

# 不同体模校准眼晶状体 $H_p(3)$ 剂量计的研究

李海亮<sup>1,2</sup>, 王仲文<sup>1</sup>, 朱建国<sup>2</sup>, 许家昂<sup>2</sup>, 杨迎晓<sup>2</sup>, 张琳<sup>2</sup>, 李福生<sup>2</sup>

1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 山东省医学科学院放射医学研究所

**摘要:** 目的 对眼晶体  $H_p(3)$  剂量计进行校准, 研究剂量计的批均匀性、探测阈、线性、能量响应和各向同性等性能指标。方法 根据 ISO 12794(2000) 标准的要求, 采用板状水体模与正圆柱注水体模两种体模相比较的方法, 选择 ISO 4037 中的窄束 X 射线辐射质(N60~N120)进行实验。结果 剂量计的批均匀性, 变异系数为 5.7%; 探测阈, 小于 0.1 mSv; 线性, 对两种体模, 剂量的响应均小于 10%; 能量响应, 对两种体模均为  $-20\% < R < 40\%$ ; 各向同性, 响应平均值与垂直入射响应的差别, 板状水体模为  $(1.05 \pm 0.03)$ , 正圆柱注水体模为  $(0.99 \pm 0.08)$ 。结论 在所选择的实验条件下, 两种体模都适合于眼晶体剂量计的校准。剂量计的校准结果符合 ISO 12794 的要求, 适用于介入放射学工作场所中的测量。

**关键词:** 眼晶状体; 剂量; 热释光剂量计; 转换系数; 校准

**Study of Calibration the Dosimeter for Measuring Eye Lens Dose in Terms of  $H_p(3)$  with Different Phantoms.** LI Hai-liang, WANG Zhong-wen, ZHU Jian-guo, XU Jia-ang, YANG Ying-xiao, ZHANG Lin, LI Fu-sheng. 1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China; 2. Institute of Radiation Medicine, Shandong Academy of Medical Sciences, Jinan 250062 China.

**Abstract:** **Objective** To calibrate the dosimeter for measuring eye lens dose in terms of  $H_p(3)$  and study the performance of the dosimeter, such as batch homogeneity, detection threshold, linearity, energy response, isotropy. **Methods** The standard for calibration is based on ISO 12794 (2000), phantoms are slab phantom and cylindrical phantom, radiation quality is the narrow beam X-ray (N60~N120) taken from ISO 4037. **Results** The performance of the dosimeter, as batch homogeneity, the coefficient of variation is 5.7%. The detection threshold is less than 0.1 mSv. As linearity, for two phantoms, response are both less than 10%. The energy responses to both phantoms, are in the range of 20%~40%. As isotropy, mean value of the response differ from the response of normal incidence is  $(1.05 \pm 0.03)$  for the slab phantom and  $(0.99 \pm 0.08)$  for the cylindrical phantom. **Conclusion** For selected experimental conditions, both phantoms are suitable for eye lens dosimeter calibration, the calibration results conform to the requirements of ISO 12794, the dosimeter is suitable for using in interventional radiology.

**Key words:** Eye Lens; Dose; Thermoluminescent Dosimeter; Conversion Coefficients; Calibration

中图分类号: TL816+.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2016)02-0129-04

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.02.001

眼晶体是对辐射敏感的器官之一。伦琴发现 X 射线 1 年之后(1897 年)就有了辐射引起白内障的动物实验报道, 10 年之后发现了辐射引起的放射工作人员白内障<sup>[1]</sup>。到目前为止, 放射性白内障一直被认为是具有剂量阈值的确定性效应。

国际放射防护委员会(ICRP)出版物中, 从 ICRP 60<sup>[2]</sup>提出一直到 ICRP 103<sup>[3]</sup>再次确认, 多年以来眼晶体的当量剂量限值一直是 150 mSv/a。2011 年, ICRP 发布了《关于组织反应的说明(Statement on tis-

sue reactions)》<sup>[4]</sup>, 把眼晶状体组织反应的吸收剂量阈值考虑为 0.5 Gy, 并建议计划照射情况下的职业照射, 眼晶状体的当量剂量的限值为 20 mSv(5 年内的平均); 每一年不超过 50 mSv。

国际辐射单位和测量委员会(ICRU) 47<sup>[5]</sup>号报告定义了 3 mm 深度的剂量当量  $H_p(3)$ , 用于个人检测眼晶状体剂量时的运行实用量(operational quantities)。ICRP 103<sup>[3]</sup>指出, 实际上  $H_p(3)$  很少被监测。对于  $H_p(3)$  很少被监测的一个重要原因是到目前为止一直没有国际上认可的空气比释动能转换因子。如 ICRU 57<sup>[6]</sup>和 2010 年出版 ICRP 116<sup>[7]</sup>等都没有给出  $H_p(3)$  单能辐射空气比释动能转换因子。国际标准化

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2013AM018), 山东省医药卫生科技发展项目(2015WS0200)

作者简介: 李海亮(1974-), 男, 山东安丘人, 助理研究员, 中国原子能科学研究院辐射防护专业博士研究生。

组织(ISO) 12794(2000)<sup>[8]</sup>只给出了基于 ISO 板状水体模(300 mm × 300 mm × 150 mm)的部分转换因子,ISO 12794 同时指出不排除使用其他体模的可能。

ISO 4037-3<sup>[9]</sup>指出,校准用的体模应尽可能再现身体佩戴剂量计部位的吸收和散射特性。这意味着校准体模在质量和形状方面应尽量与人体头部接近。考虑到 ISO 板状水体模是用于代表人体躯干产生的入射辐射的背散射,欧洲合作项目 ORAMED(优化医疗工作者的辐射防护, optimization of radiation protection for medical staff)提出了一种采用 ICRU 4 组织材料制作的正圆柱注水体模<sup>[10]</sup>(20 cm)给出了 10 keV ~ 10 MeV 光子  $\rho^\circ \sim 180^\circ$  的空气比释动能转换因子。这种圆柱体模能更好的近似人体头部的椭圆形状以及眼睛在头部的位

置。本实验采用上述两种体模,进行  $H_p(3)$  眼晶状体剂量计的 X 射线校准研究。

## 1 对象和方法

### 1.1 剂量计及读出

1.1.1 剂量计 北京广润意通辐射监测设备有限公司生产 GR-200A 热释光探测器(LiF:Mg,Cu,P)。探测器体积直径 3.6 mm 厚度 0.4 mm 分散性  $\leq 2.0\%$ 。

1.1.2 剂量计读出 北京海阳博创辐射防护科技有限责任公司生产 RGD-3B 型热释光剂量仪。预热温度:135℃,预热时间:15 s,升温速度:15℃/s,测量温度:240℃,测量时间:12 s。

### 1.2 实验方法

1.2.1 依据的标准 主要根据 ISO 12794<sup>[8]</sup>的规定,进行剂量计的批均匀性、线性、探测阈、能量响应、各向同性等的实验。

1.2.2 辐射质的选择 考虑可用的转换系数及可获得的辐射质等因素,结合 ISO 12794 的要求,选取 ISO 4037-1<sup>[11]</sup>中的窄束 X 射线辐射质(N-60、N-80、N-100、N-120)进行校准实验。实验在中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所二级标准实验室进行。

1.2.3 体模 ISO 板状水体模,前表面为厚度 2.5 mm 有机玻璃板,其他面为表面 10 mm 有机玻璃。正圆柱注水体模,壁厚 5 mm 直径 200 mm 的有机玻璃管,底部和上部为 10 mm 有机玻璃板。

### 1.2.4 转换系数

1.2.4.1 ISO 板状水体模转换系数 综合 ISO 12794<sup>[8]</sup>和 Behrens<sup>[12]</sup>的转换系数,并采用内插或外推的方法,得到板状水体模的转换系数,见表 1。

表 1 ISO 板状水体模  $H_p(3)/K_a$  (Sv/Gy) 转换系数

能量	角度	转换系数	能量	角度	转换系数
N60	0°	1.63	N80	20°	1.78
N80	0°	1.80	N80	40°	1.74
N100	0°	1.81	N80	60°	1.54
N120	0°	1.74	N80	80°	1.33

1.2.4.2 正圆柱注水体模转换系数 ORAMED 通过蒙特卡罗计算给出的转换系数<sup>[13-14]</sup>。见表 2。

表 2 正圆柱注水体模  $H_p(3)/K_a$  (Sv/Gy) 转换系数

能量	角度	转换系数	能量	角度	转换系数
N60	0°	1.602	N80	20°	1.659
N80	0°	1.665	N80	45°	1.599
N100	0°	1.648	N80	60°	1.546
N120	0°	1.588	N80	75°	1.420

## 2 结果

2.1 批均匀性 剂量计的响应与过滤片的厚度密切相关。采用 N80 射线质和板状水体模,10 个剂量计照射 5 mSv,变异系数(相对标准偏差)为 5.7%,符合标准“不大于 15%”的要求。

2.2 探测阈 采用 10 个未照射的剂量计进行读出,确定每个剂量计的评定值并计算标准偏差,得出探测阈小于 0.1 mSv。

### 2.3 线性

2.3.1 板状水体模 每组 10 个剂量计,采用 N80 射线质分别照射 0.3、0.5、1、2、3、5 mSv。剂量响应的变化范围见表 3,符合标准“剂量响应的变化不大于 10%”的要求。

表 3 板状水体模线性实验结果

照射剂量	剂量响应	照射剂量	剂量响应	照射剂量	剂量响应
0.3 mSv	0.94 ± 0.04	1 mSv	1.01 ± 0.04	3 mSv	1.03 ± 0.04
0.5 mSv	0.97 ± 0.03	2 mSv	1.03 ± 0.03	5 mSv	1.03 ± 0.05

2.3.2 正圆柱注水体模 每组 6 个剂量计,采用 N80 射线质照射 0.3、0.5、1、2、3、5 mSv。剂量响应的变化

范围见表 4,符合标准“剂量响应的变化不大于 10%”的要求。

2.4 能量响应

2.4.1 板状水体模 每组 10 个剂量计 ,采用 N60、N80、N100、N120 射线质分别照射 1.0 mSv。能量响应变化范围见表 5 ,符合标准“不应大于 ±50%”的要求。

2.4.2 正圆柱注水体模 每组 6 个剂量计 ,采用 N60、N80、N100、N120 射线质分别照射 1.0 mSv。能量响应变化范围见表 6 ,符合标准“不应大于 ±50%”的要求。

2.5 各向同性

2.5.1 板状水体模 每组 10 个剂量计 ,采用 N80 射线质照射 ,入射角分别为 0°、20°、40°、60°和 80°。响应的变化范围见表 7。0° ~ 80°范围内响应平均值与垂直入射响应的差别为( 1.05 ±0.03) ,符合标准“不应大于 15%”的要求。

2.5.2 正圆柱注水体模 每组 6 个剂量计 ,采用 N80 射线质照射 ,入射角分别为 0°、20°、45°、60°和 75°。响应的变化范围见表 8。0° ~ 75°范围内响应平均值与垂直入射响应的差别为 ( 0.99 ±0.08) ,符合标准“不应大于 15%”的要求。

表 4 正圆柱注水体模线性实验结果

照射剂量	剂量响应	照射剂量	剂量响应	照射剂量	剂量响应
0.3 mSv	1.02 ±0.07	1 mSv	1.02 ±0.04	3 mSv	0.99 ±0.04
0.5 mSv	1.01 ±0.06	2 mSv	1.03 ±0.03	5 mSv	0.95 ±0.04

表 5 板状水体模能量响应实验结果

能量	剂量响应	能量	剂量响应
N60	1.30 ±0.07	N100	0.92 ±0.03
N80	1.06 ±0.04	N120	0.83 ±0.03

表 6 正圆柱注水体模能量响应实验结果

能量	剂量响应	能量	剂量响应
N60	1.36 ±0.09	N100	0.91 ±0.02
N80	1.02 ±0.09	N120	0.85 ±0.04

表 7 板状水体模 各向同性实验结果

角度	剂量响应	角度	剂量响应	角度	剂量响应
0°	0.95 ±0.03	40°	1.03 ±0.03	80°	1.03 ±0.06
20°	0.99 ±0.04	60°	0.98 ±0.04	响应变化	1.05 ±0.03

表 8 正圆柱注水体模各向同性实验结果

角度	剂量响应	角度	剂量响应	角度	剂量响应
0°	1.01 ±0.10	45°	1.01 ±0.09	75°	1.00 ±0.07
20°	0.98 ±0.08	60°	0.98 ±0.08	响应变化	0.99 ±0.08

3 讨论

3.1 探测阈 ISO 12794 规定探测阈不应大于 1.0 mSv。ORAMED 认为 ,ISO 12794 出版时眼晶体剂量限值为 150 mSv/a ,现在已经降低到 20 mSv/a ,需要对剂量计的性能提出更高的要求 ,探测阈应不大于 0.2 mSv; 本次试验剂量计探测阈小于 0.1 mSv。

3.2 能量响应 剂量计的校准 ,原则上应包含实际辐射场中所有的辐射质和入射角度。ISO 12794 规定 ,能量范围 15 keV ~3 MeV ,响应( R) 应符合  $0.5 \leq R \leq 1.5$ 。上述规定的制订 ,是在工业照射情况下 ,假定工作人员处于能够覆盖上述能量的宽能谱 ,各种角度的照射。

有文献<sup>[15]</sup>认为 ,对于介入放射工作场所 ,采用<sup>137</sup>Cs或<sup>60</sup>Co 校准 ,可能导致过响应从而带来严重的剂

量高估。因此 ,考虑到介入放射医护人员受到较高辐射剂量的现实 ,需要采用严格于 ±50% 的标准。对于实际年剂量接近剂量限值时 ,最大偏差应该是 ±20% 或者在概率上 95% 置信区间不超过 0.67 到 1.5 ,即大约 ±40%。如果剂量计的能响达不到该要求 ,对于介入放射工作场所使用的剂量计的校准 ,需要采用参考束能量低于 150 keV 的特殊校准方法。在这种情况下 ,能量限制在 20 ~ 150 keV ,最大不确定度为 ±30%。

ORAMED 采用正圆柱水体模进行能量响应实验的结果为: 对所有能量范围 , $0.6 \leq R \leq 1.4$ ; 20 ~ 100 keV  $0.7 \leq R \leq 1.3$ 。本实验采用两种体模校准的能量响应见图 1。可以看出 ,从 N60 ~ N120 能量范围内 ,随着 X 射线的能量升高 ,响应成下降的趋势 ,其中 ,板状水体模的范围在 -20% ~ +30% 之间 ,正圆柱注水

体模的范围在  $-20\% \sim +40\%$  之间,两者之间的最大差距为  $6\%$ ,具有较好的一致性。本次实验结果与 ORAMED 的 N60 ~ N120 能量范围内结果  $0.7 \leq R \leq 1.3$  的实验结果相吻合。

3.3 各向同性 采用两种体模校准的各向同性见图 2。可以看出,板状水体模  $0^\circ \sim 80^\circ$  范围内响应平均值与垂直入射响应的差别  $1.05 \pm 0.03$ ; 正圆柱水体模  $0^\circ \sim 75^\circ$  范围内差别为  $0.99 \pm 0.08$ ,都符合标准“不应大于  $15\%$ ”的要求。

ORAMED 采用 ISO 4037 中的宽谱 X 射线辐射质 W-80(平均能量  $57 \text{ keV}$ ) ,正圆柱水体模进行各项同性( $0^\circ$   $20^\circ$   $40^\circ$   $60^\circ$ ) 校准实验。实验结果显示  $60^\circ$  以内的角度响应都在  $0 \sim 20\%$  之间,随着角度增大,响应也逐渐增大。平均结果  $y$  方向为  $1.06 \pm 0.08$ ,  $z$  方向  $1.12 \pm 0.07$ 。实验结果满足 ISO 12794 的要求。

结合 ORAMED 的实验结果,可以看出,在  $0^\circ \sim 75^\circ$  范围内,正圆柱水体模的各向同性指标优于板状水体模,但板状水体模在  $0^\circ \sim 80^\circ$  范围内也表现出很好的各向同性,两种体模都适合作为眼晶体剂量计的校准体模。

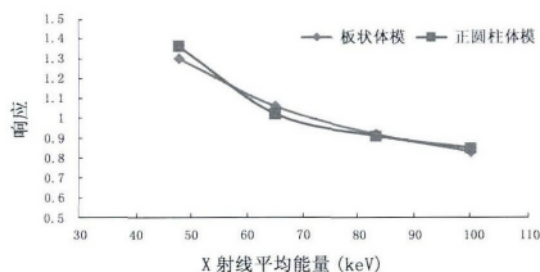


图 1 两种体模校准的能量响应

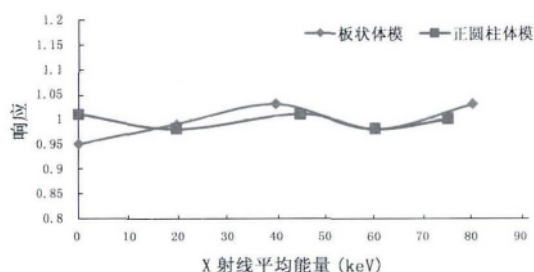


图 2 两种体模校准的各向同性

#### 4 结论

在目前没有国际上统一的转换系数的情况下,根据 ISO 12794 标准的要求,比较了板状水体模与正圆柱注水体模剂量计校准中的特性,研究了剂量计的批均匀性、探测阈、线性、能量响应和各向同性等性能指标。剂量计的校准,原则上应包含实际辐射场中所有的辐射质和入射角度。本实验的目的,主要是在研究

剂量计相应特性的基础上,将其应用于介入放射学职业照射的测量,受到实际实验条件等因素的影响,只选择了 ISO 4037 中的窄束 X 射线辐射质( $N-60 \sim N-120$ ) 进行实验,无论是辐射质类型还是能量范围都有一定的局限性,有待于进一步更加深入的研究。本次实验结果显示,在所选择的实验条件下,两种体模都适合于眼晶体剂量计的校准,实验中所采用的剂量计校准结果符合 ISO 12794 的要求,适用于介入放射学工作场所中眼晶状体剂量的测量。

#### 参考文献

- [1] Madan M, Rehani, Eliseo Vano, Olivera Ciraj et al. Radiation and cataract [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2011, 147(1-2): 300-304.
- [2] International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 [R]. ICRP, 1990.
- [3] International Commission on Radiological Protection. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 [R]. ICRP, 2007.
- [4] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Statement on tissue reactions [R]. ICRP, 2011.
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations [R]. ICRU, 1992.
- [6] International Commission on Radiation Units and Measurements. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation [R]. ICRU, 1998.
- [7] International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures [R]. ICRP, 2010.
- [8] International Organization for Standardization. ISO 12794: 2000 nuclear energy - radiation protection - individual thermoluminescence dosimeters for the extremities and eyes [S]. ISO, 2000.
- [9] International Organization for Standardization. ISO 4037 - 3: 1999 X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and determining their response as a function of photon energy, part 3 [S]. ISO, 1999.
- [10] Gualdrini G, Mariotti F, Wach S, et al. A new cylindrical phantom for eye dosimetry development [J]. Radiat Meas, 2011, 46(11): 1231-1234.
- [11] International Organization for Standardization. X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: radiation characteristics and production methods [S]. ISO, 1997.
- [12] Behrens, R. Air kerma to dose equivalent conversion coefficients not included in ISO 4037 - 3 [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2011, 147(1-2): 373-379.

## 射波刀脊柱追踪仰卧与俯卧位照射精度的对比

徐慧军 段学章 徐飞 张军华

解放军第 302 医院肿瘤放射治疗中心 北京 100039

**摘要:** 目的 利用头颈、仿真人和肺部模体检测射波刀 IGRT 治疗脊柱追踪时仰卧与俯卧位照射精度并进行对比分析,为俯卧位脊柱追踪的应用提供参考数据。方法 用 CT 对装有胶片的头颈、仿真人和肺部模体分别进行仰卧和俯卧位扫描,然后利用治疗计划系统分别设计仰卧和俯卧位模体计划,执行模体计划。利用 E2E 软件分析照射精度,对比这两种卧姿的照射精度。结果 仰卧与俯卧位精度检测结果,颈椎的追踪精度分别为 0.77 和 0.87 mm,胸椎的为 0.78 和 0.76 mm,腰椎的为 0.89 和 0.80 mm,骶椎的为 1.90 和 2.27 mm,4 个不同椎体仰卧与俯卧位精度偏差分别为:0.01、0.02、0.09 和 0.37 mm。结论 对于这三种静态模体,颈椎、胸椎、腰椎和骶椎仰卧与俯卧位脊柱追踪精度偏差很小,可以认为具有同等的照射精度。

**关键词:** 射波刀; 脊柱追踪; 仰卧; 俯卧

**Comparison of the Spine Tracking Accuracy between Supine and Prone Position Setups in CyberKnife Treatment.** XU Hui-jun, DUAN Xue-zhang, Xu Fei, Zhang Jun-hua. *Radiotherapy Center of Oncology, 302 Hospital of PLA, Beijing 100039 China.*

Corresponding Author: DUAN Xue-zhang, E-mail: duanxuezhang2006@163.com

**Abstract: Objective** Using head and neck, anthropomorphic and lung phantoms to detect the spine tracking accuracy during CyberKnife IGRT treatment, compare the results in supine and prone positions and analyze them, to provide theoretical foundation for the application of supine position in spine tracking system. **Methods** Scan with CT the head and neck phantom with films, anthropomorphic phantom and lung phantom in supine and prone positions, respectively, then design treatment plans and delivery those plans. Compare and analyze the radiation accuracy of the two different positions with E2E software.

**Results** The cervical vertebra tracking accuracy in supine and prone positions is 0.77 and 0.87 mm, respectively, with a difference of 0.01 mm; for thoracic vertebra tracking, the accuracy is 0.78 and 0.76 mm, respectively, with a difference of 0.02 mm; for lumbar vertebra, 0.89 and 0.80 mm, respectively with a difference of 0.09 mm; and for sacral vertebrae, 1.90 and 2.27 mm, with a difference of 0.37 mm. **Conclusion** For the three static phantoms, the differences of spine tracking accuracy between supine and prone position setups are very small. Therefore the accuracy in the two different positions can be considered equal.

**Key words:** CyberKnife; Spine Tracking; Supine Position; Prone Position

中图分类号: R816.8 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2016)02-0133-03

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.02.002

射波刀是一种将 6 自由度机械臂和 6 MV 紧凑型加速器有机融合到一起的立体定向放射治疗设备,配

有一对正交 kV 级影像系统和同步呼吸追踪系统,具有图像引导和实时追踪功能<sup>[1]</sup>。在治疗前和治疗中获取一对患者的二维影像,该影像与计划系统生成的数字重建影像进行配准,实现治疗前影像引导摆位和治疗中位置偏差的修正<sup>[2]</sup>。射波刀脊柱追踪系统能

基金项目: 总后勤部后勤科研计划项目( BWS13J031)

作者简介: 徐慧军(1982-),男,安徽人,硕士,物理师,从事肿瘤放射治疗技术工作。

通讯作者: 段学章, E-mail: duanxuezhang2006@163.com

[13] Bordy J M, Daures J, Denoziere M, et al. Proposals for the type tests criteria and calibration conditions of passive eye lens doseimeters to be used in interventional cardiology and radiology workplaces [J]. *Radiat Meas*, 2011, 46, 1235-1238.

[14] Daures J, Gouriou J and Bordy J. M. Monte Carlo determination of the conversion coefficients  $H_p(3)/K_a$  in a right cylinder phantom

with 'PENELOPE' code. Comparison with 'MCNP' simulations [J]. *Radiat Prot Dosim*, 2011, 144, 37-42.

[15] European Communities, NO 160. Technical recommendations for monitoring individuals occupationally exposed to external radiation [R]. EC, 2009.

收稿日期: 2016-01-21 修回日期: 2016-02-23