

文章编号: 1007-4627(2002)04-0425-06

中高能核数据评价和建库国际概况*

庄友祥, 王记民

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 简要介绍了中高能核数据评价和建库的国际概况, 较细致地讨论了中高能核反应实验测量、理论计算、积分检验、评价和建库等, 并对我国今后中高能核数据工作提出了建议。

关键词: 核反应; 核数据; 中高能; 评价; 建数据库

中图分类号: O571.53 **文献标识码:** A

1 引言

早在 20 世纪 80 年代, 美国国家核数据中心主任 Dr. Perlstein^[1] 就提出了做中高能核数据库的必要性, 并进行了系统学研究. 1991 年 ENDF/B-6 中就有了 $n + {}^{12}\text{C}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{209}\text{Bi}$ 等靶核直到 GeV 的中高能核数据. 近几年以来, 由于加速器各种应用的需要, 特别是加速器驱动嬗变系统(ADS), 还有先进的粒子束治癌、材料科学、核天体以及空间科学研究(例如, 单粒子效应)等^[2], 中高能核数据有了新的发展. 在这些中高能应用中, 在 ADS 研究中需要的数据大部分是质子和中子数据, 此外中高能重离子核数据逐渐增加, 应用需求已经显露. 值得注意的是, 入射粒子能量的“中高能”标准是大于等于 20 MeV/u, 它相应于现在的裂变堆和聚变堆数据的上限. 在中高能范围需要的主要核数据如下例所示^[3]:

(1) 有关粒子输运计算的截面, 如全截面、弹性散射截面、双微分粒子产生截面; (2) 剂量和活化用的同位素产生截面; (3) 材料损伤评估用的气体产生截面.

核数据评价工作通常基于实验测量和理论计算. 然而, 不仅中子的中高能实验数据稀少, 而且质子的中高能数据也没有进行过足够的系统性实验测量. 因此, 核理论模型计算和改进在建立中高能核数据库中起着重要的作用, 当然计算结果的优劣还要用实验测量作判据.

2 中高能核反应

2.1 实验测量进展

(1) 中高能区实验数据近几年急剧增长, 其中, $n + {}^{233, 235, 238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{239}\text{Pu}$, Pb, Bi, Cu, Fe 和 C 等反应已积累了许多实验数据. 美国、欧洲、日本和韩国等都开始建立中高能核数据库和/或废物嬗变用数据库.

(2) 近期出现了一批新的实验设备和新的实验方法. 例如, 欧洲 CERN 的高通量、宽能区、高分辨中子飞行时间谱仪(n-TOF)已经开始物理工作, 日本 JAERI-KEK 的高强度质子加速器(HIPA)联合计划业已启动, 日本理化所的放射性核束流装置计划也在顺利进行, 德国 GSI 的逆反应(IKR)技术等. 此外, 日本 NCD 的高分辨高能光子谱仪(HSS), 美国 LANL 的先进中子俘获实验装置(DANCE)和快中子产生 γ 射线观测仪(FIGARO)等新的大型设备也向人们展示了强大的测量能力.

(3) 实验数据的系统学研究取得了不少成果, 并用于数据评价. 例如 TOTELA 和 GMA 程序.

(4) 对特殊需要材料的宏观截面测量数据(积分)增多. 例如 Li, Fe 和 Cu.

2.2 理论计算模型

中高能核反应特点^[2]是: (1) 预平衡过程和碎裂等动力学过程占优势的结果, 而且质心速度增加, 出射粒子角分布十分向前; (2) 反应产物覆盖

收稿日期: 2002 - 04 - 01; 修改日期: 2002 - 10 - 09

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G19990226)

作者简介: 庄友祥(1941-), 男(汉族), 福建泉州人, 研究员, 从事核物理研究和核数据评价及建库.

一个宽的质量和原子序数范围；(3) π 介子和激发了的核子的自由度随着入射能量增大变得重要了。因此，需要考虑核子多体之外的强子多体系统。

中高能核数据评价需要可靠的理论模型。它能够很好地包括这些核反应特点并覆盖一个宽的入射能量范围，诸如预平衡过程的统计多步模型，由于多散裂引起的强子反应分子动力学而应用的模拟方

法，等等。

3 国际中高能核数据评价和建库

3.1 概况

根据我们的调研，现有的主要国际评价中高能核数据库列在表 1。

表 1 主要的中高能核数据库

| 已有核数据库名称 | 包含核数 | 能量范围/MeV | 数据文档数/MF | 完成时间 | 入射粒子 |
|---------------------------|--|---------------|----------|------|------|
| MENDL-2 ^[4] | 497 | ≤ 100 | 2 | 1995 | n, p |
| WIND ^[5] | U, Np, Pu | ≤ 100 | 2 | 1995 | n, p |
| BISERM ^[6] | 259 | $\leq 1\ 000$ | 1 | 1997 | n |
| ECN-HE ^[7] | 16 | ≤ 150 | 4 | 1997 | n |
| ENDF/B-6.6 ^[8] | 41 | ≤ 150 | 10 | 1999 | n, p |
| JENDL-HE ^[9] | 123 | $\leq 3\ 000$ | 7 | 2002 | n, p |
| NRG/CEA ^[10] | ^{54, 56} Fe, ^{58, 60} Ni | ≤ 150 | 4 | 1998 | n, p |

(1) MENDL-2 (Medium Energy Nuclear Data Library)

由 Shubin 等^[4] 在俄罗斯 IPPE 利用 ALICE-IPPE 程序完成，目的是用于中高能粒子辐照的材料活化和嬗变研究。

(2) WIND (Waste Incineration Nuclear Data)

推荐数据由 Konobejev 等^[5] (俄罗斯 Obninsk) 取自理论计算，原计划是为长寿命放射性材料嬗变，即核废物处理研究用。

(3) BISERM

Korovin 等^[6] 于 1997 年完成，只有反应截面数据。

(4) ECN-HE

荷兰能源研究中心 (ECN)^[7, 8] 与美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 合作完成。

(5) ENDF/B-6.6 (包含 LA150)

由 Chadwick 和 Young 等^[8] 在美国 LANL 利用 FKK/GNASH/GSCAN 程序，并部分同荷兰 ECN 的 Petten 合作完成的。

(6) JENDL-HE

日本 1994 年开始，2001 年完成^[9]。

(7) NRG/CEA

欧洲正在进行的合作研究计划。

直到现在，ECN-HE 和 BISERM 尚未公布，JENDL-HE 定于 2002 年释放。NRG/CEA 正在按新的合作研究计划 HINADS^[10] 进行。

3.2 评价方法

上述 7 个国际评价中高能核数据库中以 JENDL-HE 为最新最完善。下面，我们将着重以 JENDL-HE 为例^[3, 9]，介绍中高能核数据评价方法。

(1) 概况

在 JENDL-HE 中所包含的靶核数现有 123 个，入射中子和质子能量上限 3 GeV。全截面、弹性散射截面及其角分布、粒子产生截面和双微分截面的评价都是基于实验测量数据和理论计算。这些截面以 ENDF-6 格式入库。

(2) 评价方法

通常的评价过程包括：1) 尽可能齐全地收集有关的中高能实验测量数据；2) 从测量方法、实验装置和误差来源等方面对实验测量数据进行分析比较、择优录取，经过必要的各项修正和数据处理，推荐出较为可靠准确的测量数据；3) 在必要和可能时进行实验数据的系统学研究；4) 根据推荐的实验数据进行理论模型计算；5) 选取与实验数据符合较

好的理论模型计算数据和系统学结果，经适当的自治性处理得到所需的全套推荐数据；6)通过必要的格式和物理检查程序检验后，数据正式登记入库。

JENDL-HE 的中高能理论模型计算程序系统详见图 1。按照不同入射能量应用不同的理论模型，分为：(A)中能区 20—250 MeV，(B)高能区 150 MeV—3 GeV。在中能区应用的主要程序是 GNASH^[11]，它基于统计的 Fauser-Feshbach 加预平衡模型。其他的程序，如 EXIFON^[12]，部分地用

于 N 和 O 等轻核的评价。程序 ECIS^[13] 或 OPTMAN^[14] 被用于光学模型计算。必须指出的是程序 ECIS 加 GNASH 系统基本上与 LA150 评价所用的一样。在高能区应用的程序是 JQMD^[15]，它基于量子分子动力学(QMD)和统计衰变模型(SDM)。同样地，系统学程序 TOTELA^[16] 被用作高能区全截面、弹性散射和质子反应截面的评价工具。

在重叠能区 150—250 MeV，JENDL-HE 将中能区和高能区的计算结果平滑地联接起来。同位素

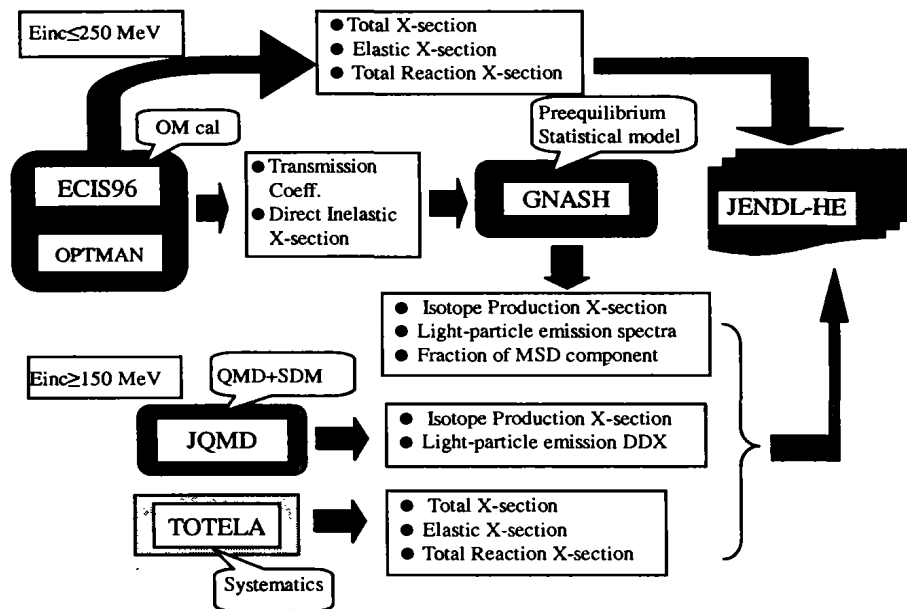


图 1 中高能理论模型计算程序系统

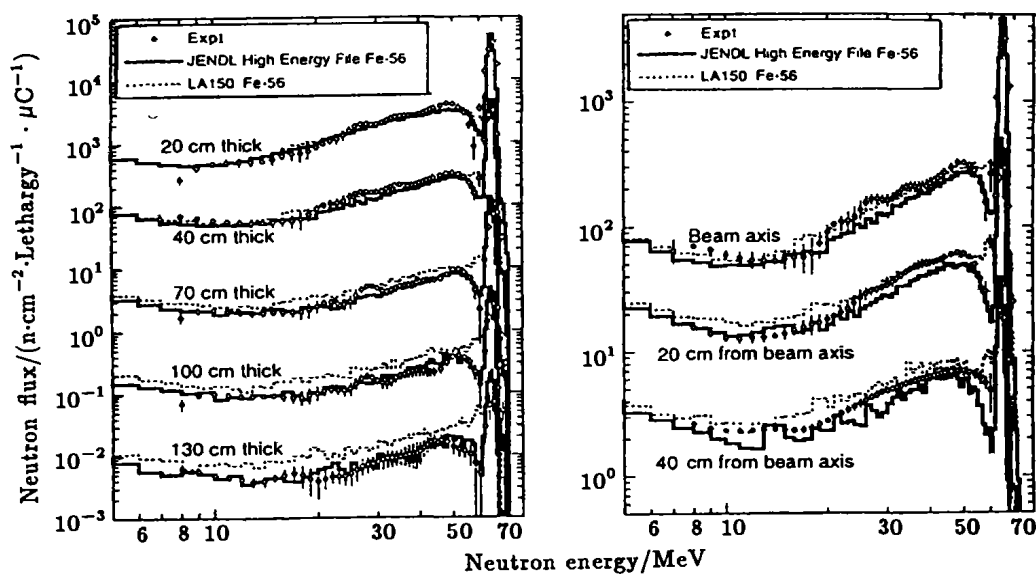


图 2 68 MeV 中子通过铁屏蔽实验的中子泄漏谱

产生截面用程序 GMA^[17]评价, 该程序基于普适的最小二乘法或经验拟合大量可利用的实验数据.

3.3 积分检验

积分检验是利用有关的人射粒子轰击大体积靶物质所造成的宏观(积分)效应来检验微观核数据的准确性和完整性. 中高能核数据积分检验已经开始^[18]. 首先, 用 NJOY99.24 程序将评价库的微观数据处理成 MCNP 工作库; 然后用程序 MCNPX 进行计算, 并与宏观测量数据比较, 观察二者符合情况, 以便于改进微观核数据.

3.4 评价与实验测量数据的比较

在 JENDL-HE 中目前已完成了入射中子能量为 43 MeV 和 68 MeV 轰击⁵⁶Fe 靶核的积分检验^[18], 如图 2(前页)所示.

某些核的实验数据与各评价中高能核数据库(如 ENDF/B-6.6 和 JENDL-HE)之间的比较也完成了. 例如, ¹²C, ²⁷Al, ²⁸Si, ⁵⁶Fe 和 ^{63, 65}Cu 等靶核^[19], 如图 3—5 所示. 可见, 评价与实验测量数据的主要部分是符合的, 但在许多部分, 还远不能满足需要.

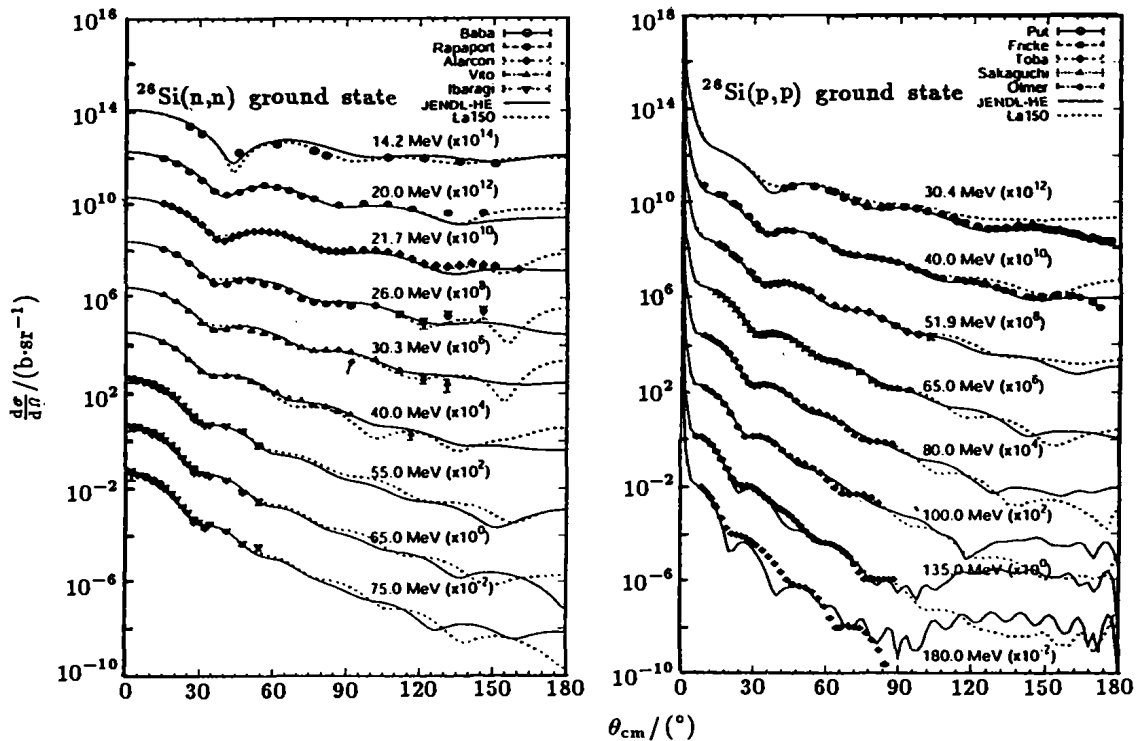


图 3 测量和计算的²⁸Si(n, n)²⁸Si 及 ²⁸Si(p, p)²⁸Si 弹性散射角分布

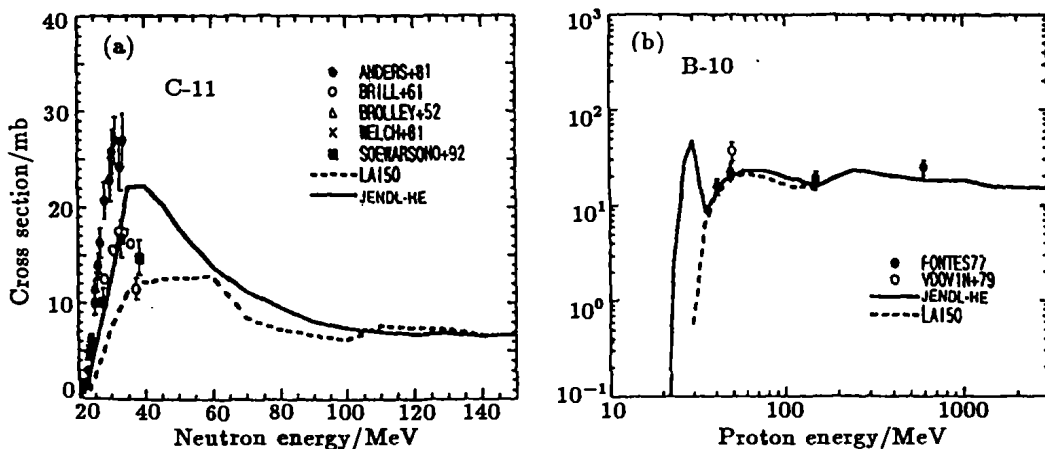
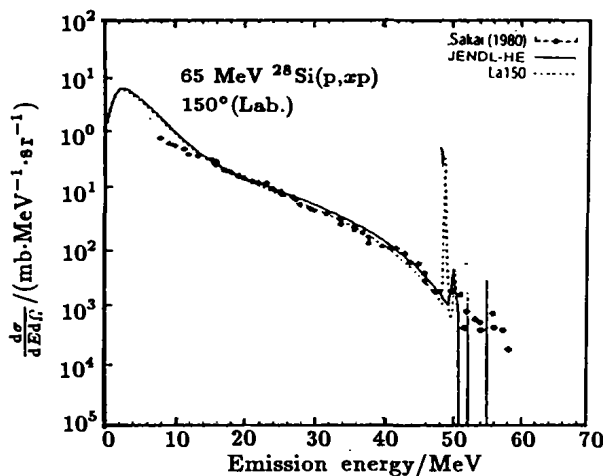


图 4 同位素产生截面: (a) ¹²C(n, 2n)¹¹C, (b) ¹²C(p, p2n)¹⁰B

图 5 $^{28}\text{Si}(p, xp)$ 反应双微分截面

4 结论和建议

最近几年来,中高能核数据研究由于 ADS 等需求的牵引,出现了一批新的实验设备和新的实验方法,大型实验设备和大型项目的国际合作日益加强。

相应的中高能核反应理论模型研究和程序的发展也非常活跃。但多数属于原有模型的应用和改进,或改版,也有一些新模型和程序出现。

由于大量中高能核数据实验结果的出现和积累,使得中高能核数据评价有了更加可靠的基础。由于中高能区很宽,包含的核反应机制多种多样,按照不同入射能区要用不同的理论模型和计算程序,中能区和高能区的计算结果在重叠能区必需平滑衔接起来。实验数据的系统学程序已成为中高能区重要的评价工具。因此,中高能核数据评价方法也有了新的发展。

现在,国际上已建立了一些专用中高能核数据库。但都在起步阶段,还很不完善。从表 1 不难看出,ENDF/B-6.6 和 JENDL-HE 库相对于其他库

数据文档较多较全,其中 JENDL-HE 能区至 3 GeV 更加合适于 ADS; MEND-2 和 BISERM 虽然核数多但文档少, WIND 不仅核数少而且文档更少。然而,新近完成的 JENDL-HE 库尚未释放。

考虑到国际上中高能核数据评价和建库概况,对我们工作的建议如下:

(1) 积极参加国际合作,借助于国际大型实验设备和大型项目开展中高能核数据测量,重点在于少量的关键数据。这样一来不仅有了我们自己的实验测量工作,还能培养许多人才。

(2) 建立我们自己的中高能核数据评价方法,包括中高能核反应理论研究和相应的计算程序编制,以及实验数据的系统学研究和宏观检验等。目前国内已经完成和正在研制的程序有中能区自动多核调光参程序 APMN 和全套数据计算程序 MEND。已经开发和正在开发的程序有中能区计算程序 GNASH 和 EMPARE 等;准备引进的国外主要计算程序有 TALYS 和 INCL4 等。此外,还须进行包括裂变截面在内的系统学研究,并引进宏观检验所需要的程序 NJOY99 和 MCNPX,以形成自己的中高能核数据评价系统。

(3) 利用我们自己的中高能核数据评价系统,评价并建成我们自己的中高能核数据库,根据“小规模、高水平、有特点”的精神,库中包含的靶核数量不必很多,但一定是重要的并且具有中国特色的;同时通过与实验测量及其他评价库数据相互比对和检验来选择、利用国际上其他评价中高能核数据。

我们的中高能核数据库在 20 MeV 处与现有的中国核数据库 CENDL 平滑联接,因此说,这两个库是互相补充并连结成一体。

致谢 作者对丁大钊院士对本文所做的修改和提出的建议表示衷心的感谢。

参 考 文 献:

- [1] Perlstein S. Summary of the Meeting of the Medium Energy Nuclear Data Working Group[R]. BNL-NCS-40070, 1987.
- [2] Fukahori T(Ed). Proc the Third Specialists' Meeting on High Energy Nuclear Data[C]. JAERI-Conf 98-016, 1998.
- [3] Watanabe Y. Present Status of JENDL High Energy File[R]. JAERI-Conf 2001-006, 2001, 101.
- [4] Shubin Y N. Medium Energy Nuclear Data Library, Version 2 [R]. IAEA-NDS-136, 1995.
- [5] Konobejev A J. Waste Incineration Nuclear Data[R]. IAEA-NDS-143, 1995.
- [6] Korovin Y A. Brief Introduction of the BISERM[R]. IAEA-NDS-203, 1997.

- [7] Koning A J. ECN High Energy File[Z]. Private Communication.
- [8] Chadwick M B, Yong P G, Chiba S, *et al.* Cross Section Evaluations to 150 MeV for Accelerator-driven System and Implementation in MCNPX[J]. Nucl Sci Eng, 1999, 131(3), 293.
- [9] Fukahori T. JENDL High Energy File[C]. ND2001 proceedings to be published.
- [10] Koning A J. A European Nuclear Data Program for Accelerator-driven System[C]. ND2001 proceedings to be published.
- [11] Young P G. GNASH Code[R]. LA-12343-MS, 1992.
- [12] Kalka H. Statistical Multistep Reactions from 1 to 100 MeV [J]. Z Phys, 1992, A341, 289.
- [13] Raynal J. Notes on ECIS94[R]. CEA-N-2772, 1994.
- [14] Sukhovitskii E S. OPTMAN and SHEMMAN Codes [R]. JAERI-Data/Code 98-019, 1998.
- [15] Niita K. High Energy Nuclear Reaction Code JAM [R]. JAERI-Conf 2000-005, 2000, 98.
- [16] Fukahori T. TOTELA Code[Z]. Private Communication.
- [17] Chiba S, Fukahori T, Watanabe Y, *et al.* Evaluation of Neutron Cross Sections up to 50 MeV [R]. JAERI-M 94-019, 1994, 300.
- [18] Maekawa F. Integral Test for JENDL High Energy File [R]. JAERI-Conf 2001-006, 2001, 107.
- [19] Weili Sun, Watanabe Y, Sukhovitskiz, *et al.* Evaluation of Neutron and Proton Nuclear Data of ^{28}Si for Energies up to 200 MeV [R]. JAERI-Conf 2001-006, 2001, 247.

A General Survey of Nuclear Data Evaluation and Database at Medium-high Energy Region in the World*

ZHUANG You-xiang, WANG Ji-min

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

Abstract: Nuclear data evaluation and database in medium-high energy region in the world are briefly discussed. Especially, experimental measurements, theoretical calculations, benchmark testing, evaluation and database construction in medium-high energy range are discussed in more detail. And the suggestion on nuclear data work for the future at medium-high energy in China is given.

Key words: nuclear reaction; nuclear data; medium-high energy; evaluation; database construction

* Foundation item: Major State Basic Research Development Program of China (G19990226)