

# 猪自由场初级肺爆震伤后动脉血气指标的变化及其应用价值

王俊康<sup>1,2</sup> 崔倩<sup>3</sup> 黄钰清<sup>1,4</sup> 张红亮<sup>1,2</sup> 王静<sup>1,2</sup> 郭程媛<sup>1,5</sup> 冯聪<sup>2</sup> 潘菲<sup>2</sup> 黎檀实<sup>2</sup>

<sup>1</sup>解放军医学院,北京 100039; <sup>2</sup>解放军总医院第一医学中心急诊医学科,北京 100039; <sup>3</sup>天津市第一中心医院放射科,天津 300192; <sup>4</sup>解放军总医院第三医学中心超声科,北京 100143;

<sup>5</sup>南开大学医学院,天津 300071

通信作者:黎檀实,Email: lts301@163.com

**【摘要】 目的** 观察自由场初级肺爆震伤(PBLI)模型猪动脉血气指标的变化,并探讨动脉血气指标在预测中重度PBLI中的应用价值。**方法** 选择成年健康长白猪9只,构建自由场PBLI猪模型,于爆炸前15 min(伤前)和爆炸后(伤后)10、30、60、120及180 min取动脉血,测定动脉血气指标及脉搏血氧饱和度(SpO<sub>2</sub>),比较不同时间点血气分析指标和SpO<sub>2</sub>水平的差异;观察肺组织大体损伤评分与病理损伤评分的变化,并分析各血气指标间的相关性。**结果** 随时间延长,各时间点pH值、动脉血氧分压(PaO<sub>2</sub>)、SpO<sub>2</sub>均较伤前降低,血乳酸(Lac)和动脉二氧化碳分压(PaCO<sub>2</sub>)较伤前升高。与伤前比较,伤后10 min血中pH值即明显下降(7.39±0.06比7.46±0.02,  $P<0.05$ ), Lac即明显升高(mmol/L: 3.61±2.89比1.10±0.28,  $P<0.05$ ),持续到伤后180 min [pH值: 7.37±0.07比7.46±0.02, Lac(mmol/L): 2.40±0.79比1.10±0.28, 均 $P<0.05$ ];而伤后180 min PaO<sub>2</sub>、SpO<sub>2</sub>明显下降 [PaO<sub>2</sub>(mmHg, 1 mmHg=0.133 kPa): 59.40±10.94比74.81±9.39,  $P<0.05$ ; SpO<sub>2</sub>: 0.75±0.11比0.89±0.08,  $P<0.05$ ], PaCO<sub>2</sub>明显升高(mmHg: 56.17±5.38比48.42±4.93,  $P<0.05$ )。相关性分析显示:肺爆震伤动物大体损伤评分与病理损伤评分呈正相关( $r=0.866$ ,  $P=0.005$ ); PaO<sub>2</sub>与SpO<sub>2</sub>呈正相关( $r=0.703$ ,  $P=0.000$ ); pH值与Lac呈负相关( $r=-0.400$ ,  $P=0.006$ ); pH值与PaCO<sub>2</sub>呈负相关( $r=-0.844$ ,  $P=0.000$ )。**结论** 本研究成功建立了大型哺乳动物自由场PBLI模型,动脉血气分析有助于PBLI的早期诊断, SpO<sub>2</sub>是否可用于评价肺损伤的严重程度有待于进一步验证。

**【关键词】** 肺爆震伤; 动物模型; 动脉血气

**基金项目:**“十三五”军队重点学科建设项目(A350109);国家重点研发计划项目(2019YFF0302300);军队生物安全研究专项(19SWAQ28);军委科技委主题项目(19-163-12-ZT-006-008-08);解放军总医院军事医学转化项目(ZH19016)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20210809-001154

## Changes of arterial blood gas indexes of free-field primary blast lung injury of pigs and its application value

Wang Junkang<sup>1,2</sup>, Cui Qian<sup>3</sup>, Huang Yuqing<sup>1,4</sup>, Zhang Hongliang<sup>1,2</sup>, Wang Jing<sup>1,2</sup>, Guo Chengyuan<sup>1,5</sup>, Feng Cong<sup>2</sup>, Pan Fei<sup>2</sup>, Li Tanshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Medical School of Chinese PLA, Beijing 100039, China; <sup>2</sup>Department of Emergency, the First Medical Centre, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100039, China; <sup>3</sup>Department of Radiology, Tianjin First Central Hospital, Tianjin 300192, China; <sup>4</sup>Department of Ultrasound, the Third Medical Centre, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100143, China; <sup>5</sup>Nankai University School of Medicine, Tianjin 300071, China

Corresponding author: Li Tanshi, Email: lts301@163.com

**【Abstract】 Objective** To observe the changes of arterial blood gas indexes in pigs with the free-field primary blast lung injury (PBLI) model, and to explore the value of arterial blood gas indexes in predicting moderate to severe PBLI. **Methods** Nine adult healthy Landrace pigs were selected to construct the pig free-field PBLI model. Arterial blood samples were taken 15 minutes before the explosion (before injury) and 10, 30, 60, 120, and 180 minutes after the explosion (after injury). Arterial blood gas indexes and pulse oxygen saturation (SpO<sub>2</sub>) were measured, compare the changes of blood gas analysis indexes and SpO<sub>2</sub> levels at different time points, and observe the changes of gross injury scores and pathological injury scores of lung tissue. Analyze the correlation between the blood gas indicators. **Results** As time prolonged, at each time point, pH, arterial partial pressure of oxygen (PaO<sub>2</sub>), and SpO<sub>2</sub> were lower than those before the injury, and blood lactic acid (Lac) and arterial partial pressure of carbon dioxide (PaCO<sub>2</sub>) were higher than those before the injury. Compared with that before the injury, the pH value in the blood decreased significantly 10 minutes after the injury (7.39±0.06 vs. 7.46±0.02,  $P<0.05$ ), and the Lac increased significantly (mmol/L: 3.61±2.89 vs. 1.10±0.28,  $P<0.05$ ), and lasts until 180 minutes after injury (pH value: 7.37±0.07 vs. 7.46±0.02, Lac (mmol/L): 2.40±0.79 vs. 1.10±0.28, both  $P<0.05$ ); while PaO<sub>2</sub> and SpO<sub>2</sub> decreased significantly at 180 minutes after injury [PaO<sub>2</sub>(mmHg, 1 mmHg = 0.133 kPa): 59.40±10.94 vs. 74.81±9.39,  $P<0.05$ ; SpO<sub>2</sub>: 0.75±0.11 vs. 0.89±0.08,  $P<0.05$ ], PaCO<sub>2</sub> increased significantly (mmHg: 56.17±5.38 vs. 48.42±4.93,  $P<0.05$ ). Correlation analysis showed that the gross injury score of lung blast injury animals was positively correlated with the pathological injury score ( $r = 0.866$ ,  $P = 0.005$ ); PaO<sub>2</sub> and SpO<sub>2</sub> were positively correlated ( $r = 0.703$ ,  $P = 0.000$ );

pH value and Lac were negative Correlation ( $r = -0.400, P = 0.006$ ); pH value is negatively correlated with PaCO<sub>2</sub> ( $r = -0.844, P = 0.000$ ). **Conclusion** This study successfully established a large mammalian free-field PBLI model, arterial blood gas analysis is helpful for the early diagnosis of PBLI, whether SpO<sub>2</sub> can be used to evaluate the severity of lung injury remains to be further verified.

**【Key words】** Blast lung injury; Animal model; Arterial blood gas

**Fund program:** The 13th Five-year Plan Military Key Discipline Construction Project of China (A350109); National Key Research and Development Program of China (2019YFF0302300); Military Biosafety Research Project of China (19SWAQ28); National Defense Science and Technology Innovation Zone of China (19-163-12-ZT-006-008-08); Military Medical Transformation Project of PLA General Hospital (ZH19016)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20210809-001154

爆炸伤是近年来军事冲突伤亡的最主要原因之一<sup>[1]</sup>。根据美军联合战区创伤登记系统的数据显示,伊拉克和阿富汗战争期间超过71%的战伤由爆炸造成<sup>[2]</sup>。保守估计从1999至2006年,恐怖袭击事件相关的爆炸伤增加了8倍<sup>[3]</sup>。因此,爆炸伤在军事和民事环境中都是一个日益严重的问题<sup>[4-5]</sup>。单纯由爆炸产生的冲击波作用于机体造成的损伤称为初级爆炸伤或初级爆震伤<sup>[6]</sup>。充满空气的器官,如肺及胃肠对冲击波最敏感<sup>[7]</sup>。冲击波作用后12 h内发生的急性肺损伤被定义为初级肺爆震伤(primary blast lung injury, PBLI),并排除穿透或钝性损伤因素<sup>[8]</sup>。肺损伤严重程度被认为是影响爆炸伤员病死率的决定性因素<sup>[9]</sup>。但肺冲击伤相关的外部体征改变不明显,且损伤程度常随暴露冲击波的性质、方位、环境和个体恢复能力的不同而有一定差异,使临床诊断困难,导致病死率较高。在无其他胸部外伤情况下,肺爆震伤的诊断主要依据病史、症状和放射学检查<sup>[10]</sup>。Wolf等<sup>[3]</sup>结合胸部X线、氧合指数(PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub>)以及是否发生支气管胸膜瘘来评估肺爆震伤的严重程度。但对于严苛的战场或灾害现场环境,在缺乏必要检查检验手段的条件下,通过简易生理指标来判定肺损伤的严重程度有重要意义<sup>[11-12]</sup>。本研究从实际出发,制备自由场猪PBLI模型,并观察动脉血气指标及脉搏血氧饱和度(pulse oxygen saturation, SpO<sub>2</sub>)的变化,探讨其在PBLI早期诊断中的价值。

## 1 材料与方法

**1.1 实验动物:**选择成年健康长白猪9只,体质量(50±5)kg,雌雄不限,由北京实创世纪小型猪养殖基地统一提供,动物许可证号:SCXK(京)2018-0011。实验开始前5 d将动物饲养在实验场地以适应环境。于实验前12 h开始禁食,但不禁水。

**1.2 实验器材与试剂:**冲击波传感器组(PCB Piezotronics Inc,美国)、16通道数据采集系统(德维创 DEWE2600,奥地利)、血气分析仪(Geotech

GEM5000,英国)、病理切片机(徕卡 RM2016,德国)、光学显微镜(尼康 NIKON CI-S,日本)。

**1.3 动物模型复制(图1):**动物预先用0.1 mL/kg剂量肌内注射(肌注)舒泰50+速眠新(以2:1体积进行配比)诱导麻醉后,再按舒泰50+速眠新1:1配比溶于生理盐水后以10 mL/h的速率静脉滴注(静滴)维持动物麻醉状态。使用联合气管导管保护气道,不进行机械通气。在便携式超声诊断仪引导下于左侧股动脉放置热稀释导管,便于抽取动脉血。将冲击波传感器组缝于胸前壁,左右各一个,使敏感端面朝向爆炸点中心。为了造成足够的肺损伤,爆炸载荷选择参考Bass等重新确立的Bowen耐受曲线。因此,目标是达到400 kPa的峰值超压和2.5 ms的正压持续时间。使用的炸药为三硝基甲苯(2,4,6-trinitrotoluene, TNT)药柱(无破片),当量为1 kg,置于空旷场地(自由场)1.5 m高处。电雷管由爆炸起爆装置引爆,延时<1 ms。电雷管固定在支撑底座上,固定在电雷管上的爆源保持裸露。为减少地面冲击波反射干扰,并模拟人体站立时肺受冲击波伤害的高度,爆炸物与实验动物胸部中心等高(爆发高度1.5 m),实验动物距炸药水平距离2.5 m。座架尺寸使每只动物在爆炸过程中都不会接触到任何物体,TNT产生的爆炸冲击波是造成动物肺损伤的唯一因素。爆炸发生后实验动物没有得到任何特殊救治。经解剖大体及病理评分均为中重度损伤的动物纳入最终实验。

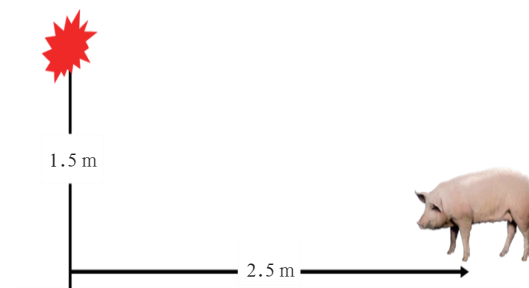


图1 猪自由场初级肺爆震伤(PBLI)模型复制过程中动物摆放示意图

**1.4 伦理学:**本研究动物处置方法符合动物伦理学标准,并经解放军总医院科研部门审核批准(审批号:SC2019-06-013)。

**1.5 检测指标**

**1.5.1 一般情况:**观察伤后 3 h 内实验动物死亡情况,记录死亡时间。致伤后观察并记录肺爆震相关症状、体征改变。置于胸前壁的冲击波传感器组记录冲击波超压峰值压力及正压持续时间。

**1.5.2 实验室指标分析:**于伤前(爆炸前 15 min)和伤后 10、30、60 min 后以每隔 1 h 抽取新鲜动脉血 1 次,利用 GEM5000 血气分析仪测定动脉血血气指标 pH 值、血乳酸(lactic acid, Lac)、动脉血氧分压(arterial partial pressure of oxygen, PaO<sub>2</sub>)、动脉血二氧化碳分压(arterial partial pressure of carbon dioxide, PaCO<sub>2</sub>)等,用监护仪 SpO<sub>2</sub> 测量模块夹于猪尾末端测定 SpO<sub>2</sub>。

**1.5.3 肺大体损伤评分:**于动物死亡即刻或实验结束(致伤后 3 h)时静脉推注氯化钾进行安乐死,按解剖规范逐层解剖,取出肺脏根据 Yelverton 等<sup>[13]</sup>和 Boutillier 等<sup>[7]</sup>的评分系统对肺部大体解剖进行损伤评估。

**1.5.4 肺组织病理损伤评分:**取双肺肺尖和中侧、下外侧、下内侧、下前侧及中内侧部位 2 cm×2 cm×2 cm 的小块肺组织各 1 个,用于组织病理学分析。肺组织样本经脱水、硬化、浸蜡和包埋等实验步骤后以 4 μm 厚度进行切片,苏木素-伊红(hematoxylin-eosin, HE)染色。光镜下随机记录 5 个放大倍数为 200 倍的组织学图像,由病理科医师进行盲法评分。根据每张切片上对 6 个参数(肺泡水肿、肺泡出血、肺间隔增厚和肺泡内炎性细胞聚集、肺内皮/上皮损伤和血栓形成)进行评分。

① 按损伤严重程度进行评分:0 分为未见明显病变,1 分为有轻度病变,2 分为中度病变,3 分为严重病变,4 分为极度严重病变;② 按病变范围程度进行评分:0 分为没有损伤,1 分为损伤≤25%,2 分为损伤 25%~50%,3 分为损伤>50%~75%,4 分为弥漫性损伤的层级分级,每张切片的总损伤评分为损伤严重程度加上损伤范围的平均数。

**1.6 统计学处理:**使用 SPSS 26.0 统计软件分析数据,符合正态分布或近似正态分布的计量数据以均数 ±

标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,采用 *t* 检验或方差分析;非正态分布的计量数据以中位数(四分位数间距)[*M*(*Q<sub>R</sub>*)]表示。计量资料的相关分析采用 Pearson 法进行相关性分析;所有统计检验均为双侧检验,*P*<0.05 为差异有统计学意义。

**2 结果**

**2.1 一般情况:**爆炸现场无实验动物死亡,约 10 min 死亡 1 只,死亡率为 11.1%。直视下观察,所有动物口鼻未见明显分泌物,其中 1 只胸前区皮肤有燎毛,所有动物胸部均未见明显外伤。伤后动物出现呼吸浅快,心率加快等表现,约 1 h 后逐渐恢复。

**2.2 冲击波:**冲击波超压峰值压力为(344.24±94.86)kPa,正压持续时间为(1.57±0.22)ms。冲击波物理参数稳定可靠,与公式计算值较为接近。

**2.3 动脉血气分析指标的变化比较(表 1):**与伤前比较,各时间点 pH 值、PaO<sub>2</sub>、SpO<sub>2</sub> 均降低, Lac、PaCO<sub>2</sub> 均升高;伤后各时间点 pH 值、Lac 与伤前比较差异均有统计学意义;而 PaO<sub>2</sub>、SpO<sub>2</sub> 仅伤后 180 min 与伤前比较差异有统计学意义(均 *P*<0.05)。综上所述,这些结果表明本实验猪 PBLI 的生理效应可真实反映人体的生理效应。

**2.4 肺组织病理学变化**

**2.4.1 肺脏大体解剖观察:**2 只动物解剖发现气道内有血性分泌物,2 只发现胸腔内有少量胸腔积液,量约 20 mL。肺表面光滑,肺组织肿胀,双肺表面均可见大小不一的淤斑,点状和片状淤斑同时存在,组织切片显示出血渗入肺实质深处。肺出血范围主要分布在左肺,肺下部出血较上部多。但未观察到典型的肋间压迹(或肋间出血)。在未见出血的肺组织切缘可见红色泡沫状液体溢出。通过对双侧肺大体评分分级,大多为 III~IV 级中重度损伤,损伤评分(3.50±0.53)分。

表 1 自由场 PBLI 猪模型伤前和伤后不同时间点血气分析指标比较( $\bar{x} \pm s$ )

时间	动物数(只)	pH 值	Lac (mmol/L)	PaO <sub>2</sub> (mmHg)	PaCO <sub>2</sub> (mmHg)	SpO <sub>2</sub>
伤前 15 min	8	7.46±0.02	1.10±0.28	74.81±9.39	48.42±4.93	0.89±0.08
伤后 10 min	8	7.39±0.06 <sup>a</sup>	3.61±2.89 <sup>a</sup>	73.50±7.50	49.28±3.68	0.83±0.13
伤后 30 min	8	7.36±0.06 <sup>a</sup>	4.11±2.16 <sup>a</sup>	68.67±18.17	52.43±3.51	0.85±0.14
伤后 60 min	8	7.37±0.06 <sup>a</sup>	3.57±1.80 <sup>a</sup>	68.00±19.92	49.85±3.89	0.83±0.16
伤后 120 min	8	7.39±0.06 <sup>a</sup>	2.86±1.12 <sup>a</sup>	71.17±18.23	52.86±5.93	0.82±0.16
伤后 180 min	8	7.37±0.07 <sup>a</sup>	2.40±0.79 <sup>a</sup>	59.40±10.94 <sup>a</sup>	56.17±5.38 <sup>a</sup>	0.75±0.11 <sup>a</sup>

注:PBLI 为初级肺爆震伤, Lac 为血乳酸, PaO<sub>2</sub> 为动脉血氧分压, PaCO<sub>2</sub> 为动脉血二氧化碳分压, SpO<sub>2</sub> 为脉搏血氧饱和度; 1 mmHg=0.133 kPa; 与伤前 15 min 比较, <sup>a</sup>*P*<0.05

**2.4.2 肺组织病理学观察(图 2):**光镜下可见肺组织损伤的病理改变,包括不同程度的肺泡壁部分断裂,肺泡间质可见出血、淤血或充血,肺泡间隔水肿、增宽,间隙消失,肺泡腔内可见大量纤维素渗出,伴有红细胞和炎性细胞渗出;同时,肺组织也表现为肺不张,肺泡壁部分或全部塌陷,肺组织实变。通过对双侧肺各部位病理评分分级,大多为 II ~ IV 级中重度损伤,损伤评分( $2.47 \pm 0.21$ )分,其中 1 只经病理学评分为 1.41 分,为轻度损伤故未入组。

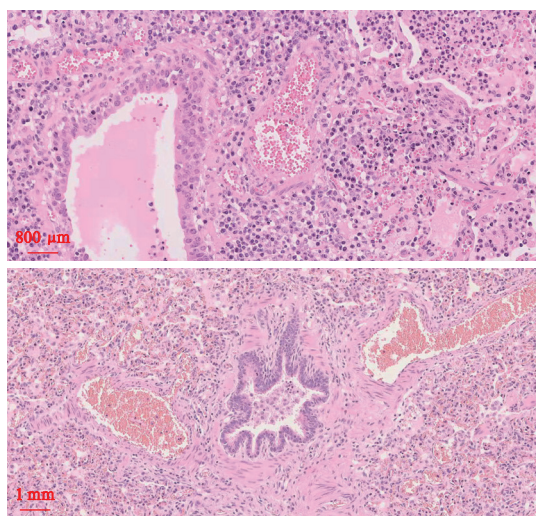


图 2 光镜下观察自由场初级肺爆震伤(PBLI)猪模型肺组织的病理学改变 肺泡内可见液体或纤维素渗出,伴有红细胞和炎症细胞,肺泡间质可见出血、水肿、间隔增宽及肺不张表现 HE 染色 中倍放大(上)、低倍放大(下)

**2.5 相关性分析:**相关性分析显示,肺爆震伤动物大体损伤评分与病理损伤评分呈正相关( $r=0.866$ ,  $P=0.005$ );  $\text{PaO}_2$  与  $\text{SpO}_2$  呈正相关( $r=0.703$ ,  $P=0.000$ );  $\text{pH}$  值与  $\text{Lac}$  呈负相关( $r=-0.400$ ,  $P=0.006$ );  $\text{pH}$  值与  $\text{PaCO}_2$  呈负相关( $r=-0.844$ ,  $P=0.000$ )。

### 3 讨论

近年来,无论是平时还是战时,爆炸伤的发生率均在逐年增加<sup>[14-15]</sup>。在这些爆炸伤伤员中约有 8.1% 发生了 PBLI<sup>[16]</sup>。中重度 PBLI 伤情复杂、隐匿并可危及生命,有些患者的症状可能会明显延迟,如何简便准确诊断 PBLI 的需求日益迫切<sup>[10]</sup>。

建立一致性较好的爆炸伤实验动物模型是研究的基础<sup>[17]</sup>。目前 PBLI 模型主要分为真实爆炸物、生物激波管及分离式霍普金森杆(split-hopkinson pressure bar, SHPB)等<sup>[18-19]</sup>。自由场真实爆炸实验的优点之一是能更真实接近弗里德兰波,但这也增加了试验的难度与不确定性<sup>[20]</sup>。激波管等模拟

真实爆炸实验重复性好、伤情简单且实验复杂程度低,但超压上升时间和持续时间比自由场爆炸产生的冲击波要长,而且超压之后的负压则很难复制成功<sup>[19]</sup>。本实验得到的冲击波质量与重复性较好,记录的超压值和正压持续时间较符合公式推断值。本研究通过对肺脏大体解剖与病理组织学损伤进行评分将中重度以上损伤的动物纳入实验,可较好地保证损伤的一致性。

PBLI 是冲击波作用于胸壁、肺组织和肺血管的直接结果,可引起肺泡和(或)毛细血管屏障的物理损伤,导致肺出血和水肿,也可能形成空气和脂肪栓塞,并诱导早期炎症反应;同时伴有肺组织细胞氧化应激增加,细胞凋亡增加<sup>[21-22]</sup>。爆炸冲击波致伤严重程度随暴露的性质、方位、环境和个体恢复能力不同而有一定差异,仅靠爆炸超压并不能准确反映机体的损伤程度<sup>[23]</sup>。有研究表明,PBLI 的临床表现差异性很大,并且特异性相当低<sup>[24-25]</sup>。严重肺部损伤出现症状的速度很快,甚至可能现场死亡,而轻度损伤可能早期无症状,只在后来出现严重并发症时才被怀疑<sup>[26]</sup>。但同时有另外一些研究显示,PBLI 的损伤诊断明确且发展迅速<sup>[27]</sup>。这可能与爆炸发生地点距离救治医院较近以及医疗资源充足有关。胸部 X 线对于任何怀疑暴露在高冲击波超压下、有肺部症状及体征或有其他冲击伤证据的伤员都有必要,X 线检查结果有诊断和预后预测价值并可用来对严重程度进行分类<sup>[24]</sup>。胸部 CT 对于肺爆震伤的诊断更敏感,但对批量爆震伤伤员均进行 CT 扫描并不现实<sup>[28]</sup>。也有研究者证实,超声可用于冲击性肺损伤的快速评估和动态监测<sup>[29-30]</sup>。Pizov 等<sup>[9]</sup>的一项研究表明,除胸部 X 线检查外, $\text{PaO}_2/\text{吸入氧浓度}$ (fraction of inspiration oxygen,  $\text{FiO}_2$ ) 比值和有无支气管胸膜瘘也可以用来判定肺损伤的严重程度,并有助于预测呼吸管理和预后。与之相似,本实验观察到长白猪在爆震伤后出现了明显的  $\text{PaO}_2$  下降以及酸中毒。一些炎性因子的变化可能与肺冲击伤有关,但在发病后 12 ~ 24 h 达到峰值,可能不适用于早期诊断<sup>[22, 31-32]</sup>。动脉血氧饱和度(arterial oxygen saturation,  $\text{SaO}_2$ ) 是动态监测血中血氧含量的重要指标,可评价呼吸及循环功能状态,有研究表明,有时甚至伤者还未出现任何症状即可检测出  $\text{SaO}_2$  的降低<sup>[3]</sup>。对于严苛的战场环境或灾害现场,在缺乏必要的检查检验手段的条件下,一些无创生理指标的采集就显得尤为必要<sup>[16, 33]</sup>。脉氧饱和度

指夹仪可十分方便地监测 SpO<sub>2</sub> 的变化,但 SpO<sub>2</sub> 能否有效监测爆炸导致的肺损伤尚缺乏实验证实。本研究表明,SpO<sub>2</sub> 伤后 180 min 与伤前比较差异有统计学意义,可能是预测的一个相关性指标。

总之,本研究成功建立了一种具备较强可重复性和一致性的大型哺乳动物自由场 PBLI 模型,证明了用猪构建自由场一次爆炸诱导中度至重度肺爆震伤模型的可重复性,反映了预期的致伤效果,结果肯定了血气对于 PBLI 的早期诊断价值;而 SpO<sub>2</sub> 是否可用于评价肺损伤的严重程度受样本量有限及观察时间较短等的影响,结论有待于进一步实验验证。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- Mathews ZR, Koefman A. Blast injuries [J]. *J Emerg Med*, 2015, 49 (4): 573–587. DOI: 10.1016/j.jemermed.2015.03.013.
- McDonald Johnston A, Alderman JE. Thoracic injury in patients injured by explosions on the battlefield and in terrorist incidents [J]. *Chest*, 2020, 157 (4): 888–897. DOI: 10.1016/j.chest.2019.09.020.
- Wolf SJ, Beharta VS, Bonnett CJ, et al. Blast injuries [J]. *Lancet*, 2009, 374 (9687): 405–415. DOI: 10.1016/S0140-6736(09)60257-9.
- Edwards DS, McMenemy L, Stapley SA, et al. 40 years of terrorist bombings—a meta-analysis of the casualty and injury profile [J]. *Injury*, 2016, 47 (3): 646–652. DOI: 10.1016/j.injury.2015.12.021.
- Smith S, Devine M, Taddeo J, et al. Injury profile suffered by targets of antipersonnel improvised explosive devices: prospective cohort study [J]. *BMJ Open*, 2017, 7 (7): e014697. DOI: 10.1136/bmjopen-2016-014697.
- Wightman JM. Pathophysiology of primary blast injury [J]. *Ann Emerg Med*, 2017, 70 (1): 104–105. DOI: 10.1016/j.annemergmed.2017.02.021.
- Boutillier J, Deck C, De Mezzo S, et al. Lung injury risk assessment during blast exposure [J]. *J Biomech*, 2019, 86: 210–217. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2019.02.011.
- Tian LQ, Guo ZH, Meng WZ, et al. The abnormalities of coagulation and fibrinolysis in acute lung injury caused by gas explosion [J]. *Kaohsiung J Med Sci*, 2020, 36 (11): 929–936. DOI: 10.1002/kjm2.12262.
- Pizov R, Oppenheim-Eden A, Matot I, et al. Blast lung injury from an explosion on a civilian bus [J]. *Chest*, 1999, 115 (1): 165–172. DOI: 10.1378/chest.115.1.165.
- Aschkenasy-Steuer G, Shamir M, Rivkind A, et al. Clinical review: the Israeli experience: conventional terrorism and critical care [J]. *Crit Care*, 2005, 9 (5): 490–499. DOI: 10.1186/cc3762.
- 张连阳, 李阳. 爆炸伤的院前急救与早期救治策略 [J]. *第三军医大学学报*, 2020, 42 (18): 1771–1776. DOI: 10.16016/j.1000-5404.202006240.
- Zhang LY, Li Y. Strategies for pre-hospital and early in-hospital management for explosion injuries [J]. *J Third Mil Med Univ*, 2020, 42 (18): 1771–1776. DOI: 10.16016/j.1000-5404.202006240.
- Rocksén D, Arborelius UP, Gustavsson J, et al. Severe, transient pulmonary ventilation-perfusion mismatch in the lung after porcine high velocity projectile behind armor blunt trauma [J]. *Exp Lung Res*, 2020, 46 (8): 271–282. DOI: 10.1080/01902148.2020.1797246.
- Yelveton JT. Pathology scoring system for blast injuries [J]. *J Trauma*, 1996, 40 (3 Suppl): S111–115. DOI: 10.1097/00005373-199603001-00025.
- Aboudara M, Mahoney PF, Hicks B, et al. Primary blast lung injury at a NATO Role 3 hospital [J]. *J R Army Med Corps*, 2014, 160 (2): 161–166. DOI: 10.1136/jramc-2013-000216.
- 李开源, 冯聪, 陈力, 等. 初级爆震伤后凝血功能变化的研究进展 [J]. *中华危重病急救医学*, 2020, 32 (5): 632–635. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200106-00091.
- Li KY, Feng C, Chen L, et al. Advances in research on changes of coagulation system after primary blast injury [J]. *Chin Crit Care Med*, 2020, 32 (5): 632–635. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200106-00091.
- Scott TE, Johnston AM, Keene DD, et al. Primary blast lung injury: the uk military experience [J]. *Mil Med*, 2020, 185 (5–6): e568–e572. DOI: 10.1093/milmed/usz453.
- 范崇熙, 张志培, 程庆书, 等. 胸部爆震伤致急性呼吸窘迫综合征模型的建立及相关因素分析 [J]. *中华危重病急救医学*, 2011, 23 (4): 243–246, 后插 3. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1003-0603.2011.04.018.
- Fan CX, Zhang ZP, Cheng QS, et al. Experimental study on acute respiratory distress syndrome and analysis of relevant factors in rabbits subjected to thoracic blast trauma [J]. *Chin Crit Care Med*, 2011, 23 (4): 243–246, insert 3. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1003-0603.2011.04.018.
- Nguyen TT, Pearce AP, Carpanen D, et al. Experimental platforms to study blast injury [J]. *J R Army Med Corps*, 2019, 165 (1): 33–37. DOI: 10.1136/jramc-2018-000966.
- Kumar R, Nedungadi A. Using gas-driven shock tubes to produce blast wave signatures [J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 90. DOI: 10.3389/fneur.2020.00090.
- Ning YL, Zhou YG. Shock tubes and blast injury modeling [J]. *Chin J Traumatol*, 2015, 18 (4): 187–193. DOI: 10.1016/j.cjtee.2015.04.005.
- Peters P. Primary blast injury: an intact tympanic membrane does not indicate the lack of a pulmonary blast injury [J]. *Mil Med*, 2011, 176 (1): 110–114. DOI: 10.7205/milmed-d-10-00300.
- Qi XL, Hao J, Huang LJ, et al. Apoptotic mechanisms in rabbits with blast-induced acute lung injury I [J]. *Acta Cir Bras*, 2018, 33 (10): 896–903. DOI: 10.1590/s0102-865020180100000004.
- Arun P, Oguntayo S, Alameh Y, et al. Rapid release of tissue enzymes into blood after blast exposure: potential use as biological dosimeters [J]. *PLoS One*, 2012, 7 (4): e33798. DOI: 10.1371/journal.pone.0033798.
- Sziklavari Z, Molnar TF. Blast injuries to the thorax [J]. *J Thorac Dis*, 2019, 11 (Suppl 2): S167–S171. DOI: 10.21037/jtd.2018.11.106.
- 张连阳. 爆炸冲击伤的诊断 [J]. *创伤外科杂志*, 2017, 19 (2): 157–162. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2017.02.026.
- Zhang LY. Diagnosis of explosive blast injury [J]. *J Tauma Surg*, 2017, 19 (2): 157–162. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2017.02.026.
- Rodriguez RM, Langdorf MI, Nishijima D, et al. Derivation and validation of two decision instruments for selective chest CT in blunt trauma: a multicenter prospective observational study (NEXUS Chest CT) [J]. *PLoS Med*, 2015, 12 (10): e1001883. DOI: 10.1371/journal.pmed.1001883.
- Smith JE. The epidemiology of blast lung injury during recent military conflicts: a retrospective database review of cases presenting to deployed military hospitals, 2003–2009 [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2011, 366 (1562): 291–294. DOI: 10.1098/rstb.2010.0251.
- Lichtenberger JP, Kim AM, Fisher D, et al. Imaging of combat-related thoracic trauma – blunt trauma and blast lung injury [J]. *Mil Med*, 2018, 183 (3–4): e89–e96. DOI: 10.1093/milmed/usx033.
- Xue YQ, Wu CS, Zhang HC, et al. Value of lung ultrasound score for evaluation of blast lung injury in goats [J]. *Chin J Traumatol*, 2020, 23 (1): 38–44. DOI: 10.1016/j.cjtee.2019.11.005.
- 赵媛媛, 张霞, 冯聪, 等. 超声应用于爆震伤院前救治的实验研究 [J/CD]. *中华医学超声杂志 (电子版)*, 2019, 16 (12): 963–966. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1672-6448.2019.12.015.
- Zhao YY, Zhang X, Feng C, et al. Application of ultrasound in pre-hospital rescue for blast injury: an experimental study [J/CD]. *Chin J Med Ultrasound (Electronic Edition)*, 2019, 16 (12): 963–966. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1672-6448.2019.12.015.
- 施琳, 佟昌慈, 丛培芳, 等. 丹参酮 II A 对小鼠肺爆震伤导致的脑损伤的保护作用 [J]. *武警医学*, 2021, 32 (5): 416–420. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3594.2021.05.012.
- Shi L, Tong CC, Cong PF, et al. Tanshinone II A inhibits brain injury caused by lung blast injury Protective effect of Tan-shinone II A on brain injury induced by lung blast injury in mice [J]. *Med J Chin PAP*, 2021, 32 (5): 416–420. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3594.2021.05.012.
- Li N, Geng CH, Hou SK, et al. Damage-associated molecular patterns and their signaling pathways in primary blast lung injury: new research progress and future directions [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21 (17): 6303. DOI: 10.3390/ijms21176303.
- 赵大伟, 房学梅, 付维林. 天津港爆炸爆震伤的影像学表现 [J]. *武警医学*, 2019, 30 (2): 162–164, 184. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3594.2019.02.024.
- Zhao DW, Fang XM, Fu WL. Imaging manifestations of blast injuries in Tianjin Port [J]. *Med J Chin PAP*, 2019, 30 (2): 162–164, 184. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3594.2019.02.024.