

·规范与共识·

CT 辐射剂量诊断参考水平专家共识

中华医学会放射学分会质量管理与安全管理学组

随着 CT 的广泛应用,电离辐射问题愈来愈受到关注,降低 CT 的辐射剂量是临床研究的热点问题,低辐射剂量 CT 检查是大势所趋。采用降低管电压、降低管电流、增加螺距等方法可以降低 CT 辐射剂量^[1-4],但过度追求低辐射剂量势必会对图像质量产生影响。为了应对日益增加的 CT 检查而带来的累积高辐射剂量问题,进而平衡辐射剂量与图像质量间的关系,国际相关机构,如联合国原子辐射影响科学委员会、国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)、国际原子能机构和 WHO,通过合作来获得医疗辐射防护的循证医学证据,建立并使用 CT 辐射剂量诊断参考水平(diagnostic reference levels, DRL)以取得辐射剂量和图像质量间的最佳平衡。目前,建立 DRL 已成为 CT 辐射防护的普遍性需求。

2012 年我国卫生部颁布的《X 线计算机断层摄影放射防护要求》中,首次使用了 DRL 的概念^[5],但公布的数据是利用模体测量后推导得出或总结国外调查的数据,无法反映我国 CT 检查辐射剂量分布的实际情况。2013 年,中华人民共和国国家职业卫生标准(GBZ-130-2013)中进一步提出,应遵循辐射防护最优化的原则^[6],在保证获得足够影像诊断信息的前提下尽可能降低受检者的辐射剂量。目前,我国仍缺少建立在大样本量数据基础上符合我国国情的 DRL。中华医学会放射学分会质量管理与安全管理学组牵头组织相关专家,在汇总国内多中心 CT 辐射剂量研究数据的基础上,对国内外

DRL 研究的现状进行总结,对 CT 辐射剂量诊断参考水平达成了一致意见,旨在推进国内对 DRL 的推广和使用,从而最大限度地优化辐射剂量与图像质量的平衡,达到从人群层面降低 CT 辐射剂量的目的。

一、与 DRL 相关的辐射剂量术语

1. CT 剂量指数(CT dose index, CTDI):表示沿 Z 轴方向产生 1 层图像的辐射剂量值,该值等于单次横断面扫描时轴面吸收剂量除以总 X 线束宽度,反映了 CT 机输出的相对辐射剂量水平。CTDI 包括 3 个参数:CTDI₁₀₀、加权 CTDI(weighted CT dose index, CTDI_w)和容积 CTDI(volume CT dose index, CTDI_{vol})。CTDI₁₀₀指 CT 的 X 线管旋转 1 周将平行于旋转轴(Z 轴,垂直于断层平面)的剂量分布 D(z)沿 Z 轴从 -50 mm 到 +50 mm 积分除以层厚 T 与扫描断层数 N 的乘积之商,反映的是在标准甲基丙烯酸甲酯模体中测得某点空气中沉积的 X 线能量。CTDI_w是电离辐射在辐射中心和边缘的加权平均值,即在辐射中心计算的 CTDI 值的 1/3 与在外围计算的 CTDI 值的 2/3 之和。CTDI_w描述 CT 扫描某一断层平面上的平均剂量状况,反映多层连续扫描的平均剂量(螺距=1 时),但对于不连续的多层扫描,CTDI_w不能准确反映其平均剂量。CTDI_{vol}描述多层螺旋 CT 在整个扫描容积范围内的平均辐射剂量,考虑了 X 线在 Z 轴方向上层边缘产生的“尾部区域”。CTDI_{vol}等于 CTDI_w与螺距的比值。

2. 剂量长度乘积(dose length product, DLP):DLP 为 CTDI_{vol}与扫描范围的乘积,反映一定扫描范围内的辐射剂量。CTDI_{vol}相同的患者由于扫描范围不同,DLP 不同。

3. 体型特异性剂量估算值(size-specific dose estimate, SSDE):人体吸收剂量不仅与设备输出剂量有关,还与患者体型有关。美国医学物理学家协会第 204 号报告提出了 SSDE 的概念^[7-10],即经过体型校正的患者吸收的 CT 辐射剂量,可通过体宽、体厚、有效直径通过查表或公式计算得到。SSDE 消除了体型变化对辐射剂量的影响,对于评估儿童的

DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2017.11.001

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0113400);南京军区医药卫生科研重大专项(142X13)

通信作者:卢光明,210002,南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院医学影像科,Email:cjr.luguangming@vip.163.com;刘士远,200003 上海,海军军医大学附属长征医院影像科,Email:cjr.liushiyan@vip.163.com

执笔者:张龙江,210002,南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院医学影像科,Email:kevinzhj@163.com

辐射剂量尤为重要。但由此获得的 SSDE 仅考虑了体型大小,而忽略了身体组织成分的影响。2014 年美国医学物理学家协会又提出了根据水等效直径计算的水等效 SSDE 的概念^[11],该参数既考虑了不同组织的密度,又考虑了患者体型,比 SSDE 更精确,尤其适用于胸部 CT^[12-13]。

4. 吸收剂量及有效剂量(effective dose, ED): 吸收剂量是 X 线沉积在受检者单位质量组织或器官内的能量。ED 指当所考虑的效应是随机性效应(如辐射诱发的癌症等)时,在全身非均匀照射的情况下,人体所有组织或器官当量剂量的加权总和。螺旋 CT 的 ED 是 DLP 与扫描组织特定的转换系数(k)的乘积^[14]。

二、低辐射剂量 CT 研究

降低管电压或管电流、增加螺距、新型探测器材料及图像重建算法均可有效降低辐射剂量^[14],联合使用不同方法能使 CT 扫描辐射剂量进一步降低^[15-19]。低辐射剂量胸部 CT 检查已用于肺癌筛查中。标准体型患者多层 CT 全肺扫描 ED 的参考值上限为 9.1 mSv^[20],我国《低剂量螺旋 CT 肺癌筛查专家共识》中推荐采用管电压 120 kVp、有效管电流 30~50 mAs 的扫描参数^[21],联合使用迭代重建算法可将 ED 降低至 0.6~1.5 mSv。肺癌 CT 筛查联合使用基于模型的迭代重组算法、低管电压(100 kV)、低有效管电流(15 mAs)技术,ED 可低至 0.43 mSv^[15]。

心血管领域降低 CT 辐射剂量的最主要方法是降低管电压,在联合应用迭代重建算法的前提下,管电压由 120 kV 降至 90 kV,辐射剂量可降低 60.6%,且对图像质量无明显影响^[16]。在主动脉 CT 成像中,联合应用低管电压(70 kV)与迭代重建方法不仅降低了 90% 的辐射剂量,还减少了 25% 的对比剂用量^[17]。低管电压(70 kV)、大螺距的冠状动脉 CT 成像能大幅降低辐射剂量至 0.2 mSv,但对受检者的体型和心率有较严格的要求^[18]。我国也在 2016 年出台了《心血管 CT 成像辐射剂量优化中国专家共识》,进一步规范了心血管 CT 成像辐射剂量优化的技术方案^[22]。

鼻窦低辐射剂量(100 kV、40 mAs)CT 扫描,与标准 CT 扫描方案(120 kV、100 mAs)相比,辐射剂量降低了 22%,是接受内窥镜鼻窦手术患者最佳且最低的辐射剂量^[19]。婴幼儿颅脑由于颅骨与脑组织的组织对比较好,适合采用低辐射剂量扫描方案。根据年龄与适应证调整扫描方案,可使辐射剂

量降低约 50%,较低年龄儿童辐射剂量降低更显著^[23]。

三、CT 辐射剂量 DRL 相关概念

为了在辐射剂量和图像质量间寻找最佳的平衡点,DRL 的概念应运而生,DRL 为在常规条件下某种特定检查程序对患者产生的辐射剂量水平^[24]。DRL 包括全国 DRL、地区及机构 DRL。全国 DRL 的确定基于对全国大规模受检者的剂量学调查,通常选取全国调查数据中典型患者辐射剂量分布的第 75 个百分位数作为全国 DRL^[25]。地区 DRL 为地区受检者辐射剂量分布的第 75 个百分位数^[25]。医疗机构应根据其特定的 CT 检查设备及扫描部位制定相应的机构 DRL,即医疗机构内 CT 辐射剂量分布的均数(或中位数)^[26]。DRL 的 3 类参考水平均应随着 CT 设备的更新或 CT 扫描方案的优化进行必要的修订^[27]。制定 DRL 需要遵循的原则是:(1)确定国家、地区或机构 DRL 的目标,如规范扫描技术;(2)根据国家、地区或机构相应的数据确定 DRL 值;(3)DRL 的测量方法应简单易行;(4)DRL 值度量患者所接受的射线量与相应变化的危险度;(5)需明确阐述用于实践中的 DRL 方式^[28]。

除了 DRL,还需要了解以下几个辐射防护优化的重要参数:(1)可达剂量(achievable doses, AD): AD 定义为在实践调研中辐射剂量分布的第 50 个百分位数^[25],辐射剂量在 DRL 范围内的设备,其进一步优化应以 AD 为目标。(2)诊断参考范围(diagnostic reference range, DRR): DRR 提供了辐射剂量的参考范围,其上、下限分别设置为辐射剂量分布的第 75 个百分位数和第 25 个百分位数。超过上限辐射剂量过高,需要调整扫描方案或优化扫描设备;而低于下限则可能会影响图像质量^[29]。(3)剂量限值:指从事辐射相关的人员不应超过的辐射剂量值^[30]。在实际工作中,不应将 DRL 和剂量限值混淆。DRL 用于描述职业辐射暴露和公共人群辐射暴露,而不针对医疗辐射暴露,是不能超过的数值;有时可根据临床需要选择超过 DRL;DRL 是根据标准体型制定的,不能用于个体。剂量限值可应用于个体。

四、CT 辐射剂量 DRL 的意义和重要性

国家、地区及机构间扫描设备及扫描方案各不相同,建立相匹配的 DRL 有利于评估实际工作中辐射剂量是否过高或过低^[31]。当一台 CT 设备在并非出于临床需求的前提下,常规辐射剂量超过 DRL,需要进行回顾性分析来确定是否可以进

化。通常需要通过 CT 设备状态和扫描方案进行调查分析,找到辐射剂量过高的原因,并进行改进。改进后需要再次评估设备的常规辐射剂量,确保其低于 DRL。美国辐射防护委员会建议,需要定期回顾 CT 扫描方案 and 操作方法(如至少每年 1 次)^[32]。应在患者检查前对新设备的扫描方案进行初始评估,在使用一段时间后(如 3~6 个月)再次进行评估。在所有步骤中,虽然应充分考虑到图像质量的需求,但不应该一味追求较高的图像质量。

建立 DRL 的目的不是最大限度地降低 CT 检查的辐射剂量,而是优化辐射剂量与图像质量的平衡。如果一个合理的 CT 检查,因辐射剂量过低导致图像质量欠佳,不能提供必要的临床信息,也就意味着接受了不必要的辐射暴露。通过 DRL 对辐射剂量进行调整,应使图像质量和辐射剂量均达到最优化。

五、CT 辐射剂量 DRL 的研究现状

建立 DRL 用于医疗照射的防护已成为一种趋势,全球多个国家已开始进行 CT 辐射剂量 DRL 的研究。在广泛调查的基础上,欧盟、美国的有关机构已制定了典型成年和代表性年龄组儿童受检者的 DRL^[32-33],并按照年龄^[34]、体宽^[35]、体型^[25,36]及适应证^[37]提出了进一步细化的 DRL。为了获得儿童辐射剂量的全国 DRL,澳大利亚于 2012 年按年龄分为 0~4 岁和 5~14 岁组,分析了儿童头部、胸部及腹盆腔的辐射剂量^[38]。2010 年,日本成立了日本医学研究与信息网收集医疗照射的相关资料,并建立了日本第一个全国 DRL^[39]。其他亚洲国家如新加坡、韩国等也相继建立了相应的 DRL^[40-41]。这些 DRL 多以地区 DRL 和机构 DRL 为主。埃及首个全国 DRL 研究中发现,尽管 CTDIvol 的 DRL 较低,但 DLP 的 DRL 却高于其他国家的标准,这主要与扫描范围较长有关^[42]。

根据其他国家的数据制定我国的 DRL 无法反映我国的实际情况,近年国内学者也开展了一些研究尝试建立全国和机构的 CT 辐射剂量 DRL。侯超等^[43]利用剂量管理软件汇总分析了 2015 年 7 月至 2016 年 6 月共 59 521 例成人 CT 检查数据,建立机构 DRL,有助于评估该医院 CT 扫描方案的合理性。牛延涛等^[44]调查了 2015 年 9 月至 2016 年 3 月全国 30 个省、自治区、直辖市的 168 家医院,收集 12 个检查项目共 15 970 个病例检查数据,获得常见 CT 扫描部位 CTDIvol 和 DLP 的分布,提供了 CT 辐射剂量 DRL。然而该数据中缺乏我国儿童 CT 辐

射剂量 DRL 数据。

为了调研全国范围的 CT 辐射剂量 DRL 并建立中国的 DRL,中华医学会放射学分会质量管理与安全管理学组于 2015 年 6 月成立中国 CT 辐射剂量管理项目工作组,利用专业辐射剂量管理软件,采集、管理和分析全国不同地域的 CT 辐射剂量数据,并于 2017 年中华医学会放射学分会学术年会上发布了该研究结果^[45]。该多中心研究的数据来自中国北部、中部及南部区域的 5 家综合性医院,采集数据时间跨度为 2016 年 2 月至 2017 年 1 月,采集部位包括头部、颈部、胸部、腹部、盆腔和冠状动脉,纳入的 CT 检查数为 448 684 人次,其中成人 425 763 人次,儿童 22 921 人次,获得成人及儿童各部位的 DRL^[45]。不同国家成人和儿童 CT 辐射剂量 DRL 见表 1、2。为利于和国外相关数据进行比较,表 1、2 中我国的数据仅列出了 CTDIvol 和 DLP 数据。

六、推荐意见

DRL 不是个体接受 CT 检查辐射剂量的参考,而是一个大样本调查后得出的整体水平上某一区域或全国范围内的辐射剂量参考水平。建议根据国家、地区或机构内的 CT 辐射剂量数据制定相应的 DRL,首先应建立机构 DRL 以优化本机构 CT 检查的辐射剂量水平;有条件者,应按患者年龄、体型、适应证、扫描设备等进一步细化 DRL。建议日常 CT 检查的辐射剂量在遵守国家主管部门相关规定的基础上,根据实际情况考虑本共识所列的全国 DRL 或机构 DRL,对超过 DRL 者应分析原因,及时调整以便降低辐射剂量。CT 扫描设备和扫描方案不断更新,也需对相应的 DRL 进行实时更新。在进行低辐射剂量 CT 研究时,应以达到辐射剂量分布的第 25 个百分位数为目标,如果辐射剂量低于该目标值,要特别考虑图像质量能否达到诊断要求。在实践中,辐射剂量的优化要同时将 DRL 和辐射剂量的第 25 个百分位数纳入考虑范围,达到辐射剂量和图像质量的最佳平衡。

专家共识委员会成员(按照姓氏拼音顺序排序) 白人驹(天津医科大学总医院放射科);崔进国(石家庄白求恩国际和平医院放射诊断科);董丹丹(哈尔滨医科大学附属第四医院医学影像科);高宏(中华放射学杂志编辑部);郭顺林(兰州大学第一医院放射科);韩萍(华中科技大学同济医学院附属协和医院放射科);洪楠(北京大学人民医院放射科);胡道予(华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科);焦俊(贵阳医学院附属医院放射科);李澄(东南大学附属中大医院放射科);李建军(海南省人民医院放射科);李明利(中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院放射科);林竹潇(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院

表1 不同国家成人各部位CT辐射剂量诊断参考水平

国家和机构	时间 (年)	头部		颈部		胸部		腹盆腔		胸、腹及盆腔连扫	
		CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)
ACR-DIR	2016	56	962	19	563	12 ^a	443 ^a	16 ^a	781 ^a	15 ^b	947 ^b
ACR-AAPM	2013	75	—	—	—	21	—	25	—	—	—
NCRP	2012	75	—	—	—	21	—	25	—	20	—
日本	2015	85	1 350	—	—	15	550	20 ^a	1 000 ^a	18	1 300
欧盟	2014	60	1 000	—	—	10	400	25	800	—	—
英国	2014	60	970	—	—	12	610	15	745	—	1 000 ^b
爱尔兰	2012	58	940	—	—	9	390	12	600	13 ^b	12 ^b
澳大利亚	2015	60	1 000	30	600	15	450	15	700	30	1 200
加拿大	2016	79	1 302	—	—	14	521	18	874	17 ^b	1 269 ^b
荷兰	2013	—	935.6	—	—	—	346.5	15	700	—	—
希腊	2014	67	1 055	—	—	14	480	16	760	17 ^b	1 020 ^b
埃及	2017	30 ^b	1 360	—	—	22	420	31	1 325	33	1 320
中国	2017	49	832	16	690	9	332	34 ^c	1 965 ^c	43	2 297

注: ACR-DIR: 美国放射学会-剂量指数注册; ACR-AAPM: 美国放射学会-美国医学物理学家协会; NCRP: 国家辐射防护与测量委员会; CTDIvol: 容积CT剂量指数; DLP: 剂量长度乘积; 埃及头部数据为头颅增强数据; 中国数据为国内多中心CT辐射剂量调研分析数据; 荷兰腹盆腔数据为2012年数据。^a: (颈部、胸部、腹盆腔以及胸腹及盆腔连扫)平扫; ^b: (颈部、胸部、腹盆腔以及胸腹及盆腔连扫)增强扫描; 其他平扫和增强扫描结果一致。^c: 腹部与盆腔平扫的辐射剂量之和。欧盟颈部增强扫描的DLP为500 mGy·cm; ACR-DIR胸部增强扫描的CTDIvol和DLP分别为13 mGy、469 mGy·cm, 腹盆腔增强扫描的CTDIvol和DLP分别为15 mGy、755 mGy·cm; 日本腹盆腔增强扫描的CTDIvol和DLP分别为15 mGy、1 800 mGy·cm; 中国胸部与腹部增强扫描的CTDIvol分别为11、18 mGy, DLP分别为468、1 787 mGy·cm。—: 无数据

表2 不同国家儿童各部位CT辐射剂量诊断参考水平

国家和机构	时间(年)	头部		胸部		腹部		腹盆腔	
		CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy·cm)
ACR-AAPM	2013	40	—	—	—	—	—	20	—
日本	2015								
<1岁		38	500	11.0(5.5)	210(105)	11.0(5.5)	220(110)	—	—
1~5岁		47	660	14.0(7.0)	300(150)	16.0(8.0)	400(200)	—	—
6~10岁		60	850	15.0(7.5)	410(205)	17.0(8.5)	530(265)	—	—
欧盟	2014	—	600、900	—	—	—	—	—	—
英国	2014								
<1岁		24	350	—	—	—	—	—	—
1~5岁		40	650	—	—	—	—	—	—
>5岁		60	860	—	—	—	—	—	—
澳大利亚	2015								
0~4岁		30	470	2	60	—	—	7	170
5~14岁		35	600	5	110	—	—	10	390
中国 ^a	2017	39	804	4	113	8	434	—	—

注: ACR-AAPM: 美国放射学会-美国医学物理学家协会; CTDIvol: 容积CT剂量指数; DLP: 剂量长度乘积; ^a: 国内多中心CT辐射剂量调研分析数据; 日本胸部和腹部的CT辐射剂量诊断参考水平采用16 cm模体测得, 括号内数据为采用32 cm模体测得; —: 无数据

医学影像科); 刘挨师(内蒙古医学院附属医院医学影像科); 刘含秋(复旦大学附属华山医院放射科); 刘士远(海军军医大学附属长征医院影像科); 刘文亚(新疆医科大学第一附属医院影像中心); 卢光明(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院放射科); 罗天友(重庆医科大学附属第一医院放射科); 马林(解放军总医院放射科); 彭卫军(复旦大学附属肿瘤医院放射诊断科); 史大

鹏(河南省人民医院影像科); 王骏(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院医学影像科); 王维(中南大学湘雅三医院放射科); 萧毅(海军军医大学附属长征医院影像科); 徐凯(徐州医学院附属医院医学影像科); 许乙凯(南方医科大学南方医院影像诊断科); 严福华(上海交通大学医学院附属瑞金医院放射科); 杨维竹(福建医科大学附属协和医院放射科); 银武(西藏自治区人民医

院影像科);袁建华(浙江省人民医院放射科);张辉(山西医科大学第一医院放射科);张龙江(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院医学影像科);张敏鸣(浙江大学医学院附属第二医院放射科);张明(西安交通大学第一附属医院影像科);张永海(青海省人民医院医学影像科);赵卫(昆明医科大学第一附属医院放射科);周纯武(中国医学科学院肿瘤医院医学影像科);周顺科(中南大学湘雅二医院放射科);朱力(宁夏医科大学总医院放射科);朱文珍(华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科);曾献军(南昌大学第一附属医院影像科);詹松华(上海中医药大学曙光医院放射科)

参 考 文 献

- [1] Spearman JV, Schoepf UJ, Rottenkolber M, et al. Effect of automated attenuation-based tube voltage selection on radiation dose at CT: an observational study on a global scale [J]. Radiology, 2016, 279(1): 167-174. DOI:10.1148/radiol.2015141507.
- [2] Zhang LJ, Qi L, Wang J, et al. Feasibility of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography with 30 mL iodinated contrast agent at 70 kVp: initial experience[J]. Eur Radiol, 2014, 24(7): 1537-1546. DOI:10.1007/s00330-014-3157-2.
- [3] Mangold S, Wichmann JL, Schoepf UJ, et al. Automated tube voltage selection for radiation dose and contrast medium reduction at coronary CT angiography using 3(rd) generation dual-source CT[J]. Eur Radiol, 2016, 26(10): 3608-3616. DOI: 10.1007/s00330-015-4191-4.
- [4] Zhang LJ, Wang Y, Schoepf UJ, et al. Image quality, radiation dose, and diagnostic accuracy of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography at 70 kVp in a clinical setting: comparison with invasive coronary angiography[J]. Eur Radiol, 2016, 26(3): 797-806. DOI:10.1007/s00330-015-3868-z.
- [5] 中华人民共和国卫生部. X 线计算机断层摄影放射防护要求[S]. 2012-08-30.
- [6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 中华人民共和国国家职业卫生标准(GBZ-130-2013)[S]. 2013-12-11.
- [7] American Association of Physicists in Medicine. Size-specific dose estimates (SSDE) in pediatric and adult body CT examinations (Task Group 204)[M]. College Park: American Association of Physicists in Medicine, 2011.
- [8] Brady SL, Kaufman RA. Investigation of American Association of Physicists in Medicine Report 204 size-specific dose estimates for pediatric CT implementation[J]. Radiology, 2012, 265(3): 832-840. DOI:10.1148/radiol.12120131.
- [9] Brink JA, Morin RL. Size-specific dose estimation for CT: how should it be used and what does it mean?[J]. Radiology, 2012, 265(3): 666-668. DOI:10.1148/radiol.12121919.
- [10] Christner JA, Braun NN, Jacobsen MC, et al. Size-specific dose estimates for adult patients at CT of the torso[J]. Radiology, 2012, 265(3): 841-847. DOI:10.1148/radiol.12112365.
- [11] American Association of Physicists in Medicine. Use of water equivalent diameter for calculating patient size and size-specific dose estimates (SSDE) in CT (Task Group 220) [M]. College Park: American Association of Physicists in Medicine, 2014.
- [12] Wang J, Christner JA, Duan X, et al. Attenuation-based estimation of patient size for the purpose of size specific dose estimation in CT. Part II. Implementation on abdomen and thorax phantoms using cross sectional CT images and scanned projection radiograph images[J]. Med Phys, 2012, 39(11): 6772-6778. DOI:10.1118/1.4757586.
- [13] Wang J, Duan X, Christner JA, et al. Attenuation-based estimation of patient size for the purpose of size specific dose estimation in CT. Part I. Development and validation of methods using the CT image[J]. Med Phys, 2012, 39(11): 6764-6771. DOI:10.1118/1.4754303.
- [14] Deak PD, Smal Y, Kalender WA. Multisection CT protocols: sex-and age-specific conversion factors used to determine effective dose from dose-length product[J]. Radiology, 2010, 257(1): 158-166. DOI:10.1148/radiol.10100047.
- [15] Ju YH, Lee G, Lee JW, et al. Ultra-low-dose lung screening CT with model-based iterative reconstruction: an assessment of image quality and lesion conspicuity[J]. Acta Radiol, 2017: 284185117726099. DOI:10.1177/0284185117726099.
- [16] Vonder M, Pelgrim GJ, Meyer M, et al. Dose reduction techniques in coronary calcium scoring: the effect of iterative reconstruction combined with low tube voltage on calcium scores in a thoracic phantom[J]. Eur J Radiol, 2017, 93: 229-235. DOI:10.1016/j.ejrad.2017.06.001.
- [17] Zhang LJ, Li X, Schoepf UJ, et al. Non-electrocardiogram-triggered 70-kVp high-pitch computed tomography angiography of the whole aorta with iterative reconstruction: initial results[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40(1): 109-117. DOI:10.1097/RCT.0000000000000329.
- [18] Wang W, Zhao YE, Qi L, et al. Prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography at 70 kVp with 30 ml contrast agent: an intraindividual comparison with sequential scanning at 120 kVp with 60 ml contrast agent[J]. Eur J Radiol, 2017, 90: 97-105. DOI:10.1016/j.ejrad.2017.02.020.
- [19] Bang M, Choi SH, Park J, et al. Radiation dose reduction in paranasal sinus CT: with feasibility of iterative reconstruction technique[J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2016, 155(6): 982-987. DOI:10.1177/0194599816664335.
- [20] 唐威, 黄遥, 吴宁, 等. 64 层螺旋 CT 胸部低剂量扫描方案优选的多中心研究[J]. 中华放射学杂志, 2011, 45(2): 142-148. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2011.02.011.
- [21] 中华医学会放射学分会心胸学组. 低剂量螺旋 CT 肺癌筛查专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2015, 49(5): 328-335. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.05.003.
- [22] 中华医学会放射学分会质量控制与安全管理专业委员会. 心血管 CT 成像辐射剂量优化中国专家共识 [J]. 中华医学杂志, 2016, 96(7): 510-516. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.07.004.
- [23] Albert GW, Glasier CM. Strategies for computed tomography radiation dose reduction in pediatric neuroimaging[J]. Neurosurgery, 2015, 77(2): 228-232. DOI:10.1227/NEU.0000000000000764.
- [24] Harding K, Thomson WH. Radiological protection and safety in medicine-ICRP 73[J]. Eur J Nucl Med, 1997, 24(10): 1207-1209.
- [25] Kanal KM, Butler PF, Sengupta D, et al. U.S. Diagnostic reference levels and achievable doses for 10 adult ct examinations[J]. Radiology, 2017, 284(1): 120-133. DOI: 10.1148/radiol.2017161911.
- [26] MacGregor K, Li L, Dowdell T, et al. Identifying Institutional diagnostic reference levels for CT with radiation dose index

- monitoring software[J]. Radiology, 2015, 276(2): 507-517. DOI:10.1148/radiol.2015141520.
- [27] IAEA. Radiation protection and safety of radiation source: international basic safety standards-Interim edition. IAEA Safety Standard Series GSR Part 3 (Interim) [R]. Vienna: IAEA, 2011:66.
- [28] ICRP. Radiological protection in medicine, ICRP Publication 105[R]. Oxford:Elsevier, 2008.
- [29] Goske MJ, Strauss KJ, Coombs LP, et al. Diagnostic reference ranges for pediatric abdominal CT[J]. Radiology, 2013, 268(1): 208-218. DOI:10.1148/radiol.13120730.
- [30] Vassileva J, Rehani M. Diagnostic reference levels[J]. AJR Am J Roentgenol, 2015, 204(1): W1-W3. DOI:10.2214/AJR.14.12794.
- [31] Smith-Bindman R, Moghadassi M, Wilson N, et al. Radiation doses in consecutive CT examinations from five university of California Medical Centers[J]. Radiology, 2015, 277(1): 134-141. DOI:10.1148/radiol.2015142728.
- [32] National Council on Radiation Protection. Reference levels and achievable doses in medical and dental imaging: recommendations for the United States, Report No. 172[R]. Bethesda: NCRP, 2012.
- [33] European Union. Diagnostic reference levels in thirty six European countries Part 2[R]. 2014.
- [34] De Bondt T, Mulkens T, Zanca F, et al. Benchmarking pediatric cranial CT protocols using a dose tracking software system: a multicenter study[J]. Eur Radiol, 2017, 27(2): 841-850. DOI:10.1007/s00330-016-4385-4.
- [35] Goske MJ, Strauss KJ, Coombs LP, et al. Diagnostic reference ranges for pediatric abdominal CT[J]. Radiology, 2013, 268(1): 208-218. DOI:10.1148/radiol.13120730.
- [36] Strauss KJ, Goske MJ, Towbin AJ, et al. Pediatric chest CT diagnostic reference ranges: development and application[J]. Radiology, 2017, 284(1): 219-227. DOI:10.1148/radiol.2017161530.
- [37] Lajunen A. Indication-based diagnostic reference levels for adult CT-examinations in Finland[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2015, 165(1-4): 95-97. DOI:10.1093/rpd/ncv087.
- [38] Hayton A, Wallace A. Derivation of Australian diagnostic reference levels for paediatric multi detector computed tomography[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2016, 39(3): 615-626. DOI:10.1007/s13246-016-0431-4.
- [39] Yonekura Y. Diagnostic reference levels based on latest surveys in Japan:Japan DRLs 2015[R]. Japanese Network for Research and Information on Medical Exposure. 2015.
- [40] Liang CR, Chen PXH, Kapur J, et al. Establishment of institutional diagnostic reference level for computed tomography with automated dose-tracking software[J]. J Med Radiat Sci, 2017, 64(2): 82-89. DOI:10.1002/jmrs.210.
- [41] Cho PK. The development of a diagnostic reference level on patient dose for head computed tomographyangiography examinations in Korea[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2013, 154(4): 505-509. DOI:10.1093/rpd/ncs264.
- [42] Salama DH, Vassileva J, Mahdaly G, et al. Establishing national diagnostic reference levels (DRLs) for computed tomography in Egypt[J]. Phys Med, 2017, 39: 16-24. DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.05.050.
- [43] 侯超, 张晓东, 刘建新, 等. 59 521 例 CT 检查辐射剂量分析[J]. 放射学实践, 2016, 31(12): 1155-1158. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2016.12.011.
- [44] 牛延涛, 张永县, 康天良, 等. 成年人 CT 扫描中辐射剂量和诊断参考水平的探讨[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(11): 862-867. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.11.013.
- [45] 卢光明, 张龙江. CT 辐射剂量调研分析[C]//2017 年中华医学会放射学分会质量与安全管理专业委员会学术年会论文汇编, 南京, 2017. 南京: 江苏省医学会, 2017: 1-5.

(收稿日期: 2017-09-20)

(本文编辑: 张晓冬)