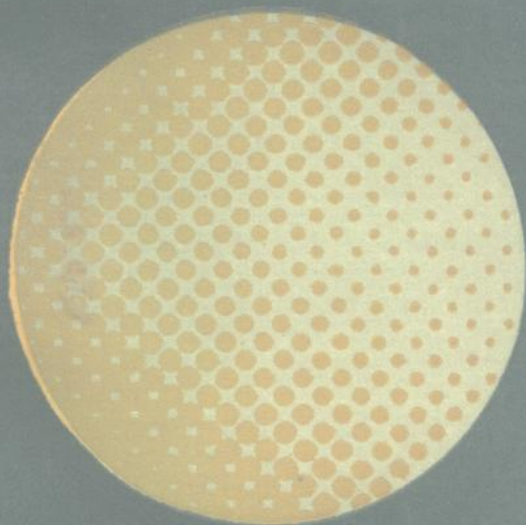


熵气象学

张学文 马力著



气象出版社

ENTROPY METEOROLOGY

P40
Zxw

熵 气 象 学

张学文 马 力 著

国家自然科学基金资助项目

80/6211

气象出版社

(京)新登字046号

内 容 提 要

本书从新的观点出发在气象学中新发现了一批现象,并用熵原理对它们作出了理论说明,从而建立了熵气象学。

第一章系统介绍了统计物理、信息论中分布函数概念,第二章即用它揭示了一批过去鲜为人知的各类气象要素的分布函数。在第三章介绍了熵概念后第四章又用它分析气象问题。第五章系统介绍了当代关于熵的原理第六章则用它去解释新发现的现象。这样就由新的观点,新发现的现象,和熵原理对它们的解释构成了气象学中一个新的知识体系。

全书还对如何把这新的知识体系用于改进天气预报,分析气候变迁,应用气候、降水分析等实用领域作了介绍。

本书对一切想把统计物理,信息论中的有用概念、原理引用自己学科的学者在方法论上必有借鉴意义。因而本书不仅对气象学者,而且对各学科的科技人员都有参考价值。

熵 气 象 学

张学文 马 力 著

责任编辑:吴向东 张 斌

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市燕山联营印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/32 印张:7 字数:144千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷

印数:1—850 定价:5.40元

ISBN 7-5029-1047-6/P·0521

序

本书研究的是气象学问题，可是它离开了动力学框架，却从统计物理和熵的非决定论角度另辟蹊径。

迄今为止，决定论的动力学描述在气象学中占着主导地位。得力于此，气象学发展到了较高的水平。其标志是把系统的观测和数值模拟结合起来了。数值模拟的理论和方法在数值天气预报的实践中天天接受着自然界的检验，被证实达到了较高的水平。数值天气预报是植根于牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)创立的古典力学的土壤中的，其出发点是大气未来状态完全取决于它现在的状态，根据某一时刻实测的大气状态和运动，通过描述大气运动规律的微分方程，可算出将来某一时刻的相应大气状态和运动。数值天气预报有着艰难的历程，有着大量的工作，有着辉煌的成就。但是万变不离其宗，应该说它是在这个决定论的框架里发展的。

但是，事物走向它的反面，因果性的决定论模型本身导致了不确定——即使大气的未来状态完全取决于它现在的状态，我们能精确地知道它现在的状态吗？不能！对初始状态的了解只能有相对的准确性，不可能有绝对的准确性。不论科学发展到何种程度，都存在测量精度的限制。人们在测量中可以“精益求精”，但永远不能使测量的误差等于零。现在人们都知道，逐日天气预报的理论上的可预报期限不超过2—3周。初始状态的微小偏差并不重要，重要的是，我们现在知道，对很多非线性系统来说，这种不确定性会随时间指

数增长，这和复利增长十分相似。我们知道，7%复利可以在十年内使存款倍增，二十年变成4倍……。同样，若每过一段时间 T 系统的误差就加倍，那么在 nT 时段之后它就增大 2^n 倍。也就是说，以二进制计，由物理规律所计算到的状态变量就丧失了 n 个有效位数。这样，经过一定时段初始状态的信息就丧失殆尽了。这就表明决定论的牛顿力学从计算和预测的观点来看，实际上具有内在的随机性。这就是混沌(chaos)系统。1963年洛伦兹(E.N.Lorenz)研究气象问题时首次发现了混沌系统，提供了第一个“奇怪吸引子”。现在大家知道，这类系统并非例外，而是自然界极普遍的现象，是经典力学所描述的事物的常规。奇怪吸引子上的运动轨道，对轨道初始位置的细小变化极其敏感，但吸引子的大轮廓却是相当稳定的。郝柏林说得好——“正是对初值的敏感性，使得物理量在奇怪吸引子上的平均值反而对初值不敏感。奇怪吸引子上的运动不仅是遍历的，而且是混合(mixing)的，可以在其上引入定常态的分布函数，进行统计描述。”

混沌理论的产生被视为本世纪物理中继相对论、量子力学后的第三大成就。其重大意义是揭示了牛顿力学具有内在的随机性。决定论和概率论描述之间，存在着由此及彼的桥梁。动力气象和数值天气预报专家汤普森(P.D.Thompson)感叹说：“宇宙间统计秩序随处可见，而决定论则绝无仅有，不懂得这一点的人在这个日益复杂混乱的世界里就会束手无策。”

不断变化着的大气状态乃是气候系统的一个奇怪吸引子。如何研究它？如何在其上引入定常态的分布函数进行统计描述是一个有待解决的问题。

张学文先生长期致力于从统计物理的角度研究气象问题，成绩显著，多所建树。他将云滴谱的概念推广成分布函数来分析其他气象问题，发现大气的许多基本特性的分布函数遵循熟知的解析表达式，并且在时间上具有稳定性。为了解释这种现象，他将信息熵概念与原理应用于大气科学，对大气中各种物理量场进行宏观描述，以熵来度量各种形态场结构的复杂性或姿态丰度。在一定的积分约束下，引入熵最大假设可从理论上推导出与实际资料相符的分布函数。这些全新的学术思想是非常值得重视的，这一方向性的有益探索无疑有着深远的意义。

本书将作者十余年来辛勤钻研的成果和见解作了一个系统的、由浅显到复杂的逐步介绍，层层剖析，是很有说服力的。我相信虽然他的体系和价值还有待于实践的印证，还有待于进一步的发展，但是他们的钻研本身已足以使人振奋。使我们觉得在主导的思潮之外，依然可以另辟蹊径，独树一帜。

应该感谢作者，感谢他们艰苦的攀登和满腔热情的奉献。

丑纪范

1991年7月9日于北京气象学院

自序

1957年当我从大学毕业时，记得我对自己说过由于熵这个词太神秘，把握不住它，今后在工作中尽可能对它敬而远之。

历史就是这么怪，30多年后的今天回首往事，我自感欣慰的工作竟是与熵有关的工作。近10(或20)年来，可以说把熵原理用于各个领域一直是我苦心思考的课题。

60年代起我在新疆从事天气预告工作。当天气没有报准时，就感到着急和痛心。为改善这种处境，记得我急切的想从众多的统计学方法中寻找对我们最有用的方法。这种努力持续了好多年，给我影响最大的是1968年有幸读了苏联的雅格洛姆的《概率与信息》一书。它不仅从概率角度使我理解了什么是信息熵，还使我看到这些概念对分析天气预告问题十分有效。从此我扭转了对熵的冷漠态度，变成了努力用它分析问题的热心人。我逐步感到用熵去分析气候特征和天气预告是非常自然又很科学的作法，而用信息分析天气预告过程则可以从信息原理中得出很有力的结论来。

信息原理使我认识到有些场合并不是预告员拿不出好的预告方法而是根本不存在这种方法。巧妇难为无米之炊、工程师造不出永动机和预告员“创造”不了信息，这三者包含着同样深渊的哲理。

1973年我的这些工作在南京气象学院办的一个统计学习班上有幸受到鼓励。这促使我把有关成果和认识汇入《气象

预告问题的信息分析》一书中。

1980年的一件事使我关注的中心从天气预报方法的信息分析又转到熵原理如何用来解释气象科学中的种种问题上去

了。

当年廖树生给我看了他的一个手稿。其核心内容是他用统计力学的思路、方法论证了日降水量的概率分布应当是负指数分布。这不仅使我看到了一种新的推证概率分布的理论方法和模型，更重要是它使我早先知道的熵极大与概率分布的知识和统计力学知识融到一起去了。而这种融合加深了信息熵极大原理的物理根基。我从中感到统计力学和熵原理会促使我们对气象现象从新的物理基点得到说明。这好似为气象学找到一个新的理论园地。

我支持廖树生发表了那篇文章(1981年4月号《新疆气象》)，此后我又沿其思路研究了降水的历时、面积和深度问题、多次降水的卷积问题、等压面上的风速分布问题等等。1983年还在新疆气象学会支持下召开过“统计力学在气象上应用潜力讨论会”。而1987年新疆科协等单位出面在乌鲁木齐召开的全国首届熵与交叉科学研讨会则把熵的应用扩及气象学以外的其他物质科学领域。

80年代我们就此陆续地发表了一些文章，1986年提出了“熵气象学”一词。1988年还获准把熵在气象上的应用研究列为国家自然科学基金课题。而本书就是这些年间形成的思路和若干成果的综合介绍。

形成一个学科应当有其基本概念和基本理论，熵概念和熵原理则在这里居主导地位；形成一个学科还应当有特定的研究领域，在本书中我们将看到小至一片云中的各个云滴，大到全球大气的风速分布，这些气象学过去关注的现象也都

是(不过观点变了)熵气象学的内容。

从具体处理问题的过程来评判,我觉得这里引用的假设的合理性、思路的严密性、数学处理的简明性、结论的普遍适用性和它与实际资料的拟合程度都使它有一定的资格跻身于“科学”的殿堂之中。

应当承认这里看待气象问题的基本观点与过去人们习惯的动力学观点有很大的差别。而完成这种观点的转变是要经历一番思考的。可是一旦理解了这种思路,余下的数学物理处理常常是较为容易的。

牛顿力学曾经是物理学的骄子,可它并不是物理学的独生子。今天,统计物理学也已在物理学中占有相当的地位了。

气象学是地球科学的骄子,动力气象学是气象学的骄子,可它也不应当永远是理论气象学的代名词。我们希望熵气象的研究能推进统计气象科学(不是单指气象统计方法)向理论阵地迈进一步。

这里还想补充一句,即本书介绍的分布函数的概念和如何通过它把熵原理用于对应的场合不仅仅是适用于气象学,它也同样适用于其他科学(含社会科学)。在笔者看来,统计物理中的深刻思想,不应当仅供物理学家独享,它实际上也是众多学科共享的理论武器,它会帮助众多学科向理论阵地迈进一大步。

本书第二章§4—§7由马力执笔,§3、§9为共同执笔。书中的大部分的计算、图表清绘和部分图表的制作,都由马力完成。

戴新刚曾在计算机上用全球逐日5层资料作了不少计算,书中的一些观点他也参与过讨论。郭爱卿也曾为本书做过一些计算工作。在此一并致谢。

我还要特别感谢丑纪范教授在序言中对我们的热情鼓励和积极评价。

本书的出版得到了气象出版社、国家自然科学基金会地球科学部等单位的支持。在此顺致谢忱。

作者学识有限，书中错误之处诚望不吝指正。

张学文

1991年3月于乌鲁木齐新疆气象科研所

Entropy Meteorology

Contents

Perface

Selfperface

Introduction

Chapter 1 Distribution Function

1.1 Examples

1.2 Distribution function

1.3 Distribution function and probability distribution

References

Chapter 2 Distribution Function in Meteorology

2.1 Spectrum in cloud physics

2.2 Particle and air parcel

2.3 Some calculating methods on the distribution function of field

2.4 The distribution function of wind speed, pressure, temperature and humidity

2.5 Some distribution functions on the isobaric surface

2.6 The distribution of atmospheric energy

2.7 The distribution function in rainfall phenomena

2.8 Probability distribution of meteorological elements

2.9 The atmospheric distribution function and the phase space

References

Chapter 3 Entropy and Distribution Function

3.1 A review on entropy concept

3.2 Thermodynamic entropy

3.3 Boltzmann entropy

3.4 Information entropy

3.5 Entropy and distribution function

3.6 The entropy of physical field

3.7 "Negative entropy"

References

Chapter 4 Some Applications of Entropy Concept in Meteorology

4.1 Potential temperature

4.2 The thermodynamic entropy of atmosphere

4.3 The macroscopic entropy of atmosphere

4.4 The second climate parameter

Appendix

References

Chapter 5 Entropy Principle

5.1 The law of entropy increase

5.2 Maximum entropy principle

5.3 The clue on statistical mechanics

5.4 The non-increase principle of information

5.5 Discussion on entropy principle

Appendix

References

Chapter 6 The Application of Maximum Entropy Principle in Meteorology

- 6.1 Temperature and pressure field of atmosphere
- 6.2 The rainfall distribution on the area
- 6.3 The exponent family of precipitation phenomena
- 6.4 The droplet spectrum of steady stratus cloud
- 6.5 Others

References

Chapter 7 Summary Discussion and Complement Words

- 7.1 Basic clue
- 7.2 Summary of the results
- 7.3 The hypothesis for the steadyness of distribution and the conservation of atmospheric entropy
- 7.4 Numerical weather forecasting
- 7.5 The climatic change
- 7.6 Complements

References

Appendix A The representative mass of air in different grids in the zonal vertical cross section

Appendix B Some distribution functions in the meteorology

Appendix C Distribution functions during maximizing its entropy

Abstract

目 录

序

自 序

引 言 (1)

第一章 分布函数 (4)

§1 实例 (4)

§2 分布函数 (9)

§3 分布函数与概率分布等价 (12)

参考文献 (16)

第二章 气象学中的分布函数 (17)

§1 云物理学中的谱 (17)

§2 粒子与空气微团 (20)

§3 场的分布函数的一些计算方法 (22)

§4 风和压、温、湿的分布函数 (27)

§5 等压面上的某些分布 (38)

§6 大气能量分布 (44)

§7 降水问题中的分布函数 (53)

§8 气象要素的概率分布 (57)

§9 大气分布函数与相空间 (59)

参考文献 (67)

第三章 熵与分布 (68)

§1 熵概念沿革 (68)

§2 热力学熵 (71)

§3 玻耳兹曼熵 (74)

§4 信息熵	(74)
§5 熵与分布	(80)
§6 物理场的熵	(81)
§7 “负熵”	(84)
参考文献	(89)
第四章 熵概念在气象上的某些应用	(90)
§1 位温	(91)
§2 大气的热力学熵	(93)
§3 大气的宏观熵	(99)
§4 第二个气候参数	(104)
附录 Γ 分布的熵值计算	(105)
参考文献	(107)
第五章 熵原理	(108)
§1 熵增加原理	(109)
§2 最大熵原理	(114)
§3 统计力学思路	(131)
§4 信息的不增殖原理	(142)
§5 熵原理讨论	(145)
附录 $\log x \leq (x-1)\log e$ 的证明	(148)
参考文献	(149)
第六章 最大熵原理在气象学中的应用	(151)
§1 大气的温度场和气压场	(152)
§2 雨量在面积上的分布	(154)
§3 降水现象中的指数簇	(158)
§4 稳定层云的云滴谱	(165)
§5 其他	(169)
参考文献	(172)
第七章 总结讨论和补白	(174)
§1 基本思路	(174)

§2 具体成果简集·····	(178)
§3 分布的稳定性和大气熵守恒猜想·····	(181)
§4 数值天气预告·····	(185)
§5 气候变迁·····	(188)
§6 补白·····	(193)
参考文献·····	(197)
附录A. 半球纬向剖面上各格点所代表的大气质量·····	(198)
附录B 气象学中的一些分布函数·····	(199)
附录C 熵达到极大时的分布函数·····	(201)
Abstract ·····	(203)

在科学发展上可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区

—N·维纳

引 言

今天的气象科学已经是一项尖端科学了。这不仅仅是由于它有遍布全球的气象观测网、有专用的卫星、雷达和一流的计算机，而且还由于我们对大气的运动规律有了较准确的认识。今天的大范围的天气预报可以说主要是在计算机上应用已知的大气运动规律演算出来的。这些“规律”对我们预测未来起到了十分重要的作用。

究竟我们掌握了哪些关于大气的基本规律呢？经常得到的答案是：旋转坐标系中的流体运动方程、理想气体方程、连续方程和热力学第一定律等等。

由于对大气的基本规律的掌握程度直接关系到对天气和气候的预测能力，我们大胆地再问一句：除上述基本规律之外，是否还有某些十分重要而尚未发现的大气基本规律？

基于热力学第二定律（熵原理）作为物理学的基本规律已被广泛承认和应用，我们就可以更具体的问一下：熵的原理是否也是制约大气的基本规律？

在物理学中我们早已知道熵的原理是适用于一切物质系统的，因而它当然也适用于地球大气（顺便说一句，它也适