

# $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$ 反应激发函数评价及 厚靶产额计算\*

李文琳<sup>1)</sup> 江历阳<sup>1)†</sup> 周小媛<sup>1)</sup> 武文若<sup>1)2)</sup> 郭浩<sup>1)</sup> 李奥<sup>1)</sup> 阮锡超<sup>1)3)</sup>

1) (中国原子能科学研究院, 核数据全国重点实验室, 北京 102413)

2) (河南师范大学物理学院, 新乡 453007)

3) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2026 年 3 月 24 日收到; 2026 年 4 月 14 日收到修改稿)

$^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  反应是质子束流监测的理想候选反应道, 然而现有实验数据在重叠能区存在明显分歧, 各评价库的推荐值与实验数据的一致性较差. 本文针对 60 MeV 以下能区, 从实验物理角度出发, 对该反应截面的实验数据开展了系统评价. 研究中筛选了半衰期偏差显著、 $\gamma$  能谱干扰严重及能量赋值不自洽等异常数据; 同时, 将衰变数据和参考反应截面等关键参数与当前评价值对比, 对实验数据进行相应比例的修正. 经筛选与修正后, 多数实验数据在误差范围内趋于一致. 在此基础上, 采用 SPCC 样条拟合程序获得了激发函数评价推荐值, 计算了厚靶产额, 并利用厚靶产额实验数据进行了检验, 计算结果与实验测量值总体符合良好, 验证了本工作推荐值的可靠性. 本研究为质子束流监测提供了可靠的数据支持, 并为相关评价库的更新提供了参考依据.

**关键词:** 质子激发函数, 核数据评价, 厚靶产额, 束流监测**DOI:** 10.7498/aps.75.20260410**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260410

## 1 引言

质子核反应截面数据在核物理基础研究、放射性同位素生产、加速器束流诊断及辐射防护等领域具有广泛的应用价值<sup>[1-4]</sup>. 活化法是获取这些截面的常用实验手段, 通常采用相对测量方式, 以已知参考反应截面为基准确定待测截面<sup>[5]</sup>. 参考截面的准确性直接影响众多截面测量结果的可靠性, 进而影响核数据的应用效果, 因此持续提高质子参考截面数据的准确度具有重要意义.

国际原子能机构 (IAEA) 推荐的 11 个常用质子参考反应中<sup>[6]</sup>, 产物核素半衰期跨度较大, 但各反应的截面峰值局限于较窄的能区范围内, 在产物

活度、监测能区与实验周期三者之间难以兼顾. 其中, 短半衰期反应 (如  $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{62,63}\text{Zn}$ ,  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{x})^{24}\text{Na}$ ,  $T_{1/2} < 1 \text{ d}$ ) 的高截面区间集中于中低能区, 虽其他能区截面较低, 但核素衰变快, 短时辐照仍可积累足量活度, 但冷却时间与测量时间均受限, 仅适用于短周期实验; 长半衰期反应 (如  $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{65}\text{Zn}$ ,  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{x})^{22}\text{Na}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{46}\text{Sc}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{56,58}\text{Co}$ ) 虽可通过延长测量时间获得较好的统计精度, 但仅适用于长周期实验. 然而, 与常规辐照-冷却-测量实验周期匹配性最佳的中等半衰期反应 ( $T_{1/2}$  为天至周数量级) 中,  $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ni}(\text{p}, \text{x})^{57}\text{Ni}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Mo}(\text{p}, \text{x})^{96\text{m}+g}\text{Tc}$  的高截面区间分别集中于 20 MeV 以下、30—40 MeV 和 35 MeV 以下, 难以保证足够的产物活度. 因此, 寻找兼具适中半衰期、较宽适

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFA1606603) 和稳定支持基础科研计划 (批准号: BJ010261223282) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangly@ciae.ac.cn

用能区和较大反应截面的新参考反应, 具有重要的实际需求.

为进一步扩展 IAEA 用于质子束流参数监测的数据库, Tárkányi 等<sup>[7]</sup>利用 Padé 有理函数拟合了质子诱发 C, Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Nb, Mo 及 Au 靶等共 18 个参考反应的截面数据 (以下称为 IAEA 拟合数据). 其中,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  两个反应道的综合优势尤为突出. 金为单一同位素元素 ( $^{197}\text{Au}$  天然丰度 100%), 化学性质稳定, 延展性优良, 易于制备高纯度均匀薄靶. 两个反应道产物核素的半衰期均以天为量级, 二者相差约 4 倍, 可适配多数质子实验的辐照时长; 其衰变数据准确可靠, 半衰期及常用特征  $\gamma$  射线分支比的不确定度均小于 5%; 特征  $\gamma$  射线能量集中于 300 keV 附近, 处于高纯锗探测器效率较高的线性响应区, 便于精确测量. 此外, 其适用能区较广, 截面量级与常规辐照条件匹配良好; 激发函数在阈值以上的一定能区内呈单调上升趋势, 有利于能量标定; 在较高能区则趋于平缓, 有利于注量率的准确确定. 这两个反应道还可在同一靶片上同时应用, 实现束流参数的相互校验与系统化监测. 综合以上特点,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  可作为理想的参考反应.

$^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  的激发函数已有多组实验测量<sup>[8-16]</sup>, 测量数据主要集中于 60 MeV 以下能区; 主要核数据评价库也已给出相应截面推荐值<sup>[17,18]</sup>. 然而, 不同实验组在重叠能区的测量结果仍存在一定分歧, 尤其是  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  在 30 MeV 以上、 $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  在 45 MeV 以上能区, 实验数据均明显分化为高低两组; 各评价库给出的推荐值亦存在明显差异, 且与部分实验数据符合度欠佳, 这直接制约了参考截面的准确度. 现有评价工作多采用函数拟合或模型计算获得推荐值, 缺乏从实验物理角度对原始数据的充分修正与筛选. 因此, 有必要从实验物理角度分析、筛选和修正数据, 对现有数据进行重新评价.

基于此, 本工作系统收集并评价了 60 MeV 以下能区  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  反应的实验截面数据, 采用 SPCC 样条拟合方法获得激发函数评价推荐值, 进一步通过积分计算获得相应的厚靶产额并与实验数据进行比较, 以验证评价结果的可靠性.

## 2 数据修正方法

质子核反应截面的实验测量通常采用叠层靶

活化法. 该方法将若干薄靶与降能片交替叠放, 利用降能片调节各层薄靶处的质子能量, 从而在单次辐照中获得多个能量点的反应截面数据<sup>[5]</sup>. 由于薄靶厚度远小于质子射程, 满足薄靶近似条件, 因此质子穿过单片薄靶时的能量损失可忽略不计.

辐照结束 (end of bombardment, EOB) 时, 产物核素的放射性活度  $A_{\text{EOB}}(\text{Bq})$  可表示为

$$A_{\text{EOB}} = N_{\text{S}} \cdot S \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot (1 - e^{-\lambda t_{\text{t}}}), \quad (1)$$

式中,  $N_{\text{S}}$  为单位面积靶核数 ( $\text{cm}^{-2}$ ),  $S$  为薄靶面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $\sigma$  为待求反应截面 ( $\text{cm}^2$ ),  $\varphi$  为质子束注量率 ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\lambda$  为产物核素衰变常数 ( $\text{s}^{-1}$ ),  $t_{\text{t}}$  为辐照时间 (s).

辐照完成后, 薄靶经冷却时间  $t_{\text{c}}(\text{s})$  后置于探测器系统上测量. 对于  $\gamma$  能谱测量, 探测器在测量时间  $t_{\text{m}}(\text{s})$  内记录的特征  $\gamma$  射线全能峰净计数  $C$  为

$$C = \left[ \frac{A_{\text{EOB}} \cdot e^{-\lambda \cdot t_{\text{c}}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{m}}})}{\lambda} \right] \cdot \varepsilon I_{\gamma}, \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon$  为探测效率,  $I_{\gamma}$  为产物核素特征  $\gamma$  射线衰变分支比. 联立 (1) 式和 (2) 式, 可由净计数  $C$  反推反应截面  $\sigma$ . 但该过程需获取质子束注量率  $\varphi$ , 而实验中难以对其实现高精度测量. 实际测量通常采用相对测量法, 通过引入已知参考反应截面消去注量率  $\varphi$ .

在相同辐照条件下, 对待测反应 (下标 x) 与参考反应 (下标 m) 分别应用 (1) 式, 对两式取比值并消去公共参数, 得到待测反应截面的计算 (3) 式:

$$\sigma_{\text{x}} = \sigma_{\text{m}} \cdot \frac{A_{\text{EOB}, \text{x}}}{A_{\text{EOB}, \text{m}}} \cdot \frac{N_{\text{s}, \text{m}}}{N_{\text{s}, \text{x}}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{\text{m}} \cdot t_{\text{t}}}}{1 - e^{-\lambda_{\text{x}} \cdot t_{\text{t}}}}, \quad (3)$$

式中, 待测核素与参考核素的 EOB 活度  $A_{\text{EOB}, \text{x}}$  和  $A_{\text{EOB}, \text{m}}$  由各自测量数据经 (2) 式独立求得.

由以上推导可知, 截面测量结果同时依赖于衰变分支比  $I_{\gamma}$ 、产物核素半衰期 (隐含于  $\lambda$ ) 以及参考截面  $\sigma_{\text{m}}$ , 当文献实验所用衰变参数、参考截面与当前评价存在偏差时, 需对原始截面数据进行相应修正, 修正后截面  $\sigma_{\text{new}}$  与修正前截面  $\sigma_{\text{old}}$  的比值即为修正因子, 具体修正公式如下<sup>[20]</sup>.

针对待测核素的某一  $I_{\gamma}$  的偏差, 由 (2) 式可知待测截面与  $I_{\gamma}$  呈反比, 因此衰变分支比修正因子由 (4) 式确定:

$$\frac{\sigma_{\text{new}}}{\sigma_{\text{old}}} = \frac{I_{\gamma, \text{old}}}{I_{\gamma, \text{new}}}, \quad (4)$$

式中,  $I_{\gamma, \text{old}}$  为文献实验所用的衰变分支比原始值;

$I_{\gamma, \text{new}}$  为 NuDat 3.0 数据库的当前评价值<sup>[21]</sup>.

针对参考反应截面  $\sigma_m$  的偏差, 由 (3) 式可知待测截面与  $\sigma_m$  呈正比, 因此参考截面修正因子由 (5) 式确定:

$$\frac{\sigma_{\text{new},x}}{\sigma_{\text{old},x}} = \frac{\sigma_{\text{new},m}}{\sigma_{\text{old},m}}, \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{\text{old},m}$  为文献实验所用的参考截面值;  $\sigma_{\text{new},m}$  为 IAEA 当前评价值<sup>[6]</sup>.

修正后截面的相对不确定度均沿用原文报道值, 因原始文献大多未给出所用参数的不确定度, 无法严格进行误差传递. 对于半衰期偏差, 因文献大多缺失辐照时间等关键参数, 故不予修正; 对于多条特征  $\gamma$  射线分支比均存在偏差的情况, 因原文未明确多线合并计算截面的方法, 也不予修正. 基于上述修正方法, 下面分别对  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  两个反应道的实验数据进行系统分析, 包括衰变数据修正、参考截面修正及异常数据的甄别与剔除.

### 3 实验数据分析

#### 3.1 $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ 反应

本工作从 EXFOR 数据库收集了 9 组  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应 (反应道为  $(\text{p}, \text{d})+(\text{p}, \text{pn})$ ) 的实验截面数据<sup>[8–16]</sup>(表 1, 图 1(a)), 所有实验均采用  $\gamma$  能谱法进行活度测量. 其中 4 组<sup>[8–11]</sup>同时给出了  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$  与  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m}2}\text{Au}$  的截面, 分别示于图 1(b), (c). 这一区分源于  $^{196}\text{Au}$  存在的 3 个同质异能态 (图 2):  $^{196\text{g}}\text{Au}$  ( $T_{1/2} = 6.1669 \text{ d}$ ),  $^{196\text{m}1}\text{Au}$  ( $T_{1/2} = 8.1 \text{ s}$ ) 与  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  ( $T_{1/2} = 9.6 \text{ h}$ ).

由于  $^{196\text{m}1}\text{Au}$  半衰期极短, 辐照结束后已通过同质异能跃迁 (IT) 衰变至基态  $^{196\text{g}}\text{Au}$ , 实验上仅能获得二者之和  $\sigma(^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au})$ ;  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  的贡献则通过分时测量法分离. 鉴于 60 MeV 以下能区实验数据较为丰富, 本工作仅对该能区数据进行分析与评价.

在衰变数据修正方面, 对于各实验组所采用的  $^{196\text{g}}\text{Au}$  和  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  的衰变分支比及半衰期与 NuDat 3.0 当前评价值<sup>[21]</sup>进行比对, 存在偏差的情况汇总于表 2 和表 3. 依据表中修正因子, 对 Szelecsenyi 等 (2007)<sup>[13]</sup>, Michel 等 (1997)<sup>[16]</sup> 及 Nagame 和 Nakahara (1990)<sup>[11]</sup> 的原始截面数据进行相应修正. 半衰期存在显著偏差的 Gusakow 等 (1961)<sup>[15]</sup> 实验组数据均舍弃; 其余实验组采用的半衰期与当前评价值接近或一致.

相对法测量还需对参考反应截面进行修正. 各实验组采用的参考反应主要包括 IAEA 推荐的  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{x})^{22,24}\text{Na}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$  和  $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{62}\text{Zn}$ , 部分早期实验使用  $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{pn})^{11}\text{C}$  反应. 对于明确给出参考截面值且与最新评价值有偏差的文献, 本工作在每个实验能点上, 根据 (5) 式的修正因子计算方法, 以该能量点处 IAEA 当前推荐的参考截面值与原文献所用参考截面值之比作为修正因子, 对测量截面进行了逐点修正. 如图 3 所示, Kavanagh 和 Bell (1961)<sup>[14]</sup> 的参考反应修正因子范围为 0.900—1.050; 由于同一实验组在 3.2 节  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  测量中采用相同的参考反应, 上述修正因子同样适用. 对于 Červenák 和 Lebeda (2019)<sup>[10]</sup> 的实验, 尽管其采用的参考截面值与最新评价值存在轻微差异, 但该实验采用绝对测量与  $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$  参考

表 1  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  反应实验截面数据相关文献信息汇总  
Table 1. Compilation of experimental cross-section data for  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  reactions.

| 作者及年份                                      | 装置    | 探测器          | 测量核素                                                                 | 参考反应                                                                                                                 | 能量范围/MeV    |
|--------------------------------------------|-------|--------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Ditroi, et al. (2016) <sup>[8]</sup>       | CYCLO | HPGe         | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{196\text{m}2}\text{Au}, ^{194}\text{Au}$ | $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{x})^{22,24}\text{Na}$ ,<br>$^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$ | 4.9—63.5    |
| Naik, et al. (2023) <sup>[9]</sup>         | LINAC | HPGe         | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{196\text{m}2}\text{Au}, ^{194}\text{Au}$ | $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{62}\text{Zn}$                                                           | 49.8—65.47  |
| Červenák and Lebeda (2019) <sup>[10]</sup> | ISOCY | HPGe         | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{196\text{m}2}\text{Au}, ^{194}\text{Au}$ | $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$ ,<br>结合绝对测量                                                | 12.66—35.29 |
| Nagame and Nakahara (1990) <sup>[11]</sup> | CYCLO | Ge(Li)       | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{196\text{m}2}\text{Au}$                  | —                                                                                                                    | 13.94—49.11 |
| Szelecsenyi (1997) <sup>[12]</sup>         | CYCLO | Ge(Li)       | $^{196\text{g}}\text{Au}$                                            | —                                                                                                                    | 13.5—18.3   |
| Szelecsenyi, et al. (2007) <sup>[13]</sup> | CYCLO | HPGe         | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{194}\text{Au}$                           | —                                                                                                                    | 25.37—65.38 |
| Kavanagh and Bell (1961) <sup>[14]</sup>   | SYNCY | NaI(Tl)      | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{194}\text{Au}$                           | $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{pn})^{11}\text{C}$                                                                    | 18—86       |
| Gusakow, et al. (1961) <sup>[15]</sup>     | SYNCY | NaI(Tl)      | $^{196\text{g}}\text{Au}$                                            | $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{x})^{24}\text{Al}$ ,<br>$^{12}\text{C}(\text{p}, \text{n})^{12}\text{N}$             | 40.2—155    |
| Michel, et al. (1997) <sup>[16]</sup>      | SYNCY | Ge(Li), HPGe | $^{196\text{g}}\text{Au}, ^{194}\text{Au}$                           | $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{x})^{22}\text{Na}$                                                                   | 22.3—2600   |

注: 1) CYCLO 为回旋加速器, LINAC 为直线加速器, ISOCY 为等时性回旋加速器, SYNCY 为同步加速器, HPGe 为高纯锗探测器, Ge(Li) 为锂漂移锗探测器, NaI(Tl) 为碘化钠探测器; 2) 仅对 60 MeV 以下能区数据进行分析与评价.

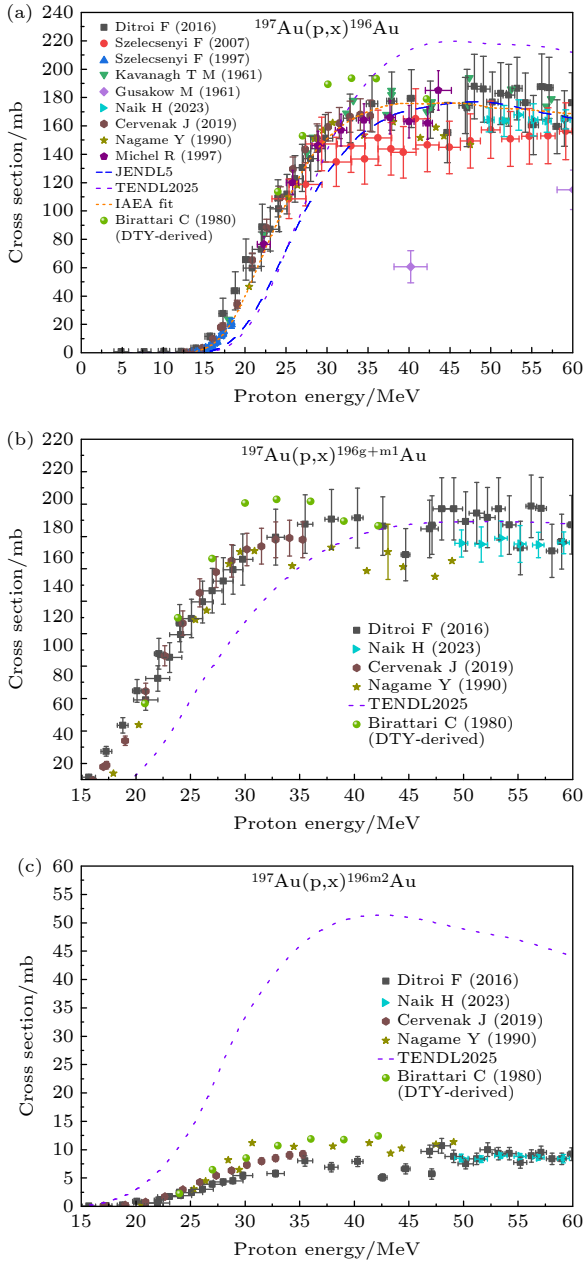


图 1  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应截面实验数据、评价库数据及微分厚靶产额反算截面汇总 (a)–(c) 分别为  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ ,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g}+\text{m}1)\text{Au}}$  和  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m}2}\text{Au}$  反应道

Fig. 1. Summary of  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  reaction cross sections, including experimental data, ENDF values and reference data derived from differential thick-target yields: (a)–(c) Correspond to the  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ ,  $^{196(\text{g}+\text{m}1)\text{Au}}$  and  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  reaction channels, respectively.

截面联合校正束流流强, 数据自洽, 本工作不再进行额外修正, 3.2 节中同一实验组的数据采用相同处理原则。

在 30 MeV 以上能区, 截面数据呈现两组明显不同的分布趋势. 其中, 属于高值趋势组的 Ditroi 等<sup>[8]</sup>报道了 4.9–63.5 MeV 能区的  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$

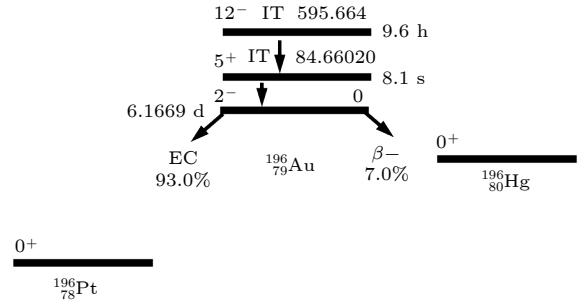


图 2  $^{196}\text{Au}$  衰变纲图 (简化)

Fig. 2. Simplified decay scheme of  $^{196}\text{Au}$ .

截面数据. 经分析, 该组数据存在以下问题, 本工作不予采用。

1)  $\gamma$  能谱测量干扰严重: 实验采用电沉积在 Au 箔上的 GaNi 合金靶, 辐照后产生大量放射性核素, 特征峰密集且康普顿本底较高. 特别是  $^{52}\text{Fe}$  产物的 168.688 keV 特征峰与冷却时间受限条件下的  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  168.37 keV 的特征峰重叠, 严重干扰计数. 该峰计数无法准确反映  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  的活度, 导致所测截面产生系统性偏差。

2) 叠层靶能量赋值不自洽: 如表 4 所示, 该文献共开展了 3 组叠层靶实验. 本工作利用 SRIM 程序逐层计算质子在各靶箔中的能量损失, 将物理厚度换算为质量厚度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), 以各靶箔界面处的累积质量厚度为横坐标、对应质子能量为纵坐标, 得到 3 组实验的质子降能曲线 (图 4), 并标出文献的 Au 箔能点以供对比. 根据 Bethe-Bloch 理论, 随质子能量降低, 其质量阻止本领 ( $-\text{d}E/\text{d}(\rho x)$ ) 应单调增大, 即降能曲线斜率的绝对值  $|\Delta E/\Delta(\rho x)|$  应沿束流方向持续增大, 本工作 SRIM 计算结果符合该规律。

实验 1 的叠层靶由 18 组 Al(151.1  $\mu\text{m}$ )–Hf(10.54  $\mu\text{m}$ )–Al(56.5  $\mu\text{m}$ )–Al(26.9  $\mu\text{m}$ )–GaNi(17.7 或 15.9  $\mu\text{m}$ )–Au(25  $\mu\text{m}$ ) 依次排列构成, 初始质子束能量为 65 MeV, 文献给出 Au 箔处质子能量由此逐级降低至 25 MeV, 其能点与 SRIM 计算结果符合良好。

实验 2 的叠层靶分为前段 (实验 2a) 12 组 W(21.3  $\mu\text{m}$ )–Al(250  $\mu\text{m}$ )–GaNi(13.35  $\mu\text{m}$ )–Cu(13.35  $\mu\text{m}$ ) 或 Al(250  $\mu\text{m}$ ) (仅起降能作用) 与后段 (实验 2b) 17 组 Au(23.1  $\mu\text{m}$ )–Al(125  $\mu\text{m}$ )–W(21.3  $\mu\text{m}$ )–Al(250  $\mu\text{m}$ )–GaNi(13.2  $\mu\text{m}$ )–Cu(12.5  $\mu\text{m}$ ) 或 Al(125  $\mu\text{m}$ ) (含 Au 靶箔), 初始束能 65 MeV 经前段降至约 47 MeV 后入射后段, 文献给出 Au 箔

表 2  $^{196}\text{gAu}$  衰变分支比修正因子汇总  
Table 2. Branching ratio correction factors for  $^{196}\text{gAu}$  decay.

| 作者及年份                                      | 半衰期/天  | 特征射线能量/keV | 衰变分支比/% | 修正因子   |
|--------------------------------------------|--------|------------|---------|--------|
| Szelecsenyi, et al. (2007) <sup>[13]</sup> | 6.18   | 333        | 22.9    | 1.067# |
|                                            |        | 356        | 87      |        |
|                                            |        | 426        | 7       |        |
| Szelecsenyi (1997) <sup>[12]</sup>         | 6.183  | 355.58     | 87      | &      |
|                                            |        | 333.09     | 22.9    |        |
| Michel, et al. (1997) <sup>[16]</sup>      | 6.2    | 355.7      | 87      | 1.091# |
|                                            |        | 426.1      | 7.2     |        |
| Nagame and Nakahara (1990) <sup>[11]</sup> | 6.18   | 355.7      | 88      | 1.012  |
|                                            |        | 331        | —       |        |
|                                            |        | 354        | —       |        |
| Kavanagh and Bell (1961) <sup>[14]</sup>   | 6.1    | 426        | —       | —      |
|                                            |        | 327        | —       |        |
|                                            |        | 355.73     | 87      |        |
| Červenák and Lebeda (2019) <sup>[10]</sup> | 6.1669 | 355.73     | 87      | &      |
| Gusakov, et al. (1961) <sup>[15]</sup>     | 5.6    | —          | —       | —      |
|                                            |        | 333.03     | 22.9    |        |
| Ditroi, et al. (2016) <sup>[8]</sup>       | 6.1669 | 355.73     | 87      | &      |
|                                            |        | 426.1      | 6.6     |        |
|                                            |        | 355.73     | 87      |        |
| Naik, et al. (2023) <sup>[9]</sup>         | 6.1669 | 355.73     | 87      | &      |

注: #多线测量中仅单条特征 $\gamma$ 射线分支比存在偏差; &当前评价值, 无需修正; —未写明, 无法修正

表 3  $^{196\text{m2}}\text{Au}$  衰变分支比修正因子汇总  
Table 3. Branching ratio correction factors for  $^{196\text{m2}}\text{Au}$  decay.

| 作者及年份                                      | 半衰期/h | 特征射线能量/keV | 衰变分支比/% | 修正因子  |
|--------------------------------------------|-------|------------|---------|-------|
| Nagame and Nakahara (1990) <sup>[11]</sup> | 9.7   | 147.8      | 44.6    | 1.025 |
| Červenák and Lebeda (2019) <sup>[10]</sup> | 9.6   | 147.81     | 43.5    | &     |
|                                            |       | 137.69     | 1.3     |       |
|                                            |       | 147.81     | 43.5    |       |
|                                            |       | 168.37     | 7.8     |       |
| Ditroi, et al. (2016) <sup>[8]</sup>       | 9.6   | 188.27     | 30.0    | &     |
|                                            |       | 285.49     | 4.4     |       |
|                                            |       | 316.19     | 3.0     |       |
|                                            |       | 147.81     | 43.5    |       |
| Naik, et al. (2023) <sup>[9]</sup>         | 9.6   | 147.81     | 43.5    | &     |

注: &当前评价值, 无需修正.

能量覆盖 47—23.1 MeV. 然而, 其低能段 (大质量厚度区) 的能点明显偏离 SRIM 计算曲线, 且  $|\Delta E/\Delta(\rho x)|$  随质量厚度增大反而减小, 与物理规律相悖.

实验 3 的叠层靶由前段 (实验 3a) 7 组 Al(11  $\mu\text{m}$ )–In(116  $\mu\text{m}$ )–Al(50  $\mu\text{m}$ )–Ti(10.9  $\mu\text{m}$ ) (降能段) 与后段 (实验 3b) 11 组 Au(23.1  $\mu\text{m}$ )–Al(11  $\mu\text{m}$ )–In(116  $\mu\text{m}$ )–Al(50  $\mu\text{m}$ )–Ti(10.9  $\mu\text{m}$ ) (测量段) 构成, 初始束能 33.7 MeV 经前段降至约 25.2 MeV 后入射后段, 文献给出 Au 箔能量覆盖 25.2—7.2 MeV.

该组测量段能点存在明显异常: 一是相同累积质量厚度处, 文献能点明显偏离 SRIM 计算值; 二是质量厚度 1.3—1.6  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  区间, 降能曲线局部趋于平缓,  $|\Delta E/\Delta(\rho x)|$  出现非单调变化, 与物理规律相悖.

上述不合理的能量赋值不仅影响了参考截面数值的应用, 也使待测截面无法与准确能量相对应, 进而导致截面数据偏离真实情况. 综合这两方面的系统性问题, 本工作对该组数据不予采用.

经上述筛选与修正后, 大部分实验数据在误差范围内趋于一致, 图 5(a)—(c) 分别展示了  $^{197}\text{Au}(\text{p},$

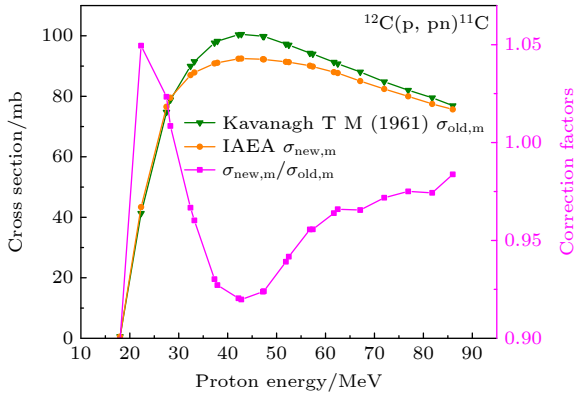


图3 Kavanagh 和 Bell (1961)<sup>[14]</sup> 使用的<sup>12</sup>C(p, pn)<sup>11</sup>C 监测截面修正因子

Fig. 3. Correction factors for the <sup>12</sup>C(p, pn)<sup>11</sup>C monitor cross sections applied to Kavanagh and Bell (1961)<sup>[14]</sup>.

x)<sup>196</sup>Au, <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>196(g+m1)</sup>Au 和 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>196m2</sup>Au 反应经修正与筛选后的实验数据.

### 3.2 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>194</sup>Au 反应

本工作从 EXFOR 数据库收集了 6 组 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>194</sup>Au (反应道为 (p, nt)+(p, d2n)+(p, p3n)) 的实验截面数据 (表 1, 图 6). 在衰变数据修正方面, 对于实验中所用衰变分支比或半衰期与 NuDat 3.0 当前评价值存在偏差的情况, 已汇总于表 5, 并依据表中所列修正因子对 Červenák 和 Lebeda (2019)<sup>[10]</sup> 测量 <sup>194</sup>Au 时所用的衰变分支比进行了修正. Szelecsenyi 等 (2007)<sup>[13]</sup>, Michel 等 (1997)<sup>[16]</sup> 及 Kavanagh 和 Bell (1961)<sup>[14]</sup> 采用的 <sup>194</sup>Au 半衰期与当前评价值偏差较小, 本工作未作修正. 参考截面的处理原则与 3.1 节一致: Červenák 和 Lebeda (2019)<sup>[10]</sup> 不作额外修正, Kavanagh 和 Bell(1961)<sup>[14]</sup> 已按当前评价值完成修正. Ditroi 等 (2016)<sup>[8]</sup> 的数据因存在与 3.1 节相同的叠层靶能量计算不自洽问题, 本工作不予采用. 经上述筛选与修正后, 各实验组数据在误差范围内趋于一致, 经修正与筛选

后的实验截面数据如图 7 所示.

综合以上分析, 本工作共收集了 9 组 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>196</sup>Au 和 6 组 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>194</sup>Au 的实验截面数据. 其中, Ditroi 等 (2016)<sup>[8]</sup> 因 γ 能谱测量干扰严重且叠层靶能量计算不自洽, Gusakow 等 (1961)<sup>[15]</sup> 因所用半衰期与当前评价值偏差过大 (约 9%) 且无法修正, 两组数据均予以排除. 在保留的数据中, 有 1 组进行参考截面修正; 针对 <sup>196g</sup>Au, <sup>196m2</sup>Au 和 <sup>194</sup>Au 的衰变分支比, 分别对 3 组、1 组、1 组实验数据进行相应比例修正. 修正后, 各实验组数据在重叠能区的一致性明显改善, 为 60 MeV 以下激发函数评价提供了可靠的数据基础.

## 4 激发函数评价

本工作经第 3 节所述的数据筛选与修正后, 两个反应的实验数据在整体上趋于一致, 且在 60 MeV 以下能区数据点较为丰富. 本研究采用中国核数据中心研发的 SPCC 程序 (spline fitting for multi-sets of correlative data) 对激发函数进行拟合. 该程序基于分段多项式样条方法, 可灵活设置样条阶数与节点参数, 并保证曲线在节点处连续光滑. 分段样条拟合在全局平滑约束下具备良好的局部适应性, 既能准确体现激发函数平稳变化的物理行为, 又能有效抑制离散数据点对全局拟合趋势的干扰, 适用于多来源、存在一定离散性的实验截面数据拟合. 基于此, 获得了 60 MeV 以下能区 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>196</sup>Au 和 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>194</sup>Au 反应的激发函数评价推荐值, 并提供了同质异能态 <sup>197</sup>Au(p, x)<sup>196(g+m1), m2</sup>Au 的反应截面作为参考. 本工作评价推荐值与经修正和筛选后的实验数据对比结果如图 5(a)—(c) 及图 7 所示.

针对上述两个反应道, 现有 3 项评价数据:

表 4 Ditroi 等 (2016)<sup>[8]</sup> 实验采用的入射质子能量、靶结构和材料等参数

Table 4. The parameters used in the experiment by Ditroi et al. (2016)<sup>[8]</sup>, such as the incident proton energy, stacked-foil targets, and material.

|      | 设备              | 初始能量/MeV  | 堆叠靶结构及厚度/μm                                                  | 堆叠层数 |
|------|-----------------|-----------|--------------------------------------------------------------|------|
| 实验1  | Cyclone110, LLN | 65        | Al(151.1)-Hf(10.54)-Al(56.5)-Al(26.9)-GaNi(17.7或15.9)-Au(25) | 18   |
| 实验2a | Cyclone110, LLN | 65        | W(21.3)-Al(250)-GaNi(13.35)-Cu(13.35)或Al(250)                | 12   |
| 实验2b | Cyclone110, LLN | 47        | Au(23.1)-Al(125)-W(21.3)-Al(250)-GaNi(13.2)-Cu(12.5)或Al(125) | 17   |
|      | 设备              | 初始能量(MeV) | 堆叠靶结构及厚度(um)                                                 | 堆叠层数 |
| 实验3a | CGR560, VUB     | 33.7      | Al(11)-In(116)-Al(50)-Ti(10.9)                               | 7    |
| 实验3b | CGR560, VUB     | 25.2      | Au(23.1)-Al(11)-In(116)-Al(50)-Ti(10.9)                      | 11   |

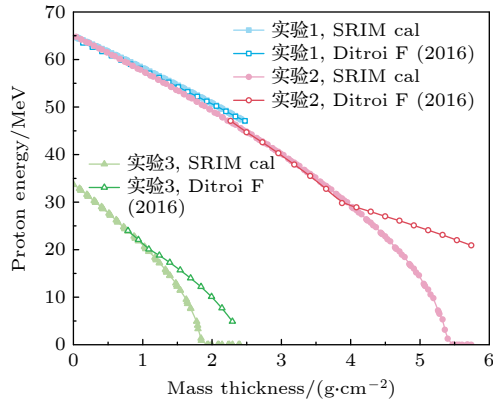


图4 Ditroi et al. (2016)<sup>[8]</sup> 三组叠层靶中质子降能曲线的SRIM计算结果

Fig. 4. SRIM-calculated proton energy degradation curves in the three stacked-foil targets reported by Ditroi et al. (2016)<sup>[8]</sup>.

JENDL-5.0<sup>[17]</sup> 与 TENDL-2025<sup>[18]</sup> 均以理论模型计算为主; IAEA 的拟合数据<sup>[7]</sup> 基于实验数据拟合, 其中  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  和  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应分别收录了 7 家<sup>[8,11-14,16,22]</sup> 和 5 家实验数据<sup>[8,10,13,14,16]</sup>, 能量区间覆盖超过 150 MeV. 该评价采用 Padé 有理函数模型, 以分子分母多项式之比对实验数据进行全局最小二乘拟合. 该方法在非线性行为复杂的条件下可保持良好的全局光滑性, 但对数据离散度较为敏感, 对实验数据筛选与修正程度要求高. JENDL-5.0<sup>[17]</sup>, TENDL-2025<sup>[18]</sup>, IAEA 的拟合数据<sup>[7]</sup> (图中标注为 IAEA fit) 三者与原始实验数据及基于微分厚靶产额反推的反应截面之间的对比, 展示于图 1(a) (针对  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应) 和图 6 (针对  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应); 与经过修正和筛选后的实验截面数据及本工作评价推荐值的对比, 见图 5(a) ( $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应) 和图 7 ( $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应). 其中 TENDL-2025 还提供了同质异能态  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{g}, \text{m}1, \text{m}2}\text{Au}$  的反应截面, 为便于与实验数据的对比, 本文将  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{g}, \text{m}1}\text{Au}$  合并为  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$  (见图 1(b) 和图 5(b)),  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m}2}\text{Au}$  的数据对应图 1(c) 和图 5(c).

与实验数据相比, 两个评价库在  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应的低能区均系统性偏低; TENDL-2025 在  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m}2}\text{Au}$  反应的高能区还呈现明显偏高趋势. IAEA 的拟合数据<sup>[7]</sup> 存在实验数据收集不完全的问题, 且仅基于统计方法对偏离较大的实验数据进行简单剔除, 未充分开展数据修正与异常剔除. 直接使用 Padé 拟合易受原始数据偏差干扰,

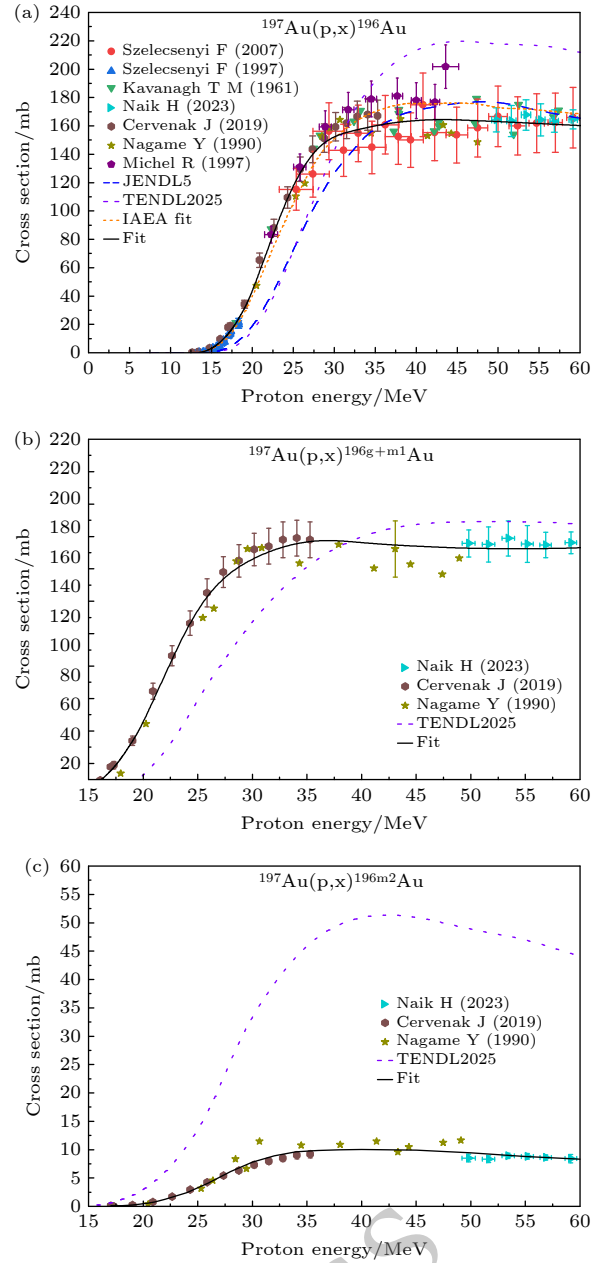


图5  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应截面经修正与筛选后的实验截面数据、评价库数据及本工作评价推荐值汇总 (a)–(c) 分别为  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ ,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$  和  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m}2}\text{Au}$  反应道

Fig. 5. Summary of  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  reaction cross sections, including evaluated experimental data, ENDF values, and recommended data obtained by fitting: (a)–(c) Correspond to the  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ ,  $^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$  and  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  reaction channels, respectively.

导致其推荐值系统性偏离真实截面趋势, 与本工作处理后的大于 30 MeV 能区的  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  实验数据, 以及大于 45 MeV 的  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  实验数据相比偏高.

由此可见, 现有 3 项评价价值均未从实验物理角

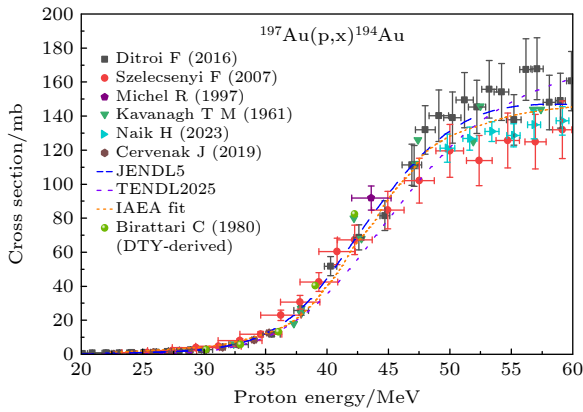


图 6  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应截面实验数据、评价库数据及微分厚靶产额反算截面汇总

Fig. 6. Summary of  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  reaction cross sections, including experimental data, ENDF values and reference data derived from differential thick-target yields.

度对实验数据进行充分的分析与修正, 实验数据对评价结果的约束作用有限, 导致各评价结果之间偏差较大, 且与实验数据的整体符合度普遍不理想. 相比之下, 本工作所得评价推荐值综合考虑了多项实验物理因素, 并采用局部可调、对数据离散容忍度适中的 SPCC 样条程序进行拟合, 与修正后实验数据的符合程度明显优于现有评价结果. 具体表现为: 不仅在低能区 ( $<30$  MeV) 有效改善了评价库数据系统性偏低的问题, 也提高了在  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  反应的 30—60 MeV 能区以及  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应 45—60 MeV 能区截面值的可靠性.

## 5 厚靶产额计算

为进一步验证上述评价推荐值的可靠性, 本节通过计算厚靶产额并与实验测量值进行比较, 从积分量的角度对评价推荐值进行检验. 厚靶产额是检验激发函数评价推荐值整体可靠性的重要物理量. 饱和厚靶产额  $Y(E_0)$  (单位为 MBq/C) 定义为辐照时间趋于无穷时, 单位入射粒子在靶中从入射能量  $E_0$  减速至反应阈值  $E_{\text{th}}$  过程中产生的放射性核素活度, 其积分表达式为<sup>[20,23,24]</sup>

$$Y(E_0) = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot N_A}{M} \int_{E_{\text{th}}}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{S(E)} dE \cdot \frac{1}{1.602 \times 10^{-19}} \cdot \frac{1}{10^6}, \quad (6)$$

式中,  $\sigma(E)$  为反应截面 ( $\text{cm}^2$ );  $M$  为原子量 ( $\text{g/mol}$ );  $\rho$  为靶密度 ( $\text{g/cm}^3$ );  $S(E)$  为质子在金靶中的阻止本领 (stopping power), 单位为  $\text{MeV/cm}$ . 本工作中阻止本领数据取自 SRIM-2010<sup>[25]</sup> 的计算值.

利用本工作推荐的激发函数, 计算了  $^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$ ,  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  和  $^{194}\text{Au}$  的厚靶产额, 并与 3 组实验测量数据<sup>[26–28]</sup> 进行对比, 结果如图 8 所示 (图中标注为 fit cal). 对于  $^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$ , 本工作推荐值与 Dmitriev 和 Molin(1983)<sup>[26]</sup> 的单点厚靶产额数据吻合良好; 由于 Abe 等 (1984)<sup>[27]</sup> 对多种典型反应 (如  $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{62,65}\text{Zn}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ni}(\text{p}, \text{x})^{57}\text{Ni}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Mo}(\text{p}, \text{x})^{96\text{m}+\text{g}}\text{Tc}$ ) 厚靶产额的测量结果普遍偏离当前评

表 5  $^{194}\text{Au}$  衰变分支比修正因子汇总

Table 5. Branching ratio correction factors for  $^{194}\text{Au}$  decay.

| 作者                                         | 半衰期/小时 | 特征射线能量/keV | 衰变分支比/% | 修正因子  |
|--------------------------------------------|--------|------------|---------|-------|
| Szelecsenyi, et al. (2007) <sup>[13]</sup> | 38.4   | 294        | 10.4    | *     |
|                                            |        | 328        | 61      |       |
|                                            |        | 293.5      | 11      |       |
| Michel, et al. (1997) <sup>[16]</sup>      | 38.0   | 328.40     | 63      | *     |
|                                            |        | 1104.1     | 2.14    |       |
|                                            |        | 1468.9     | 6.68    |       |
| Kavanagh and Bell (1961) <sup>[14]</sup>   | 39     | 291        | —       | —     |
|                                            |        | 327        | —       |       |
| Červenák and Lebeda (2019) <sup>[10]</sup> | 38.02  | 328.464    | 60.4    | 0.962 |
|                                            |        | 293.548    | 10.9    |       |
| Ditroi et al. (2016) <sup>[8]</sup>        | 38.02  | 328.464    | 62.8    | &     |
|                                            |        | 1468.882   | 6.8     |       |
| Naik, et al. (2023) <sup>[9]</sup>         | 38.02  | 293.55     | 10.9    | &     |
|                                            |        | 328.74     | 62.8    |       |

注: \*多线均存在偏差, 未修正; &当前评价值, 无需修正; —未写明, 无法修正

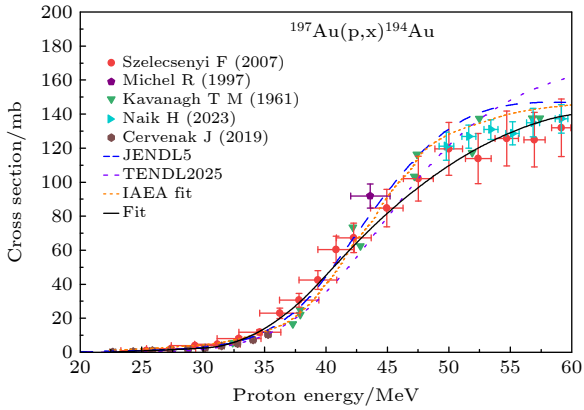


图 7  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应截面经修正与筛选后的实验截面数据、评价库数据及本工作评价推荐值汇总

Fig. 7. Summary of  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  reaction cross sections, including evaluated experimental data, ENDF values, and recommended data obtained by fitting.

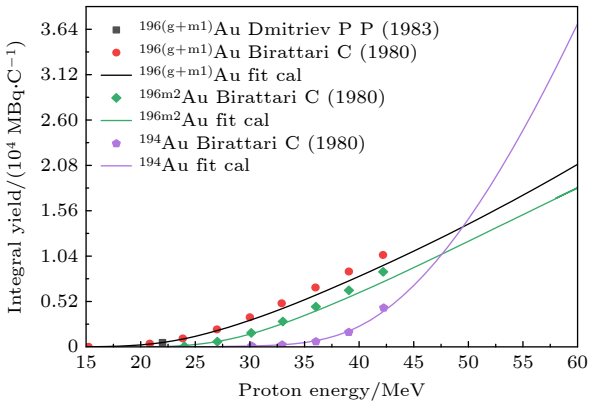


图 8  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g+m1})}\text{Au}$ ,  $^{196\text{m2}}\text{Au}$  和  $^{194}\text{Au}$  厚靶产额的计算值与实验测量值对比

Fig. 8. Comparison of calculated and experimental physical yields of  $^{196(\text{g+m1})}\text{Au}$ ,  $^{196\text{m2}}\text{Au}$  and  $^{194}\text{Au}$  from proton activation of Au.

价值约两倍, 存在系统性偏差的可能, 故本工作未将其数据纳入对比; 在 30 MeV 以上能区, Birattari 和 Bonardi(1984)<sup>[28]</sup> 的数据明显偏高. Birattari 和 Bonardi(1984)<sup>[28]</sup> 在 18 MeV 以上使用各个能点的质子辐照 (即不是使用降能片) 辐照 Al-Au-Al 靶片, 采用法拉第筒测量注量, 其给出形式非积分厚靶产额而是微分厚靶产额. 对于  $^{196\text{m2}}\text{Au}$ , 目前仅有 Birattari 和 Bonardi(1984)<sup>[28]</sup> 一组实验数据, 其在 30 MeV 以上能区同样高于本工作推荐值. 为进一步分析该偏差, 本文基于其微分厚靶产额, 结合 SRIM<sup>[25]</sup> 计算的阻止本领, 反推得到  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  反应在相应能点的截面 (见图 1 和图 6), 结果  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g+m1}), \text{m2}}\text{Au}$  反应截面同样呈现出系统性偏高的趋势; 且对于  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g+m1})}\text{Au}$

和  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ , Birattari 和 Bonardi(1984)<sup>[28]</sup> 微分厚靶产额反推得到的截面在约 30 MeV 处出现峰值后随能量升高而下降, 与激发函数在该能区应呈相对平缓变化的趋势不符. 对于  $^{194}\text{Au}$ , 本工作推荐值与 Birattari 和 Bonardi(1984)<sup>[28]</sup> 的实验数据总体符合良好. 厚靶产额计算结果与多数实验测量值符合良好, 验证了本工作推荐激发函数的可靠性, 该评价推荐值可作为质子核反应的参考截面, 应用于质子束流参数的监测工作.

## 6 总结与展望

本工作系统收集并评价了 60 MeV 以下能区  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  (含  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g+m1})}\text{Au}$  与  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m2}}\text{Au}$ ) 和  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  反应的实验截面数据, 综合考虑了衰变数据、参考截面、能点赋值和  $\gamma$  能谱测量等多项实验环节, 对实验数据进行系统的筛选与修正, 从而使大多实验数据在误差范围内趋于一致. 基于此, 采用 SPCC 样条拟合方法获得了上述 3 个反应道 60 MeV 以下能区的激发函数评价推荐值, 澄清了各能区的截面数据分歧, 所得评价推荐值整体可靠性优于 JENDL-5.0, TENDL-2025, IAEA 的拟合数据<sup>[7]</sup> 等现有评价结果.

基于推荐的激发函数计算了  $^{196(\text{g+m1})}\text{Au}$ ,  $^{196\text{m2}}\text{Au}$  和  $^{194}\text{Au}$  的厚靶产额, 计算结果与多数实验测量值符合良好, 进一步验证了评价推荐值的可靠性. Birattari 和 Bonardi(1984)<sup>[28]</sup> 的  $^{196}\text{Au}$  数据在 30 MeV 以上能区存在系统性偏高, 通过微分厚靶产额反算截面的结果也证实了这一系统性偏差.

本研究为束流监测候选反应提供了较为可靠的评价截面, 并为相关核数据评价库的更新与完善提供了参考依据. 由于现有实验数据相较于 IAEA 推荐的 11 个常用质子参考反应<sup>[6]</sup> 仍较为有限, 本工作所得评价结果未来仍需通过更多实验测量加以验证与完善. 此外,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  的截面比在较宽的质子能量范围内随质子能量单调变化且灵敏度较高, 在质子能量测量方面具有较大的应用潜力, 可作为后续研究的重点方向.

## 参考文献

- [1] Escher J E, Burke J T, Dietrich F S, Scielzo N D, Thompson I J, Younes W 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 353
- [2] Tárkányi F, Hermanne A, Ignatyuk A V, Takács S, Capote R

- 2022 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **331** 1169
- [3] Takács S, Tárkányi F, Sonck M, Hermanne A 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **188** 106
- [4] Barbier M 1969 *Induced Radioactivity* (Amsterdam: North-Holland Publishing Company) p180
- [5] Lu X T 2000 *Nuclear Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) p263 (in Chinese) [卢希庭 2000 原子核物理 (北京: 原子能出版社) 第 263 页]
- [6] IAEA Nuclear Data Section <https://www-nds.iaea.org/medical/index.html> [2026-03-10]
- [7] Tárkányi F, Hermanne A, Ignatyuk A V, Ditrói F, Takács S, Capote R 2024 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **333** 4123
- [8] Ditrói F, Tárkányi F, Takács S, Hermanne A 2016 *Appl. Radiat. Isot.* **113** 96
- [9] Naik H, Kim G, Lee C, Yang S C, Jang W Y, Nguyen H T, Kim K 2023 *Radiochim. Acta* **111** 655
- [10] Červenák J, Lebeda O 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **458** 118
- [11] Nagame Y, Nakahara H 1990 *Phys. Rev. C* **41** 889
- [12] Szelecsényi F 1997 *Ph. D. Dissertation* (Groningen: University of Groningen)
- [13] Szelecsényi F, Steyn G F, Kovács Z, van der Walt T N 2007 *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology* Nice, France, April 22–27, 2007 p101
- [14] Kavanagh T M, Bell R E 1961 *Can. J. Phys.* **39** 1172
- [15] Gusakow M, Albouy G, Poffé N, Riehl C 1961 *J. Phys. Radium* **22** 636
- [16] Michel R, Bodemann R, Busemann H, Daunke R, Gloris M, Lange H J, Klug B, Krins A, Leya I, Lüpke M, Neumann S, Reinhardt H, Schnatz-Büttgen M, Herpers U, Schiekel T, Sudbrock F, Holmqvist B, Condé H, Malmberg P, Suter M, Ditrach-Hannen B, Kubik P W, Synal H A, Filges D 1997 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **129** 153
- [17] Iwamoto O, Iwamoto N, Kunieda S, Minato F, Nakayama S, Abe Y, Tsubakihara K, Okumura S, Ishizuka C, Yoshida T, Chiba S, Otuka N, Sublet J C, Iwamoto H, Yamamoto K, Nagaya Y, Tada K, Konno C, Matsuda N, Yokoyama K, Taninaka H, Oizumi A, Fukushima M, Okita S, Chiba G, Sato S, Ohta M, Kwon S 2023 *J. Nucl. Sci. Technol.* **60** 1
- [18] Koning A J [https://tendl.web.psi.ch/tendl\\_2025/tendl2025.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl_2025/tendl2025.html) [2026-03-06]
- [19] National Nuclear Data Center <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/> [2026-03-06]
- [20] Wang J M, Kang M X, Huang X L 2016 *At. Energy Sci. Technol.* **50** 1729 (in Chinese) [王记民, 康梦霄, 黄小龙 2016 原子能科学技术 **50** 1729]
- [21] National Nuclear Data Center <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> [2026-03-06]
- [22] Yule H P, Turkevich A 1960 *Phys. Rev.* **118** 1591
- [23] Kang M X, Huang X L, Liu L L 2016 *At. Energy Sci. Technol.* **50** 2117 (in Chinese) [康梦霄, 黄小龙, 刘丽乐 2016 原子能科学技术 **50** 2117]
- [24] Liu Y Y, Huang X L, Wang J M 2024 *At. Energy Sci. Technol.* **58** 982 (in Chinese) [刘洋洋, 黄小龙, 王记民 2024 原子能科学技术 **58** 982]
- [25] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **268** 1818
- [26] Dmitriev P P, Molin G A 1983 *Radionuclide Yields for Thick Targets at 22 MeV Proton Energy* INDC(CCP)-188/L (Vienna: IAEA)
- [27] Abe K, Iizuka A, Hasegawa A, Morozumi S 1984 *J. Nucl. Mater.* **122** 972
- [28] Birattari C, Bonardi M 1984 *Appl. Radiat. Isot.* **35** 564

## Evaluation of excitation functions for $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$ reactions and calculation of thick target yields\*

LI Wenlin<sup>1)</sup>    JIANG Liyang<sup>1)†</sup>    ZHOU Xiaoyuan<sup>1)</sup>    WU Wenruo<sup>1)2)</sup>  
 GUO Hao<sup>1)</sup>    LI Ao<sup>1)</sup>    RUAN Xichao<sup>1)3)</sup>

1) (National Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2) (College of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

3) (School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

( Received 24 March 2026; revised manuscript received 14 April 2026 )

### Abstract

The  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  reactions are promising candidate reactions for proton beam monitoring. The two channels share the same target foil, allowing cross-checked beam monitoring with a wide energy coverage. The two product nuclei have half-lives on the order of days, which matches most proton irradiation schedules. Their decay data are reliable, with uncertainties below 5% in both the half-lives and the main  $\gamma$ -ray branching ratios.

\* Project supported by the National Key Research Program of China (Grant No. 2023YFA1606603) and the Continuous-Support Basic Scientific Research Program, China (Grant No. BJ010261223282).

† Corresponding author. E-mail: [jiangly@ciae.ac.cn](mailto:jiangly@ciae.ac.cn)

However, inconsistencies are present among the published experimental data for these reactions, and significant discrepancies are observed between the evaluated data library values and experimental data.

In this work, the experimental data below 60 MeV were collected and analyzed from an experimental nuclear physics standpoint. The data include nine datasets for  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$  and six datasets for  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$ . The analysis followed three steps. First, the decay parameters (half-life and  $\gamma$  branching ratio  $I_\gamma$ ) used in each original measurement were compared with the current evaluated values from NuDat 3.0, and a correction factor was applied where a clear bias was found. Second, for relative measurements, the reference cross sections used in the original work were compared with the current IAEA recommendations, and a point-by-point energy correction was applied. Third, datasets with identifiable systematic problems were excluded: for example, one experimental group used half-life values differing by nearly 10% from those given in NuDat 3.0 when calculating cross sections; measurements of  $^{196\text{m}2}\text{Au}$  activity via  $\gamma$ -ray spectroscopy sometimes utilized overlapping characteristic peaks, which led to inaccurate activity determination; and some experiments employed stacked-foil targets with incorrect energy calculations.

The processed experimental data are in good agreement within the uncertainties. The corrected data were fitted using the SPCC spline fitting program developed at the China Nuclear Data Center. Recommended excitation functions were obtained for  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196}\text{Au}$ ,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196(\text{g}+\text{m}1)}\text{Au}$ ,  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{196\text{m}2}\text{Au}$ , and  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194}\text{Au}$  below 60 MeV. Compared with JENDL-5.0 and TENDL-2025, the existing evaluations are systematically low at low energies for  $^{196}\text{Au}$ , whereas JENDL-5.0, TENDL-2025, and the IAEA Padé fit of Tárkányi et al. are systematically high above 30 MeV for  $^{196}\text{Au}$  and above 45 MeV for  $^{194}\text{Au}$ .

Integral yield curves over the studied energy range were derived and compared with experimentally measured yields at specific energy points. Similarly, experimental thick-target yields were collected and analyzed from an experimental nuclear physics standpoint. One experimental group reported thick-target yields for several common reactions, including  $^{\text{nat}}\text{Cu}(\text{p}, \text{x})^{62,65}\text{Zn}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ni}(\text{p}, \text{x})^{57}\text{Ni}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{p}, \text{x})^{48}\text{V}$  and  $^{\text{nat}}\text{Mo}(\text{p}, \text{x})^{96\text{m}+\text{g}}\text{Tc}$ , whose results deviated from IAEA recommended values by a factor of about two; thus, these data were excluded from comparison in this work. For some experimental data reported as differential thick-target yields, this work utilized SRIM-calculated stopping power data to derive reaction cross sections from yields. These cross sections were notably higher than all existing experimental data above 30 MeV, indicating a systematic overestimation that led to elevated thick-target yield values. After rejecting these significantly outlying datasets, the obtained results were in good agreement with the experimental data.

The recommended data obtained by fitting showed noticeably better agreement with the corrected cross-section data than existing evaluated results. The experimental data within the 30–60 MeV range fall into two distinct groups, and the evaluated libraries also disagree with each other in this range. This study therefore provides valuable data support for proton beam monitoring and contributes to the extension of the database. These results should be further checked by direct measurements in the future because the available experimental data are very scarce. Additionally, the cross-section ratios of  $^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{x})^{194,196}\text{Au}$  exhibit significant energy dependence over a wide proton energy range, indicating that these reaction cross sections can be employed for proton energy determination, which may guide subsequent research.

**Keywords:** proton excitation functions, nuclear data evaluation, thick target yields, beam monitoring

**DOI:** 10.7498/aps.75.20260410

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260410