

双波源与单波源体外碎石机治疗肾及输尿管上段 结石疗效的前瞻性双中心随机对照研究

谢晓强¹ 陈斌¹ 林晓翰² 叶友新¹ 杨恩明² 邢金春¹ 段波¹ 杨水法² 王飞²

〔摘要〕 目的:探讨双波源体外碎石机治疗肾和输尿管上段结石的安全性、有效性及其与单波源碎石模式对比的优势。**方法:**本研究采用前瞻性、双中心、随机对照的方法,于2019年1月~2020年2月,按1:1的比例将符合入组条件的肾和输尿管上段结石患者通过分层区组随机方法分为试验组和对照组。试验组采用双波源碎石模式,对照组采用单波源碎石模式。比较两组患者的碎石次数、碎石时间、曝光时间、碎石能级、术中疼痛情况、碎石成功率、部分粉碎率、无粉碎率及术后并发症情况,包括肾周血肿、血尿、感染发热、皮肤瘀伤等。**结果:**本研究共纳入600例患者,其中554例患者完成试验。试验组与对照组在性别、年龄、身高、体重、结石部位、结石最大径、合并肾积水程度、结石CT值及合并症等方面比较差异无统计学意义($P>0.05$)。两组在碎石效能方面,碎石时间 $[(26.7\pm4.8)\text{ min vs. } (36.9\pm6.5)\text{ min}, P<0.05]$ 、曝光时间 $[(3.9\pm0.8)\text{ min vs. } (4.1\pm0.7)\text{ min}, P>0.05]$ 、碎石次数 $[(1372\pm179)\text{ 次 vs. } (1814\pm236)\text{ 次}, P<0.05]$ 、碎石能级 $[(10.2\pm2.1)\text{ kV vs. } (13.4\pm3.0)\text{ kV}, P<0.05]$ 、碎石成功率为 $(83.1\% \text{ vs. } 70.2\%, P<0.05)$,上述两组结果的比较,除曝光时间外,其余各项差异均有统计学意义($P<0.05$)。试验组患者的疼痛评分低于对照组 $[(5.3\pm0.9)\text{ vs. } (7.2\pm0.7), P<0.05]$ 。并发症方面,血尿、肾周血肿、感染发热、皮肤瘀伤的发生率试验组分别为9例(3.3%)、2例(0.7%)、5例(1.8%)、11例(4.0%)。对照组分别为28例(9.9%)、6例(2.1%)、4例(1.4%)、36例(12.8%),两组并发症的总体发生率比较差异有统计学意义 $[27\text{ 例}(9.9\%) \text{ vs. } 75\text{ 例}(26.6\%), P<0.05]$ 。**结论:**双波源碎石机治疗肾和输尿管上段结石安全、有效,双波源碎石机较单波源碎石模式具备更高的碎石效率、更少的并发症。

〔关键词〕 肾结石;输尿管上段结石;体外冲击波碎石术;双波源体外碎石机;随机对照研究;多中心

doi:10.13201/j.issn.1001-1420.2020.12.003

〔中图分类号〕 R692.4 **〔文献标志码〕** A

Dual shock wave lithotripter versus single shock wave mode for treatment of kidney and upper ureteral calculus: a double-center prospective randomized study

XIE Xiaoqiang¹ CHEN Bin¹ LIN Xiaohan² YE Youxin¹ YANG Enming²
XING Jinchun¹ DUAN Bo¹ YANG Shuifa² WANG Fei²

(¹Department of Urology, Xiamen Urology Center, First Affiliated Hospital of Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361003, China; ²Department of Urology, Second Affiliated Hospital of Xiamen Medical College)

Corresponding author: XING Jinchun, E-mail: xm2007@sina.com

Abstract Objective: To evaluate the clinical safety and efficacy of dual shock wave lithotripter in treating kidney or upper ureteral calculi, and compare its advantages to single shock wave mode. **Method:** A prospective, multicenter, randomized controlled study was performed from Jan. 2019 to Feb. 2020. Eligible patients were randomized in a ratio of 1:1, to either experimental group or control group. Patients in experimental group received dual shock wave lithotripter, while patients in control group received single shock wave mode. Patients were followed by CT at 2 weeks after procedure. Comparative items included shock frequency, treating time, time of exposure, treating energy, pain scale, stone clearance rate and complication. **Result:** Six hundred patients were recruited, and 554 of them were finally completed the study (272 in experimental group, 282 in control group). The demographic and preoperative parameters were comparable between the two groups ($P>0.05$). The dual shock wave subgroup achieved higher success rate (83.1% vs. 70.2%, $P<0.05$) with less treating time $[(26.7\pm4.8)\text{ min vs. } (36.9\pm6.5)\text{ min}, P<0.05]$, lower energy $[(10.2\pm2.1)\text{ kV vs. } (13.4\pm3.0)\text{ kV}, P<0.05]$ and fewer shocks $[(1372\pm179)\text{ times vs. } (1814\pm236)\text{ times}, P<0.05]$, lower complication rate $[9.9\% \text{ vs. } 26.6\%, P<0.05]$, compared with those of the single shock wave subgroup. Also, pain scale was less than that of single

¹厦门大学附属第一医院泌尿外科 厦门市泌尿系统疾病诊治中心(福建厦门,361003)

²厦门医学院附属第二医院泌尿外科

通信作者:邢金春, E-mail: xm2007@sina.com

shock wave subgroup [(5.3 ± 0.9) vs. (7.2 ± 0.7) , $P < 0.05$]. **Conclusion:** Our study shows the dual shock wave lithotripter is safe and effective for both kidney and upper ureteral calculi. Dual mode has higher success rate and fewer complications.

Key words kidney stone; upper ureteral calculi; extracorporeal shock wave lithotripsy; dual shock wave lithotripter; randomized controlled study; multicenter

近年来,伴随着科技的进步,包括输尿管镜和肾镜在内的各种内镜设备被广泛应用于尿路结石的微创治疗^[1-4],尽管腔内泌尿外科得到了迅猛发展,但体外冲击波碎石术(ESWL)作为经典的治疗方法,仍然是肾(<2 cm)及输尿管上段结石(<1.5 cm)治疗的首选。体外碎石机自 20 世纪 80 年代进入临床,现已走过了约 30 年,先后有液电式、压电式和电磁式 3 种冲击波源被应用于临床治疗。第 1 代体外冲击波碎石设备采用的是液电式技术,其疗效肯定,但一般需要麻醉或镇静来控制患者的疼痛。与液电式相比,电磁式碎石机通常可以提供更稳定和更少的能量,大大减轻了患者的疼痛,因此可以更适合于无镇静治疗。早先的碎石机都只有一个冲击波源,疼痛感与碎石机和患者之间的接触面积呈反比。最新一代的双冲击波源碎石机创新性地将冲击波能量分成两半,分别从两个反射杯发射,其接触面积是单一反射杯的两倍,在提高碎石效能的同时进一步减轻了患者的疼痛^[5-7],成为新一代体外碎石机的另一优势所在。

初步的研究显示最新一代的电磁式双波源体外碎石机安全有效^[8],然而多数研究为体外实验及动物实验,或单中心回顾性临床资料分析的结果,证据等级较弱。因此,双波源体外碎石机治疗上尿路结石的安全性和有效性仍需高等级证据支持。我院和厦门医学院附属第二医院拥有 Duet Magna 电磁式双波源体外碎石机,我们上述 2 家医院于 2019 年 1 月~2020 年 2 月,采用前瞻性临床随机、对照方法,选取符合纳入标准的拟行双波源体外碎石的肾或输尿管上段结石患者,以单波源碎石模式为对照,探讨双波源体外碎石机的安全性和有效性及其对比单波源碎石的优势所在。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选取自 2019 年 1 月~2020 年 2 月在我院及厦门医学院附属第二医院住院的肾或输尿管上段结石拟行 ESWL 治疗的患者共计 600 例。每个中心各 300 例,各中心试验组和对照组各 150 例。试验组使用双波源模式行 ESWL,对照组使用单波源模式碎石。

1.2 随机化方法及其实施

随机方法采用各分中心随机分层,在每家医院进行区组随机化。由随机数字表法随机分组,试验

组和对照组按 1:1 随机分配受试者入组。各医院按受试者入组顺序,根据随机数字表法随机分组编号予受试者进行相应的碎石。

1.3 纳入及排除标准

纳入标准:①年龄 18~70 周岁,性别不限;②经泌尿系 CT 检查确诊为肾结石最大径 <2 cm,输尿管结石最大径 <1.5 cm 的单侧单发结石,或多发结石(除最大结石外其余结石均 <0.4 cm);③术前无泌尿道感染或感染已经得到控制;④肝肾功能正常。

排除标准:①患侧合并泌尿系统畸形,如肾盂输尿管连接部梗阻、输尿管狭窄等;②BMI >28 或 <18 的患者(前期的临床工作发现过于肥胖或消瘦的患者因身体前后径与双波源发射器间 72° 夹角不相匹配,无法行双波源模式碎石);③肾下盏结石;④妊娠及哺乳期;⑤重度肾积水,估计结石嵌顿较久的;⑥心肺功能异常;⑦凝血功能异常。

1.4 研究方法

碎石方法符合入组标准的受试者完善围手术期准备后,于术前 1 d 进行随机分组。每家医院均由同一名拥有 5 年以上碎石经验的泌尿外科医生对两组患者进行碎石,采用双波源模式的患者以仰卧紧贴上、下水囊。操作者以 X 线定位结石,调整患者的体位和碎石床,将两个独立反射杯的第 2 焦点同时靶向定位于目标结石。设置每个波源的冲击波频率为 60 次/min,以双波源同步模式运行。肾结石能量设定为 8~14 kV,输尿管结石能量设定为 8~16 kV。采用单波源模式的患者,只需将 1 个焦点靶向定位于目标结石。设置每个波源的冲击波频率为 60 次/min,以单波源模式运行。肾结石能量设定为 8~14 kV,输尿管结石能量设定为 8~16 kV。

1.5 评估指标

比较两组患者的碎石次数、碎石时间、曝光时间、碎石能级、术中疼痛情况、碎石成功率(残石 <4 mm)、部分粉碎率(残石 ≥ 4 mm)、无粉碎率及术后并发症情况(血尿、肾周血肿、感染发热、皮肤瘀伤),本次研究我们定义出现血尿并发症为血尿持续时间超过碎石术后 24 h。所有患者术后 2 周复查 CT 统计治疗效果,以结石完全排出或结石碎片 <4 mm 定义为碎石成功^[9-10]。术前常规予双氯芬酸钠栓剂纳肛镇痛。疼痛评估采用数字评价量表

(numerical rating scale, NRS), 统计患者碎石中疼痛评分。以 0~10 分表示不同程度的疼痛: 0 分: 无痛; 1~3 分: 轻度疼痛(尚不影响治疗); 4~7 分: 中度疼痛(尚能耐受, 呼吸移动度加大/轻微挪动体位); 8~9 分: 重度疼痛(疼痛不能耐受, 终止治疗); 10 分: 剧痛^[11]。术后常规服用 α 受体阻滞剂(盐酸坦索罗辛 0.2mg qn)。

1.6 统计学方法

采用 SPSS22.0 统计软件处理研究数据, 计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 采用独立样本的 t 检验; 计数资料用率(%)表示, 采用 χ^2 检验或秩和检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料比较

本研究共纳入 600 例, 其中 5 例试验组患者和 8 例对照组患者因疼痛感敏锐及心慌、气促等其他不适主诉于碎石开始 5 min 内终止碎石, 退出研究; 另外 11 例患者因过于肥胖或过于消瘦无法匹配双波源发射器夹角而无法行双波源碎石亦退出研究; 还有 22 例患者(双波源组 12 例, 单波源组 10 例)因未按约定返院复查导致失访, 退出研究。最终 554 例患者入组研究, 其中试验组 272 例, 对照组 282 例。试验组和对照组的术前一般资料见表 1, 两组在性别、年龄、身高、体重、结石部位、结石最大径、合并肾积水程度、结石 CT 值及合并症方面比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。

2.2 疗效比较

试验组 272 例的碎石时间 19.5~42.3 min, 平均(26.7 $\pm$ 4.8)min。曝光时间 3.8~7.5 min, 平均(3.9 $\pm$ 0.8)min。碎石次数 800~2200 次, 平均(1372 $\pm$ 179)次。碎石能级 8~16 kV, 平均(10.2 $\pm$ 2.1)kV。一期碎石成功率为 83.1%(226/272)。部分粉碎率 7.4%(残石 $\geq$ 4 mm, 20 例)。无粉碎率 9.6%(26 例)。单波源组 282 例的碎石时间 23.0~50.7 min, 平均(36.9 $\pm$ 6.5)min。曝光时间 4.0~8.1 min, 平均(4.1 $\pm$ 0.7)min。碎石次数 800~2500 次, 平均(1814 $\pm$ 236)次。碎石能级 8~16kV, 平均(13.4 $\pm$ 3.0)kV。碎石成功率为 70.2%(198/282)。上述两组结果比较, 除曝光时间外, 其余各项比较差异均有统计学意义($P < 0.05$)。试验组和对照组患者疼痛评分分别为(5.3 $\pm$ 0.9)分和(7.2 $\pm$ 0.7)分, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 见表 2。两组均没有因不能耐受疼痛而中断治疗的患者, 其中试验组有 8 例, 对照组有 6 例因疼痛较为剧烈相应缩短了碎石时间, 但均超过 20 min。

在碎石并发症方面, 试验组 272 例患者血尿、肾周血肿、感染发热、皮肤瘀伤的发生率分别为 9

例(3.3%)、2 例(0.7%)、5 例(1.8%)、11 例(4.0%)。对照组 282 例患者血尿、肾周血肿、感染发热、皮肤瘀伤的发生率分别为 28 例(9.9%)、6 例(2.1%)、4 例(1.4%)、36 例(12.8%), 两组并发症的总体发生率比较差异有统计学意义:[27 例(9.9%)vs. 75 例(26.6%)], $P < 0.05$], 尤其是血尿和皮肤瘀伤发生率的比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 见表 2。对照组有 2 例肾周血肿范围较大, 经绝对卧床休息 4 周, 保守治疗 2 个月后复查 CT, 血肿明显吸收。其余患者的肾周血肿范围均较小(最大径 $<$ 2 cm)。

表 1 两组患者术前一般资料比较

例(%), $\bar{x} \pm s$				
项目	试验组 ($n=272$)	对照组 ($n=282$)	t/χ^2	P
性别			2.869	0.090
男	128(47.1)	153(54.3)		
女	144(52.9)	129(45.7)		
年龄/岁	39.1 $\pm$ 9.3	42.5 $\pm$ 8.5	0.924	0.310
身高/cm	168.8 $\pm$ 7.8	166.2 $\pm$ 9.0	0.442	0.740
体重/kg	65.3 $\pm$ 9.6	63.5 $\pm$ 13.0	0.875	0.662
结石部位			2.052	0.127
肾上盏	39(14.3)	25(8.9)		
肾中盏	29(10.7)	38(13.5)		
肾盂	93(34.2)	87(30.9)		
输尿管上段	111(40.8)	122(43.3)		
肾积水程度			1.108	0.292
无或轻度	233(85.7)	250(88.7)		
中度	39(14.3)	32(11.3)		
结石最大径/mm	12.5 $\pm$ 4.5	11.2 $\pm$ 3.7	0.977	0.284
CT 值/HU			2.984	0.084
<500	32(11.8)	21(7.4)		
500~1500	211(77.6)	221(78.4)		
>1500	29(10.7)	40(14.2)		
合并高血压	55(20.2)	49(17.4)	0.735	0.391
合并糖尿病	37(13.6)	34(12.1)	0.296	0.586

3 讨论

自 20 世纪 80 年代, 随着 ESWL 的出现, 因其临床有效、操作简单和并发症少使泌尿外科结石治疗发生了革命性的变化, 目前仍为绝大多数泌尿系结石治疗的首选。近些年来出现的第三代模块移动式 and 第四代双波源式体外碎石机, 使碎石的成功率不断提升^[12-14]。其中最新一代的双冲击波源碎石机, 在体外碎石模型的研究中显示: 双波源同步模式下的碎石效果要比传统的单波源好^[15]。在相同的冲击剂量下, 从双波源发射的冲击波比单源的

冲击波碎石更有效,同时疼痛及副损伤进一步降低^[16-18]。Duet Magna 型碎石机采用了最新的电磁式冲击波技术,设计为 2 个独立的液电式冲击波发射源/反射杯系统,其夹角为 72°,2 个冲击波源发射的低能冲击波从不同的角度汇聚至同一点,从而形成一个蝴蝶形焦区,从 2 个方向粉碎结石。可采用同步(2 个冲击波源同时发射冲击波)或异步/交替发射冲击波(2 个冲击波源交替发射冲击波)2 种模式。这一机型已于 2012 年获得美国 FDA 认证被批准用于治疗结石患者,并于 2016 年开始陆续引入我国市场。既往的研究多为体外及动物实验,或单中心回顾性临床资料分析结果,缺乏多中心、前瞻性的临床数据,故我们联合本省内仅有的两家拥有双波源体外碎石机的单位开展了为期一年的临床研究,以双波源体外碎石治疗肾与输尿管上段结石,并以单波源碎石模式为对照,探讨双波源体外碎石机的安全性和有效性及其优势所在。

表 2 两组患者的疗效比较

项目	例(%), $\bar{x} \pm s$			
	试验组 (n=272)	对照组 (n=282)	t/ χ^2	P
碎石时间/min	26.7±4.8	36.9±6.5	6.123	0.012
曝光时间/min	3.9±0.8	4.1±0.7	1.268	0.219
碎石能级/kV	10.2±2.1	13.4±3.0	4.937	0.029
碎石次数/次	1372±179	1814±236	14.567	0.000 2
碎石成功率 (残石<4 mm)	226(83.1)	198(70.2)	12.780	0.000 3
部分粉碎率 (残石≥4 mm)	20(7.4)	39(13.8)		
无粉碎率	26(9.6)	45(16.0)		
疼痛评分/分	5.3±0.9	7.2±0.7	6.352	0.011
并发症				
血尿	9(3.3)	28(9.9)	9.735	0.002
肾周血肿	2(0.7)	6(2.1)	1.035	0.309
感染发热	5(1.8)	4(1.4)	0.153	0.696
皮肤瘀伤	11(4.0)	36(12.8)	13.566	0.000 6
总并发症	27(9.9)	75(26.6)	25.611	0.000 2

本研究的结果显示,在两种患者一般资料相近的情况下,试验组 272 例一期碎石成功率为 83.2%,明显优于对照组($P<0.05$)。试验组碎石效能提高的可能原因为:双波源的碟形焦斑使结石靶点更加稳固,减少了靶点的移动度,提高了焦点的精准度;其包裹性的振动碎石效能,因对结石同时产生挤压和裂解的双重作用,碎石力度更大;另外,2 个冲击波同步/交替发射时,在首个冲击波产生的气穴气泡周围崩溃期间,施加第 2 次冲击波,可以显著加强对结石的粉碎作用^[15-16,18]。最后,双

波源碎石机采用了直径为 220 mm 的抛物面形反射杯,入射面积大,通过椭圆体的几何特性可以使冲击波实现无损耗聚焦。

疼痛感与碎石机和患者之间的接触面积呈反比。双冲击波源碎石机创新性地将冲击波能量平均分为两半,并从两个反射杯发射,其接触面积是单反射杯的两倍,在保持碎石有效性的前提下进一步减轻了患者的疼痛。成为新一代体外碎石机的另一优势所在。我们的研究显示,试验组患者疼痛评分为(5.3±0.9)分,明显低于对照组(7.2±0.7)分,差异有统计学意义($P<0.05$)。两组均无不能耐受疼痛而中断治疗者,其中试验组有 6 例,对照组有 4 例因疼痛较为剧烈相应缩短了碎石时间,但均超过 20 min。

在副损伤的发生率方面,双波源碎石机的冲击波剂量被一分为二,2 个冲击波发射的能量,沿不同的路径通过身体时,能量得到分流,引起损伤(焦区外)的能量被分散于 2 倍的体积内,把造成损伤的强度降低至损伤阈值以下水平,可显著降低组织损伤,从而减少了患者治疗时的疼痛和并发症^[19]。我们的研究显示。两组并发症的总发生率比较差异有统计学意义:[27 例(9.9%)vs. 75 例(26.6%)]($P<0.05$)。尤其在血尿及皮肤瘀伤发生率的比较差异有统计学意义($P<0.05$)。两组患者均无重大不良事件发生。

在研究中,我们也发现了双波源碎石机的不足之处。双波源碎石机的 2 个波源发射器的夹角固定为 72°,对于偏瘦或者偏肥胖的患者因身体前后径过小或者过大,导致无法与水囊确切贴合,所以难以实现双波源同步对焦。有文献报道此时可结合多功能体外碎石床及患者的体位进行双波源立体定位,如斜仰卧对侧背伸位,头低足高半斜卧位,或仰卧患侧后斜位基础上增加腹部前弓位等改变体位的方式^[20]。上述文献的建议我们将在日后的工作中尝试,让更多的患者能从双波源碎石机中获益。

综上所述,应用双波源碎石机治疗肾和输尿管上段结石安全、有效,双波源碎石机较单波源碎石模式具备更高的碎石效率、更少的并发症。值得临床推广。对于偏瘦或者偏胖的患者,需要改变体位或是从工业设计上改变双波源发射器的夹角,这些有待日后我们进行更多的尝试,争取让更多患者从双波源碎石机获益。

[参考文献]

- 1 曾国华,李佳胜,赵志健,等.逆行软性输尿管镜下钬激光碎石术治疗肾结石的有效性与安全性分析[J].中华泌尿外科杂志,2015,36(6):401-404.
- 2 乐有为,冯建华,朱寒亮,等.超微通道经皮肾镜取石术

- 与传统微通道经皮肾镜取石术治疗 1~2 cm 肾结石的倾向性评分匹配研究[J]. 临床泌尿外科杂志, 2019, 34(3): 183—185, 196.
- 3 贾宏亮, 李循, 曾国华, 等. 超微经皮肾镜取石术与逆行输尿管软镜手术治疗儿童上尿路结石的对比研究[J]. 中华泌尿外科杂志, 2018, 39(12): 885—889.
 - 4 杨磊, 蒋立, 唐伟. 一期输尿管软镜钬激光碎石术治疗输尿管结石合并输尿管迂曲的疗效观察[J]. 中华泌尿外科杂志, 2019, 40(7): 537—540.
 - 5 Bengio RG, Arribillaga L, Epelde J, et al. Predictive score of success adapted to our environment to improve results of extracorporeal lithotripsy[J]. Arch Esp Urol, 2016, 69(7): 398—404.
 - 6 Gatkin M, Sopotov A, Raikin I. Dual shockwave and using high-flow oxygen administration by nasal cannula (HFONC) may improve lithotripsy results[J]. Eur Urol Suppl, 2017, 16(3): e61—e62.
 - 7 Anjum F, Abbaraju J, Madaan S, et al. Initial experience with a new dual-shockwave lithotripter in the management of upper urinary tract calculi[J]. Brit J Med & Sur Urol, 2010, 3(3): 124—125.
 - 8 许晓波, 王帅, 周密, 等. 双波源体外碎石机治疗上尿路结石的有效性和安全性[J]. 中华泌尿外科杂志, 2017, 38(9): 675—678.
 - 9 Osman MM, Alfano Y, Kamp S, et al. 5-year-follow-up of Patients with Clinically Insignificant Residual Fragments after Extracorporeal Shockwave Lithotripsy[J]. Eur Urol, 2005, 47(6): 860—864.
 - 10 Wiesenthal JD, Chicalet D, Ray AA, et al. A clinical nomogram to predict the successful shock wave lithotripsy of renal and ureteral calculi[J]. J Urol, 2011, 186(2): 556—562.
 - 11 陈付强, 封明霞, 于洋, 等. 罗哌卡因对氢吗啡酮鞘内自控镇痛治疗难治性上腹部癌痛患者疗效的影响[J]. 中华疼痛学杂志, 2020, 16(2): 112—118.
 - 12 Skolarikos A, Grivas N, Kallidonis P, et al. The Efficacy of Medical Expulsive Therapy (MET) in Improving Stone-free Rate and Stone Expulsion Time, After Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy (SWL) for Upper Urinary Stones: A Systematic Review and Meta-analysis[J]. Urology, 2015, 86(6): 1057—1064.
 - 13 Lawler AC, Ghiraldi EM, Tong C, et al. Extracorporeal Shock Wave Therapy: Current Perspectives and Future Directions[J]. Curr Urol Rep, 2017, 18(4): 25.
 - 14 Elmansy HE, Lingeman JE. Recent advances in lithotripsy technology and treatment strategies: A systematic review update[J]. Int J Surg, 2016, 36(Pt D): 676—680.
 - 15 Greenstein A, Sofer M, Matzkin H, et al. Efficacy of the Duet lithotripter using two energy sources for stone fragmentation by shockwaves: an in vitro study. [J]. J Endourol, 2004, 18(10): 942—945.
 - 16 Handa RK, McAteer JA, Willis LR, et al. Dual-head lithotripsy in synchronous mode: acute effect on renal function and morphology in the pig[J]. BJU Int, 2010, 99(5): 1134—1142.
 - 17 Greenstein A, Matzkin H, Sofer M. Efficacy of the Duet lithotripter using two energy sources for stone fragmentation by shockwaves: an in vitro study[J]. J Endourol, 2004, 18(10): 942—945.
 - 18 Handa RK, McAteer JA, Evan AP, et al. Assessment of renal injury with a clinical dual head lithotripter delivering 240 shock waves per minute[J]. J Urol, 2009, 181(2): 884—889.
 - 19 陈景秋, 韦春霞, 邓艇, 等. 体外冲击波碎石技术的力学机理的研究[J]. 力学进展, 2007, 37(4): 590—600.
 - 20 Bohris C, Roosen A, Dickmann M, et al. Monitoring the coupling of the lithotripter therapy head with skin during routine shock wave lithotripsy with a surveillance camera[J]. J Urol, 2012, 187(1): 157—163.

(收稿日期: 2020-08-20)