

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2023.13.018

不同超滤方式对体外循环瓣膜置换术后患者心肺功能、补体和炎性介质的影响 *

方恒晓¹ 范悦¹ 莫安胜² 杨柳山¹ 罗磊¹ 莫春榕¹

(1 广西中医药大学附属瑞康医院胸心外科 广西 南宁 530001; 2 广西中医药大学第一附属医院胸心外科 广西 南宁 530023)

摘要 目的:探讨不同超滤方式对体外循环(CPB)瓣膜置换术后患者心肺功能、补体和炎性介质的影响。**方法:**选择 2018 年 1 月~2022 年 6 月于广西中医药大学附属瑞康医院接受 CPB 瓣膜置换术治疗的患者 130 例,应用随机数字表法将其分为常规超滤组(n=31)、改良超滤组(n=34)、零平衡超滤组(n=32)和联合组(改良超滤联合零平衡超滤)(n=33)。观察各组患者超滤前(T1)、超滤即刻(T2)、超滤后 2 h(T3)、超滤后 6 h(T4)心脏输出量(CO)、心脏指数(CI)、氧合指数(OI)、呼吸指数(RI)及肺静态顺应性(Cstat),并比较不同时间点各组患者血清肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白细胞介素-6(IL-6)、补体 3a(C3a)、补体 5a(C5a)水平。**结果:**T2、T3、T4 时间点联合组 CO 和 CI 水平高于其他三组($P<0.05$)。T2、T3、T4 时间点联合组 RI 水平低于其他三组,OI 和 Cstat 水平高于其他三组($P<0.05$)。T2、T3、T4 时间点联合组 IL-6、C3a、C5a 水平均低于其他三组,且 TNF- α 水平低于常规超滤组及改良超滤组($P<0.05$)。**结论:**相对常规超滤、改良超滤、零平衡超滤,改良超滤联合零平衡超滤对 CPB 瓣膜置换术后患者心肺功能影响较小,术后炎症介质、补体水平升高程度较低,滤过效果明显,更适于 CPB 瓣膜置换术。

关键词:超滤方式;体外循环;瓣膜置换术;心功能;肺功能;补体;炎性介质

中图分类号:R654.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2023)13-2494-05

Effects of Different Ultrafiltration Methods on Cardiopulmonary Function, Complement and Inflammatory Mediators in Patients after Cardiopulmonary Bypass Valve Replacement*

FANG Heng-xiao¹, FAN Yue¹, MO An-sheng², YANG Liu-shan¹, LUO Lei¹, MO Chun-rong¹

(1 Department of Cardiothoracic Surgery, Ruikang Hospital affiliated to Guangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanning, Guangxi, 530001, China; 2 Department of Cardiothoracic Surgery, The First Affiliated Hospital of Guangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanning, Guangxi, 530023, China)

ABSTRACT Objective: To investigate the effects of different ultrafiltration methods on cardiopulmonary function, complement and inflammatory mediators in patients after cardiopulmonary bypass (CPB) valve replacement. **Methods:** 130 patients who were received CPB valve replacement in Ruikang Hospital affiliated to Guangxi University of Traditional Chinese Medicine from January 2018 to June 2022 were selected. They were randomly divided into conventional ultrafiltration group (n=31), modified ultrafiltration group (n=34), zero balance ultrafiltration group (n=32) and combined group (modified ultrafiltration combined with zero balance ultrafiltration) (n=33) according to the random number table method. The cardiac output (CO), cardiac index (CI), oxygenation index (OI), respiratory index (RI) and pulmonary static compliance (Cstat) of patients in each group before ultrafiltration (T1), immediately after ultrafiltration (T2), 2 h after ultrafiltration (T3), 6 h after ultrafiltration (T4) were observed. The levels of serum tumor necrosis factor- α (TNF- α), interleukin-6 (IL-6), complement 3a (C3a) and complement 5a (C5a) were compared in each group at different time points. **Results:** The CO and CI levels in the combined group at T2, T3 and T4 time points were higher than those in the other three groups ($P<0.05$). The RI level in the combined group at T2, T3 and T4 time points was lower than that in the other three groups, and the OI and Cstat levels were higher than those in the other three groups ($P<0.05$). The IL-6, C3a and C5a levels in the combined group at T2, T3 and T4 time points were lower than those in the other three groups, and TNF- α level was lower than that in the conventional ultrafiltration group and modified ultrafiltration group ($P<0.05$). **Conclusion:** Compared with conventional ultrafiltration, modified ultrafiltration and zero balance ultrafiltration, the modified ultrafiltration combined with zero balance ultrafiltration has less effect on cardiopulmonary function of patients after CPB valve replacement, and the level of inflammatory mediators and complements increased slightly after operation, so the filtering effect is obvious, and it is more suitable for CPB valve replacement.

Key words: Ultrafiltration method; Cardiopulmonary bypass; Valve replacement; Cardiac function; Pulmonary function; Complement; Inflammatory mediators

Chinese Library Classification(CLC): R654.2 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2023)13-2494-05

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81860785)

作者简介:方恒晓(1977-),男,本科,副主任医师,研究方向:胸心外科学,E-mail: fanghengxiao1977@163.com

(收稿日期:2023-03-03 接受日期:2023-03-27)

前言

体外循环(CPB)瓣膜置换术是目前最常见的治疗心脏疾病的手术,然而 CPB 会对机体生理状态产生影响,导致患者组织间隙水钠潴留,加之瓣膜置换术中患者血液稀释,加重了患者心脏负担,因此,患者术后心肺功能受到较大影响,严重者可能导致治疗失败,危及患者生命安全^[1,2]。多项研究显示^[3,4],CPB 进行期间会产生大量的补体和炎症介质,两者是导致患者心肺功能受到影响的重要原因。近年来,随着瓣膜置换术的不断发展,超滤技术在临床中不断被推广。有报道显示,与传统 CPB 相比,超滤技术可以明显改善患者血流动力学,降低患者术后并发症的发生^[5]。近几年来,超滤技术不断得到突破,从常规超滤到零平衡超滤,再到改良超滤和改良超滤联合零平衡超滤等,如何选择有效的超滤方式进行 CPB 瓣膜置换术是临床胸心外科的研究热点。本研究通过探讨不同超滤方式对 CPB 瓣膜置换术后患者心肺功能、补体和炎症介质的影响,旨在为 CPB 瓣膜置换术超滤方式的选择提供依据,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选择 2018 年 1 月~2022 年 6 月于广西中医药大学附属瑞康医院接受 CPB 瓣膜置换术治疗的 130 例患者,纳入标准:(1)年龄 ≥ 18 岁;(2)需要进行 CPB 瓣膜置换术治疗;(3)欧洲心血管手术危险因素评分 ≥ 6 分,能够进行手术治疗;(4)患者或家属对研究知情同意。排除标准:(1)非首次进行心脏手术患者;(2)合并严重脑、肝、肾功能障碍者;(3)单纯进行冠脉旁路移植手术或大血管手术者;(4)正在接受其他研究者。应用随机数字表法将其分为常规超滤组($n=31$)、改良超滤组($n=34$)、零平衡超滤组($n=32$)和联合组($n=33$)。常规超滤组:男性 18 例,女性 13 例;年龄 33~70 岁,平均(52.73 ± 7.45)岁;体重 55~82 kg,平均(63.62 ± 6.62)kg;心功能分级:II 级 10 例,III 级 21 例。改良超滤组:男性 19 例,女性 15 例;年龄 32~70 岁,平均(53.28 ± 8.32)岁;体重 54~80 kg,平均(63.11 ± 7.34)kg;心功能分级:II 级 13 例,III 级 21 例。零平衡超滤组:男性 18 例,女性 14 例;年龄 32~69 岁,平均(52.12 ± 7.97)岁;体重 55~83 kg,平均(63.52 ± 6.23)kg;心功能分级:II 级 10 例,III 级 22 例。联合组:男 19 例,女性 14 例;年龄 33~69 岁,平均(51.93 ± 7.33)岁;体重 55~82 kg,平均(63.97 ± 6.45)kg;心功能分级:II 级 11 例,III 级 22 例。各组患者性别、年龄、体重、心功能分级比较无差异($P>0.05$)。本研究经广西中医药大学附属瑞康医院医学伦理委员会同意并批准开展实施。

1.2 方法

各组均进行 CPB 瓣膜置换术治疗,循环机为德国 STOCK CPB 机,中度稀释血液,所有患者均采用无血预充,以羟乙基淀粉溶液、乳酸林格液加适量的甘露醇、硫酸镁、碳酸氢钠、乌司他丁和呋塞米。激活全血凝血时间 >480 s 时进行 CPB,密切观察血氧饱和度、血细胞比容,使平均动脉压维持在 50~80 mmHg。从主动脉根部逆行灌注 4:1 含血冷停搏液。常规超滤组:在循环管道中采用自膜肺动脉端连接血液超滤器,超滤器出口端则连接静脉回流室内,在阻断升主动脉、灌注心肌保护液,患者血液动力学平稳后开始超滤,根据静脉回流情况决定停止超滤。改良

超滤组:采用改良超滤连接方式,血液流动方向为过滤器出口端-泵-超滤器-静脉管-右心房,超滤流速控制在 10~20 mL/kg,超滤时间为 15~20 min,水分被滤除的同时储血器内补充液体容量,并向储血器内加入林格氏液,使 CPB 处于备用状态。零平衡超滤组:连接方式同改良超滤组,血液流动方向为过滤器出口端-泵-超滤器-静脉管-右心房,当转流开始 30 min 后进行零平衡超滤,超滤量维持在 1800~2000 mL,同时补充林格氏液,补充量为 1200~1500 mL。联合组:连接方式同改良超滤组,血液流动方向为过滤器出口端-泵-超滤器-静脉管-右心房,当转流开始 30 min 后进行零平衡超滤,超滤量维持在 1000~1500 mL,停机后进行改良超滤,超滤量维持在 2000~2500 mL。所有患者心内操作结束时血液恢复温度至 36.5℃,心肌收缩力恢复。

1.3 观察指标

1.3.1 心功能 观察各组超滤前(T1)、超滤即刻(T2)、超滤后 2 h(T3)、超滤后 6 h(T4)心脏输出量(CO)和心脏指数(CI), $CO = \text{氧消耗量}(\text{mL}/\text{min}) / [\text{周围动脉血氧含量}(\text{vol}\%) - \text{混合静脉血氧含量}(\text{vol}\%)] \times 10$; $CI = CO / \text{体表面积}(\text{m}^2)^{[6]}$ 。

1.3.2 肺功能 观察各组 T1、T2、T3、T4 氧合指数(OI)、呼吸指数(RI)及肺静态顺应性(Cstat)。OI=动脉血氧分压/吸入氧浓度;RI=肺泡动脉氧分压差/外周动脉氧分压;Cstat=潮气量/呼吸停顿压-呼气末正压通气^[7]。

1.3.3 补体和炎症介质 分别于 T1、T2、T3、T4 采集患者外周静脉血 5 mL,经 3500 r/min 离心 10 min,离心半径为 6 cm,分离血清,应用酶联免疫吸附法测定各组患者上述时点血清肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白细胞介素-6(IL-6)水平,试剂盒均购自北京北方生物技术研究所有限公司。应用放射免疫法测定血清补体 3a(C3a)、补体 5a(C5a)水平,试剂盒购自德国 Biotrend 公司。相关操作均严格按照说明书进行。

1.4 统计学方法

采用 SPSS24.0 软件进行统计学分析。观测资料主要为多时点重复观测计量资料,用均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,整体比较为两因素重复测量方差分析,组间两两比较为 LSD-t 检验,时间两两比较为差值 t 检验(暂未考虑调整检验水准)。 $P<0.05$ 表明差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 各组患者不同时点心功能指标比较

各指标组间、时间及交互作用均有显著性意义($P<0.05$)。T2、T3、T4 时间点联合组 CO 和 CI 水平高于其他三组($P<0.05$)。见表 1。

2.2 各组患者不同时点肺功能指标比较

各指标组间、时间及交互作用均有显著性意义($P<0.05$)。T2、T3、T4 时间点联合组 RI 水平低于其他三组,OI 和 Cstat 水平高于其他三组($P<0.05$)。详见表 2。

2.3 各组患者不同时点血清 TNF- α 、IL-6 和补体水平比较

各组患者不同时点血清炎症介质和补体水平组间、时间及交互作用均有显著性意义($P<0.05$)。T2、T3、T4 时间点联合组 IL-6、C3a、C5a 水平均低于其他三组,且 TNF- α 水平低于常规超滤组及改良超滤组($P<0.05$)。见表 3。

表 1 各组患者不同时点 CO 和 CI 比较($\bar{x} \pm s$)
Table 1 Comparison of CO and CI at different time points of patients in each group ($\bar{x} \pm s$)

Groups	Time	CO(L/min)	CI[L/(min·m ²)]
Conventional ultrafiltration group(n=31)	T1	2.82± 0.11	3.52± 0.13
	T2	2.12± 0.18*	2.71± 0.22*
	T3	2.16± 0.16*	2.73± 0.20*
	T4	2.15± 0.21*	2.76± 0.25*
Modified ultrafiltration group(n=34)	T1	2.80± 0.12	3.51± 0.14
	T2	2.51± 0.19 ^{ac} *	3.22± 0.21 ^{ac}
	T3	2.63± 0.18 ^{ac} *	3.33± 0.20 ^{ac}
	T4	2.66± 0.22 ^{ac} *	3.35± 0.23 ^{ac}
Zero balance ultrafiltration group(n=32)	T1	2.83± 0.12	3.53± 0.15
	T2	2.39± 0.19**	3.02± 0.22**
	T3	2.46± 0.21**	3.01± 0.25**
	T4	2.52± 0.15**	3.12± 0.17**
Combined group(n=33)	T1	2.82± 0.13	3.50± 0.15
	T2	2.74± 0.18 ^{abc} *	3.43± 0.21 ^{abc} *
	T3	2.77± 0.17 ^{abc} *	3.47± 0.19 ^{abc} *
	T4	2.79± 0.18 ^{abc} *	3.49± 0.23 ^{abc} *
Overall analysis (ball test HF coefficient)		0.9195	0.9347
Inter-group dimension(F,P)		315.469, 0.000	379.778, 0.000
Time dimension(F,P)		266.011, 0.000	246.909, 0.000
Interaction(F,P)		43.873, 0.000	45.698, 0.000

Note: Compare with T1 time point of the same group, * $P<0.05$. Compared with conventional ultrafiltration group, ^a $P<0.05$. Compared with modified ultrafiltration group, ^b $P<0.05$. Compared with zero balance ultrafiltration group, ^c $P<0.05$.

3 讨论

近年来,尽管瓣膜置换手术不断发展,但无论是心脏直视瓣膜置换手术还是腔镜下瓣膜置换术仍需要在 CPB 下进行,然而在 CPB 过程中血液长时间在体外流动,大量热量被释放,加之血液稀释可以导致组织间隙水钠潴留,从而增加心肺功能负担,影响治疗效果^[8]。由于 CPB 并非是一种生理性循环,在手术过程中患者血液会与体外装置接触并引发机体炎症反应,导致炎症因子释放^[9]。超滤技术是解决 CPB 中上述问题的重要方法,其主要原理是模仿机体肾脏功能,通过半透膜滤器将 CPB 中多余的水分、可溶性小分子物质与血液中的大分子物质、血细胞等有形成分离并滤出,从而减轻机体细胞和组织的水肿,起到浓缩血液以及降低心脏、肺脏负担的作用,同时也具有降低炎症反应的作用^[10,11]。

超滤技术自问世以来便受到了国内外广泛重视,目前已经形成了常规超滤、改良超滤、零平衡超滤及联合超滤等几大技术^[12]。改良超滤、零平衡超滤及联合超滤均是在常规超滤技术的基础上发展而来的,其中改良超滤技术是在常规超滤基础上加入泵头以控制液体流量,并可根据 CPB 情况控制超滤时间和超滤量,从而降低 CPB 对患者心肺功能的影响^[13]。零平衡超滤技术则是在常规超滤基础上同时加入滤液量等量的晶体液,

以保持 CPB 过程中氧合器液面稳定,该技术可以通过类似于清洗的方式排除血液中的炎症介质,从而降低炎症反应^[14]。联合超滤则是复合应用了改良超滤和零平衡超滤的技术^[15]。本研究结果显示,各组患者 T2、T3、T4 时点 CO、CI、OI 和 Cstat 水平均较 T1 时点降低,RI 较 T1 时点升高,不同时间点常规超滤组、零平衡超滤组组内 CO、CI、RI、OI 和 Cstat 水平比较差异有统计学意义。其中 CO、CI 是反映心脏射血、泵血功能的重要指标^[16]。RI 是反映肺部通气和氧交换功能的指标,正常情况下 RI ≤ 1 ,当肺通气、氧交换功能降低时,RI 水平升高。OI 则是反映肺氧合功能的指标,是监测肺换气功能的重要指标^[17]。Cstat 水平是反映肺顺应性的重要指标^[18]。本研究结果表明 CPB 中患者心脏射血功能、泵血功能降低,肺通气、换气功能降低,顺应性降低,改良超滤联合零平衡超滤对患者心肺功能的影响最小。改良超滤技术可以根据 CPB 情况控制超滤时间和超滤量,从而降低了组织间隙水钠潴留,也降低了心脏和肺脏的负担^[19]。零平衡超滤由于在 CPB 中加入了滤液量等量的晶体液,因此对心肺功能有一定影响^[20]。改良超滤联合零平衡超滤则兼有改良超滤和零平衡超滤的特点,因此对患者心肺功能影响也相对较小^[21]。而常规超滤由于仅仅通过半透膜滤器将 CPB 中多余的水分,因此对心肺功能的影响大于改良超滤、零平衡超滤、改良超滤联合零平衡超滤^[22]。

表 2 各组患者不同时间 RI、OI 和 Cstat 水平比较($\bar{x} \pm s$)Table 2 Comparison of the levels of RI, OI and Cstat of patients in different groups at different time points($\bar{x} \pm s$)

Groups	Time	RI	OI(mmHg)	Cstat(mL/cmH ₂ O)
Conventional ultrafiltration group(n=31)	T1	0.37± 0.04	415.28± 92.29	48.29± 8.92
	T2	1.42± 0.05*	227.29± 72.92*	26.02± 6.12*
	T3	1.26± 0.09*	245.92± 88.21*	27.92± 6.19*
	T4	1.04± 0.08*	292.32± 87.29*	34.27± 7.14*
Modified ultrafiltration group(n=34)	T1	0.38± 0.05	412.02± 91.78	48.72± 8.88
	T2	1.04± 0.07 ^{ac} *	278.76± 87.21 ^{ac} *	35.03± 7.23 ^{ac} *
	T3	0.86± 0.09 ^{ac} *	302.72± 88.29 ^{ac} *	39.22± 6.02 ^{ac} *
	T4	0.81± 0.06 ^{ac} *	317.27± 92.28 ^{ac} *	41.62± 8.20 ^{ac} *
Zero balance ultrafiltration group(n=32)	T1	0.37± 0.05	417.29± 89.20	47.67± 8.94
	T2	1.28± 0.12 ^a *	265.27± 78.27 ^a *	30.02± 7.89 ^a *
	T3	1.07± 0.09 ^a *	278.29± 77.29 ^a *	32.92± 7.92 ^a *
	T4	0.92± 0.08 ^a *	293.26± 86.29 ^a *	34.27± 8.02 ^a *
Combined group(n=33)	T1	0.36± 0.05	414.78± 91.72	47.62± 8.92
	T2	0.89± 0.12 ^{abc} *	292.53± 87.28 ^{abc} *	39.34± 6.92 ^{abc} *
	T3	0.81± 0.09 ^{abc} *	319.24± 78.29 ^{abc} *	42.54± 7.87 ^{abc} *
	T4	0.67± 0.07 ^{abc} *	332.44± 89.29 ^{abc} *	45.45± 8.20 ^{abc} *
Overall analysis (ball test HF coefficient)		0.8672	0.9975	0.9978
Inter-group dimension(F,P)		951.336, 0.000	12.818, 0.000	85.439, 0.000
Time dimension(F,P)		5,036.041, 0.000	159.648, 0.000	199.418, 0.000
Interaction(F,P)		124.011, 0.000	2.183, 0.027	11.051, 0.000

Note: Compare with T1 time point of the same group, * $P<0.05$. Compared with conventional ultrafiltration group, ^a $P<0.05$. Compared with modified ultrafiltration group, ^b $P<0.05$. Compared with zero balance ultrafiltration group, ^c $P<0.05$.

各组患者 T2、T3、T4 时点 TNF- α 、IL-6、C3a、C5a 水平较 T1 时点升高,表明 CPB 过程中会导致机体炎症介质和补体水平升高。这与在手术过程中患者血液会与体外装置接触并引发机体炎症反应,导致炎症因子释放有关^[23]。零平衡超滤组、联合组 TNF- α 、IL-6、C3a、C5a 水平均低于改良超滤组,表明改良超滤联合零平衡超滤对患者炎症介质和补体影响较小。这主要是由于零平衡超滤技术加入滤液量等等的晶体液,通过类似于清洗的方式排除血液中的炎症介质,从而降低炎症反应^[24];改良超滤亦可继续滤出 CPB 术后体内新产生的炎症介质^[25],而改良超滤联合零平衡超滤兼有此两者的特点,因此可进一步降低对 CPB 瓣膜置换术后患者炎症介质和补体的影响。

综上所述,CPB 期间会产生大量的补体和炎症介质,相对常规超滤、改良超滤组、零平衡超滤,改良超滤联合零平衡超滤对患者心肺功能影响较小,术后产生的炎症介质和补体更少,滤过效果明显,更适于 CPB 瓣膜置换术。

参考文献(References)

- [1] Karacalilar M, Onan IS, Onan B, et al. Effects of pulmonary perfusion during cardiopulmonary bypass on lung functions after cardiac operation[J]. J Card Surg, 2020, 35(10): 2469-2476
- [2] Politi MT, Ochoa F, Netti V, et al. Changes in cardiac Aquaporin expression during aortic valve replacement surgery with cardiopulmonary bypass[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2020, 57(3): 556-564
- [3] Aljure OD, Fabbro M 2nd. Cardiopulmonary Bypass and Inflammation: The Hidden Enemy [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2019, 33(2): 346-347
- [4] Kefalogianni R, Kamani F, Gaspar M, et al. Complement activation during cardiopulmonary bypass and association with clinical outcomes[J]. EJHaem, 2022, 3(1): 86-96
- [5] 刘亚光, 贾清彦, 韩丁, 等. 改良超滤技术对先天性心脏病患儿体外循环术后血流动力学的影响[J]. 中国医药, 2016, 11(3): 347-349
- [6] 兰锡纯, 冯卓荣. 心脏血管外科学 - 第 2 版[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002: 142-143
- [7] 章征兵, 明腾, 万彩云. 肢体远隔缺血后处理对婴幼儿体外循环中肺损伤的影响[J]. 江西医药, 2017, 52(2): 116-118
- [8] 李思晨, 叶建明, 范庆浩, 等. 体外循环心脏瓣膜置换术患者术后心肌酶谱变化及其与心肌损伤及预后的关系 [J]. 中国现代医生, 2022, 60(30): 89-93
- [9] Jufar AH, Lankadeva YR, May CN, et al. Renal and Cerebral Hypoxia and Inflammation During Cardiopulmonary Bypass [J]. Compr Physiol, 2021, 12(1): 2799-2834
- [10] 方颖慧. 超滤技术对体外循环下心脏手术中抗生素及炎症因子的影响[D]. 北京: 北京协和医学院, 2014
- [11] Low ZK, Gao F, Sin KYK, et al. Modified ultrafiltration reduces

表 3 各组患者不同时点血清 TNF- α 、IL-6 和补体水平比较($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Comparison of the levels of serum TNF- α , IL-6 and complement of patients in different groups at different time point($\bar{x} \pm s$)

Groups	Time	TNF- α (ng/L)	IL-6(ng/L)	C3a(μ g/L)	C5a(μ g/L)
Conventional ultrafiltration group(n=31)	T1	7.39 $\pm$ 1.34	5.29 $\pm$ 1.21	268.29 $\pm$ 77.83	256.39 $\pm$ 67.49
	T2	38.39 $\pm$ 12.92*	33.02 $\pm$ 10.28*	478.63 $\pm$ 93.47*	463.32 $\pm$ 94.38*
	T3	36.94 $\pm$ 11.25*	38.21 $\pm$ 10.27*	487.48 $\pm$ 94.37*	481.29 $\pm$ 98.39*
	T4	23.63 $\pm$ 8.25*	25.29 $\pm$ 9.25*	421.03 $\pm$ 82.84*	438.25 $\pm$ 87.49*
Modified ultrafiltration group(n=34)	T1	7.36 $\pm$ 1.42	5.27 $\pm$ 1.24	268.02 $\pm$ 75.36	255.25 $\pm$ 66.42
	T2	25.29 $\pm$ 8.25 ^{a*}	23.32 $\pm$ 9.27 ^{a*}	423.48 $\pm$ 91.73 ^{a*}	412.02 $\pm$ 86.39 ^{a*}
	T3	21.28 $\pm$ 7.72 ^{a*}	22.34 $\pm$ 9.17 ^{a*}	434.13 $\pm$ 94.73 ^{a*}	428.32 $\pm$ 78.41 ^{a*}
	T4	20.82 $\pm$ 6.24 ^{a*}	21.54 $\pm$ 8.12 ^{a*}	378.39 $\pm$ 82.74 ^{a*}	367.29 $\pm$ 72.94 ^{a*}
Zero balance ultrafiltration group(n=32)	T1	7.42 $\pm$ 1.34	5.28 $\pm$ 1.28	266.32 $\pm$ 76.37	255.19 $\pm$ 65.26
	T2	18.29 $\pm$ 6.28 ^{ab*}	15.34 $\pm$ 4.29 ^{ab*}	332.82 $\pm$ 92.74 ^{ab*}	318.03 $\pm$ 76.29 ^{ab*}
	T3	15.28 $\pm$ 5.21 ^{ab*}	13.64 $\pm$ 3.19 ^{ab*}	343.29 $\pm$ 91.37 ^{ab*}	339.92 $\pm$ 77.29 ^{ab*}
	T4	12.82 $\pm$ 4.28 ^{ab*}	11.12 $\pm$ 3.08 ^{ab*}	297.92 $\pm$ 74.38 ^{ab*}	308.20 $\pm$ 68.20 ^{ab*}
Combined group(n=33)	T1	7.38 $\pm$ 1.32	5.31 $\pm$ 1.25	267.29 $\pm$ 75.49	258.16 $\pm$ 65.27
	T2	16.12 $\pm$ 6.27 ^{abc*}	11.34 $\pm$ 4.26 ^{abc*}	308.90 $\pm$ 82.92 ^{abc*}	301.34 $\pm$ 81.29 ^{abc*}
	T3	15.65 $\pm$ 5.19 ^{abc*}	9.64 $\pm$ 3.16 ^{abc*}	291.24 $\pm$ 80.39 ^{abc*}	317.23 $\pm$ 77.29 ^{abc*}
	T4	11.64 $\pm$ 5.31 ^{abc*}	8.12 $\pm$ 2.89 ^{abc*}	288.43 $\pm$ 78.39 ^{abc*}	282.12 $\pm$ 62.72 ^{abc*}
Overall analysis (ball test HF coefficient)		0.8281	0.8341	1.0016	0.9781
Inter-group dimension(F,P)		238.638, 0.000	371.014, 0.000	119.155, 0.000	110.132, 0.000
Time dimension(F,P)		352.161, 0.000	389.162, 0.000	122.973, 0.000	177.404, 0.000
Interaction(F,P)		37.729, 0.000	55.388, 0.000	15.228, 0.000	17.609, 0.000

Note: Compare with T1 time point of the same group, * $P < 0.05$. Compared with conventional ultrafiltration group, ^a $P < 0.05$. Compared with modified ultrafiltration group, ^b $P < 0.05$. Compared with zero balance ultrafiltration group, ^c $P < 0.05$.

- postoperative blood loss and transfusions in adult cardiac surgery: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Interact Cardiovasc Thorac Surg, 2021, 32(5): 671-682
- [12] Bierer J, Stanzel R, Henderson M, et al. Ultrafiltration in Pediatric Cardiac Surgery Review [J]. World J Pediatr Congenit Heart Surg, 2019, 10(6): 778-788
- [13] 袁从虎, 张亚军, 宋建祥, 等. 改良超滤联合常规超滤对重症瓣膜病患者瓣膜置换术后肺保护的作用 [J]. 国际心血管病杂志, 2021, 48(1): 48-52
- [14] Gholampour Dehaki M, Niknam S, Azarfarin R, et al. Zero-Balance Ultrafiltration of Priming Blood Attenuates Procalcitonin and Improves the Respiratory Function in Infants After Cardiopulmonary Bypass: A Randomized Controlled Trial [J]. Artif Organs, 2019, 43(2): 167-172
- [15] 孙文婷, 汤楚中, 潘绪, 等. 联合超滤技术在婴幼儿体外循环手术中的应用[J]. 北京医学, 2013, 35(7): 530-532
- [16] Iddawela S, Naseem S, Stickley J, et al. Non-invasive cardiac output monitoring with electrical velocimetry after cardiac surgery in infants [J]. Ann R Coll Surg Engl, 2022, 104(8): 583-587
- [17] 郑茂, 张玉凤, 张晓芳, 等. 呼吸指数及氧合指数在儿童 ARDS 中的临床意义[J]. 中国妇幼健康研究, 2019, 30(9): 1144-1147
- [18] 吴益杭, 陈文华, 林芬, 等. 肺静态顺应性导向最佳呼气末正压对单肺通气氧合及肺内分流的影响[J]. 福建医科大学学报, 2022, 56(3): 249-255
- [19] 孙煦, 姚昊, 陈杨, 等. 平衡超滤加改良超滤对婴幼儿体外循环术后肺功能的作用分析 [J]. 现代生物医学进展, 2013, 13(16): 3091-3094
- [20] 俞瑾, 詹海婷, 李帆, 等. 改良超滤与零平衡超滤对高风险心脏瓣膜置换术患者术后心肺功能的影响 [J]. 中国体外循环杂志, 2017, 15(3): 144-147
- [21] Bierer J, Henderson M, Stanzel R, et al. Subzero balance - simple modified ultrafiltration (SBUF-SMUF) technique for pediatric cardiopulmonary bypass[J]. Perfusion, 2022, 37(8): 785-788
- [22] 孙煦, 王东进. 改良超滤与常规超滤用于重症心脏瓣膜病患者瓣膜置换术的效果评价[J]. 海南医学院学报, 2014, 20(2): 216-219
- [23] 宋磊军, 朱雅萍. 体外循环预充还原型谷胱甘肽对心脏瓣膜置换术患者心肌损伤和炎症因子的影响 [J]. 海南医学, 2021, 32(14): 1782-1785
- [24] 程玉梅, 陈峰, 靳明扬, 等. 平衡超滤技术对小儿先心病术后炎症因子、凝血功能及肺功能的影响[J]. 现代生物医学进展, 2020, 20(2): 333-337
- [25] 马黎明, 褚衍林, 乔衍礼, 等. 改良超滤联合平衡超滤对婴幼儿体外循环术后补体和炎性介质的血浆含量和肺功能影响[J]. 中国体外循环杂志, 2010, 8(3): 144-147