

临床研究

DOI: 10.11699/cyxb20130315

深低温停循环与选择性顺行性脑灌注在小儿主动脉弓手术中的应用效果比较

黄贵金,舒仕瑜,徐 颖,徐红珍,刘 巍,叶 茂

(重庆医科大学附属儿童医院麻醉科,儿童发育疾病研究教育部重点实验室,儿科学重庆市重点实验室,重庆市儿童发育重大疾病诊治与预防国际科技合作基地,重庆 400014)

【摘要】目的:比较深低温停循环(deep hypothermic circulatory arrest, DHCA)与选择性顺行性脑灌注(selective antegrade cerebral perfusion, SACP)在小儿主动脉弓手术中的应用效果。**方法:**回顾性分析我院 2008 年 1 月至 2012 年 3 月 60 例在体外循环下行主动脉缩窄或主动脉弓中断合并心内畸形矫治术患儿的临床资料,根据脑保护方法分为 DHCA 组($n=23$)和 SACP 组($n=37$),对其术中体外循环转流情况和术后恢复情况进行比较。**结果:**与 DHCA 组比较,SACP 组转流中最低鼻咽温和最低直肠温显著升高($P<0.05$);术后 24 h 胸腔引流量、术后机械通气时间比较,显著降低($P<0.05$)。2 组死亡率、神经系统并发症、急性肾功能衰竭和低心排出量综合征发生率差异无统计学意义($P>0.05$)。**结论:**小儿主动脉弓手术中 DHCA 与 SACP 的脑保护效果相似。SACP 有利于术后呼吸功能的恢复,减少术后出血。

【关键词】深低温停循环;选择性顺行性脑灌注;儿童;主动脉弓;脑保护

【中国图书分类法分类号】R614.2;R654.1;R726.1

【文献标志码】A

【收稿日期】2012-09-27

Comparasion between deep hypothermic circulatory arrest and selective antegrade cerebral perfusion during pediatric aortic arch surgery

HUANG Guijin, SHU Shiyu, XU Ying, XU Hongzhen, LIU Wei, YE Mao

(Department of Anesthesiology, the Children's Hospital, Chongqing Medical University, Ministry of Education, Key Laboratory of Child Development and Disorders, Key Laboratory of Pediatrics in Chongqing, Chongqing International Science and Technology Cooperation Center for Child Development and Disorders)

【Abstract】Objective: To evaluate the efficacy between deep hypothermic circulatory arrest (DHCA) and selective antegrade cerebral perfusion (SACP) used in pediatric aortic arch surgery. **Methods:** Sixty cases undergoing repair of coarctation of aorta or interrupted aortic arch complicated with cardiac monstrosity from January 2008 to March 2012 in our hospital were retrospectively reviewed. They were divided into two groups according to the method of cerebral protection: DHCA group ($n=23$) and SACP group ($n=37$). Perioperative variables between the two groups were compared. **Results:** The lowest nasopharyngeal and rectal temperatures were significantly higher, postoperative intubation time was longer and thorax output during postoperative 24 h was larger in SACP group than in DHCA group ($P<0.05$). There was no significant difference between two groups in terms of hospital mortality, occurrence of postoperative neurological complication, acute renal failure and low cardiac output syndrome ($P>0.05$). **Conclusions:** Cerebral protective effect of DHCA and SACP in pediatric aortic arch surgery is comparable. SACP has the advantages of better recovery of respiratory function and less postoperative bleeding.

【Key words】 deep hypothermic circulatory arrest; selective antegrade cerebral perfusion; child; aortic arch; brain protection

主动脉缩窄(coarctation of aorta, CoA)或主动脉弓中断(interrupted aortic arch, IAA)是较危重的先天性心脏病,若合并其他心内畸形患儿早期即出现

严重的肺动脉高压和心力衰竭,需尽早手术治疗。目前多在体外循环(cardiopulmonary bypass, CPB)下行一期 CoA 或 IAA 合并心内畸形矫治术。术中需暂时中断脑血流,脑部缺血缺氧将对中枢神经系统造成损伤,导致神经系统并发症的发生。深低温停循环(deep hypothermic circulatory arrest, DHCA)和选择性顺行性脑灌注(selective antegrade cerebral per-

作者介绍:黄贵金, Email: HGJCQMU@126.com,

研究方向:小儿心血管麻醉与体外循环。

通信作者:叶 茂, Email: yemao3066@126.com。

基金项目:重庆市卫生局医学科研课题资助项目(编号:2012-2-094)。

fusion, SACP) 是这类手术中常用的两种脑保护方法。DHCA 利用深低温提高脑细胞对缺血缺氧的耐受力; SACP 保持脑及部分肢体的灌注, 减少脑缺血缺氧时间。成人研究认为 SACP 较 DHCA 的脑保护效果更好^[1], 但二者在小儿中应用的结果存在争议^[2-3]。最近研究表明, 新生儿主动脉弓重建术中, SACP 较 DHCA 有更好的肺、肾和肠道保护作用^[6-7]。本研究拟分析我院 2008 年 1 月至 2012 年 3 月在 CPB 下行 CoA 或 IAA 合并心内畸形矫治术患儿的临床资料, 比较 DHCA 与 SACP 在此类手术中应用的效果, 以期为临床提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集 2008 年 1 月至 2012 年 3 月重庆医科大学附属儿童医院胸心外科收治住院的 CoA 或 IAA 合并心内畸形患儿的临床资料。纳入标准: 在 CPB 环下行一期 CoA 或 IAA 合并心内畸形矫治术, 术中采用 DHCA 或 SACP 方法。排除标准: 术前合并神经系统功能异常、肾功能不全或凝血功能异常。全组 60 例, 男性 38 例, 女性 22 例; 年龄 10 d~13 岁, 平均 4.0(2.5, 7.9)个月; 体质量 2.6~44.0 kg, 平均 5.2(4.3, 6.7) kg; 诊断 CoA 46 例, IAA 14 例, 合并主动脉弓发育不良 2 例, 主肺动脉窗 4 例, 房间隔缺损 8 例, 室间隔缺损 33 例, 房间隔缺损并室间隔缺损 13 例, 右室双出口 5 例, 完全性肺静脉异位引流 1 例, 动脉导管未闭 40 例, 卵圆孔未闭 19 例。所有患儿术前经彩色多普勒心脏超声或胸部 CT 加血管重建检查确诊。术中使用的脑保护方法在早期以 DHCA 为主, 2009 年以后主要使用 SACP 方法。60 例患儿根据脑保护方法分为 DHCA 组($n=23$)和 SACP 组($n=37$)。

1.2 麻醉方法

麻醉诱导前 30 min 建立外周静脉通路, 均未用术前药。入手术室后常规监测心电图、血压和脉搏血氧饱和度。麻醉诱导: 静脉注射咪达唑仑 0.1 mg/kg、盐酸戊乙奎醚 0.01 mg/kg、舒芬太尼 1.0~1.5 μ g/kg 和顺式苯磺酸阿曲库铵 0.10~0.15 mg/kg。气管插管后机械通气, 吸入氧浓度 30%~50%, 潮气量 8~10 ml/kg, 呼吸频率 20~28 次/min, 吸呼比 1:1.5。右颈内静脉、右桡动脉、股动脉穿刺置管监测中心静脉压和上、下肢动脉血压。术中持续静脉泵注舒芬太尼 2~4 μ g/(kg·h)、顺式苯磺酸阿曲库铵 0.10~0.15 mg/(kg·h), 间断吸入 1%~2%七氟醚麻醉维持。

1.3 CPB 方法

采用 Stockert-C/III 型 CPB 机(德国), Dideco 901/902 型膜式氧合器(意大利), 宁波菲拉儿婴儿 CPB 管道和动脉微栓过滤器。预充液根据术前血红蛋白浓度、血细胞比容(hematocrit, HCT)加入勃脉力 A、红细胞悬液、新鲜冰冻血

浆、20%白蛋白, 常规使用甲基强的松龙、磷酸肌酸和速尿。采用升主动脉和上、下腔静脉插管建立 CPB; IAA 或导管前型 CoA 合并粗大未闭动脉导管的患儿还需从肺动脉经动脉导管插入降主动脉灌注管, 以保证下半身灌注。CPB 建立后开始血液及体表降温, 鼻咽温降至 32 $^{\circ}$ C 左右时阻断升主动脉, 灌注心脏停搏液。降温过程缓慢而均匀, 水温与血温的温差控制在 10 $^{\circ}$ C 内。DHCA 组在温度降至鼻咽温 17 $^{\circ}$ C~20 $^{\circ}$ C 时, 停止动脉血泵灌注并夹闭动脉管路, 麻醉医生手控呼吸皮囊鼓肺, 外科医生轻压患儿腹部, 使体内血液尽量引流至 CPB 机内, 然后阻断腔静脉并拔除右房插管, 钳夹静脉管路后 CPB 机以机器能达到的最低流量自身循环。降温及停循环期间患儿头部加用冰帽, 主动脉手术操作完成后恢复全身循环。SACP 组在鼻咽温 20 $^{\circ}$ C~25 $^{\circ}$ C 时将主动脉插管沿升主动脉向上伸入无名动脉内开始 SACP, 脑灌流量 15~35 ml/(kg·min), 监测桡动脉血压并维持在 25~40 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa), 保持颈内静脉血氧饱和度 60%以上。主动脉手术操作完成后将主动脉插管退回升主动脉内, 充分排气恢复全身灌注。先低温转流约 10 min, 静脉血氧饱和度达 65%以上后开始复温。术中具体情况在降温或复温阶段完成心内合并畸形的矫治。整个 CPB 转流过程维持 HCT 值 20%~30%, 采用 α -稳态管理血气, 均使用超滤。

1.4 观察指标

1.4.1 术中 CPB 转流情况 CPB 环时间、主动脉阻断时间、DHCA 或 SACP 时间、手术时间、最低鼻咽温、最低直肠温、最低 HCT、转流中尿量。

1.4.2 术后恢复情况

1.4.2.1 一般情况 术后 24 h 尿量、术后 24 h 胸腔引流量、正性肌力药物得分^[8]、清醒时间、机械通气时间、ICU 停留时间。

1.4.2.2 并发症 死亡、神经系统并发症^[9-10](包括苏醒延迟、癫痫、缺血缺氧性脑病、脑栓塞、昏迷、偏瘫、截瘫等)、急性肾功能衰竭(术后行透析治疗)、低心排出量综合征。

1.5 统计学处理

数据采用 SPSS 13.0 统计软件处理, 计量资料先经 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验。年龄、体质量、主动脉阻断时间、转流中尿量为偏态分布资料, 以中位数 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示, 组间比较采用两独立样本非参数检验(Mann-Whitney U 法)。射血分数、术前肾功能、CPB 时间、DHCA 或 SACP 时间等为正态分布资料, 以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 组间比较采用两独立样本 t 检验。性别、病种、术后并发症例数为计数资料, 采用卡方检验。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧), 以 $P \leq 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料

2 组患儿一般资料各指标的比较差异无统计学意义($P>$

0.05), 见表 1。

2.2 术中 CPB 转流情况

与 DHCA 组比较, SACP 组转流中降温程度显著减轻, 最低鼻咽温和最低直肠温均显著升高 ($P < 0.05$); 2 组 CPB 时间、主动脉阻断时间、DHCA 或 SACP 时间等术中 CPB 转流情况的其他指标比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 2。

2.3 术后一般情况

与 DHCA 组比较, SACP 组术后 24 h 胸腔引流量、机械通气时间均显著减少 ($P < 0.05$); 2 组术后 24 h 尿量、正性肌力药物得分、清醒时间、ICU 停留时间比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 3。

2.4 术后并发症

DHCA 组死亡 4 例, 其中 1 例因低心排综合征术毕不能停机死亡, 1 例因低心排、肺动脉高压危象死亡, 另 2 例因呼吸循环衰竭死亡; SACP 组死亡 5 例, 其中 2 例因低心排综合征术毕不能停机死亡, 2 例因呼吸循环衰竭死亡, 另 1 例因呼吸窘迫综合征死亡。DHCA 组出现神经系统并发症 3 例, 分别为 1 例脑栓塞和 2 例频繁抽搐; SACP 组 1 例频繁抽搐和 1 例双下肢肌张力异常。DHCA 和 SACP 组分别有 1 例和 2 例术后发生急性肾功能衰竭, 经腹膜透析治疗后肾功能恢复正常。DHCA 和 SACP 组分别有 5 例和 4 例术后发生低心排出量综合征。2 组患儿术后并发症发生情况比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 4。

表 1 2 组患儿一般资料各指标的比较

Tab.1 Comparison of general information between DHCA group and SACP group

组别	年龄 (月)	体质量 (kg)	性别 (n, 男/女)	病种 (n, CoA/IAA)	ASA 分级 (n, III/IV)	射血分数 (%)	术前肾功能	
							血肌酐 ($\mu\text{mol/L}$)	血尿素氮 (mmol/L)
DHCA 组 (n=23)	4.5 (2.5, 8.0)	5.4 (4.3, 7.0)	14/9	17/6	16/7	67.6 $\pm$ 10.1	31.1 $\pm$ 13.2	3.3 $\pm$ 1.5
SACP 组 (n=37)	3.7 (2.5, 8.5)	4.7 (4.3, 6.5)	24/13	29/8	22/15	67.5 $\pm$ 9.0	25.1 $\pm$ 11.0	3.6 $\pm$ 2.0
t 值或 Z 值、 χ^2 值	-0.373	-0.715	0.097	0.158	0.624	0.038	1.921	-0.423
P 值	0.709	0.475	0.755	0.691	0.430	0.970	0.060	0.674

表 2 2 组患儿术中 CPB 转流情况比较

Tab.2 Comparison of intraoperative CPB conditions between DHCA group and SACP group

组别	CPB 时间 (min)	主动脉阻断时间 (min)	DHCA 或 SACP 时间 (min)	手术时间 (h)	最低鼻咽温 ($^{\circ}\text{C}$)	最低直肠温 ($^{\circ}\text{C}$)	最低 HCT (%)	转流中尿量 [ml/(kg·h)]
DHCA 组 (n=23)	185.7 $\pm$ 55.8	73.0 (60.0, 95.0)	31.3 $\pm$ 9.4	5.3 $\pm$ 1.4	18.3 $\pm$ 1.4	21.3 $\pm$ 1.5	21.5 $\pm$ 2.5	6.8 (2.9, 8.6)
SACP 组 (n=37)	169.3 $\pm$ 80.9	71.0 (64.5, 92.5)	34.2 $\pm$ 10.4	5.1 $\pm$ 1.4	22.6 $\pm$ 2.9	25.0 $\pm$ 3.1	22.4 $\pm$ 2.5	6.9 (3.9, 13.8)
t 值或 Z 值	0.856	-0.601	-1.075	0.570	-7.848	-6.207	-1.404	-0.814
P 值	0.395	0.548	0.287	0.572	0.000	0.000	0.166	0.416

表 3 2 组患儿术后一般情况比较

Tab.3 Comparison of postoperative outcomes between DHCA group and SACP group

组别	术后 24 h 尿量 (ml/kg)	术后 24 h 胸腔引流量 (ml/kg)	正性肌力药物得分 (分)	清醒时间 (h)	机械通气时间 (h)	ICU 停留时间 (d)
DHCA 组 (n=23)	78.9 $\pm$ 36.5	42.3 $\pm$ 23.2	16.5 $\pm$ 5.8	3.9 $\pm$ 2.1	81.9 $\pm$ 55.0	7.1 $\pm$ 3.1
SACP 组 (n=37)	65.9 $\pm$ 20.7	23.0 $\pm$ 12.4	15.9 $\pm$ 5.7	3.0 $\pm$ 1.4	51.8 $\pm$ 46.3	5.6 $\pm$ 4.3
t 值	1.631	3.359	0.406	1.924	2.090	1.253
P 值	0.109	0.003	0.687	0.060	0.042	0.216

注: 正性肌力药物得分计算方法^[8]: 多巴胺 [$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$] + 多巴酚丁胺 [$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$] + 肾上腺素 [$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$] $\times 100$ + 去甲肾上腺素 [$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$] $\times 100$ + 米力农 [$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$] $\times 15$

表 4 2 组患儿术后并发症发生情况比较 (n, %)

Tab.4 Comparison of postoperative complication occurrences between DHCA group and SACP group (n, %)

组别	死亡	神经系统并发症	急性肾功能衰竭	低心排出量综合征
DHCA 组 (n=23)	4 (17.4)	3 (13.0)	1 (4.3)	5 (21.7)
SACP 组 (n=37)	5 (13.5)	2 (5.4)	2 (5.4)	4 (10.8)
χ^2 值	0.001	0.314	0.000	0.610
P 值	0.970	0.575	1.000	0.435

3 讨论

DHCA 利用深低温减慢代谢速度发挥器官保护作用,减少插管和阻断钳的干扰,提供安静无血的术野,是小儿复杂先心病矫治术中常用的 CPB 方法。但随着其应用后尤其长时间停循环后神经系统并发症的报道不断增多^[9-10],其他方法如 SACP、逆行性脑灌注等逐渐被应用。因此本中心早期在小儿主动脉弓手术中主要使用 DHCA,2009 年后以使用 SACP 为主。本研究参照文献^[11-12]神经系统并发症的诊断以出现明确的独立的神经系统体征为准,不包括多脏器衰竭中神经系统的晚期表现,并参照头颅 CT 或 MRI 检查结果,结合神经内科专业医生的会诊意见得出。参照文献^[6,8],将术后正性肌力药物得分作为反映心肌功能的指标。排除了术前合并神经系统功能异常、凝血功能异常和肾功能不全的患儿,以排除这些因素对术后恢复情况的影响。

神经系统损伤是小儿复杂心脏手术后最严重的并发症之一,其直接关系到术后其他并发症和死亡的发生率。文献报道小儿神经系统并发症发生率为 5.4%~18.9%^[9,11],死亡率 12%~20%^[3,5]。本研究中总体神经系统并发症发生率和死亡率分别为 8.3% 和 15%,在上述报道范围内。究竟选择何种脑保护方法能够减少神经系统并发症和死亡,目前存在争议。DHCA 利用深低温降低脑代谢率发挥脑保护作用,简单有效。它的主要缺点是 DHCA 降低却不能完全阻止脑代谢,因此应用时存在一定的时间限制。研究表明,鼻咽温 18℃ 左右时,DHCA 停循环的“安全”时限为 30~40 min^[10]。随着 DHCA 时间继续延长,术后神经系统并发症发生率和死亡率将明显升高^[9]。本研究中 DHCA 时间平均为 31.3 min,在停循环的“安全”时限内,为减少神经系统并发症提供重要保证。SACP 是在下半身停循环的情况下,经不同插管方式保持脑部灌注,为脑组织供血供氧来减轻脑损伤。由于 SACP 的插管方式、灌注流量、温度等方面没有一致标准,因此各中心的研究结果不尽相同。SACP 流量不足时大脑缺血,脑组织氧供需失衡;SACP 流量过高又会造成脑奢灌,引起脑水肿等并发症。文献报道的鼻咽温 18℃~20℃ 时婴幼儿 SACP 流量为 20~40 ml/(kg·min)^[2-3]和 40~60 ml/(kg·min)^[4,6-7]不等,Fraser 与 Andropoulos^[13]认为 SACP 流量低于 40 ml/(kg·min) 对大部分患儿不能保证足够

的脑血流和氧供应,SACP 流量不足时脑保护效果不如 DHCA。本研究中采用的 SACP 方法是将升主动脉插管向上伸入无名动脉内,直接灌注右侧大脑半球和右上肢,左侧大脑半球通过 Willis 环也可以得到血供。转流过程中监测颈内静脉血氧饱和度间接反映脑组织氧供需情况,同时利用右桡动脉压调整脑灌流量。成人研究表明,采用 SACP 能降低主动脉弓手术后中风的发生率,提高 3 年存活率^[1]。Morales 等^[14]也报道 SACP 是 IAA 矫治术患儿术后存活的独立保护因素。但本研究结果显示,SACP 与 DHCA 两组的死亡率和神经系统并发症发生率无差异,SACP 未较 DHCA 表现出更优越的脑保护效果。这一点与 Goldberg 等^[3]的结果一致,他们在 Norwood 手术病例中对 SACP 和 DHCA 进行随机对照研究,发现两组患儿二期手术前和术后 1 年的精神、智力发育指数无明显差异。本研究中,DHCA 时间未超过停循环的“安全”时限,SACP 流量低于 Fraser 与 Andropoulos^[13]40 ml/(kg·min) 的标准,这些可能是 DHCA 和 SACP 脑保护效果无差异的原因。这一结果说明,在一定时间范围内,DHCA 和 SACP 的脑保护效果相似。

主动脉弓手术中脑损伤的防治关注较多,对其他重要脏器如肺、肾和心的影响则研究较少。这类患儿术前常合并肺部感染、肺动脉高压,加上 CPB 环过程中缺血再灌注、炎性反应等的影响,均可能造成肺损伤,影响术后呼吸功能的恢复,导致术后机械通气时间延长。CoA 或 IAA 矫治时阻断降主动脉,肾脏血供停止,术后可能发生急性肾功能衰竭。因此术中对肺和肾功能的保护相当重要。Algra 等^[6-7]认为,CoA 或 IAA 患儿主动脉病变部位的侧枝循环丰富,SACP 时不仅灌注了大脑,可能还有少量血流通通过侧枝循环对肺和肾脏供血,但心肌得不到侧枝循环的灌注,因此 SACP 较 DHCA 有一定的肺和肾保护作用,二者对心肌功能的影响无明显差异。本研究结果显示,SACP 组术后机械通气时间明显短于 DHCA 组,两组术后正性肌力药物得分和低心排发生率无明显差异,与上述报道一致。说明 SACP 较 DHCA 对肺的损伤更小,对术后呼吸功能的恢复更有利。与上述报道不同的是,本研究中两组急性肾功能衰竭发生情况无明显差异,SACP 无肾保护作用,可能与急性肾衰发生率低、未选择敏感的肾损伤指标有关,二者对肾功能的影响有待进一步研究。

深低温是 DHCA 发挥器官保护作用的基础,但同时深低温对凝血系统的影响较大,温度降低到 20℃左右时会引起凝血功能紊乱,增加术后出血量^[14],深低温是术后出血二次开胸的独立危险因素^[15]。SACP 维持了一定流量的脑部灌注,为脑组织代谢供血供氧,因此脑保护不必再依赖于极深的低温。Ly 等^[16]在中低温和常温下下行 SACP 也取得了较好效果。考虑到较高温度下停止下半身循环对脊髓、肾脏等重要脏器的影响,SACP 时温度不宜过高,但是可以较 DHCA 的深低温程度减轻。本研究结果显示,SACP 组降温程度较 DHCA 组明显减轻,术后 24 h 胸引量显著减少。可能由于 SACP 减轻了深低温对凝血功能的损伤,从而减少术后出血。

本研究为回顾性分析,病例数有限,术中未用近红外光谱仪、经颅多普勒超声等实时监测脑氧饱和度 and 脑血流,未对患儿术后长期生存情况和远期神经、精神发育做进一步随访,可能影响到神经系统并发症的统计。今后还需要大样本的前瞻性随机对照试验来研究 DHCA 与 SACP 在小儿主动脉弓手术中的脑保护作用和对其他脏器功能的影响。

综上所述,DHCA 与 SACP 在小儿主动脉弓手术中的脑保护效果相似。SACP 有利于术后呼吸功能的恢复,减少术后出血。

参 考 文 献

- [1] Shihata M, Mittal R, Senthilselvan A, et al. Selective antegrade cerebral perfusion during aortic arch surgery confers survival and neuroprotective advantages[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2011, 141(4): 948–952.
- [2] Visconti K J, Rimmer D, Gauvreau K, et al. Regional low-flow perfusion versus circulatory arrest in neonates; one-year neurodevelopmental outcome[J]. Ann Thorac Surg, 2006, 82(6): 2207–2211.
- [3] Goldberg C S, Bove E L, Devaney E J, et al. A randomized clinical trial of regional cerebral perfusion versus deep hypothermic circulatory arrest; outcomes for infants with functional single ventricle[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2007, 133(4): 880–887.
- [4] Morales D L, Scully P T, Braud B E, et al. Interrupted aortic arch repair; aortic arch advancement without a patch minimizes arch reinterventions[J]. Ann Thorac Surg, 2006, 82(5): 1577–1583.
- [5] Tlaskal T, Vojtovic P, Reich O, et al. Improved results after the primary repair of interrupted aortic arch; impact of a new management protocol with isolated cerebral perfusion[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2010, 38(1): 52–58.
- [6] Algra S O, Kornmann V N, van der Tweel I, et al. Increasing duration of circulatory arrest, but not antegrade cerebral perfusion, prolongs postoperative recovery after neonatal cardiac surgery[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2012, 143(2): 375–382.
- [7] Algra S O, Schouten A N, Oeveren W, et al. Low-flow antegrade cerebral perfusion attenuates early renal and intestinal injury during neonatal aortic arch reconstruction[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2012, 144(6): 1323–1328.
- [8] Chen J S, Ko W J, Yu H Y, et al. Analysis of the outcome for patients experiencing myocardial infarction and cardiopulmonary resuscitation refractory to conventional therapies necessitating extracorporeal life support rescue[J]. Crit Care Med, 2006, 34(4): 950–957.
- [9] Clancy R R, Mcgaurn S A, Wernovsky G, et al. Risk of seizures in survivors of newborn heart surgery using deep hypothermic circulatory arrest[J]. Pediatrics, 2003, 111(3): 592–601.
- [10] Wypij D, Newburger J W, Rappaport L A, et al. The effect of duration of deep hypothermic circulatory arrest in infant heart surgery on late neurodevelopment; the Boston circulatory arrest trial[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2003, 126(5): 1397–1403.
- [11] 彭 东. 深低温停循环对婴幼儿心脏手术围术期的影响[J]. 南方医科大学学报, 2010, 30(2): 409–410.
- [12] Peng D. Effect of deep hypothermic circulatory arrest on infants in cardiac operation [J]. J South Med Univ, 2010, 30(2): 409–410.
- [13] 吴洪斌, 吴清玉, 许建屏, 等. 婴幼儿心脏手术后脑并发症的临床分析[J]. 中华小儿外科杂志, 2003, 24(3): 23–25.
- [14] Wu H B, Wu Q Y, Xu J P, et al. Cerebral complications in children undergoing operative correction of congenital heart disease[J]. Chin J Pediatr Surg, 2003, 24(3): 23–25.
- [15] Fraser C D Jr, Andropoulos D B. Principles of antegrade cerebral perfusion during arch reconstruction in newborns/infants[J]. Semin Thorac Cardiovasc Surg Pediatr Card Surg Annu, 2008, 11(1): 61–68.
- [16] Mossad E B, Machado S, Apostolakis J. Bleeding following deep hypothermia and circulatory arrest in children[J]. Semin Cardiothorac Vasc Anesth, 2007, 11(1): 34–46.
- [17] Kamiya H, Hagl C, Kropivnitskaya L, et al. The safety of moderate hypothermic lower body circulatory arrest with selective cerebral perfusion; a propensity score analysis[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2007, 133(2): 501–509.
- [18] Ly M, Roubertie F, Belli E, et al. Continuous cerebral perfusion for aortic arch repair; hypothermia versus normothermia[J]. Ann Thorac Surg, 2011, 92(3): 942–948.

(责任编辑: 关蕴良)