· 论著 ·

丹酚酸 B 对保存红细胞质量的影响及机制探究

陈传爱　李浩泷　安蓬蓬　杨育森　于洋
(天津市血液中心,天津 300110)

摘要:目的　探究丹酚酸 B 对保存红细胞质量的影响并初步探索其潜在机制。**方法**　募集健康成年志愿献血者,采集全血后制备悬浮红细胞保存于 MAP(甘露醇-腺嘌呤-磷酸盐)保存液中,将红细胞悬液分为对照组和丹酚酸 B 实验组,实验组加入丹酚酸 B 使其终浓度为 10 μM,混匀后于 2~6℃保存。分别于储存 d0、d7、d14、d21、d28、d35 收集红细胞,通过细胞计数、红细胞形态、渗透脆性、溶血率等指标评价红细胞损伤情况,检测胞浆 ROS 水平、胞内 SOD 酶活性评价氧化应激水平。**结果**　丹酚酸 B 有助于保持红细胞形态和渗透稳定性,减少球形红细胞、棘状细胞等损伤细胞的形成,保存 d28 和 d35 丹酚酸 B 组红细胞溶血率显著降低。与对照组相比,从保存 d14 开始,红细胞胞浆 ROS 水平降低,胞内 SOD 酶活性升高。**结论**　丹酚酸 B 通过减少红细胞氧化应激缓解红细胞存储损伤。

关键词:丹酚酸 B;红细胞保存;氧化应激;存储损伤
中图分类号:R457.1⁺2　R331.1⁺41　**文献标识码:**A　**文章编号:**1004-549X(2026)8-1012-06
DOI:10.13303/j.cjbt.issn.1004-549x.2026.08.003

Effect of salvianolic acid B on the stored red blood cell quality and its underlying mechanism

CHEN Chuan'ai, LI Haolong, AN Pengpeng, YANG Yumiao, YU Yang.
Department of Quality Management, Tianjin Blood Center, Tianjin 300110, *China.*
*Corresponding author: CHEN Chuan'ai, Email: chenchuanaiczh@*163.*com*

Abstract: Objective　To investigate the effects of salvianolic acid B (Sal B) on the quality of stored red blood cells (RBC) and to preliminarily explore its underlying mechanisms. **Methods**　Whole blood was collected from healthy adult volunteers, and suspended RBC were prepared and stored in MAP (mannitol-adenine-phosphate) solution. The RBC suspensions were divided into a control group and a Sal B group, with the latter supplemented with Sal B at a final concentration of 10 μM. All samples were mixed and stored at 2-6℃. RBC were collected on days 0, 7, 14, 21, 28, and 35 for evaluation. RBC damage was assessed through cell counting, morphological observation, osmotic fragility test, and hemolysis rate measurement. Cytosolic ROS levels and intracellular SOD activity were measured to evaluate oxidative stress. **Results**　Sal B helped maintain RBC morphology and osmotic stability, and reduced the generation of morphologically abnormal cells such as spherocytes and echinocytes. On days 28 and 35, the hemolysis rate in the Sal B group was significantly lower than that in the control group. Compared with the control group, the Sal B group exhibited decreased cytosolic ROS levels and increased intracellular SOD activity from day 14 onward. **Conclusion**　Sal B alleviates RBC storage lesion by reducing oxidative stress.

Key words: salvianolic acid B (Sal B); red blood cell storage; oxidative stress; storage lesion

多种急性病症和慢性血液系统疾病患者恢复健康依赖于输血治疗,20 世纪初抗凝剂和保养液的问世极大地延长了血液体外保存时间[1-2]。在各类血液成分制品中,红细胞是临床应用最广泛的血液产品。然而,大量输注红细胞并非全无风险。一项纳入多种临床情景的叙述性综述提示,输注储存时间较长(尤其是≥35 d)的红细胞可能与发病率(特别是感染)增加有关[3]。此外,近期一项前瞻性随机试验发现,在镰状细胞病这一特定人群中,输注储存时间较长(≥30 d)的红细胞与代谢紊乱、炎症指标升高及输血疗效降低存在关联[4]。早期单中心观察性研究曾报道心脏手术中输注储存>14 d 的红细胞与并发症及死亡率增加有关,但这一关联需更多高质量研究验证[5]。红细胞在体外冷藏的保存条件下,会发生一系列生化和形态学的

基金项目:天津市卫生健康科技项目资助(TJWJ2023MS049)
第一作者简介:陈传爱(1990-),女,主管技师,Email:chenchuanaiczh@163.com

改变,最终导致红细胞质量和功能的下降,即红细胞存储损伤[6-7]。产生红细胞损伤的机制主要包括以下两个方面:1)蛋白质、脂质及血红蛋白的氧化损伤;2)细胞内 ATP、2,3-DPG 等代谢耗竭[7]。深入探究红细胞存储损伤的机制及临床影响,有助于寻找干预措施以降低受血者风险。

目前多项研究尝试通过在红细胞保存液中加入抗氧化剂或者中药有效成分等各种成分,以期降低红细胞损伤,延长血液保存时间,例如乙醇、氧化铈纳米粒子、维生素 C、茶多酚、氘化亚油酸、柚皮苷等均能有效降低红细胞存储损伤[8-13]。此外,丹参来源的酚酸类化合物因其强效自由基清除能力和良好的临床安全性备受关注。丹参作为一种常用中草药,具有抗凝血、抗炎、抗氧化、抗纤维化和抗凋亡的作用,可有效调节患者血脂代谢,改善血液流变学及临床症状[14]。丹酚酸 B(Salvianolic acid B, Sal B)是丹参中重要的水溶性酚酸类单体之一,在体外实验中表现出显著的自由基清除与抗氧化活性。研究表明,Sal B 对羟自由基、超氧阴离子自由基及 DPPH 自由基的清除能力均显著优于维生素 C,且抗氧化活性强于同源化合物丹参素[15]。近期研究进一步从分子层面证实,Sal B 在铁蛋白介导的 Fe^{2+}/Fe^{3+} 转化过程中表现出比维生素 C 更强的铁螯合能力及自由基清除活性[16]。鉴于铁离子介导的 Fenton 反应是红细胞储存中脂质过氧化的关键驱动因素[7],Sal B 有望通过协同抗氧化与铁螯合双重机制减轻红细胞存储损伤。

在安全性方面,以 Sal B 为重要活性成分的中药注射剂丹红注射液已在中国长期用于冠心病、心绞痛及脑卒中等心脑血管疾病的临床治疗,其药理作用涵盖抗炎、抗氧化、抗凝血、调脂、抗凋亡、扩血管及促血管生成等多个方面,被认为是一种安全有效的治疗制剂[17-19]。此外,一项针对中国健康志愿者的随机、双盲、安慰剂对照 I 期临床试验进一步证实,Sal B 注射液单次给药剂量达 300 mg、连续 5d 给药达 250 mg 时均表现出良好的安全性和耐受性[20]。值得注意的是,除心血管领域的广泛研究外,Sal B 在其他细胞体系中也显示出保护作用:在血小板功能调控方面,Sal B 可直接抑制凝血酶催化位点,发挥抗血栓作用[21];在肝细胞保护方面,Sal B 可通过靶向 ECM1、调控 SIRT1/p53 轴抑制肝细胞铁死亡,从而减轻肝纤维化[22]。这些研究进一步拓展了 Sal B 在细胞保护领域的应用前景,为其在红细胞储存中的应用提供了参考。

基于上述证据,Sal B 兼具强效抗氧化、铁螯合调控及良好的生物安全性,是干预红细胞储存损伤的理想候选分子。本研究旨在探索 Sal B 添加对红细胞存储损伤的影响,假设在储存初期向红细胞中添加 Sal B,可通过减少氧化应激缓解红细胞存储损伤。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究为探索性研究,样本量参照同类红细胞储存干预性研究确定[8,12,23],纳入 10 名健康成年无偿献血者。采集全血后经成分制备获得悬浮红细胞,无菌接管机将每袋血均分为实验组和对照组:实验组加入 Sal B 使其终浓度为 10 μM,对照组加入等体积生理盐水,于 2~6℃保存。

1.2 试剂与仪器

丹酚酸 B(索莱宝);总超氧化物歧化酶(T-SOD)测定试剂盒(南京建成科技公司),H_2DCFDA(Sigma-Aldrich),瑞氏染色液(碧云天),血浆游离血红蛋白测定试剂盒(北京瑞尔达生物科技有限公司);酶标仪(Anthos Zenyth 340r);高速分选型流式细胞仪(BD-FACS Aria Ⅱ);全自动血细胞分析仪(Sysmex-XS-800i),医用冷藏冰箱(海尔)。

1.3 实验方法

1.3.1 标本处理与取样

采集当天,向实验组悬浮红细胞加入 Sal B,使其终浓度为 10 μM,对照组加入等体积的生理盐水,保存于 2~6℃。在不同保存时间点(采集当天为 d0)收取悬浮红细胞样本,分别于保存 d0,d7,d14,d21,d28,d35,在无菌条件下,用一次性注射器从每组中抽取 5 mL 红细胞悬液用于后续实验。

1.3.2 瑞氏染色

用生理盐水将悬浮红细胞稀释 10 倍,用玻片推制成楔形血涂片,晾干后以瑞氏染液染色 4 min,流水冲洗,干燥后于 40 倍物镜下镜检,观察细胞形态。

1.3.3 ROS 测定

悬浮红细胞计数后,生理盐水洗涤 3 次,用生理盐水将细胞稀释至 1×10^6/mL,取 100 μL 细胞悬液装载 ROS 荧光探针(H_2DCFDA),使 H_2DCFDA 工作浓度为 10 μM,37℃孵育 30 min,离心弃上清,经生理盐水洗涤 3 次后,流式上机检测。

1.3.4 SOD 酶活性测定

取 500 μL 悬浮红细胞,经生理盐水洗涤 3 次后,离心弃上清,加入等体积的双蒸水充分震荡获得待测溶血液,后续 SOD 酶活性检测操作步骤按照试剂盒说明书操作。

1.3.5　游离血红蛋白含量检测

收取 1 mL 储存悬浮红细胞,3 000 rpm,4℃离心 10 min,取上清用于 FHb 检测,测定步骤按照试剂盒说明书操作。根据 FHb 数值计算溶血率,计算公式如下:

[(1−Hct)×血浆游离血红蛋白(g/dL)]/总血红蛋白(g/dL)×100%

1.3.6　渗透脆性检测

悬浮红细胞经生理盐水洗涤 3 次后弃上清获得待测红细胞,取 12 支试管,加入 1 mL 不同浓度(0~0.9%)的 NaCl 溶液,每管中加入 10 μL 待测红细胞,室温静置 2 h,3 000 rpm 离心 5 min,取上清加入比色皿,空白调零,以 0%的生理盐水作为 100%溶血,于 540 nm 测定吸光度。

1.4　统计学分析

采用 GraphPad Prism 7.0 软件对数据进行统计学分析,所测数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示,同一储存时间点两组间比较采用配对 t 检验。多时间点、多组间比较采用重复测量双因素方差分析(repeated-measures two-way ANOVA)。实验数据中若存在极端离群值,经 Grubbs 检验($P<0.05$)判定后予以剔除,剔除后各组数据经 Shapiro-Wilk 检验符合正态分布,再进行后续统计分析。$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　不同浓度 Sal B 对红细胞储存期末溶血率及形态的影响

为确定 Sal B 的最佳干预浓度,本研究首先通过预实验检测了不同浓度(0、1、2、5、10、20、50 μM)Sal B 对悬浮红细胞储存期末(d35)溶血率及形态的影响。溶血率检测结果(图 1)显示,随着 Sal B 浓度的增加,溶血率呈先下降后回升的趋势。与对照组相比,1、2、5、10、20、50 μM 浓度组溶血率降低(P 值分别为 0.042、0.036、0.027、0.002、0.025、0.065);10 μM 浓度组溶血率降至最低。综合溶血率结果,10 μM Sal B 表现出最优的保护效果。

此外,红细胞形态学观察(图 2)显示,保存 35 d 可见部分红细胞出现轻微棘形改变,添加不同浓度 Sal B 能够减少红细胞形态改变,10 μM Sal B 组棘形红细胞比例相对较少。综合溶血率和红细胞形态两个指标,10 μM 为 Sal B 的最优保护浓度,可作为后续实验最佳干预浓度。

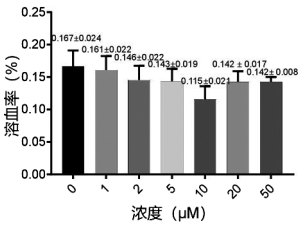
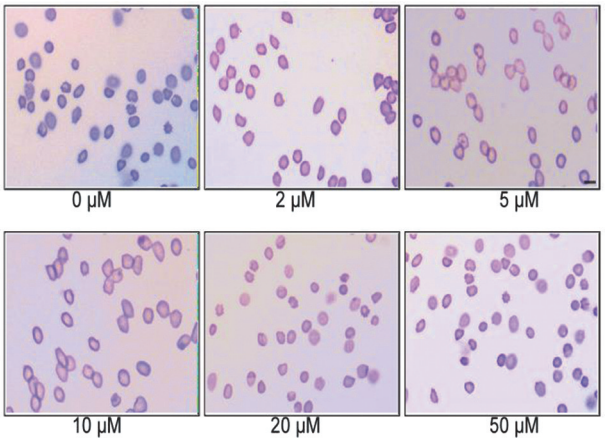


图 1　不同浓度 Sal B 对红细胞储存期末溶血率的影响

Figure 1　Effect of different concentrations of Sal B on hemolysis rate of suspended RBC at the end of storage



注:于储存 d35 取样,经瑞氏染色后,在光学显微镜下观察悬浮红细胞形态。标尺=10 μm。

图 2　不同浓度 Sal B 对红细胞储存期末形态的影响

Figure 2　Effect of different concentrations of Sal B on morphology of suspended RBC at the end of storage

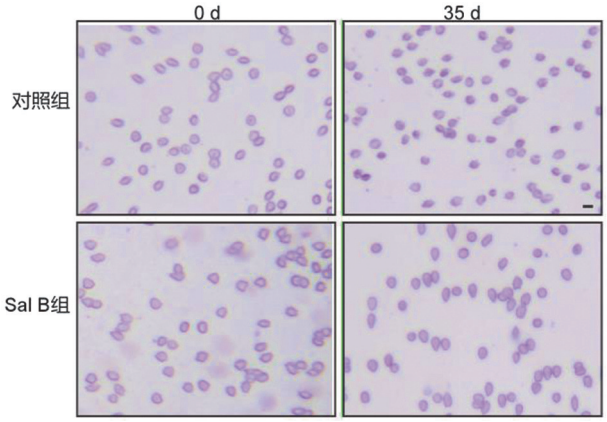
2.2　红细胞形态学分析

为探究 Sal B 添加对红细胞的潜在保护作用,在光学显微镜下观察储存 35 d 的红细胞形态。如图 3 所示,两组红细胞均出现储存损伤现象,可观察到盘状红细胞、棘状红细胞、球形棘状红细胞及球形红细胞等多种形态。实验组异常红细胞数量较对照组减少,提示实验组红细胞受损程度较轻。

2.3　悬浮红细胞的溶血率和膜稳定性分析

为进一步明确 Sal B 添加对红细胞的作用,我们检测了两组悬浮红细胞的渗透稳定性评价膜损伤情况,并测定游离血红蛋白含量计算溶血率。渗透脆性检测结果(表 1)显示,在保存 0 d、7 d、14 d,两组间渗透脆性无显著差异;而在保存 21 d、28 d、35 d,Sal B 组引起 50%红细胞溶血所需的 NaCl 浓度均显著低于对照组(P 值分别为 0.044、0.016、

0.007),提示 Sal B 组红细胞膜对低渗溶液的耐受性更强,膜稳定性显著提高。溶血率检测结果(表 2)显示,随着保存期的延长,悬浮红细胞膜损伤程度和溶血率逐渐增加,Sal B 组升高的趋势低于对照组,在保存 0 d、7 d、14 d、21 d,两组间溶血率无显著差异;而在保存 28 d 和 35 d,Sal B 组溶血率均显著低于对照组(P 值分别为 0.011、0.003)。两组溶血率均符合《全血及成分血质量要求(GB 18469-2012)》中储存期末溶血率<0.80%的规定。以上结果说明,Sal B 添加有助于减少体外低温存储导致的红细胞膜损伤和溶血的发生。



注:对储存 d35 悬浮红细胞进行瑞氏染色后,于光学显微镜下观察悬浮红细胞形态,标尺 = 10 μm。

图 3 两组悬浮红细胞在储存期末的形态

Figure 3 Morphology of suspended RBC in the two groups at the end of storage

表 1 两组悬浮红细胞渗透脆性比较($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

Table 1 Comparison of osmotic fragility of suspended RBC between the two groups($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

时间点(d)	对照组(g/L)	Sal B 组(g/L)	P 值
0	3.461±0.230	3.616±0.235	0.208
7	4.042±0.270	3.943±0.152	0.473
14	4.895±0.418	4.824±0.356	0.751
21	5.263±0.251	4.861±0.167	0.044 *
28	5.764±0.261	5.119±0.235	0.016 *
35	6.077±0.228	5.297±0.235	0.007 **

注:渗透脆性以引起 50%红细胞溶血时对应的 NaCl 的浓度表示,引起 50%溶血的 NaCl 浓度越高,提示红细胞对低渗环境的耐受性越差,数值越低表示红细胞膜稳定性越好;同一时间点组间比较采用配对 t 检验;* 相同时间点实验组与对照组相比,* P<0.05,* * P<0.01。

2.4 Sal B 缓解红细胞存储损伤机制的初步探究

为评估 Sal B 对红细胞存储期间氧化应激的影响,本研究检测了两组悬浮红细胞胞浆内 ROS 水平及 SOD 酶活性。ROS 检测结果(表 3)显示,保存 7 d 时两组间无显著差异,而保存 14 d、21 d、28 d、35 d 时,Sal B 组 ROS 水平均显著低于对照组。进一步检测胞内 SOD 酶活性,结果显示,保存 0 d 和 7 d 时两组 SOD 活性无显著差异,而保存 14 d、21 d、28 d、35 d 时,Sal B 组 SOD 活性均显著高于对照组。以上结果表明,Sal B 的添加能够显著提升存储红细胞内 SOD 酶活性,并有效清除积累的 ROS,从而减轻体外低温存储诱导的氧化应激(表 4)。

表 2 两组悬浮红细胞溶血率比较($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

Table 2 Comparison of hemolysis rate of suspended RBC between the two groups($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

时间点(d)	对照组(%)	Sal B 组(%)	P 值
0	0.041±0.012	0.043±0.010	0.894
7	0.0555±0.015	0.048±0.016	0.364
14	0.084±0.018	0.082±0.014	0.629
21	0.115±0.005	0.102±0.023	0.961(ns)
28	0.158±0.038	0.103±0.015	0.011 *
35	0.197±0.024	0.107±0.019	0.003 **

注:经 Grubbs 检验,在储存 d21 对照组中存在 1 例离群值(P<0.05),予以剔除。同一时间点组间比较采用配对 t 检验;* 相同时间点实验组与对照组相比,* P<0.05,* * P<0.01。

表 3 两组悬浮红细胞胞浆 ROS 水平比较($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

Table 3 Comparison of cytosolic ROS levels in suspended RBC between the two groups($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

时间点(d)	对照组(%)	Sal B 组(%)	P 值
0	1.088±0.219	0.888±0.485	0.526
7	2.546±0.503	1.972±0.271	0.163
14	3.104±0.516	2.068±0.246	0.023 *
21	3.291±0.238	2.572±0.304	0.012 *
28	4.142±0.195	2.923±0.370	0.004 **
35	4.866±0.340	2.986±0.592	0.002 **

注:同一时间点组间比较采用配对 t 检验;* 相同时间点实验组与对照组相比,* P<0.05,* * P<0.01。

表 4 两组悬浮红细胞胞内 SOD 酶活性比较($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

Table 4 Comparison of intracellular SOD activity in suspended RBC between the two groups($\bar{x}\pm s$,$n=10$)

时间点(d)	对照组(U/mg Hb)	Sal B 组(U/mg Hb)	P 值
0	0.887±0.079	0.850±0.073	0.217
7	0.609±0.043	0.569±0.053	0.153
14	0.375±0.038	0.514±0.073	0.019 *
21	0.364±0.054	0.483±0.038	0.018 *
28	0.303±0.038	0.392±0.060	0.015 *
35	0.235±0.036	0.351±0.050	0.012 *

注:同一时间点组间比较采用配对 t 检验;* 相同时间点实验组与对照组相比,* P<0.05。

3 讨论

红细胞输注在挽救生命和改善患者健康方面发挥着关键作用。正常人体内红细胞的平均寿命约为 120 d,这是由红细胞的生理特性、衰老机制及脾脏的清除功能共同决定的。红细胞保养液(红细胞添加液)的研发彻底改变了血液储存技术,使红细胞能在体外长时间保存并维持功能,为现代输血医学奠定了基础。然而,体外低温(2~6℃)储存环

境下改变了红细胞的生理状态,这种改变直接影响红细胞的代谢、结构和功能,诱导红细胞存储损伤,输注存储病变的红细胞可能与临床不良后果及输血回收率下降具有一定的关系[4,25-26]。本研究旨在寻找缓解红细胞存储损伤的方法,有望为临床减少输血不良反应提供新的思路。

丹参具有抗凝血、抗炎、抗氧化、抗纤维化和抗凋亡的作用。研究显示,丹参活血汤联合西药治疗心血瘀阻型冠心病心绞痛临床效果及安全性均较高,可有效调节患者血脂代谢,改善血液流变学及临床症状。Sal B 作为丹参水溶性的重要有效成分,是有效的自由基清除剂和抗氧化剂,具有铁螯合活性。本研究证明 Sal B 能够减少氧化应激缓解红细胞存储损伤,提升了 Sal B 的临床应用功效。

红细胞存储损伤主要表现为氧化损伤及代谢紊乱,氧化损伤包括脂质、蛋白质及血红蛋白的氧化。丹酚酸 B 是否通过抗氧化及螯合铁离子的功能缓解红细胞存储损伤还未可知。在本研究中,我们试图确定 Sal B 对红细胞存储病变的影响。通过测定红细胞形态、渗透脆性和溶血率明确 Sal B 对红细胞的保护作用,并检测红细胞胞浆 ROS 水平和胞内 SOD 酶活性探究 Sal B 的作用机制。

研究结果显示,Sal B 能够更好地维持体外低温存储条件下红细胞的形态和渗透稳定性,降低溶血程度,这一结果说明,Sal B 能够减少红细胞存储损伤;进一步探究潜在机制发现,Sal B 能够有效地减少体外存储诱导的 ROS 的累积,并提高胞内 SOD 酶活性。本研究结果说明,Sal B 能够通过减少氧化应激缓解红细胞存储损伤。

本研究初步探究了 Sal B 在红细胞存储损伤中的作用及潜在机制,证实 Sal B 具有调节氧化应激缓解红细胞存储损伤的作用,为红细胞存储损伤的机制研究提供了理论证据。虽然本研究初步证实了 Sal B 缓解红细胞存储损伤,但 Sal B 调节氧化应激的潜在机制,以及可能对红细胞生化、代谢等的影响仍需进一步验证。另外,Sal B 是否通过其铁螯合活性直接抑制 Fenton 反应、减少脂质过氧化,目前尚不清楚,这也是本研究的局限性之一。后续研究将结合铁离子含量及脂质过氧化标志物的检测,并结合免疫印迹、蛋白组学、代谢组学等技术,进一步揭示 Sal B 调节红细胞存储损伤的分子网络,为临床红细胞保存提供新的思路与实验依据。

利益冲突说明/Conflict of Interests

所有作者均声明不存在利益冲突。

伦理批准及知情同意/Ethics Approval and Donor/Patient Consent

本研究已通过中国医学科学院血液病医院伦理委员会审批(批件号:TJ2023007-EC-1);本研究纳入的所有献血者均已签署知情同意书。

作者贡献/Authors' Contribution

陈传爱:实验思路设计、实验实施、数据分析、论文撰写;李浩泷:实验思路提出、样本收集、实验设计、实验数据分析、文章撰写与校对;安蓬蓬:样本收集、实验实施、数据收集;杨育森:实验实施、数据分析与整理、文章校对;于洋:数据收集与整理、文章校对。

[参考文献]

[1] ROUS P, TURNER J R. The preservation of living red blood cells in vitro: II. The transfusion of kept cells[J]. J Exp Med, 1916, 23(2): 239-248.

[2] LOUTIT J F, MOLLISON P L. Disodium-citrate-glucose mixture as a blood preservative[J]. Br Med J, 1943, 4327(2): 744-745.

[3] RILEY B C, STANSBURY L G, HASAN R A, et al. Transfusion of red blood cells ≥ 35 days old: a narrative review of clinical outcomes[J]. Transfusion, 2023, 63(11): 2179-2187.

[4] KARAFIN M S, GRIER A L, FASANO R M, et al. Blood-storage duration affects hematological and metabolic profiles in patients with sickle cell disease receiving transfusions[J]. J Clin Invest, 2025, 135(17): e192920.

[5] KOCH C G, LI L, SESSLER D I, et al. Duration of red-cell storage and complications after cardiac surgery[J]. N Engl J Med, 2008, 358(12): 1229-1239.

[6] RAFIEE M H, AZIZI M, MONSEF SHOKRI M, et al. Comparative evaluation of red blood cell storage lesion in red cell concentrates(RCCs) prepared from regular and first-time blood donors[J]. Expert Rev Hematol, 2026, 19(2): 203-211.

[7] YOSHIDA T, PRUDENT M, D'ALESSANDRO A. Red blood cell storage lesion: causes and potential clinical consequences[J]. Blood Transfus, 2019, 17(1): 27-52.

[8] SHE Y, LIU Q, XIONG X, et al. Erythrocyte storage lesion improvements mediated by naringin screened from vegetable/fruit juice using cell extract and HPLC-MS[J]. J Anal Methods Chem, 2022, 2022: 7556219.

[9] KIM C Y, JOHNSON H, PELTIER S, et al. Deuterated linoleic acid attenuates the RBC storage lesion in a

mouse model of poor RBC storage[J]. Front Physiol, 2022(13):868578.

[10] LIU T, HAN S, PANG M, et al. Cerium oxide nanoparticles protect red blood cells from hyperthermia-induced damages[J]. J Biomater Appl, 2021, 36(1):36-44.

[11] ZINGG S W, SCHUSTER R, JOSEPH B, et al. Storage with ethanol attenuates the red blood cell storage lesion [J]. Surgery, 2022, 172(6):1829-1836.

[12] 杨丽丽, 李旭研, 孙明玥, 等. 维生素 C 对存储红细胞的影响[J]. 包头医学院学报, 2019, 35(10):59-61.
YANG L L, LI X Y, SUN M M, et al. Effect of vitamin C on red blood cells during storage[J]. Journal of Baotou Medical College, 2019, 35(10):59-61.

[13] 张春霞, 刘晶晶, 王雷, 等. 茶多酚对体外存储红细胞的影响[J]. 包头医学院学报, 2019, 35(10):65-67.
ZHANG C X, LIU J J, WANG L, et al. Effect of tea polyphenols on red blood cells during storage[J]. Journal of Baotou Medical College, 2019, 35(10):65-67.

[14] WANG Y H, WU J, LAI Y, et al. Multitargeted synergistic mechanisms of Salvia miltiorrhiza and its bioactive compounds: A review [J]. J Ethnopharmacol, 2026, 368:121780.

[15] ZHAO G R, ZHANG H M, YE T X, et al. Characterization of the radical scavenging and antioxidant activities of danshensu and salvianolic acid B[J]. Food Chem Toxicol, 2008, 46(1):73-81.

[16] XIE Y F, ZHANG Z, LIU Z S, et al. Salvianolic acid B influences the ferritin function in iron(II)/iron(III) transformation and iron chelation[J]. J Sci Food Agric, 2025, 105(6):3364-3372.

[17] FENG X, LI Y, WANG Y, et al. Danhong injection in cardiovascular and cerebrovascular diseases: pharmacological actions, molecular mechanisms, and therapeutic potential. Pharmacol Res, 2019,139:62-75.

[18] PAN D P, WAN H T, HE Y,et al. Efficacy of danhong injection adjuvant therapy in patients with acute ischemic stroke: a real-world, multicenter, retrospective study [J]. Front Pharmacol. 2025, 16:1608719.

[19] KAN Z Q, YAN W L, CHEN C, et al. Efficacy and safety of Danhong injection on inflammatory factors and vascular endothelial function in patients with unstable angina pectoris: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J]. Front Pharmacol. 2025, 16:1389746.

[20] CHENG J L, LONG J, ZHANG J J, et al. Safety, tolerance, and pharmacokinetics of salvianolic acid B in healthy Chinese volunteers: a randomized, double-blind, placebo-controlled phase 1 clinical trial[J]. Front Pharmacol, 2023(14):1146309.

[21] NEVES M A D, NI T T, MACKEIGAN D T, et al. Salvianolic acid B inhibits thrombosis and directly blocks the thrombin catalytic site[J]. Res Pract Thromb Haemost, 2024, 8(4):102443.

[22] ZHOU X X, LV J X, LIU W, et al. Salvianolic acid B ameliorates metabolic dysfunction-associated steatohepatitis in mice by inhibiting hepatocyte ferroptosis via regulation of the SIRT1/p53 axis[J]. Free Radic Biol Med, 2026, 252:464-477.

[23] GHEZELBASH B, AZARKEIVAN A, POURFATHOLLAH A A, et al. Comparative evaluation of biochemical and hematological parameters of pre-storage leukoreduction during RBC storage[J]. Int J Hematol Oncol Stem Cell Res, 2018, 12(1):35-42.

[24] HUANG Y X. Main events and mechanism of human erythrocyte ageing[J]. Expert Rev Mol Med, 2026, 28:e4.

[25] BRUUN-RASMUSSEN P, KRAGH ANDERSEN P, BANASIK K, et al. Intervening on the storage time of RBC units and its effects on adverse recipient outcomes using real-world data [J]. Blood, 2022, 139(25): 3647-3654.

[26] ROUSSEL C, MOREL A, DUSSIOT M, et al. Rapid clearance of storage-induced microerythrocytes alters transfusion recovery[J]. Blood, 2021, 137(17):2285-2298.

(2026-07-07 收稿,08-06 修回,08-10 接收)

本文编辑:李弘武