DOI: 10.12235/E20260031
文章编号：1007-1989（2026）08-0017-09

论 著

不同气腹压对结直肠癌根治术患者内皮细胞形态的影响*

苏雅雅[1]，黄哲[1]，仇晓娟[2]，倪爽[1]，潘昕[1]，丰陈[1]
（1.南京市中心医院 麻醉科，江苏 南京 210018；2. 南京市溧水区人民医院 麻醉科，江苏 南京 211200）

摘要：目的 探讨低气腹压（LPP）（10 mmHg）与标准气腹压（SPP）（14 mmHg）对腹腔镜结直肠癌（CRC）根治术患者腹腔大网膜毛细血管内皮细胞形态结构、炎症因子、氧化应激反应及围手术期生理功能的影响。**方法** 采用前瞻性随机对照试验，纳入2022年1月—2023年8月于该院择期行腹腔镜CRC根治术的患者63例，采用随机数表法分为LPP组（$n = 31$）和SPP组（$n = 32$）。分别于气腹建立即刻和关腹前5 min取带毛细血管的大网膜标本，透射电镜下观察大网膜毛细血管内皮细胞血管壁厚度、细胞膜不连续发生率及自噬溶酶体的数量；同时监测炎症因子和氧化应激指标，记录血流动力学指标和呼吸力学参数，以及术后48 h镇痛药物追加次数。**结果** 与LPP组相比，SPP组关腹前5 min毛细血管内皮细胞厚度增加，细胞膜不连续发生率较高，自噬溶酶体数量增多；关腹前5 min和术后24 h的白细胞介素-6（IL-6）水平较高，关腹前5 min的丙二醛（MDA）较高，超氧化物歧化酶（SOD）较低；术后24 h的还原型谷胱甘肽（GSH）较低；气腹建立后各时点的平均气道压（Pmean）增高，术后48 h补救镇痛次数更多，差异均有统计学意义（$P < 0.05$）。**结论** 在腹腔镜CRC根治术中，LPP较SPP有助于减轻大网膜毛细血管内皮细胞损伤，减轻炎症反应和氧化应激反应，改善术中呼吸力学，减少术后早期镇痛需求，具有一定的临床应用价值。

关键词： 结直肠癌（CRC）；气腹压；微循环；炎症因子；内皮细胞
中图分类号： R735；R656

Effects of varying pneumoperitoneum pressures on endothelial cell morphology in patients undergoing radical resection of colorectal carcinoma*

Su Yaya[1], Huang Zhe[1], Qiu Xiaojuan[2], Ni Shuang[1], Pan Xin[1], Feng Chen[1]
(1.Department of Anesthesiology, Nanjing Central Hospital, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 2. Department of Anesthesiology, Nanjing Lishui People's Hospital, Nanjing, Jiangsu 211200, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of low-pressure pneumoperitoneum (LPP) (10 mmHg) versus standard-pressure pneumoperitoneum (SPP) (14 mmHg) on the microscopic structure of greater omentum capillaries, inflammatory factors, oxidative stress, and perioperative physiological function in patients undergoing laparoscopic radical resection of colorectal carcinoma (CRC). **Methods** A prospective randomized study was conducted. A total of 63 patients scheduled for laparoscopic radical resection of CRC from January 2022 to August 2023 were enrolled

收稿日期：2026-01-18
* 基金项目：南京市卫生科技发展专项基金项目（YKK20180）
[通信作者] 丰陈，E-mail：85604704@qq.com；Tel：13770754473
[作者简介] 丰陈曾于南京市溧水区人民医院工作

and randomly divided into the LPP group ($n = 31$) and the SPP group ($n = 32$) using a random number table. Specimens were collected from a standardized area of the greater omentum immediately after pneumoperitoneum establishment and five minutes before abdominal closure. Transmission electron microscopy was used to observe the thickness of capillary endothelial cell walls, the incidence of discontinuous cell membranes, and the number of autophagolysosomes. Inflammatory factors and oxidative stress indicators were monitored, while hemodynamic and respiratory mechanics parameters were recorded. The number of additional analgesic administrations within 48 hours postoperatively was also assessed. **Results** Compared with the LPP group, the SPP group showed increased capillary endothelial cell wall thickness 5 minutes before abdominal closure, a higher incidence of discontinuous cell membranes, and a greater number of autophagolysosomes; The SPP group also exhibited higher IL-6 levels 5 minutes before abdominal closure and 24 hours postoperatively; Higher malondialdehyde (MDA) and lower superoxide dismutase (SOD) levels 5 minutes before abdominal closure, and lower reduced glutathione (GSH) levels at 24 hours postoperatively; At all time points after pneumoperitoneum establishment, the mean airway pressure (Pmean) was significantly higher in the SPP group; Additionally, the number of rescue analgesic administrations 48 hours postoperatively was significantly more in the SPP group, the differences were statistically significant ($P < 0.05$). **Conclusion** In laparoscopic radical resection of CRC, LPP may help alleviate ultrastructural damage to greater omentum capillary endothelial cells, reduce inflammation and oxidative stress, improve intraoperative respiratory mechanics, and decrease early postoperative analgesic requirements compared with SPP. It has certain clinical application value.

Keywords: colorectal carcinoma (CRC); pneumoperitoneum pressure; microcirculation; inflammatory factors; endothelial cells

结直肠癌（colorectal carcinoma，CRC）作为消化系统常见的恶性肿瘤之一，全球发病率呈明显上升趋势[1]。相较于传统开腹术式，腹腔镜CRC根治术具有创伤小、手术视野清晰及术后恢复快等优势，已成为外科治疗的主流术式[2]。该术式依赖人工气腹以提供操作空间，临床工作中为保障术中充分暴露，常规采用12～16 mmHg的气腹压[3]。人工气腹可导致腹内压增高，增加了麻醉管理的难度与风险，主要表现为：潮气量减少、静脉回流受阻及心输出量波动[4]；同时，二氧化碳吸收会导致高碳酸血症，术中须严密监测动脉血气及呼气末二氧化碳分压（partial pressure of end-tidal carbon dioxide，$PetCO_2$），并精准调控通气参数，以维持酸碱平衡。此外，多项研究[5-9]证实，较高的气腹压会对心、肝、肾、肺、胃肠道及脑等多个器官功能产生不利影响，直接关系到患者围手术期安全和远期预后。目前，对于气腹压影响微循环血流灌注变化的分子机制，尤其是对毛细血管内皮细胞形态结构影响的具体效应，尚缺乏系统阐释。基于此，本研究在透射电镜下，观察腹腔大网膜毛细血管内皮细胞的形态学特征变化，系统评估低气腹压（lower-pressure pneumoperitoneum，LPP）（10 mmHg）与标准气腹压（standard-pressure pneumoperitoneum，SPP）（14 mmHg）对腹腔镜CRC根治术患者腹腔大网膜毛细血管内皮细胞形态结构、炎症因子、氧化应激反应及围手术期生理功能的影响，以期为临床优化腹腔镜CRC根治术的麻醉与气腹策略，提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究是一项前瞻性、随机、双盲和对照试验。选择2022年1月—2023年8月于南京市溧水区人民医院择期行腹腔镜CRC根治术的患者63例，采用随机数表法分为LPP组（31例）与SPP组（32例）。两组患者年龄、体重指数（body mass index，BMI）、性别、美国麻醉医师协会（American Society of Anesthesiologists，ASA）分级和肿瘤部位等一般资料比较，差异均无统计学意义（$P > 0.05$），具有可比性。见表1。本研究经医院伦理委员会审查通过，伦理批件号：2020SQ16，并在国家医学研究登记备案信息系统备案。本研究已在中国临床试验注册中心完成注册（注册号：ChiCTR2500102467）。。

纳入标准：ASA分级为Ⅰ级或Ⅱ级；BMI为18～30 kg/m^2；年龄40～75岁；对本研究知情，且签署知情同意书。排除标准：有神经肌肉疾病史；有严重肝、肾功能异常；有严重心、肺疾病；有认知障碍、语言沟通障碍或精神类疾病，无法配合研究；既往有腹部手术史。剔除标准：术中血流动力学不稳定（进

表 1　两组患者一般资料比较

Table 1　Comparison of general data between the two groups

组别	年龄/岁	BMI/(kg/m^2)	性别/例		ASA 分级/例		肿瘤部位/例	
			男	女	Ⅰ级	Ⅱ级	结肠	直肠
LPP 组(n = 31)	63.84±5.74	24.94±3.73	19	12	11	20	10	21
SPP 组(n = 32)	60.56±7.83	25.68±3.11	17	15	13	19	12	20
t/χ^2值	1.89	−0.86	0.43†		0.18†		0.19†	
P值	0.063	0.395	0.513		0.674		0.663	

注：†为χ^2值。

行干预治疗后，平均动脉压持续 10 min 低于或高于基线值 25.0%）；术中中转开腹或改变预定手术范围；术中发生严重并发症，需要抢救（如：大出血、心脏骤停）；患者或家属要求退出研究；研究者认为需剔除的其他情况。

1.2　方法

1.2.1　样本量计算　采用 G*Power 3.1 软件计算样本量，主要指标为关腹前 5 min 毛细血管壁厚度。根据预试验结果，LPP 组毛细血管壁平均厚度约为（0.78 ± 0.48）μm，SPP 组约为（1.22 ± 0.69）μm，以两独立样本 t 检验进行样本量估算，设双侧检验水准 $\alpha = 0.05$，检验效能 $1-\beta = 0.80$，两组样本量之比为 1∶1。每组最少需 30 例。考虑约 10.0% 的剔除/脱落率，每组拟纳入 33 例，两组共需 66 例。本研究初始符合条件的患者共计 68 例，LPP 组中观察到 2 例患者因肿瘤体积过大而中转开腹，另有 1 例由于血流动力学不稳定而多次使用血管活性药物被排除；SPP 组中 2 例因腹腔内严重粘连及肿瘤过大等问题中转开腹，最终纳入分析的患者数为 63 例。

1.2.2　麻醉方法　患者进入手术室后，常规行心电监护，实施标准化全凭静脉麻醉方案。预充氧后，静脉注射丙泊酚 2.0 mg/kg、舒芬太尼 0.25 μg/kg 和罗库溴铵 0.6 mg/kg 进行麻醉诱导，行气管插管间歇正压通气，设置氧气流量为 1.5 L/min，空气流量为 1.0 L/min，潮气量为 6.0 ~ 8.0 mL/kg，吸呼比为 1∶2，呼吸频率为 12 ~ 16 次/min，呼气末正压通气为 5 cmH_2O，根据 PetCO_2 进行调整，维持术中 PetCO_2 在 35 ~ 45 mmHg。术中持续泵注丙泊酚 2 ~ 4 mg/（kg·h）和瑞芬太尼 0.15 ~ 0.30 μg/（kg·h），间断给予罗库溴铵，使脑电双频指数维持在 40 ~ 60，且处于深肌松水平（强直后计数 1 或 2）。采用奥林巴斯气腹机（型号：UHI-4）建立气腹，LPP 组气腹压设定为 10 mmHg，SPP 组设定为 14 mmHg。术后 48 h 内患者自控静脉镇痛（patient controlled intravenous analgesia，PCIA）方案为：将舒芬太尼 2 μg/kg 和昂丹司琼 4 mg 加入生理盐水稀释至 100.0 mL；负荷剂量为 2.0 mL，背景输注速率 2 mL/h；单次按压剂量 0.5 mL，锁定时间为 15 min。

1.3　观察指标

1.3.1　手术相关情况　包括：手术时间、麻醉时间、拔管时间、晶体液输注总量、胶体液输注总量、尿量、失血量、麻醉恢复室（postanesthesia care unit，PACU）停留时间、术后 48 h 补救镇痛次数（PCIA 按压次数）和术后住院时间。

1.3.2　主要观察指标　于气腹建立即刻及关腹前 5 min，对大网膜组织同一部位实施采样（胃结肠韧带区域），取 1 cm^3 组织，用 0.9% 氯化钠溶液进行冲洗，再用手术刀片将组织分离为 5 至 6 个 1 mm^3 规格且完整保留的毛细血管结构标本单元。经固定、脱水、浸透、包埋、聚合和切片制备后，将完成染色的标本置于透射电子显微镜下观察。重点记录腹腔大网膜毛细血管内皮细胞超微结构的改变情况，后续采用 Digital Micrograph 专业图像分析系统处理数据。

1.3.3　次要观察指标　1）炎症因子：于麻醉诱导前 5 min、关腹前 5 min 和术后 24 h，记录白细胞介素-1（interleukin-1，IL-1）、白细胞介素-6（interleukin-6，IL-6）和肿瘤坏死因子-α（tumor necrosis factor-α，TNF-α）水平；2）氧化应激指标：于麻醉诱导前 5 min、关腹前 5 min 和术后 24 h，记录丙二醛（malondialdehyde，MDA）、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）和还原型谷胱甘肽（reduced glutathione，GSH）水平；3）血流动力学指标：于气腹前 5 min、气腹后 5 min、气腹后 1 h、放气前 5 min 和放气后 5 min，记录平均动脉压（mean

arterial pressure，MAP）和心率（heart rate，HR）；4）呼吸力学参数：于气腹前5 min、气腹后5 min、气腹后1 h、放气前5 min和放气后5 min，记录气道平均压（mean airway pressure，Pmean）和气道峰压（peak airway pressure，Ppeak）。

1.4 统计学方法

采用SPSS 29.0统计学软件分析数据。符合正态分布的计量资料以均数±标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，组间比较采用独立样本t检验，组内比较采用配对t检验；计数资料以例（%）表示，比较采用χ^2检验。$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者手术相关情况比较

两组患者拔管时间、PACU停留时间、胶体液输注总量、尿量和失血量比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。LPP组手术时间和麻醉时间较SPP组长，晶体液输注总量较SPP组多，差异均有统计学意义（$P<0.05$）。SPP组住院时间较LPP组长，术后48 h补救镇痛次数（PCIA按压次数）较LPP组多，差异均有统计学意义（$P<0.05$）。见表2。

2.2 两组患者主要观察指标比较

于气腹建立即刻采集的大网膜组织样本：毛细血管细胞内膜与外膜结构完整，细胞核形态学正常，胞质厚度均匀，线粒体呈类圆形，未见自噬溶酶体。关腹前5 min样本：LPP组毛细血管内皮细胞及血管壁结构完整，壁厚均匀，未见明显增厚（图1A），平均厚度（0.78±0.32）μm，SPP组血管壁增厚（图1B），平均值（1.22±0.46）μm，两组患者比较，差异有统计学意义（$P<0.05$）。LPP组细胞膜连续性完整（图1C），SPP组中有3例出现细胞膜不连续现象（图1D）。LPP组线粒体大多呈现规则形态（图1E），自噬溶酶体数量较少，细胞状态相对稳定。SPP组可见自噬溶酶体数量相对较多，包括双层膜结构包裹的降解中线粒体碎片（图1F）。每张标本随机选取3～5个视野进行计数操作，定量分析显示：LPP组每个视野自噬溶酶体平均值为（2.8±0.5）个，SPP组为（4.3±0.9）个，两组患者比较，差异有统计学意义（$P<0.05$）。

2.3 两组患者次要观察指标比较

2.3.1 炎症因子 与麻醉诱导前5 min比较，SPP组和LPP组关腹前5 min和术后24 h IL-1和IL-6水平均增高；且SPP组IL-6水平明显高于LPP组，差异均有统计学意义（$P<0.05$）。两组患者术后24 h的TNF-α水平明显高于麻醉诱导前5 min，差异有统计学意义（$P<0.05$）。见表3。

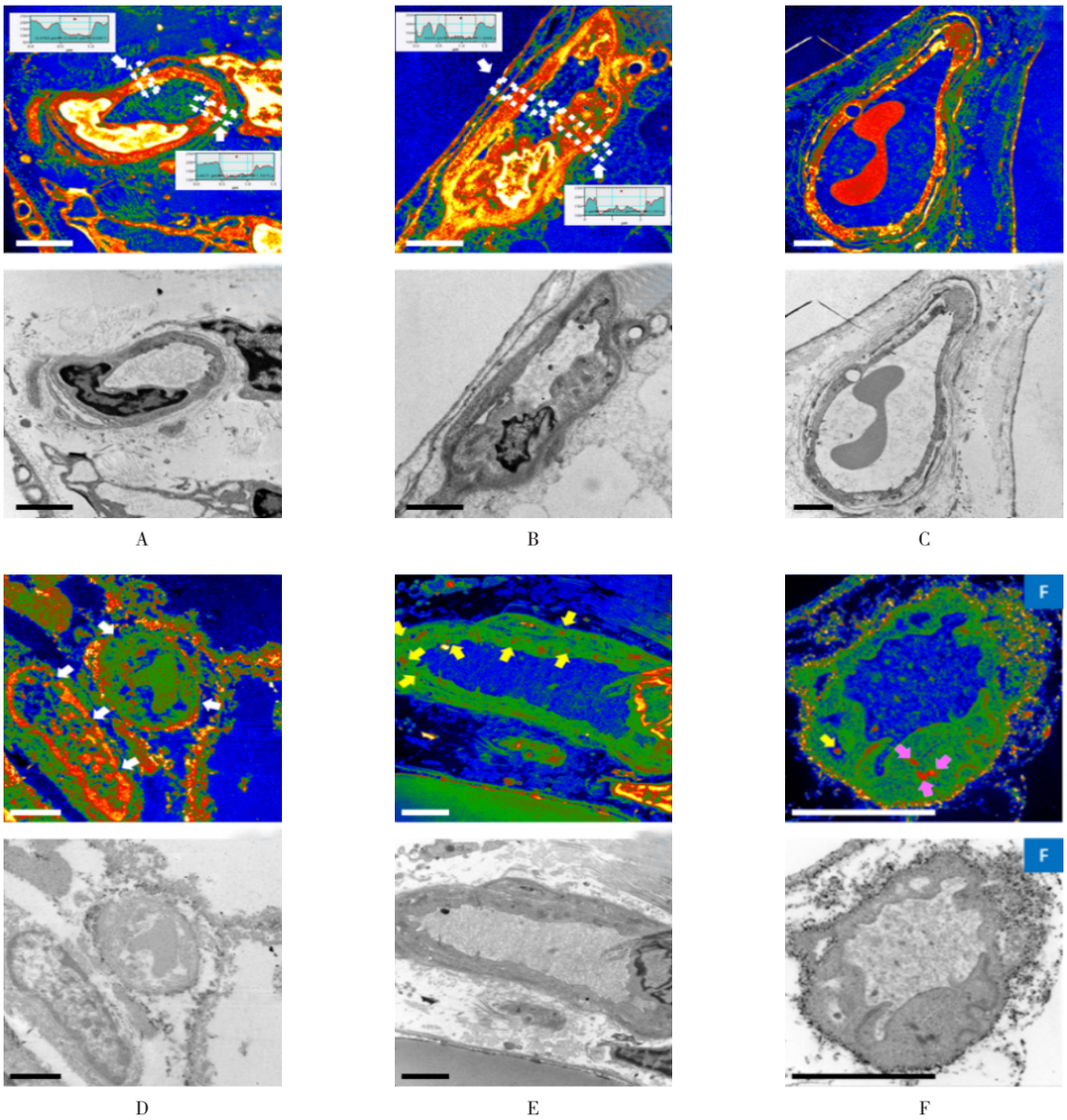
2.3.2 氧化应激指标 与麻醉诱导前5 min相比，两组患者关腹前5 min和术后24 h的MDA水平均明显增高，差异有统计学意义（$P<0.05$）。在关腹前5 min，SPP组MDA水平明显高于LPP组，差异均有统计学意义（$P<0.05$）。两组患者关腹前5 min和术后24 h SOD水平较麻醉诱导前5 min降低，差异有统计学意义（$P<0.05$）。与麻醉诱导前5 min相比，两组患者关腹前5 min GSH水平均降低；SPP组术后24 h较麻醉诱导前5 min GSH水平降低；SPP组术后24 h的GSH水平明显低于LPP组，差异有统计学意义（$P<0.05$）。见表4。

表2 两组患者手术相关情况比较 （$\bar{x} \pm s$）

Table 2 Comparison of surgical-related outcomes between the two groups （$\bar{x} \pm s$）

组别	晶体液输注总量/mL	胶体液输注总量/mL	拔管时间/min	PACU停留时间/min	术后住院时间/d
LPP组（n = 31）	2 556.77±322.16	636.72±154.90	23.81±5.39	40.21±6.90	10.04±1.09
SPP组（n = 32）	2 216.41±293.07	572.94±148.55	24.09±5.74	42.09±5.50	10.74±1.20
t值	4.38	1.67	−0.20	−1.20	−2.42
P值	< 0.001	0.100	0.843	0.236	0.019

组别	PCIA按压次数/次	手术时间/min	麻醉时间/min	尿量/mL	失血量/mL
LPP组（n = 31）	5.72±1.34	182.69±13.46	220.60±17.27	378.07±35.52	369.03±49.08
SPP组（n = 32）	7.38±1.41	166.25±15.22	206.99±16.87	369.85±58.37	365.29±46.73
t值	−4.79	4.54	3.16	0.67	0.31
P值	< 0.001	< 0.001	0.002	0.504	0.758



第 1 行为 Digital Micrograph 系统处理后的图，第 2 行为原图，图片左下角标尺均为 2 μm。A 和 B：基于图像对比度，利用强度分布剖面测定壁厚；C：细胞膜连续性完整；D：细胞膜破裂或不连续（白色箭头所指）；E 和 F：完整线粒体（黄色箭头所指）和自噬溶酶体（粉色箭头所指）。

图 1　透射电镜下腹腔大网膜毛细血管内皮细胞形态图

Fig.1　Morphology of capillary endothelial cells of the abdominal greater omentum under a transmission electron microscope

2.3.3　血流动力学指标　气腹后 5 min，SPP 组的 MAP 明显低于 LPP 组[（77.16 ± 5.62）和（80.06 ± 5.70）mmHg]，差异有统计学意义（$P < 0.05$）；SPP 组气腹后 1 h 及放气前 5 min 的 MAP 均低于气腹前 5 min，差异有统计学意义（$P < 0.05$）。SPP 组的 HR 在气腹后 1 h、放气前 5 min 和放气后 5 min 明显高于气腹前 5 min 水平，差异均有统计学意义（$P < 0.05$）。LPP 组气腹后 1 h、放气前 5 min 和放气后 5 min 的 HR 明显低于 SPP 组，差异均有统计学意义（$P < 0.05$）。见表 5。

2.3.4　呼吸力学参数　两组患者 Pmean 和 Ppeak 自气腹建立后均升高，并随气腹时间延长而进一步上升。气腹建立后各时点，SPP 组 Pmean 明显高于 LPP 组；Ppeak 气腹后 1 h、放气前 5 min 和放气后 5 min 明显高于 LPP 组，差异均有统计学意义（$P < 0.05$）。见表 6。

表 3 两组患者不同时间点炎症因子水平比较 （pg/mL，$\bar{x} \pm s$）

Table 3 Comparison of inflammatory factor levels between the two groups at different time points （pg/mL，$\bar{x} \pm s$）

组别	麻醉诱导前 5 min	关腹前 5 min	术后 24 h
IL-1			
SPP 组（n = 32）	87.90±11.50	108.27±23.90†	96.87±14.63†
LPP 组（n = 31）	86.76±10.78	100.52±20.71†	93.07±18.20†
t 值	0.41	1.37	0.91
P 值	0.686	0.175	0.364
IL-6			
SPP 组（n = 32）	30.42±5.54	64.99±6.06†	49.58±7.09†
LPP 组（n = 31）	30.67±5.68	60.93±5.36†	44.60±5.81†
t 值	−0.18	2.81	3.04
P 值	0.860	0.007	0.003
TNF-α			
SPP 组（n = 32）	38.89±4.97	41.47±6.52	42.37±6.56†
LPP 组（n = 31）	37.98±5.31	40.38±5.83	41.54±5.59†
t 值	0.70	1.34	0.54
P 值	0.485	0.185	0.591

注：†与本组麻醉诱导前 5 min 比较，差异有统计学意义（$P < 0.05$）。

表 4 两组患者不同时间点氧化应激指标比较 （$\bar{x} \pm s$）

Table 4 Comparison of oxidative stress indexes between the two groups at different time points （$\bar{x} \pm s$）

组别	麻醉诱导前 5 min	关腹前 5 min	术后 24 h
MDA/（nmol/mL）			
SPP 组（n = 32）	25.65±3.94	33.46±6.89†	30.11±4.28†
LPP 组（n = 31）	24.80±7.12	29.17±4.65†	29.35±4.59†
t 值	−0.62	−2.88	−0.69
P 值	0.539	0.005	0.495
SOD/（u/mL）			
SPP 组（n = 32）	102.52±11.05	89.51±9.01†	96.47±6.92†
LPP 组（n = 31）	103.06±7.72	93.16±8.31†	96.14±8.04
t 值	0.23	1.67	−0.17
P 值	0.822	0.100	0.864
GSH/（μmol/L）			
SPP 组（n = 32）	71.83±5.93	60.52±6.10†	65.65±5.93†
LPP 组（n = 31）	72.25±7.95	62.01±6.44†	70.69±8.12
t 值	0.24	0.94	2.82
P 值	0.814	0.351	0.006

注：†与本组麻醉诱导前 5 min 比较，差异有统计学意义（$P < 0.05$）。

表 5　两组患者不同时间点血流动力学指标比较　（$\bar{x} \pm s$）

Table 5　Comparison of hemodynamic indicators between the two groups at different time points　（$\bar{x} \pm s$）

组别	气腹前 5 min	气腹后 5 min	气腹后 1 h	放气前 5 min	放气后 5 min
MAP/mmHg					
SPP 组（n = 32）	82.69±6.55	77.16±5.62	79.16±7.80†	77.97±4.87†	76.72±4.81†
LPP 组（n = 31）	82.32±6.77	80.06±5.70†	79.84±4.80	77.65±7.91	77.16±6.65†
t 值	−0.22	2.04	0.42	1.02	0.30
P 值	0.829	0.046	0.678	0.313	0.763
HR/（次/min）					
SPP 组（n = 32）	66.59±5.91	66.34±6.34†	72.66±4.76†	76.16±5.57†	68.81±5.53†
LPP 组（n = 31）	66.84±6.47	68.45±5.69	67.94±6.08	68.81±6.12	65.00±6.93
t 值	0.16	1.39	−3.44	−4.98	−2.42
P 值	0.876	0.170	0.001	< 0.001	0.019

注：†与本组气腹前 5 min 比较，差异有统计学意义（P < 0.05）。

表 6　两组患者不同时间点呼吸力学参数比较　（cmH_2O，$\bar{x} \pm s$）

Table 6　Comparison of respiratory mechanics parameters between the two groups at different time points　（cmH_2O，$\bar{x} \pm s$）

组别	气腹前 5 min	气腹后 5 min	气腹后 1 h	放气前 5 min	放气后 5 min
Pmean					
SPP 组（n = 32）	7.72±0.58	10.94±1.11†	13.06±1.08†	14.78±2.87†	10.00±0.84†
LPP 组（n = 31）	7.71±0.94	9.39±0.92†	10.48±1.15†	11.87±1.52†	8.52±0.89†
t 值	−0.05	−6.04	−9.19	−5.00	−6.80
P 值	0.963	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Ppeak					
SPP 组（n = 32）	15.31±1.38	17.91±1.99†	24.88±2.32†	27.03±1.99†	17.69±1.55†
LPP 组（n = 31）	15.68±1.56	17.52±1.48†	21.52±1.53†	24.87±1.54†	16.87±1.43†
t 值	0.99	−0.88	−6.76	−4.80	−2.17
P 值	0.328	0.382	< 0.001	< 0.001	0.034

注：†与本组气腹前 5 min 比较，差异有统计学意义（P < 0.05）。

3　讨论

3.1　气腹压对腹腔镜手术的影响

3.1.1　LPP 可减少组织损伤　腹腔镜手术中，气腹压的调节对腹膜微循环灌注有显著影响。有研究[10]表明，在气腹压从 16 mmHg 下调至 8 mmHg 的过程中，腹膜微血管灌注指标呈现持续改善态势。本团队前期研究[11]发现，在 14 mmHg 下行腹腔镜胃癌根治术的患者，大网膜毛细血管内皮细胞出现明显肿胀，胞质内液体积聚，血管管腔狭窄。这提示：较高的气腹压可能导致微血管结构与功能受损。本研究进一步证实，相较于 LPP，SPP 较高的气腹压不仅增加了细胞膜不连续率，还会增加细胞内自噬溶酶体数量。这一现象可能与高压环境下细胞膜的机械性损伤及细胞应激诱导的自噬反应增强有关。这提示：过高的气腹压，可通过破坏细胞膜稳定性及加速细胞内结构降解，导致组织损伤。

3.1.2　LPP 可减轻炎症反应　手术过程中，直接或间接的组织损伤，均能够激活机体免疫系统，促进多种损伤相关因子释放，并产生氧自由基，诱发炎症

反应[12]；活化的内皮细胞会释放黏附分子、整合素及P选择素等，这些物质可进一步导致白细胞迁移[13]，加重细胞水肿。Serrano等[14]采用激光多普勒血流监测技术，证实：低气腹压在提高腹壁及内脏器官微循环血流量的同时，能够有效地抑制术后炎症反应。本研究结果显示，LPP患者MDA含量较低，这提示：LPP可减轻细胞氧化应激损伤，保护微血管内皮功能。

3.1.3 LPP可减轻术后疼痛 气腹压水平不仅是术中生理状态的重要调控因素，还是术后疼痛的主要决定因素之一。有研究[15]显示，气腹持续时间对疼痛强度的影响仅占7%，而气腹压水平为疼痛强度的主要影响因素[16-17]。本研究中，LPP组术后48 h补救镇痛次数少于SPP组，且缩短了住院时间。LPP可能通过优化微循环与抑制炎症反应的双重保护机制，促进术后更好的恢复[18]。

3.1.4 LPP可改善血流动力学指标和呼吸力学参数 气腹压可改变血流动力学与呼吸力学特性。高气腹压可压迫下腔静脉和腹主动脉，导致回心血量降低，心脏前负荷下降，后负荷增加，心脏功能受到抑制。呼吸力学特性的改变机制与腹膜对CO_2吸收速率有关。高气腹压可推动膈肌向头侧移位，使肺组织受压，胸壁顺应性及肺顺应性均降低，呼吸功能受到抑制[19-20]。当气腹压处于8～15 mmHg区间时，约56%的压力可传导至胸腔[21]，增加了围手术期肺部并发症的发生率[22]。针对这一问题，术中个体化肺保护通气方案，可有效地缓解过高气腹压对呼吸系统的不利影响，改善氧合[23]。

3.2 本研究的局限性

1）本研究样本量较小，因术式改变和血流动力学极不稳定而被终止试验的5例患者，未被纳入最终统计学分析，统计效力受限，结果可能产生偏倚；2）已知腹腔镜手术并发症多发生于术后3～6个月时段，短期随访设计无法评估切口疝发生率等远期结局指标；3）肿瘤学相关指标缺失，特别是LPP对肿瘤细胞腹膜种植转移的潜在影响，未被考察。

综上所述，LPP用于腹腔镜CRC根治术，可改善大网膜微循环灌注，减轻细胞应激损伤与炎症反应，减轻术后疼痛，缩短住院时间，减少呼吸力学障碍。在确保手术视野和操作空间的前提下，适当降低气腹压，并配合个体化肺保护通气，是临床优化腹腔镜CRC根治术的重要实践方向。

参 考 文 献：

[1] Shin A E, Giancotti F G, Rustgi A K. Metastatic colorectal cancer: mechanisms and emerging therapeutics[J]. Trends Pharmacol Sci, 2023, 44(4): 222-236.

[2] Hamaker M E, Schiphorst A H, Verweij N M, et al. Improved survival for older patients undergoing surgery for colorectal cancer between 2008 and 2011[J]. Int J Colorectal Dis, 2014, 29(10): 1231-1236.

[3] Şahan A, Ozkaptan O, Cubuk A, et al. Fast, easy, and safe establishment of pneumoperitoneum in laparoscopic surgery: the fingertip technique[J]. JSLS, 2021, 25(1): e2020.00093.

[4] Stamate E, Piraianu A I, Duca O M, et al. The effect of increased intra-abdominal pressure on hemodynamics in laparoscopic cholecystectomy-the experience of a single centre[J]. J Pers Medi, 2024, 14(8): 871.

[5] Ortenzi M, Montori G, Sartori A, et al. Low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Surg Endosc, 2022, 36(10): 7092-7113.

[6] Bahadir G B, Taşkinlar H, Isbir C, et al. Analyzing the effect of laparoscopy duration time on peroperative gastroesophageal reflux[J]. Turk J Med Sci, 2019, 49(2): 639-643.

[7] Mazzinari G, Diaz-cambronero O, Neto A S, et al. Modeling intra-abdominal volume and respiratory driving pressure during pneumoperitoneum insufflation-a patient-level data Meta-analysis[J]. J Appl Physiol (1985), 2021, 130(3): 721-728.

[8] Celarier S, Monziols S, Francois M O, et al. Randomized trial comparing low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in laparoscopic colectomy: PAROS trial[J]. Trials, 2020, 21(1): 216.

[9] Yashwashi T, Kaman L, Kajal K, et al. Effects of low- and high-pressure carbon dioxide pneumoperitoneum on intracranial pressure during laparoscopic cholecystectomy[J]. Surg Endosc, 2020, 34(10): 4369-4373.

[10] Albers K I, Polat F, Loonen T, et al. Visualising improved peritoneal perfusion at lower intra-abdominal pressure by fluorescent imaging during laparoscopic surgery: a randomised controlled study[J]. Int J Surg, 2020, 77: 8-13.

[11] 丰陈, 胡有力. 不同气腹压对腹腔镜胃癌根治术的影响[J]. 临床麻醉学杂志, 2023, 39(12): 1237-1242.
Feng Chen, Hu Youli. Effect of different pneumoperitoneum pressure on laparoscopic radical gastrectomy for gastric cancer[J]. Journal of Clinical Anesthesiology, 2023, 39(12): 1237-1242.

[12] Albers K I, Polat F, Helder L, et al. Quality of recovery and innate immune homeostasis in patients undergoing low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum during laparoscopic colorectal surgery (recover): a randomized controlled trial[J]. Ann Surg, 2022, 276(6): e664-e673.

[13] Ge Shanhui, He Wanmei, Zhang Lishan, et al. Ghrelin pretreatment enhanced the protective effect of bone marrow-derived mesenchymal stem cell-conditioned medium on lipopolysaccharide-induced endothelial cell injury[J]. Mol Cell Endocrinol, 2022, 548: 111612.

[14] Serrano A B, Díaz-cambronero Ó, Montiel M, et al. Impact of standard versus low pneumoperitoneum pressure on peritoneal environment in laparoscopic cholecystectomy. Randomized clinical trial[J]. Surg Laparosc Endosc Percutan Tech, 2024, 34(1): 1-8.

[15] Choi B M, Ki S H, Lee Y H, et al. Effects of depth of neuromuscular block on postoperative pain during laparoscopic gastrectomy: a randomised controlled trial[J]. Eur J Anaesthesiol, 2019, 36(11): 863-870.

[16] Sandhu R, Routh D, Rao P P, et al. A randomised clinical trial to study postoperative abdominal and shoulder tip pain following low and standard pressure laparoscopic cholecystectomy[J]. Med J Armed Forces India, 2023, 79(Suppl 1): s230-s236.

[17] Park S E, Hong T H. Effects of extremely low-pressure pneumoperitoneum on postoperative recovery after single site robot-assisted cholecystectomy: a randomized controlled trial[J]. Langenbecks Arch Surg, 2023, 408(1): 242.

[18] Dourado J, Rogers P, Horesh N, et al. Low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in minimally invasive colorectal surgery: a systematic review, Meta-analysis, and Meta-regression analysis[J]. Gastroenterol Rep (Oxf), 2024, 12: goae052.

[19] D'antini D, Rauseo M, Grasso S, et al. Physiological effects of the open lung approach during laparoscopic cholecystectomy: focus on driving pressure[J]. Minerva Anestesiol, 2018, 84(2): 159-167.

[20] Cinnella G, Grasso S, Spadaro S, et al. Effects of recruitment maneuver and positive end-expiratory pressure on respiratory mechanics and transpulmonary pressure during laparoscopic surgery[J]. Anesthesiology, 2013, 118(1): 114-122.

[21] Diaz-cambronero O, Lorente B F, Mazzinari G, et al. A multifaceted individualized pneumoperitoneum strategy for laparoscopic colorectal surgery: a multicenter observational feasibility study[J]. Surg Endosc, 2019, 33(1): 252-260.

[22] Yan Tao, Li Huixian, Sun Yulin, et al. Preventing pulmonary complications after laparoscopic colorectal surgery: a lung-protective protocol vs. standard care: a randomised controlled trial[J]. Eur J Anaesthesiol, 2025, 42(9): 826-839.

[23] Richebé P, Bousette N, Fortier L P. A narrative review on the potential benefits and limitations of deep neuromuscular blockade[J]. Anaesth Crit Care Pain Med, 2021, 40(4): 100915.

（曾文军　编辑）

本文引用格式：

苏雅雅, 黄哲, 仇晓娟, 等. 不同气腹压对结直肠癌根治术患者内皮细胞形态的影响[J]. 中国内镜杂志, 2026, 32(8): 17-25.

Su Yaya, Huang Zhe, Qiu Xiaojuan, et al. Effects of varying pneumoperitoneum pressures on endothelial cell morphology in patients undergoing radical resection of colorectal carcinoma[J]. China Journal of Endoscopy, 2026, 32(8): 17-25.