

一类大气非线性动力热力学反应-扩散系统解的稳定性态*

陈丽华^{1)†} 林万涛²⁾ 林一骅²⁾ 莫嘉琪³⁾

1) (福建师范大学福清分校数学与计算机科学系, 福清 350300)

2) (大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

3) (安徽师范大学数学系, 芜湖 241003)

(2011 年 10 月 16 日收到; 2011 年 12 月 1 日收到修改稿)

研究了一类大气非线性系统. 利用大气非线性热力动力学理论, 讨论了大气非线性强迫耗散系统的速度、温度和湿度所满足的非线性反应-扩散系统, 再利用微分方程 Lyapunov 稳定性理论, 得到了大气非线性反应-扩散系统在均匀定态解邻域内的微扰解. 最后由系统的控制参数的变化, 得到了大气非线性强迫耗散系统有关的物理量的有序-无序-有序状态的转化过程, 从而可以预报和预测相应的局部大气非线性强迫耗散系统的稳定性态.

关键词: 反应-扩散, 热力学, 大气非线性系统

PACS: 02.30.Jr

1 引言

大气非线性动力过程和非线性热力过程已经成为当代大气科学研究的最前沿领域^[1]. 目前, 对大气非线性热力学的研究, 主要是直接应用理论物理中非平衡态热力学的结论, 这一理论主要是实验室尺度讨论的物理和化学现象, 基本上未考虑大气系统的一系列重要物理特征^[2-5]. 而大气非线性热力动力系统是由空气微团形成的地球尺度宏观系统, 它的耗散过程是湍流黏性效应, 并且受重力场的地球转动 Coriolis 力等动力因子及热力层结构的热力因子所控制.

地-气或海-气相互作用等, 均涉及到非线性动力过程和非线性热力过程. 气象预报和预测问题,

就是一个大气系统的稳定性问题, 在一个时间段内, 所处的或观测到的相对稳定的大气状态就是非线性热力学所研究的热力学的一个有组织的有序结构. 气象预报和预测主要是关心一个有序结构状态转到失去稳定的状态从而又产生新的有序结构的状态, 这正是非线性热力学所研究的热力系统的稳定性问题, 包括大气系统的转型, 气候的突变和生态环境不可逆的荒漠化等. 所以说, 非线性热力动力学稳定性的分析方法为气候的预报和预测以及为天气或小气候的人工影响开辟了一种新思路和新方法.

非线性渐近理论和方法目前在学术界是一个十分热门的研究方面^[6-10], 许多学者做了大量工作^[11-16]. 我们也讨论了一类微分方程边值问题、反应扩散问题、奇摄动冲击层解、非线性孤波解

* 国家自然科学基金(批准号: 41175058, 11071205)、中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题项目(批准号: XDA01020304)、安徽高校省级自然科学研究项目(批准号: KJ2011A135)、江苏省自然科学基金(批准号: BK2011042)和福建省教育厅基金(A类)(批准号: JA10288)资助的课题.

† E-mail: clhfq@yahoo.com.cn

等^[11-18]. 本文是应用非线性热力动力学的分析方法, 来讨论一个大气强迫耗散下的反应-扩散系统解的某些定量、定性状态.

2 大气强迫耗散系统的反应-扩散方程

由大气动力学状态方程、连续性方程、动量守恒方程、温度平衡方程和水汽平衡方程等, 可以建立大气非线性强迫耗散系统的速度、温度和湿度系统. 这个系统可导出如下非线性反应-扩散系统的一般形式^[1]:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} K_1 \frac{\partial Y_1}{\partial x_j} + f_1(Y_1, Y_2, Y_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3), \quad (1)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial t} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} K_2 \frac{\partial Y_2}{\partial x_j} + f_2(Y_1, Y_2, Y_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3), \quad (2)$$

$$\frac{\partial Y_3}{\partial t} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} K_3 \frac{\partial Y_3}{\partial x_j} + f_3(Y_1, Y_2, Y_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3), \quad (3)$$

其中 $Y_i (i = 1, 2, 3)$ 分别表示大气风速、温度和湿度, 它描述了单位体积中第 i 组分的程度; K_i 是第 i 组分的程度 Y_i 的湍流输送系数, 本文为了简单起见, 设它们为常数, 故上述系统 (1)—(4) 各式的右端项第一项是湍流耗散项, 它表示湍流输送的过程; f_i 是描述单位体积第 i 组分的程度 Y_i 通过化学反应而产生或消耗所引起的总变化率, 它是表示体系中各组分程度的 $\{Y_i\}$ 及动力条件的控制参数 $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 的函数. $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 的值是反映体系所受到的控制的程度及描述体系偏离热力学平衡的程度. 因此 f_i 实际上就是反应-扩散过程的强迫源. 显然, 系统 (1) 是自治的系统. 我们假设:

$$(\mathbf{H}_1) \text{ 矩阵 } \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} \text{ 是满秩的.}$$

$$(\mathbf{H}_2) \lim_{\|x\| \rightarrow 0} \frac{\|f\|}{\|x\|} = 0, \text{ 其中 } x = (x_1, x_2, x_3), f = (f_1, f_2, f_3), \|x\| = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2}, \|f\| = (f_1^2 +$$

$$f_2^2 + f_3^2)^{1/2}.$$

首先考虑系统 (1)—(3) 的一组与空间变量无关的均匀定态解 (Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}) . 由 (1)—(3) 式知

$$f_1(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) = 0, \quad (4)$$

$$f_2(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) = 0, \quad (5)$$

$$f_3(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) = 0. \quad (6)$$

再由假设 $(\mathbf{H}_1)$, 系统 (4)—(6) 存在一组均匀定态解 (Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}) .

3 反应-扩散系统的微扰解

设系统 (1)—(3) 的一组关于定态解 (Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}) 的微扰解为

$$Y_i = Y_{i0} + \sum_{j=1}^{\infty} Y_{ij} \varepsilon^j, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

其中 ε 为小的人工正参数. 将 (7) 式代入 (1)—(3) 式, 按 ε 展开非线性项, 合并 ε 同次幂项, 并考虑到定态解 (Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}) 满足系统 (4)—(6), 则由 ε^1 的系数可得

$$\frac{\partial Y_{11}}{\partial t} = K_1 \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial^2 Y_{11}}{\partial x_j^2} + f_{1Y_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) Y_{j1} \right], \quad (8)$$

$$\frac{\partial Y_{21}}{\partial t} = K_2 \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial^2 Y_{21}}{\partial x_j^2} + f_{2Y_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) Y_{j2} \right], \quad (9)$$

$$\frac{\partial Y_{31}}{\partial t} = K_3 \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial^2 Y_{31}}{\partial x_j^2} + f_{3Y_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) Y_{j3} \right]. \quad (10)$$

为了求解线性微分系统的解, 设 $Y_{i1} (i = 1, 2, 3)$ 的 Fourier 变换为

$$\bar{Y}_{i1} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Y_{i1}(x_1, x_2, x_3) \times \exp[-i(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \lambda_3 x_3)], \\ dx_1 dx_2 dx_3, \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

将 (8)—(10) 各式两端进行 Fourier 变换, 由 Fourier 变换性质有

$$\frac{d\bar{Y}_{11}}{dt} = \sum_{j=1}^3 [-K_1 \lambda_j^2 \bar{Y}_{11}$$

$$\begin{aligned}
 & + f_{1Y_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) \bar{Y}_{j1}], \quad (12) \\
 \frac{d\bar{Y}_{21}}{dt} = & \sum_{j=1}^3 [-K_2 \lambda_j^2 \bar{Y}_{21} \\
 & + f_{2Y_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) \bar{Y}_{j2}], \quad (13) \\
 \frac{d\bar{Y}_{31}}{dt} = & \sum_{j=1}^3 [-K_3 \lambda_j^2 \bar{Y}_{31} \\
 & + f_{3Y_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3) \bar{Y}_{j3}]. \quad (14)
 \end{aligned}$$

线性微分系统 (12)—(14) 的特征方程为

$$\begin{vmatrix}
 (f_{1Y_1})_0 - K_1 \sum_{j=1}^3 \lambda_j^2 - \omega & (f_{1Y_2})_0 & (f_{1Y_3})_0 \\
 (f_{2Y_1})_0 & (f_{2Y_1})_0 - K_2 \sum_{j=1}^3 \lambda_j^2 - \omega & (f_{2Y_3})_0 \\
 (f_{3Y_1})_0 & (f_{3Y_2})_0 & (f_{3Y_3})_0 - K_3 \sum_{j=1}^3 \lambda_j^2 - \omega
 \end{vmatrix} = 0, \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned}
 (f_{iY_j})_0 &= f_{iY_j}(Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, \mu_1, \mu_2, \mu_3), \\
 i, j &= 1, 2, 3.
 \end{aligned}$$

因为特征方程 (15) 是未知数 ω 三次代数方程, 所以可以用初等方法来得到 (7) 式的三个特征根 $\omega = \omega_j(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3)$ ($j = 1, 2, 3$), 其特征根的

结构在此从略. 与此同时, 我们便能得到线性微分系统 (12)—(14) 的三个特解 $(\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3)$ 为

$$\begin{aligned}
 & \bar{y}_i(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, t) \\
 &= C_{ij} \exp[\omega_j(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3)t], \\
 & i, j = 1, 2, 3, \quad (16)
 \end{aligned}$$

其中 C_{1j}, C_{2j}, C_{3j} ($j = 1, 2, 3$) 为相互关联的常数:

$$\begin{aligned}
 C_{2j} &= - \frac{\begin{vmatrix} (f_{2Y_1})_0 & (f_{2Y_3})_0 \\ (f_{3Y_1})_0 & \omega_j + K_3 \sum_{k=1}^3 \lambda_k^2 + (f_{2Y_1})_0 \end{vmatrix}}{\Delta_j} C_{1j}, \\
 C_{3j} &= - \frac{\begin{vmatrix} \omega_j + K_3 \sum_{k=1}^3 \lambda_k^2 + (f_{2Y_1})_0 & (f_{2Y_1})_0 \\ (f_{3Y_1})_0 & (f_{3Y_3})_0 \end{vmatrix}}{\Delta_j} C_{1j}, \quad (17)
 \end{aligned}$$

其中

$$\Delta_j = \begin{vmatrix} \omega_j + K_3 \sum_{k=1}^3 \lambda_k^2 + (f_{2Y_1})_0 & (f_{2Y_3})_0 \\ (f_{3Y_1})_0 & \omega_j + K_3 \sum_{k=1}^3 \lambda_k^2 + (f_{2Y_1})_0 \end{vmatrix}.$$

因此线性微分系统 (12)—(14) 的一组通解 $(\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3)$ 为

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_i &= \sum_{j=1}^3 C_{ij} \\
 & \times \exp[\omega_j(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3)t], \quad (18)
 \end{aligned}$$

其中 C_{1j} 为任意常数, 而 C_{2j}, C_{3j} 由 (17) 式表示.

再由 (18) 式求出对应函数的 Fourier 逆

变换, 得到线性微分系统 (12)—(14) 的一组通解 (Y_1, Y_2, Y_3) :

$$\begin{aligned}
 & Y_i(x_1, x_2, x_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \sum_{j=1}^3 C_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \\
 & \times \exp \left[\omega_j(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3)t \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k=1}^3 \lambda_k x_k \Big] d\lambda_1 d\lambda_2 d\lambda_3, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

于是, 利用微分系统 Lyapunov 稳定性理论, 在假设 (H_1) , (H_2) 下, 大气非线性强迫耗散反应-扩散系统 (1)–(3) 在均匀定态解 (Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}) 邻域内的一组微扰解 $(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \tilde{Y}_3)$ 的大气流速 $\tilde{Y}_1$, 温度 $\tilde{Y}_2$, 湿度 $\tilde{Y}_3$ 为

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_i(x_1, x_2, x_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3) \\ = Y_{i0} + \frac{\varepsilon}{(2\pi)^3} \sum_{j=1}^3 C_{ij} \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \\ \times \exp \left[\omega_j(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3)t \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^3 \lambda_k x_k \right] d\lambda_1 d\lambda_2 d\lambda_3 \\ + O(\varepsilon^2), \quad i, j = 1, 2, 3, 0 < \varepsilon \ll 1. \quad (19) \end{aligned}$$

4 微扰解的稳定性态的讨论

我们知道, 大气动力学描述了一类反应-扩散系统, 它是一类抛物型方程. 由偏微分方程理论, 抛物型方程在一定的条件下存在极值原理和相应的初始、边界条件下存在惟一的稳定解. 此外, 具有非线性强迫耗散系统的广义能量存在极值解的条件是动力平衡条件, 它是 Newton 力和湍流黏性力及动量平流输送相平衡; 热力平衡条件, 它是水汽相变潜热释放及辐射加热, 即非绝热加热和湍流热输送及平流输送相平衡以及水汽平衡条件, 它是水汽相变造成的水汽增加或损耗和湍流黏性水汽及平流水汽输送相平衡. 因此相空间在上述平衡的条件下, 广义能量在恒定能量曲面内的子空间内存在惟一的极小值; 而在恒定的能量曲面外的子空间内存在惟一的极大值. 这些极值状况的判定就是微分方程解的稳定性问题. 它是预报和预测大气系统状况的关键.

由微分系统 Lyapunov 稳定性理论, 大气非线性强迫耗散反应-扩散系统 (1)–(3) 解的稳定性态可用近似方法来实现. 因此, 由上节得到的反应-扩散系统 (1)–(3) 的微扰解 (19) 就显得十分重要.

由于大气强迫耗散反应-扩散系统 (1)–(3) 的强迫耗散项具有控制参数 $\mu_i (i = 1, 2, 3)$, 再由反应-扩散系统解对参数的连续依赖性, 所以控制参数 $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 的变化, 由开始的均匀定态解 (Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}) 的稳定状态连续地变化到某一临界值 μ_i^c 后, 由 (19) 决定的微扰解趋于无穷, 再根据微分方程稳定性理论, 这时大气非线性强迫耗散反应-扩散系统 (1)–(3) 在定态解临近的微扰解就由有序的稳定态转化到渐近不稳定解. 并且根据控制参数 $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 的不同变化状态趋于临界值 μ_i^c , 而会使不稳定解出现各种不同无序的性状, 甚至会出现分叉、混沌等复杂的现象. 又因为大气非线性强迫耗散系统在变化的过程中, 系统的潜能将不断地释放出来, 以致系统解又返回渐近稳定态.

因为可以通过微扰解的控制参数的变化, 使定态解邻近区域内的微扰解从有序到无序再返回有序的过程, 这给我们研究大气非线性强迫耗散系统提供了研究途径, 从而能较准确地预报和预测局部大气非线性系统的规律, 使人们及早知晓大气灾害的发生, 并能及时地采取有效措施, 减少灾害带来的损失. 进而期望能把产生灾害的局部大气非线性系统的潜能转化为有利于人类经济建设的新能源.

5 结 论

1) 大气非线性强迫耗散系统描述的是一个复杂的自然现象的局部系统, 它普遍地发生在世界局部时间段和局部区域. 例如海-气振子在赤道太平洋区域内所引发的厄尔尼诺事件, 在东太平洋和西大西洋区域内所引发的飓风、龙卷风, 在西太平洋区域内所引发的台风以及地-气振子在我国西北部和西南部地区等所引发的沙尘暴和不同程度的水、旱灾. 这些现象的发生严重地影响人类的生命和造成经济上的巨大损失. 因此, 大气非线性强迫耗散系统的发生过程是当今学术界重点关注的对象.

2) 利用大气非线性热力动力学理论研究大气非线性强迫耗散系统是一种有效的方法, 它有效地克服了过去利用单纯的实验室数据模拟研究带来的不足.

3) 大气非线性热力动力学理论与非线性微分方程稳定性理论密切相关, 它可以将大气非线性强

迫耗散系统转化为相应的反应-扩散系统来研究.

4) 由微分系统 Lyapounov 理论, 在一定的条件下, 对大气非线性反应-扩散系统的求解, 可以用近似的方法来得到. 本文就是利用这样的途径来得到相应系统在定态解附近的微扰解, 然后利用系统的控制参数来决定其临界状态, 最后得到系统由有序

的渐近稳定状态转化到无序的不稳定状态, 最后再转到有序的稳定状态.

5) 通过对系统的有序-无序-有序的转化过程的研究, 可对大气非线性强迫耗散系统的各关节点进行预报和预测大气相关的物理量的定量、定性状态. 这就是目前我们的研究目标.

-
- [1] Hu Y Q 2002 *Introductory to Atmospheric Thermodynamics and Dynamics —Linear and Nonlinear Thermodynamics of the Atmospheric Non-equilibrium State* (Beijing: Geology Publication) (in Chinese) [胡隐樵 2002 大气热力动力学导论 —— 大气非平衡态线性和非线性热力学 (北京: 地质出版社)]
 - [2] De Groot S K, Mazur P 1962 *Non-equilibrium Thermodynamics* (Amsterdam: North-Holland Pub. Co.)
 - [3] Prigogine I 1967 *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes* (New York: Interscience Pub.)
 - [4] Shutts G J 1981 *Quart. J. R. Met. So.* **107** 503
 - [5] Mhrt L 1986 *J. Atmos. Sci.* **43** 1036
 - [6] de Jager E M, Jiang F R 1996 *The Theory of Singular Perturbation* (Amsterdam: North-Holland Publishing Co.)
 - [7] Barbu L, Morosanu G 2007 *Singularly Perturbed Boundary-Value Problems* (Basel: Birkhauser Verlag AG)
 - [8] Ramos M 2009 *J. Math. Anal. Appl.* **352** 246
 - [9] D'Aprile T, Pistoia A 2010 *J. Differ. Eqs.* **248** 556
 - [10] Faye L, Frenod E, Seck D 2011 *Discrete Contin. Dyn. Syst.* **29** 1001
 - [11] Mo J Q 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 010204
 - [12] Mo J Q 2009 *Science in China Ser. G* **39** 568
 - [13] Mo J Q, Lin Y H, Lin W T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6701 (in Chinese) [莫嘉琪, 林一骅, 林万涛 2010 物理学报 **59** 6701]
 - [14] Mo J Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 090203 (in Chinese) [莫嘉琪 2011 物理学报 **60** 090203]
 - [15] Mo J Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020202 (in Chinese) [莫嘉琪 2011 物理学报 **60** 020202]
 - [16] Mo J Q 2010 *Commun. Theor. Phys.* **53** 440
 - [17] Mo J Q, Lin Y H, Lin W T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030202
 - [18] Mo J Q, Lin W T, Lin Y H 2011 *Chin. Phys B* **20** 070205

Stable behavior of solution for the reaction-diffusion system of atmospheric nonlinear dynamics and thermodynamics*

Chen Li-Hua^{1)†} Lin Wan-Tao²⁾ Lin Yi-Hua²⁾ Mo Jia-Qi³⁾

1) (*Department of Mathematics and Computer Science, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300, China*)

2) (*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamic,*

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

3) (*Department of Mathematics, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China*)

(Received 16 October 2011; revised manuscript received 1 December 2011)

Abstract

A class of nonlinear system is studied. Firstly, the reaction-diffusion system with speed, temperature and humidity for a atmospheric nonlinear force dissipative system is discussed using the atmospheric nonlinear theory of thermodynamics and dynamics. Secondly, the small disturbed solution of atmospheric nonlinear reaction-diffusion system in the neighborhood of homogeneous steady state solution is obtained from the Lyapunov stability theory. Finally, from the variations of the control parameters for transgenic processes, the states of ordered-unordered-ordered processes of atmospheric nonlinear reaction-diffusion system are found. Thus the corresponding local atmospheric nonlinear force dissipative system can be predicated and calculated.

Keywords: reaction-diffusion, thermodynamics, atmospheric nonlinear system

PACS: 02.30.Jr

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175058, 11071205), the “Strategic Priority Research Program-Climatic Change: Carbon Budget and Relevant Issues” of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA01020304), the Natural Science Foundation from the Education Bureau of Anhui Province, China (Grant No. KJ2011A135), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2011042) and the Foundation of the Education Department of Fujian Province, China (Grant No. JA10288).

† E-mail: clhfq@yahoo.com.cn