

文章编号: 1007-4627(2018)01-0023-05

400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶核反应重电离粒子前后关联研究

郑素华^{1,2}, 杨文锦^{1,2}, 张东海², 苗慧峰²

(1. 太原工业学院理学系, 太原 030008;
2. 山西师范大学现代物理研究所, 山西 临汾 041004)

摘要: 对 400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶核反应重电离粒子的前后关联进行了研究。重电离粒子来源于靶核碎片, 分为灰径迹粒子和黑径迹粒子两种。实验结果很好地验证了核-核碰撞几何模型。灰径迹粒子的发射在前、后半球是各向异性的, 而黑径迹粒子的发射基本是一致的。向前、向后发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子平均多重数对重电离粒子数 n_h 呈线性依赖, 黑径迹粒子、灰径迹粒子的向前发射随 n_h 的增加而增加的幅度分别大于其向后发射随 n_h 的增加而增加的幅度, 但核内级联效应受靶核大小的影响, 向后半球内发射的灰径迹粒子平均多重数随 n_h 的增加有饱和现象, 这些多重数关联特性基本上可以利用基于碰撞几何的旁观体-反应体模型及级联蒸发模型来解释。

关键词: 重电离粒子; 多重数; 平均多重数; 关联

中图分类号: O572.21⁺¹

文献标志码: A

DOI: [10.11804/NuclPhysRev.35.01.023](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.023)

1 引言

在相对论重离子碰撞过程中, 次级粒子不伴随反应产生, 而需要一个形成时间。在实验室系下, 快粒子的形成时间较短, 而慢粒子的形成时间较长, 且它们在靶核内进行强子化, 同时可能与周围的靶核物质再次作用产生级联粒子。依赖于入射强子所撞击的靶核数, 我们知道在靶核内有能量沉积, 却没有对靶核旁观体内级联反应的准确估计, 特别是对靶核碎裂区域内级联效应的正确估计, 就很难对相对论性核-核反应实验结果给出合理解释。由于缺乏靶核碎裂区域内的系统实验结果, 且目前没有对强子化物质形成时间的确切解释及完善的包含级联粒子产生的理论模型, 以至于我们对强子化过程中时空演化过程缺乏较好的理解。为了增加对核反应机制的了解, 对靶核碎裂区粒子的性质进行实验研究是非常重要的。

鉴于强子-核反应末态粒子的向后发射是受反应动力学限制的, 人们近年来极大地重视强子-核及核-核反应前后半球内末态粒子的研究。目前, 对于高能强子-核、核-核反应质子和 π 介子的向后发射已经有了大量研究^[1-5], 大家普遍认为, 由于累积效应, 碰撞初期产生的 π 介子会向后发射, 而靶核内核子会吸收次级 π 介子, 进而引起质子向后发射。因此, 进行相对论重离

子诱发乳胶核反应重电离粒子前后关联研究, 可以对反应后粒子的前后发射机制进行探索, 不仅有助于揭示核反应的动力学性质, 还可以得到靶核内粒子积累发射方面的信息。

对于相对论性重离子诱发乳胶核反应产生的簇射粒子、重电离粒子之间的多重数关联人们已经进行了较多的研究^[1-10], 但对于较低能区离子诱发乳胶核反应产生的簇射粒子、重电离粒子之间的多重数关联的研究相对较少^[1]。本文则主要研究 400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶核反应重电离粒子的前后关联。

2 实验描述与末态粒子分类

本实验中乳胶的照射是在日本放射线医学综合研究所(NIRS)重离子医用加速器(HIMAC)上进行, 照射束流为 400 AMeV ^{12}C , 束流通量为 3 000 离子/厘米², 束流沿平行于乳胶平面照射, 核乳胶为由山西师范大学现代物理研究所生产的核-4 电子全灵敏型乳胶, 乳胶体积为 5 cm×5 cm×1 cm, 每个乳胶片的厚度为 500 μm 。照射后乳胶的后处理在山西师范大学现代物理研究所进行。

400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶核作用事例利用重光生物研究显微镜沿径迹进行扫描, 物镜为 100 倍浸油镜头,

收稿日期: 2017-06-05; 修改日期: 2017-08-17

基金项目: 太原工业学院青年科学基金项目(2014LQ07); 国家自然科学基金资助项目(11054100); 山西省回国留学人员基金项目(2011-058)

作者简介: 郑素华(1984-), 女, 山西文水人, 讲师, 从事中高能核物理方面研究; E-mail: zhengsh425@126.com。

目镜放大倍数为 15 倍。为了避免乳胶畸变的影响，扫描从距乳胶边缘 0.5 cm 处开始，上下两边各空 0.5 cm。我们一共找到 1193 个作用事例，舍弃距乳胶上下表面 30 μm 内的核作用事例和 6 个弹性作用事例，我们选择 793 个核作用事例用于本文的分析。

根据原子核乳胶实验技术惯例，把相对论重离子诱发乳胶核反应的末态粒子分成四类^[12]。

(1) 簇射粒子 N_s ，也称为极小电离粒子，主要由速度大于 $0.7c$ 的 π 介子组成，其电离密度小于 $1.4I_0$ ，这里 I_0 为相对论性单电荷粒子的极小电离密度， c 为光速。簇射粒子数(多重数)用 n_s 表示。

(2) 灰径迹粒子 N_g ，也叫靶核反冲质子，在核乳胶中射程大于 3 mm，电离颗粒密度为 $1.4I_0 < I < 9I_0$ ，主要由靶核反冲质子构成，另外还有少量的 K 介子和 π 介子。灰径迹粒子数(多重数)用 n_g 表示。

(3) 黑径迹粒子 N_b ，也叫靶核蒸发碎片，在核乳胶中射程小于 3 mm，电离颗粒密度大于 $9I_0$ ，主要是靶核在碰撞后期受激蒸发产生的动能 $E_K < 26$ MeV 的质子。黑径迹粒子数(多重数)用 n_b 表示。

灰径迹粒子与黑径迹粒子统称重电离粒子 N_h ，也称为慢粒子，其粒子数(多重数) $n_h = n_g + n_b$ 。

(4) 弹核碎片 N_f ，为没有发生碰撞的弹核粒子剩余物。

由于重电离粒子多重数 n_h 与靶核的大小有很强的关联性，所以也用 n_h 的大小来区分碳核与不同靶核的作用。其中 $n_h \leq 1$ ，认为是入射粒子与氢靶(H, $A=1$)作用， $2 \leq n_h \leq 7$ 是入射粒子与碳氮氧靶(CNO, $A=14$)发生作用， $n_h \geq 8$ 是入射粒子与溴化银靶(AgBr, $A=94$)发生作用，而 $n_h \geq 0$ 是入射粒子与平均质量为 73 的核乳胶($A=73$)碰撞事例。

在核乳胶实验中，我们用重电离粒子多重数来表征碰撞参数的大小，若 n_h 的值较大(≥ 28)，说明碰撞参数较小，弹核和靶核碰撞剧烈，即发生中心碰撞；若 n_h 很小(≤ 1)，则碰撞参数很大，此时弹核和靶核之间无核作用，即发生电磁离解。若末态粒子的发射角 $\theta < 90^\circ$ ，则为向前发射的粒子，而发射角 $\theta \geq 90^\circ$ 的为向后发射的粒子。我们用 $\langle n_g^f \rangle < \langle n_b^f \rangle$ 来表示向前发射的灰径迹粒子和黑径迹粒子平均多重数；用 $\langle n_g^B \rangle < \langle n_b^B \rangle$ 表示向后发射的灰径迹粒子和黑径迹粒子平均多重数。

3 前后半球内重电离粒子多重数

对于扫描到的 793 个 400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶非弹核作用事例，我们对每个事例中的灰径迹粒子与黑径迹粒子的多重数及发射角进行测量，表 1 给出了 400

AMeV ^{12}C 诱发乳胶不同靶核作用的灰径迹粒子、黑径迹粒子以及重电离粒子在前后半球内的平均多重数，由表可以得出。

(1) 向前、向后发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子的平均多重数都与靶核大小有关联。随着靶核的增大，向前、向后发射的的灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子的平均多重数均随之增多，说明弹核和靶核作用的剧烈程度在增加，核内碰撞粒子数目在增多。

(2) 向前发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子的平均多重数明显会大于向后发射的。

表 1 400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶不同靶核作用灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子在前后半球内的平均多重数

靶	轻靶(H)	乳胶靶(CNO)	重靶(AgBr)
$\langle n_g^f \rangle$	0.510 ± 0.037	0.816 ± 0.045	1.990 ± 0.126
$\langle n_g^B \rangle$	0.119 ± 0.017	0.241 ± 0.021	0.683 ± 0.064
$\langle n_b^f \rangle$	2.152 ± 0.054	3.000 ± 0.107	6.914 ± 0.228
$\langle n_b^B \rangle$	1.139 ± 0.045	1.544 ± 0.058	3.462 ± 0.126
$\langle n_h^f \rangle$	2.662 ± 0.060	3.816 ± 0.130	8.905 ± 0.250
$\langle n_h^B \rangle$	1.258 ± 0.047	1.784 ± 0.066	4.146 ± 0.134

表 2 给出了 400 AMeV ^{12}C 诱发核乳胶不同靶核作用灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子在前、后半球的产额比 $(F/B)_b$ 、 $(F/B)_g$ 、 $(F/B)_h$ ，由表所给结果可见。

(1) 靶核质量的变化引起灰径迹粒子的 $(F/B)_g$ 显著变化，灰径迹粒子向前发射的几率会随之减小，相应的向后发射的几率在增加，证实灰径迹粒子向前、向后发射是不对称的，为各向异性发射，这是碰撞初期核内级联引起的。

(2) 随着靶核大小的增加，黑径迹粒子的前后产额比 $(F/B)_b$ 却变化甚微，说明黑径迹粒子向前、向后发射的几率几乎是无变化的，证明黑径迹粒子在前、后半球内发射的不对称性远低于灰径迹粒子。

(3) 重电离粒子的前、后半球产额比 $(F/B)_h$ 也随靶核的增大而变化甚微。

表 2 400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶不同靶核作用的前后产额比 $(F/B)_b$, $(F/B)_g$, $(F/B)_h$

靶	$(F/B)_g$	$(F/B)_b$	$(F/B)_h$
轻靶	4.286	1.889	2.130
乳胶靶	3.386	1.943	2.139
重靶	2.913	1.997	2.148

4 前后半球内灰径迹粒子、黑径迹粒子多重数的关联

图1给出了前后半球内灰径迹粒子平均多重数随着黑径迹粒子数的变化, 向前发射的灰径迹粒子平均多重数在 $n_b < 7$ 时随黑径迹粒子数的增加明显增加, 向后发射的灰径迹粒子平均多重数在 $n_b < 7$ 时随黑径迹粒子数的增加也增加, 但幅度较小; 当 $n_b \geq 7$ 时, 向前发射的灰径迹粒子平均多重数趋于饱和的趋势, 既随着靶核大小的增加及靶核旁观体受激程度的增加, 向前发射的靶核反冲质子数平均多重数基本保持不变。利用线性关联式 $\langle n_g^i \rangle = an_g + b$ 及最小二乘法拟合实验结果, 得到的参数 a 和 b , 其中 a 为拟合直线的斜率(表示关联的强度), b 为拟合直线的截距, i 代表向前(f)或向后(B)。拟合参数 a 和 b 见表3。

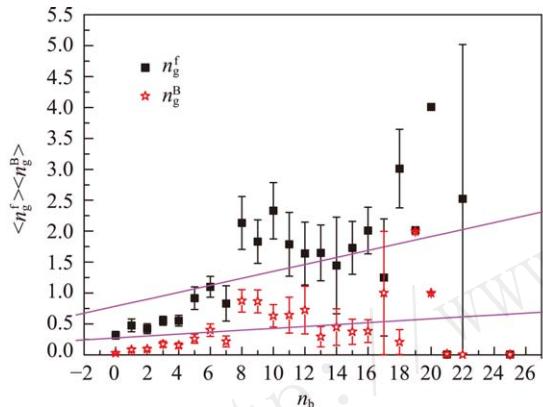


图1 (在线彩图) 400 AMeV ^{12}C -Em 作用的灰径迹粒子前后半球平均多重数与黑径迹粒子的关联

表3 400 AMeV ^{12}C -Em 反应中灰径迹粒子、黑径迹粒子前后平均多重数与黑径迹粒子、灰径迹粒子关联拟合值

关联类型	a	b
$\langle n_g^f \rangle - n_b$	0.056 ± 0.027	0.786 ± 0.360
$\langle n_g^B \rangle - n_b$	0.015 ± 0.013	0.274 ± 0.180
$\langle n_g^f \rangle - n_g$	0.746 ± 0.124	2.192 ± 0.732
$\langle n_g^B \rangle - n_g$	0.094 ± 0.080	1.950 ± 0.475

图2给出了前后内半球黑径迹粒子平均多重数随着灰径迹粒子数的变化, 在 $n_g < 6$ 时向前后发射的黑径迹粒子平均多重数随灰径迹粒子数的增加明显增加; 当 $n_g \geq 6$ 时, 向前后发射的黑径迹粒子平均多重数随灰径迹粒子数的增加趋于饱和的趋势。随着灰径迹粒子数的增加核内级联碰撞次数增加, 则靶核旁观体受激程度增加, 所以黑径迹粒子平均多重数增加, 但这种增加受靶核大小的限制, 所以出现饱和趋势。利用线性关联

式 $\langle n_b^i \rangle = an_g + b$ 及最小二乘法拟合实验结果, 得到的拟合参数 a 和 b , 其结果如表3所列。

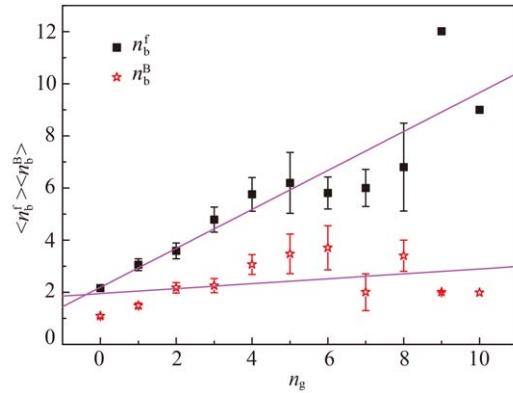


图2 (在线彩图) 400 AMeV ^{12}C -Em 作用的黑径迹粒子前后半球平均多重数与灰径迹粒子的关联

5 向前向后发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子与重电离粒子之间的关联

图3, 图4分别给出灰径迹粒子、黑径迹粒子在前后半球内平均多重数随重电离粒子数的关联。由图可见随着重电离粒子数的增加, 灰径迹粒子、黑径迹粒子在前后半球内平均多重数随着增加, 但向前发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子平均多重数随重电离粒子数增加而增加的幅度明显大于向后增加的幅度; 且向后发射的灰径迹粒子平均多重数随重电离粒子数增加出现饱和趋势。利用线性关系式 $\langle n_i \rangle = an_j + b$, $i \neq j$ 拟合实验结果, 得到的参数 a 和 b , 列于表4中。

中高能及高能核-核碰撞末态粒子的产生, 可以利用基于碰撞几何的旁观体-反应体模型^[13]及级联蒸发模型^[14]来描述。依据核-核碰撞几何, 碰撞系统中弹核和靶核相互重叠的部分为反应体, 其余部分为旁观体, 旁观体部分又分为弹核旁观体和靶核旁观体。反应体内

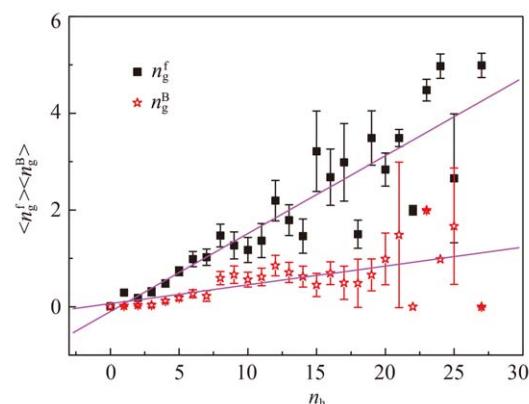


图3 (在线彩图) 400 AMeV ^{12}C -Em 反应中 n_g 在前后半球内平均多重数与重电离粒子数的关联

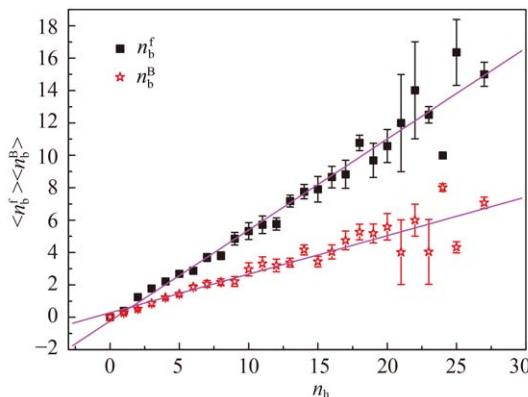


图4 (在线彩图) 400 AMeV ^{12}C -Em反应中 n_h 在前后半球内平均多重数与电离粒子数的关联

表4 400 AMeV ^{12}C -Em反应中 n_h , n_g 在前后半球内平均多重数与 n_h 关联的线性拟合参数

关联类型	a	b
$< n_g^f > - n_h$	0.162 ± 0.016	-0.101 ± 0.243
$< n_g^B > - n_h$	0.039 ± 0.010	0.063 ± 0.158
$< n_b^f > - n_h$	0.561 ± 0.024	-0.236 ± 0.365
$< n_b^B > - n_h$	0.237 ± 0.019	0.274 ± 0.286

核子-核子相互穿透，发生剧烈碰撞。反应开始时，重叠区域内核子相互挤压，局部密度迅速增加，能量相互传递，是热平衡的建立过程。碰撞结束后，反应体扩张冷却，产生簇射粒子。在旁观体中，弹核旁观体以原来的速度和方向运动，形成弹核碎片，由于费米能量的影响，运动方向发生偏离；靶核旁观体因激发而蒸发成核碎片，在实验室系下各向同性飞出，形成黑径迹粒子。灰径迹粒子是靶核内与弹核核子发生碰撞的反冲质子。随着碰撞参数的减小和靶核大小的增大，相互碰撞的两核相互重叠的部分增加，反应的剧烈程度增加，靶核反冲质子数增加，靶核旁观体部分得到的激发能增加，导致靶核蒸发碎片数即黑径迹粒子数增加，但受靶核大小限制，靶核蒸发碎片数最后趋于饱和。反之，随着碰撞参数的增加，相互碰撞的两核相互重叠的部分变小，反应的剧烈程度也降低，靶核反冲质子数减小，靶核旁观体部分得到的激发能下降，导致靶核蒸发碎片数即黑径迹粒子数减少。实验得到的多重数关联特性基本上可以利用基于碰撞几何的旁观体-反应体模型及级联蒸发模型来解释。

6 结论

本文对400 AMeV ^{12}C 诱发乳胶核反应向前后发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子平均多重数与黑径迹粒子数、灰径迹粒子数及重电离粒子数之间的关联做了详细

分析，其结果很好地验证了核-核碰撞几何模型。

(1) 随着靶核大小的增加，向前后半球内发射的灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子的平均多重数都随之增加，而受弹核能量影响，向前发射的重电离粒子平均多重数均明显大于向后发射的重电离粒子平均多重数；且产生于碰撞初期的灰径迹粒子在前后半球内的发射是各向异性的，而受激蒸发出的黑径迹粒子，其前后发射几率变化不明显。

(2) 向前、向后发射的灰径迹粒子平均多重数对重电离粒子 n_h 的依赖呈线性关系，重电离粒子多重数体现了碰撞参数的大小， n_h 越大，说明碰撞参数越小，靶核参与反应的部分就越大，此时向前、后半球发射的灰径迹粒子平均多重数 $< n_g^f >$ 、 $< n_g^B >$ 也就越大，实验发现 $< n_g^f >$ 随 n_h 变化的幅度远大于 $< n_g^B >$ 随 n_h 的变化幅度，且 $< n_g^B >$ 随 n_h 的变化出现饱和趋势，说明灰径迹粒子的产生，不仅跟初期碰撞有关，而且受靶核大小限制比较明显。

(3) 向前、向后发射的黑径迹粒子平均多重数随重电离粒子数的增加而明显增加， $< n_b^f >$ 随 n_h 增加而增加的幅度大于 $< n_b^B >$ 随 n_h 的增加而增加的幅度。

参考文献：

- [1] GHOSH D, ROY J, SENGUPTA R, et al. Can J Phys, 1989, **67**: 115.
- [2] NAGHY M E, MOSSA N A, ABDELSALAM A. Nuovo Cimento A, 1997, **110**: 1255.
- [3] AHMAD T, IRFAN M. Phys Rev C, 1992, **46**: 1483.
- [4] NAGHY A E, SADEK N M, MOHERY M. Nuovo Cimento A, 1997, **110**: 125.
- [5] WAGED K A. J Phys G, 1999, **25**: 1721.
- [6] LI Huiling, ZHANG Donghai, LI Xueqin, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(6): 488.(in Chinese) (李惠玲, 张东海, 李雪琴, 等. 原子能科学技术, 2008, **42**(6): 488.)
- [7] ZHANG Donghai. Chinese Phsics, 2006, **15**: 340.
- [8] ZHANG Donghai. Relativistic Heavy Ion Induced Nuclear Reaction Research[D]. Beijing: China institute of atomic energy, 1999. (in Chinese) (张东海. 相对论性重离子诱发乳胶核反应研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 1999.)
- [9] EL-NAGDY M S, ABDELSALAM A, et al. Nuclear Physics A, 2004, **730**: 419.
- [10] ZHANG Donghai, LIU Minghai. Atomic Energy Science and Technology, 2002, **36**(6): 548. (in Chinese) (张东海, 刘明海. 原子能科学技术. 2002, **36**(6): 548.)
- [11] YANG Wenjin, ZHENG Suhua, GUO Guifang, et al. Nuclear Physics Review, 2016, **33**(4): 422. (in Chinese) (杨文锦, 郑素华, 郭桂芳, 等. 原子核物理评论. 2016, **33**(4): 422.)

- [12] SINGH V, TULI S K. arXiv: Nucl-ex/0414049, 2004, 1(22): 1.
- [13] BOWMAN J D, SWIATECKI W J, TSANG C F. Abrasion and ablation of heavy ions. Lawrence Berkeley Report: LBL-2908, 1973.
- [14] POWELL C F, FOWLER P H, PERKINS D H. The Study of Elementary Particles by the Photographic Method[M]. London: Pergamon Press, 1959: 432.

Forward-backward Multiplicity Correlation of Heavily Ionizing Track Particles in ^{12}C -emulsions Interactions at 400 AMeV

ZHENG Suhua^{1,2,1)}, YANG Wenjin^{1,2}, ZHANG Donghai², MIAO Huifeng²

(1. Department of Science, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;

2. Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi, China)

Abstract: The forward-backward multiplicity correlation of heavily ionized particles produced in ^{12}C -emulsion interactions at 400 AMeV is investigated. The heavy ionized particles, come from the target fragments, are divided into grey track particle and black track particle. The experimental results can be well explained by the geometry model of the nucleus-nucleus collisions. The emission of grey track particles in forward and backward hemisphere is not isotropic, but the emission of black track particle is almost isotropic. The averaged multiplicity of grey track particles and black track particles in forward and backward hemisphere linearly depend on the number of heavily ionized particle n_h , the correlation strength in forward hemisphere is greater than that in backward hemisphere, but the dependence of grey track particle in backward hemisphere on the number of heavily ionized particle n_h shows the saturation because of the intranuclear cascade effect is influenced by target size. The characteristics of multiplicity correlations can be well explained by the participant-spectator model based on the colliding geometrical picture and the cascade evaporation model of high energy nucleus-nucleus collisions.

Key words: heavily ionized particle; multiplicity; average multiplicity; correlation

Received date: 5 Jun. 2017; Revised date: 17 Aug. 2017

Foundation item: Youth science foundation of Taiyuan Industrial of Technology (2014LQ07); National Natural Science Foundation of China (11054100); Shanxi Province for Returned Overseas Chinese Scholars (2011-058)

1) E-mail: zhengsh425@126.com.