

文章编号: 1007-4627(2017)03-0446-04

## $^{10}\text{Be}$ 中子谱因子的实验研究

李二涛<sup>1</sup>, 李志宏<sup>2</sup>, 李云居<sup>2</sup>, 郭冰<sup>2</sup>, 颜胜权<sup>2</sup>, 苏俊<sup>2</sup>, 曾晟<sup>2</sup>, 王友宝<sup>2</sup>, 连钢<sup>2</sup>, 刘建成<sup>2</sup>,  
甘林<sup>2</sup>, 樊启文<sup>2</sup>, 李鑫悦<sup>2</sup>, 苏毅<sup>2</sup>, 马田丽<sup>2</sup>, 罗奇<sup>1</sup>, 胡世鹏<sup>1</sup>, 郝昕<sup>1</sup>, 孙慧斌<sup>1</sup>,  
谌阳平<sup>2</sup>, 周勇<sup>2</sup>, 韩治宇<sup>2</sup>, 裴常进<sup>2</sup>, 柳卫平<sup>2</sup>

(1. 深圳大学物理与能源学院, 广东 深圳 518060;

2. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:** 核谱因子描述了单粒子轨道中核子的占有状态, 在核结构和核天体物理中有重要的应用。目前国际上 $^{10}\text{Be}$ 中子谱因子的研究结果存在3倍左右的差异。本实验利用中国原子能科学研究院HI-13串列加速器的高灵敏度Q3D磁谱仪, 对 $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$ 反应角分布进行了精确测量。通过实验数据和扭曲波玻恩近似(DWBA)计算结果进行比较, 导出了 $^{10}\text{Be}$ 的中子谱因子。该结果与转动不变壳模型理论及曾敏尔等的评价结果基本一致。利用该结果可以得到 $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ 的天体物理反应率, 评价该反应在相关天体环境中对CNO循环种子核 $^{12}\text{C}$ 的影响, 为核结构和核天体物理提供可靠数据。

**关键词:** 扭曲波玻恩近似; 中子谱因子; Q3D磁谱仪

**中图分类号:** O571.41+6      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.446

## 1 引言

核谱因子是实验微分截面与扭曲波玻恩近似(Distorted Wave Born Approximation, DWBA)理论计算微分截面的比值。它描述了单粒子轨道中核子的占有状态, 在核结构和核天体物理中有重要的应用。在核结构中, 借助于核谱因子不仅可以确定原子核准粒子能级的组态混合结构, 还可以确定偶偶核能级的自旋、解释幻核附近原子核的特性等<sup>[1]</sup>。在核天体物理中, 恒星的能量来源及元素丰度等信息可以通过天体物理反应网络计算得出, 其中反应网络所需的直接辐射俘获反应率可以通过核谱因子间接确定<sup>[2]</sup>。

恒星能量主要来源于氢燃烧过程, 该过程的反应路径主要有两种: p-p反应链和CNO循环, 这两种路径的净效应都是将4个氢原子核转化为一个氦原子核。温度较低时, p-p反应链起主要作用, 温度较高时, CNO循环将取代p-p反应链成为氢燃烧的主要途径。CNO循环的流量在很大程度上取决于种子核 $^{12}\text{C}$ 的数目, 通常认为 $3\alpha$ 过程即 $^4\text{He}(\alpha, \gamma)^8\text{Be}(\alpha, \gamma)^{12}\text{C}^*$  ( $E_x=7.654$  MeV)反应链, 是合成 $^{12}\text{C}$ 核的主要路径<sup>[3, 4]</sup>。但是在特定环境中,  $^4\text{He}(\alpha n, \gamma)^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 反应链也能产生

大量的 $^{12}\text{C}$ 核<sup>[5]</sup>, 例如加州理工学院凯洛格辐射实验室的研究者通过反应网络计算得出, 在超新星爆发过程中密度 $\rho=5\times 10^4$  g/cm<sup>3</sup>、温度 $T=4$  GK时,  $^4\text{He}(\alpha n, \gamma)^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 反应链产生的 $^{12}\text{C}$ 核是 $3\alpha$ 过程的40倍<sup>[6]</sup>。不过, 同时他们也指出, 由于 $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ 与 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 反应竞争, 会减少 $^9\text{Be}$ 核素, 进而影响 $^{12}\text{C}$ 的丰度, 因此以这种方式产生 $^{12}\text{C}$ 核的多少受制于 $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ 反应<sup>[6]</sup>。目前,  $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ 反应的实验数据十分匮乏, 并且直接测量非常困难, 该反应可以通过测量 $^{10}\text{Be}$ 的中子谱因子间接确定。

目前国际上,  $^{10}\text{Be}$ 中子谱因子的研究结果差异非常大。理论上, 美国阿贡国家实验室、美国堪萨斯大学和乌克兰核物理研究所给出的结果分别为2.35<sup>[7]</sup>, 0.98<sup>[8]</sup>和1.41<sup>[9]</sup>。实验上, 多家大学和实验室分别通过测量 $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}$ <sup>[10-14]</sup>,  $^{10}\text{Be}(p, d)^9\text{Be}$ <sup>[15]</sup>,  $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{10}\text{Be}$ <sup>[16]</sup>及 $^9\text{Be}(^{10}\text{Be}, ^9\text{Be})^{10}\text{Be}$ <sup>[17]</sup>反应得到了 $^{10}\text{Be}$ 的中子谱因子。其中, 美国阿贡国家实验室、美国马里兰大学和美国科罗拉多大学的研究人员分别利用11.8, 2.8和17.3 MeV的氘通过测量 $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}$ 反应角分布得到了1.67<sup>[10]</sup>, 1.78<sup>[11]</sup>和1.21<sup>[12]</sup>的结果, 后来美国圣母大学的研究人员利用15 MeV的极化核

收稿日期: 2016-11-20; 修改日期: 2017-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11505117, 11490560, 11475264, 11321064, 11375269, 11605114); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB834406); 国家重点研发计划项目(2016YFA0400502); 广东省自然科学基金资助项目(2015A030310012, 2016A030310042)

作者简介: 李二涛(1981-), 男, 河南驻马店人, 讲师, 博士, 从事原子核与粒子物理研究, E-mail: let@szu.edu.cn。

素氛得到了2.10的结果<sup>[13]</sup>, 而美国佛罗里达大学根据 $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{10}\text{Be}$ 反应得到2.07的结果<sup>[16]</sup>。这些实验结果都介于理论值2.35和0.98之间。2005年美国密西根州立大学的刘晓东<sup>[15]</sup>通过 $^{10}\text{Be}(p, d)^9\text{Be}$ 反应得到2.99的结果远大于已有的实验及理论值。同一年曾敏儿等<sup>[14]</sup>对这些结果进行了系统总结, 认为 $^{10}\text{Be}$ 中子谱因子的合理值应该为1.58。但是2011年美国密西根州立大学的Grinyer等<sup>[17]</sup>通过 $^9\text{Be}(^{10}\text{Be}, ^9\text{Be})^{10}\text{Be}$ 系统得到 $^{10}\text{Be}$ 中子谱因子为1.93, 比1.58大了近25%。这些结果存在相当大的差异, 为了进一步澄清该项分歧, 有必要通过一个不同的转移反应对 $^{10}\text{Be}$ 的中子谱因子进行一次全新的测量。

## 2 实验测量

在中国原子能科学研究院串行加速器Q3D磁谱仪上, 利用40 MeV的 $^9\text{Be}$ 束流轰击厚度为 $90\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 $^{13}\text{C}$ 同位素靶, 对 $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$ 反应角分布进行测量。实验设置如图1所示, 在 $0^\circ$ 方向放置一个可移动的法拉第筒用来测量束流强度, 对大角度( $\geq 6^\circ$ )反应截面进行绝对归一。在靶下游 $20^\circ$ 方向放置一个 $\Delta E-E$ 探测器望远镜来测量弹性散射的 $^9\text{Be}$ 粒子, 用来监测束流的稳定性和对小角度数据( $2^\circ \sim 6^\circ$ )进行相对归一。法拉第筒大角度绝对归一和 $\Delta E-E$ 探测器望远镜小角度相对归一的方法已经成功运用于 $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^8\text{Li})^{14}\text{N}$ <sup>[18]</sup>、 $^{12}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{11}\text{B}$ <sup>[19]</sup>和 $^{15}\text{N}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{16}\text{N}$ <sup>[20]</sup>等反应的测量中。

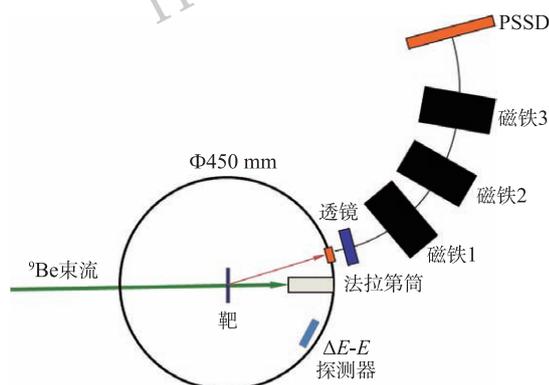


图1 (在线彩图) 实验装置示意图

在Q3D磁谱仪入口放置一直径5 mm的光阑, 其有效接收立体角为 $0.34\ \text{mSr}$ 。磁谱仪能够分开不同磁刚度的离子并聚焦相同磁刚度的离子。反应产物通过磁谱仪分离聚焦, 实验的目标粒子被置于焦平面位置处的二维位置灵敏半导体探测器(two-dimensional position sensitive silicon detector, PSSD)收集。PSSD的二维

位置信息能够保证进入探测器立体角内的所有离子被完全收集。由于磁刚度相同的不同离子其能量不一样, PSSD的能量信息能够区分具有相同磁刚度的不同离子。这样就实现了磁谱仪和PSSD的组合, 可以对不同性质及不同能量的离子进行鉴别。

图2给出了PSSD在 $\theta_{\text{lab}}=10^\circ$ 处的能量位置二维谱和目标产物 $^{10}\text{Be}$ 的焦平面位置谱。在图2(a)中, 虚线方框内的事例为束流在 $^{13}\text{C}$ 上发生转移反应出射的 $^{10}\text{Be}$ , 该图中间的事例为匹配磁钢度的 $\alpha$ , 下方的事例为 $\alpha$ 源事例。图2单维谱为虚线方框内 $^{10}\text{Be}$ 粒子的焦平面位置谱, 可以看出几乎没有任何杂质的干扰。在进行束流归一后, 可以得到 $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$ 转移反应的角分布, 如图3中的点所示。

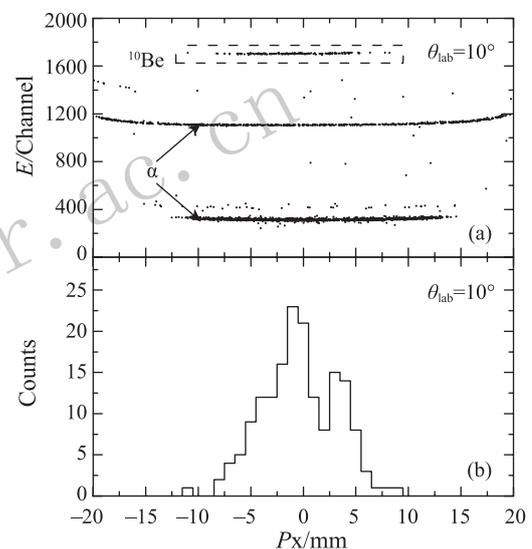


图2  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$ 反应产物在 $\theta_{\text{lab}}=10^\circ$ 处的能量位置二维谱和目标产物 $^{10}\text{Be}$ 的焦平面位置谱

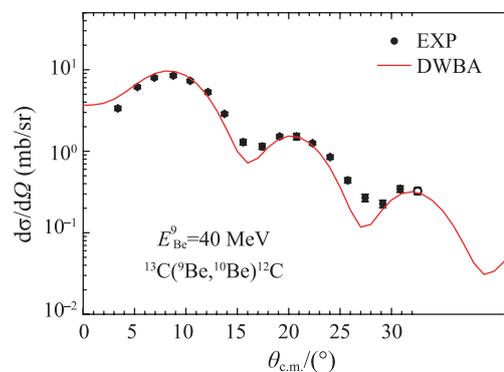


图3 (在线彩图)  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$ 转移反应角分布的实验及DWBA理论计算结果

## 3 DWBA理论计算

用有限程扭曲波玻恩近似方法程序FRESKO<sup>[21]</sup>对

实验角分布进行分析。 $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$  实验微分截面与 DWBA 理论计算的微分截面以及核谱因子的关系可表示为

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} = S_{^{13}\text{C}} S_{^{10}\text{Be}} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{DWBA}}, \quad (1)$$

其中： $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}}$  为实验测量的微分截面； $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{DWBA}}$  为 DWBA 理论计算的微分截面； $S_{^{13}\text{C}} = 0.81 \pm 0.04$  是  $^{13}\text{C}$  的中子谱因子<sup>[22]</sup>。

在 DWBA 理论计算中，采用的光学模型为 Woods-Saxon 势。入射道和出射道的光学势列于表 1 中。其中入射道的光学势是利用  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^9\text{Be})^{13}\text{C}$  弹性散射角分布得到的<sup>[18]</sup>。由于  $^{10}\text{Be}$  不稳定，没有  $^{10}\text{Be} + ^{12}\text{C}$  的光学势，因此出射道用  $^9\text{Be} + ^{12}\text{C}$  的光学势<sup>[23]</sup>来近似。

表 1 DWBA 理论计算用的光学势参数。V, W 是以 MeV 为单位的势参数；r, a 是以 fm 为单位的约化半径和弥散参数；单粒子的约化半径和弥散参数分别为  $r_0 = 1.25 \text{ fm}$  和  $a_0 = 0.65 \text{ fm}$ 。

光学势参数	出射道 <sup>[23]</sup>	入射道 <sup>[18]</sup>
V	33.69	127.0
$r_V$	0.97	0.80
$a_V$	0.92	0.78
$W_V$	6.52	13.9
$r_W$	1.51	1.25
$a_W$	0.48	0.70
$r_C$	1.20	1.00

经过归一后的 DWBA 理论计算得到的  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$  转移反应角分布如图 3 中的实线所示。最终根据公式 1 导出的  $^{10}\text{Be}$  中子谱因子为  $1.46 \pm 0.13$ 。结果的误差主要来自于统计误差、靶厚的不确定度和  $^{13}\text{C}$  中子谱因子的误差。

图 4 显示了本实验和目前国际上已有的实验和理论

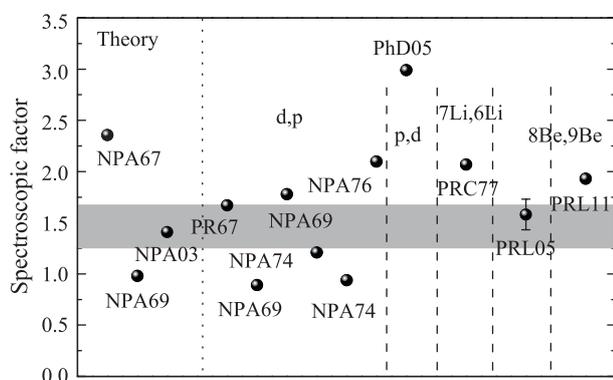


图 4  $^{10}\text{Be}$  中子谱因子的理论和实验结果  
图中标明了数据发表的杂志及年代。其中灰色横带代表本实验的结果，横带的宽度表示实验误差。

结果。本实验结果与乌克兰核物理研究所通过转动不变壳模型理论得到的结果<sup>[9]</sup>及曾敏儿等<sup>[14]</sup>评价的结果基本一致<sup>[14]</sup>，与刘晓东等<sup>[15]</sup>得到的结果差异较大。另外早期的结果可能受到实验条件的限制，得到的结果差异比较大。而 2011 年密西根州立大学的 Grinyer 等<sup>[17]</sup>是通过 120 MeV/u 的敲出反应得到的结果，不同方法得到的结果可能受到不同机制的影响，结果也会有一定的差异。

## 4 结论

本工作在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器 Q3D 磁谱仪上，利用加速器提供的 40 MeV 的  $^9\text{Be}$  束流，轰击  $^{13}\text{C}$  同位素靶，首次精确测量了  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$  转移反应角分布。通过对转移反应角分布的 DWBA 进行分析比较，提取的  $^{10}\text{Be}$  的中子谱因子为  $1.46 \pm 0.13$ 。本工作的结果与转动不变壳模型理论得到的 1.41<sup>[9]</sup>及曾敏儿等<sup>[14]</sup>得到 1.58 的评价结果基本一致。

根据实验得到的  $^{10}\text{Be}$  中子谱因子并结合辐射俘获理论可以得到  $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$  的天体物理反应率，然后将反应率数据带入反应网络中即可得到该反应在相关天体环境中对 CNO 循环种子核  $^{12}\text{C}$  的影响。

## 参考文献：

- [1] YAN Y M. Nuclear Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. (in Chinese)  
(颜一鸣. 原子核物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.)
- [2] ILIADIS C. Nuclear Physics of Stars[M]. Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2007.
- [3] COOK C W, FOWLER W A, LAURITSEN C C, et al. Phys Rev, 1957, **107**: 508.
- [4] FYNBO H O U, DIGET C A, BERGMANN U C, et al. Nature, 2005, **433**: 136.
- [5] WOOSLEY S E, HOFFMAN R D. Astrophys J, 1992, **395**: 202.
- [6] WREAN P R, BRUNE C R, KAVANAGH R W. Phys Rev C, 1994, **49**: 1205.
- [7] COHEN S, KURATH D. Nucl Phys A, 1967, **101**: 1.
- [8] VARMA S, GOLDHAMMER P. Nucl Phys A, 1969, **125**: 193.
- [9] KYRYANCHUK V M, RUDCHIK A T, BUDZANOWSKI A, et al. Nucl Phys A, 2003, **726**: 231.
- [10] SCHIFFER J P, MORRISON G C, SIEMSEN R H, et al. Phys Rev, 1967, **164**: 1274.
- [11] ROUSH M L, YOUNG F C, FORSYTH P D, et al. Nucl Phys A, 1969, **128**: 401.
- [12] ANDERSON R E, KRAUSHAAR J J, RICKEY M E, et al. Nucl Phys A, 1974, **236**: 77.

- [13] DARDEN S E, MURILLO G, SEN S. Nucl Phys A, 1976, **266**: 29.
- [14] TSANG M B, LEE J, LYNCH W G. Phys Rev Lett, 2005, **95**: 222501.
- [15] LIU X D. The study of (p, d) reactions on  $^{13}\text{C}$ ,  $^{11}\text{B}$ , and  $^{10}\text{Be}$  in inverse kinematics[D]. Michigan State University, 2005.
- [16] KEMPER K W, MOORE G E, PUIGH R J, *et al.* Phys Rev C, 1997, **15**: 1726.
- [17] GRINYER G F, BAZIN D, GADE A, *et al.* Phys Rev Lett, 2011, **106**: 162502.
- [18] LI Z H, LI Y J, SU J, *et al.* Phys Rev C, 2013, **87**: 017601.
- [19] LI E T, LI Z H, LI Y J, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 067601.
- [20] LI E T, GUO B, LI Z H, *et al.* Chin Phys C, 2016, **40**: 114104.
- [21] THOMPSON I J. Comput Phys Rep, 1988, **7**: 167.
- [22] GUBLER H P, PLATINER G R, SICK I, *et al.* Nucl Phys A, 1977, **284**: 114.
- [23] KAMYS B, JARCZYK L, RUDY Z, *et al.* Nucl Phys A, 1983, **406**: 193.

## Measurement of the Neutron Spectroscopic Factor in $^{10}\text{Be}$

LI Ertao<sup>1,1)</sup>, LI Zhihong<sup>2</sup>, LI Yunju<sup>2</sup>, GUO Bing<sup>2</sup>, YAN Shengquan<sup>2</sup>, SU Jun<sup>2</sup>, ZENG Sheng<sup>2</sup>, WANG Youbao<sup>2</sup>, LIAN Gang<sup>2</sup>, LIU Jiancheng<sup>2</sup>, GAN Lin<sup>2</sup>, FAN Qiwen<sup>2</sup>, LI Xinyue<sup>2</sup>, SU Yi<sup>2</sup>, MA Tianli<sup>2</sup>, LUO Qi<sup>1</sup>, HU Shipeng<sup>1</sup>, HAO Xin<sup>1</sup>, SUN Huibin<sup>1</sup>, SHEN Yangping<sup>2</sup>, ZHOU Yong<sup>2</sup>, HAN Zhiyu<sup>2</sup>, PEI Changjin<sup>2</sup>, LIU Weiping<sup>2</sup>

(1. College of Physics and Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

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

**Abstract:** Spectroscopic factor describes the overlap between the initial and final states and gives some information on the occupancy of a given single-particle orbiting around nuclear. It plays an important role in a variety of topics on nuclear structure and nuclear astrophysics. Nowadays, several experiments have been performed to study the neutron spectroscopic factor of  $^{10}\text{Be}$ , but the results have a big difference with each other. In order to clarify this discrepancy, new measurement is highly needed. In this work, the angular distribution of  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^{12}\text{C}$  reaction was measured at the Q3D magnetic spectrometer of the HI-13 tandem accelerator, China Institute of Atomic Energy, Beijing. And then, the neutron spectroscopic factor of  $^{10}\text{Be}$  was derived by normalizing the calculational differential cross-sections with the distorted-wave Born approximation to the experimental data. The present value is in good agreement with that obtained by Tsang *et al.* and also in good agreement with that derived from translationary invariant shell model calculation. One can use this result to calculate the  $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$  reaction rates and calculate its influence to the production of  $^{12}\text{C}$ .

**Key words:** distorted-wave born approximation; neutron spectroscopic factor; Q3D magnetic spectrometer

**Received date:** 20 Nov. 2016; **Revised date:** 30 Mar. 2017

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (11505117, 11490560, 11475264, 11321064, 11375269, 11605114); National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB834406); National key Research and Development Project of China (2016YFA0400502); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2015A030310012, 2016A030310042)

1) E-mail: [let@szu.edu.cn](mailto:let@szu.edu.cn).