

# 中高能质子入射碎片质量分布研究\*

肖玉衡<sup>1</sup> 樊胜<sup>2;1)</sup>

1 (湖南益阳师范高等专科学校物理系 湖南益阳 413049)

2 (中国原子能科学研究所 北京 102413)

**摘要** 中高能质子轰击靶的碎片的质量分布是了解散裂中子靶的放射性累积和对靶材料性能的影响的一个重要方面. 利用在级联-激子模型(CEM)的基础上发展起来的“多步动力学”模型(MSDM, Many Stage Dynamical Model)分别研究了入射质子能量为 334, 572, 775, 1200, 1500 和 2600 MeV 轰击 Nb 靶, 329, 555, 760, 1200, 1500 和 2600 MeV 轰击 <sup>197</sup>Au 靶, 160, 230, 271, 322, 533, 660, 759, 1400, 1600 和 2600 MeV 轰击 Pb 靶引起的碎片的质量分布, 并和实验测量数据进行了比较.

**关键词** 碎片 质量分布 “多步动力学”模型(MSDM)

## 1 引言

近年来, 利用中能质子加速器轰击重靶产生的散裂中子驱动次临界反应堆的洁净核能系统(ADS)是国际上的一个热点<sup>[1]</sup>. 该系统的一个重要环节是中能质子轰击铅(铋)或钨靶的散裂中子源. 在该能区既有多粒子发射反应, 又有铅(铋)或钨等核的多重碎裂和裂变反应. 散裂靶的辐照环境非常特殊, 辐射强度很大, 单上中子注量率就达到  $10^{15}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$  以上, 其中包含了 20 MeV 以上的中能中子的辐射. 其次, 放射性同位素的种类与靶基体元素关系很大, 因而与通常反应堆中的情况很不一样, 碎片对放射性有重要贡献, 特别是放射性氦, 可以占到整个活度的百分之几十, 但目前对碎片的考虑还很粗略. 同时, 靶内产生  $\alpha, \text{T}$  等粒子, 以及在靶内产生以气体形式存在的碎片, 如: <sup>35</sup>Cl, <sup>39</sup>Ar, <sup>83</sup>Rb 等. 这些碎片将引起靶材性能的变化, 如惰性气体产物引起的靶材的脆变. 为了了解靶的放射性累计和产物对靶材料性能的影响, 对中能质子入射引起核反应的碎片质量分布的研究是重要的.

碎片的实验数据较为丰富. 德国的 R. Michel 领导的国际合作组几十年来, 一直注重对中能质子与核碰撞引起核反应的剩余核和碎片的测量工作<sup>[2,3]</sup>. 近几年来, 受加速器驱动洁净核能系统研究需要, 该合作组的人员和测量范围都迅速地扩大. 他们选择了 40 余种具有代表性的靶, 利用 CERN/Geneve, IPN/Orsay, KFA/Julich, LANL/Los Alamos, LNS/Saclay,

2002-01-06 收稿, 2002-03-21 收修改稿

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022600)资助

1) 负责作者: 北京 275 信箱 41 分箱, 102413; 电话: 010-69357670; E-mail: sfan@iris.ciae.ac.cn

PSI/Viligen, TSL/Uppsala 和 LUC/Louvain 等的试验条件, 质子入射能量从 45MeV 到 2.6GeV, 测量了各种碎片的产额, 已获得了近 15000 个数据点<sup>[2,3]</sup>. 这些数据对改善散裂靶的模拟计算非常重要, 但目前测量一般采用辐照后离线测  $\gamma$  谱或 AMS 的办法, 只能得到产额, 无法得到碎片的能量.

近年来, 已发展了十余种模型和程序来模拟计算散裂靶问题. 大多数程序采用高能输运程序 (HETC<sup>[4]</sup>) 和某一中子输运程序联接在一起使用. 它采用 Bertini 的核子-核子级联碰撞模型, 跟随预平衡发射和 Rutherford-Appleton 的实验室蒸发与裂变模型, 采用 Gilbert-Cameron-Cook-Ignatyuk 模型给出了能级密度. 由于没有考虑碎裂机制, 因此不能处理碎片问题. 近年来, 人们正在努力改进模型和程序来处理碎片问题, 如: HETC/KFA2<sup>[5]</sup> 等, 但现在还远不算成功, 计算结果与实验数据往往差很多倍.

樊胜等利用量子分子动力学 (QMD) 加上裂变 (FISSION) 模型处理碎片问题, 得到了较为理想的结果<sup>[6,7]</sup>. 但 QMD 计算量大, 且 FISSION 模型基本上是一个半经验的方法. 俄罗斯科学院核研究所以及 Dubna 联合核子研究所发展 MSDM (many Stage Dynamical Model) 模型<sup>[8]</sup>. 程序可以处理 100GeV 以下的核子、 $\pi$  介子、K 介子、反核子、 $\mu$  子等的产生和输运以及这些粒子的二体和三体衰变. 该程序在研究散裂碎片方面也有其特点, 我们在该程序中改进了相关的理论后<sup>[9]</sup>, 计算的散裂碎片质量分布能很好地再现实验测量结果. 在该工作中, 利用 MSDM 程序分别研究了入射质子能量为 334, 572, 775, 1200, 1500 和 2600MeV 轰击 Nb 靶, 329, 555, 760, 1200, 1500 和 2600MeV 轰击 <sup>197</sup>Au 靶, 160, 230, 271, 322, 533, 660, 759, 1400, 1600 和 2600MeV 轰击 Pb 靶引起的碎片的质量分布, 并和实验测量数据进行了比较.

## 2 MSDM 程序系统<sup>[8]</sup>及改进

MSDM 可以用来模拟核子、 $\pi$  介子、K 介子、反核子、 $\mu$  子等在介质中传输, 它考虑了带电粒子的电离能损以及  $\pi$  介子和 K 介子的二体和三体衰变.

MSDM 程序的强子-核作用的过程分成核内的碰撞快过程, 预平衡发射和平衡态的退激发<sup>[9]</sup>. 在本工作所关心的能量范围 (入射质子的能量小于 3GeV), 核内快过程用的是杜布纳的级联模型. 模型假定核内快过程可等效于若干个强子-核子碰撞的子过程, 所用截面为自由强子-核子碰撞截面. 预平衡发射假定快过程产生的粒子会以质子、中子、复合粒子等形式发射, 以使体系达到平衡. 对于已达平衡的剩余核的退激发, 包括几个模型: 对  $A < 16$  的核, 用的是费米碎裂模型; 对于中等质量及重核, 若每核子激发能大于 2MeV, 则采用统计多重碎裂模型. 每核子激发能小于 2MeV 时, 则多重碎裂模型可以简化为重核的“蒸发”与裂变机制的竞争.

产生出来的次级粒子 (包括蒸发出来的中子) 继续在介质中传输, 可能再次与核作用, 或衰变产生光子、正负电子、中微子等. 对低能中子的 ( $E < 14.5$ MeV) 传输, MSDM 程序还做了一个较细致的处理, 即基于 BNAB 的 26 群中子的数据库, 它考虑了中子与核中的核子的弹性散射 ( $n, n$ ), 非弹性散射 ( $n, n'$ ), 中子被原子核的吸收 ( $n, a$ ), 中子的倍增 ( $n, 2n$ ) 以及中子引起的原子裂变. 该程序设计非常全面, 用于计算的能区广泛, 原则上可以计算碎裂反应中的各种物理过程.

在理论模型的蒙特-卡罗(M-C)模拟过程中,裂变截面定义如下<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_f = \sigma_{in} \frac{N_f}{N_{in}} = \sigma_{geom} \frac{N_f}{N_t}, \quad (1)$$

其中  $N_f$  是裂变事件数目,  $N_t = N_{in} + N_{el}$ , 总的事件数目等于弹性和非弹反应数目的和,  $\sigma_{geom}$  是反应的几何截面. 对于低几率裂变核素(如 Au)  $N_f \ll N_t$ , 为了满足 M-C 计算裂变截面的统计精度, 考虑的总的级联事件数目要足够多.

在 MSDM 中考虑上面的裂变截面的直接 M-C 计算外, 采用 CEM95 模型<sup>[10]</sup> 中统计函数  $W_n = \prod_{i=1}^n W_{n_i}$ , 和  $W_f = 1 - W_n$  来计算裂变截面. 其中  $W_n$  是核通过  $N$  次连续蒸发粒子退激发到具有激发能  $E^*$  的余核的几率,  $W_f$  是在这  $N$  次过程中某一核的裂变几率,  $W_{n_i} = 1 - W_{f_i}$  是在这  $N$  次级联蒸发粒子的过程中第  $i$  个过程的粒子发射几率,  $W_{f_i}$  对应相应的裂变几率, 利用统计方法计算得到. 则退激发过程中的裂变截面考虑为

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{in}}{N_{in}} \sum_{i=1}^{N_{in}} (W_{f_i})_i. \quad (2)$$

同时把 CEM95 模型<sup>[10]</sup> 中对次级粒子发射相关的对修正效应、预平衡发射态和蒸发态的角动量、复合核和预平衡态核的转动动能等因素以及具有激发能的余核的裂变在 MSDM 程序中加以考虑, 采用 Ignatyuk 能级密度公式和相关参数改进 MSDM 程序中原来的 CEM 模型<sup>[11]</sup>. 复合核(c)、剩余核(j)和裂变核鞍点态(f)对能修正效应考虑为<sup>[12]</sup>

$\Delta_c = \chi_c \cdot 12 / \sqrt{A_c} (\text{MeV})$ ,  $\Delta_j = \chi_j \cdot 12 / \sqrt{A_j} (\text{MeV})$ ,  $\Delta_f = \chi_c \cdot 14 / \sqrt{A_c} (\text{MeV})$ , (3)  
其中  $A_j = A_c - A_1$ ,  $A_c$  和  $A_1$  分别是复合核(c)和剩余核(j)的质量数, 对于奇-奇、奇-偶核以及偶-偶核,  $\chi_k$  的值分别为 0, 1 和 2.

对能级密度壳效应的考虑, 在 MSDM 中, 为了简化计算, 能级密度参数简单取为  $a = 0.125A$ , 在本工作中, 能级密度参数考虑为<sup>[13]</sup>

$$a(Z, N, E^*) = \bar{a} \left\{ 1 + \delta W_{\sigma}(Z, N) \frac{f(E^* - \Delta)}{E^* - \Delta} \right\}, \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \alpha A + \beta A^{2/3} B_s, \quad f(E^*) = 1 - \exp(-\gamma E^*), \\ \alpha &= 0.072 \quad \beta = 0.257 \quad \gamma = 0.052 \text{MeV}^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

以上公式的参数取自文献[12]和[13].

在 MSDM 中, 碎片的累积没有考虑, 为了计算碎片累积, 碎片( $A, Z$ )累积为

$$\sigma^{cum}(A, Z) = \sigma^i(A, Z) + \sum_{(A', Z')} b(A', Z' \rightarrow A, Z) \sigma^i(A', Z'), \quad (6)$$

其中  $b(A', Z' \rightarrow A, Z)$  是由核( $A', Z'$ )衰变到核( $A, Z$ )的份额. 定义碎片( $A_n, Z_n$ )是由核( $A_1, Z_1$ )衰变而来,

$$(A_1, Z_1) \rightarrow (A_2, Z_2) \rightarrow \dots \rightarrow (A_n, Z_n),$$

考虑到第  $j$  个核的衰变常数  $\lambda_j \gg \lambda_n$ , 则碎片( $A_n, Z_n$ )的累积为

$$\sigma_n^{cum}(A_n, Z_n) = \sigma_n^i(A_n, Z_n) + \frac{\lambda_{n-1}}{(\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \sum_j \sigma_j^i(A_j, Z_j) r_j,$$

其中  $r_j$  是由核  $(A_j, Z_j)$  衰变到核  $(A_n, Z_n)$  的份额.

### 3 计算结果和分析

MSDM 给出的碎片分布是一个质子入射引起散裂靶碎片出现的事例数目,任意碎片  $i(A_i, Z_i)$  出现的事例数是  $N_i$ ,总的入射质子数目是  $N$ ,入射质子引起核反应的去弹截面为  $\sigma_R$ ,则碎片  $i$  的形成截面定义为

$$\sigma_i(A_i, Z_i) = \sigma_R \frac{N_i}{N}. \quad (9)$$

图 1 给出了利用 MSDM 分别计算的 334, 572, 775, 1200, 1500 和 2600 MeV 的质子入射 Nb 薄靶的碎片质量分布和实验测量数据<sup>[2]</sup>的比较. 图 2 是利用 MSDM 分别计算的 329, 555, 760, 1200, 1500 和 2600 MeV 的质子入射<sup>197</sup>Au 薄靶的碎片质量分布和实验测量数据<sup>[2]</sup>的比较. 图 3 给出了利用 MSDM 分别计算的 160, 230, 271, 322, 533, 660, 759, 1400, 1600 和 2600 MeV 的质子入射 Pb 薄靶的碎片质量分布和实验测量数据<sup>[2,3,14,15]</sup>的比较.

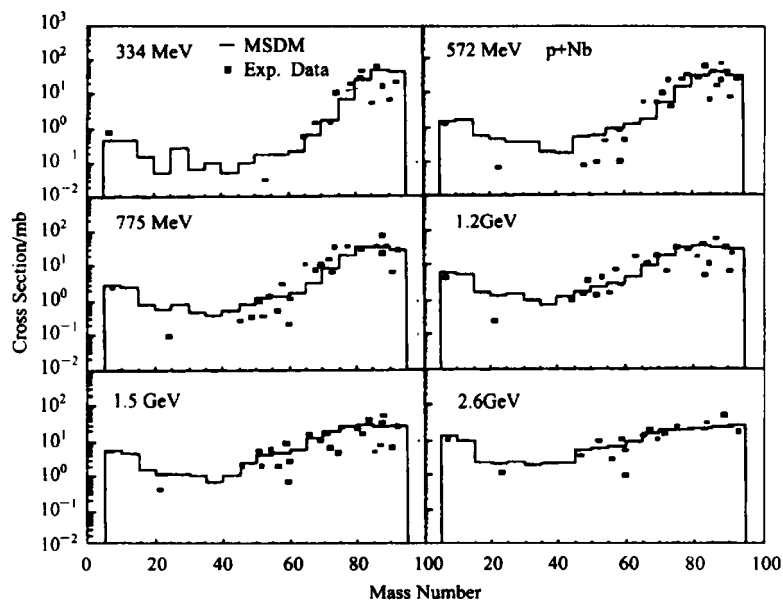


图 1 利用 MSDM 分别计算的 334, 572, 775, 1200, 1500 和 2600 MeV 的质子入射 Nb 靶的碎片质量分布和实验测量数据的比较

M. Gloris 和 R. Michel 等<sup>[2,3,14,15]</sup>的实验测量数据是在加速器上,利用  $\gamma$  射线、X 射线质谱仪的方法测量靶核中剩余产物的质量和电荷分布以及碎片质量分布.

从图 2 和图 3 中高能质子入射<sup>197</sup>Au 和铅薄靶实验测量数据和理论计算结果可以发现,中、高能质子轰击靶,碎片质量分布的形成截面很明显地分为两个部分,在图中为各自相互独立的两个高斯分布,这在入射质子能量低于 700 MeV 时特别显著,随着入射质子能量的增加,这两个峰的区别不再特别明显,主要是碎片质量数  $A$  在 90—150 之间的碎片增加.靠近右边的一个高斯峰,峰的位置接近于靶核的质量数( $A$ ),很明显,这个峰是散裂产

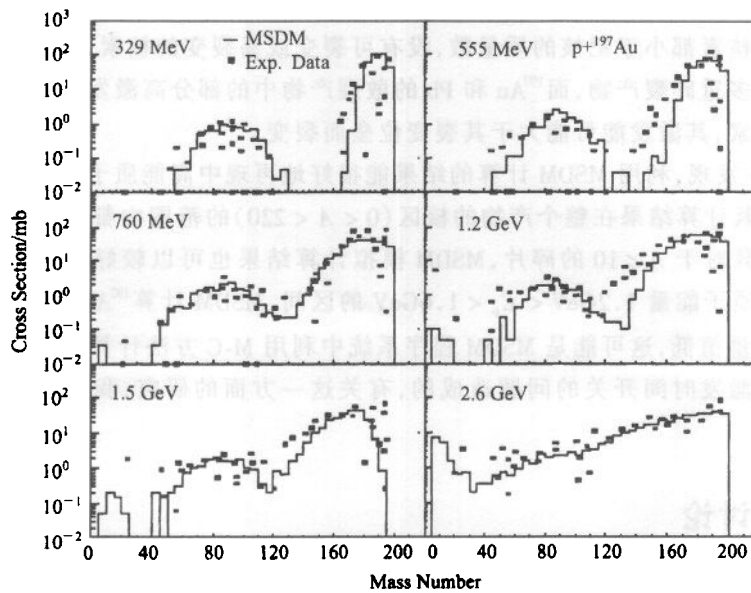


图 2 利用 MSDM 分别计算的 329,555,760,1200,1500 和 2600MeV 的质子入射<sup>197</sup>Au 靶的碎片质量分布和实验测量数据的比较

物的分布. 随着入射质子能量的增加,峰的位置逐渐向左移动,分布的宽度逐渐展宽,峰的高度也逐渐减小. 这是因为,随着入射质子能量的增加,反应更剧烈敲出的核子数目增多,相应的远离靶核质量数目的余核增多.

在靶核的质量数一半 ( $A/2$ ) 的地方出现另一个高斯分布. 很明显,这个峰是一个裂变峰. 这个峰的出现可能是仍然具有较高激发能的散裂余核通过裂变的方式,或者是较高能量的质子入射的深度散裂反应所形成的碎块. 峰的宽度随入射质子能量的增加相对展宽,但峰的位置基本上保持不变,截面大约为几个 mb 的量级. 图 3 中短线是没有改进的 MSDM 计算的 322MeV 质子入射的碎片分布,在裂变部分,计算结果只有测量值的 30%,很明显,改进后的 MSDM 计算结果比改进前的好得多.

我们以前的研究<sup>[16,17]</sup>表明,多重碎裂反应在裂变产物分布中的贡献是很小的,认为部分仍具有较高激发能的余核通过裂

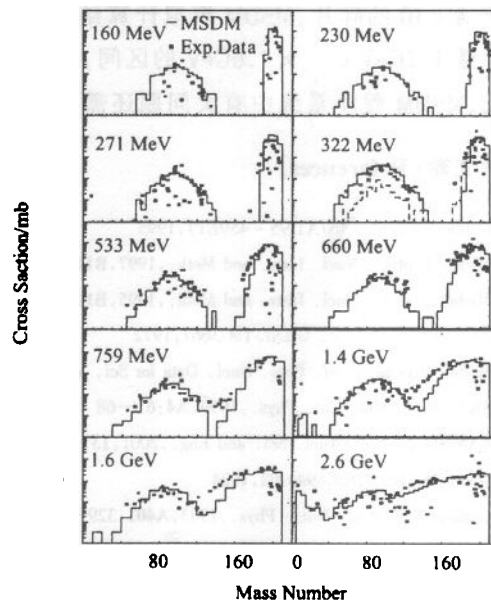


图 3 利用 MSDM 分别计算的 160,230,271,322,533,660,759,1400,1600 和 2600MeV 的质子入射 Pb 靶的碎片质量分布和实验测量数据的比较

变退激而形成裂变峰是主要的。这在图 1 中很明显。图 1 中由于 Nb 的质量数很小,因此散裂产物中的核素都小于靶核的质量数,没有可裂变或易裂变的核素,其碎片分布主要是散裂产物以及多重碎裂产物,而<sup>197</sup>Au 和 Pb 的散裂产物中的部分高激发能余核是可裂变以及易裂变的核素,其激发能可能大于其裂变位垒而裂变。

从图 1—3 发现,利用 MSDM 计算的结果能很好地再现中高能质子入射碎片的质量分布的两个峰。其计算结果在整个产物的核区( $0 < A < 220$ )的范围内都能较好地再现实验测量数据。尤其对于  $A < 10$  的碎片,MSDM 模拟计算结果也可以较好地再现实验测量结果。但在入射质子能量  $1.2\text{GeV} < E_p < 1.6\text{GeV}$  的区间,MSDM 计算<sup>197</sup>Au 和 Pb 的碎片分布结果比实验测量值低,这可能是 MSDM 程序系统中利用 M-C 方法计算由粒子的预平衡发射到平衡态退激发时间开关的问题造成的,有关这一方面的研究,我们目前正在研究之中。

## 4 结果和讨论

在级联-激子模型(CEM)的基础上利用多步动力学过程(MSDM)分别研究了入射质子能量为 334, 572, 775, 1200, 1500 和 2600MeV 轰击 Nb 薄靶, 329, 555, 760, 1200, 1500 和 2600MeV 轰击<sup>197</sup>Au 薄靶, 160, 230, 271, 322, 533, 660, 759, 1400, 1600 和 2600MeV 轰击 Pb 薄靶引起的碎片的质量分布,并和实验测量数据进行了比较。

利用 MSDM 计算的结果能很好地再现中高能质子入射碎片的质量分布的两个峰。其计算结果在整个产物的核区( $0 < A < 220$ )的范围内都能较好地再现实验测量数据。尤其对于  $A < 10$  的碎片,MSDM 模拟计算结果也可以较好地再现实验测量结果。但在入射质子能量  $1.2\text{GeV} < E_p < 1.6\text{GeV}$  的区间,MSDM 计算<sup>197</sup>Au 和 Pb 的碎片分布结果比实验测量值低,MSDM 程序系统中有关问题还需要改进。

## 参考文献 (References)

- 1 Rubbia et al. CERN/AT/95 - 459ET), 1995
- 2 Michel R et al. Nucl. Instr. and Meth., 1997, **B129**:153—193
- 3 Michel R et al. Nucl. Instr. and Meth., 1995, **B103**:183—222
- 4 Armstrong T W et al. ORNL-TM-3667, 1972
- 5 Michel R et al. Conf. Proc. Nucl. Data for Sci. and Tech., SIF Bologna, Italy, 1997, **59**:1458—1462
- 6 FAN Sheng et al. Eur. Phys., 1999, **A4**:61—68
- 7 FAN Sheng et al. Nucl. Sci. and Eng., 2001, **137**:89—95
- 8 Blann M. NSC/DOC(94)-02, 1994
- 9 Gudima K K et al. Nucl. Phys., 1983, **A401**:329—361
- 10 Mashnik A G et al. Cascade-Exciton Model Developed Analysis of Proton Sapllation at Energies from 10MeV to 5GeV, Report LANL, 1998
- 11 FAN Sheng. The Report for Post-doctor of Peking University, Beijing, 2000
- 12 Cameron A G. Can. J. Phys., 1957, **35**:1021
- 13 Ignatyuk A V et al. Sov. J. Nucl. Phys., 1975, **21**:255
- 14 Gloris M et al. Nucl. Instr. and Meth., 2001, **A463**:593—633

- 15 Alexandrov Y V et al. Conf. Proc. Nucl. Data for Sci. and Tech., SIF, Bologna, Italy, 1997, 59:1525—1527
- 16 FAN Sheng. The Ph. D. Thesis of China Institute of Atomic Energy. Beijing, 1998, 12(in Chinese)  
(樊胜. 中国原子能科学研究院博士论文. 北京, 1998, 12)
- 17 FAN Sheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24:(9)845—851(in Chinese)  
(樊胜等. 高能物理与核物理, 2000, 24(9):845—851)

## Analysis for Mass Distribution of Proton-Induced Reactions in Intermediate Energy Range

XIAO Yu-Heng<sup>1</sup> FAN Sheng<sup>2;1)</sup>

1 (Hu'nan City University, Hu'nan Yiyang 413049, China)

2 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** The mass and charge distribution of residual products produced in the spallation reactions needs to be studied, because it can provide useful information for the disposal of nuclear waste and residual radioactivity generated by the spallation neutron target system. In present work, the Many Stage Dynamical Model(MSDM) is based on the Cascade-Exciton Model (CEM) We use it to investigate the mass distribution of Nb, Au and Pb proton-induced reactions in energy range from 100 MeV to 3 GeV. The agreement between the MSDM simulations and the measured data is good in this energy range, and deviations mainly show up in the mass range of 90—150 for the high energy proton incident upon Au and Pb.

**Key words** fragment, mass distribution, many stage dynamical model(MSDM)

---

Received 6 January 2002, Revised 21 March 2002

\* Supported by Major State Basic Research Development Program(G1999022600)

1) Corresponding author: P. O. Box 275(41), Beijing 102413; Tel: + 10 69357670; E-mail: sfan@iris.ciac.ac.cn