

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2021.09.001  
文章编号: 1005-8982 (2021) 09-0001-06

专家述评

## 颅脑战创伤机制及救治研究进展\*

张剑宁, 程岗

(中国人民解放军总医院第一医学中心 神经外科医学部, 北京 100853)

**摘要:** 颅脑战创伤(bTBI)是致残、致死率最高的战创伤类型。在机制方面, 冲击波损伤及弹道伤是bTBI的特有损伤形式, 能通过影响颅内压、空腔效应等机制造成脑组织广泛损伤。分级救治是提高bTBI救治能力, 降低死亡率的有效方法。解放军总医院在bTBI治疗的信息化方面进行了多年研究, 结合手术机器人、远程手术等新技术, 进一步提高了bTBI的救治水平。

**关键词:** 颅脑战创伤; 机制; 分级救治; 手术机器人; 5G

**中图分类号:** R82

**文献标识码:** A

## Mechanism and treatment of blast-related traumatic brain injury\*

Jian-ning Zhang, Gang Cheng

(Department of Neurosurgery, The First Medical Center, PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

**Abstract:** Blast-related traumatic brain injury (bTBI) is with the highest morbidity and mortality in war-related trauma. In terms of mechanism, shock wave injury and ballistic injury are unique in bTBI, which can cause extensive brain damage by increased intracranial pressure and cavity effect. Graded treatment is an effective method to improve treatment efficacy and reduce the mortality of bTBI. The PLA General Hospital focused on informatization of bTBI treatment for many years, combined with the application of new technologies such as surgical robot and remote surgery, which has made due contributions to further improving the treatment level of bTBI.

**Keywords:** blast-related traumatic brain injury; mechanism; graded treatment; surgical robot; 5G

近年来, 国际局势正在发生深刻变化, 国际形势中的不稳定、不确定因素明显增加。以美国为首的西方国家为了阻止我国的崛起, 不断通过各种手段进行遏制, 我们在崛起的道路上必然面对各种军事压力。能战方能止战, 加强战创伤研究是提高我军卫勤保障能力的重要一环。在所有战创伤类型中, 颅脑战创伤(blast-related traumatic brain injury, bTBI)的致残、致死率最高。1991年的海湾战争被认为是现代高科技战争的标志, 这种战争时空转变快、跨度大、突发性强, 具有广延性、多变性、交叉性、立体

性、破坏性、分散性、机动性、连续性的特点。武器的精度更高、杀伤力更大, bTBI的发生率更高。2001年—2005年伊拉克及阿富汗美军伤员统计发现, bTBI发生率高于二战、朝鲜战争及越南战争时期。2000年—2016年, 共有361 092例美军士兵被诊断为bTBI; 2020年1月, 伊朗导弹袭击伊拉克美军基地, 所有伤员均为bTBI。北大西洋公约组织还成立了专业的研究团队, 将bTBI作为环境毒性问题进行研究<sup>[1]</sup>。因此, 只有加强bTBI的机制和治疗研究, 才能有效提高我军的卫勤保障能力, 适应现代战争需求。

收稿日期: 2021-04-18

\* 基金项目: 全军后勤科研计划课题重大项目 (No: AHJ14J001); 全军装备科研项目 (No: LB20201A010026、LB20191A010010); 全军后勤科研项目 (No: BWS208038)

[作者简介] 张剑宁, 男, 博士, 主任医师, 研究方向: 脑肿瘤、脑外伤、脑血管病、脊髓肿瘤。E-mail: zjianning\_doctor@163.com

## 1 bTBI的损伤机制

过去30年间,美国陆军医学研究和装备司令部军事职业医学研究项目一直致力于bTBI的研究,并于2008年发表了经典的bTBI致伤因素分类<sup>[2]</sup>。bTBI的损伤分为4级。一级损伤是冲击波直接作用于机体造成的损伤,也称为气压损伤;二级损伤是由弹片或其他抛射物击中机体产生的损伤;三级损伤是指在冲击波作用下,身体跌落、撞击等引起的加速或减速性损伤;四级损伤是由爆炸产生的高温、化学性因素等造成的损伤。在这些损伤机制中,一级和二级损伤是bTBI中比较独特的致伤因素。

### 1.1 一级损伤机制

在一级损伤中,研究的焦点之一是冲击波通过什么机制对颅内压产生影响,包括4种假说:颅骨骨孔假说、颅腔直接传播假说、胸腔压力传递假说及颅骨变形假说。

**1.1.1 颅骨骨孔假说** 颅骨骨孔理论认为,冲击波通过听道、鼻窦、眼眶等骨孔进入颅腔,引起颅内压升高。在有关听道的研究中,发现爆炸能引起听道的损伤,包括鼓膜穿孔、听骨链损伤、毛细胞丢失、出血、前庭和听觉系统损伤等<sup>[3]</sup>。有限元模型研究发现,虽然冲击波超压在听道中会被放大,但是颅内压并没有明显改变<sup>[4]</sup>,说明通过听道的冲击波对颅内压的影响有限,因而其不是引起bTBI的主要因素。冲击波也能引起鼻窦的直接损伤,对231例阿富汗及伊拉克bTBI伤员的研究发现,中重度bTBI伤员会出现嗅觉功能障碍,而轻度bTBI伤员出现嗅觉功能障碍概率很低<sup>[5]</sup>。研究发现颅骨内窦腔能够影响冲击波对颅骨的作用方式,但对颅内压是否有影响缺乏深入研究<sup>[6]</sup>。此外,冲击波也能引起视网膜、脑组织视觉中枢等的损伤<sup>[7]</sup>,但是爆炸后是否对眼睛进行保护并不影响颅内压的变化<sup>[8]</sup>,因此眼眶也不是颅内压变化的关键影响因素。综上所述,现有研究仅发现骨孔和骨窦能使冲击波作用于颅骨后的传播方式更复杂,但是对颅内压影响的研究结果并不一致。

**1.1.2 颅腔直接传播假说** 颅腔直接传播理论认为冲击波能够直接穿过颅骨进入颅内,进而对颅内压产生影响。但是,冲击波在不同介质之间进行传递时,存在透射和反射。两种介质的阻抗值差别越大,

冲击波被反射的比例就越高,反之,两种介质的阻抗值差值越小,冲击波透射的比例就越高。空气的阻抗值为 $0.0004 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,而颅骨的阻抗值为 $7.75 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,计算发现空气中的冲击波到达颅骨界面后,透过率仅有0.04%,到达脑组织的比例仅有0.005%<sup>[9]</sup>。因此理论而言冲击波很难直接穿透颅骨对颅内压产生影响。但是,不同的模型模拟和动物实验结果并不一致<sup>[10]</sup>,部分研究者仍认为冲击波能够穿透颅骨,进入脑内。因此,颅腔直接传播理论需要进一步研究证实。

**1.1.3 胸腔压力传递假说** 这一理论认为胸腹腔的冲击波通过血管和软组织传入脑内,引起颅内压的升高。但是,血管内的阻力与半径的4次方成反比,随着脑血管直径的缩小,阻力会显著增大。单纯胸腔冲击试验或单纯颅脑冲击试验均能引起颈内动脉内压力的升高<sup>[11]</sup>,但是现有研究并没有量化冲击波压力、胸腔内压力、颅内压之间的关系,因此尚不能完全解释冲击波后颅内压的升高。

**1.1.4 颅骨变形假说** 这一理论与颅腔直接传播理论相反,认为颅骨在冲击波作用下产生变形和振动,进而影响颅内压。这方面有动物和实验证据<sup>[12]</sup>。大鼠颅脑冲击波研究发现,大鼠颅骨变形的程度与冲击波强度呈正相关,颅骨中缝、冠状缝、人字缝是变形最明显的区域<sup>[13]</sup>,证实颅骨变形可能是颅内压出现梯度变化的重要因素。

### 1.2 冲击波在颅内的传播特点

笔者所在团队近年来承担一系列军事课题,对不同场景下的冲击波致伤特点进行了全面研究,并首次探讨了颅内外冲击波压力关系。研究发现冲击波在透过颅骨之后其传播方式没有发生根本性变化,也没有时间延迟,证实颅骨和脑组织对外界冲击波有一定阻挡作用,但是冲击波仍能够进入颅腔,影响颅内压。而且自由场和水下环境爆炸时,脑表面的颅内压峰值与外界冲击波峰值存在相应的指数关系<sup>[14]</sup>。但是不同场景下的冲击波对颅内的影响有各自特点。

**1.2.1 自由场** 爆炸形成的高压气体比周围气体的密度、压力大很多,形成冲击波快速地向外传播,理想自由场环境下,冲击波以圆球形向外扩散。脑组织压力测量曲线变化和颅骨外压力测量

曲线走势接近,在脑组织和颅骨的缓冲作用下脑组织压力测量曲线的量值较小且更为平滑,颅内方向测得的颅内冲击波峰值和外界存在一定的相关性( $r=0.804$ )<sup>[14]</sup>。

**1.2.2 舱室** 冲击波在舱室内传播时,由于受到舱壁的阻挡和多次反射,存在明显的准静态压力,舱室爆炸对机体产生的破坏作用高于自由场<sup>[15-20]</sup>。冲击波也能透过颅骨进入颅内,由于舱室爆炸后波形极其复杂,颅内外的冲击波强度并没有明显的数值关系。

**1.2.3 水下** 水下爆炸时,由于水的密度和波阻都较大,冲击波很快与气泡分离,并独自向前传播。因此,水中爆炸会先后产生水中冲击波和气泡脉动压力波。这两种波都成比例地通过胸腹部上传至脑部,两者的数值也存在相关性( $r=0.767$ )<sup>[14]</sup>。

笔者的研究结果明确证实冲击波能够从颅骨及脑组织两个方向对颅内压产生影响,但是背后的机制并不相同。颅骨变形假说能够解释来自颅骨方向的冲击波影响。但是胸腔压力传递假说不能圆满解释水下爆炸后,为何颅内压与冲击波的数值有相关性。AKTAS等通过测量不同部位的脑脊液循环特点发现,脑脊液循环同时受到心率和呼吸的影响,从头端到骶尾部,呼吸影响因素逐渐增强,呼吸幅度越大,对脑脊液循环的影响越明显,这种影响与静脉回流量和动脉泵血量改变有关<sup>[21]</sup>。笔者认为,爆炸后冲击波通过作用于胸腹腔对循环系统的血流量造成影响,类似于AKTAS试验中深呼吸对脑脊液循环的影响,最终导致颅内压改变,而非冲击波直接通过血管进入脑组织所致。

### 1.3 二级损伤机制

**1.3.1 弹道伤分类** 根据弹道特点,可分为切线伤、盲管伤和贯通伤。根据子弹或投射物的速度,可分为低速(低于300 m/s,如手枪)、中速(300~600 m/s,如轻型自动步枪)、高速(超过600 m/s,如AK-47、加利尔突击步枪等)。炮弹爆炸后的破片速度明显高于子弹射速。笔者对炮弹破片速度进行了实际测量。76 mm炮弹爆炸破片的最大初速度为1 404 m/s,130 mm炮弹爆炸破片侵彻两层厚度为4 mm的钢板并在空中飞行3 400 mm后速度仍高达1 020 m/s。根据动能公式,投射物的动能与速

度的平方成正比,因此射速是影响动能的主要因素。当射速低于300 m/s时,对脑组织的损伤效应主要是单纯的挤压效应;射速超过700 m/s时,对颅骨和脑组织的损伤明显增加,空腔效应也更明显,枪弹出颅的破口大于入口,速度越高,出颅的破口越大。

**1.3.2 弹道伤病理特点** 投射物直接损伤:投射物穿过颅脑,造成伤道;瞬时空腔效应:子弹高速通过颅脑,在其前方形成正压区,后方形成负压区,形成比原发伤道大出几倍至几十倍的瞬时空腔;压力波作用:子弹在组织内形成的压力波;远隔部位的损伤:如子弹致伤头颅时,在脊髓、心肺等部位出现的损伤。此外,弹道伤还有一些特殊的病理现象。JOHNSON和DUTT首先发现高速子弹击中颅骨后,由于能量传递,造成远隔部位骨折,这类骨折与子弹的入口骨折并不连续,他们将其称为“discrete”现象<sup>[22]</sup>。约1/3火器伤死亡病例出现这种骨折,被称为“不连续骨折”<sup>[23]</sup>。这类骨折易发生于颅底,因此,枪弹伤伤员出现脑脊液漏的比例明显高于一般伤员。

**1.3.3 弹道伤伤情特点** 颅脑贯通伤的现场死亡率高达71%,院前死亡率为66%~93%<sup>[24]</sup>。435例两伊战争火器伤员伤势分析显示,颅脑贯通伤、盲管伤和切线伤中的重型颅脑损伤占比分别为48.8%、19.9%和15.6%,颅脑贯通伤在死亡伤员和存活伤员中的占比分别为47.9%和24.0%<sup>[25]</sup>。

## 2 bTBI的分级救治

bTBI的救治分秒必争,重型bTBI自然死亡时间为5 min,紧急非手术处置,可延长生命1 h;早期清创手术,可再延长生命2 h,伤后4 h手术,死亡率比4 h内手术增加3倍。因此战场救治提出了“急救黄金1 h,白金10 min”的理念,为了提高救治效率,救治前移是唯一途径。

### 2.1 我军的bTBI救治分级

**2.1.1 现场急救** 通常由卫生兵和营、连抢救组人员完成,主要内容包括止血、包扎伤口,保持呼吸道通畅,迅速后送。止血、包扎、固定、搬运、通气是现场急救需要具备的5大基本急救技能。

**2.1.2 紧急救治** 由卫生士官和团以下单位军医

在战场或团救护所完成，主要任务是对休克的颅脑伤员，抗休克的同时进行全身检查，对一侧或两侧瞳孔散大的颅内高压、脑疝患者，使用脱水药控制病情，颅脑穿透伤伤员应尽快后送到专科医院。

**2.1.3 早期治疗** 通常由师救护所及相当救治机构完成，主要任务包括进行简要的神经系统检查和全身检查，注意伤情变化，头皮清洁处理，进行伤员分类，由于条件限制，只开展损伤控制性手术(头皮清创缝合术、硬膜外血肿清除术、硬膜下血肿清除术、颅内血肿清除术、去骨瓣减压术)，如果有专科手术队补充，具备手术条件时，可做彻底清创，病情平稳的伤员，后送到有神经外科加强的医院进行专科治疗，对濒危伤员，采取紧急后送。

**2.1.4 专科治疗** 通常由基地医院和后方医院完成，主要内容包括详细全面的神经查体，根据轻重缓急，合理安排手术次序，火器伤一次彻底清创(72 h内伤口)，彻底清创的颅脑伤，伤口可做一期缝合，对于手术后脑水肿严重，清创不彻底者，做减张缝合；已有感染迹象的伤道，做部分缝合，放置引流，头皮伤口部分缝合或不缝合。

## 2.2 美军的分级救治

**2.2.1 一级救治** 相当于我军的现场急救，包括自救、互救，即刻的生命支持，重点是采取必要措施使伤员重返战斗岗位或稳定病情以便后送至下一层级医疗机构，包括维持呼吸道通畅、止血、抗休克、保护伤口、制动骨折及其他必要的急救措施。

**2.2.2 二级救治** 相当于我军的紧急救治，进行高级创伤处置和急救，一般分为轻装机动型和加强型两种，轻装机动型是指用于为地面机动分队提供支援的装备较轻、高度机动的医疗队，加强型具备基本的二级救护、初步手术、重症监护和病床收容能力。

**2.2.3 三级救治** 相当于我军的早期和专科救治，拥有人员及工作动物救治设备，可处理各类伤情，包括复苏、初步手术、专科治疗和术后处理，后送配属部队伤员，依靠合适的人员和设备处理各种类型的伤情，为缺乏医疗能力的友邻部队提供支持。

**2.2.4 四级救治** 相当于我军的部分专科和康复治疗，依托美国本土和条件较好的盟国后方医院，

能够满足从冲突地区后送伤员的需求，这是整个医疗救治体系能提供的最佳治疗。

## 3 bTBI关键救治技术

根据战伤救治规则，bTBI的早期救治可简单归纳为A(Airway,保持气道畅通)、B(Bleeding,控制出血)、C(Compression-relief,解除颅内压迫)、D(Debridement,清创)、E(Edema,控制脑水肿)、F(Function,尽可能保护脑功能)原则。后期治疗包括并发症的治疗：感染、癫痫、脑脊液漏、血管损伤等，颅骨修补，功能康复等。在整个治疗过程中，预防和控制感染是bTBI治疗的重要措施。bTBI容易出现颅内异物，脑脊液漏发生率高，伤情也较重，这些都是颅内感染的高危因素<sup>[26]</sup>。因此，所有开放性bTBI均需尽早预防性应用抗生素，抗生素的选择应该包括针对革兰阳性菌和革兰阴性菌。2008年，美国国防部颁布了战创伤感染控制临床应用指南，指南建议在抗生素应用方面尽量使用最广谱的抗生素进行预防。在抗生素使用时程上目前无统一标准，KAZIM等建议抗生素预防性应用7~14 d<sup>[27]</sup>。脑脊液漏在得到控制之前，需一直使用抗生素。若有脑室外引流，抗生素用至拔除引流管为止<sup>[28]</sup>。

此外，bTBI患者容易出现各类精神和心理障碍。2010年，美国国防部制定一项强制性政策，规定所有疑似颅脑爆震伤患者必须接受军事急性脑挫伤评估，而且在参加军事行动之前须再次接受评估。采用这种方法，美军仅在参加阿富汗军事行动的人员中就检查出14 950例脑挫伤患者，并且建立11所脑挫伤治疗中心。这些患者没有明显的运动和语言功能障碍，筛查和诊断是难点，也是目前bTBI研究的重点内容之一，除了各类评分量表之外，多模态影像诊断、脑电图、基因筛查等也逐渐成为重要的检查手段<sup>[29]</sup>。

## 4 bTBI的信息化和智能化研究

现代化战争突发性强、战场转换快。传统的分级救治方法很难满足现代战争的需求。为此，本院在远程诊疗、手术机器人等方面进行了多年研究，提出了解决这一难题的新策略，取得了突破性进展。

#### 4.1 远海bTBI快速救治系统研究

本院1997年在国内率先研制了手术机器人并用于临床,开创了国内神经外科机器人手术先例,入选当年“中国医药科技十大新闻”<sup>[30]</sup>,被中央电视台的“新闻联播”栏目报道。针对海上医疗环境,研制系列手术机器人。2003年在国际上首次成功实施遥控操作手术,实现优质医疗资源共享。2011年,在海军“866”医院船上成功实施了遥控机器人模拟手术,开创了远海遥控操作神经外科手术先河,为提升我军海上救治能力提供了关键技术。英国密德萨斯大学GAO教授给予了高度评价<sup>[31]</sup>。

#### 4.2 5G远程bTBI控制手术救治模块

这一模块包括立体定向手术机器人、移动式头颅CT、远程操控系统、损伤控制手术器械箱组构成,具有信息化、智能化、小型化等特点。能将bTBI手术救治前移到第二级救治阶梯,救治时机由伤后6~8h缩短到2~3h。本院2019年代表联保部队参加“全军信息化建设成果展”,2020年代表解放军总医院参加联保部队“现代物流展示”,受到各级领导的高度赞扬。其中,5G远程操控手术受到国内外广泛关注,联合国副秘书长哈雷、白俄罗斯参谋长潘菲奥罗夫、德国总理默克尔派博伊莱公司总栽先后来院参观。

综上所述,面对越来越严峻的国际形式,必须牢记树立“姓军为兵、姓军为战”的思想,结合现代战争形式,不断加强bTBI的研究,才能确保部队战斗力,为我国的现代化建设保驾护航。

#### 参考文献:

[1] LEGGIERI M J Jr, BIELER D, BJARNASON S, et al. environmental toxicology of blast exposures: injury metrics, modelling, methods and standards[J]. J R Army Med Corps, 2019, 165(1): 7-9.

[2] JAMES H S. Blast Injury: Translating Research Into Operational Medicine[M]. Washington DC: Office of the Surgeon General at TMM Publications, Borden Institute, Walter Reed Army Medical Center, US Army Medical Dept. Center & School, 2010.

[3] BALLIVET de RÉGLOIX S, CRAMBERT A, MAURIN O, et al. Blast injury of the ear by massive explosion: a review of 41 cases[J]. J R Army Med Corps, 2017, 163(5): 333-338.

[4] AKULA P, HUA Y, GU L. Blast-induced mild traumatic brain injury through ear canal: a finite element study[J]. Biomed Eng

Lett, 2015, 5(4): 281-288.

[5] XYDAKIS M S, MULLIGAN L P, SMITH A B, et al. Olfactory impairment and traumatic brain injury in blast-injured combat troops: a cohort study[J]. Neurology, 2015, 84(15): 1559-1567.

[6] AKULA P, HUA Y, GU L. Role of frontal sinus on primary blast-induced traumatic brain injury[J]. J Med Device, 2013; 7(3): 030925.

[7] de MAR J, SHARROW K, HILL M, et al. Effects of primary blast overpressure on retina and optic tract in rats[J]. Front Neurol, 2016, 7: 59.

[8] LEONARDI A D, BIR C A, RITZEL D V, et al. Intracranial pressure increases during exposure to a shock wave[J]. J Neurotrauma. 2011, 28(1): 85-94.

[9] FIEVISOHN E, BAILEY Z, GUETTLER A, et al. Primary blast brain injury mechanisms: current knowledge, limitations, and future directions[J]. J Biomech Eng, 2018, 140(2): DOI: 10.1115/1.4038710.

[10] SELVAN V, GANPULE S, KLEINSCHMIT N, et al. Blast wave loading pathways in heterogeneous material systems-experimental and numerical approaches[J]. J Biomech Eng, 2013, 135(6): 61002-61014.

[11] GOLDSTEIN L E, FISHER A M, TAGGE C A, et al. Chronic traumatic encephalopathy in blast-exposed military veterans and a blast neurotrauma mouse model[J]. Sci Transl Med, 2012, 4(134): 134ra60.

[12] WARE J B, BIESTER R C, WHIPPLE E, et al. Combat-related mild traumatic brain injury: association between baseline diffusion-tensor imaging findings and long-term outcomes[J]. Radiology, 2016, 280(1): 212-219.

[13] BOLANDER R, MATHIE B, BIR C, et al. Skull flexure as a contributing factor in the mechanism of injury in the rat when exposed to a shock wave[J]. Ann Biomed Eng, 2011, 39(10): 2550-2259.

[14] 程岗, 李彦腾, 魏铂沅, 等. 不同海战环境爆炸后比格犬颅内外压力变化特点的实验研究[J]. 中华神经创伤外科电子杂志, 2021, 7(1): 6-11.

[15] 皇甫罗锴, 程岗, 贾博, 等. 多舱室爆炸致比格犬血清皮质醇、生长激素、泌乳素的变化及其与伤情的关系[J]. 中国临床神经外科杂志, 2020, 25(2): 94-97.

[16] 毛汉丁, 程岗, 刘帅, 等. 舱室内爆炸震伤后HIF-1 $\alpha$ 、NF- $\kappa$ B在犬脑和肺组织的表达及其相关性[J]. 中华神经外科疾病研究杂志, 2018, 17(4): 314-318.

[17] 刘帅, 程岗, 刘邦鑫, 等. 多舱室爆炸比格犬致伤特点与伤情分析[J]. 解放军医学杂志, 2017, 42(11): 1011-1015.

[18] 刘邦鑫, 程岗, 刘帅, 等. 舰船多舱室爆炸致比格犬颅脑爆炸伤模型建立及伤情分析[J]. 第二军医大学学报, 2017, 38(1): 106-111.

[19] 李彦腾, 程岗, 刘帅, 等. 舱室内爆炸致大鼠颅脑爆炸伤模型的建立[J]. 解放军医学杂志, 2017, 42(9): 820-825.

- [20] 李彦腾, 程岗, 刘帅, 等. 舰船邻舱爆炸致比格犬脑损伤的实验研究[J]. 解放军医学杂志, 2017, 42 (3): 234-238.
- [21] AKTAS G, KOLLMEIER J M, JOSEPH A A, et al. Spinal CSF flow in response to forced thoracic and abdominal respiration[J]. *Fluids Barriers CNS*, 2019, 16(1): 10.
- [22] JOHNSON R T, DUTT P. On dural laceration over paranasal and petrous air sinuses[J]. *Br J Surg*, 1947, 55(Suppl 1): 141-167.
- [23] CAMPBELL E, KUHLENBECK H. Mortal brain wounds; a pathologic study[J]. *J Neuropathol Exp Neurol*, 1950, 9(2): 139-149.
- [24] AARABI B. Surgical outcome in 435 patients who sustained missile head wounds during the Iran-Iraq war[J]. *Neurosurgery*. 1990, 27(5): 692-695.
- [25] ROSENFELD J V, BELL R S, ARMONDA R. Current concepts in penetrating and blast injury to the central nervous system[J]. *World J Surg*, 2015, 39(6): 1352-1362.
- [26] JIMENEZ C M, POLO J, ESPAÑA J A. Risk factors for intracranial infection secondary to penetrating craniocerebral gunshot wounds in civilian practice[J]. *World Neurosurg*. 2013, 79(5/6): 749-755.
- [27] KAZIM S F, SHAMIM M S, TAHIR M Z, et al. Management of penetrating brain injury[J]. *J Emerg Trauma Shock*, 2011, 4(3): 395-402.
- [28] SONABEND A M, KORENFELD Y, CRISMAN C, et al. Prevention of ventriculostomy-related infections with prophylactic antibiotics and antibiotic-coated external ventricular drains: a systematic review[J]. *Neurosurgery*, 2011, 68(4): 996-1005.
- [29] GALINA V P, IRINA N G, OLGA V M. Residual and compensatory changes of resting-state EEG in successful recovery after moderate TBI[J]. *Brain Science Advances*, 2020, 6(4): 364-378.
- [30] 佚名. 97 中国医药科技十大新闻条目[J]. *现代临床医学生物工程学杂志*, 1998, 4(1): 57.
- [31] GAO X. The anatomy of teleneurosurgery in China[J]. *Int J Telemed Appl*, 2011, 2011: 353405.

(张蕾 编辑)

本文引用格式: 张剑宁, 程岗. 颅脑战创伤机制及救治研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2021, 31(9): 1-6.

Cite this article as: ZHANG J N, CHENG G. Mechanism and treatment of blast-related traumatic brain injury[J]. *China Journal of Modern Medicine*, 2021, 31(9): 1-6.