

氧供导向的体外循环灌注策略预防患者心脏术后急性肾损伤的临床研究

张娜*, 黄厚刚, 郑霞#

重庆医科大学附属永川医院麻醉科, 重庆

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月13日

摘要

目的: 探讨氧供导向的体外循环灌注策略是否能降低患者心脏术后急性肾损伤的发生率。方法: 选取2024年12月~2026年2月在重庆医科大学附属永川医院于浅低温体外循环下行心脏瓣膜置换手术的患者60名。根据体外循环管理方法分为传统灌注策略组(C组)和氧供导向灌注策略组(G组), 每组各30例。C组采用传统灌注策略, 根据体表面积调整匹配泵流量。G组采用氧供导向的体外循环灌注策略, 根据氧供指数(DO_{2i})调整泵流量。比较两组术中灌注指标包括体外循环(CPB)时间、主动脉阻断时间、术中库存红细胞(PRBCs)输注率、体外循环中最低鼻咽膀胱温度、最低血红蛋白(Hb)浓度、最低氧供指数(DO_{2i})、平均氧供指数(DO_{2i})等方面。比较两组术后临床结局指标包括术后48小时急性肾损伤(AKI)发生率、术后机械通气时间、ICU停留时间、总住院时间、术后并发症发生率、术后30天死亡率等。记录两组麻醉诱导后(T1)、主动脉阻断后10 min (T2)、主动脉开放前10 min (T3)、CPB停机(T4)、回ICU即刻0 h (T5)、回ICU 6 h (T6)、回ICU 12 h (T7)、回ICU 24 h (T8)各时间点的乳酸水平。结果: 两组的术中灌注指标比较, 在最低DO_{2i}、平均DO_{2i}方面G组高于C组, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 其余术中灌注指标两组无统计学差异($P > 0.05$)。两组术后临床结局指标比较, C组术后48小时急性肾损伤(AKI)发生率高于G组($P < 0.05$), 而术后机械通气时间、ICU停留时间、总住院时间、术后并发症发生率、术后30天死亡率等未呈现统计学差异($P > 0.05$)。采用重复测量方差分析比较两组乳酸(Lac)水平, 两组Lac水平主体间比较, T1~T8各时间点的Lac变化趋势大致一致, C组和G组比较差异无统计学意义($P > 0.05$); 两组Lac水平主体内比较, T2~T3时点与同组T1时点无统计学差异($P > 0.05$), T4~T8时点与同组T1时点有统计学差异($P < 0.05$)。结论: 氧供导向的体外循环灌注策略能显著降低患者心脏术后急性肾损伤的发生率, 更有利于患者的肾功能恢复。

关键词

体外循环, 心脏瓣膜置换手术, 氧供指数, 急性肾损伤

*第一作者。

#通讯作者。

A Clinical Study on the Prevention of Acute Kidney Injury after Cardiac Surgery by an Oxygen Delivery-Directed Perfusion Strategy during Cardiopulmonary Bypass

Na Zhang*, Hougang Huang, Xia Zheng#

Department of Anaesthesiology, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 8, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 13, 2026

Abstract

Objective: To investigate whether an oxygen delivery-directed perfusion strategy during cardiopulmonary bypass (CPB) can reduce the incidence of acute kidney injury (AKI) after cardiac surgery. **Methods:** A total of 60 patients who underwent cardiac valve replacement surgery under mild hypothermic CPB at the Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University from December 2024 to February 2026 were selected. They were divided into two groups based on the CPB management method: the traditional perfusion strategy group (Group C) and the oxygen delivery-directed perfusion strategy group (Group G), with 30 cases in each group. Group C received traditional perfusion management, adjusting pump flow according to body surface area. Group G received an oxygen delivery-directed CPB perfusion strategy, adjusting pump flow based on the oxygen delivery index (DO_{2i}). Intraoperative perfusion parameters were compared between the two groups, including CPB time, aortic cross-clamp time, intraoperative packed red blood cells (PRBCs) transfusion rate, lowest nasopharyngeal and bladder temperature during CPB, lowest hemoglobin (Hb) concentration, lowest DO_{2i} , and mean DO_{2i} . Postoperative clinical outcomes were compared between the two groups, including the incidence of acute kidney injury (AKI) within 48 hours post-surgery, postoperative mechanical ventilation time, ICU stay length, total hospital stay length, postoperative complication rate, and 30-day postoperative mortality rate. Lactate levels were recorded at the following time points: After anesthesia induction (T1), 10 minutes after aortic cross-clamping (T2), 10 minutes before aortic declamping (T3), at CPB discontinuation (T4), immediately upon ICU admission at 0 h (T5), at 6 h (T6), 12 h (T7), and 24 h (T8) after ICU admission. **Results:** Comparison of intraoperative perfusion parameters showed that the lowest DO_{2i} and mean DO_{2i} were significantly higher in Group G than in Group C ($P < 0.05$). No statistically significant differences were found in other intraoperative perfusion parameters between the two groups ($P > 0.05$). Regarding postoperative clinical outcomes, the incidence of AKI within 48 hours post-surgery was significantly higher in Group C than in Group G ($P < 0.05$). However, no statistically significant differences were observed between the groups in terms of postoperative mechanical ventilation time, ICU stay length, total hospital stay length, postoperative complication rate, and 30-day postoperative mortality rate ($P > 0.05$). Repeated measures ANOVA was used to compare lactate (Lac) levels between the two groups. The between-group comparison showed that the trends in Lac levels from T1 to T8 were generally consistent, with no statistically significant difference between Group C and Group G ($P > 0.05$). The within-group comparison showed that Lac levels at T2~T3 were not statistically significantly different from the T1 level within the same group ($P > 0.05$), while Lac levels at T4~T8 were statistically significantly different from the T1 level within the same group ($P < 0.05$). **Conclusion:** The oxygen delivery-directed perfusion strategy during cardiopulmonary bypass significantly reduce the inci-

dence of AKI after cardiac surgery, which is more beneficial for the recovery of patients' renal function.

Keywords

Cardiopulmonary Bypass, Heart Valve Replacement Surgery, Oxygen Delivery Index, Acute Kidney Injury

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

体外循环(cardiopulmonary bypass, CPB)是心脏手术中维持血液循环和气体交换的关键技术。然而, CPB 过程中灌注不足或氧供不充分可能导致组织缺血缺氧, 进而引发术后并发症, 其中急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)是心脏手术后最常见且严重的并发症之一, 在成年患者中发生率高达 20%~40%, 不仅显著增加了患者的病死率, 还会延长住院周期并加重医疗经济负担[1] [2]。因此, 如何在 CPB 过程中优化组织灌注, 预防术后 AKI 的发生, 是心脏外科领域长期关注的问题。

CPB 期间的组织器官灌注不足被认为是导致术后 AKI 的关键病理生理机制。肾脏作为对血流动力学变化和缺氧极为敏感的器官, 在 CPB 期间尤其脆弱[3]。传统的体外循环灌注策略通常基于患者的体表面积(body surface area, BSA)设定一个固定的灌注流量(如 2.2~2.6 L/min/m²), 并不能量化 CPB 中机体实际的氧供及氧耗, 可能存在隐性低灌注, 继而导致组织氧供需失衡及器官损伤风险。为克服传统灌注策略的局限性, 近年来新提出了氧供目标导向的体外循环灌注策略。该策略通过监测并调控机体的氧供指数(Oxygen delivery index, DO_{2i}), 旨在维持最佳的组织氧合, 从而预防和减轻器官功能损伤。DO_{2i} 整合了动脉血氧饱和度、动脉血氧分压、血细胞比容以及灌注流量指数, 更能综合地反应机体氧供, 因此 DO_{2i} 是 CPB 中“最佳灌注”的决定因素之一[4]。

最近一项多中心随机对照试验显示, 氧供导向灌注策略即维持 DO_{2i} > 280 mL/min/m², 可降低 AKI 发生率[5]。然而, 对照组 DO_{2i} 经常达到 280 mL/min/m² 或更高。这导致了两组之间的 DO_{2i} 差异有限。因此, 与常规灌注策略相比, 以氧供为导向的灌注策略是否能够降低患者 CPB 下心脏术后急性肾损伤发生率仍存在争议。本研究旨在证明, 维持更高水平的氧供指数 DO_{2i} 的灌注策略即 CPB 中维持 DO_{2i} > 300 mL/min/m², 可降低心脏术后 AKI 发生率, 对术后 AKI 起到一定预防作用。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

选取 2024 年 12 月~2026 年 2 月在重庆医科大学附属永川医院接受浅低温体外循环(CPB)下心脏瓣膜置换手术的患者 60 例。纳入标准: 1) 18 岁 ≤ 年龄 ≤ 75 岁; 2) 择期行 CPB 下心脏瓣膜置换术; 3) 美国麻醉协会(American Society of Anesthesiologists, ASA) III-IV 级; 4) 纽约心脏协会功能(New York Heart Association functional, NYHA) III-IV 级。排除标准: 1) 合并严重肝、肺、脑等重要脏器功能障碍者; 2) 术前存在急性肾损伤或慢性肾病者; 3) 术前左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF) < 40%; 4) 急诊手术或二次心脏手术(包括术中二次转机); 5) 合并严重感染或血液系统疾病; 6) 术中深低温停循

环。采用随机数字表法分为两组，氧供导向灌注组(G组，n=30)和传统灌注组(C组，n=30)。G组采用氧供导向的体外循环灌注策略，C组采用传统体外循环灌注策略。收集两组患者年龄、性别、体表面积、ASA 分级、NYHA 分级、血红蛋白(hemoglobin, Hb)浓度、红细胞压积(haematocrit, Hct)、血肌酐、左室射血分数、合并疾病等术前资料，后续行统计学分析，比较两组术前资料差异均无统计学意义($P > 0.05$) (见表 1)。本研究经重庆医科大学附属永川医院伦理委员会批准通过，研究对象均签署知情同意书。

Table 1. Comparison of preoperative data between the two patient groups

表 1. 两组患者术前资料比较

临床资料	C 组	G 组	t/χ^2 值	P 值
年龄($\bar{x} \pm s$, 岁)	57.47 \pm 10.56	57.00 \pm 9.97	0.176	0.861
男性[n (%)]	16 (53.3%)	14 (46.7%)	0.267	0.606
体表面积($\bar{x} \pm s$, m ²)	1.59 \pm 0.137	1.59 \pm 0.147	-0.036	0.971
ASA 分级[n (%)]			0.271	0.602
III	14 (46.7%)	12 (40.0%)		
IV	16(53.3%)	18 (60.0%)		
NYHA 分级[n (%)]			0.373	0.542
III	24 (80.0%)	22 (73.3%)		
IV	6 (20.0%)	8 (26.7%)		
Hb ($\bar{x} \pm s$, g/L)	129.36 \pm 17.51	135.50 \pm 22.81	-1.168	0.248
Hct ($\bar{x} \pm s$, %)	39.10 \pm 5.12	40.13 \pm 7.01	-0.652	0.517
血肌酐($\bar{x} \pm s$, umol/L)	73.70 \pm 14.59	77.90 \pm 16.97	-1.027	0.308
左室射血分数($\bar{x} \pm s$, %)	59.70 \pm 6.26	60.10 \pm 6.46	-0.243	0.809
高血压[n (%)]	11 (36.7%)	12 (40.0%)	0.071	0.791
糖尿病[n (%)]	4 (13.3%)	2 (6.7%)	0.185	0.667

2.2. 方法

2.2.1. 麻醉和体外循环方法

1) 麻醉方法

两组患者均接受全身麻醉。麻醉诱导药物包括咪达唑仑、舒芬太尼、丙泊酚和罗库溴铵，待完成诱导后行气管内插管，并连接呼吸机进行机械通气。同期完成桡动脉及中心静脉穿刺置管，并常规采用近红外光谱技术监测局部脑氧饱和度。麻醉维持阶段则持续给予七氟烷、丙泊酚、舒芬太尼及罗库溴铵。术中根据循环功能状态，使用血管活性药物(如肾上腺素、去甲肾上腺素、硝酸甘油)以维持血流动力学稳定。建立体外循环时，常规对主动脉及上下腔静脉进行插管，手术方式均为瓣膜置换术。所有患者的围术期管理，包括外科操作、麻醉实施、体外循环灌注及重症监护，均由同一组专科医师遵循标准化方案完成。

2) 体外循环方法

病例均采用 Sorin C5 型滚压泵和 Medtronic 氧合器建立体外循环。其预充方案为：复方氯化钠注射液 500 ml、琥珀酰明胶 500 ml、20%甘露醇(按 1.25 mL/kg 计算)以及人血白蛋白 20 g。整个转流过程维持血红蛋白水平不低于 80 g/L。使用 4:1 含血 Del Nido 停搏液进行心肌保护，首剂按 20 ml/kg 灌注，随

后每隔 1 小时复灌一次, 剂量减半为 10 ml/kg。抗凝管理上, 静脉注射肝素 300 U/kg, 待 ACT 监测值 ≥ 480 秒后, 启动体外循环。术中采用浅低温体外循环技术(维持温度 $32^{\circ}\text{C}\sim 34^{\circ}\text{C}$), 并将红细胞压积 Hct 维持在 24%以上, 平均动脉压维持在 50~80 mmHg 的范围内。术中常规每半小时监测 ACT 和动脉血气, 依据血气结果及时纠正电解质紊乱, 并酌情进行超滤。循环开放后, 心脏多可自动复跳(若未成功则行电除颤)。待心脏功能恢复至足以支持循环时, 即终止体外循环, 并按 1:1 比例(鱼精蛋白:肝素)精确中和肝素。术后患者常规转入 ICU 进行后续监护。

C 组采用传统灌注策略, 基于体表面积调整泵流量, 灌注流量 = 体表面积 \times 流量指数($2.2\sim 2.6$ L/min/m²), CPB 期间关注灌注流量(perfusion flow, PF)、Hct 和混合静脉血氧饱和度(mixed venous oxygen saturation, SvO₂)等传统指标。G 组采用氧供导向的体外循环灌注策略, 除关注以上传统指标外, 更以氧供指数 DO_{2i} 作为核心指导, 旨在协调并动态优化流量、Hct 与平均动脉压之间的关系。计算氧供指数 DO_{2i} (mL/min/m²) = 泵流量 PF (L/min/m²) \times [1.36 ml/g \times 血红蛋白 Hb (g/L) \times 血红蛋白饱和度 SaO₂ (%) + 动脉氧分压 PaO₂ (mmHg) \times 0.0031], 设定导向目标氧供指数 DO_{2i} > 300 mL/min/m²。两组流转期间维持平均动脉压 50~80 mmHg, 达到目标流量和目标氧供后, 合理提高灌注流量, 若平均动脉压 < 50 mmHg, 需要给与去甲肾上腺素升压。Hb 低于 80 g/L 时可选择超滤必要时输注红细胞悬液。根据出血情况、出凝血及血栓弹力图结果补充凝血因子、血小板、纤维蛋白原等。术毕所有患者带气管插管转入 ICU。

2.2.2. 观察指标

1) 术中灌注指标: 体外循环(CPB)时间、主动脉阻断时间、术中红细胞(packed red blood cells, PRBCs)输注率、CPB 期间最低鼻咽温与膀胱温、术中最低 Hb 浓度、最低氧供指数(DO_{2i})及平均氧供指数(DO_{2i})。

2) 术后临床结局指标比较: 主要结局指标为术后 48 小时内急性肾损伤(AKI)发生率, 依据 KDIGO 诊断标准[6]定义为: 术后 48 h 内血肌酐升高 ≥ 0.3 mg/dL, 或升高至基线值的 1.5 倍及以上, 或尿量持续 6 小时以上 < 0.5 mL/kg/h。次要结局指标包括: 术后机械通气(mechanical ventilation, MV)时间、重症监护室(intensive care unit, ICU)停留时间、总住院时间、严重并发症发生率(如低心排综合征、肺部感染、脑血管意外、术后出血), 以及术后 30 天死亡率。

3) 各时点乳酸 Lac 水平: 分别于以下 8 个时点记录相关数据包括麻醉诱导后(T1)、主动脉阻断后 10 min (T2)、主动脉开放前 10 min (T3)、CPB 停机(T4)、回 ICU 即刻 0 h (T5)、回 ICU 6 h (T6)、回 ICU 12 h (T7)、回 ICU 24 h (T8)。

2.2.3. 统计学分析

采用 SPSS 20.0 进行数据分析, 使用 GraphPad Prism 8 软件进行绘图。计数资料以 n (%)表示, 采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。计量资料采用 Shapiro-Wilk 检验进行正态分析, 正态分布数据以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)形式表示, 组间比较采用两组独立样本 t 检验; 非正态分布数据使用中位数和四分位数[M(Q1, Q3)]表示, 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。利用重复测量方差分析, 对组内不同时段的数据进行比较。P < 0.05 认为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 两组患者术中灌注指标比较

两组患者术中灌注情况比较, 在最低 DO_{2i}、平均 DO_{2i} 方面, G 组高于 C 组, 差异有统计学意义, (P < 0.05)。其余指标包括 CPB 时间、主动脉阻断时间、术中 PRBCs 输注率、CPB 中最低鼻咽膀胱温度、最低 Hb 浓度等方面, 均无统计学差异(P > 0.05)。见表 2。

Table 2. Comparison of intraoperative perfusion parameters between the two groups
表 2. 两组患者术中灌注指标比较

临床资料	C 组	G 组	t/χ^2 值	P 值
CPB 时间($\bar{x} \pm s$, min)	198.30 ± 52.13	204.53 ± 59.05	-0.433	0.666
主动脉阻断时间($\bar{x} \pm s$, min)	129.60 ± 44.11	136.03 ± 43.06	-0.572	0.570
术中 PRBCs 输注率[n (%)]	19 (63.3%)	16 (53.3%)	0.617	0.432
最低鼻咽温度($\bar{x} \pm s$, °C)	32.55 ± 0.48	32.42 ± 0.46	1.058	0.295
最低膀胱温度($\bar{x} \pm s$, °C)	32.86 ± 0.54	32.74 ± 0.53	0.813	0.419
最低 Hb 浓度($\bar{x} \pm s$, g/L)	85.66 ± 12.62	90.53 ± 12.35	-1.509	0.137
最低 DO _{2i} ($\bar{x} \pm s$, mL/min/m ²)	266.73 ± 25.88	307.53 ± 28.83	-5.768	0.000
平均 DO _{2i} ($\bar{x} \pm s$, mL/min/m ²)	284.13 ± 25.64	323.80 ± 24.44	-6.132	0.000

3.2. 术后临床结局指标比较

两组患者主要术后临床结局指标比较, C 组术后急性肾损伤(AKI)发生率高于 G 组, ($P < 0.05$)。两组次要术后临床结局指标: 术后机械通气时间、ICU 停留时间、总住院时间、术后并发症发生率、术后 30 天死亡率等未呈现统计学差异($P > 0.05$)。见表 3。

Table 3. Comparison of postoperative clinical outcomes between the two groups
表 3. 两组患者术后临床结局比较

临床资料	C 组	G 组	t/χ^2 值	P 值
AKI 发生率[n (%)]	10 (33.3%)	3 (10.3%)	4.812	0.028
MV 时间($\bar{x} \pm s$, h)	36.63 ± 26.80	36.33 ± 24.89	0.045	0.964
ICU 停留时间($\bar{x} \pm s$, h)	71.83 ± 45.22	68.80 ± 39.49	0.277	0.783
总住院时间($\bar{x} \pm s$, d)	27.87 ± 10.26	29.33 ± 9.70	-0.569	0.572
术后并发症发生率				
低心排综合征[n (%)]	6 (20.0%)	7 (23.3%)	0.098	0.754
肺部感染[n (%)]	9 (30.0%)	10 (33.3%)	0.077	0.781
脑血管意外[n (%)]	4 (13.3%)	2 (6.7%)	0.185	0.667
术后出血[n (%)]	1 (3.3%)	1 (3.3%)	0.000	1.000
术后 30 天死亡率[n (%)]	2 (6.7%)	1 (3.3%)	0.000	1.000

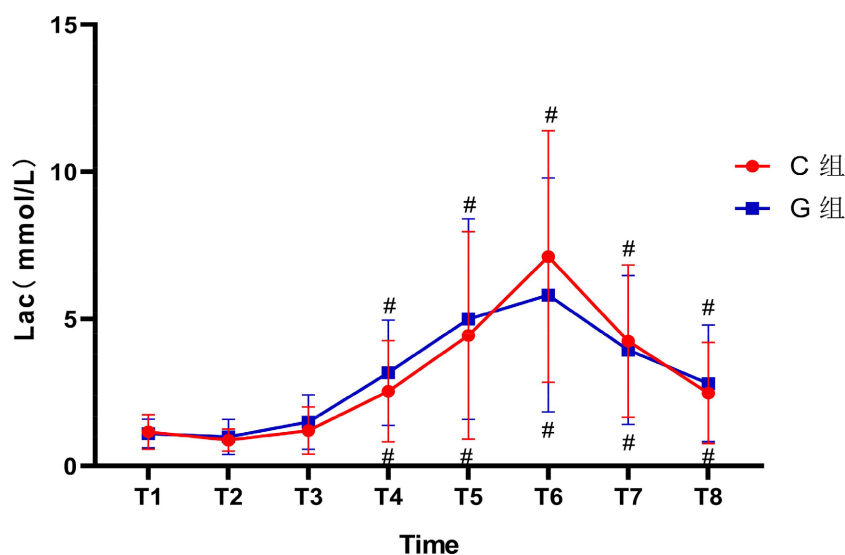
3.3. 两组患者乳酸(Lac)水平比较

采用重复测量方差分析比较两组 Lac 水平, 两组 Lac 主体间比较, 发现两组患者不同时间点的 Lac 变化趋势大致一致, T1~T8 各时间点, C 组和 G 组比较差异无统计学意义(主体间效应检验: 组别 $F = 0.007$, $P = 0.935 > 0.05$)。两组 Lac 主体内比较, 主体内效应检验时点 $F = 19.664$, $P = 0.00 < 0.05$, 而且时间因素和组别之间不存在交互效应(时点*组别 $F = 1.979$, $P = 0.076 > 0.05$), T2~T3 时点与同组 T1 时点 Lac 水平差异无统计学意义($P > 0.05$), T4~T8 时点与同组 T1 时点 Lac 水平差异有统计学意义($P < 0.05$)。患者从停机开始, Lac 显著升高, 并在 ICU 6 h 达到高峰, 而后逐渐回落, ICU 24 h 回落最明显。见表 4、图 1。

Table 4. Comparison of lactate levels between the two groups at different time points
表 4. 两组患者不同时间点乳酸(Lac)水平比较

临床资料	C 组	G 组	t 值	P 值
Lac 峰值浓度($\bar{x} \pm s$, mmol/L)				
T1	1.15 ± 0.58	1.09 ± 0.49	0.405	0.687
T2	0.87 ± 0.37	0.98 ± 0.59	-0.854	0.397
T3	1.20 ± 0.80	1.49 ± 0.92	-1.279	0.206
T4	2.53 ± 1.72	3.17 ± 1.78	-1.397	0.168
T5	4.43 ± 3.52	4.99 ± 3.41	-0.625	0.535
T6	7.11 ± 4.26	5.81 ± 3.97	1.224	0.226
T7	4.24 ± 2.58	3.94 ± 2.52	0.449	0.655
T8	2.47 ± 1.72	2.80 ± 1.98	-0.680	0.499

注：组别 $F = 0.007$, $P = 0.935 > 0.05$ ；时点 $F = 19.664$, $P = 0.00 < 0.05$ ；时点*组别 $F = 1.979$, $P = 0.076 > 0.05$ 。



备注：#表示组内各时间点与 T1 相比，Lac 水平差异有统计学意义， $P < 0.05$ 。

Figure 1. Comparison of lactate levels between the two groups at different time points using repeated measures ANOVA

图 1. 重复测量方差分析法比较两组患者不同时间点 Lac 值

4. 讨论

急性肾损伤(AKI)是心脏手术后最常见且严重的并发症之一。CPB 相关的 AKI 发病机制复杂，涉及肾脏缺血-再灌注损伤、血液稀释、非搏动性血流、低温以及全身炎症反应等多种因素[7][8]。其中，组织氧供不足被认为是启动肾脏损伤级联反应的关键始动环节[3]。传统灌注策略主要依据患者体表面积计算灌注流量，术中通过监测混合静脉血氧饱和度、乳酸等指标评估灌注情况，这些监测指标在反应全身组织器官氧供和氧耗方面存在着一定的不足，混合静脉血氧饱和度和乳酸易受微循环状态、动静脉短路的影响，Lac 具有滞后性。因此，传统灌注策略可能无法满足所有患者在 CPB 应激状态下的个体化代谢需求，易导致部分患者出现“隐性低灌注”状态。

氧供导向的灌注策略是在混合静脉血氧饱和度、乳酸等指标的基础上,将氧供指数(DO_{2i})作为灌注的核心目标。DO_{2i}的计算结合了术中实时的动脉泵流量、血红蛋白、氧饱和度以及氧分压,相比于乳酸和尿量等指标能更为全面地反映机体氧供情况,是实现体外循环“最佳”灌注的决定因素之一,更能早期、特异性地预测器官损伤风险[9] [10]。DO_{2i}能够综合反映机体氧供状况,并具有在CPB过程中早期预测组织低灌注及氧供需失衡的特点,可指导临床及时采取针对性干预措施,从而提升CPB管理质量,改善患者临床预后[11]。

本研究中G组在未显著增加输血率的情况下,通过优化泵流量即实现了DO_{2i}的提升,CPB期间维持DO_{2i} > 300 mL/min/m²。研究结果发现,氧供导向组(G组)术后48小时AKI发生率为10.3%,传统灌注组(C组)为33.3%,G组AKI发生率显著低于C组($P < 0.05$)。以上结果提示了氧供导向的灌注策略可能实现了更充分的组织灌注,维持了肾脏供需平衡,与既往研究结果一致[12] [13]。Ranucci等[5]的研究提出CPB期间存在一个DO_{2i}的“安全阈值”(约为280 mL/min/m²),低于该阈值将显著增加术后AKI的风险。然而,常规灌注组DO_{2i}经常达到280 mL/min/m²或更高,这导致了两组之间的DO_{2i}差异有限。因此,本研究采用的300 mL/min/m²作为目标值,策略上更为积极。本研究中,C组的最低DO_{2i}及平均DO_{2i}均显著低于G组($P < 0.05$),这证实了传统策略下存在氧供相对不足的风险。通过实时监测并主动干预以维持DO_{2i}在目标阈值以上,G组患者的肾脏在整个CPB期间可能经历了更少的缺血时间与更轻的缺血程度,从而有效保护了肾小管上皮细胞的功能,减轻了后续的炎症反应和细胞凋亡,最终体现为AKI发生率的降低。

围术期动态监测血乳酸水平,有助于评估患者组织氧供氧耗的匹配状况,并在一定程度上反应患者的预后[14]。然而本研究结果显示,尽管G组的氧供指数DO_{2i}高于C组,两组Lac水平主体间比较无统计学差异($P > 0.05$),且各时间点的乳酸变化趋势基本一致,与既往研究结果相符[15]。传统观念认为,血乳酸是组织缺氧和无氧代谢的标志物,DO_{2i}的提升理应伴随着乳酸水平的下降。本研究中两组乳酸水平的相似性可能由以下几方面解释:首先,全身动脉血乳酸水平可能无法灵敏地反映局部器官(如肾脏)的灌注状态[16]。在CPB的非生理状态下,组织器官难以得到生理状态下的搏动性均匀灌注,可能存在区域性灌注不足,即在全身氧供看似充足时,肾脏等特定器官仍可能经历短暂的灌注不足。其次,血乳酸水平受多种因素的影响,如CPB过程中的预充液类型、应激反应(包括儿茶酚胺释放、血液稀释、低温)等均可影响乳酸的生成与清除,其复杂性可能掩盖了不同灌注策略对乳酸代谢的细微影响。近年来有相关研究[13] [17]通过对DO_{2i}低于阈值的曲线下面积(area under the curve, AUC)的分析,表明了DO_{2i}低于阈值的深度与持续时间与术后AKI以及不良预后密切相关。随着体外循环技术的不断改进,灌注师在CPB过程中采取各种措施避免DO_{2i}持续或严重下降,减少了高乳酸血症及AKI等不良事件的发生。本研究中,两组Lac水平主体内比较,T2~T3时点与同组T1时点差异无统计学意义($P > 0.05$),T4~T8时点与同组T1时点有统计学差异($P < 0.05$)。两组均从停机(T4)开始,Lac显著升高,并在ICU 6 h达到高峰,而后逐渐回落,ICU 24 h回落最明显,但是仍高于基线水平。这可能是手术创伤应激及再灌注共同作用的结果,而非单纯由组织缺氧引起,但G组患者的肾脏可能因为术中获得了更好的氧供保护,从而具备了更强的应对这种全身性打击的能力,表现为更低的AKI发生率。

本研究结果显示,两组主要术后临床结局指标,C组术后48小时急性肾损伤(AKI)发生率高于G组($P < 0.05$)。两组次要术后结局指标包括术后机械通气时间、ICU停留时间、总住院时间、术后并发症发生率、术后30天死亡率等方面均无统计学差异($P > 0.05$)。

这可能与本研究的样本量较小有关,导致统计学效能不足以检测出这些指标的差异。此外,随着现代围术期管理水平的整体提升,对于中低风险的心脏手术患者,这些宏观预后指标的改善可能需要更大规模的样本或更长时间的随访才能显现。尽管如此,AKI本身是影响长期生存和生活质量的重要独立危

险因素,有效降低其发生率本身就具有重大的临床意义。

5. 结论

本研究显示,两组术后 48 小时内 AKI 发生率存在显著的统计学差异,证实了在心脏外科手术中采用以维持 $DO_{2i} > 300 \text{ mL/min/m}^2$ 为目标的氧供导向体外循环灌注策略,是一种安全、有效的肾脏保护措施,能够显著降低心脏术后早期 AKI 的发生率。鉴于 AKI 对患者预后的严重影响,该策略具有重要的临床应用价值。未来的研究应着眼于开展更大规模的多中心随机对照试验,以验证本研究的结论,并进一步探索该策略对患者长期预后(如远期肾功能和生存率)的影响。

声明

本研究获得重庆医科大学附属永川医院伦理委员会批准(审批号:2024EC0105),患者均签署知情同意书。

基金项目

永川区 2024 年度公益类科研项目(2024yc-cxfz30026)。

参考文献

- [1] Khuong, J.N., Wilson, T.G., Iyengar, A.J. and d'Udekem, Y. (2021) Acute and Chronic Kidney Disease Following Congenital Heart Surgery: A Review. *The Annals of Thoracic Surgery*, **112**, 1698-1706. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2020.10.054>
- [2] Zappitelli, M., Parikh, C.R., Kaufman, J.S., Go, A.S., Kimmel, P.L., Hsu, C., et al. (2020) Acute Kidney Injury and Risk of CKD and Hypertension after Pediatric Cardiac Surgery. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, **15**, 1403-1412. <https://doi.org/10.2215/cjn.00150120>
- [3] Lannemyr, L., Bragadottir, G., Krumbholz, V., Redfors, B., Sellgren, J. and Ricksten, S. (2017) Effects of Cardiopulmonary Bypass on Renal Perfusion, Filtration, and Oxygenation in Patients Undergoing Cardiac Surgery. *Anesthesiology*, **126**, 205-213. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000001461>
- [4] Brown, J.R., Baker, R.A., Shore-Lesserson, L., Fox, A.A., Mongero, L.B., Lobdell, K.W., et al. (2022) The Society of Thoracic Surgeons/Society of Cardiovascular Anesthesiologists/American Society for Extracorporeal Technology Clinical Practice Guidelines for the Prevention of Adult Cardiac Surgery-Associated Acute Kidney Injury. *Anesthesia & Analgesia*, **136**, 176-184. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000006286>
- [5] Ranucci, M., Johnson, I., Willcox, T., Baker, R.A., Boer, C., Baumann, A., et al. (2018) Goal-Directed Perfusion to Reduce Acute Kidney Injury: A Randomized Trial. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **156**, 1918-1927.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.04.045>
- [6] Levey, A.S., Eckardt, K., Dorman, N.M., Christiansen, S.L., Hoorn, E.J., Ingelfinger, J.R., et al. (2020) Nomenclature for Kidney Function and Disease: Report of a Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) Consensus Conference. *Kidney International*, **97**, 1117-1129. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2020.02.010>
- [7] O'Neal, J.B., Shaw, A.D. and Billings, F.T. (2016) Acute Kidney Injury Following Cardiac Surgery: Current Understanding and Future Directions. *Critical Care*, **20**, Article No. 187. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1352-z>
- [8] Newland, R.F. and Baker, R.A. (2017) Low Oxygen Delivery as a Predictor of Acute Kidney Injury during Cardiopulmonary Bypass. *The Journal of ExtraCorporeal Technology*, **49**, 224-230. <https://doi.org/10.1051/ject/201749224>
- [9] Dijoy, L., Dean, J.S., Bistrick, C. and Sistino, J.J. (2015) The History of Goal-Directed Therapy and Relevance to Cardiopulmonary Bypass. *The Journal of ExtraCorporeal Technology*, **47**, 90-94. <https://doi.org/10.1051/ject/201547090>
- [10] de Somer, F., Mulholland, J.W., Bryan, M.R., Aloisio, T., Van Nooten, G.J. and Ranucci, M. (2011) O_2 Delivery and CO_2 Production during Cardiopulmonary Bypass as Determinants of Acute Kidney Injury: Time for a Goal-Directed Perfusion Management? *Critical Care*, **15**, R192. <https://doi.org/10.1186/cc10349>
- [11] Groom, R.C. (2017) Is It Time for Goal-Directed Therapy in Perfusion. *The Journal of ExtraCorporeal Technology*, **49**, 8-12.

-
- [12] Magruder, J.T., Crawford, T.C., Harness, H.L., Grimm, J.C., Suarez-Pierre, A., Wierschke, C., *et al.* (2017) A Pilot Goal-Directed Perfusion Initiative Is Associated with Less Acute Kidney Injury after Cardiac Surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **153**, 118-125.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2016.09.016>
- [13] Mukaida, H., Matsushita, S., Kuwaki, K., Inotani, T., Minami, Y., Saigusa, A., *et al.* (2019) Time-Dose Response of Oxygen Delivery during Cardiopulmonary Bypass Predicts Acute Kidney Injury. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **158**, 492-499. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.10.148>
- [14] 章晓华, 熊卫萍, 庄建. 血浆乳酸水平与成人心脏手术预后关系[J]. 中国体外循环杂志, 2018, 16(6): 351-356.
- [15] 彭勤宝. 目标导向灌注体外循环管理在感染性心内膜炎瓣膜手术的应用——一项单中心倾向性匹配研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2022.
- [16] Shahbazi, S., Khademi, S., Shafa, M., *et al.* (2013) Serum Lactate Is Not Correlated with Mixed or Central Venous Oxygen Saturation for Detecting Tissue Hypo Perfusion during Coronary Artery Bypass Graft Surgery: A Prospective Observational Study. *International Cardiovascular Research Journal*, **7**, 130-134.
- [17] Magruder, J.T., Dungan, S.P., Grimm, J.C., Harness, H.L., Wierschke, C., Castillejo, S., *et al.* (2015) Nadir Oxygen Delivery on Bypass and Hypotension Increase Acute Kidney Injury Risk after Cardiac Operations. *The Annals of Thoracic Surgery*, **100**, 1697-1703. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2015.05.059>