

· 知识介绍 ·

熵气象学简介

张学文 马力

(新疆气象科学研究所, 乌鲁木齐 830002)

提 要

熵气象学是80年代新出现的词汇(学科)。作者简述了其来历、基本框架、主要成果与应用前景,使人们看到在动力气象学之外,另一个理论气象学分支在形成。

关键词 最大熵原理 分布函数 熵气象学

引 言

“熵气象学”一词于1986年出现^[1],1992年《熵气象学》一书的出版^[2],标志着这门新的科学已破土出苗。

熵概念伴随热力学第二定律是上世纪中期从物理学中诞生的。本世纪中期发现空气位温与熵的关系,推进了大气等熵面分析,使熵从热力学角度引入气象学。

50年代创立的信息论中又提出信息熵,这把熵概念扩展到非热力学领域,与此对应的最大熵原理也被引伸用于非热力学,从而形成了熵的应用领域的又一次大扩展。

这种新扩展在气象学中也有反应,我国顾震潮^[3]、张学文^[4]于50、80年代把信息熵用于气象评分、气象预告和气候分析就是其例。1981年廖树生把统计物理学中的玻尔兹曼原理用于说明降水的概率分布^[5],这促使张学文等人探索用最大熵原理来解释气象现象。经过12年的努力,他们先后发表多篇论文,终于搭起了熵气象学的框架。

人们看到熵气象学所研究的对象远远超出了大气热力学中的位温和等熵面分析的圈子,它在动力气象学之外另辟了一个理论园地。

1 基本框架

如果考察较为成熟的学科,可以发现它

们所以被公认为是一门学科,大致有如下几个特征

- 有较统一的研究对象和研究领域
- 有适用于该领域的通用性比较强的概念
- 有研究这些对象的若干仪器、手段和方法
- 发现了较丰富的事实、现象
- 通过归纳、分析与推理得到了若干规律
- 有若干应用事例

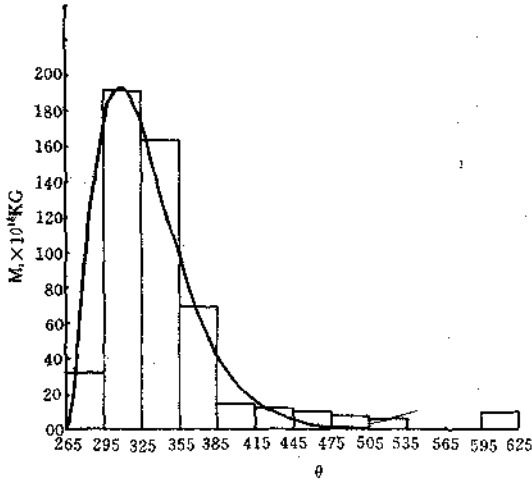
对于熵气象学来说,它的研究领域也就是地球大气,这与动力气象学是一致的、相同的。但它与动力气象学看待事物的角度是有很大差别的。动力学着重于对物质单个质点(单个的空气微团)的分析,而熵气象学必须面对群体作分析,如气温不等的众多空气微团,一批冰雹粒,一次降水过程等种种集合。

“力”几乎是横贯动力气象学的通用性很强的概念,而在熵气象学中已发现的通用性很强的概念包容有两个 分布函数和熵。

气象学中的气候分支早就引入了概率分布的概念。这个概念主要用于对某固定地点的某气象变量的众多个样本的分析,而分布函数的概念包括了概率分布概念。如云物理学中的云滴谱、雨滴谱、冰雹谱等,也是分布

函数的一种特例。

熵气象学的一个重要贡献在于它提出了以同一时刻的全球大气为总体的各种(温度、气压、比湿、位能、动能、风速等)分布函数(见附图)。它不究空气块在什么地理位置,仅显示当时全球大气中有不同温度(或气压等)的空气各有多少(质量)。



附图 大气位温分布

熵气象学已揭示的分布函数有 30 多个,它们都是光滑的连续函数,且很少随时间的变化而变化,它们大多可以用一个参数不多的解析式来描述。

分布函数这一概念在外观上似与概率分布完全不同,但是如果构想一个“理想实验”,不难发现它的数学与物理特性和概率分布函数 $f(x)$ 是相同的、等价的。

在信息论中,物理量 H 被定义为对分布函数的如下积分

$$H = \int f(x) \ln f(x) dx$$

此积分从变量 x 的下限取到上限。据此,有了分布函数 $f(x)$,我们就会得到依上式算出的物理量 H 。依前人的考虑,这个标量应当叫作“熵”。

如果回顾统计物理学,上世纪玻尔兹曼从分子分布函数中也引出过这个式子。

这样看来,一切已经找出分布函数的气象研究对象,只要把它的特有分布函数用上

式计算出 H 值,我们就说这是该气象要素的熵。

在这里熵这个量度的是一个系统(一个集合)内各个元素的状态的丰富(复杂)程度^[6]。某一系统(集合)如其各个元素无差别,则其熵为零。

在已研究的气象问题中已经找出了约 30 种分布函数,根据上述的熵与分布函数的公式,我们也就有 30 多个气象熵。它们不仅在数量上远超过早期与位温相伴的热力学熵,而且它们的气象含义也远比位温对应的熵要丰富。

由于在众多的大气系统(集合)中有着众多的分布函数,由于分布函数与熵的确定关系,因而我们不难看到“熵”在气象上的应用领域不是比“力”窄而是更广。

人们也许会问,把分布函数引伸到熵究竟有什么科学意义?

我们说引入熵的核心目的是为了把熵原理广泛用于各个气象问题之中。

在近 150 年的科学发展中,熵原理曾经被应用于热力学、光谱学、化学动力学、分子运动论、电子学等极为广泛的领域,它被称为生产“公式”的培养基(细菌学语)。近 30 年来从信息论中引伸出来的最大熵原理在统计判别(如最大熵谱)等方面又有不少应用。

所有这些使我们看到广义的熵原理是横跨物质科学与抽象科学的普遍法则。气象学的任务不是回避熵原理,而是借用它来认识大气的内在规律。

熵原理就是最大熵原理,它是说任何一个物质体系(集合)总是在约束条件(可有多种)允许的情况下使自己状态的复杂程度(熵)达到最大值。

我们知道牛顿的力学原理也可以表述为“最小作用原理”,熵原理的上述表述方式与最小作用原理具有类似性。

封闭在一个瓶子里的气体分子会以同一个速度运动吗?熵原理说,分子的运动速度会自动呈现最复杂状态(有的快、有的慢),都不会相同。

法律规定了结婚年龄的下限,人们是否

都到相同的年龄就结婚呢?熵原理说,人们会在约束条件——法律、经济等情况下结婚,但结婚的年龄会自动地达最复杂化(熵最大)程度,而不是在相同的年龄都结婚。

把最大熵原理用于气象上我们会想到

一片云中的云滴不会都一样大,且大小不等的云滴各占一定比例,这种大小云滴的比例关系就是云滴谱(分布函数),而一定的谱就对应于某种约束下的熵达极大值。

一场雨降在各地的雨量不会都一样多,大小不等的雨占的不同面积恰是某种约束下“熵极大”(最复杂)的体现。

全球的空气有的运动的快、有的慢,有的热、有的凉,有的干、有的湿等等。熵原理告诉我们大气的状态自动趋于“最复杂”。

照此说来,熵原理是时刻制约着大气,使它表演“最复杂的节目”。

分析各个气象上的系统(集合),找出其特有的分布函数,通过熵而与最大熵原理联系起来,这就是熵气象学的从实践到理论的基本环节,它们构筑了熵气象学的基本框架。

2 主要成果

2.1 发现了一批分布函数

如前所述,熵气象学把分布函数概念引入气象学,这使人们可以用它来寻找各种气象系统(集合)的分布函数究竟是什么形态?研究发现很多都可以用解析式来表示,在表1中列出的分布函数就是其例。如果细看可以发现有些分布是云物理学、统计气候学中已有的。而另一些涉及同一时刻全球大气的分布函数,几乎都是新发现。

表1 气象学中四大类分布函数

类型	元量	样本总体
统计气象学中的概率分布函数	某一单位时间内的某气象要素	同一地点充分长时间中的大样本
大气分布函数	单位质量大气的某气象要素	同一瞬时的全球大气
云物理学中的分布函数	云滴或降水的“粒子”	某一片云或某一场降水(注:云滴谱、雨滴谱)
水文气象学中的分布函数	某一面积元或时间元的降水要素	一场降水的区域或其总历时(注:暴雨历时面积-深度之间的关系)

这当中气压与温度分别服从均匀分布,

比湿、位能、风速分别服从负指数分布,总能量、位温分别服从概率论中的 Γ 分布。人们想不到全球大气竟有这么清楚的规律,而它长期未被发现。

表2中的一个重要特点是这些分布函数几乎都是概率论中常见的解析式,它们早已有了,诸如正态分布、均匀分布、指数分布等专门的称谓。后边将说明有这种结果决不是偶然的。

2.2 发现气象上的分布函数有很高的稳定性

由于很多气象上的分布函数都是以同一时刻的全球大气为总体而计算出来的,人们自然会问,大气无时不在流动,难道下一时刻(如24小时)的分布函数还是同一个解析式。

分析表明,不同时刻的分布函数的解析式在函数形状上是不变的。如果有点变化仅仅是公式中参数值的微小变化。

这种不变性确实是大气的重要特性。

2.3 解释了一批分布函数恰好符合某种分布(如正态)的物理原因

这种事例很多,这里不仔细分析。我们想指明,这种解释都联系着最大熵原理,都给出明确而又易于接受的约束条件。

在熟知的大气现象中,不仅从新角度出现了一批经验公式(分布函数),而且用新的理论——熵原理从物理上作了说明。

2.4 用最大熵原理统一了一批概率分布函数

在概率论中经常介绍一批常用的概率密度分布函数的解析式、数学特性和那些随机事件符合该种分布。

人们会问,为什么某个事件恰好符合某一特定分布呢?人们也许还会问这一些概率分布函数外形不同,能否有内在的统一性?

在熵原理一书中,我们指出10余个概率分布函数都可以用最大熵原理辅以不同的约束条件而推导出来。换言之,熵原理统一了概率论中的众多分布。

表2 气象学中的一些分布函数

类型	序号	名称	分布函数	样本总体	随机变量
统计气象学中的概率分布函数	1	日降水量的分布	负指数	某地一个不变的历史时期	日降水量
	2	月、季降水量的分布	Γ 分布	某地一个不变的历史时期	月、季降水量
	3	年降水量的分布	正态	某地一个不变的历史时期	年降水量
	4	日平均气温的分布	正态	某地一个不变的历史时期	日平均气温
	5	月平均相对湿度分布	β 分布	某地一个不变的历史时期	月平均相对湿度
	6	气温极值分布	三参数韦伯	某地一个不变的历史时期	气温极值
	7	无雨期长度分布	负指数	某地一个不变的历史时期	无雨期长度
	8	连续雨日分布	负指数	某地一个不变的历史时期	连续降雨时间
大气分布函数	9	风速分布	负指数	全球大气	空气微团的风速
	10	气压分布	均匀	全球大气	空气微团的气压
	11	气温分布	均匀	全球大气	空气微团的气温
	12	比湿分布	负指数	全球大气	空气微团的比湿
	13	位温分布	$n=3$ 的 Γ 分布	全球大气	空气微团的位温
	14	内能分布	均匀	全球大气	空气微团的内能
	15	位能分布	负指数	全球大气	空气微团的位能
	16	动能分布	$\sqrt{E_k}$ 是负指数	全球大气	空气微团的动能
	17	潜热能分布	负指数	全球大气	空气微团的潜热能
	18	总能量分布	$n=3$ 的 Γ 分布	全球大气	空气微团的总能量
	19	各等压面上风速分布	$n=2$ 的 Γ 分布	大气任一层等压面	空气面积元的风速
20	各等压面上位势高度分布	不规则	大气任一层等压面	空气面积元的位势高度	
21	海平面气压分布	不规则	海平面气压	空气面积元的气压	
22	月平均海平面气压分布	正态	海平面气压	空气面积元的月平均气压	
云物理学中的分布函数	23	雨滴的谱	负指数	某地一场雨	雨滴半径
	24	雪花的谱	负指数	某地一场雪	雪花的半径当量
	25	冰雹的谱	负指数	某地一场冰雹	冰雹的半径
	26	霰的谱	负指数	某地一场霰	霰的半径
	27	云滴谱	瑞利	某一片稳定层云	云滴半径
水文气象学中的分布函数	28	雨深-面积分布	负指数	一场雨的雨区	面积元的雨深
	29	雨强-时间分布	负指数	一场雨的总历时	时间元的雨强
	30	瞬时雨强-面积分布	负指数	一场雨某一瞬时的雨区	面积元的瞬时雨强
	31	过程平均雨强-面积分布	负指数	一场雨的雨区	面积元的平均雨强
	32	过程总历时-面积分布	负指数	一场雨的雨区	面积元的平均总历时
	33	多年平均年降水量的面积分布	负指数	某一地理区域	面积元的多年平均年降水量
	34	动能、位能、内能三元分布	貌似一只瓜皮	全球大气	空气微团的三种能量之和

把不同的初始边界条件与牛顿力学结合起来不是可以导出直线运动、抛物线运动、圆周运动吗？熵原理导出的不同分布函数在这里也显示了与牛顿力学的相似性。

熵原理还向我们提示着另一个简单的道理，这就是一个系统当其熵已经达到极大值之后，如约束条件不变，则熵值也不变化。而熵值的不变化正是我们发现的众多个气象上的分布函数不随时间变化的物理原因。

熵气象研究还对位温与熵的公式作了改

进，新的关系式可用于计算空气熵的绝对值。此外，计算出全球大气的热力学总熵的绝对值为 $3.5 \times 10^{22} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

在研究中，作者对熵原理从多角度作了说明，它融统计物理、信息论于一体，提出热力学熵与信息熵的比例系数不仅有玻尔兹曼常数，还应当有粒子个数。

3 应用前景

熵的原理已是对大气有普遍的适用性（普遍性），因而它的应用前景是光明的、应用

面是宽广的。

3.1 暴雨的历时、面积、深度关系

水文气象学中曾做过大量的分布函数分析,有不少经验曲线。但这些个例在空间上的可移植性、在时间上的再现性都受到质疑(缺少普适性)。

熵原理在此领域的应用首先是借用分布函数这一工具来表示暴雨时、面、深关系的。从而克服了时间、空间上的局限,它找出的规律多为简明的数学公式,且普遍适用于不同地区的各类降水,这就使暴雨时面深成果的可信程度、可用地域大为扩大。

可以说,熵气象学为暴雨时面深研究提供了得力的分析工具(分布函数)和理论工具(熵原理)。而这方面成果的实用化对暴雨、洪水预告、对水利工程设计都有重要价值。

3.2 气候概率分布研究

这方面的研究过去着力于从资料中找出经验公式,进而分析它符合某种概率分布,但很少研究其属于某种分布的原因。

熵气象研究则给出了一个理论框架,它帮助你从物理原因上寻找某问题中那些较合理的假设(约束)与熵原理结合应当导出哪一种概率分布。

这样,熵气象就把气候概率研究向物理原因方面迈进一步,使一些经验方程上升为理论公式,从而提高了科学性。

3.3 数值天气预告

熵原理是独立于力学原理之外的另一种

原理,它不排斥也不代替力学原理,因而时刻运动着的大气时时刻刻都体现了力学原理和熵原理对它的约束。依此看来,设法把熵原理连同力学原理都用于数值天气预告中是更合理的。

如何把力学原理与熵原理都用于预告中?这一工作尚待人们去探索。我们有理由相信把熵原理巧妙地与力学结合起来,能显著的提高预告的精度和有效时效。

3.4 气候变迁

“气候变暖”的议论,从分布函数的角度看,这仅是分析分布函数的一个特征量——平均值。而对气候变化的更精确一些的描述就不应当仅用“平均值”,而应当用“分布函数”(它不涉及具体点的气候变化,但给出总体分布)。据此看来,把分布函数引入气候变迁的研究不仅会使问题提得更精确,而且便于为气候研究打开新出路。

这方面显然有大量工作有待人们去完成。

参考文献

- 1 张学文 相对分布函数和气象熵 气象学报,44(1986) 214--219
- 2 张学文,马力 熵气象学 北京 气象出版社,1992
- 3 顾震潮 从信息论看天气预告的评分和使用 气象学报, 28(1957),4 256--263
- 4 张学文 气象预告问题的信息分析 北京 科学出版社, 1981
- 5 廖树生,降水指数分布律的说明 新疆气象,1981,4 1—5
- 6 张学文 物理场的熵和它的自发减少现象,自然杂志,9 (1986),11 847—850,812

Entropy Meteorology

Zhang Xuewen Ma Li

(Xinjiang Institute of Meteorology, Urumqi, 830002)

Abstract

The theoretical framework of entropy meteorology consists of the following three parts (1) The distribution function concept and many of its examples in meteorology, (2) The relationship between distribution function and entropy, (3) The illustration of various meteorological distribution function by the maximum entropy principle

In entropy meteorology the meteorological distribution functions are divided into four kinds

Entropy may be used in four disciplines (1) The depth, duration and area of rain process (2) Statistical climatology (3) Numeral weather forecasting (4) Climate change

Key Words entropy meteorology distribution function maximum entropy principle