

• 临床研究 •      doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.08.028  
网络首发    [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.r.20250625.1701.002\(2025-06-26\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.r.20250625.1701.002(2025-06-26))

# 基于 ERAS 的多模式镇痛联合目标导向液体治疗在骨科机器人辅助椎弓根内固定术中的应用研究

胡丹丹<sup>1</sup>,袁光华<sup>1</sup>,丁颖<sup>1</sup>,陈捷<sup>1</sup>,宗林<sup>2△</sup>

(1. 淮安八十二医院麻醉科,江苏淮安 223000;2. 南京大学医学院附属金陵医院麻醉科,南京 210000)

**[摘要]** **目的** 探讨基于加速康复外科(ERAS)的多模式镇痛联合目标导向液体治疗在骨科机器人辅助椎弓根内固定术患者麻醉管理中的应用效果。**方法** 选取 2024 年 2 月至 2025 年 2 月在淮安八十二医院行机器人辅助手术的 80 例腰椎骨折患者为研究对象,按随机数字表法分为 ERAS 组和对照组,每组 40 例。ERAS 组实施基于 ERAS 的多模式镇痛联合目标导向液体治疗,对照组采用传统麻醉方案。比较两组麻醉开始前( $T_0$ )、术前即刻( $T_1$ )、手术结束时( $T_2$ )、术后苏醒时( $T_3$ )血流动力学指标[心率、平均动脉压(MAP)], $T_0$ 、术后 24 h( $T_4$ )、术后 48 h( $T_5$ )、术后 72 h( $T_6$ )IL-6 水平,记录术后苏醒时间、视觉模拟量表(VAS)评分、并发症发生率及住院时间、围手术期体液管理指标[总输血量、液体正平衡量、每搏量变异度(SVV)达标率等]。**结果** 与对照组比较,ERAS 组 MAP 波动 $\leq \pm 10\%$ 的比例(87.5% vs. 62.5%)、心率增幅 $\leq 20\%$ 基础值比例(95.0% vs. 70.0%)更高( $P < 0.05$ )。 $T_4$  时两组 IL-6 水平最高, $T_4 \sim T_6$  时 ERAS 组 IL-6 水平低于对照组( $P < 0.05$ )。与对照组比较,ERAS 组苏醒时间[(18.5 $\pm$ 3.2)min vs. (25.1 $\pm$ 4.5)min]、首次下床时间[(8.2 $\pm$ 2.1)h vs. (20.5 $\pm$ 4.3)h]、住院时间[(4.2 $\pm$ 1.1)d vs. (6.5 $\pm$ 1.3)d]更短,24 h 静息 VAS 评分[(2.1 $\pm$ 0.6)分 vs. (3.8 $\pm$ 0.9)分]、并发症发生率(20.0% vs. 57.5%)更低,总输血量[(1 850 $\pm$ 220)mL vs. (2 550 $\pm$ 310)mL]、胶体液用量[(620 $\pm$ 95)mL vs. (850 $\pm$ 120)mL]、液体正平衡量[(320 $\pm$ 90)mL vs. (1 120 $\pm$ 210)mL]更少,术中尿量[(0.55 $\pm$ 0.08)mL $\cdot$ kg<sup>-1</sup> $\cdot$ h<sup>-1</sup> vs. (0.30 $\pm$ 0.10)mL $\cdot$ kg<sup>-1</sup> $\cdot$ h<sup>-1</sup>]更多,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。ERAS 组 SVV 达标率为 95.0%(38/40)。**结论** 基于 ERAS 的多模式镇痛联合目标导向液体治疗可有效稳定机器人辅助脊柱手术患者的围手术期生理状态,加速术后功能恢复并减少并发症发生。

**[关键词]** 加速康复外科;目标导向液体治疗;多模式镇痛;骨科机器人;麻醉管理  
**[中图法分类号]** R614      **[文献标识码]** A      **[文章编号]** 1671-8348(2025)08-1924-06

## Study on the application of multimodal analgesia combined with goal-directed fluid therapy based on ERAS in orthopedic robot-assisted pedicle internal fixation

HU Dandan<sup>1</sup>,YUAN Guanghua<sup>1</sup>,DING Ying<sup>1</sup>,CHEN Jie<sup>1</sup>,ZONG Lin<sup>2△</sup>

(1. Department of Anesthesiology, Huai'an 82 Hospital, Huai'an, Jiangsu 223000, China;  
2. Department of Anesthesiology, Jinling Hospital Affiliated to Medical School of Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

**[Abstract]** **Objective** To explore the application effect of multimodal analgesia combined with goal-directed fluid therapy based on enhanced recovery after surgery (ERAS) in the anesthesia management of patients undergoing orthopedic robot-assisted pedicle internal fixation. **Methods** Eighty patients with lumbar fractures who underwent robot-assisted surgery in Huai'an 82 Hospital from February 2024 to February 2025 were selected as the research objects and divided into the ERAS group and the control group according to the random number table method, with 40 cases in each group. The ERAS group received multimodal analgesia combined with goal-directed fluid therapy based on ERAS, while the control group adopted the traditional anesthesia protocol. The hemodynamic indicators [heart rate, mean arterial pressure (MAP)] before the start of anesthesia ( $T_0$ ), immediately before the operation ( $T_1$ ), at the end of the operation ( $T_2$ ), and at the time of postoperative recovery ( $T_3$ ), as well as the IL-6 levels at  $T_0$ , 24 hours after the operation ( $T_4$ ), 48 hours after the operation ( $T_5$ ), and 72 hours after the operation ( $T_6$ ) were compared between the two groups. Recorded the postoperative recovery time, visual analogue scale (VAS) score, incidence of complications and hospital

△ 通信作者, E-mail:755615061@qq.com.

stay,as well as perioperative infusion management parameters [total infusion volume,positive fluid balance volume,the compliance rate of stroke volume variation (SVV),etc.]. **Results** Compared with the control group,the proportion of MAP fluctuations  $\leq \pm 10\%$  (87.5% vs. 62.5%),and the proportion of basal heart rate increase  $\leq 20\%$  (95.0% vs. 70.0%) in the ERAS group were higher than those in the control group ( $P<0.05$ ). At  $T_4$ ,the IL-6 levels in both groups were the highest,while the IL-6 levels from  $T_4$  to  $T_6$  in the ERAS group were lower than those in the control group ( $P<0.05$ ). Compared with control group,wake times [(18.5 $\pm$ 3.2)min vs. (25.1 $\pm$ 4.5)min],bed time for the first time [(8.2 $\pm$ 2.1)h vs. (20.5 $\pm$ 4.3)h],the length of time [(4.2 $\pm$ 1.1)d vs. (6.5 $\pm$ 1.3)d] in the ERAS group were shorter,24-hour resting VAS score (2.1 $\pm$ 0.6 vs. 3.8 $\pm$ 0.9) and the incidence of complications (20.0% vs. 57.5%) were lower,the total infusion volume [(1 850 $\pm$ 220)mL vs. (2 550 $\pm$ 310)mL],the amount of colloid solution [(620 $\pm$ 95)mL vs. (850 $\pm$ 120)mL],and the positive balance volume of liquid [(320 $\pm$ 90)mL vs. (1 120 $\pm$ 210)mL] were less,the intraoperative urine volume [(0.55 $\pm$ 0.08)mL $\cdot$ kg<sup>-1</sup> $\cdot$ h<sup>-1</sup> vs. (0.30 $\pm$ 0.10)mL $\cdot$ kg<sup>-1</sup> $\cdot$ h<sup>-1</sup>] was more,the differences were statistically significant ( $P<0.05$ ). The compliance rate of SVV in the ERAS group was 95.0%(38/40). **Conclusion** Multimodal analgesia combined with goal-directed fluid therapy based on ERAS can effectively stabilize the perioperative physiological state of patients undergoing robot-assisted spinal surgery,accelerate postoperative functional recovery and reduce complications.

[**Key words**] enhanced recovery after surgery;goal-directed fluid therapy;multimodal analgesia;orthopedic robot;anesthetic management

加速康复外科(enhanced recovery after surgery,ERAS)理念通过优化围手术期管理策略,缩短了患者康复周期并改善了预后,现已在胃肠外科、关节外科等领域取得明显成效<sup>[1]</sup>,其核心在于通过多学科协作,减少手术应激反应及并发症。而麻醉管理作为ERAS的关键环节,直接影响患者血流动力学稳定、炎症调控及术后功能恢复<sup>[2]</sup>。近年来,骨科机器人辅助技术因其精准度高、创伤小的优势,在椎弓根内固定术中得到广泛应用,与传统脊柱手术相比,机器人辅助椎弓根内固定术需患者更长时间地维持俯卧位,且为保证术野的清晰可见,同时也要为机械臂提供足够的操作空间,要求体位固定性更高<sup>[3-4]</sup>。这种体位可能导致胸腹部受压加剧,影响呼吸力学与血流动力学稳定性,加剧围手术期血流动力学波动及炎症反应<sup>[5-6]</sup>。传统麻醉方案缺乏对体位相关生理变化的预见性调控,在维持生理稳态及促进早期康复方面存在局限性,不能满足机器人辅助技术对麻醉管理的特殊需求<sup>[7]</sup>。

现有研究表明,机器人辅助脊柱手术术后患者IL-6等炎症因子水平明显升高,与疼痛加重、恢复延迟密切相关<sup>[8-9]</sup>。此外,传统麻醉中单模式镇痛及经验性液体治疗(固定晶体液与胶体液比例)虽部分改善容量管理,但缺乏目标导向的动态调整,可能导致液体过负荷或组织灌注不足,进而加剧苏醒延迟、增加术后恶心呕吐及肺部感染风险<sup>[10]</sup>。尽管ERAS在开放脊柱手术中的应用已有探索,但其在机器人辅助手术中的麻醉管理路径尚未形成共识,尤其是多模式镇痛策略、目标导向液体治疗与早期拔管时机的协同效应仍需进一步验证<sup>[11]</sup>。因此,本研究旨在探讨基于ERAS多模式镇痛联合目标导向液体治疗在围手术

期血流动力学稳定性、炎症调控及康复指标中的价值,为优化该类手术的麻醉策略提供循证依据,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2024年2月至2025年2月在淮安八十二医院行机器人辅助手术的80例腰椎骨折患者为研究对象。纳入标准:(1)年龄18~75岁;(2)美国麻醉医师协会(American Society of Anesthesiologists,ASA)分级Ⅰ~Ⅲ级;(3)诊断为第1~2腰椎骨折需行骨科机器人辅助椎弓根内固定术。排除标准:(1)合并凝血功能障碍或感染性疾病;(2)长期使用阿片类药物或免疫抑制剂;(3)精神疾病无法配合评估;(4)术中中转开放手术;(5)严重心肺功能障碍或镇痛药物禁忌证。按随机数字表法分为ERAS组和对照组,每组40例。两组一般资料比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性,见表1。本研究通过淮安八十二医院伦理委员会审批(审批号:HA82YY202407),患者或家属均知情同意。

| 表 1 两组一般资料比较           |                   |                   |            |       |
|------------------------|-------------------|-------------------|------------|-------|
| 项目                     | ERAS组<br>(n=40)   | 对照组<br>(n=40)     | $\chi^2/t$ | P     |
| 男/女(n/n)               | 22/18             | 19/21             | 0.219      | 0.624 |
| 年龄( $\bar{x}\pm s$ ,岁) | 54.30 $\pm$ 12.81 | 56.17 $\pm$ 11.58 | 0.013      | 0.537 |
| 高血压[n(%)]              | 7(17.5)           | 9(22.5)           | 0.349      | 0.613 |
| 糖尿病[n(%)]              | 3(7.5)            | 2(5.0)            | 0.161      | 0.558 |

1.2 方法

1.2.1 干预方式

两组术前常规禁食6 h、禁饮2 h,入手术室后开

通静脉通路,给予心电监护监测生命体征。依次静脉注射盐酸咪达唑仑注射液(江苏恩华药业股份有限公司,批准文号 H20031037)0.2 mg/kg、舒芬太尼(宜昌人福药业有限责任公司,批准文号:国药准字 H20054171)0.5 μg/kg、依托咪酯(江苏恩华药业股份有限公司,批准文号:国药准字 H32022999)0.3 mg/kg 及罗库溴铵 0.6 mg/kg(浙江仙琚医药股份有限公司,批准文号:国药准字 H20123188),气管插管后连接麻醉机行机械通气。

ERAS 组采用基于 ERAS 的多模式镇痛联合目标导向液体治疗。(1)多模式镇痛:术前 20 min 采用超声引导下竖脊肌平面阻滞,注入浓度为 0.250% 的盐酸罗哌卡因注射液 20 mL;术中静脉输注瑞芬太尼(0.1~0.2 μg·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>)联合右美托咪定(0.5 μg·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>);术毕前 30 min 静脉注射帕瑞昔布钠 40 mg;术后采用患者自控静脉镇痛泵(舒芬太尼 1.5 μg/kg+托烷司琼 10 mg,背景剂量 2 mL/h,单次追加量 0.5 mL,锁定时间 15 min)。(2)目标导向液体治疗:通过 FloTrac 传感器(美国 Edwards Lifesciences 公司)监测每搏量变异度(stroke volume variation,SVV),维持 SVV<13%,晶体液(乳酸林格液)与胶体液(羟乙基淀粉 130/0.4)按体积比 2:1 输注,维持术中尿量≥0.5 mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>。(3)早期拔管与康复干预:术毕符合拔管标准[自主呼吸恢复、意识清醒、4 个成串刺激(train-of-four,TOF)值≥0.9]即刻拔管;术后 2 h 开始床上踝泵运动,术后 4 h 允许少量饮水,术后 6 h 协助坐立。

对照组采用传统麻醉方案。术中镇痛仅使用静脉输注舒芬太尼(0.3~1.0 μg/kg),未实施任何区域阻滞;术毕拔管标准与 ERAS 组一致;术后采用静脉镇痛泵(芬太尼 15 μg/kg+氟比洛芬酯 100 mg);液体治疗按体重(10 mL·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>)经验性 2:1(体积比)输注晶体液(乳酸林格液)与胶体液(羟乙基淀粉 130/0.4);术后 24 h 开始康复训练。

1.2.2 观察指标

(1)血流动力学指标:记录麻醉诱导前(T<sub>0</sub>)、术前

即刻(T<sub>1</sub>)、手术结束时(T<sub>2</sub>)、术后苏醒时(T<sub>3</sub>)的心率和平均动脉压(mean arterial pressure,MAP),计算 MAP 波动幅度(ΔMAP=实测值-基础值/基础值×100%)。(2)IL-6:于 T<sub>0</sub>、术后 24 h(T<sub>4</sub>)、术后 48 h(T<sub>5</sub>)、术后 72 h(T<sub>6</sub>)采集静脉血 3 mL,采用 ELISA 法检测 IL-6 水平(试剂盒购自美国 R&D Systems 公司)。(3)康复指标:记录术后苏醒时间(术毕至拔管时间)、术后 24 h 静息状态视觉模拟量表(visual analogue scale,VAS)评分(0~10 分)、首次下床时间及住院时间。(4)并发症发生情况:统计术后 48 h 内恶心呕吐、肺部感染、低血压(MAP<65 mmHg 持续 5 min)发生率。(5)围手术期体液管理指标:术中总输入量、液体正平衡量、术中尿量、SVV 达标率,其中 SVV 达标率定义为 SVV<13%的时间占比,因对照组未监测 SVV,故无达标率数据。

1.3 统计学处理

采用 SPSS26.0 软件进行数据分析,计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,比较采用 *t* 检验或方差分析;计数资料以例数或百分比表示,比较采用  $\chi^2$  检验或 Fisher 确切概率法;多元线性回归分析相关性,以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 两组血流动力学指标比较

T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub> 时 ERAS 组心率、MAP 水平低于对照组,差异有统计学意义(*P*<0.05),见表 2。ERAS 组 MAP 波动≤±10%的比例高于对照组[87.5%(35/40) vs. 62.5%(25/40)],差异有统计学意义( $\chi^2=6.120, P=0.012$ );ERAS 组心率增幅≤20%基础值比例高于对照组[95.0%(38/40) vs. 70.0%(28/40)],差异有统计学意义( $\chi^2=8.570, P=0.003$ )。

2.2 两组 IL-6 水平比较

T<sub>4</sub> 时两组 IL-6 水平最高,T<sub>4</sub>~T<sub>6</sub> 时 ERAS 组 IL-6 水平低于对照组(*P*<0.05),见表 3。多元线性回归分析结果显示,IL-6 水平与术中液体正平衡量呈正相关(*P*=0.002)。

表 2 两组血流动力学指标比较( $\bar{x} \pm s$ )

| 项目        | <i>n</i> | T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub>        | T <sub>2</sub>        | T <sub>3</sub>        |
|-----------|----------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 心率(次/min) |          |                |                       |                       |                       |
| ERAS 组    | 40       | 72.3±6.5       | 75.1±7.2 <sup>a</sup> | 80.5±8.1 <sup>a</sup> | 78.8±6.9 <sup>a</sup> |
| 对照组       | 40       | 73.8±7.1       | 82.6±8.9              | 88.4±9.7              | 85.3±8.3              |
| MAP(mmHg) |          |                |                       |                       |                       |
| ERAS 组    | 40       | 85.6±7.2       | 88.9±6.8 <sup>a</sup> | 90.2±7.1 <sup>a</sup> | 87.5±6.5 <sup>a</sup> |
| 对照组       | 40       | 86.1±6.9       | 94.3±8.7              | 98.2±9.4              | 93.6±8.1              |

<sup>a</sup>:*P*<0.05,与同期对照组比较;重复测量方差分析显示组间×时间交互作用 *P*<0.001。

2.3 两组康复指标比较

与对照组比较,ERAS 组苏醒时间、首次下床时

间、住院时间更短,24 h 静息 VAS 评分更低,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),见表 4。协方差分析结果显示,IL-6 水平每升高 10 pg/mL,首次下床时间延迟 1.2 h( $P=0.013$ )。

2.4 两组并发症发生情况比较

ERAS 组并发症发生率低于对照组[20.0%(8/40) *vs.* 57.5%(23/40)],差异有统计学意义( $\chi^2=12.340, P<0.001$ ),见表 5。且 ERAS 组恶心呕吐风

险降低了 64.7%( $RR=0.353, 95\% CI: 0.170\sim 0.720$ )。

2.5 两组围手术期体液管理指标比较

与对照组比较,ERAS 组总输血量、胶体液用量、液体正平衡量更少,术中尿量更多,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),见表 6。ERAS 组 SVV 达标率为 95.0%(38/40)。

表 3 两组 IL-6 水平比较( $\bar{x}\pm s$ , pg/mL)

| 组别     | <i>n</i> | T <sub>0</sub> | T <sub>4</sub>          | T <sub>5</sub>          | T <sub>6</sub>           | <i>F</i> | <i>P</i> |
|--------|----------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|----------|
| ERAS 组 | 40       | 10.2±3.1       | 48.3±12.1 <sup>ad</sup> | 32.6±9.8 <sup>abd</sup> | 18.5±5.4 <sup>abcd</sup> | 35.700   | <0.001   |
| 对照组    | 40       | 11.5±3.6       | 76.9±18.4 <sup>a</sup>  | 54.2±15.3 <sup>ab</sup> | 34.8±10.1 <sup>abc</sup> | 85.400   | <0.001   |

<sup>a</sup>: $P<0.05$ ,与同组 T<sub>0</sub> 时比较;<sup>b</sup>: $P<0.05$ ,与同组 T<sub>4</sub> 时比较;<sup>c</sup>: $P<0.05$ ,与同组 T<sub>5</sub> 时比较;<sup>d</sup>: $P<0.05$ ,与同期对照组比较;组间比较  $F=35.700, P<0.001$ ;时间效应  $F=128.600, P<0.001$ ;交互效应  $F=21.300, P<0.001$ 。

表 4 两组康复指标比较( $\bar{x}\pm s$ )

| 项目                | ERAS 组<br>( <i>n</i> =40) | 对照组<br>( <i>n</i> =40) | <i>t</i> | <i>P</i> |
|-------------------|---------------------------|------------------------|----------|----------|
| 苏醒时间(min)         | 18.5±3.2                  | 25.1±4.5               | 7.820    | <0.001   |
| 24 h 静息 VAS 评分(分) | 2.1±0.6                   | 3.8±0.9                | 9.450    | <0.001   |
| 首次下床时间(h)         | 8.2±2.1                   | 20.5±4.3               | 15.670   | <0.001   |
| 住院时间(d)           | 4.2±1.1                   | 6.5±1.3                | 8.230    | <0.001   |

降低并发症发生率,为智能骨科时代的精准麻醉提供了新范式。

本研究 T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub> 时 ERAS 组心率、MAP 水平低于对照组,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。这一结果与骨科机器人手术对体位稳定性和操作精度的要求密切相关。机器人辅助手术虽能减少组织创伤,但术中需反复调整 C 型臂扫描及机械臂定位,可能延长俯卧位时间并加剧血流动力学波动<sup>[12-13]</sup>。传统麻醉方案依赖经验性液体输注与单一阿片类药物镇痛,难以应对此类应激刺激。本研究中 ERAS 组采用目标导向液体治疗联合右美托咪定持续输注,通过动态调控 SVV 与  $\alpha 2$  受体激动剂的交感抑制效应,有效维持血管张力稳定性。这与凌武胆等<sup>[12]</sup>报道的机器人辅助脊柱手术中精细化液体管理可减少术中低血压事件的观点一致。此外,术前竖脊肌平面阻滞阻断了伤害性刺激向中枢传导,减少了手术切皮及椎弓根置钉时的交感兴奋,可能是 MAP 波动幅度降低的关键机制<sup>[14-15]</sup>。

表 5 两组并发症发生情况比较[*n*(%)]

| 项目   | ERAS 组<br>( <i>n</i> =40) | 对照组<br>( <i>n</i> =40) | $\chi^2$ | <i>P</i> |
|------|---------------------------|------------------------|----------|----------|
| 恶心呕吐 | 6(15.0)                   | 17(42.5)               | 7.290    | 0.007    |
| 肺部感染 | 1(2.5)                    | 4(10.0)                | 1.900    | 0.168    |
| 低血压  | 1(2.5)                    | 6(15.0)                | 3.960    | 0.046    |

本研究结果显示,T<sub>4</sub> 时两组 IL-6 水平最高,T<sub>4</sub>~T<sub>6</sub> 时 ERAS 组 IL-6 水平低于对照组( $P<0.05$ )。既往研究表明,机器人手术虽能减少机械性创伤,但术中反复透视及机械臂振动仍可激活炎症通路[如核因子-kappa B(nuclear factor-kappa B,NF- $\kappa$ B)通路],促进 IL-6 等促炎因子释放<sup>[16]</sup>。本研究中 ERAS 组通过多个阶段的干预有效阻断了炎症级联:(1)术前竖背肌平面阻滞减少了外周伤害感受器敏化<sup>[17]</sup>;(2)术中右美托咪定抑制了小胶质细胞活化<sup>[18]</sup>;(3)术毕帕瑞昔布钠选择性抑制了环氧化酶-2(cyclooxygenase-2, COX-2),形成“外周-中枢-全身”三重抗炎屏障。这一机制与周亚东等<sup>[16]</sup>研究结果一致。此外,亦有研究表明,多模式镇痛可通过激活迷走神经抗炎通路(如胆碱能抗炎通路),通过  $\alpha 7$  烟碱型乙酰胆碱受体( $\alpha 7$ -nicotinic acetylcholine receptor,  $\alpha 7$ nAChR)介导的信

表 6 两组围手术期体液管理指标比较( $\bar{x}\pm s$ )

| 项目                                          | ERAS 组<br>( <i>n</i> =40) | 对照组<br>( <i>n</i> =40) | <i>t</i> | <i>P</i> |
|---------------------------------------------|---------------------------|------------------------|----------|----------|
| 总输血量(mL)                                    | 1 850±220                 | 2 550±310              | 6.450    | <0.001   |
| 晶液体占比(%)                                    | 66.7±3.5                  | 66.7±4.1               | 0.820    | 0.417    |
| 胶体液用量(mL)                                   | 620±95                    | 850±120                | 4.230    | <0.001   |
| 术中尿量(mL·kg <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 0.55±0.08                 | 0.30±0.10              | 4.820    | <0.001   |
| 液体正平衡量(mL)                                  | 320±90                    | 1 120±210              | 5.910    | <0.001   |

3 讨 论

本研究首次将 ERAS 理念系统整合至骨科机器人辅助椎弓根内固定术的麻醉管理中,证实了多模式镇痛、目标导向液体治疗与早期康复干预的协同作用,结果显示,基于 ERAS 的多模式镇痛联合目标导向液体治疗不仅能明显改善围手术期血流动力学稳定性、抑制炎症级联反应,还可加速术后功能恢复并



号级联反应,对 NF- $\kappa$ B 和信号转导因子和转录激活因子 3(signal transducer and activator of transcription 3,STAT3)通路的调控直接抑制巨噬细胞活化与 IL-6 释放<sup>[19-20]</sup>。值得注意的是,IL-6 水平与术中液体正平衡量呈正相关( $P<0.05$ ),提示目标导向液体治疗通过动态血流动力学监测精准优化心脏前负荷与心输出量,有效提升全身氧输送效率<sup>[21]</sup>,进而优化微循环灌注、减少组织缺氧,为细胞提供充足氧气以维持正常有氧代谢。正是通过这一根本性的生理改善,目标导向液体治疗可能间接抑制由缺血再灌注损伤引发的过度炎症反应。其作用机制在于减轻初始缺血损伤(减少损伤相关分子模式脱氧腺苷一磷酸的释放)和优化再灌注质量(减轻活性氧爆发),共同削弱激活中性粒细胞浸润、内皮细胞活化及促炎细胞因子风暴的关键触发信号,进而调控炎症级联反应的强度与范围,最终减轻炎症介导的继发性组织损伤<sup>[22-24]</sup>。

传统麻醉方案受限于苏醒延迟及阿片类药物残留效应,常将下床时间推迟至术后 24 h<sup>[25]</sup>。与对照组比较,ERAS 组苏醒时间、首次下床时间、住院时间更短,24 h 静息 VAS 评分更低( $P<0.05$ )。这一突破性进展得益于麻醉管理与康复干预的深度融合。本研究通过优化麻醉药物配伍(瑞芬太尼联合右美托咪定),利用前者超短半衰期的特性实现快速苏醒,同时后者通过抗焦虑作用增强患者早期活动依从性。此外,竖脊肌平面阻滞提供长达 18~24 h 的区域镇痛<sup>[26]</sup>,为早期功能锻炼奠定基础。这一结果与于凌佳等<sup>[13]</sup>研究观点一致。

本研究显示,ERAS 组并发症发生率低于对照组( $P<0.05$ ),恶心呕吐风险降低了 64.7%。除多模式镇痛减少了阿片类药物用量外,目标导向液体治疗通过 SVV 监测精准匹配胶体液补充与容量缺口,更有利于维持内环境稳态,有效降低组织水肿与胃肠道淤血风险,加快术后胃肠道功能的恢复<sup>[27]</sup>,同时也可以减少肺部并发症的发生<sup>[28]</sup>。此外,早期拔管(术毕即刻)与术后 4 h 饮水干预,通过恢复胃肠蠕动功能进一步预防了误吸及肺部感染。

综上所述,基于 ERAS 的多模式镇痛联合目标导向液体治疗可明显优化骨科机器人辅助椎弓根内固定术患者的围手术期生理稳态,其通过多模式镇痛抑制炎症风暴、目标导向液体治疗维持内环境平衡、早期康复干预打破卧床恶性循环,最终实现“精准麻醉-加速康复-并发症防控”的闭环管理。该方案为智能骨科手术的麻醉优化提供了高级别循证依据,具有明显的临床推广价值。本研究也存在以下局限:(1)单中心设计可能存在选择偏倚;(2)未评估长期预后;(3)IL-6 仅作为炎症标志物,未结合肿瘤坏死因子- $\alpha$ 、C 反应蛋白等指标多维度评价。后期将开展多中心研究验证结论,并探索 ERAS 与术中神经监测、人工智能液体管理系统的整合应用效果。

## 参考文献

- [1] WAINWRIGHT T W, GILL M, MCDONALD D A, et al. Consensus statement for perioperative care in total hip replacement and total knee replacement surgery: enhanced recovery after surgery (ERAS<sup>®</sup>) society recommendations [J]. *Acta Orthop*, 2020, 91(1): 3-19.
- [2] SILVETTI S, PATERNOSTER G, ABELARDO D, et al. Recommendations for fast-track extubation in adult cardiac surgery patients: a consensus statement [J]. *Minerva Anestesiol*, 2024, 90(11): 957-968.
- [3] ANTONACCI C L, ZENG F, BLOCK A, et al. Robotic-assisted spine surgery: a narrative review [J]. *J Spine Surg*, 2024, 10(2): 305-312.
- [4] TOVAR M A, DOWLATI E, ZHAO D Y, et al. Robot-assisted and augmented reality-assisted spinal instrumentation: a systematic review and meta-analysis of screw accuracy and outcomes over the last decade [J]. *J Neurosurg Spine*, 2022, 37(2): 299-314.
- [5] HU X, LIEBERMAN I H. What is the learning curve for robotic-assisted pedicle screw placement in spine surgery [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(6): 1839-1844.
- [6] MENDER R P, SAVARDEKAR A R, FAROKHI F, et al. A cost-effectiveness analysis of the integration of robotic spine technology in spine surgery [J]. *Neurospine*, 2018, 15(3): 216-224.
- [7] LI J, ZHANG L, GAO Y, et al. Enhanced recovery after surgery (ERAS) pathways in minimally invasive spine surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 123.
- [8] CHEN R, LI X, LIU Y. Combined dexmedetomidine and lidocaine infusion reduces postoperative IL-6 levels in robotic spinal fusion patients: a randomized controlled trial [J]. *Pain Med*, 2023, 24(8): 1123-1131.
- [9] 沈科, 赵登, 尹立. 机器人辅助手术对胸腰段骨折患者置钉准确性、创伤程度及预后的影响 [J]. *机器人外科学杂志*, 2024, 5(5): 765-770.
- [10] 戴京晶, 汪鑫. 中西医关于术后恶心呕吐的研究进展 [J]. *医学理论与实践*, 2025, 38(2): 225-228.
- [11] LICINA A, SILVERS A, LAUGHLIN H, et al. Proposed pathway for patients undergoing en-

hanced recovery after spinal surgery:protocol for a systematic review[J]. Syst Rev,2020,9(1):39.

[12] 凌武胆,潘艳芳,陈云超. 骨科机器人辅助下行微创胸腰椎内固定术的效果和术中护理配合[J]. 广西医学,2021,43(12):1509-1512.

[13] 于凌佳,孟海,杨雍,等. 国产“天玑”骨科机器人辅助微创椎弓根钉置入的新技术报道[J]. 临床和实验医学杂志,2024,19(14):1514-1518.

[14] WITTAYAPAIROJ A,WITTAYAPAIROJ K,VECHVITVARAKUL M. Effect of bilateral ultrasound-guided erector spinae plane block on postoperative pain after open lumbar spinal surgery: a double-blind, randomized controlled trial[J]. Eur Spine J,2023,32(2):420-427.

[15] YUCE Y,KARAKUS S A,SIMSEK T,et al. Comparative efficacy of ultrasound-guided erector spinae plane block versus wound infiltration for postoperative analgesia in instrumented lumbar spinal surgeries[J]. BMC Anesthesiol,2024,24(1):374.

[16] 周亚东,李欢,白静,等. 骨科机器人辅助微创减压治疗脊柱转移瘤的临床分析[J]. 颈腰痛杂志,2024,45(1):149-153.

[17] 蔡雨佳,曲音音. 区域阻滞麻醉在剖宫产术后镇痛中的研究进展[J]. 中国微创外科志,2022,22(7):585-589.

[18] HE G,HE Y,NI H,et al. Dexmedetomidine attenuates neuroinflammation and microglia activation in LPS-stimulated BV2 microglia cells through targeting circ-Shank3/miR-140-3p/TLR4 axis[J]. Eur J Histochem,2023,67(3):3766.

[19] ZHAO J,ZHANG R,WANG W,et al. Low-dose ketamine inhibits neuronal apoptosis and neuroinflammation in PC12 cells via  $\alpha 7$ nAChR mediated TLR4/MAPK/NF- $\kappa$ B signaling pathway [J]. Int Immunopharmacol,2023,117:109880.

[20] LI Y,DING S,WANG Y. Targeting the cholinergic anti-inflammatory pathway: an innovative strategy for treating diseases[J]. Mol Biol Rep,2025,52(1):199.

[21] KAN C F K,SKAGGS J D. Current commonly used dynamic parameters and monitoring systems for perioperative goal-directed fluid therapy: a review[J]. Yale J Biol Med,2023,96(1):107-123.

[22] LIAO X,SONG X,LI J,et al. An injectable co-assembled hydrogel blocks reactive oxygen species and inflammation cycle resisting myocardial ischemia-reperfusion injury [J]. Acta Biomater,2022,149:82-95.

[23] KUMPHUNE S,SEENAK P,PAIYABHROM N,et al. Cardiac endothelial ischemia/reperfusion injury-derived protein damage-associated molecular patterns disrupt the integrity of the endothelial barrier[J]. Heliyon,2024,10(2):e24600.

[24] NWADURU C,OVALLE L A,HOAREAU G L,et al. Ectonucleotidases in ischemia reperfusion injury: unravelling the interplay with mitochondrial dysfunction in liver transplantation [J]. Transplant Proc,2024,56(7):1598-1606.

[25] LI H,ZHANG H,CHENG Z,et al. Effects of alfentanil hydrochloride on cough and hemodynamics during induction of general anesthesia in daytime surgery[J]. Minerva Surg,2023,78(6):730-732.

[26] ZHANG Q,WU Y,REN F,et al. Bilateral ultrasound-guided erector spinae plane block in patients undergoing lumbar spinal fusion: a randomized controlled trial[J]. J Clin Anesth,2021,68:110090.

[27] SUN Y,LIANG X,CHAI F,et al. Goal-directed fluid therapy using stroke volume variation on length of stay and postoperative gastrointestinal function after major abdominal surgery-a randomized controlled trial[J]. BMC Anesthesiol,2023,23(1):397.

[28] FENG A,LU P,YANG Y,et al. Effect of goal-directed fluid therapy based on plasma colloid osmotic pressure on the postoperative pulmonary complications of older patients undergoing major abdominal surgery[J]. World J Surg Oncol,2023,21(1):67.