

论 著

双源CT在单心室合并单心房诊断和分型中的应用价值

王建军 杨 瑞* 刘继伟

王倩倩 范玉欢

河南省胸科医院,郑州大学附属胸科医院
(河南 郑州 450000)

【摘要】目的 探讨心电门控双源CT血管造影(DSCTA)用于先天性单心室(SV)合并单心房(SA)的诊断价值。方法 对27名患有单心室合并单心房的严重复杂型先天性心脏病患者进行DSCTA检查,进行诊断分型并归纳其合并的畸形情况。结果 27例患者依据主心室腔的形态学特征分类,左心室型8例、右心室型12例、不确定型7例,相应占比分别为29.63%、44.44%、26.00%。心房正位9例(9/27, 33.33%),心房反位1例(1/27, 3.70%),心房不定位17例(17/27, 62.96%,其中包含1例左心房异构,16例右心房异构);合并畸形30种188处。左室双出口、右室双出口和小梁囊在三种类型单心室之间具有统计学差异($P<0.05$)。不确定型与左心室型单心室在右房异构方面存在统计学差异($P<0.05$),其他方面没有统计学显著差异($P>0.05$)。DSCT与经胸超声心动图在评估左肺动脉直径、腹主动脉直径以及McGoorn指数方面存在相关性。结论 DSCTA可准确诊断单心室、单心房及合并畸形,为外科手术适应症、风险评估提供参考。

【关键词】先天性;单心室;单心房;
体层摄影术;X线计算机

【中图分类号】R445.3; R541.1

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.06.023

The Application Value of Dual Source CT in the Diagnosis and Typing of Single Ventricle Combined with Single Atrium

WANG Jian-jun, YANG Rui*, LIU Ji-wei, WANG Qian-qian, FAN Yu-huan.

Department of Radiology, Henan Provincial Chest Hospital(Chest Hospital of Zhengzhou University), Zhengzhou 450000, Henan Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the value of ECG-gated dual-source computed tomography angiography (DSCTA) in the diagnosis of single atrium (SV) and single atrium (SA). **Methods** DSCTA was performed in 27 patients with severe complex congenital heart with disease SV combined SA. The classification diagnosis was made, and the complicated deformities were summarized. **Results** According to the morphological characteristics of the main ventricular cavity, the 27 patients were classified as left ventricular type (8 cases), right ventricular type (12 cases) and uncertain type (7 cases) (29.63%, 44.44% and 26.00%, respectively). Atrial situs solitus was found in 9 (9/27, 33.33%), atrial situs inversus was found in 1 (1/27, 3.70%) and atrial situs ambiguous was found in 17 (17/27, 62.96%, including right atrial isomerism in 16 and left atrial isomerism in 1 patient). The patients complicated with 30 kinds, totally 188 deformities. There were statistically significant differences between the left ventricular double outlet, right ventricular double outlet and trabecular capsule of three types of single ventricle ($P<0.05$). There were statistical differences in right atrial isomerism between uncertainty type and left ventricular type single ventricle ($P<0.05$), and no statistically significant differences in other aspects ($P>0.05$). Left pulmonary artery diameter, abdominal aorta diameter and McGoon index measured by two methods of DSCT and TTE were correlated. **Conclusion** DSCTA can accurately diagnose single ventricle, single atrium and associated malformations, and provide reference for surgical indications and risk assessment.

Keywords: Congenital; Single Ventricle; Single Atrium; Tomography; X-ray Computed

单心室(single ventricle, SV)合并单心房(single atrium, SA)是一组严重的复杂、发绀型先天性心脏病(简称先心病),由于混合含氧血液在全身循环,患者可出现心脏杂音、呼吸窘迫、发绀或低血压等^[1]。SV是指一个心腔完全接受来自三尖瓣和二尖瓣或共同房室瓣的血流;或者整个房室连接仅与一个心室腔相连,发生率约占先心病的1.0%~3.0%,遗传率相对较高^[2-4]。SA为房间隔完全缺失,是一种罕见的房间隔缺损类型^[5-7]。SV的诊断即是心胸外科手术的适应证^[2],早期判断其分型并明确合并畸形情况对于选择手术方式及评估预后至关重要。然而,SV合并SA多为个案报道,本研究旨在探讨心电门控双源CT血管造影(dual-source computed tomography angiography, DSCTA)在诊断SV合并SA中的效用。

1 资料与方法

1.1 一般资料 收集2009年4月至2022年9月我院27例确诊的SV合并SA患者,其中男性14例,女性13例,年龄1.3个月至23岁,平均(7.86±7.50)岁。26例临床表现为紫绀症状,13例为杵状指(趾);体格检查显示17例患者胸骨左缘第2-4肋间可闻及收缩期杂音,10例患者胸骨右缘第2-4肋间可闻及收缩期杂音,17例患者肺动脉第2音减弱,2例患者肺动脉第2音亢进。

1.2 仪器与方法 采用德国西门子SOMATOM Definition Flash双源CT扫描仪;对比机采用非离子型造影剂碘海醇(350mgI/mL)。对于能正常配合的患者进行屏气训练后屏气扫描。对于无法配合检查的患儿,在扫描前进行10%水合氯醛(0.5mL/kg体重)灌肠镇静,同时开通静脉通道,麻醉状态下扫描。采取回顾性心电门控技术,扫描范围为胸锁关节至膈前上棘。扫描参数:0-6岁患儿,管电压80kV;7-12岁患儿,管电压100kV;12岁以上患者,管电压80~100kV, Care DOSE 4D自动管电流调节;机架旋转时间0.28s/周,螺距0.6 mm,准直宽度128×0.6 mm,扫描层厚0.6 mm,重建层厚1 mm,重建层间距1 mm,矩阵512×512。使用Ulrich Medical高压注射器通过上肢静脉注射碘海醇,12岁以下患儿注射流率为0.3~1.5 mL/s,剂量为1.0~1.5 mL/kg体重。12岁以上患者注射流率4.0~5.0 mL/s,剂量为75mL。注射比剂后以同样速率注射10~30mL生理盐水。监视四腔心层面心脏四腔室均有对比剂流入后,立即手动触发扫描。

1.3 图像和分析指标 检查完成后由Siemens主机(Syngo acquisition workplace)自动选取最佳收缩期和最佳舒张期图像,重建各心动周期图像并选择最佳增强期相(心脏各腔室及大血管对比剂均匀且浓度高的期相)。将原始图像传送至Siemens Syngo工作站,使用多平面重组(MPR)、最大密度投影(MIP)、最小密度投影(MinIP)、容积再现(VR)等后处理技术观察心内、外畸形。所有数据由两位放射科副主任及以上职称医师采用双盲法独立进行分析,意见不一致时对图像重新评价,经讨论获得一致结果。先心病外科治疗中国专家共识^[2]归纳了SV的3种分型方法。Van Praagh分类法将SV分为4型:A

【第一作者】王建军,男,副主任医师,主要研究方向:心血管影像学。E-mail: 88429720@qq.com

【通讯作者】杨 瑞,女,主任医师,主要研究方向:心血管影像学。E-mail: yangruizz@163.com

型：单纯左心室发育，无右室窦部；B型：单纯右心室发育，无左心室窦部；C型：室间隔未发育或仅有残余室间隔，又称双心室型；D型：左右心室窦部和室间隔均未发育，又称不定型SV。Anderson分型方法分3型：左心室型、右心室型及不确定型，与Van Praagh分类法不同之处在于Anderson分型法纳入了二尖瓣、三尖瓣闭锁。第三种是国际先天性心脏病命名学和数据库采用功能性SV概念进行的分类^[8]。本研究采用Anderson分型。按照先天性心脏病节段分析法，依次明确诊断心房位置、静脉-心房连接关系、心室位置、房-室连接类型、大动脉(主动脉和肺动脉)位置及心室-动脉连接关系。

1.4 统计学处理 采用SPSS 25.0统计学软件对收集的数据资料进行统计分析。对计量资料进行正态性检验，符合正态分布者采用平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)描述，两组间均值比较采用独立样本t检验。计数资料采用例数、百分比(%)表示，百分比的比较采用卡方检验或Fisher精确检验，另采用Pearson相关分析评价相关性。以上均以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 总体分布 最终纳入27例SV合并SA患者，均行DSCTA及经胸超声心动图(TTE)检查，获得解剖细节清晰的高质量图像进行影像学分析。患者年龄1.3个月~23岁，平均年龄 7.86 ± 7.50 岁，其中男14例，女13例。27例SV合并SA患者中，左心室型、

右心室型、不确定型SV分别为8例(8/27, 29.63%; 图1)、12例(12/27, 44.44%; 图2、3)、7例(7/27, 26.00%; 图4)。心房正位9例(9/27, 33.33%)，心房反位1例(1/27, 3.70%; 图3)，心房不定位17例(17/27, 62.96%)，后者包括右心房异构16例(图1、2、4)及左心房异构1例。在DSCTA检查下，27例SV合并SA共伴发畸形30种188处(表1)，最常见的心内畸形为共同房室瓣(22/27, 81.48%)。两种最常见的大血管异常是大动脉转位(12/27, 44.44%)和双上腔静脉(9/27, 33.33%)。最常见的心血管外畸形是右肺异构(18/27, 66.67%)(表1)。

2.2 三种单心室分型合并单心房的比较 各不同类型SV在左室双出口、右室双出口、小梁囊方面存在统计学差异($P < 0.05$)。不确定型与左心室型SV在右房异构方面存在统计学差异($P = 0.041 < 0.05$)，在其他方面无统计学差异($P > 0.05$)(表2)。

2.3 肺动脉及McGoan指数比较 以McGoan 比值 > 1.5 (有双侧肺动脉的患者)拟实施Glenn手术为依据^[2]，DSCT所测量的左肺动脉、腹主动脉直径和McGoan指数均高于TTE，差异均有统计学意义($P < 0.05$)。除了右肺动脉直径之外，DSCT与TTE评估的左肺动脉直径中度相关($r = 0.606$)，腹主动脉直径高度相关($r = 0.949$)，McGoan指数高度相关($r = 0.829 > 0.8$)(表3)。

2.4 手术情况 本组中21例患者接受手术治疗，17例姑息手术中，单一行双向腔静脉-肺动脉吻合术(双向Glenn术)11例；3例行体-肺分流术；3例合并心血管复杂畸形患者同时行双向Glenn术及其他畸形矫治术。4例接受根治手术治疗的患者中，I期全腔肺动脉连接术(total cavopulmonary connection, TCPC)、分期TCPC分别为1例和3例，占比为4.76%、14.29%。

表1 单心室单心房患者伴发心内外畸形情况(例)

变量	左室型(n=8)	右室型(n=12)	不定型(n=7)	合计(n=27)
性别(男/女)	5/3	4/8	5/2	14/13
年龄(岁)	8.25±7.70	7.83±8.84	7.47±5.52	7.86±7.50
伴发畸形[n(%)]				
右房异构	2(25.00)	8(66.67)	6(85.71)	16(59.26)
左房异构	—	1(8.33)	—	1(8.33)
心房反位	—	1(8.33)	—	1(3.70)
右位心	—	2	1	3
无脾综合征	3(37.50)	7(58.33)	6(85.71)	16(59.3)
多脾综合征	—	1(8.33)	—	1(3.70)
共同房室瓣	7(87.50)	9(75.00)	6(85.71)	22(81.48)
完全型心内膜垫缺损	2(25.00)	7(58.33)	3(42.86)	12(44.44)
完全性肺静脉畸形连接	—	3(25.00)	1(14.29)	4(14.81)
部分性肺静脉畸形连接	1(12.50)	1(8.33)	1(14.29)	3(11.11)
大动脉转位	4(50.00)	4(33.33)	4(57.14)	12(44.44)
肺动脉狭窄	1(12.50)	6(50.00)	1(14.29)	8(29.63)
肺动脉闭锁	2(25.00)	3(25.0)	3(42.86)	8(29.63)
三尖瓣闭锁	1(12.50)	1(8.33)	2(28.57)	4(14.81)
右弓右降	3(37.50)	—	1(14.29)	4(14.81)
主动脉弓分支畸形	2(25.00)	1(8.33)	—	3(11.11)
动脉导管未闭	2(25.00)	3(25.00)	2(28.57)	2(28.57)
冠状动脉异常起源	1(12.50)	4(33.33)	2(28.57)	7(25.93)
粗大体-肺侧支血管	2(25.00)	2(16.67)	1(14.29)	5(18.52)
双上腔静脉	3(37.50)	3(25.00)	3(42.86)	9(33.33)
双下腔静脉	—	1(8.33)	—	1(3.70)
左位奇静脉弓	1(12.50)	—	—	1(3.70)
肺动静脉畸形	—	—	1(14.29)	1(3.70)
肝静脉回流异常	1(12.50)	—	—	1(3.70)
右肺异构	3(37.50)	9(75.00)	6(85.71)	18(66.67)
左肺异构	1(12.50)	1(8.33)	—	2(7.41)
支气管-肺反位	1(12.50)	1(8.33)	—	2(7.41)
气管性支气管	1(12.50)	—	1(14.29)	2(7.41)
腹腔脏器反位	2(25.00)	3(25.00)	—	5(18.52)
先天性唇裂	—	1(8.33)	—	1(3.70)

注：“—”表示未见此类畸形。

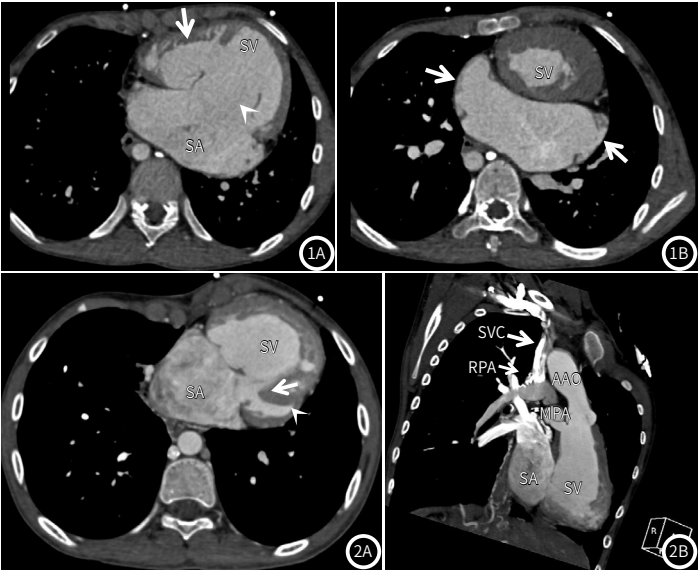


图1A 患者男，14岁，SV(左心室型)，SA(右房异构)DSCTA图 一组共同房室瓣(箭头)，主心室腔肌小梁纤细，为左心室结构；位于主心室腔右前侧的附属心腔(箭)小，肌小梁粗大且不与大动脉连接，称小梁囊；
图1B 患者男，14岁，SV(左心室型)，SA(右房异构)DSCTA图，两侧心耳双右结构，为宽钝三角形(箭)；
图2A 患者男，12岁，SV(右心室型)，SA(右房异构)DSCTA图，主心室腔与小梁囊(箭)通过球室孔(箭头)连接
图2B 患者男，12岁，SV(右心室型)，SA(右房异构)DSCTA图，主动脉与肺动脉均起自主心室腔(右室结构)，为右室双出口；双向Glenn术后，上腔静脉与右肺动脉连通。(RPA：右肺动脉；SVC：上腔静脉)

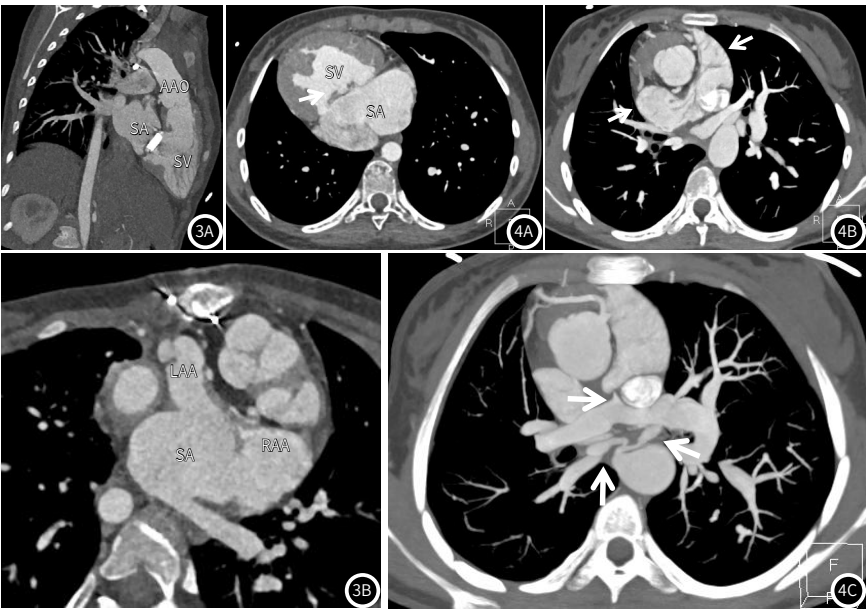


图3A 患者女，12岁，SV(右心室型)，SA(心房反位)房室瓣置换术+TCPC术后DSCTA图；主心室腔肌小梁粗大，为右心室结构；
图3B 患者女，12岁，SV(右心室型)，SA(心房反位)房室瓣置换术+TCPC术后DSCTA图；心耳反位，左心耳位于右侧，为宽基底类三角形；左心耳位于右侧，呈管状，边缘有深切迹；
图4A 患者女，16岁，SV(不定型)，SA(右房异构)DSCTA图；完全型心内膜垫缺损，房室瓣水平十字交叉消失，仅显示一组房室瓣(箭)，心室孤立无附属心腔，肌小梁非左、右心室形态，为不定型SV；
图4B 患者女，16岁，SV(不定型)，SA(右房异构)DSCTA图；箭示双侧心耳均为右心耳形态；
图4C 患者女，16岁，SV(不定型)，SA(右房异构)DSCTA图；合并肺动脉闭锁(Castaneda II型)，无主肺动脉瓣及主干，左、右肺动脉有连接(短箭)；胸降主动脉向左、右发出粗大体-肺动脉侧支血管供应双肺。

表2 三种单心室分型合并单心房对比[n(%)]

SV分型	n	共同房室瓣	两组房室瓣	单心室型房室连接			主心室腔双出口		合并肺动脉狭窄	合并肺动脉闭锁
				左侧房室无连接	右侧房室无连接	双入口型房室连接	左室双出口	右室双出口		
左心室型	8 ^b	7(87.50)	1(12.50) ^b	—	1(12.50) ^{ab}	7(87.50)	3(37.50)	—	1(12.50)	2(25.00)
右心室型	12 ^c	9(75.00)	3(25.00) ^c	1(8.33)	1(8.33)	10(83.33)	—	6(50.00)	6(50.00) ^c	3(25.00)
不确定型	7	6(85.71)	1(14.29)	1(14.29)	2(28.57)	4(57.14)	—	—	1(14.29)	3(42.86)
合计	27	22	5	2	4	21	3	6	8	8
χ^2		2.333	0.652	0.652	1.329	1.577	2.168	5.651	8.159	3.763
P		0.420	0.840	0.840	0.726	0.655	0.417	0.031	0.008	0.168

续表2

输出腔	小梁囊	支气管异构		
		右房异构	左房异构	心房反位
3(37.50) ^b	5(62.50)	2(25.00)	—	—
4(33.33) ^c	8(66.67)	8(66.67)	1(8.33)	1(8.33)
—	—	6(85.71)	—	—
7	13	16	1	1
3.344	9.054	5.754	1.399	1.399
0.238	0.011	0.066	1.000	1.000

注：a、b、c分别表示左心室型vs右心室型、左心室vs不确定型，右心室vs不确定型。
“—”表示未见此类畸形。

表3 单心室单心房患者肺动脉、腹主动脉及McGoan指数对比

检查方法	左肺动脉直径(mm)	右肺动脉直径(mm)	腹主动脉直径(mm)	McGoan指数
DSCT	10.58±3.79	10.11±3.93	11.40±3.35	1.89±0.61
TTE	9.26±2.78	12.11±6.55	10.95±3.13	1.81±0.52
r值	0.606	0.320	0.949	0.829
P值	0.001	0.103	0.000	0.000

3 讨 论

3.1 DSCTA在单心室合并单心房成像中的优势 先心病是我国最常见的出生缺陷，近半数未成年患者未接受手术治疗，已成为我国5岁以下儿童发育异常的主要死因^[9-10]。SV畸形多发生在妊娠第30至56天，预计在20年内全球SV患者数量将翻一番，未经手术治疗常是致命的^[4,11-13]。SV心脏只具备单一的发育良好的窦部、小梁部及流出道，其分型是基于内在的心肌形态学特征。左心室小梁部肌小梁纤维整齐且心内膜面柔滑，右心室肌小梁结构粗大且心内膜面粗糙^[14]。SV往往存在一个发育不全的附属小心腔，该心室与一个或两个大动脉连接时叫做输出腔，不与大动脉连接时叫做小梁囊，主心室腔和输出腔之间的通道称为球室孔或小梁间隔缺损。DSCTA舒张期图像可以清晰显示肌小梁形态，协助判定

单心室主心室腔及附属心腔类型、显示残存室间隔，测量小梁间隔缺损大小。SA的房间隔完全缺失，通过两组房室瓣或一组共同房室瓣连接主心室为双入口型房—室连接。从心脏CT开始，CT发展开始“分道扬镳”，与单源多排CT通过多扇区重建中将来自几个心动周期的数据组合成一幅图像系统不同，DSCT在扫描野实现了相当于机架旋转时间四分之一的的时间分辨率，仅采用单个心动周期的数据来重建图像，因此时间分辨率与患者的心率无关^[15-16]。在评价心外大血管空间排列关系、体-肺侧支血管走行路径方面，DSCTA具有明显优势，其三维重建技术利于显示复杂的空间解剖结构，使先心病无创性诊断更加趋于完善，尤其对危重患儿的检查安全性较高^[17-18]。横断位四腔心或心脏长轴位MIP

图能够清楚显示两组分开的房室瓣,当两组房室瓣融合,其纤维间隔消失时,便形成了共同房室瓣。本研究中,以右室型SV、右房异构型SA最常见,DSCTA共检出伴发畸形30种188处,最常见的心内、外畸形分别为共同房室瓣、大动脉转位。左室双出口、右室双出口和小梁囊在三种类型单心室之间具有统计学差异($P<0.05$)。不确定型与左心室型单心室在右房异构方面存在统计学差异($P<0.05$),其他方面没有统计学上的显著差异。本组TTE漏诊畸形10处,包括冠状动脉异常起源7处(7/27, 25.93%),部分性肺静脉畸形连接2处(2/27, 7.41%),粗大体-肺侧支血管5处(5/27, 18.52%);而DSCTA均未出现漏诊,由此可见,对于TTE诊断有一定困难的心外血管复杂畸形如主动脉病变、冠脉异常、肺静脉畸形、体-肺侧支循环、支气管肺结构异常等,建议TTE联合DSCTA检查,可优势互补,减少漏、误诊率。

3.2 DSCTA对选择单心室单心房治疗方案的价值 SV合并SA解剖矫治死亡率高,生理矫治姑息手术是主要术式^[2,19],手术策略制定因解剖及病理生理学差异而呈现多样化。手术方式包括双向Glenn术、体肺分流术、肺动脉环束术及Fontan类手术,心外管道的TCPC术是目前国际上最常用的术式。制定手术策略的原则是保持体循环和肺循环平衡,保护肺血管床及SV功能^[20]。双向Glenn手术要求对患者肺动脉的发育程度进行评估,建议McGoon比值 >1.5 ;对于伴有动脉导管或开口直径大于1.5~2.0mm的体-肺侧支血流进行封堵处理;术时结扎奇静脉以防止患者的血氧饱和度降低;且必须对存在双上腔静脉的患者行双侧上腔静脉-肺动脉吻合^[2],DSCT可以一站式完成以上评估和测量,本组检出双上腔静脉占比33.33%(9/27),动脉导管未闭占比25.93%(7/27),左位奇静脉弓占比3.70%(1/27)。DSCT在评价肺动脉及其分支的发育、体-肺侧支血管的数量及走行方面甚至优于心血管造影,而且可以检出支气管-肺畸形、肺动静脉瘘等异常^[21-22]。在评价患者肺血管的发育状况方面,本研究显示DSCT与TTE在评估左肺动脉直径、腹主动脉直径以及McGoon指数方面存在相关性。影响TCPC相关决策的因素主要包括肺静脉畸形连接、内脏异位综合征、肺动脉高压等危险因素,如果不加控制,就会失去手术机会^[2]。本研究中伴发肺静脉畸形连接(7/27, 25.93%)、内脏心房异位综合征(17/27, 62.96%)、肺动脉狭窄(8/27, 29.63%)或闭锁(8/27, 29.63%)、冠脉异常等多种畸形(7/27, 25.93%),增加了TCPC风险。

综上,DSCTA在制定SV伴SA手术策略密切相关的肺动脉发育状况、肺静脉畸形连接、内脏心房异位综合征、冠状动脉异常起源、体-肺侧支等诸多畸形的一站式检出方面,具有较明显优势。随着DSCTA更广泛地应用于先心病评估,尽管其具有时间分辨率高、不受患者心率影响等诸多优势,但其仍需应对许多挑战,尤其是对瓣膜、腱索的动态显示方面,另外本研究病例数较少,仍需扩大样本量进一步验证本文的结论。

参考文献

- [1] Vlahos AP, Lock JE, McElhinney DB, et al. Hypoplastic left heart syndrome with intact or highly restrictive atrial septum: outcome after neonatal transcatheter atrial septostomy[J]. *Circulation*, 2004, 109(19): 2326-2330.
- [2] 花中东, 李守军. 先天性心脏病外科治疗中国专家共识(八): 单心室生理矫治系列手术[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(9): 979-986.

- [3] Hinton RB Jr, Martin LJ, Tabangin ME, et al. Hypoplastic left heart syndrome is heritable[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2007, 50(16): 1590-1595.
- [4] Garcia AM, Beatty JT, Nakano SJ. Heart failure in single right ventricle congenital heart disease: physiological and molecular considerations[J]. *American Journal of Physiology Heart and Circulatory Physiology*, 2020, 318(4): H947-H965.
- [5] 接连利, 刘清华, 许燕. 胎儿心脏病理解剖与超声诊断学[M]. 人民卫生出版社, 2010.
- [6] Jacobs JP, Quintessenza JA, Burke RP, et al. Congenital heart surgery nomenclature and database project: atrial septal defect[J]. *The Annals of Thoracic Surgery*, 2000, 69(4 Suppl): S18-24.
- [7] Zhang Y, Yang ZG, Yang MX, et al. Common atrium and the associated malformations: Evaluation by low-dose dual-source computed tomography[J]. *Medicine*, 2018, 97(46): e12983.
- [8] Jacobs ML, Mayer JE Jr. Congenital heart surgery nomenclature and database project: single ventricle[J]. *The Annals of Thoracic Surgery*, 2000, 69(4 Suppl): S197-204.
- [9] 中国生物医学工程学会体外循环分会, 赵举, 黑飞龙, 等. 2021年中国心外科手术和体外循环数据白皮书[J]. *中国体外循环杂志*, 2022, 20(4): 196-199.
- [10] 胡盛寿. 《先天性心脏病外科治疗中国专家共识》述评[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2021, 28(1): 1-3.
- [11] Schilling C, Dalziel K, Nunn R, et al. The Fontan epidemic: population projections from the Australia and New Zealand Fontan registry[J]. *International Journal of Cardiology*, 2016, 219: 14-19.
- [12] Dhanantwari P, Lee E, Krishnan A, et al. Human cardiac development in the first trimester: a high-resolution magnetic resonance imaging and episcopic fluorescence image capture atlas[J]. *Circulation*, 2009, 120(4): 343-351.
- [13] Sizarov A, Ya J, De Boer BA, et al. Formation of the building plan of the human heart: morphogenesis, growth, and differentiation[J]. *Circulation*, 2011, 123(10): 1125-1135.
- [14] Wilkinson JL, Anderson RH. Anatomy of functionally single ventricle[J]. *World Journal for Pediatric & Congenital Heart Surgery*, 2012, 3(2): 159-164.
- [15] 韩倩, 侯阳. 四种品牌CT设备成像质量的研究[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, (1): 168-170.
- [16] Schmidt B, Flohr T. Principles and applications of dual source CT[J]. *Phys Med*, 2020, 79: 36-46.
- [17] 中华医学会小儿外科学分会心胸外科组. 新生儿危重先天性心脏病术前评估中国专家共识(草案)[J]. *中华小儿外科杂志*, 2017, 38(3): 164-169.
- [18] Holbrook MD, Clark DP, Badea CT. Dual source hybrid spectral micro-CT using an energy-integrating and a photon-counting detector[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2020, 65(20): 205012.
- [19] Jonas RA. Fontan or septation: when I abandon septation in complex lesions with two ventricles[J]. *Seminars in Thoracic and Cardiovascular Surgery Pediatric Cardiac Surgery Annual*, 2009: 94-98.
- [20] Hsu DT. The Fontan operation: the long-term outlook[J]. *Current Opinion in Pediatrics*, 2015, 27(5): 569-575.
- [21] 侯洁, 肖俊睿, 孙玉, 等. MSCT诊断肺动脉闭锁伴室间隔缺损[J]. *中国医学影像技术*, 2018, 34(4): 528-532.
- [22] Bhalla S, Javidan-Nejad C, Bierhals AJ, et al. CT in the evaluation of congenital heart disease in children, adolescents, and young adults[J]. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*, 2008, 10(5): 425-432.

(收稿日期: 2023-06-09)

(校对编辑: 孙晓晴)