·论著·

达芬奇机器人辅助腹腔镜儿童肾盂成形术的学习曲线

杨嘉飞，谷化剑，杜君，陈有望，聂梅兰，何坤凤
（贵州医科大学附属医院小儿外科，贵阳 550001）

摘要 目的 评估达芬奇机器人辅助腹腔镜肾盂成形术（RALP）治疗儿童肾盂输尿管连接处梗阻（UPJO）的疗效与学习曲线。**方法** 回顾性选取2021年3月至2024年6月间由同一术者连续完成RALP治疗的78例UPJO患儿，采用累积和（CUSUM）绘制手术操作学习曲线，并按峰值分为学习提高阶段（1~29例）与熟练掌握阶段（30~78例），比较两阶段围手术期指标。**结果** 全部手术顺利完成；布孔时间14.0（12.0~16.0）min，手术时间118.0（105.5~165.0）min，出血量10.0（5.0~20.0）mL；并发症Clavien-Dindo Ⅰ级3例，Ⅱ级3例，Ⅲ级2例。CUSUM显示，布孔拐点为第13例，手术操作拐点为第29例。与学习提高阶段相比，熟练掌握阶段手术时间、出血量、引流管留置时间、术后住院时间及住院费用均显著降低（$P < 0.05$）。**结论** RALP治疗儿童UPJO安全有效，术者约完成29例后可达到稳定熟练水平。

关键词 学习曲线；机器人手术；肾盂输尿管连接处梗阻；肾盂成形术
中图分类号 R726.9 **文献标志码** A **文章编号** 0258-4646（2026）05-0449-05
网络出版地址 https://link.cnki.net/urlid/21.1227.R.20260515.1540.034
DOI：10.12007/j.issn.0258-4646.2026.05.012

Learning curve of Da Vinci robot-assisted laparoscopic pyeloplasty in children

YANG Jiafei，GU Huajian，DU Jun，CHEN Youwang，NIE Meilan，HE Kunfeng
（Department of Pediatric Surgery，The Affiliated Hospital of Guizhou Medical University，Guiyang 550001，China）

Abstract Objective To evaluate the surgical outcomes of the Da Vinci robot-assisted laparoscopic pyeloplasty（RALP）for pediatric ureteropelvic junction obstruction（UPJO）and to characterize its learning curve. **Methods** The clinical data of 78 consecutive children who underwent RALP performed by a single surgeon at the Department of Pediatric Surgery，The Affiliated Hospital of Guizhou Medical University，between March 2021 and June 2024，were retrospectively reviewed. Cumulative sum（CUSUM）analysis was used to construct the learning curves. According to the peak of the fitted CUSUM curve，the cases were divided into the learning phase（cases 1 to 29）and proficiency phase（cases 30 to 78）. Perioperative variables were compared between the phases. **Results** All the procedures were successfully completed. The median trocar placement time was 14.0（12.0–16.0）min，operative time was 118.0（105.5–165.0）min，and estimated blood loss was 10.0（5.0–20.0）mL. Postoperative complications assessed using the Clavien-Dindo classification were grade Ⅰ in three cases，grade Ⅱ in three cases，and grade Ⅲ in two cases. CUSUM analysis identified the turning point in case 13 for trocar placement and in case 29 for overall operative performance. Compared with the learning phase，the proficiency phase showed significantly reduced operative time，blood loss，duration of drainage，postoperative hospital stay，and hospitalization cost（all $P < 0.05$）. **Conclusion** The da Vinci RALP is safe and effective for pediatric UPJO. Approximately 29 patients are required for a surgeon to achieve stable proficiency using this procedure.

Keywords learning curve；robotic surgery；ureteropelvic junction obstruction；pyeloplasty

肾盂输尿管连接处梗阻（ureteropelvic junction obstruction，UPJO）是儿童肾积水最常见的病因之一。部分患儿可在产前超声中发现肾积水，但多数患儿因腹痛、腰背痛、呕吐等症状就诊时或体检偶然发现后确诊[1]。传统治疗以开放肾盂输尿管成形术（open pyeloplasty，OP）为主，Anderson-Hynes术式成功率可达90%~100%[1-2]。近年来，随着微创外科的发展，UPJO治疗逐步从OP向微创手术转变，经历了腹腔镜肾盂成形术（laparoscopic pyeloplasty，LP）到机器人辅助腹腔镜肾盂成形术（robot-assisted laparoscopic pyeloplasty，RALP）的演进[3-5]。作为新兴技术，RALP学习曲线评估对保障手术安全和效率、推

基金项目：贵州省卫生健康委科学技术基金（gzwkj2024-036）；贵州省科技厅基础研究项目（黔科合基础-zk［2025］面上471）；贵州医科大学“早接触临床”专项训练项目（PX-6724423）；贵州医科大学附属医院教改项目（JXYJY-2025-043，JXYJZ-2025-013）
作者简介：杨嘉飞（1992-），男，主治医师，博士.
通信作者：谷化剑，E-mail：huajiangu6@163.com
收稿日期：2025-05-06
网络出版时间：2026-05-18 16:11:04

动技术规范化推广及优化培训模式具有重要意义，但国内儿童RALP学习曲线相关研究仍较少。本研究通过回顾性分析单一术者实施的78例RALP手术，绘制其学习曲线并进行模型拟合，同时比较不同学习阶段患儿的临床参数和手术效果，旨在为儿科泌尿外科医生掌握该术式提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　一般资料

回顾性选取2021年3月至2024年6月间在贵州医科大学附属医院由同一术者连续完成RALP治疗的78例UPJO患儿作为研究对象。纳入标准：经泌尿系统超声及磁共振水成像检查确诊为中度或重度肾积水，且伴有肾皮质变薄；保守治疗无效，明确需手术干预；无腹腔手术史。排除标准：继发性肾积水；合并孤立肾、异位肾、重复肾、马蹄肾等复杂解剖结构异常；合并需优先处理的其他重大先天性畸形（如心血管或呼吸系统疾病）；凝血功能障碍；病历资料不全或失访。所有手术由具备丰富腹腔镜手术经验的同一位术者及固定手术团队完成，以保证操作标准的一致性。本研究获得贵州医科大学附属医院伦理委员会批准[2022伦审第（521）号]。本研究为回顾性分析，数据来源于既往病历资料，已对患者信息进行匿名化处理；伦理委员会同意豁免患儿监护人知情同意。

1.2　手术方法

患儿麻醉后取健侧卧位，常规消毒铺巾。于脐部建立12 mm气腹孔（压力8~12 mmHg），在上、下腹部辅助置入2个8 mm操作孔。经肠系膜路径暴露肾下极，游离并明确输尿管狭窄段。肾盂减压后行悬吊牵引，横断输尿管狭窄段并将其外侧壁纵行切开1.5 cm，同时于肾盂最低点行“V”形切开。将输尿管与肾盂最低点对位，行连续缝合；置入双J管后，缝合后壁并修剪多余肾盂组织，行间断缝合修整。术毕留置肾周引流管及导尿管，分层关闭切口。

1.3　评价指标

（1）布孔时间：自皮肤穿刺开始至所有手术孔完成并连接机器人机械臂的时间。（2）手术时间：机械臂连接后开始操作至手术结束并关闭腹腔的总耗时。（3）术中出血量：按吸引器吸出量结合纱布估算法计算，每片浸湿小纱布按5 mL计。（4）术后并发症：按Clavien-Dindo分级评估，主要并发症定义为需手术/内镜/影像学干预者（Clavien-Dindo分级>Ⅲ级）。（5）引流管留置时间、术后住院时间及住院费用：用于综合评估疗效与恢复情况。

1.4　学习曲线分析

学习曲线用累积和（cumulative sum，CUSUM）分析法进行分析。将按时间顺序排列的每例患者的手术时间与整组患者的平均手术时间的差值进行累积求和，得到CUSUM值。计算公式：$CUSUM_n=\sum_{i=1}^{n}(X_i-\mu)$，$X_i$为每例患者的实际手术时间，$\mu$为这组患者的平均手术时间。以例数为横坐标，以CUSUM值为纵坐标，做图得到学习曲线。

1.5　统计学分析

采用SPSS 23.0软件进行统计分析。首先对连续型变量进行正态性检验，使用Shapiro-Wilk检验判断其是否服从正态分布。正态分布的数据以$\bar{x}\pm s$表示，非正态分布的数据以$M(P_{25}\sim P_{75})$表示。正态分布数据2组间比较采用独立样本t检验，多组间比较采用单因素方差分析。非正态分布数据组间比较采用Mann-Whitney U检验或Kruskal-Wallis H检验。分类变量比较使用χ^2检验或Fisher精确法。所有检验均为双侧检验，$P<0.05$为差异有统计学意义。

本研究为回顾性学习曲线研究，未进行事先样本量估算。研究期间符合纳入与排除标准的连续病例均纳入分析（$n=78$），用于CUSUM学习曲线构建及分阶段比较。对于发生率较低的并发症等结局指标，本研究统计效能可能不足，需在更大样本量或多中心研究中进一步验证。

2　结果

2.1　临床资料分析

本研究共纳入78例患儿，其中男60例（76.92%），女18例（23.08%）；平均年龄（4.14±4.22）岁，最小22 d，最大13岁；平均体重（16.25±11.32）kg；左侧UPJO 48例（61.54%），右侧UPJO 30例（38.46%）。手术均顺利完成，布孔时间14.0（12.0~16.0）min，手术时间118.0（105.5~165.0）min，术中出血量10.0（5.0~20.0）mL，术后平均住院时间8.0（5.0~12.0）d。术后并发症方面，尿液渗漏3例，感染3例，术后再次狭窄2例。见表1。

表1　一般资料

Tab.1　General characteristics

Clinical variable	Data
Sex [*n* (%)]	
Male	60 (76.92)
Female	18 (23.08)
Age [*n* (%)]	
≤ 1 year	30 (38.46)
>1 to 3 years	11 (14.10)
>3 to 7 years	15 (19.23)
>7 to 14 years	22 (28.21)
Average age (year)	4.14 ± 4.22
Average body weight (kg)	16.25 ± 11.32
Affected side	
Left	48 (61.54)
Right	30 (38.46)
Etiology [*n* (%)]	
Stenosis	65 (83.33)
Vascular compression	7 (8.97)
Polyp	6 (7.69)
Port placement time (min)	14.0 (12.0–16.0)
Operation time (min)	118.0 (105.5–165.0)
Estimated blood loss (mL)	10.0 (5.0–20.0)
Postoperative hospital stay (d)	8.0 (5.0–12.0)
Complications (Clavien-Dindo classification)	8
Grade Ⅰ	3
Grade Ⅱ	3
Grade Ⅲ	2

2.2　CUSUM分析评估手术布孔学习曲线

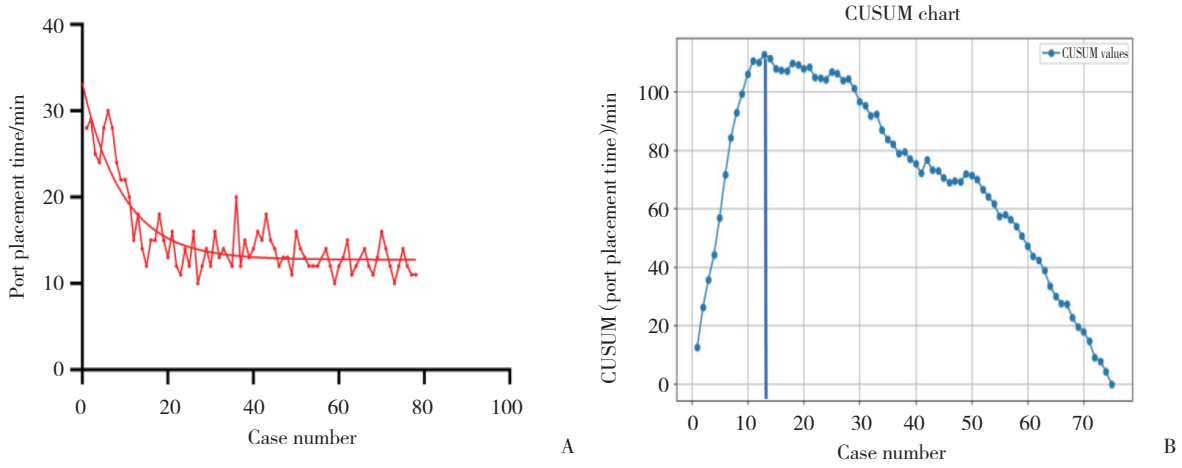
如图1所示，布孔时间的CUSUM曲线在第13例手术时达到峰值（累计偏差值最大），提示术者在此之前处于学习积累阶段，此后布孔表现趋于稳定，学习曲线进入平台期。因此，本研究以第13例作为手术布孔初步探索阶段与熟练掌握阶段的分界点。第1~13例为初步探索阶段，第14~78例为熟练掌握阶段，布孔时间分别为24.00（22.00~28.00）min和13.00（12.00~14.75）min，二者比较差异有统计学意义（$P<0.05$）。

2.3　CUSUM分析评估手术操作学习曲线

如图2所示，手术时间CUSUM曲线在第29例达峰值（累计偏差最大），提示术者约完成29例后手术操作由学习提高阶段（阶段Ⅰ）进入熟练掌握阶段（阶段Ⅱ）。2个阶段患儿年龄、性别、身高、体重及并发症发生率比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$），但手术时间、出血量、引流管留置时间、术后住院时间及住院费用比较差异有统计学意义（$P<0.05$），见表2。

3　讨论

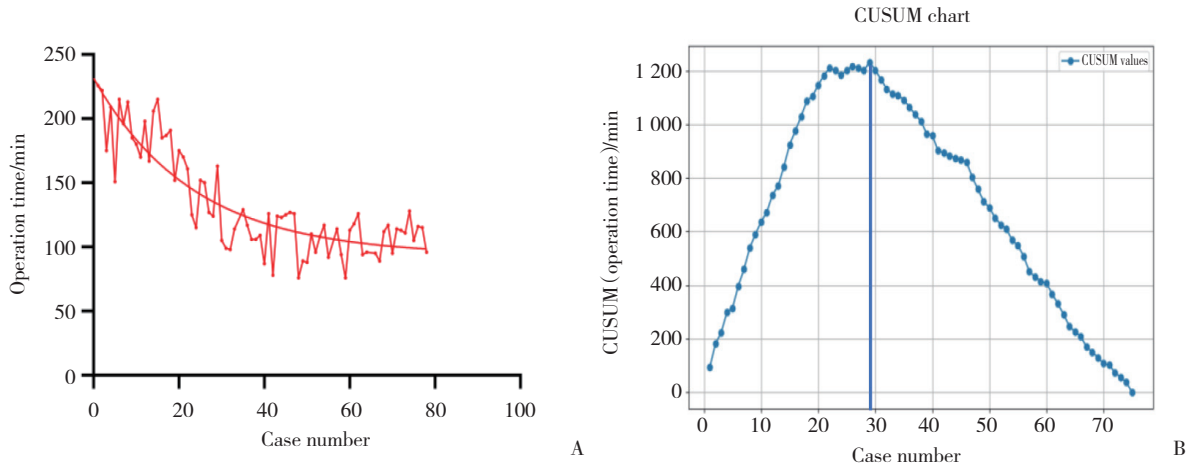
近年来儿童UPJO微创治疗快速发展，机器人辅助手术应用日益广泛[3-4]。达芬奇系统凭借三维视野、操作稳定及器械灵活等优势，逐渐成为重要的微创手段之一[6-7]。但机器人技术推广的关键在于术者从传统手术向机器人操作的平稳过渡。通过学习曲线评估可量化达到操作稳定所需的病例数，客观反映熟练度，为培训与考核提供依据，并有助于学习早期实施规范化监管，降低风险，保障手术安全与疗效。



A，port placement time versus case number；B，the CUSUM of port placement time. The curve peaks at case 13，indicating stabilization after 13 cases.

图1　达芬奇RALP的布孔时间学习曲线

Fig.1　Learning curve of port placement time for Da Vinci robot-assisted laparoscopic pyeloplasty



A, operation time versus case number; B, the CUSUM of operation time. The curve peaks at case 29, indicating stabilization after 29 cases.

图2　达芬奇RALP的手术时间学习曲线

Fig.2　Learning curve of operation time for Da Vinci robot-assisted laparoscopic pyeloplasty

表2　手术操作阶段Ⅰ与阶段Ⅱ一般资料比较

Tab.2　Comparison of general data between phase Ⅰ and phase Ⅱ of operative performance

Item	Phase Ⅰ (n = 29)	Phase Ⅱ (n = 49)	P
Sex (male/female)	22/7	38/11	0.8641
Age (year)	4.57 ± 4.27	4.34 ± 3.69	0.810 3
Height (cm)	98.21 ± 33.53	93.84 ± 35.03	0.596 8
Body weight (kg)	16.00 ± 10.35	16.40 ± 11.96	0.883 7
Operation time (min)	176.50 ± 31.43	107.98 ± 16.65	<0.000 1
Estimated blood loss (mL)	10.0 (5.0–20.0)	5.0 (5.0–10.0)	0.018 4
Complications [n (%)]	4 (13.8)	4 (8.2)	0.122 7
Drainage duration (d)	3.23 ± 0.57	2.17 ± 0.43	0.002 1
Postoperative hospital stay (d)	8.0 (6.0–14.0)	7.0 (5.0–10.0)	0.007 9
Hospitalization cost (CNY)	58 375.57 ± 5 413.15	54 708.70 ± 5 918.17	0.009 2

本研究中，达芬奇RALP布孔时间与手术操作时间的CUSUM曲线均呈“先升后降”趋势，符合新技术学习规律。其中，布孔学习曲线以第13例作为分界点分为初步探索阶段与熟练掌握阶段。ASHRAF等[8]报道其布孔曲线在30例达峰。本研究拐点更早，主要缘于本研究病种单一（均为UPJO），而文献纳入病例复杂性更高。尽管拐点存在差异，但两研究均证实布孔操作经一定病例积累后即可快速稳定。根据手术操作时间CUSUM 曲线，将学习过程分为学习提高阶段（第1~29例）与熟练掌握阶段（第30~78例）。2组基线特征差异无统计学意义（P > 0.05），表明围手术期指标差异主要反映了术者熟练度的提升。进入熟练掌握阶段后，手术时间从（176.50 ± 31.43）min 显著缩短至（107.98 ± 16.65）min（P < 0.05），与ESPOSITO等[1]及SUN 等[9]的报道相符。安全性方面，术中出血量随熟练程度提升呈下降趋势（熟练掌握阶段均值10 mL），虽略高于部分研究[7,10]报道，但考虑到微量出血多依赖术中目测，记录口径差异是影响可比性的主要原因。术后恢复方面，引流管留置时间由学习期3.2 d缩短至熟练期2.1 d，与之前的研究[1,11]（1.8~3.08 d）高度一致。在经济指标上，熟练掌握阶段较学习提高阶段医疗总平均费用降低约4 000元，处于行业预期区间[1,12]。综上所述，RALP学习曲线进入平台期后，在保障安全与疗效的同时，能显著提升临床效率并降低患者的经济负担。

关于RALP 学习曲线的量化标准，既往研究结论存在显著异质性。早期的开创性研究[13]认为，术者完成15~20例手术后即可实现手术效率与开放手术对等。然而，后续基于CUSUM 分析的研究[14-15]揭

示了更为复杂的学习进程，随着评估指标（如控制台时间和总时间）的不同，熟练拐点多出现在40~60例之间。近期的1项系统综合评价则指出，RALP操作的初步胜任通常在18例左右达成，而达到全面胜任则往往需要约31例[16]。本研究中，手术操作时间的CUSUM拐点出现在第29例，处于上述研究报道的区间中段，证实了本研究学习曲线的合理性。文献间数据的显著差异主要归因于多重因素：首先，不同研究对操作时间的定义不一，导致CUSUM拐点发生前移或后移，缺乏统一标准限制了中心间的横向比较；其次，术者既往的腹腔镜缝合基础、机器人培训经历及固定团队的磨合程度，直接决定了“试错期”的长短；此外，各中心在患儿年龄、体重及解剖复杂程度（难度谱）上的差异，亦是影响曲线斜率的关键变量。综上，RALP学习曲线不存在统一的“标准例数”，临床评估应结合病例构成与手术安全性指标进行动态综合考量。

本研究存在一定局限性：单中心回顾性设计限制了样本规模与结论的普适性；学习曲线受术者及手术团队经验影响，存在个体异质性；仅凭时间指标难以全面反映吻合质量与远期安全性。未来需开展多中心前瞻性研究，引入多维结局指标，以进一步深化验证。

综上所述，RALP在治疗儿童UPJO方面具有良好的安全性与有效性，尤其在精细操作与术后康复方面优势明显。本研究通过绘制布孔操作与手术操作学习曲线发现，术者在完成约13例布孔及29例完整手术后，技术趋于成熟，并进入熟练阶段。本研究结果为小儿外科医生开展RALP提供了量化参考，有助于指导临床培训与技术的标准化推广。

参考文献：

[1] ESPOSITO C，MASIERI L，CASTAGNETTI M，et al. Robot-assisted vs laparoscopic pyeloplasty in children with uretero-pelvic junction obstruction（UPJO）：technical considerations and results [J]. J Pediatr Urol，2019，15（6）：667.e1-667.e8. DOI：10.1016/j.jpurol.2019.09.018.

[2] WU YY，CAO HL，LI P，et al. Robot-assisted pedicled colonic flap pyeloplasty for the treatment of complicated ureteropelvic junction obstruction：technique and outcomes from a single center [J]. Surg Endosc，2025，39（9）：5801-5810. DOI：10.1007/s00464-025-11968-y.

[3] 申宵茹，杜浩文，管哲明，等. 机器人辅助腹腔镜治疗肾盂输尿管连接部梗阻的临床应用及研究进展 [J]. 中华小儿外科杂志，2022，43（1）：87-92. DOI：10.3760/cma.j.cn421158-20200706-00469.

[4] 李泸平，张俊杰，张胜利，等. 机器人辅助腹腔镜与传统腹腔镜在儿童肾盂成形术的应用价值 [J]. 中华小儿外科杂志，2022，43（1）：14-19. DOI：10.3760/cma.j.cn421158-20210227-00093.

[5] SZAVAY P. Laparoscopic pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction [J]. J Laparoendosc Adv Surg Tech，2021，31（10）：1214-1218. DOI：10.1089/lap.2021.0452.

[6] 黎鑫，艾克拜尔·艾力，阿力木江·麦斯依提，等. 机器人辅助和腹腔镜袖状胃切除术联合胆囊切除术治疗肥胖合并胆囊结石患者的减重效果和安全性 [J]. 中国医科大学学报，2023，52（3）：219-223，229. DOI：10.12007/j.issn.0258-4646.2023.03.005.

[7] 刘慧，范晓晓，李德儒，等. 机器人辅助腹腔镜与传统腹腔镜下肾盂成形术在治疗儿童肾盂输尿管连接部梗阻中的对比分析 [J]. 机器人外科学杂志（中英文），2023，4（5）：477-484. DOI：10.12180/j.issn.2096-7721.2023.05.012.

[8] ASHRAF J，KRISHNAN J，TURNER A，et al. Robot docking time：cumulative summation analysis of a procedure-independent learning curve in pediatric urology [J]. J Laparoendosc Adv Surg Tech，2018，28（9）：1139-1141. DOI：10.1089/lap.2017.0418.

[9] SUN L，ZHAO DY，SHEN YD，et al. Laparoscopic versus robot-assisted pyeloplasty in infants and young children [J]. Asian J Surg，2023，46（2）：868-873. DOI：10.1016/j.asjsur.2022.09.046.

[10] HU ZL，CHEN S，WANG ZH，et al. The application of artificial technology in pediatric pyeloplasty the efficacy analysis of robotic-assisted laparoscopic pyeloplasty in the treatment of ureteropelvic junction obstruction [J]. Front Pediatr，2023，11：1209359. DOI：10.3389/fped.2023.1209359.

[11] SARHAN O，AL AWWAD A，AL OTAY A，et al. Comparison between internal double J and external pyeloureteral stents in open pediatric pyeloplasty：a multicenter study [J]. J Pediatr Urol，2021，17（4）：511.e1-511.e7. DOI：10.1016/j.jpurol.2021.03.027.

[12] SHU BS，ZHANG SF，GAO J，et al. Da Vinci robotic assisted pyeloplasty versus laparoscopic pyeloplasty in newborns under 3 months [J]. Sci Rep，2025，15：28435. DOI：10.1038/s41598-025-14603-x.

[13] SORENSEN MD，DELOSTRINOS C，JOHNSON MH，et al. Comparison of the learning curve and outcomes of robotic assisted pediatric pyeloplasty [J]. J Urol，2011，185（6 Suppl）：2517-2522. DOI：10.1016/j.juro.2011.01.021.

[14] CUNDY TP，GATTAS NE，WHITE AD，et al. Learning curve evaluation using cumulative summation analysis：a clinical example of pediatric robot-assisted laparoscopic pyeloplasty [J]. J Pediatr Surg，2015，50（8）：1368-1373. DOI：10.1016/j.jpedsurg.2014.12.025.

[15] ZHOU LJ，HUANG J，XIE H，et al. The learning curve of robot-assisted laparoscopic pyeloplasty in children [J]. J Rob Surg，2024，18（1）：97. DOI：10.1007/s11701-024-01856-3.

[16] PAKKASJÄRVI N，KRISHNAN N，RIPATTI L，et al. Learning curves in pediatric robot-assisted pyeloplasty：a systematic review [J]. J Clin Med，2022，11（23）：6935. DOI：10.3390/jcm11236935.

（编辑　王又冬）