

超脉冲钬光纤激光体外碎石术中光纤周围温度变化的研究

丁天福¹ 肖博¹ 曾雪¹ 梁磊¹ 姬超岳¹ 李建兴¹

[摘要] 目的:探讨国产超脉冲钬光纤激光体外碎石过程中光纤周围温度的变化。方法:将大小 1 cm×1 cm×1 cm 的人造立方体结石置于的体外圆柱形模型中,由同一名医生行体外软性输尿管镜激光碎石术,温度探头位于光纤周围 5 mm 处,激光激发 15 s,间断 5 s,每组实验周期为 120 s,每组重复 5 次实验。激光功率为 10、15、20、25、30 W,灌注速率为 0、10、15、25 mL/min,激光设备为超脉冲钬光纤激光,光纤直径为 272 μm,脉宽为 7 ms。实时记录光纤周围温度变化情况,比较不同功率、不同灌注速度下光纤周围温度的变化情况。结果:在碎石功率为 10 W 时,灌注流速为 0 mL/min 时,周围温度每分钟升高 0.2℃,在 57 s 时光纤周围温度达到安全阈值 43℃。当灌注速度为 15 mL/min,碎石功率 20 W 时,光纤平台期温度 36.9~37.25℃,未超过安全阈值 43℃。当灌注速度为 20 mL/min,碎石功率 25 W 时,光纤平台期温度 36.8~37.05℃,未超过安全阈值 43℃。当灌注速度为 25 mL/min,碎石功率 30 W 时,光纤平台期温度 37.05~37.2℃,未超过安全阈值 43℃。结论:体外软性输尿管镜超脉冲钬光纤激光碎石术中,安全灌注速度与激光功率成正相关,碎石功率≤20 W 时需保持灌注速度≥15 mL/min,碎石功率≤25 W 时需保持灌注速度≥20 mL/min,碎石功率≤30 W 时需保持灌注速度≥25 mL/min。

[关键词] 超脉冲钬光纤激光;温度;碎石;安全阈值

DOI:10.13201/j.issn.1001-1420.2023.01.012

[中图分类号] R454 **[文献标志码]** A

Study on the temperature change around the fiber during super-pulse thulium fiber laser extracorporeal lithotripsy

DING Tianfu XIAO Bo ZENG Xue LIANG Lei JI Chaoyue LI Jianxing

(Department of Urology, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua University, Beijing, 102218, China)

Corresponding author: LI Jianxing, E-mail: ljx1@sina.com

Abstract Objective: To investigate the changes of temperature around the fiber during in vitro lithotripsy with domestic super-pulse thulium fiber laser. **Methods:** An artificial cube stone of 1 cm×1 cm×1 cm was placed in an external cylindrical model, and the same doctor performed external flexible ureteroscopic laser lithotripsy. The temperature probe was located 5 mm around the optical fiber, and the laser excitation was performed for 15 s with an interval of 5 s. The experiment period of each group was 120 s, and the experiment was repeated for 5 times in each group. The laser power was 10, 15, 20, 25, 30 W, and the perfusion rate was 0, 10, 15, 25 mL/min. The laser equipment was ultra pulse thulium fiber laser, the fiber diameter was 272 μm, and the pulse width was 7 ms. The temperature change around the fiber was recorded in real time, and the temperature change around the fiber was compared under different power and different perfusion speed. **Results:** When the gravel power was 10 W and the perfusion flow rate was 0 mL/min, the surrounding temperature increased by 0.2℃ per minute, and the surrounding temperature reached the safe threshold of 43℃ at 57 s. When the perfusion rate was 15 mL/min and the crushed stone power was 20 W, the fiber plateau temperature was 36.9–37.25℃, which did not exceed the safe threshold of 43℃. When the perfusion rate was 20 mL/min and the crushed stone power was 25 W, the temperature of the fiber platform phase was 36.8–37.05℃, which did not exceed the safe threshold of 43℃. When the perfusion rate is 25 mL/min and the crushed stone power is 30 W, the temperature of the fiber platform phase is 37.05–37.2℃, which does not exceed the safe threshold of 43℃. **Conclusion:** The safe perfusion velocity is positively correlated with the laser power in the extracorporeal flexible ureteroscope ultra pulse thulium fiber laser lithotripsy. The perfusion velocity should be maintained ≥15 mL/min when the lithotripsy power is less than 20 W, ≥20 mL/min when the lithotripsy power is less than 25 W, and ≥25 mL/min when the lithotripsy power is less than 30 W.

Key words super-pulse thulium fiber laser; temperature; lithotripsy; safe threshold

¹清华大学附属北京清华长庚医院泌尿外科 清华大学临床医学院(北京,102218)

通信作者:李建兴,E-mail:ljx1@sina.com

泌尿系结石是泌尿外科中较常见的疾病,在过去几十年里,其发病率在全世界范围内呈现上升趋势^[1]。随着腔镜技术的发展以及激光光纤的出现^[2],输尿管镜激光碎石因其微创、治疗效果好、安全性高等优势,已经成为了结石的最主要的治疗方式。在众多使用的激光中,钬激光一直是临床上激光碎石的“金标准”^[3],目前,一种新型激光产品——超脉冲钬光纤激光出现,与钬激光(Ho:YAG)不同,它是由掺铥离子的石英光纤组成,在激光泵浦过程中触发,发射波长为 1940 nm 的激光。并且在实验室及临床研究上表现出优于钬激光的碎石以及结石回退力的效果^[4-6]。由于其激光的作用原理会导致周围温度升高^[7],并造成周围组织热损伤,激光的温度问题一直成为泌尿外科医生在手术中关注并广泛研究的问题,目前尚无关于国产超脉冲钬光纤激光碎石过程中光纤周围温度变化的相关研究,本研究于 2021 年 11—12 月通过人造结石及体外测温装置,研究国产超脉冲钬光纤激光碎石过程中光纤周围温度的变化。

1 资料与方法

1.1 一般资料

使用课题组前期设计的测温装置,此装置包括内外 2 部分:外部为恒温水浴系统,使用恒温水箱与水泵组合,提供稳定的 36.5~37.5℃ 温水,模拟人体温度;内部为一端开放的圆柱体,圆柱体长度为 40 mm,半径 8 mm,容积约为 7.5 mL,开放的一端通过橡皮塞封闭,橡皮塞上有 3 个开口,分别供输尿管扩张鞘(F12/14)及 2 个测温探头通过,结石置于圆柱体内。激光设备选用峰值 500 W 的连续超脉冲双模输出掺铥光纤激光手术系统(以下简称“超脉冲钬光纤激光”),光纤直径为 272 μm,脉冲宽度 7 ms。使用多通道实时测温仪,采用四个测温探头(每秒记录 1 次温度),第 1 个与第 2 个分别固定于光纤周围 5 mm 处的位置,记录光纤周围的温度变化。第 3 个与第 4 个至于外部水流中,记录并监测外部水流的温度。采用德国 Bego 公司的产品 Begostone 作为人造结石的主要成分,将其与水 15:3 进行混合,搅拌均匀后置入金属模具中,待模具中的混合液体干燥后进行脱模,制成 1 cm×1 cm×1 cm 的立方体,将立方体置于室温中干燥 48 h 以上,备用。每次使用人造结石进行碎石实验前,将人造结石立方体置于室温水浸泡 30 min 以上,保证人造结石立方体内部的孔隙被水充满。

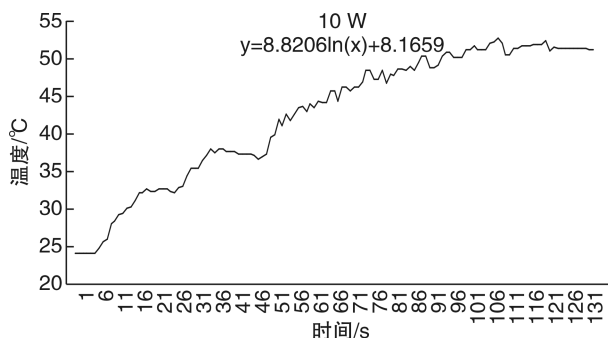
1.2 方法

保持室温为 22~26℃,将人造结石置于体外肾模型中(图 1),使用软性输尿管镜配合超脉冲钬光纤激光,由 1 名泌尿外科医生进行碎石操作,该医生对于手术目的不知情。采用不同的激光功率:10 W(10 Hz×1 J)、15 W(10 Hz×1.5 J)、20 W(10 Hz×2 J)、25 W(10 Hz×2.5 J)、30 W(10 Hz×3 J)和不同的灌注速度:0、15、25、35 mL/min(灌

注液:生理盐水,温度为 24℃)。每次实验前使用大芯径光纤切割刀进行修剪光纤,并使用激光功率计进行测量,保证激光功率符合额定标准(100%±20%)W。2 个温度探头分别至于光纤周围 5 mm 处,每秒记录 1 次温度,取双侧探头的平均值。激光激发选择较符合手术操作习惯的激发方式:激光激发 15 s,间断 5 s,每组实验周期为 120 s,每组重复 5 次实验。每次实验后待模拟肾盂内温度降至 24℃后再进行下一次实验。测温仪实时记录温度,最终记录不同的功率及灌注流速下光纤周围的温度变化情况。

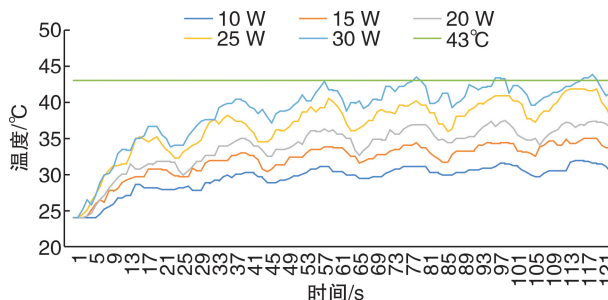
2 结果

在碎石功率为 10 W 时,灌注流速为 0 mL/min 时(图 1),周围温度每分钟升高 0.2℃,在 57 s 时光纤周围温度达到安全阈值 43℃。当灌注速度为 15 mL/min(图 2),碎石功率 20 W 时,光纤平台期温度 36.9~37.25℃,未超过安全阈值 43℃。当灌注速度为 20 mL/min(图 3),碎石功率 25 W 时,光纤平台期温度 36.8~37.05℃,未超过安全阈值 43℃。当灌注速度为 25 mL/min(图 4),碎石功率 30 W 时,光纤平台期温度 37.05~37.2℃,未超过安全阈值 43℃。



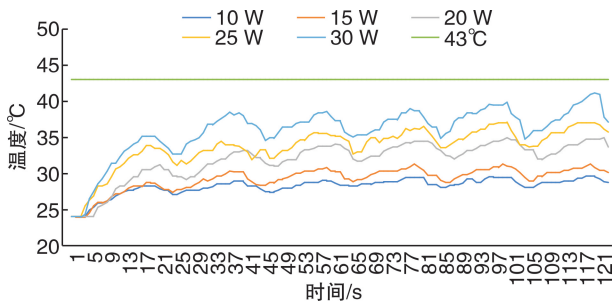
肾盂内初始温度为 24℃,随着时间的增加,水温越来越高。57 s 时温度达到安全阈值 43℃,结束时温度到达 52.1℃。

图 1 在 0 mL/min、碎石功率为 10 W 情况下时间与温度的关系



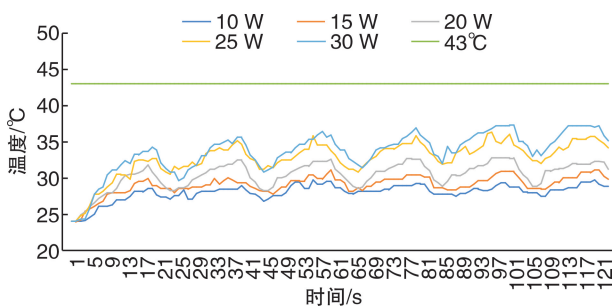
当灌注速度为 15 mL/min、碎石效率为 25 W 与 30 W 时,灌注液体与光纤释放的热量未达到平衡,周围温度有持续上升的趋势。而碎石功率 20 W 时,灌注液体与光纤释放的热量达到平衡。

图 2 在 15 mL/min、不同碎石功率情况下时间与温度的关系



当灌注速度为 20 mL/min、碎石效率为 30 W 时,灌注液体与光纤释放的热量未达到平衡,周围温度有持续上升的趋势。而碎石功率为 25 W 时,灌注液体与光纤释放的热量达到平衡。

图 3 在 20 mL/min、不同碎石功率情况下时间与温度的关系



当灌注速度为 25 mL/min、碎石效率为 30 W 时,灌注液体与光纤释放的热量达到平衡。

图 4 在 25 mL/min、不同碎石功率情况下时间与温度的关系

3 讨论

随着医疗技术的发展,激光碎石得到了越来越多的应用,激光的碎石原理为光热效应与光机械效应。光热效应:光纤发出的热量聚积使结石消融;光机械效应:通过光纤激发在水中产生的水泡,而导致结石的裂解^[7]。超脉冲铥光纤激光属于红外光,波长为 1940 nm,在水中的吸收系数较高,这种特点可以导致在结石间隙、空隙中的水分吸收能量后汽化产生爆破进而促进碎石^[8-9]。输尿管激光碎石术作为一种有效且相对安全的手术方式,术后输尿管狭窄发生率较低^[10],尽管发生率很低,但是其并发症较严重,而碎石时激光造成的组织损伤是其原因之一。根据前期的研究^[11-13],超过 43°C 时组织开始损伤,43°C 被确定为激光手术的安全阈值。当温度在 54°C 时,大多数组织已基本完全坏死^[14]。因此在使用过程中引起周围温度升高而对周围组织造成损伤是评价其安全性的重要指标之一^[15],由于超脉冲铥光纤激光在水中较高的吸收系数,其碎石过程中光纤周围温度的变化更加值得关注。

为了尽可能模拟体内真实环境,减少干扰因素,使实验具有可行性,本课题组前期自主设计的

体外肾模型,此模型包括外部恒温水浴系统;内部是与人体肾盂容积相似的圆柱体,相对于 Peng 等^[16]的研究,此肾模型尽可能模拟体内真实容积环境。圆柱体开放的一端通过橡皮塞封闭,橡皮塞上有 3 个开口,分别供输尿管扩张鞘及 2 个测温探头通过,光纤与测温探头固定在橡皮塞上,相对距离保持固定。碎石时将结石置于圆柱体内,操作软性输尿管镜进行碎石,灌注液通过水泵连接软性输尿管镜,出水从软镜与扩张鞘之间的空隙中流出。而对于 3D 打印肾模型而言需要有经验的软性输尿管镜操作者才能进行操作,并且在术中由于结石的位移或者视野模糊,术者将会停止激光激发或调节灌注液速率而影响温度的检测进而导致实验误差增大。本模型操作简单,初次使用者也可进行实验,且模型由透明材料制作,碎石时可同时观察显示屏或从外侧观察,不会由于视野模糊而造成影响;此外在圆柱体内有一圆形弹簧,防止结石位移而影响碎石的过程,将术中操作的误差降至最低。

本研究结果显示,激光碎石术中,在灌注速率及碎石功率的不同组合下,光纤周围温度升高的幅度不同。既往 Hein 等^[12]、Peng 等^[16]、Taratkin 等^[17]通过构建了体外肾脏模型,使用不同的灌注速率和功率设置激发激光以检测水温的变化,最终得出结论在激光碎石中,功率设置与灌注速率在降低水温方面中发挥了关键作用,更具体来讲,高功率及低灌注可能导致潜在的组织损伤。在本研究中,所有的碎石功率下所致的温度曲线,都类似于对数曲线,温度在初期迅速升高,然后在某一时刻灌注液与热量相平衡,曲线出现平台期。当灌注速度为 15 mL/min,碎石效率为 25 W 与 30 W 时,灌注液体与光纤释放的热量未达到平衡,周围温度有持续上升的趋势。而碎石功率 20 W 时,灌注液体与光纤释放的热量达到平衡。这与 Peng 等^[16]的研究部分相同,他们研究认为,在同等灌注速率下,只有 30 W 的碎石功率会超过安全阈值,考虑其差异性是由于实验所使用容器的容积差异(20 mL 与 7.5 mL)导致,较大的容积将会导致水流更快的混合将会降低一部分温度^[18],而我们实验选用的容积与肾盂的容积相似,会更加符合真实体内实验效果,另外,还与其激光激发方式有关。但两者的实验都说明了:在灌注速率 15 mL/min 时,20 W 以内的碎石功率是安全、可靠的。除此之外,与 Taratkin 等^[19]和 Hardy 等^[20]的实验模型不同的是,他们所使用的是底部带有网筛的双侧通畅的试管,灌注液从一端流入从一端流出,热量将会被液体大大降低,所以其两者研究结果在 25 mL、35 mL 灌注速率时的温度更低。而我们的是一侧封闭状态,激光所造成的湍流将会影响一部分水温,但恰恰能模拟出在肾盂内或肾盏灌注,而灌注液经过肾盂、

肾盏的阻挡而从软性输尿管镜与输尿管扩张鞘之间流出,这就能很好地解释在灌注速率为 20 mL/min 与 25 mL/min 时我们实验与他们结果的差异。此外,我们还选择了在临床上较常使用的碎石功率 10 W,在零灌注情况下,水温随着时间的增加而升高,连续激发 24 s 时温度达到安全阈值,而采用间断激发的方式将会延长到达安全阈值的时间。在激光碎石术中,由于结石的回退或肾盂内高压等影响,术者会刻意减少术中的灌注流量,甚至会暂停冲洗以避免结石位移等。这有可能使局部灌注不足而至热量积累超过组织安全温度,造成组织热损伤,在这种情况下应当注意暂停冲洗的时间,以避免对组织造成不可逆的热损伤。同时本研究也可以观察到,相同碎石功率所到达平台期的温度,随着灌注速率的增加而降低,但较高的灌注速率将会导致肾盂内压力升高,可以导致术后感染并发症、甚至尿脓毒症的发生。李成文等^[21]和赵蓉等^[22]研究表明,经皮肾镜取石术中肾盂内压力与术后感染、术后康复密切相关。在软性输尿管碎石过程中需要灌注液体保持术中视野清晰,同样也有肾盂内高压情况出现,杨嗣星等^[23]通过使用灌注泵维持平均灌注流量后得出结论术中肾盂内压力变化与灌注压力及灌注时间有关。基于此,我们并没有选用较大的灌注速率,灌注液体在 50 mL 以下,可以满足临床需求,以避免肾盂内高压等情况发生。

本研究为国产超脉冲钕光纤激光的初步体外实验,存在一定的局限性。首先,实验装置无法真正模拟人体集合系统的真实解剖结构以及组织的柔韧性,但依然能够证明碎石过程中碎石功率与光纤周围温度变化的关系,使用动物模型的研究可能有助于解决这一限制,其次没有考虑术中影响因素,如术中需要考虑肾盂内压力及术中出血的影响,此外,肾脏集合系统的分泌及肾脏循环系统在防止损伤组织损伤也起着重要作用等^[12]。最后,本研究只选用单一能量组合,无多种碎石参数组合,同时钕光纤激光为固定型号、固定设备,下一步将会设置多种设备及多种碎石参数的组合对比。尽管如此,但初步的研究结果为体内实验和临床应用提供了有价值的参考。

综上所述,本研究初步的结果显示,体外软性输尿管镜超脉冲钕光纤激光碎石术中,安全灌流速度与激光功率呈正相关,碎石功率 ≤ 20 W 时需保持灌注速度 ≥ 15 mL/min,碎石功率 ≤ 25 W 时需保持灌注速度 ≥ 20 mL/min,碎石功率 ≤ 30 W 时需保持灌注速度 ≥ 25 mL/min。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Zeng G, Mai Z, Xia S, et al. Prevalence of kidney stones in China: an ultrasonography based cross-sectional study[J]. *BJU Int*, 2017, 120(1):109-116.

- [2] Huusmann S, Lafos M, Meyenburg I, et al. Tissue effects of a newly developed diode pumped pulsed Thulium:YAG laser compared to continuous wave Thulium:YAG and pulsed Holmium:YAG laser[J]. *World J Urol*, 2021, 39(9):3503-3508.
- [3] Fried NM, Irby PB. Advances in laser technology and fibre-optic delivery systems in lithotripsy[J]. *Nat Rev Urol*, 2018, 15(9):563-573.
- [4] Traxer O, Keller EX. Thulium fiber laser: the new player for kidney stone treatment? A comparison with Holmium:YAG laser[J]. *World J Urol*, 2020, 38(8):1883-1894.
- [5] Kronenberg P, Traxer O. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser—a systematic review [J]. *Transl Androl Urol*, 2019, 8(Suppl 4):S398-S417.
- [6] Rapoport LM, Gazimiev MA, Korolev DO, et al. Flexible ureteroscopy for lower pole renal stones: novel superpulse thulium (TM) fiber laser lithotripsy[J]. *Urologia*, 2020(6):89-92.
- [7] Cinman NM, Andonian S, Smith AD. Lasers in percutaneous renal procedures[J]. *World J Urol*, 2010, 28(2):135-142.
- [8] Traxer O, Corrales M. Managing Urolithiasis with Thulium Fiber Laser: Updated Real-Life Results—A Systematic Review [J]. *J Clin Med*, 2021, 10(15):3390.
- [9] Ventimiglia E, Doizi S, Kovalenko A, et al. Effect of temporal pulse shape on urinary stone phantom retro-pulsion rate and ablation efficiency using holmium:YAG and super-pulse thulium fibre lasers [J]. *BJU Int*, 2020, 126(1):159-167.
- [10] Dong H, Peng Y, Li L, et al. Prevention strategies for ureteral stricture following ureteroscopic lithotripsy [J]. *Asian J Urol*, 2018, 5(2):94-100.
- [11] Thomsen S, Pearce JA. Thermal Damage and Rate Processes in Biologic Tissues[M]// Welch AJ, van Gemert MJC, eds. *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011:487-549.
- [12] Hein S, Petzold R, Schoenthaler M, et al. Thermal effects of Ho:YAG laser lithotripsy: real-time evaluation in an in vitro model [J]. *World J Urol*, 2018, 36(9):1469-1475.
- [13] Aldoukhi AH, Ghani KR, Hall TL, et al. Thermal Response to High-Power Holmium Laser Lithotripsy [J]. *J Endourol*, 2017, 31(12):1308-1312.
- [14] He X, McGee S, Coad JE, et al. Investigation of the thermal and tissue injury behaviour in microwave thermal therapy using a porcine kidney model [J]. *Int J Hyperthermia*, 2004, 20(6):567-593.

(下转第 62 页)

- lithotomy[J]. *Front Immunol*,2022,13:1017219.
- [8] Akdeniz E,Ozturk K,Ulu MB,et al. Risk Factors for Systemic Inflammatory Response Syndrome in Patients with Negative Preoperative Urine Culture after Percutaneous Nephrolithotomy[J]. *J Coll Physicians Surg Pak*,2021,30(4):410-416.
- [9] 卢凯,陈智慧,叶绍强,等. 经皮肾镜术后全身炎症反应综合征的危险因素[J/OL]. *中华腔镜泌尿外科杂志(电子版)*,2021,15(4):289-293.
- [10] 范钧泓,吴文起,朱玮,等. 经皮肾镜取石术后全身炎症反应综合征的相关危险因素分析[J]. *中华泌尿外科杂志*,2017,38(11):857-861.
- [11] 徐方明,白璐,张森,等. 经皮肾镜碎石取石术后发生全身炎症反应综合征的列线图模型建立[J]. *医学研究生学报*,2019,32(9):968-972.
- [12] Liu J,Zhou C,Gao W,et al. Does preoperative urine culture still play a role in predicting post-PCNL SIRS? A retrospective cohort study[J]. *Urolithiasis*,2020,48(3):251-256.
- [13] Geraghty RM,Davis NF,Tzelvels L,et al. Best Practice in Interventional Management of Urolithiasis: An Update from the European Association of Urology Guidelines Panel for Urolithiasis 2022[J]. *Eur Urol Focus*,2022.
- [14] Yang Z,Lin D,Hong Y,et al. The effect of preoperative urine culture and bacterial species on infection after percutaneous nephrolithotomy for patients with upper urinary tract stones[J]. *Sci Rep*,2022,12(1):4833.
- [15] De Lorenzis E,Alba AB,Cepeda M,et al. Bacterial spectrum and antibiotic resistance of urinary tract infections in patients treated for upper urinary tract calculi;a multicenter analysis[J]. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*,2020,39(10):1971-1981.
- [16] Gu J,Song P,Chen X,et al. Comparative study of the bacterial distribution and antimicrobial susceptibility of uropathogens in older and younger patients with urinary stones[J]. *BMC Geriatr*,2022,22(1):195.
- [17] Nevo A,Mano R,Shoshani O,et al. Stone culture in patients undergoing percutaneous nephrolithotomy: a practical point of view[J]. *Can J Urol*,2018,25(2):9238-9244.
- [18] 何朝辉,唐福才,王航涛,等. 经皮肾镜碎石取石术后全身炎症反应综合征的危险因素探讨[J/OL]. *中华腔镜泌尿外科杂志(电子版)*,2017,11(4):255-259.
- [19] Kriplani A,Pandit S,Chawla A,et al. Neutrophil-lymphocyte ratio(NLR),platelet-lymphocyte ratio(PLR) and lymphocyte-monocyte ratio(LMR) in predicting systemic inflammatory response syndrome(SIRS) and sepsis after percutaneous nephrolithotomy(PNL)[J]. *Urolithiasis*,2022,50(3):341-348.
- [20] 冯大林,崔韵,张军晖,等. 经皮肾镜取石术后全身炎症反应综合征的危险因素分析[J]. *临床泌尿外科杂志*,2021,36(4):259-263.

(收稿日期:2022-08-05)

(上接第 56 页)

- [15] Cinman NM,Andonian S,Smith AD. Lasers in percutaneous renal procedures[J]. *World J Urol*,2010,28(2):135-142.
- [16] Peng Y,Liu M,Ming S,et al. Safety of a Novel Thulium Fiber Laser for Lithotripsy: An In Vitro Study on the Thermal Effect and Its Impact Factor[J]. *J Endourol*,2020,34(1):88-92.
- [17] Taratkin M,Laukhtina E,Singla N,et al. Temperature changes during laser lithotripsy with Ho:YAG laser and novel Tm-fiber laser:a comparative in-vitro study[J]. *World J Urol*,2020,38(12):3261-3266.
- [18] Andreeva V,Vinarov A,Yaroslavsky I,et al. Preclinical comparison of superpulse thulium fiber laser and a holmium:YAG laser for lithotripsy[J]. *World J Urol*,2020,38(2):497-503.
- [19] Taratkin M,Laukhtina E,Singla N,et al. Temperature changes during laser lithotripsy with Ho:YAG laser and novel Tm-fiber laser:a comparative in-vitro study[J]. *World J Urol*,2020,38(12):3261-3266.
- [20] Hardy LA,Wilson CR,Irby PB,et al. Thulium fiber laser lithotripsy in an in vitro ureter model[J]. *J Biomed Opt*,2014,19(12):128001.
- [21] 李成文,刘畅,齐士勇. 预测肾结石腔内手术后发生尿脓毒症列线图模型的建立[J]. *临床泌尿外科杂志*,2022,37(3):175-179.
- [22] 赵蓉,沈昊,周家杰,等. 肾盂尿及结石细菌培养与经皮肾镜取石术后尿脓毒症的相关性研究[J]. *临床泌尿外科杂志*,2019,34(7):557-561.
- [23] 杨嗣星,郑府,柯芹,等. 软性输尿管镜碎石术中肾盂内压力监测方法及意义[J]. *中华泌尿外科杂志*,2014,35(8):575-578.

(收稿日期:2022-08-04)