

熵流与大气系统的演变

柳崇健¹ 刘英¹ 徐辉²

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 国家气象中心, 北京 100081

摘 要 熵流是大气耗散结构理论的核心概念。作者从强天气现象观测事实分析与理论研究两个方面入手, 讨论了熵流与大气系统演变的关系。前者主要涉及美国近 50 年龙卷、雷暴大风和冰雹事件的时间演变, 后者从 Gibbs 关系出发导得熵平衡方程, 并对一个强天气系统台风麦莎 (2005) 进行熵流分析, 从而揭示出熵作为一个热力学无序度的度量对大气系统的适用性。研究显示, 负熵流有助于大气系统的发展, 而大气圈作为一个整体将朝着愈益背离平衡态的高度组织化的方向演变。

关键词 熵流 耗散结构 极端天气气候事件

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1251-06

中图分类号 P433

文献标识码 A

Entropy Flow and the Evolution of the Atmospheric Systems

LIU Chong-Jian¹, LIU Ying¹, and XU Hui²

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract More attention has been paid to the ultimate result of the evolution of the earth's atmosphere, as is originating from the facts of the global warming and trends of extreme weather and climate events towards violence that might directly influence the future biosphere for the human race. The theory of dissipative structures created by I. Prigogine (1955) points out that an open system will be driven further from equilibrium by negative entropy flow entering into it and, early in the 1940s, E. Schrödinger (1992) mentioned in his monograph "What Is Life?" that life's existence depends on its continuous gain of "negentropy" from its surroundings, suggesting that negative entropy is something very positive for structural creation and evolution within a thermodynamic system. However, the effect of negative entropy flow on the evolution of the atmospheric systems is unknown. Here the authors show that entropy flow diagnosis is a powerful tool in understanding the mechanism responsible for the atmospheric ordered systems. Based on the observational data, the authors found that the numbers of severe weather events such as tornados, high winds and hails are dramatically increased in some regions, e. g. the United States, for recent 50 years and more, and revealed, using the entropy flow formula derived in this paper, that the growth of the devastating Typhoon Matsa (2005), as an example of the ordered systems, relies greatly upon the negative entropy flow from its environment. The former suggests that the earth's atmosphere will be more and more organized with extreme weather processes caused frequently within it and, the latter suggests that the entropy flow methodology might be generalized to the other relevant fields to discuss the life-cycle of an ordered system, whether it is living or nonliving, from the point of view of "panmerism".

收稿日期 2007-05-30, 2007-06-28 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40475022、40333028

作者简介 柳崇健, 男, 1943 年出生, 教授, 主要从事非线性大气动力学和大气耗散结构理论以及中尺度数值天气预报等方面的研究工作。E-mail: cliu@cams.cma.gov.cn

Key words entropy flow, dissipative structures, extreme weather and climate events

1 引言

由于大气本质上可视为一架热机,近年来人们愈来愈关注热力学理论及其应用。牛津大学和剑桥大学相继出版了大气热力学专著^[1, 2]综述了这一领域的进展。

如同熵是经典热力学的至关重要的概念,熵流是耗散结构理论的核心概念。自从普利高津建立耗散结构理论^[3~6]后,确实有气象学者^[7]估算了整个地气系统的熵收支。然而,耗散结构理论所揭示的熵的一个更本质、更深刻的内涵是熵可以作为热力学系统的宏观无序度的一个度量。因为热力学第二定律指出自发的不可逆演变过程总是导致熵的增加,而伴随“熵增”过程的则是“能降”现象,即熵的增加是一个消极的物理过程。要想使一个宏观热力学系统被重新激活,一个有效的途径就是使这个系统从环境获得负熵。

事实上,一个更广泛的“泛生论”思想,早在20世纪40年代就被量子物理学奠基人之一薛定谔所阐明^[8]。他在名著《什么是生命》^[8]中指出,既然对于一个生命个体而言,平衡态这个熵达到最大的无序态对应于死亡,那么一个人(生命个体)从外界获得“负熵”就有望造成其体内的减熵过程。根据这一命题,人们立即就意识到负熵是十分积极的东西,有机体就是依赖负熵而存活的。果然,五十多年过去了,人们现在甚至已经将单位摩尔的葡萄糖的规定熵都算出来了^[6]。这是物理学与生命科学互相渗透的结果。

本文即从大气耗散结构理论的角度来考察大气系统演变的熵流特征及地球大气作为一个整体的终极演变趋向。大体安排是:下一节先介绍原理和方法;第3节提出一些大气观测事实;第4节通过一个强风暴系统的熵流分析来揭示熵诊断方法对于理解大气结构生消机理的潜在应用价值;最后在第5节展开深入讨论并对本文加以总结。

2 原理

热力学第二定律是一个基于观测事实凝炼而得的物理学定律。对于孤立系统,即一个跟其环境既无质量交换又无能量交换的热力学系统,其熵是随

着时间单调增加的。这就是所谓的孤系熵增原理。一旦熵增至极大值,就达到了热力学平衡态,这个态是最无序的,或用统计物理学语言来表述,这是一个出现几率最大的态,或最易于出现的态。例如,对于滴入原本一杯清水中的蓝墨水,我们将观察到随着时间的推移,此墨水将逐渐向整个杯中的其余部位扩散,直至充满整个杯水。这个(扩散)过程是不可逆的,是时间单向进行的,而且是自发的。这就是说,不经外界的任何干预,扩散过程总是沿浓度较大的部位向浓度较小的相邻部位这一方向自发进行的,而且不可能反过来,即我们观察不到原先充满整个杯水的蓝墨水分子逐渐(自发地)向某个中心聚集以致最后成为孤立的一滴。因此这个过程是不可逆的,或者说大自然是偏爱平衡态的。换言之,任何一个原先不均匀的或非平衡的过程将自发趋向于均匀化或趋于平衡态,而平衡态就自然成了几率最大的态,这样的态是最无序的,或最无结构创生的可能的;生命个体达到平衡态即意味着死亡。现在,使用熵的语言,我们就可以得到如下的概念:一个热力学系统的熵即是该系统无序度的度量,熵演变到极大就达到最无序的平衡态,而系统处于低熵则意味着此系统比较有序,或有结构生成的机会。如果一个开放系统能从其环境源源获得负熵,那么这个系统即有望造成其内部的减熵运动,从而使系统更加偏离平衡态而组织化,而原来就远离平衡态的有序结构(系统)就会趋于加强。

图1给出的是一个经典贝纳特对流的例子,系1900年由法国科学家Bénard(转引自文献^[5])从受控实验中首先发现。图1中所示的一薄层流体(考虑到表面张力等因素实验中多半选择液氮作为受试流体),最初是处于静止状态的。如果我们自底部在温度 T_2 下加热该层流体,同时由顶部在较低的温度 T_1 下失去热量,那么一旦垂直温度梯度 $T_2 - T_1$ 大于某个临界值,这个原来静止的薄层流体内部就会产生宏观的对流:从上面俯视流体,可以发现有如蜂窝状的六边形的格子形成,这就是原来平衡的系统(薄层流体)自环境获得了负熵而由静止态跃至有组织的宏观对流的有序态,或有结构创生。具体计算该薄层系统与其环境的熵交换(δs_e),发现

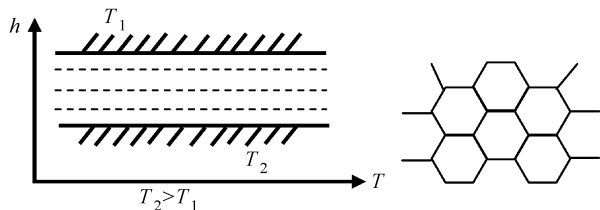


图1 作为自组织原型的贝纳特对流示意图

Fig. 1 The schematic diagram for Bénard convection as the prototype of self-organization

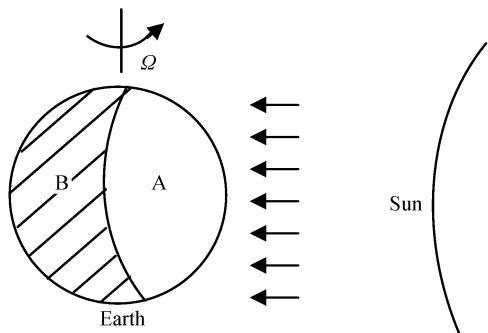


图2 作为负熵源天然机构的日地系统示意图 (详见正文)

Fig. 2 The schematic diagram for the sun-earth system as a natural mechanism of negative entropy source (see text for details)

$$\delta s_e = \frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} Q < 0,$$

式中, Q_2 、 Q_1 和 Q 分别为通过该薄层系统底部、顶部和趋于定常后的热流量; δs_e 小于零意味着该流体系统有负熵流入。原则上, 凡是在高温下得到热量而在低温下失去热量的系统均能从环境获得负熵。用这个观点去考察处于太阳系中的行星地球 (参见图 2), 由于该星球无时无刻均处于向日面 (白天) 半球于高温下接受太阳辐射能, 而同时在背日面 (夜间) 于低温下失去“黑体”辐射能, 因此地气系统永远是一个获得负熵的系统。观测资料也证实了这一点。Peixoto^[7] 的大气熵分支分析指出, 全球大气的熵通量为 $-606 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。注意到它是一个负值, 因此大气总是在背离平衡态。从这个角度也不难理解为什么 Dutton^[9] 给他的名著关于大气运动的理论加上副标题“不止风”的缘故。

鉴于此, 我们针对大气系统从 Gibbs 关系出发推导出适于用等压面坐标表示的大气变量来计算熵收支的熵平衡方程, 依此诊断大气系统各发展阶段的熵流, 通过分析熵流在系统生命史各演变阶段的

特征来揭示负熵流对大气系统组织化的作用。

采取局域平衡假设后的 Gibbs 关系^[4]可表示为

$$T\delta s = \delta u + p\delta\alpha - \sum_k \mu_k \delta N_k, \quad (1)$$

式中, δ 表示一般的增量, 亦可用于表示随时间的个别导数。对于后者 (1) 式变成

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} \frac{du}{dt} + \frac{p}{T} \frac{d\alpha}{dt} - \sum_k \frac{\mu_k}{T} \frac{dN_k}{dt}, \quad (2)$$

式中, s 是单位质量的熵; T 为温度; p 为气压; u 是单位质量的内能; $\alpha = \rho^{-1}$ 是比容, ρ 为总密度; N_k 和 μ_k 是第 k 个组分的分比质量和化学势: $N_k = \rho_k / \rho$, 其中 ρ_k 为第 k 组分的密度, 它们之间成立关系式: $\rho = \sum_k \rho_k$ 和 $\sum_k N_k = 1$ 。公式 (2) 中的三个个别导数可以分别由热力学第一定律、质量连续性方程和组分平衡方程来替代, 这样, (2) 式经过若干初等运算步骤之后最终可改写成

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\text{div} \left(\mathbf{S}\mathbf{V} + \frac{1}{T} \mathbf{J}_q - \sum_k \frac{\mu_k}{T} \mathbf{J}_k \right) + \sigma, \quad (3)$$

这里, $\mathbf{V}$ 为风速; $\mathbf{J}_k$ 和 $\mathbf{J}_q$ 分别为扩散流和热流矢, 前者按定义为系统内相异组分间的相对运动所引起的扩散流, 一般设为零, 而后者因大气中分子热传导项比熵平流的贡献要小两个或两个以上量级, 在本文的计算中亦不予考虑; $S = \rho s$ 为单位体积的熵。之所以换算成单位体积的形式, 目的是便于我们下面针对一个具体三维大气系统 (例如, 台风) 进行体积分, 从而获得整个大气系统的熵收支 (熵流)。(3) 式右边第一项为散度项, 这就是本文关心的熵流项。因为根据高斯定理, 经由一个三维系统的边界而进入系统的任何一个与该边界正交的流量 (本文指的是熵矢量表征的熵流量) 的面积分可以化为该矢量散度对整个系统体积的体积分。

3 若干观测事实

国内外的各种观测资料均显示出强天气事件是渐趋频发的。国内强沙尘暴从 20 世纪 50 年代的 5 次增至 90 年代的 23 次, 而平均沙化土地面积从 50~60 年代的 1560 km^2 扩至 90 年代的 2460 km^2 , 后者相当于一年沙化掉一个中等大小的县。

国外, 如美国近 50 年的龙卷和冰雹等强天气事件亦是愈演愈烈的。从 NASA 在 NCDC (国家气候资料中心) 网站公布的数据^[10] 即能看出这一点 (见图 3、4), 它们分别是 1950~2003 年间美国

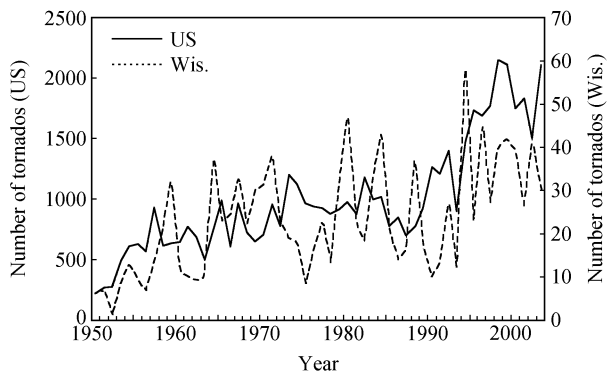


图 3 美国/威斯康星州 1950~2003 年出现的龙卷事件数
Fig. 3 The number of tornados in the United States/Wisconsin during 1950 - 2003

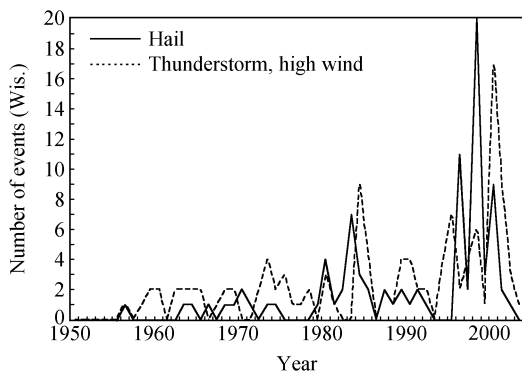


图 4 威斯康星州 1950~2003 年间出现的雷雨大风 (风速至少 75 节) 和冰雹 (大小至少 2.5 英寸) 事件次数
Fig. 4 The numbers of thunderstorms, high winds with speed of at least 75 knots and hails with size of at least 2.5 inches in Wisconsin during 1950 - 2003

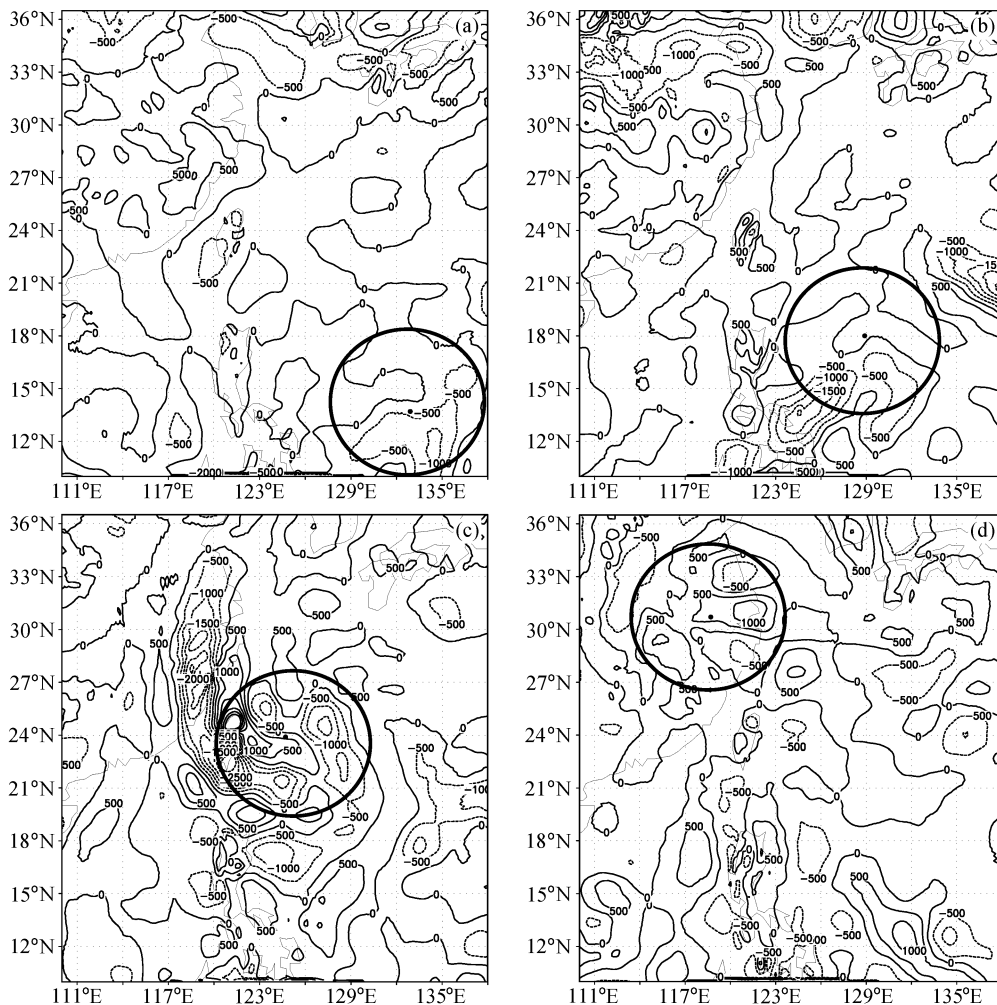


图 5 台风麦莎 (2005) 500 hPa 熵流场: (a) 形成期 (8 月 1 日 00 时); (b) 发展期 (8 月 2 日 06 时); (c) 成熟期 (8 月 4 日 06 时); (d) 衰减期 (8 月 6 日 18 时)。熵流等值线间隔为 $0.5 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 5 Entropy flow fields at 500 hPa in the different evolution stages of Typhoon Matsa (2005): (a) Genesis (0000 UTC 1 Aug); (b) development (0600 UTC 2 Aug); (c) maturity (0600 UTC 4 Aug); (d) decay (1800 UTC 6 Aug). The contour interval is $0.5 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

的龙卷发生数和威斯康星州雷雨大风与冰雹发生数(威斯康星州是美国灾害性天气最稀少的州之一)。图 3、4 均清晰地显示,近 50 年来,美国的强天气事件是日益增多的,而 20 世纪 90 年代之后更趋大幅上升。

4 负熵流对大气系统组织化的作用

运用本文导出的公式 (3),我们针对一个具体的大气强系统——台风麦莎 (2005),按其生命史的各阶段计算了相应的熵流,即 (3) 式右端的散度项。

麦莎是自 1997 年以来给我国华东地区带来最严重灾害的一个登陆台风。它的生命史大致可以划分出三个阶段,2005 年 7 月 31 日 18 时~8 月 3 日 06 时 (国际协调时,下同) 为发展阶段,8 月 3 日 06 时~5 日 18 时为成熟阶段,而 8 月 5 日 18 时~8 日 00 时为衰减阶段。本文计算熵流的资料是基于 NCEP/NCAR $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的再分析资料^[11]。这样,将熵流,即 (3) 式右端的散度项,转化成 p 坐标的形式是方便的:

$$-\operatorname{div} \mathbf{J}_s = -\frac{\partial \rho s u}{\partial x} - \frac{\partial \rho s v}{\partial y} + \rho g \frac{\partial \rho s \omega}{\partial p}, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{J}_s$ 为熵流矢; u 、 v 分别是等压面上 x 、 y 方向上的速度, ω 是 p 坐标中的垂直速度; g 则是重力加速度。

方程 (4) 即是本文用以诊断熵流的基本公式。

图 5 是麦莎在各演变阶段 500 hPa 的熵流分布图,2005 年 8 月 1 日 00 时、2 日 06 时、4 日 06 时和 6 日 18 时分别对应于台风形成期、发展期、成熟

期和衰减期,图中圆圈表示台风的大致范围。该图清楚地显示麦莎在发展阶段负熵流逐渐加强,至成熟期负熵流急剧增大趋于极盛,而衰减阶段对应的负熵流复又转弱。

图 6 给出了对整个台风积分后的熵流以 6 小时为间隔的时间演变图,图中同时给出了地面最大风速 ($V_{\max}$) 作为参考。该图描绘了负熵与台风强度之间的联系,清楚地显示出负熵流对台风组织化的作用以及正熵流的负面影响。

事实上,详细的分析还可揭示出熵流演变相对于台风强度的变化存在一个提前量,反映出熵流诊断分析方法具有提供台风演变预报信息的潜在功能。沿着这个方向正在开展一系列台风个案研究,以便从中提炼出更带一般性的结果并用于指导业务应用。

5 讨论和结语

熵概念是热力学第二定律的产物。热力学第二定律在热力学与统计物理学中处于特别重要的地位。早在 1938 年 Emden 就说过:“在自然过程的庞大工厂里,熵原理起着经理的作用,因为它规定整个企业的经营方式和方法,而能原理仅仅充当簿记,平衡贷方和借方”(转引自文献[6])。也就是说,能量守恒定律还不能制约能量转换的方向。例如,将全世界所有海水降低 10°C 使释放出的热量全部用来做功是不可能自发完成的,因为这虽不违背热力学第一定律却违背热力学第二定律,这就是为什么第二类永动机不能实现的物理原因。而多体系

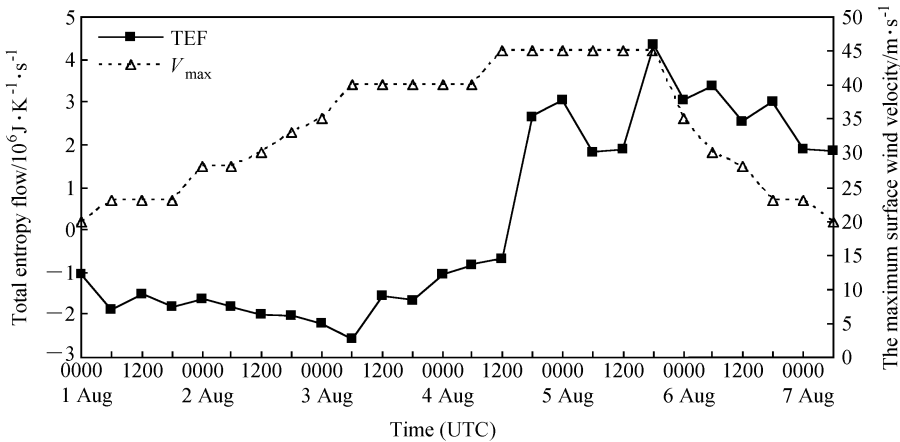


图 6 麦莎台风中心及其邻近范围内三维总熵流 (TEF) 随时间的演变 (时间间隔为 6 小时)。图中同时给出地面最大风速的变化作为对照
Fig. 6 The evolution of three-dimensional total entropy flow (TEF) in the Typhoon Masta's centre and its neighborhood (the time interval is 6 h), with changes of the maximum surface wind velocity as a reference

统(自由度大于三的系统, 大气即属多体系统)不可逆性的实质就是耗散性, 耗散导致系统的熵增加, 序减小, 要维持该系统的序度, 就必须依赖来自环境的负熵流。因此, 熵流是一个描述过程的更深刻的概念, 在广泛的意义上有能力刻画热力学系统的动态。薛定谔提出了生命“赖负熵为生”的命题^[8], 从物理学走向了生命科学, 就是通过负熵流这个概念架设的桥梁。现在热力学概念甚至已超出自然科学和工程技术的领域, 进入了人文科学。弗洛伊德晚年提出的所谓“死的本能”^[12]指的是要求回复到事物的初始状态, 乃至其所源出的无机状态的本能, 此说不啻是热力学第二定律的精神分析学版本。

总之, 任何一个热力学系统, 包括大气系统, 要抵制消亡甚或远离平衡态而获得发展, 必须从系统的环境引入负熵流。本文对麦莎这个算例的结果印证了这一推断, 对强热带风暴碧丽斯(2006)^[13]以及较早的西太平洋近海台风(1975年)和孟加拉湾气旋(1979年)^[14]等, 我们也取得了类似的结果。就单个大气风暴系统而言, 负熵流有助于该系统的发展, 而大气圈作为一个整体, 根据上文的讨论, 由于它随时从环境获得负熵流, 终将高度组织化而不断有新的更极端的天气气候事件纷至沓来。

参考文献 (References)

- [1] Bohren C F, Albrecht B A. *Atmospheric Thermodynamics*. Oxford University Press, 1999
- [2] Zdunkowski W, Bott A. *Thermodynamics of the Atmosphere*. Cambridge University Press, 2004
- [3] Prigogine I. Thermodynamics of irreversible processes. *Bull. Class. Sci. Acad. Roy. Belg.*, 1945, **31** (5): 600~621
- [4] Prigogine I. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. Illinois: Charles C. Thomas Publisher Springfield, 1955
- [5] 柳崇健. 大气耗散结构理论. 北京: 气象出版社, 1988. 82~105
Liu Chongjian. *The Theory of Dissipative Structures for the Atmosphere* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1988. 82~105
- [6] 赵凯华, 罗蔚茵. 热学. 北京: 高等教育出版社, 1999. 282~286
Zhao Kaihua, Luo Weiyin. *Thermology* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1999. 282~286
- [7] Peixoto J P. Entropy budget of the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96** (D6): 10981~10988
- [8] Schrödinger E. *What is Life?* Cambridge: Cambridge University Press, 1992 (first published in 1944)
- [9] Dutton J A. *The Ceaseless Wind: An Introduction to the Theory of Atmospheric Motion*. New York: McGraw Hill, 1976
- [10] <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/severeweather/extremes.html>
- [11] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [12] Freud S. *The Standard Edition of the Complete Psychological Works of Sigmund Freud*. New York: W. W. Norton & Company, 2000
- [13] Liu Ying, Liu Chongjian. On the entropy flow properties of a severe tropical storm. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91** (1): 014103, doi: 10.1063/1.2753538
- [14] Liu Chongjian, Liu Ying. Negative entropy flow and its effect on the organization of synoptic-scale severe atmospheric systems. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L01108, doi: 10.1029/2003GL018071 (2004)