意, 特別感謝 А. М. 奥布霍夫 (Обухов), С. А. 馬什科維奇 (Машкович), С. И. 季托夫 (Титов), А. С. 莫宁 (Монин), А. М. 雅格洛姆 (Яглом), Л. С. 甘金 (Гандин), А. С. 杜波夫 (Дубов), К. В. 皮亚蒂基娜 (Пятыгина) 和 М. Е. 什維茨 (Швец)。

1) Квасисоленоидальная модель 直译为准力管模式, 这里我们译为惯用的“准无輻散模式”。——译者注

符 号

- a ——地球半径
- A (不带标记)——热功当量
- A (带标记)——复数振幅,函数的特征值
- B (带标记)——相关函数
- c ——波的传播速度
- c_* ——声速
- c_p, c_v ——比热
- D ——能量的频散比
- D (带标记)——结构函数
- div ——散度
- $\frac{d}{dt}$ ——对时间的个别微商
- $\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}$ 等等——偏微商
- e ——水汽的部分压力,自然对数的底
- e_m ——饱和水汽张力
- E_B, E_H ——气柱的位能和内能
- f ——分布密度
- F ——位势涡度
- F_v ——波锋的位移速度
- g ——重力加速度
- grad ——梯度
- $\vec{G}$ ——重力
- G ——影响函数
- h ——网格步长,计算差分时的水平距
- H_0 ——均质大气高度
- H_θ, H_φ ——温度和风场的垂直尺度
- H_1, H_2, H_3 ——Hesse 函数
- $i = \sqrt{-1}$

j_0 ——零阶贝塞尔函数
 J_T ——温度平流
 J_Ω ——涡度平流
 $\vec{k}(k_x, k_y, k_z)$ ——波的向量
 $k_x = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ——波向量的水平分量
 K_x, K_y, K ——交换系数
 K_0 ——第二类零阶虚变量的柱函数
 l ——柯氏参数
 L ——凝结热
 $L(\text{带标记})$ ——运动尺度
 m ——混合比
 M ——地图比例尺度
 M_1, M_2 ——影响函数
 M_i ——空间引导气流
 n ——多元指数
 $\vec{N}$ ——粘性力
 $O[]$ ——方括号内量的特征值,量级
 p ——大气压力
 p_0 ——地面气压
 $P = 1000 \text{ 毫巴}$ ——标准气压
 $\vec{P}_A$ ——辐射能通量
 P_T ——湍流热通量
 q ——比湿
 r ——距离
 rot ——涡度
 R ——气体常数
 $R(\text{在表内者})$ ——相关系数
 s ——水平方向
 S ——湿度差, 潜密度
 t ——时间
 T ——空气的绝对温度
 T_d ——露点
 u, v, w ——速度分量

- u_g, v_g ——地转风分量
 u', v' ——地转偏差风分量
 U ——纬向气流
 $\vec{v}$ ——风速
 $\tilde{w}$ ——相当垂直速度
 x, y ——水平坐标
 z ——垂直坐标
 Z ——拔海高度
 ∇ ——海米尔登算子
 $\Delta = \nabla^2$ ——拉普拉斯算子
 α ——无因次的稳定度参数, 波向量相平面中的角
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ——方向余弦
 γ ——温度垂直梯度
 γ_a ——绝热梯度
 γ_{sa} ——湿绝热梯度
 $\delta = \sqrt{\frac{K}{\omega}}$ ——大气边界层中的特征长度¹⁾, 小参数
 δ ——热流入量
 $\delta_\pi, \delta_\phi, \delta_M, \delta_T$ ——各种形式的热流入量
 δ_q ——水分流入量
 $\xi = \ln \frac{p_0}{p}$ ——无因次垂直坐标²⁾
 ϑ ——极角
 Θ ——位温
 $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ ——比热比
 $\lambda = \frac{c_p - c_v}{c_p}$
 λ ——经度
 λ^2 ——平滑参数

1) 原为 $\delta = \sqrt{\frac{k}{\omega}}$, 实系 $\sqrt{\frac{K}{\omega}}$ 之误。——译者注

2) 原为 $\ln \frac{p_0}{p}$, 实系 $\ln \frac{p_0}{P}$ 之误。——译者注

- λ ——波长
 μ ——波向量的长度
 ν ——粘性运动系数
 ν_T ——导温系数
 ρ ——空气密度
 σ ——频率,各向同性二维场的谱密度
 τ_{xx}, τ_{xy} ——湍流应力
 φ ——纬度,速度势
 Φ ——位势
 χ ——地转偏差风速的势
 ψ ——流函数
 $\vec{\Psi}(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3)$ ——地转偏差风速的向量势
 $\vec{\Omega}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ ——速度涡度(简称涡度)
 Ω_p ——涡度在等压面法向的分量
 $\vec{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ——地球自转角速度
 H ——信息比
 $\mathcal{S}$ ——熵

目 录

序言.....	iii
符号.....	x

第一篇 大气运动的若干一般规律

第一章 緒論.....	1
§ 1. 簡史.....	1
§ 2. 大气动力学方程.....	4
§ 3. 边界条件.....	7
§ 4. 大气中热流入量的确定.....	9
§ 5. 水分输送方程。水汽的凝结.....	13
§ 6. 湍流交换。大气边界层.....	15
§ 7. 水平交换与平均化范围的依赖关系.....	20
第二章 大气运动的一般分类.....	23
§ 1. 大气运动的多尺度性.....	23
§ 2. 大气的强迫振动和自由振动.....	27
§ 3. 快速波与“准恒定”波.....	28
§ 4. 准静力近似及其过滤作用.....	31
§ 5. 大气缓慢运动的分类.....	33
§ 6. 气象场的适应.....	35
第三章 基本气象要素在空間的系統性变化.....	40
§ 1. 气压場的鉛直尺度.....	40
§ 2. 溫度場的鉛直尺度.....	42
§ 3. 溫度和气压随纬度的变化.....	43
§ 4. 地转风及其随高度的变化.....	46
§ 5. 热成风和急流.....	49
第四章 大尺度大气运动动力学方程中各項的关系.....	51
§ 1. 问题的考虑.....	51

§ 2. 准静力运动方程的线性化·····	52
§ 3. 关于特征数值的运算·····	55
§ 4. 水平散度及其确定·····	59
§ 5. 热流入量方程中各项的特征数值·····	61
§ 6. 涡度方程各项的特征数值·····	63
§ 7. 结果的说明·····	67
§ 8. 有关运动特殊情况的意见·····	72
§ 9. 快速波发生的条件·····	74
第五章 气象场结构的若干规律性·····	76
§ 1. 随机序列, 随机过程·····	76
§ 2. 随机场·····	82
§ 3. 随机场差分的经验研究·····	86
§ 4. 位势场结构的若干说明·····	90
§ 5. 差分法得到的资料·····	92
§ 6. 位势相关函数逼近. 谱密度·····	94
§ 7. 地转风结构·····	96

第二篇 数值预报的理论基础

第六章 各种坐标系的大气动力学方程·····	101
§ 1. 关于选择坐标系的一般评论·····	101
§ 2. 准笛卡尔水平坐标·····	103
§ 3. 压力坐标系·····	108
§ 4. 压力坐标系中的大气动力学方程·····	111
§ 5. 对其他已提出的坐标系的评述·····	114
第七章 涡度方程·····	116
§ 1. 涡度方程的推导·····	117
§ 2. 涡度方程的解释·····	118
§ 3. 涡度场的谱特性·····	125
§ 4. 涡度的差分表达式·····	127
§ 5. 涡度平流的谱特性·····	131
§ 6. 涡度方程的简化形式·····	134
§ 7. 在差分平滑时, 涡度方程中各项关系的畸变·····	136

第八章	位势場預报問題——一般討論, 正压模式	139
§ 1.	基本方程	139
§ 2.	绝热运动的不变量	141
§ 3.	求解的步骤及其基本特点	145
§ 4.	边界条件	147
§ 5.	辅助关系式, 倾向方程和马尔古累斯 (Margules) 定理	149
§ 6.	气柱位能随时间的变化, 正压模式	153
§ 7.	正压模式的第二个方案, 两个方案的比较	158
第九章	位势場的預报方法	161
§ 1.	位势对时间导数的解析表达式	161
§ 2.	解的分析	166
§ 3.	作用半径的确定	171
§ 4.	用常微分方程组代替偏微分方程——直线法	176
§ 5.	迭代法求解	181
§ 6.	标准面上的平面法預报	182
§ 7.	关于其它求解方法的论述	184
§ 8.	涡度方程的解析求解法, 解的稳定性问题	185
§ 9.	求积涡度方程的图解法	193
第十章	地轉偏差模式与准无輻散模式	199
§ 1.	定义, 问题的提出	199
§ 2.	涡度的仿射运算	200
§ 3.	简化的地转偏差涡度方程组	204
§ 4.	讨论地转偏差风的一些定性规则, 方程组的解释	206
§ 5.	由简化方程组求位势高度	211
§ 6.	地转偏差风的计算	214
§ 7.	溫度場和风場的数值預报方案	218
§ 8.	地转偏差与准地转两种数值預报模式之比较	219
§ 9.	解的精确度的提高	221
§ 10.	准无輻散模式	224
第十一章	下垫面影响的考虑, 凝結条件的預报	231
§ 1.	地形对大尺度运动的影响	231
§ 2.	大气边界层中的湍流摩擦效应	236

§ 3. 凝結區的預報	238
§ 4. 降水量預報, 凝結熱的考慮	244
第十二章 大氣動力學初始方程的積分	248
§ 1. 應用大氣動力學初始方程的原因, 非地轉模式的分類	248
§ 2. 問題的直接求解方法及其缺點	252
§ 3. 過濾二維波的若干方法	254
§ 4. 適應方程	257
§ 5. 適應理論在預報中的應用	261
§ 6. 非地轉模式中氣象要素初值的選擇	263

第三篇 預報的實際方法和結果. 客觀分析

第十三章 數值試驗和預報評分	266
§ 1. 試驗在數值預報中的作用	266
§ 2. 專門的數值試驗	267
§ 3. 比較數值試驗的討論	269
§ 4. 試驗用的“標準”資料	270
§ 5. 風場和位勢高度場的預報評分方法	273
§ 6. 定性的預報評分. 信息論概念的應用	276
§ 7. 正反預報的評分方法	281
第十四章 大氣平均層上風和重力位勢的預報	285
§ 1. 概論. 誤差來源的分類	285
§ 2. 正壓模式的第一批試驗	286
§ 3. 差分近似誤差的一些後果	289
§ 4. 虛構邊界條件所引起的誤差	290
§ 5. 對廣闊地區的業務預報	291
§ 6. “虛假的反氣旋生成”和無輻散正壓模式	292
§ 7. 原始資料不準確對預報誤差的影響	300
§ 8. 消除計算不穩定方法的場的平滑, 平滑的物理意義	302
§ 9. 行星波移動預報的誤差及其消除	306
§ 10. 預報風所達到的準確性	310
第十五章 不同高度上氣象場的預報	311
§ 1. 一些主要模式	311

§ 2. 苏联的数值预报和天气学预报正确性的比较·····	312
§ 3. 气压场和风场预报正确性的一些其它材料·····	314
§ 4. 增加解的稳定性。48 小时的斜压预报·····	319
§ 5. 气旋发展的预报·····	327
§ 6. 地转偏差模式的应用。气旋移动的预报·····	329
§ 7. 在数值预报中采用的若干经验方法·····	333
第十六章 气象场的客观分析·····	338
§ 1. 客观分析的任务·····	338
§ 2. 个别气象要素的最优插值·····	339
§ 3. 各种信息来源的使用(场的协调)·····	343
§ 4. 客观分析的某些业务计算方案·····	345
§ 5. 各种插值方法的比较·····	349
§ 6. 关于编制预报其他部分工作的自动化问题·····	352
附录 大气动力学方程中非线性项的谱分解·····	354
§ 1. 随机函数谱密度的卷积公式·····	354
§ 2. 涡度平流的谱分解·····	358
§ 3. 温度平流的谱分解·····	360
§ 4. 地转偏差涡度的谱分解·····	363
参考文献·····	365
第一篇 参考文献·····	365
第二篇 参考文献·····	369
第三篇和附录 参考文献·····	380
内容索引·····	388

第一篇

大气运动的若干一般规律

第一章

緒論

§ 1. 簡史

在十九世紀，天气預报几乎无例外地都以經驗研究为基础。而仅在本世紀初才建立了比較可靠的天气分析和預报的物理基础。

动力气象学的发展結果，把天气特征与一系列理論上研究所得的大气性質（大气鋒的运动学性質，大气热力稳定性条件等等）联系起来。因此，在二十和三十年代，才可能根本地改变了天气分析預报的方法和工具（当然这也与高空观测网的发展有关）。

V. 皮叶克尼斯 (Bjerknes) 領導的研究組，在拟定以动力气象学成就为基础的新的分析方法中，建立了很大的功績。这个研究組的工作成果已綜合在两本书中 (V. Bjerknes and col., 1910—1911 和 V. Bjerknes, J. Bjerknes, S. Solberg, Th. Bergeron, 1933)。要了解同时期别的理論气象学者的工作，还可以參閱 Б. И. 伊茲維科夫 (Извеков) 和 Н. Е. 科欽 (Кочин) 編写的“动力气象学” (1935—1937)，N. 肖 (Shaw) 的“气象学指南” (1931) 以及 F. M. 爱克司納 (Exner) 的“动力气象学” (1926)。

L. F. 里查逊 (Richardson, 1922) 为了預报天气的目的，首先作了对大气动力学方程直接求积的嘗試。他借助于許多假定，

把热力学、流体力学的方程組閉合以后，用差分方法求解。L. R. 里查遜所作的这一工作，在許多方面是非常有意思的，而且現在人們仍值得对此作仔細的研究。当时数值預报試驗的失敗，可归之于下列几个原因：

1. 大气非定常过程的理論尚不成熟——沒有大气运动的哪些基本規律，在預报中必須予以考虑的必要知識。

2. 气象要素的起始值資料根本不够——高空測站网特別稀疏，而且在这些測站上也只进行对流层下部的觀測。

3. 以差分方法求解偏微分方程的理論尚处于萌芽状态，尚无法闡明，哪些差分方案可以获得問題的准确解和哪些差分方案不能得到准确解。另外，还需补充一点，在二十年代計算技术的水平，对于业务数值預报的实现，还没有希望。不仅如此，关于闡明計算方案缺陷及消除它們的系統研究，由于过分繁杂而在实际上也是不可能实现的。

L. R. 里查遜的嘗試失敗表明，必須避免“正面攻击”，而要寻求解決預报問題的迂迴道路。从这一观点来看，A. A. 弗利德曼 (Фридман) 的关于大气非定常过程理論的研究具有很大意义。还在1914年，A. A. 弗利德曼与 Th. 赫塞耳别尔格 (Hesselberg) 就对大气动力学方程中各項进行了估計，并区分了其中主要的和次要的項。此后 A. A. 弗利德曼的大多数工作(1922, 1927 及其它)，都是研究大气运动的运动学性質，特別是空气的涡旋运动。A. A. 弗利德曼詳尽地研究了涡度輸送方程，这个方程在近代的天气預报理論中具有很重要的意义，他并且着手建立了大气动力学方程的近似閉合方程組。

A. A. 弗利德曼的很多工作都对垂直速度問題进行了討論，对垂直速度的确定具有特殊的意义。由于他的早逝，研究工作就此沒有完成。但是在选择最重要的动力气象問題和解决它們的途径方面，他的洞察力是令人惊奇的。他所指出的解决大气运动非定常計算問題的途径，只是一个方面，与近代方法有本質上的差別；即在 A. A. 弗利德曼的工作中所确定的大气运动的性質，基本上

是平均尺度运动,对于这种运动,相对加速度与柯氏加速度具有相同的量级¹⁾。但是温度、压力和风随时间的变化,主要由大尺度运动确定,大尺度运动的相对加速比柯氏加速度小很多。同时,我們所說的随时间变化的时间間隔,与天气預报的有效期是相当的。

Н. Е. 科欽在大气环流理論的工作中(1936),开始以相似論为基础,分析了大尺度运动的性質。

在 И. А. 基別尔 (Кибель) 的工作中(1940),应用大尺度运动的性質来討論短期預报問題,其中給出了运动方程的主要小参数,并且把速度場按此小参数的幂次展开。其重要的結論之一是:地轉风并非在任何方面都是实际风的第一近似,亦即风速的水平散度并不是由地轉风的分布来确定的,而主要是由地轉风偏差来确定。这些概念也成为由 М. Е. 什維茨提出的,从涡度方程确定垂直速度的方法的基础(1941)。

И. А. 基別尔的工作应当看作是二个研究工作之一,这两个工作的观念开辟了建立近代天气預报理論的途径。第二个工作是 С. Г. 罗斯培 (Rossby) 和他的合作者的工作(1939),在他們的工作中,第一次应用了涡度方程来計算对流层中层的气压波。为此目的,С. Г. 罗斯培在忽略了涡度方程中与风速水平散度成正比的項和引入平均緯向輸送項以后,对綫性化了的方程进行积分,获得了不同波长的波的传播速度。用近代的術語來說,他的工作是第一次求解正压模式的綫性化方程。

Е. Н. 勃利諾娃 (Блинова) 应用了球面上綫性化的涡度方程的解于整个气压場的預报(1943)。她提出了一个計算 500 和 700 毫巴面(整个北半球)的方案,并随即开始根据此方案作几天的預报工作。

在 1948—1949 年 J. G. 恰尼^{*} (Charney) 和 A. M. 奥布霍夫(1949)对大尺度大气运动的基本性質进行了詳細的分析,并且拟定了求解正压模式非綫性方程的方法。在 1950—1953 年,三維

1) 这里涉及的关于大气运动分类的问题,将在第二章中詳細討論。