第 52 卷 第 6 期 2003 年 6 月
1000-3290/2003/52(06)/1379-06

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.52,No.6,June,2003

强迫耗散系统的有序结构和系统的发展(Ⅰ),最小熵产生原理和有序结构*

胡隐樵

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000)

(大气边界层和大气化学国家重点实验室,北京 100029)

(2002 年 9 月 2 日收到;2002 年 11 月 18 日收到修改稿)

一个系统的发展总是由不可逆热力过程和非线性动力过程所驱动.将大气动力学方程组同考虑了动能变化的 Gibbs 关系结合起来构建的熵平衡方程,才能更好地描述大气系统的不可逆热力过程和非线性动力过程.至今非平衡态热力学仅利用 Onsager 线性唯象关系证明了最小熵产生原理.利用新建立的熵平衡方程和大气动力学方程的性质证明,最小熵产生原理在热力学线性区和非线性区都是普遍成立的.且当热量输送平衡、水汽输送平衡和动量输送平衡时,系统达到不可逆过程最弱的最小熵产生热力学状态.当系统又是动力平衡且无平流时,这种最小熵产生态就是定态.在偏离平衡态的条件下,这种定态对应于大气系统的某种有序结构.

关键词:非线性热力学,熵产生,最小熵产生原理,有序结构

PACC:0570L,4460,0560,8670G

1. 引 言

熵极大值原理指出一个封闭系统的熵总是趋于熵取极大值的稳定状态[1];而 Prigogine[2,3] 最小熵产生原理则表明,一个处于线性区的开放系统总是趋于熵产生取极小值的稳定状态.它们都表述了系统的一种惰性行为.Bertalanffy[4] 首先在"物理学和生物学开放系统理论"一文中,认识到复杂系统必须是一个开放系统,并得到开放系统和稳定状态原理.该原理表明一个包括生命细胞在内的复杂开放系统,能量储存时间变化率为零就代表整个系统达到稳定状态.或者说开放系统全部能量输入率和全部能量输出率之间的平衡就代表整个系统达到稳定状态.Prigogine[5] 于 1967 年又在关于"理论物理和生物学"的第一次国际会议上提出耗散结构(dissipative structure)和自组织(self-organize)等新概念,并称之为耗散结构理论.该理论指出一个开放系统经过某种扰动最终总是自组织成一种新的有序结构.这些理论结果为我们认识复杂系统的特性和行为提供了重要线索.

不可逆过程在建立有序方面起到积极的作用,而非线性动力过程是建立有序结构不可缺少的一环.复杂系统总是一个动力耗散系统,只有从非线性热力学和非线性动力学两方面入手,才有可能揭示复杂系统的发展过程和有序结构的形成机理.流体系统和大气系统都是典型的复杂系统,研究它们可以揭示许多动力耗散系统的特性和复杂行为[6,7].

熵平衡方程是非平衡态热力学的核心,现今的熵平衡方程仅是由 Gibbs 关系和内能方程导出的.但一个系统的发展总是由不可逆热力过程和非线性动力过程所驱动.对于环境流体研究表明,只有在熵平衡方程中引入动力过程,才能更好地描述系统发展的不可逆热力过程和非线性动力过程[8].另一方面,最小熵产生原理是非平衡态热力学的一个重要定理.该原理表明一个开放系统总是有一种使系统不可逆过程趋于最弱的倾向.但至今只是利用 Onsager 线性唯象关系证明了最小熵产生原理[1-3],使最小熵产生原理只能局限于热力学线性区.当环境流体熵平衡方程中引入动力过程后,即可证明最小熵产生原理不仅适用于热力学线性区,对热力学非线性区也是成立的[9].

* 国家自然科学基金(批准号:49835010 和 40233035)资助的课题.

大气系统是一种典型的动力耗散系统.本文试图进一步利用大气动力学方程组同考虑了动能的 Gibbs 关系结合起来,构建大气系统的熵平衡方程.并进一步利用新构建的熵平衡方程和大气动力学方程组的性质证明,最小熵产生原理在热力学非平衡态的线性区和非线性区都是普遍成立的.这种最小熵产生状态就是经过自组织达到的不可逆过程最弱的状态.该命题将以本文完成(以后简称为"文(Ⅰ)").同时以非线性动力学证明广义能量极小值原理,该原理表明一个动力耗散系统的终态是广义能量为极小的稳定的定态,它是动力耗散系统的吸引子.而且证明了这两个被独立证明的原理在物理上的一致性.从而表明动力耗散系统的吸引子就是热力学上最小熵产生态.它们也是同 Bertalanffy 的开放系统和稳定状态原理一致的,表述了复杂系统基本特性和行为.第二部分简称"文(Ⅱ)"(参见文献[10]).

2. 大气热力系统熵平衡方程和动力熵产生

为了建立能充分地表达大气中的热力和动力学过程的熵平衡方程,必须将非平衡态热力学理论的基本概念同大气动力学紧密结合起来.

大气动力学方程组由状态方程、连续性方程、动量守恒方程、温度平衡方程和水汽平衡方程构成,即

$$p = \rho RT, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0, \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\rho \frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t} &= -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho g \delta_{i3} - \frac{\partial p}{\partial x_j}\delta_{ij} + f_c \varepsilon_{ij3} \rho U_j \\ &= -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i,\end{aligned} \tag{3}$$

$$\rho c_p \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial J_{\theta j}}{\partial x_j} - \sum_{\alpha=1}^{3} \omega_\alpha \nu_{ab}^{\alpha} \lambda_{ab}^{\alpha}, \tag{4}$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial J_{Vj}}{\partial x_j} + \sum_{\alpha=1}^{3} \omega_\alpha \nu_{ab}^{\alpha} \delta^{\alpha} m_V. \tag{5}$$

其中 ρ 为空气密度,R 为空气气体常数,c_p 为等压比热.$\{U_i, \theta, q, p, T\}$ 分别为速度、位温、比湿、气压和绝对温度.方程(3)中 F_i 为 Newton 力,g 为重力,f_c 为 Coriolis 系数.其中 λ_{ab}^{α},ω_α 和 ν_{ab}^{α} 分别为相变潜热、相变速率和相变系数,m_V 为水分子量.符号的详细说明参见文献[11].方程(3)—(5)中的动量输送通量 τ_{ij}、热输送通量 $J_{\theta j}$ 和水汽输送通量 J_{Vj} 包括湍流输送和分子黏性输送两部分.

能量守恒方程为

$$\mathrm{d}u - \mathrm{d}\left(\frac{1}{2}U_i^2\right) = \delta q - \delta w. \tag{6}$$

式中 δq 为空气微团从环境所吸收的热量;δw 是空气微团对环境作的功;而 $\mathrm{d}u$ 为内能.方程左边第二项为空气微团动能,U_i 是它在 i 方向的速度.于是得到 Gibbs 关系

$$\mathrm{d}u = \delta q - p\mathrm{d}\nu + U_i \mathrm{d}U_i + \sum_n \mu_n \mathrm{d}c_n. \tag{7}$$

式中 μ_n 是第 n 组分的化学势;c_n 是第 n 组分的比分;$-p\mathrm{d}\nu$ 是空气微团对环境作的压缩功.这就是考虑了动力过程、压缩作功、组分变化后的能量守恒定律表达式.同经典非平衡态热力学 Gibbs 关系比较,这里增加了动能变化项,或者说增加了速度作功项.

利用理想气体的性质并经一定变换后,从方程(7)得到没有化学反应的湿空气大气系统 Gibbs 关系为

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = \frac{c_p}{\theta}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \frac{\Delta\mu}{T}\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} - \frac{U_i}{T}\frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t}. \tag{8}$$

式中 s 为单位质量的比熵.将(8)式乘以 ρ,然后将(3)—(5)式代入,在局域平衡假设条件下,经过一定的整理,就得到大气熵平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho s) = -\frac{\partial}{\partial x_j}J_{sj} + \sigma + \sigma_g. \tag{9}$$

式中的熵流 J_{sj} 和熵产生 σ 以及动力熵产生 σ_g 分别为

$$J_{sj} = \rho s U_j + \frac{1}{\theta}J_{\theta j} + \frac{\Delta\mu}{T}J_{Vj} - \frac{U_i}{T}\tau_{ij}, \tag{10}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= J_{\theta j}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{1}{\theta}\right) + J_{Vj}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right) \\ &\quad - \tau_{ij}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{U_i}{T}\right) + \sum_{\alpha=1}^{3}\omega_\alpha\lambda_\alpha,\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}\sigma_g &= \rho\frac{U_i}{T}\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j}\delta_{ij} + g\delta_{i3} - f_c\varepsilon_{ij3}U_j\right) \\ &= \rho F_i\left(-\frac{U_i}{T}\right).\end{aligned} \tag{12}$$

按如下关系定义相变驱动力

$$\lambda_\alpha = -\frac{1}{\theta}\nu_{ab}^{\alpha}\lambda_{ab}^{\alpha} + \frac{\Delta\mu}{T}\nu_{ab}^{\alpha}\delta^{\alpha}m_V. \tag{13}$$

其中 $\Delta\mu$ 为单位质量的干空气化学势 μ_d 与水汽化学势 μ_V 之差,即

$$\Delta\mu = \mu_d - \mu_V. \tag{14}$$

大气熵平衡方程同现流行的非平衡态热力学熵平衡方程有所不同,而引入了动力熵产生项 σ_g.这

里动力熵产生为 Newton 力对空气微团质心作的功除以温度.该项是气流输送驱动力 F_i 作功对系统局地熵变的贡献.但 σ_g 并不具有熵产生“正定”的属性,当力 F_i 对系统作正功时 σ_g 是负的,而当 F_i 作负功时 σ_g 是正的.另一方面从物理上分析,Newton 力作功驱动气流输送 ρU_i 是一种可逆过程.自然,σ_g 就不是熵产生 σ 所表征的不可逆过程强弱的度量.因此我们称该项 σ_g 为“动力熵产生”.“动力熵产生”可以作为 Newton 力作功这一可逆过程强弱的度量.它一方面具有熵产生的量纲,另一方面又具有熵流表征系统得到或损失能量的属性.但是,“动力熵产生”所表征的是气流输送驱动力 F_i 作功,使系统获得或损失动能,而熵流所表征的是能流造成的系统获得或损失内能.大气热力系统的熵平衡方程直接表达了大气中发生的湍流黏性热输送、水汽输送、动量输送和三种相变等四类不可逆过程以及 Newton 力 F_i 驱动气流输送的动力可逆过程.

3. 非平衡态非线性区的最小熵产生原理

3.1. 非平衡态非线性区熵产生的极值条件

现在不利用线性唯象关系,而利用变分原理和动力学方程组更一般地证明大气系统热力学非线性区熵产生取极值的条件.为此分析系统某体系总熵产生的性质.由(11)式,体系总熵产生可表示成形式

$$\mathscr{P}=\int_\Omega \sigma \mathrm{d}V=\int_\Omega \Big(J_{\theta j}X_{\theta j}+J_{\mathrm{V}j}X_{\mathrm{V}j}+\tau_{ij}X_{mij}+\sum_{\alpha=1}^{3}\omega_\alpha\lambda_\alpha\Big)\mathrm{d}V=\int_\Omega F\mathrm{d}V. \tag{15}$$

其中热力学力分别为(13)式和下列各式

$$X_{\theta j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{1}{\theta}\right),\quad X_{\mathrm{V}j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right),$$
$$X_{mij}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\frac{U_i}{T}\right). \tag{16}$$

非平衡态热力学指出,一个系统的不可逆过程是由热力学力所驱动的.(15)和(16)式表明,总熵产生 $\mathscr{P}$ 的变化完全由函数 $\left(\frac{1}{\theta}\right)$,$\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right)$ 和 $\left(-\frac{U_i}{T}\right)$ 的变化造成,即总熵产生 $\mathscr{P}$ 是它们的泛函数,所以总熵产生 $\mathscr{P}$ 的被积函数可以记为

$$F=\sigma\left(\frac{1}{\theta},\frac{\Delta\mu}{T},-\frac{U_i}{T}\right). \tag{17}$$

泛函数 $\mathscr{P}$ 取极值的条件为

$$\delta\mathscr{P}=\delta\int_\Omega F\mathrm{d}V=0. \tag{18}$$

为了得到变分(18)的 Euler 方程具体形式,将(16)式代入(15)式的前三项并对其分部积分.假设体系边界上热力学流是固定的,则分部积分的面积分为零.作适当整理得到变分方程(18)的被积函数为

$$\begin{aligned}F=-\Big[&\frac{1}{\theta}\Big(\frac{\partial J_{\theta j}}{\partial x_j}+\sum_{\alpha=1}^{3}\omega_\alpha\nu_{ab}^{\alpha}\lambda_{ab}^{\alpha}\Big)\\&+\frac{\Delta\mu}{T}\Big(\frac{\partial J_{\mathrm{V}j}}{\partial x_j}-\sum_{\alpha=1}^{3}\omega_\alpha\nu_{ab}^{\alpha}\delta^\alpha m_{\mathrm{V}}\Big)\\&-\frac{U_i}{T}\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}\Big].\end{aligned} \tag{19}$$

利用(19)和(17)式得到(18)式的 Euler 方程

$$-\frac{\partial J_{\theta j}}{\partial x_j}-\sum_{\alpha=1}^{3}\omega_\alpha\nu_{ab}^{\alpha}\lambda_{ab}^{\alpha}=0, \tag{20}$$

$$-\frac{\partial J_{\mathrm{V}j}}{\partial x_j}+\sum_{\alpha=1}^{3}\omega_\alpha\nu_{ab}^{\alpha}\delta^\alpha m_{\mathrm{V}}=0, \tag{21}$$

$$-\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}=0. \tag{22}$$

这就是体系总熵产生取极值的条件.在物理上,只有满足条件(20)—(22)式才能保证对于 $\left(\frac{1}{\theta},\frac{\Delta\mu}{T},-\frac{U_i}{T}\right)$ 的任意变化,都使(18)式成立.

这就证明了固定边界或恒流边界系统的非线性区熵产生取极值的条件是如(20)—(22)式所示,体系的热量输送(包括湍流输送和辐射热输送)同水相变潜热释放或耗损相平衡;水汽输送同水相变导致的水汽的产生或耗损相平衡;而且动量通量输送散度为零.可以分别称它们为热量输送平衡、水汽输送平衡和动量输送平衡.

3.2. 熵产生极小值原理和最小熵产生态

上面仅证明了大气系统熵产生取极值的条件,下面进一步证明这个极值就是熵产生的极小值.将体系总熵产生的(15)式再改写成

$$\mathscr{P}=\int_\Omega\sigma\mathrm{d}V=\int_\Omega(\sigma_\theta+\sigma_V+\sigma_m+\sigma_\alpha)\mathrm{d}V. \tag{23}$$

可见,体系总熵产生由热量输送熵产生 σ_θ、水汽输送熵产生 σ_{V}、动量输送熵产生 σ_m 和水的相变过程熵产生 σ_α 组成.

作如下假设:

1)热量输送熵产生 σ_θ 的变化完全由位温变化决定,则热量输送熵产生的全微分为

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\left(\frac{1}{\theta}\right)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\frac{1}{\theta}\right)\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}. \tag{24}$$

2)水汽输送熵产生 σ_{V} 的变化完全由比湿变化所决定.类似于(24)式,水汽输送熵产生的全微分为

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{V}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\sigma_{\mathrm{V}}}{\partial\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right)}\frac{\partial}{\partial q}\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right)\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}. \tag{25}$$

固定温度和气压,有关系[11]

$$\frac{\partial}{\partial q}\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right)_{p,T} = -R_{\mathrm{V}}\frac{1}{q}. \tag{26}$$

3)动量输送熵产生 σ_m 的变化完全由速度变化所决定,其全微分为

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_m}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\sigma_m}{\partial\left(-\frac{U_i}{T}\right)}\frac{\partial}{\partial U_i}\left(-\frac{U_i}{T}\right)\frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t}. \tag{27}$$

4)大气水相变熵产生 σ_α 的变化,是同时由位温和比湿变化所决定的,即由 $\left(\frac{1}{\theta}\right)$ 和 $\left(\frac{\Delta\mu(q)}{T}\right)_{p,T}$ 所决定的.

5)最后假设大气系统是动力平衡的,即满足动力平衡条件

$$\rho F_i = -\rho g\delta_{i3} - \frac{\partial p}{\partial x_j}\delta_{ij} + f_{\mathrm{c}}\varepsilon_{ij3}\rho U_j = 0. \tag{28}$$

假设1)—4)意味着体系热量输送同水汽输送之间不存在交叉耦合;温度和气压变化对水汽输送造成的熵产生的影响可忽略不计;温度变化造成的动量输送对熵产生的影响也可忽略不计.在大气测量的精度范围内,这些假设对大气系统是可以接受的.

现在对体系总熵产生(15)式求全微分,并考虑(19)式以及假设1)—4)和动力平衡假设5)后,体系总熵产生的全微分为

$$\frac{\mathrm{d}\mathscr{P}}{\mathrm{d}t} = -\int_\Omega \rho c_{\mathrm{p}}\left[\frac{1}{\theta^2}\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \rho R_{\mathrm{V}}\frac{1}{q}\left(\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \rho\frac{1}{T}\left(\frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t}\right)^2\right]\mathrm{d}V \leqslant 0. \tag{29}$$

则(29)式证明系统熵产生所取极值为极小值.最后可以得出结论,当一个系统热量输送平衡、水汽输送平衡和动量输送平衡时,系统熵产生取极小值.由于熵产生是不可逆过程强度的度量,这时该热力学体系的不可逆过程处于最弱的状态.我们称系统熵产生取极小值的热力学状态为最小熵产生态.如假设不可逆过程总是使熵产生是正的,即 $\mathscr{P} > 0$,则最小熵产生态是稳定的.

3.3. 大气系统的定态和有序结构

理论热力学中总是假定最小熵产生态就是定态[1],但关系式(20)—(22)表明,大气系统最小熵产生态的动力学方程(3)—(5)应该为

$$\rho\frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t} = -\rho g\delta_{13} - \frac{\partial p}{\partial x_j}\delta_{ij} + f_{\mathrm{c}}\varepsilon_{ij3}\rho U_j;$$

$$\rho c_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = 0;\rho\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = 0. \tag{30}$$

方程组(30)表明,大气系统的最小熵产生态并不一定是定态.由于大气系统的动力过程仍可使体系处于非定态.只有当体系动力平衡(28)成立,且体系不存在任何平流过程 $U_j\frac{\partial}{\partial x_j} = 0$ 时,体系才达到定态,即$\frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} = 0$.这意味着,当一个动力平衡且无平流的系统达到热量输送平衡、水汽输送平衡和动量输送平衡时,一旦达到最小熵产生态,必处于一个定态.这时,我们的结论就同经典非平衡态热力学的结论完全一致,最小熵产生态就是定态.所以,以上结论应该是既适用于非平衡态线性区,也适用于非平衡态非线性区的更一般性的结论.

一个系统处于平衡态时,该系统处于无序的无组织结构的均匀状态,它是一种特殊的定态.非线性热力学耗散结构理论指出[12],如果一个系统偏离平衡态也可能达到定态,这种定态可能是非均匀的有组织结构的有序状态.特别是当系统远离平衡态时,系统可能在非线性动力过程中自组织成一种有序结构,即耗散结构.

根据以上分析,一个远离平衡态的大气系统达到某种定态,该系统必处于内部不可逆过程最弱的状态,即最小熵产生态.而且这种定态是一种有组织结构的有序状态.

4. 讨 论

1.熵平衡方程是非平衡态热力学的核心.大气热力学系统熵平衡方程必须引入动力过程,这样才能更好地描述该系统的不可逆过程和非线性动力过程.一个偏离平衡态的大气系统,如果达到热量输送平衡、动量输送平衡和水汽输送平衡,那么该系统必达到不可逆过程最弱的最小熵产生态.如果该系统又是无平流且是动力平衡的,则该最小熵产生态就是一个定态.这就是热力学线性区和非线性区普遍

适用的最小熵产生原理.

2. 最小熵产生原理表述了非平衡态的一种“惰性”行为:当边界条件阻止体系达到平衡态时,体系将选择一个最小耗散的态,而平衡态仅仅是它的一个特例,即熵产生为零或称零耗散的态.一个偏离平衡态的大气系统,特别是远离平衡态的非线性系统,最小熵产生态和定态一般对应着大气系统的某种有序结构.最小熵产生原理在热力学非线性区普遍适用的事实表明,非线性系统的有序结构是一个最小耗散的态.

3. 最小熵产生态的热力输送平衡、水汽输送平衡和动量输送平衡,实质上就是 Bertalanffy 开放系统和稳定状态原理所指的,开放系统全部能量输入率和全部能量输出率之间的平衡的稳定状态.

4. 这种有序结构形成的过程是该系统的非线性动力过程决定的.正如 Gell-Mann[13] 所指出的如何理解复杂性一样,“能量流经一个系统会使其有序性增加”,“只能利用宇宙的初始条件和动力学定律”才能理解复杂性系统的有序性.为了研究系统的有序结构形成机理,就必须研究这个系统能量流所控制的发展规律.这是下一篇论文“文(Ⅱ)”(文献[10])的任务.

[1] Li R S 1986 *Nonequilibrium States thermodynamics and Dissipates Structure* (Beijing:Qinghua University Press) chapter 1,3 (in Chinese) [李如生 1986 非平衡态热力学和耗散结构(北京:清华大学出版社)第一章 第三章]

[2] De Groot S R and Mazur P 1962 *Non-equilibrium Thermodynamics* (North-Holland:Publishing Company-Amsterdam) chapter 5

[3] Glansdorff P and Prigogine I 1971 *Thermodynamic theory of Structure, Stability and Fluctuations* (New York:WiLey-Interscience) chapter 3

[4] von Bertalanffy L 1950 *Sciences* **111** 23

[5] Prigogine I 1967 *Structure, Dissipation and Life Communication Presented at the first international conference* "*Theoretical physics and Biology*" (North-Holland:Publishing Company-Amsterdam)

[6] Nicolis C and Nicolis G 2001 *Physica* D **155** 184

[7] Nicolis C 1999 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **125** 1859

[8] Hu Y Q 2002 *Progress in Natural Science* **12** 180

[9] Hu Y Q 2002 *Progress in Natural Sciences* **12** 1086 (in Chinese) [胡隐樵 2002 自然科学进展 **12** 1086]

[10] Hu Y Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 67 (in Chinese) [胡隐樵 2003 物理学报 **52** 67]

[11] Hu Y Q 1999 *Plateau Meteorology* **18** 306 (in Chinese) [胡隐樵 1999 高原气象 **18** 306]

[12] Prigogine I 1978 *Science* **201** 777

[13] Gell-Mann M 1994 *The Quark and the Jaquar, Adventures in the Simple and the Complex* (New York:W. H Freeman and Company) chapter 15

Ordered structure and system development of the force dissipation system(Ⅰ), Principle of minimum entropy production and ordered structure*

Hu Yin-Qiao

(*Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute of Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*)

(*State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Beijing* 100029, *China*)

(Received 2 September 2002; revised manuscript received 18 November 2002)

Abstract

Development of a system is always driven by the thermodynamic irreversible process and also the nonlinear dynamics process. The entropy equilibrium equation, which combines the equation set of atmosphere dynamics and the Gibbs relation in which kinetic energy change is taken into account, can describe the thermodynamic irreversible process and the nonlinear dynamics process. Up to now, the principle of minimum entropy production has been demonstrated only using the Onsager linear phenomenological relation in the nonequilibrium state thermodynamics. This paper demonstrates the principle of minimum entropy production by using the new entropy equilibrium equation that is established with the atmosphere kinetic equation. As a result the principle of minimum entropy production is universal in the linear and nonlinear regions of thermodynamics. A system arrives at a state of minimum entropy production with the weakest irreversible process, when it is in heat transportation balance; vapor transportation balance and momentum transportation balance. This minimum-entropy-production state is a stationary state, when the system is also in dynamic equilibrium and with out advection. This stationary state corresponds to a certain ordered structure of the atmosphere system, when it deviates from the equilibrium state.

Keywords: nonlinear thermodynamics, entropy production, principle of least entropy production, ordered structure

PACC: 0570L, 4460, 0560, 8670G

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 49835010 and 40233035).