

第二代双源 CT 大螺距模式低辐射剂量血管成像进展

徐佳欢 孙凯

014040, 包头医学院 (徐佳欢); 014040, 包头市中心医院影像科 (徐佳欢、孙凯)

通信作者: 孙凯, Email: Henrysk@163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2016.04.011

【摘要】 双源 CT 应用临床以来, 在 CT 血管造影方面越来越显示出其独特优势, 其较高的时间和空间分辨率及较快的扫描速度使获得高质量的图像成为可能。双源 CT 大螺距扫描模式在血管成像方面具有图像质量好、有效射线剂量低、扫描时间快等优点。笔者就第二代双源 CT 大螺距模式在血管成像方面的进展及临床应用价值进行综述。

【关键词】 体层摄影术, 螺旋计算机; 辐射剂量; CT 血管成像

基金项目: 国家自然科学基金 (81560286); 内蒙古自治区卫生和计划生育委员会项目 (201302124)

Application of high-pitch and low-dose mode using dual-source CT by computed tomography angiography Xu Jiahuan, Sun Kai

Baotou Medical College, Baotou 014040, China (Xu JH); Department of Image, Baotou Central Hospital, Baotou 014040, China (Xu JH, Sun K)

Corresponding author: Sun Kai, Email: Henrysk@163.com

【Abstract】 Given the unique advantages of dual-source computed tomography (DSCT), such as high temporal and spatial resolutions and fast scanning speed, its application in angiography has made possible for high-quality images to be obtained. In high-pitch scanning mode, DSCT can obtain high-quality angiography images with low effective radiation dose at a short scan time. This paper reviewed the progress and clinical applications of high-pitch mode DSCT in computed tomography angiography.

【Key words】 Tomography, spiral computed; Radiation dosage; Computed tomography angiography

Fund programs: Nation Natural Science Foundation of China (81560286); Inner Mongolia Autonomous Region Health and Family Planning Commission (201302124)

近年来, 随着多层螺旋 CT 技术的飞速发展, CT 血管成像 (computed tomography angiography, CTA) 以其检查的无创性、快捷性和准确性等优点得到了广泛应用^[1-2], 但伴随而来的较高辐射剂量也越来越引起人们的关注。2009 年, 第二代双源 CT 问世, 它的时间分辨率达到 75 ms, 扫描速度 45 cm/s, 最大螺距 3.4。双源 CT 的大螺距扫描模式, 又称 Flash spiral 模式 (Flash 模式)。它实现了前瞻性螺旋扫描单个心动周期心脏成像, 采集数据时间减少到 0.25 s, 明显降低了有效射线量。双源 CT 大螺距血管成像使得 CT 血管造影在很大程度上满足了临床的各种需要, 使 CT 血管造影技术又达到了一个新高度。

1 大螺距扫描模式原理

2006 年, 第一代双源 CT 问世, 它由两个相互

成 90° 角的 X 线球管和两组 64 层探测器构成, 每组探测器包括 40 排探测器, 时间分辨率为 83 ms, 空间分辨率为 0.33 mm, 最大螺距 1.5, 两套 X 线系统每套最大功率为 80 kV, 每个球管都可以分别设置为 80、100、120、140 kV, 从而可进行双能量数据采集。2009 年, 第二代双源 CT 应用于临床, 机架内的两套 X 线球管呈 94° 角放置, 两套对应的探测器系统增加到 128 层, 时间分辨率提高至 75 ms, 空间分辨率为 0.17 mm, 最大螺距提高至 3.4, 两套 X 线系统最大功率提升为 100 kV, 利用能谱纯化技术, 实现了前瞻性大螺距扫描。在对冠状动脉及主、肺动脉的扫描时, 能以较快的速度及较低的辐射剂量取得较好的图像质量。另外, 原始数据的迭代重建技术可以双重减少噪声和伪影, 大大增加图像信噪比, 大幅度降低了辐射剂量。

2 双源 CT 大螺距模式低辐射剂量冠状动脉成像

2.1 低心率患者的大螺距模式成像

前瞻性心电门控技术、大螺距扫描模式、较快的进床速度以及 0.28 s/圈的旋转时间促使两组球管-探测器在大螺距旋转扫描模式下能在 1/4 机架旋转时间内覆盖整个心脏容积范围,从而满足在一个心动周期内完成整个心脏的扫描。Achenbach 等^[3]对不同心率患者的双源 CT 冠状动脉图像质量进行评价发现,心率 ≤ 80 次/min 患者的最佳成像时间窗为 RR 间期的 70%; Husmann 等^[4]研究认为,心率 < 60 次/min 最佳成像时间窗选择为 RR 间期的 50%~60%。低心率患者采用回顾性心电门控模式时,利用冠状动脉舒张末期低速平台,采集时相选择为 RR 间期的 70%~80%;采用 Flash 模式时,由于单个心动周期成像,扫描时间至少需要 250 ms,如果在 RR 间期的 70%~80% 成像,则会落入下一周期的 P 波后产生伪影,因此,大螺距双源 CT 默认的扫描时间窗为 RR 间期的 55% 或 60%^[5]。

2.2 高心率患者的大螺距模式成像

Goetti 等^[6]对心率 ≥ 70 次/min 的患者采用大螺距前瞻性心电门控进行冠状动脉血管成像,结果发现,高心率患者在 RR 间期的 30% 成像,不可诊断的血管节段为 2.8%,采用 RR 间期的 60% 采集数据成像,不可诊断的血管节段高达 8.3%。Sun 等^[7]研究显示,高心率患者(平均心率 90 次/min)采用 Flash 模式在 RR 间期的 20%~30% 成像可获得较好的图像质量,不可诊断的冠状动脉节段仅为 1.5%,这在以往的多层螺旋 CT 是难以达到的。另有研究表明,随着心率的增加,采用收缩期采集数据成像可降低伪影的发生^[8]。

2.3 冠状动脉支架患者的大螺距模式成像

对支架植入术后的评价,传统的多层螺旋 CT 的时间分辨率较低,支架的线束硬化伪影致使冠状动脉成像的图像质量较差,多层螺旋 CT 对支架内管腔观察受限,尤其对 < 3.5 mm 的支架内再狭窄诊断受限。有研究发现,双源 CT 诊断支架内再狭窄的灵敏度为 85.7%,特异度为 95.7%,当支架直径 > 2.75 mm 时,诊断支架内再狭窄的灵敏度与特异度均为 100%^[9]。另有研究显示,双源 CT 诊断支架直径 ≥ 3.50 mm、支架直径 $= 3.00$ mm 和支架直径 ≤ 2.75 mm 的再狭窄特异度分别为 100%、80%和

66%,阳性预测值分别为 100%、95% 和 53%^[10]。Wang 等^[11]研究结果显示,在 173 例支架植入术后的患者中,有 156 例获得了较好的图像质量,44 例支架直径 < 3 mm 的患者中,冠状动脉 CTA 发现有 10 例患者发生支架内再狭窄,而同样行冠状动脉血管造影仅发现 9 例。由此可见,双源 CT 诊断支架内再狭窄有较好的可行性,支架内径是影响支架内腔成像的关键因素。

2.4 冠状动脉旁路移植术后双源 CT 大螺距模式成像

冠状动脉旁路移植术后 5 年内有 25% 的患者发生桥血管的狭窄或闭塞,随访复查至关重要。由于桥血管较长,因此,冠状动脉搭桥术后患者冠状动脉 CT 成像扫描范围较常规扫描范围大,辐射剂量高。Lee 等^[12]研究显示,使用 Flash 模式的辐射剂量可较回顾性心电门控扫描模式降低 65% 左右。Heye 等^[13]利用二代双源 CT 评价 110 条桥血管,诊断灵敏度和特异度分别为 97.9% 和 100%,Goetti 等^[14]同样利用第二代双源 CT 评价 125 条桥血管的 465 个血管节段,不可诊断的血管比例仅为 0.6%,有效剂量为 2.3 mSv。由此可见,双源 CT 对桥血管狭窄或闭塞的诊断准确性优于多层螺旋 CT。

2.5 冠状动脉低辐射剂量大螺距模式成像

冠状动脉 CT 成像的主要局限性是对人体的电离辐射,一项评价冠状动脉辐射剂量的多中心临床研究显示,采用传统的回顾性心电门控平均有效剂量为 12 mSv^[15]。根据放射防护最优化合理使用剂量原则,在满足诊断需求的前提下,应尽可能降低辐射剂量。双源 CT Flash 模式其螺距可高达 3.4,根据容积 CT 剂量指数(computed tomographic dose index, CTDI_{vol})的定义($CTDI_{vol} = CTDI_w / CT$ 螺距因子)可知,螺距越大,剂量越低。双源 CT 结合低管电压及迭代重建方法,在保证冠状动脉图像质量的同时,应将辐射剂量降低到 1 mSv 以下^[16-18]。Fuchs 等^[19]报道,冠状动脉 CTA 辐射剂量仅为 0.21 mSv,接近普通 X 射线剂量。另有报道,低体重患者辐射剂量可低至 0.1 mSv^[20]。

双源 CT 冠状动脉 CTA 有效辐射剂量见表 1。

3 双源 CT 大螺距模式主动脉成像

主动脉夹层是主动脉疾病中常见的病变之一,多层螺旋 CT 诊断主动脉夹层的灵敏度和特异度接近 100%,但多层螺旋 CT 由于时间分辨率的限制,

表 1 双源 CT 冠状动脉 CT 血管成像有效辐射剂量
Table 1 Dual-source CT coronary CT artery effective radiation

dose			
作者文献源	设备	病例数	射线剂量/mSv
Zheng 等 ^[16]	双源 CT	100	0.26±0.05
Marwan 等 ^[17]	双源 CT	150	0.2
Zhang 等 ^[18]	双源 CT	150	0.18±0.02
Fuchs 等 ^[19]	双源 CT	42	0.21
Schuhbaeck 等 ^[20]	双源 CT	21	0.06±0.01
Koplay 等 ^[21]	双源 CT	105	0.34±0.10
Celik 等 ^[22]	双源 CT	110	1.11
Matsubara 等 ^[23]	双源 CT	138	1.5±0.2

主动脉根部产生明显运动伪影造成主动脉夹层假阳性或根窦部不能评价,且辐射剂量大,一次扫描的辐射剂量为 12~14 mSv。近年来,一系列减少辐射剂量的扫描方法应用于临床,如大螺距扫描模式,降低管电压、管电流模式。Apfaltrer 等^[24]对 110 例患者分别采用大螺距模式和传统模式行主动脉成像,结果显示,主动脉的图像质量在两种模式下具有较高的一致性,而有效辐射剂量却仅为传统扫描模式的 50% [9.6±3.0) mSv vs (19.8±8.2) mSv]。Bolen 等^[25]的研究同样显示,大螺距模式下的主动脉成像图像质量清晰,辐射剂量仅为 (5.4±1.8) mSv。双源 CT 大螺距主动脉扫描在减少患者辐射剂量及提高图像质量方面具有独特优势,能为主动脉病变的及时检出提供准确显示和评价,进而有助于医生早期制定治疗方案。

4 双源 CT 大螺距模式肺动脉成像

肺动脉栓塞是急诊常见病,病死率高。肺动脉 CT 血管成像凭借着其较高的灵敏度与特异度成为诊断肺动脉栓塞的主要方法。但是,传统的肺动脉 CT 血管成像需要患者屏气且辐射剂量偏高,难以克服呼吸运动伪影的影响。大螺距扫描模式突破了上述限制,图像质量高,可明显降低辐射剂量。有研究在肺动脉 CTA 中,比较双源 CT 大螺距模式、双能量模式、传统 128 层螺旋 CT 模式及 64 层 CT 4 种扫描模式的图像质量与辐射剂量,结果显示,双源 CT 大螺距模式下辐射剂量最低,仅为 2.34 mSv,其他分别为 3.24、3.58、4.21 mSv^[26]。Lu 等^[27]将 100 例怀疑肺栓塞患者随机分为两组,分别行普通模式和大螺距模式肺动脉扫描,结果显示,大螺距模式的辐射剂量低于 1 mSv,与普通组

相比,辐射剂量降低了 50.3%,对比剂用量仅为 20 mL,是普通组对比剂用量的 1/3,但两者的图像质量相当。Bauer 等^[28]研究显示,大螺距模式下的肺动脉 CT 成像可以在自由呼吸下进行,有效剂量为 (1.99±0.43) mSv,图像质量清晰,可供临床诊断。双源 CT 较高的空间分辨率有效避免了心跳呼吸带来的伪影,患者无需屏气即可完成检查,重建后的薄层图像经最大密度投影、多平面重组、曲面重建、容积再现等后处理工作站技术实现多种图像重组,通过比较分析,能清楚显示肺动脉形态、管径及周围解剖关系,更有助于肺段及亚段肺栓塞的检出以达到最佳诊断效果,双源 CT 大螺距模式以其独特的优势为低辐射剂量的肺动脉成像的研究提供了方向。

5 双源 CT 大螺距模式心脑血管联合成像

动脉粥样硬化是一种全身性疾病,冠状动脉粥样硬化与颈动脉、脑动脉粥样硬化密切相关。传统的多层螺旋 CT 对头颈部及冠状动脉血管造影需要分 2 次进行,且辐射剂量高,对比剂用量大,操作复杂。Wang 等^[29]研究发现,利用双源 CT 大螺距模式对 47 例患者进行心脑血管联合扫描其平均辐射剂量为 3.58 mSv,利用前瞻性序列扫描模式对 51 例患者行冠状动脉 CTA,其平均辐射剂量为 3.56 mSv,二者辐射剂量值相当,而前者使用了 65 mL 对比剂获得了 3 个部位的数据,显著降低了辐射剂量及对比剂用量。Sun 等^[30]应用双源 CT 大螺距模式进行心脑血管“一站式”联合扫描,即单次注射对比剂完成心脏和头颈血管 3 个部位的扫描,图像质量与传统分次扫描无显著差异,平均辐射剂量仅为 1.4 mSv,对比剂用量为分次扫描的 1/2。双源 CT 扫描模式心脏和头颈动脉“一站式”联合 CTA 扫描,为检测心脑血管病变提供了低辐射剂量、高图像质量的无创性方法。为早期干预、降低心脑血管事件的发生提供依据,具有重要临床意义。

6 展望

综上所述,第二代双源 CT 极大地提高了时间分辨率,以其较高的准确率,较清晰的图像质量及超低的辐射剂量,基本满足了临床血管疾病检查的需要。2014 年,第三代双源 CT 应用于临床,时间分辨率提高至 66 ms,机架旋转速度达到 0.25 s,冠

状动脉成像仅 0.13 s。其大螺距模式又称 Turbo Flash 模式, 第三代双源 CT 大螺距扫描有望进一步提高图像质量, 降低辐射剂量, 值得临床进一步研究。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 徐佳欢负责论文撰写; 孙凯负责提出命题、论文审阅。

参 考 文 献

- [1] 中华放射学杂志心脏冠状动脉多排 CT 临床应用协作组. 心脏冠状动脉多排 CT 临床应用专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2011, 45(1): 9-17. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2011.01.003. Chinese Journal of Radiology Heart Coronary Artery Multi-Detector Row CT Clinical Applications of Collaboration. Expert consensus document of Chinese Journal of Radiology on clinical applications of cardiac and coronary artery imaging by multi-detector row CT[J]. Chin J Radiol, 2011, 45(1): 9-17.
- [2] Westwood ME, Raatz HD, Misso K, et al. Systematic review of the accuracy of dual-source cardiac CT for detection of arterial stenosis in difficult to image patient groups[J]. Radiology, 2013, 267(2): 387-395. DOI: 10.1148/radiol.13121136.
- [3] Achenbach S, Manolopoulos M, Schuhbaeck AA, et al. Influence of heart rate and phase of the cardiac cycle on the occurrence of motion artifact in dual-source CT angiography of the coronary arteries [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6(2): 91-98. DOI: 10.1016/j.jcct.2011.11.006.
- [4] Husmann L, Leschka S, Desbiolles L, et al. Coronary artery motion and cardiac phases; dependency on heart rate-implications for CT image reconstruction[J]. Radiology, 2007, 245(2): 567-576. DOI: 10.1148/radiol.2451061791.
- [5] 孙凯, 韩瑞娟, 李坤成. 心脏电-机械耦联与双源 CT 冠状动脉成像最佳成像时间窗[J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2013, 7(23): 10875-10879. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-0785.2013.23.111. Sun K, Han RJ, Li KC. Cardiac electrical mechanical coupling and the optimal electrocardiographic pulsing Windows for Dual-source CT coronary angiography[J]. Chin J Clinicians(Electronic Edition), 2013, 7(23): 10875-10879.
- [6] Goetti R, Feuchtner G, Stolzmann P, et al. High-pitch dual-source CT coronary angiography; systolic data acquisition at high heart rates[J]. Eur Radiol, 2010, 20(11): 2565-2571. DOI: 10.1007/s00330-010-1838-z.
- [7] Sun K, Han RJ, Cui LF, et al. Feasibility and diagnostic accuracy for assessment of coronary artery stenosis of prospectively electrocardiogram-gated high-pitch spiral acquisition mode dual-source CT coronary angiography in patients with relatively higher heart rates; in comparison with catheter coronary angiography[J]. Chin Med Sci, 2013, 27(4): 213-219.
- [8] 孙凯, 韩瑞娟, 赵瑞平, 等. 不同心率患者采用大螺距双源 CT 冠状动脉成像的图像质量及影响因素分析[J]. 中华放射学杂志, 2012, 46(9): 773-778. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2012.09.001. Sun K, Han RJ, Zhao RP, et al. The image quality and influencing factors of high-pitch dual-source CT coronary angiography in patients with different heart rates[J]. Chin J Radiol, 2012, 46(9): 773-778.
- [9] 孔令燕, 刘冬, 王怡宁, 等. 双源 CT 冠状动脉成像评价冠状动脉支架通畅性[J]. 中国医学科学院学报, 2010, 32(6): 601-606. DOI: 10.3881/j.issn.1000-503X.2010.06.002. Kong LY, Liu D, Wang YN, et al. Assessment of coronary stent lumen visibility and patency by Dual-source computed tomographic Angiography[J]. Acta Acad Med Sin, 2010, 32(6): 601-606.
- [10] 羊镇宇, 王强, 郭素映, 等. 双源 CT 在冠状动脉支架内再狭窄诊断中的价值[J]. 中华心血管病杂志, 2011, 39(1): 49-52. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2011.01.010. Yang ZY, Wang Q, Guo SX, et al. Value of detecting in-stent restenosis by dual source coronary computed tomography coronary angiography[J]. Chin J Cardiol, 2011, 39(1): 49-52.
- [11] Wang LF, Tao LW, Huang MX, et al. Clinical evaluation of coronary in-stent restenosis using dual-source computed tomography[J]. Echocardiography, 2015, 32(11): 1681-1687. DOI: 10.1111/echo.12932.
- [12] Lee YW, Yang CC, Mok GS, et al. Prospectively versus retrospectively ECG-gated 256-slice CT angiography to assess coronary artery bypass grafts-comparison of image quality and radiation dose [J/OL]. PLoS One, 2012, 7(11): e49212[2016-04-10]. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0049212>. DOI: 10.1371/journal.pone.0049212.
- [13] Heye T, Kauczor HU, Szabo G, et al. Computed tomography angiography of coronary artery bypass grafts; robustness in emergency and clinical routine settings[J]. Acta Radiol, 2014, 55(2): 161-170. DOI: 10.1177/0284185113494977.
- [14] Goetti R, Leschka S, Baumüller S, et al. Low dose High-Pitch spiral acquisition 128-Slice Dual-Source computed tomography for the evaluation of coronary artery bypass graft patency[J]. Invest Radiol, 2010, 45(6): 324-330. DOI: 10.1097/RLI.0b013e3181dfa47e.
- [15] Einstein AJ, Wolff SD, Manheimer ED, et al. Comparison of image quality and radiation doses of coronary computed tomographic angiography between conventional helical scanning and a strategy incorporating sequential scanning[J]. Am J Cardiol, 2009, 104(10): 1343-1350. DOI: 10.1016/j.amjcard.2009.07.003.
- [16] Zheng MW, Wu YJ, Wei MQ, et al. Low-Concentration contrast medium for 128-Slice Dual-Source CT coronary angiography at a very low radiation dose using prospectively ECG-triggered high-Pitch spiral acquisition[J]. Acad Radiol, 2015, 22(2): 195-202. DOI: 10.1016/j.acra.2014.07.025.
- [17] Marwan M, Mettin C, Pflederer T, et al. Very low-dose coronary

- artery Calcium scanning with high-pitch spiral acquisition mode: comparison between 120-kV and 100-kV tube voltage protocols[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2013, 7(1): 32–38. DOI:10.1016/j.jct.2012.11.004.
- [18] Zhang LJ, Qi L, De Cecco CN, et al. High-Pitch coronary CT angiography at 70 kVp with low contrast medium volume comparison of 80 and 100 kVp High-Pitch protocols[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2014, 93(22): 18. DOI:10.1097/MD.0000000000000092.
- [19] Fuchs TA, Stehli J, Bull S, et al. Coronary computed tomography angiography with model-based iterative reconstruction using a radiation exposure similar to chest X-ray examination[J]. *Eur Heart J*, 2014, 35(17): 1131–1136. DOI:10.1093/eurheartj/ehu053.
- [20] Schuhbaeck A, Achenbach S, Layritz C, et al. Image quality of ultra-low radiation exposure coronary CT angiography with an effective dose<0.1 mSv using high-pitch spiral acquisition and raw data-based iterative reconstruction[J]. *Eur Radiol*, 2013, 23(3): 597–606.
- [21] Koplay M, Kizilca O, Cimen D, et al. Prospective ECG-gated high-pitch dual-source cardiac CT angiography in the diagnosis of congenital cardiovascular abnormalities: Radiation dose and diagnostic efficacy in a pediatric population [J/OL]. *Diagn Interv Imaging*, 2016, pii: S2211–5684(16)30078–X[2016–04–10]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221156841630078X>. DOI: 10.1016/j.diii.2016.03.014.
- [22] Koplay M, Celik M, Avcı A, et al. Comparison between prospectively electrocardiogram-Gated high-pitch mode and retrospectively electrocardiogram-gated mode for dual-source CT coronary angiography[J/OL]. *Pol J Radiol*, 2015, 80: 561–568[2016–04–10]. <http://www.ncbi.nlm.gov/pmc/articles/PMC4699622>. DOI:10.12659/PJR.895232. eCollection 2015.
- [23] Matsubara K, Sakuda K, Nunome H, et al. 128-slice dual-source CT coronary angiography with prospectively electrocardiography-triggered high-pitch spiral mode: radiation dose, image quality, and diagnostic acceptability[J]. *Acta Radiol*, 2016, 57(1): 25–32. DOI: 10.1177/0284185114562467.
- [24] Apfaltrer P, Hanna EL, Schoepf U, et al. Radiation dose and image quality at High-Pitch CT angiography of the aorta: intraindividual and interindividual comparisons with conventional CT angiography [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2012, 199(6): 1402–1409. DOI: 10.2214/AJR.12.8652.
- [25] Bolen MA, Popovic ZB, Tandon N, et al. Image quality, contrast enhancement, and radiation dose of ECG-triggered high-pitch CT versus non-ECG-triggered standard-pitch CT of the thoracoabdominal aorta[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2012, 198(4): 931–938.
- [26] 戴颖钰, 马新星, 陈钢钢, 等. 四种 CT 扫描模式对肺动脉成像图像质量和辐射剂量的影响[J]. *中国医学影像学杂志*, 2015, 23(1): 4–7, 9. DOI:10.3969/j.issn.1005–5185.2015.01.002. Dai YY, Ma XX, Chen YY, et al. Effect of four CT scan modes on image quality and radiation dose of pulmonary angiography[J]. *Chin J Med Imaging*, 2015, 23(1): 4–7, 9.
- [27] Lu GM, Luo S, Meinel FG, et al. High-pitch computed tomography pulmonary angiography with iterative Reconstruction at 80 kVp and 20 mL contrast agent volume[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(12): 3260–3268. DOI:10.1007/s00330–014–3365–9.
- [28] Bauer RW, Schell B, Beerers M, et al. High-pitch dual-source computed tomography pulmonary angiography in freely breathing patients[J]. *J Thorac Imaging*, 2012, 27(6): 376–381. DOI:10.1097/RTI.0b013e318250067e.
- [29] Wang ZW, Chen Y, Wang Y, et al. Feasibility of low-dose contrast medium high pitch CT angiography for the combined evaluation of coronary, head and neck arteries[J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e90268[2016–04–10]. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0090268>. DOI:10.1371/journal.pone.0090268.
- [30] Sun K, Li K, Han R, et al. Evaluation of high-pitch dual-source CT angiography for evaluation of coronary and carotid-cerebrovascular arteries[J]. *Eur J Radiol*, 2015, 84(3): 398–406. DOI:10.1016/j.ejrad.2014.11.009.

(收稿日期: 2016–04–11)

(上接第 388 页)

- diotherapy for primary brain tumors delivered with active raster scanning at the Heidelberg Ion Therapy Center (HIT): early treatment results and study concepts[J]. *Radiat Oncol*, 2012, 7(41): 1–7. DOI:10.1186/1748–717X–7–41.
- [31] Hirasawa N, Tsuji H, Ishikawa H, et al. Risk factors for neovascular glaucoma after carbon ion radiotherapy of choroidal melanoma using dose-volume histogram analysis[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 67(2): 538–543. DOI:10.1016/j.ijrobp.2006.08.080.
- [32] Mizoe JE, Hasegawa A, Jingu K, et al. Results of carbon ion radiotherapy for head and neck cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2012, 103(1): 32–37. DOI:10.1016/j.radonc.2011.12.013.
- [33] Shinoto M, Yamada S, Yasuda S, et al. Phase I trial of preoperative, short-course carbon-ion radiotherapy for patients with resectable pancreatic cancer[J]. *Cancer*, 2013, 119(1): 45–51. DOI:10.1002/cncr.27723.

(收稿日期: 2016–06–29)