

# 红细胞储存期间代谢变化对输血效果影响研究

邢永艳<sup>1</sup> 邢永杰<sup>2</sup>

1 格尔木市中心血站 2 格尔木市疾病预防控制中心

DOI:10.12238/bmtr.v6i5.10051

**[摘要]** 输血作为医疗救治的重要手段,能够挽救生命、改善贫血与凝血功能,提升手术安全性。然而,红细胞在储存过程中会发生一系列代谢变化,这些变化可能直接影响输血效果,甚至导致不良事件的发生。本文旨在深入探讨红细胞储存期间代谢变化的具体机制及其对输血效果的影响,为优化血液制品储存条件和预测输血后性能提供理论依据。

**[关键词]** 红细胞储存; 代谢变化; 输血效果影响

中图分类号: R555 文献标识码: A

## Study on the influence of metabolic changes of red blood cells during storage on blood transfusion

Yongyan Xing<sup>1</sup> Yongjie Xing<sup>2</sup>

1 Central Blood Station of Golmud 1 Qinghai Province, Golmud

2 Golmud Center for Disease Control and Prevention 2 Qinghai province

**[Abstract]** as an important means of medical treatment, blood transfusion can save lives, improve the function of anemia and coagulation, and improve the safety of surgery. However, red blood cells undergo a series of metabolic changes during storage that may directly affect transfusion outcomes and even lead to adverse events. The purpose of this study was to explore the mechanism of red blood cell metabolism during storage and its effect on blood transfusion, and to provide theoretical basis for optimizing the storage conditions of blood products and predicting the post-transfusion performance.

**[Key words]** red blood cell storage; metabolic changes; effect of blood transfusion

红细胞是血液中负责运输氧气和二氧化碳的主要细胞。在储存过程中,红细胞会经历结构、生物化学和代谢的复杂变化,这些变化统称为“储存损伤”。这些损伤不仅影响红细胞的携氧能力,还可能引发氧化应激、炎症作用和凝血反应,进而影响输血效果。因此,研究红细胞储存期间的代谢变化对于提高输血安全性和有效性具有重要意义。

### 1 红细胞储存期间的代谢变化

#### 1.1 能量代谢变化

红细胞,作为血液中不可或缺的组成部分,其生命活动的核心在于维持一个精细的能量平衡,这主要依赖于糖酵解途径的高效运作。在正常的生理状态下,红细胞通过分解葡萄糖,经过一系列酶促反应,最终生成腺苷三磷酸(ATP),这是它们执行氧气和二氧化碳运输、维持细胞形态及膜完整性的关键能量来源。然而,当红细胞被置于储存环境中时,这一能量代谢过程开始发生微妙而深远的变化。随着储存时间的延长,红细胞内的葡萄糖储备逐渐被消耗,同时糖酵解途径的终产物——乳酸开始在细胞内累积。乳酸的积聚不仅改变了细胞内的渗透压,还直接导致

了红细胞内pH值的下降,这是一个不容忽视的生理变化。pH值的降低对红细胞内复杂的酶系统产生了显著影响,特别是那些对酸碱度敏感的酶类,如磷酸果糖激酶和葡萄糖6-磷酸脱氢酶。这些酶在糖酵解途径中扮演着至关重要的角色,它们的活性受到pH值变化的精细调控。当pH值偏离最适范围时,这些酶的催化效率显著降低,进而导致ATP的生成速度减缓,最终引起细胞内ATP水平的下降。ATP的减少,作为能量代谢变化的核心后果,对红细胞的功能产生了多方面的影响。首先,它削弱了红细胞的变形能力,使得红细胞在通过狭窄的毛细血管时变得困难,影响了血液的流动性和氧气供应效率。其次,ATP的减少还可能引起红细胞膜上的脂质和蛋白质发生构象变化,降低了膜的稳定性和韧性,增加了红细胞在储存和输血过程中发生溶血的风险。溶血不仅会导致红细胞的破坏和丢失,还可能引发一系列输血相关的并发症,如免疫反应、凝血障碍等,严重影响输血效果和患者的安全。

#### 1.2 氧化还原代谢变化

在红细胞的储存过程中,其内部环境的微妙平衡——特别

是氧化还原状态的稳定, 遭受了显著的挑战。这一平衡状态对于维持红细胞的结构完整性和功能活性至关重要。然而, 随着储存时间的推移, 红细胞逐渐失去了对氧化应激的有效防御能力。具体来说, 红细胞内原本存在的抗氧化防御体系, 包括谷胱甘肽 (GSH) 这一关键的非酶类抗氧化剂, 以及谷胱甘肽过氧化物酶 (GPXs) 等酶类抗氧化剂, 它们的含量在储存期间逐渐下降。GSH 作为细胞内主要的还原剂, 能够中和自由基, 防止其对细胞成分造成损害; 而 GPXs 则通过催化过氧化物的分解, 减少其对细胞的毒性作用。这两者的减少, 无疑削弱了红细胞对抗氧化应激的能力, 使得细胞更加容易受到氧化损伤<sup>[1]</sup>。与此同时, 储存条件中的某些因素, 如温度、氧气浓度以及光照等, 都可能促进氧化应激反应的加剧。在这些因素的作用下, 血红蛋白分子中的铁离子可能参与催化自由基的生成, 导致血红蛋白的氧化修饰。这种氧化修饰不仅改变了血红蛋白的结构和功能, 还可能使其失去与氧气结合的能力, 从而影响红细胞的携氧功能。

### 1.3 氨基酸和铁代谢变化

在红细胞储存的漫长时间里, 其内部的氨基酸和铁代谢过程经历了一系列复杂而深刻的变化, 这些变化对红细胞的功能和稳定性产生了显著影响。一方面, 红细胞内蛋白质的动态平衡被打破, 表现为蛋白质碎片化的增加。这是由于储存条件导致的蛋白质降解加速, 使得原本结构完整的蛋白质分子被切割成较小的片段。同时, 膜迁移或外化现象也变得更加明显, 即红细胞膜上的蛋白质或脂质成分发生位置变化, 甚至脱离细胞膜进入周围环境。这些变化不仅破坏了红细胞膜的正常结构和功能, 还可能导致红细胞表面抗原性的改变, 影响输血的安全性和有效性。另一方面, 血红蛋白作为红细胞内最重要的蛋白质, 其铁代谢也发生了变化。血红蛋白分子中的二价铁离子在储存过程中可能参与了一系列不利的化学反应。特别是当它们与过氧化氢相遇时, 会迅速反应生成高度活跃的羟基自由基。羟基自由基是一种极强的氧化剂, 能够无差别地攻击细胞内的各种成分, 包括蛋白质、脂质和核酸等, 导致氧化应激反应的进一步加剧。这种氧化应激不仅加剧了血红蛋白自身的氧化损伤, 还促进了脂质过氧化反应的发生, 形成了一种恶性循环。另外, 非转铁蛋白结合铁 (NTBI) 的增加也是储存过程中一个值得关注的现象。NTBI 是指那些未与转铁蛋白结合而游离在血浆中的铁离子。在储存条件下, 由于转铁蛋白与铁的结合能力可能下降, 导致 NTBI 的浓度上升。NTBI 具有很强的促氧化作用, 它能够催化 ROS 的产生, 进一步加剧红细胞的氧化损伤。

### 1.4 一氧化氮代谢变化

一氧化氮 (NO), 作为一种关键的气体信号分子, 在生物体内发挥着广泛而复杂的调控作用, 特别是在维持血管稳态、调节细胞功能和促进免疫反应等方面。然而, 在红细胞储存的过程中, NO 的代谢和功能状态发生了显著的变化, 这些变化对红细胞本身以及输血后的生理效应产生了深远的影响。首先, 随着储存时间的延长, 红细胞内 NO 的含量逐渐降低。这一现象可归因于多种因素的综合作用, 包括 NO 合成酶的活性下降、NO 清除机制的增

强以及细胞内部环境的改变等。NO 的减少直接影响了红细胞的变形能力, 这是红细胞在微循环中顺利通过狭窄血管通道的关键能力。变形能力的下降不仅增加了红细胞在血管中的滞留和破坏风险, 还可能影响血液的流动性和组织氧供<sup>[2]</sup>。NO 的减少也削弱了红细胞膜的稳定性。NO 在维持细胞膜脂质双层的流动性和完整性方面发挥着重要作用。当 NO 含量下降时, 细胞膜容易受到氧化应激和物理损伤的侵袭, 导致膜破裂和细胞内容物的泄露。这不仅加剧了红细胞的溶血风险, 还可能引发输血相关的炎症反应和凝血障碍。另外, NO 还是一种重要的抗氧化剂, 能够中和自由基并保护细胞免受氧化损伤。在红细胞储存过程中, NO 的减少降低了其对抗氧化应激的能力, 使得红细胞更容易受到氧化攻击并发生功能障碍。这种氧化应激的加剧进一步促进了红细胞的衰老和死亡。

## 2 代谢变化对输血效果的影响

### 2.1 溶血风险增加

在红细胞储存的漫长周期里, 其内部发生的复杂代谢变化悄然编织着一张影响深远的网络, 其中最为显著且令人担忧的后果之一便是溶血风险的显著增加。这些代谢变化, 尤其是膜稳定性的削弱与抗氧化防御体系的衰退, 如同两把利刃, 共同作用于红细胞, 使其在面对输血过程中的各种挑战时显得尤为脆弱。膜稳定性的下降, 是红细胞储存过程中一个不容忽视的现象。红细胞膜作为细胞的保护屏障, 其完整性和稳定性对于维持细胞形态、控制物质进出以及保障细胞功能至关重要。然而, 随着储存时间的推移, 膜上的脂质和蛋白质成分发生变化, 膜的结构和弹性受损, 导致膜的稳定性急剧下降。这种变化使得红细胞在输血过程中更容易受到物理性损伤, 如剪切力、压力变化等, 进而引发溶血反应。与此同时, 抗氧化能力的减弱也为溶血的发生埋下了伏笔。红细胞在储存期间, 其内部的抗氧化物质逐渐被消耗, 而氧化应激反应却日益增强。这种不平衡的状态使得红细胞在面对外界氧化剂时显得力不从心, 无法有效清除自由基和其他氧化产物, 导致细胞内的氧化损伤不断累积。当这种损伤达到一定程度时, 便会触发溶血过程, 红细胞膜破裂, 细胞内容物释放到血液中, 引发一系列不良后果。溶血反应的发生, 不仅直接降低了输血效果, 使得患者无法获得足够的氧气和营养物质供应, 还可能引发一系列严重的输血不良反应<sup>[3]</sup>。这些反应包括但不限于发热、寒战、过敏反应、溶血性贫血等, 严重者甚至可能危及生命。

### 2.2 携氧能力下降

在红细胞储存与输血流程的每一步中, 都潜藏着对其核心功能——携氧能力的微妙影响。随着储存时间的延长, 红细胞内部发生的深刻代谢变化逐渐显露其负面影响, 其中 ATP 的减少与血红蛋白的氧化损伤成为了两大关键因素, 共同作用于红细胞的携氧效率, 进而对患者的治疗效果产生不容忽视的影响。ATP, 作为细胞内能量的直接来源, 对于红细胞维持其正常生理功能至关重要。然而, 在储存过程中, 由于糖酵解途径受阻、ATP 生成减少, 红细胞面临着能量匮乏的困境。这种能量不足不仅削弱了

红细胞的变形能力,限制了其在微循环中的自由穿梭,更直接影响了其主动运输氧气的能力。当红细胞携带的氧气量减少时,输血后患者的血氧饱和度自然也会随之下降,无法满足组织对氧气的迫切需求,进而影响疾病的治疗进程和效果。与此同时,血红蛋白作为红细胞内负责运输氧气的关键蛋白质,其状态也直接决定了红细胞的携氧能力。然而,在储存期间,血红蛋白极易受到氧化应激的攻击,发生氧化损伤。这种损伤不仅改变了血红蛋白的结构和功能,还可能导致其失去与氧气结合的能力,从而进一步削弱了红细胞的携氧效率。当受损的血红蛋白随输血进入患者体内时,它们无法有效地将氧气输送到组织细胞中,导致患者的血氧饱和度持续偏低,治疗效果因此大打折扣。

### 2.3 炎症反应和凝血反应

在红细胞储存的漫长时间里,一系列生物化学变化悄然发生,这些变化不仅影响着红细胞自身的性质,还可能对输血后的患者健康带来潜在的威胁。特别是红细胞在储存过程中可能释放的促凝血磷脂和促炎分子,它们如同潜伏的“定时炸弹”,在输血时可能触发复杂的生理反应,导致炎症反应和凝血反应的加剧,从而增加患者并发症的风险。促凝血磷脂,作为红细胞膜上的一种重要成分,在正常情况下维持着血液的正常凝固平衡。然而,在储存条件下,随着红细胞膜稳定性的下降和细胞损伤的增加,这些磷脂可能被异常释放到血液中。一旦进入血液循环,它们便能激活凝血系统,促进血小板的聚集和凝血酶的形成,导致凝血反应过度激活。这种过度的凝血反应不仅可能引发血栓的形成,还可能阻塞血管,影响血液循环,造成组织缺血缺氧等严重后果<sup>[4]</sup>。与此同时,红细胞在储存过程中还可能释放一系列促炎分子,如细胞因子、趋化因子等。这些分子具有强大的生物活性,能够激活免疫系统,促进炎症细胞的浸润和炎症介质的释

放。在输血后,这些促炎分子可能随着红细胞进入患者体内,与患者的免疫系统发生相互作用,引发或加剧炎症反应。炎症反应不仅会导致患者出现发热、寒战等不适症状,还可能损伤血管内皮细胞,进一步促进凝血反应的发生,形成恶性循环。<sup>[5]</sup>

### 3 结语

红细胞储存期间的代谢变化对输血效果具有显著影响。通过深入研究这些代谢变化的机制,可以优化血液制品的储存条件,减少储存损伤,提高输血的安全性和有效性。未来的研究应进一步探索新的评估红细胞储存质量和输血后性能的方法,为临床输血提供更加科学的指导。

### [参考文献]

- [1]周军,喻斌.重型颅脑损伤患者应用不同储存时间红细胞输注治疗的临床效果比较[J].深圳中西医结合杂志,2023,33(24):118-121.
- [2]付晓艳,甄自达,邱立娟,等.红细胞储存时间与体外循环心脏手术患儿术后急性肾损伤的关系[J].临床输血与检验,2023,25(04):489-493.
- [3]欧阳足兰,俞勇,倪建萍.输注不同储存时间红细胞对极低出生体质量儿输血疗效和安全性的影响[J].现代实用医学,2023,35(04):517-519.
- [4]雍雪莲,邹莉,刘磊,等.不同低气压缺氧环境下悬浮红细胞的质量变化[J].中国输血杂志,2023,36(01):15-19.
- [5]冯倩,罗圆圆,陈麟凤,等.滤除白细胞对保存期内红细胞功能变化的影响研究[J].北京医学,2013,(05):387-390.

### 作者简介:

邢永艳(1980--),女,藏族,青海省互助县人,本科,主管技师,从事血站采供血管理及研究。