

基于综合损伤程度的大鼠颅脑前后向-侧向碰撞HIC关系

朱林娜, 王国祥, 王讯, 罗庆航, 熊涛, 陈秋菊, 许竞毓, 于佳, 刘盛雄
重庆理工大学药学与生物工程学院生物医学工程系, 重庆 400054

【摘要】目的:探讨前后向(AP)碰撞与侧向(LM)碰撞中头部损伤评价标准(HIC)值的关系。**方法:**雄性SD大鼠102只,随机分为对照组0 m(6只)、4组AP实验组和4组LM实验组(12只/组)。大鼠适应性训练后,采用经典Marmarou模型构建颅脑AP碰撞与LM碰撞系列高度损伤模型,并测量获取各组HIC。实验组分别于损伤前后24 h获取走杆实验、抓力实验,于损伤后24 h获取胼胝体与脑干锥体束出血占比的数据。**结果:**随着AP组和LM组碰撞高度的增加,走杆实验时间和抓力实验峰值变化均呈正相关,胼胝体和脑干锥体束的出血比例增加。根据综合损伤程度值与HIC数学关系可知:相同损伤值下,LM-HIC小于AP-HIC,并拟合出了AP-HIC和LM-HIC的数学关系。HIC相同时,LM组损伤程度更为严重,同时AP组的头部碰撞更耐受。**结论:**相同HIC,LM组损伤程度比AP组更严重。AP-HIC与LM-HIC之间初步显示存在线性数学关系。实验结果有望拓展HIC的适用范围并达成对于颅脑LM碰撞损伤程度的准确评估。

【关键词】创伤性颅脑损伤;头部损伤评价标准;冲击损伤生物力学;动物实验

【中图分类号】R318.0

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2025)03-0406-09

HIC relationship of anterior-posterior and lateral-medial collisions based on the comprehensive evaluation of injury

ZHU Linna, WANG Guoxiang, WANG Xun, LUO Qinghang, XIONG Tao, CHEN Qiuju, XU Jingyu, YU Jia, LIU Shengxiong
Department of Biomedical Engineering, School of Pharmacy and Biological Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract: Objective To explore the relationship between the head injury criterion (HIC) values in anterior-posterior (AP) collisions and lateral-medial (LM) collisions. **Methods** A total of 102 male SD rats were randomly divided into a control group of 0 m (6 rats), 4 AP groups (12 rats/group) and 4 LM groups (12 rats/group). After adaptive training, the classical Marmarou model was used to execute the brain AP and LM collisions under a series of different height impacts, and the HIC values were calculated. The experimental group data of the walk-pole test and grip strength test were collected at 24 hours before and after injury, and the data of the proportion of hemorrhage in the corpus callosum and pyramidal tracts were collected at 24 hours after injury. **Results** As the collision heights increased in both AP and LM groups, there were positive correlations with changes in WP test time and peak GS, and corresponding increases in the proportion of hemorrhage in the cc and py. According to the mathematical relationships between the comprehensive injury degrees and HIC values, it was found that at the same injury degree, LM-HIC value was less than AP-HIC value. A mathematical relationship between AP-HIC and LM-HIC was fitted based on the comprehensive injury degrees. At the same HIC, LM group experienced more severe injuries, and AP group was more tolerant to head collision. **Conclusion** The injury severity in LM group is greater than that of AP group at the same HIC. Preliminary results show there is a linear mathematical relationship between AP-HIC and LM-HIC. These results can be expected to expand the application scope of HIC and achieve an accurate assessment of the LM collision severity.

Keywords: traumatic brain injury; head injury criterion; impact injury biomechanics; animal experiment

【收稿日期】2024-11-05

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0800702-3)

【作者简介】朱林娜,研究方向:颅脑碰撞损伤生物力学机制, E-mail: 18325172829@163.com; 王国祥,研究方向:颅脑碰撞损伤生物力学机制, E-mail: 2574132838@qq.com(朱林娜与王国祥为共同第一作者)

【通信作者】刘盛雄,博士,副教授,研究方向:颅脑碰撞损伤生物力学机制, E-mail: shengxiongliu@cqut.edu.cn

前言

颅脑外伤的发病率在各种类型的创伤中居于首位,占全身各部位损伤的15%~20%^[1]。交通事故导致的颅脑损伤在各类颅脑损伤中占首位^[2]。交通事故中的颅脑损伤类型可分为加速损伤、减速损伤和挤压损伤。有关加速性脑损伤的力学和医学机制的报

道较多,如基于光学显微镜、免疫组化、分子生物学以及生物力学反应参数如应变、应力等对脑损伤开展直接研究^[3-8];但有关颅骨厚度不均、脑损伤部位不同以及脑组织损伤敏感性差异的关联研究报道较少^[9]。目前流行的头部损伤评价标准(Head Injury Criterion, HIC)重点纳入了颅脑前后向(Anterior Posterior, AP)的碰撞数据,难以将其直接用于评判颅脑侧向(Lateral-Medial, LM)碰撞导致的损伤程度。因此,引入多模态综合损伤程度,对颅脑AP-HIC和LM-HIC之间的数学关系进行分析,并得出不同方向HIC值之间的等效转换关系,对于不同方向碰撞下颅脑损伤程度的准确评估意义重大。啮齿类动物和人类大脑的功能结构非常相似,在创伤性轴索损伤研究方面,大鼠脑干锥体束(Pyramidal Tract, py)和胼胝体(Callosum, cc)是常用的实验动物模型^[8]。在实验模型方面,改良的Marmarou损伤模型常被用于构建啮齿类动物的加速损伤模型,该致伤模型制作简单且可重复性强,能复刻不同损伤程度的脑损伤模型^[10-11]。颅脑受力引发脑组织水肿、脑神经轴索损伤及内血管破裂并扩散至内部,引发脑组织器质性损伤;而神经功能受损则导致控制认知、运动的通路异常,进而生物体肢体功能控制障碍。由于动物行为学能对动物的肢体障碍程度做出客观评价,因此可以利用动物行为学探究实验前后的功能性损伤变化以评估其损伤程度。此外,颅脑损伤后,应力集中于cc和py并导致相应部位出血^[12]。苏木精-伊红(Hematoxylin-eosin, HE)染色用于反映脑组织损伤后的出血情况,如脑缺血药物研究多选择此指标进行评价^[13]。因此,也可利用HE染色方法对脑损伤后cc和py区域的损伤程度进行评估。

HIC作为目前通用的衡量头部损伤的数据值,重点考虑线性碰撞动态响应^[14-16]。有研究表明旋转碰撞动态响应同样会对头部损伤产生很大影响^[17]。事实上,不同碰撞部位的刚度和线性碰撞速度对人颅脑组织响应都有较大的影响^[18]。过往研究常忽略颅骨结构的差异,较少关注大脑受到不同方向碰撞(不同碰撞部位)情况下的头部损伤标准^[19]。因此,有必要对颅脑受到不同方向碰撞情况下的损伤程度进行评价和比对,实现AP-HIC与LM-HIC的数学关系转化。

为实现对颅脑不同方向碰撞的多模态综合评价,结合组织病理学与动物行为学是有必要的。因此,本研究旨在通过大鼠颅脑建立不同方向碰撞的Marmarou加速损伤模型,以AP和LM碰撞的综合损伤程度为研究对象采用走杆(Walking Pole, WP)实验、抓力(Grasp Strength, GS)实验、cc和py的HE染

色实验研究方法,以因子分析获取权重得出综合损伤程度值,探究基于综合损伤程度值的AP-HIC与LM-HIC之间的数学关系,以期有助于评价交通损伤中不同方向颅脑碰撞的综合损伤程度。

1 材料与方法

1.1 损伤模型

本研究经重庆理工大学动物伦理委员会审核批准。WP装置、肢体GS装置和改良Marmarou加速致伤装置(图1a)均由课题组研究设计^[20-22]。所有大鼠麻醉后致伤,冲击锤450 g,冲击直径(头盔)为10 mm。研究样本选用SD雄性大鼠102只,体质量为(400±50)g;随机分对照组0 m(n=6)以及实验组0.75AP、1.25AP、1.75AP、2.25AP、0.75LM、1.25LM、1.75LM、2.25LM,每组12只,共96只。致伤高度为0.00、0.75、1.25、1.75、2.25 m^[23]。AP碰撞区是大鼠头部两耳之间的区域,LM碰撞区是左耳与眼睛之间的区域(图1b)。对照组6只动物被随机编号,需完成行为学实验和组织病理学实验;实验组每组12只,损伤后随机选取6只进行动物行为学实验,余下6只进行组织病理学实验。

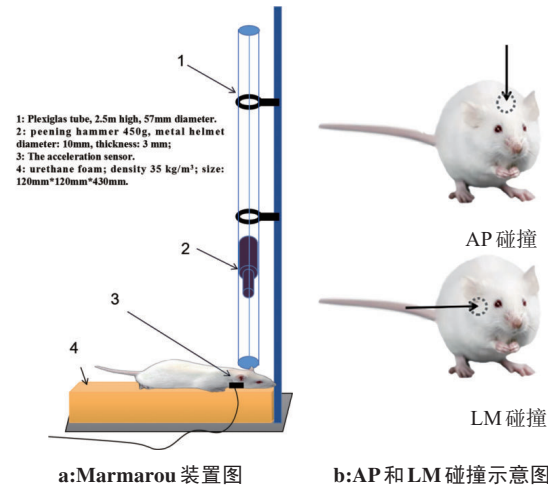


图1 致伤装置与碰撞部位图

Figure 1 Injury device and collision sites

1:有机玻璃管,高2.5 m,直径57 mm;2:打击锤450 g,接触面为金属头盔,直径10 mm,厚度3 mm;3:加速度传感器;4:聚氨酯泡沫,密度35 kg/m³,尺寸120 mm×120 mm×430 mm

1.2 方法

1.2.1 动物行为学 大鼠进行适应性饲养。完成适应性训练后,分别记录损伤前和损伤24 h后的WP时间数据,其中杆长1 m。GS实验详细步骤参照石菁菁等^[24]。记录损伤前和损伤后24 h的GS峰值,每组3次,每次测试间隔15 min。

1.2.2 组织病理学 利用标准解剖技术取出大鼠脑组织直接固定,利用10%中性缓冲多聚甲醛固定24~48 h,对关注部位脑组织标准化取样,采用标准技术石蜡包埋标本。脑组织被切成5~7 μm的厚度。对于HE的组织病理学解释,遵循Wick^[25]的方法。采用显微镜来获取脑组织的出血占比图片,其中红色斑点为组织出血斑点,蓝紫色为细胞核。

1.2.3 HIC 大鼠采用科学注射法处死,通过标准解剖技术暴露出大鼠LM组对面的颞骨和AP组的鼓骨,安装并固定单轴线加速度传感器。每组测试3次。传感器的采样频率为50 kHz。根据式(1)计算各AP组和LM组的HIC值^[26]:

$$HIC = \max \left\{ \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \right) \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \quad (1)$$

其中, t_1 和 t_2 是HIC完成最大加速度的时间开始和结束。 $a(t)$ =加速度曲线。

1.3 数据分析

1.3.1 图像采集 每组随机抽取4只大鼠脑组织的cc和py区域。每只大鼠选取4张切片。每组可分别获取16张cc区域与py区域的片子,其中每张片子选取3个位置在10×40倍光镜下采集图像,利用Image-J图像处理对每张片子做出血占比的平均处理,分别获得关于9组16个cc出血数据与py出血数据。

1.3.2 统计学处理 采用Graphpad Prism 9.5 软件进行统计学分析,各类数据比较采用重复测量方差分析;进行组织病理学与动物行为学组的显著性和相关性分析, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。利用SPSSAU在线分析进行因子分析,以获取各成分的权重^[27-29],量化不同部位的综合损伤程度值^[30]。使用Origin 2019b分析回归拟合,比较最优 R^2 ,并分别拟合关于综合损伤程度值和AP-HIC与LM-HIC数学关系;在大鼠致伤高度组对应的HIC和综合损伤程度值范围内,比较最优 R^2 ,并拟合AP-HIC和LM-HIC对应数学关系的曲线。

2 结果与分析

2.1 结果

表1为AP组和LM组大鼠24 h后cc与py区域的HE染色出血占比情况以及肢体GS大小与WP实验时间变化。

2.2 分析

2.2.1 显著性分析 在组织病理学角度,由16个cc和py样本的出血占比数据表明:py组角度下,2.25AP组和0.75AP组($P<0.01$)、2.25LM组和0.75LM组($P<0.001$)之间的差异有统计学意义(图2a);cc组角度下:2.25AP组和0.75AP组($P<0.01$)、2.25LM组和

0.75LM组($P<0.01$)之间的差异有统计学意义(图2b)。可知实验组的较低碰撞高度和最高碰撞高度之间的py和cc出血比例差异显著;实验组同一碰撞方向当高度增加,cc和py的出血比例数据也随之增加。

表1 各组大鼠实验结果标准化后数据
Table 1 Data after standardization of experimental results in each group of rats

组别	cc 标准化	py 标准化	GS 标准化	WP 标准化
0 m	0	0	0	0
0.75AP	0.126 9	0.2104	0.493 8	0.130 4
1.25AP	0.254 4	0.279 1	0.683 0	0.391 3
1.75AP	0.745 4	0.534 9	0.819 0	0.521 7
2.25AP	0.872 0	0.821 9	0.837 0	0.608 6
0.75LM	0.135 3	0.331 2	0.551 1	0.217 3
1.25LM	0.367 1	0.416 0	0.823 1	0.521 7
1.75LM	0.893 6	0.712 2	0.951 1	0.608 6
2.25LM	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

py组出血占比数据与cc组采用配对 t 检验,结果显示:cc部位数据组与py部位数据组之间的差异有统计学意义($P<0.05$),除个别极低碰撞高度组外,py出血占比数据均大于cc区域(图2c);AP组出血占比数值比其对应LM组别的数值更小(图2d)。随着致伤高度增加,不同组别间差异增大。

在动物行为学角度,分别对WP和GS实验的9组实验数据进行显著性分析。GS组数据结果:2.25AP组与0.75AP损伤组($P<0.05$)、2.25LM组与0.75LM组($P<0.05$)实验数据差异有统计学意义(图3a);WP组实验结果:2.25LM组与0.75LM组($P<0.001$)、2.25AP组与0.75AP组($P<0.001$)实验数据差异有统计学意义(图3b)。可见AP较低碰撞高度组与最高碰撞高度组之间,GS数据和WP数据在各组间的变化情况有显著性差异,LM较低碰撞高度组与最高碰撞高度组之间也有类似结论。

2.2.2 相关性分析 本研究利用线性回归分析评价不同研究角度下的数据的一致性,利用Pearson相关分析描述数据的相关大小和正负相关。从组织病理学的角度下,图4a、b是对AP组与LM组在对不同碰撞等级损伤水平下HE染色实验的cc与py出血占比标准化后数据进行线性回归分析。无论是AP组还是LM组,碰撞高度和两个部位的出血占比标准化后数据成正比。

结合Pearson相关系数研究AP-py、AP-cc分别和LM-py、LM-cc之间的相关关系,由表2可知:颅脑碰

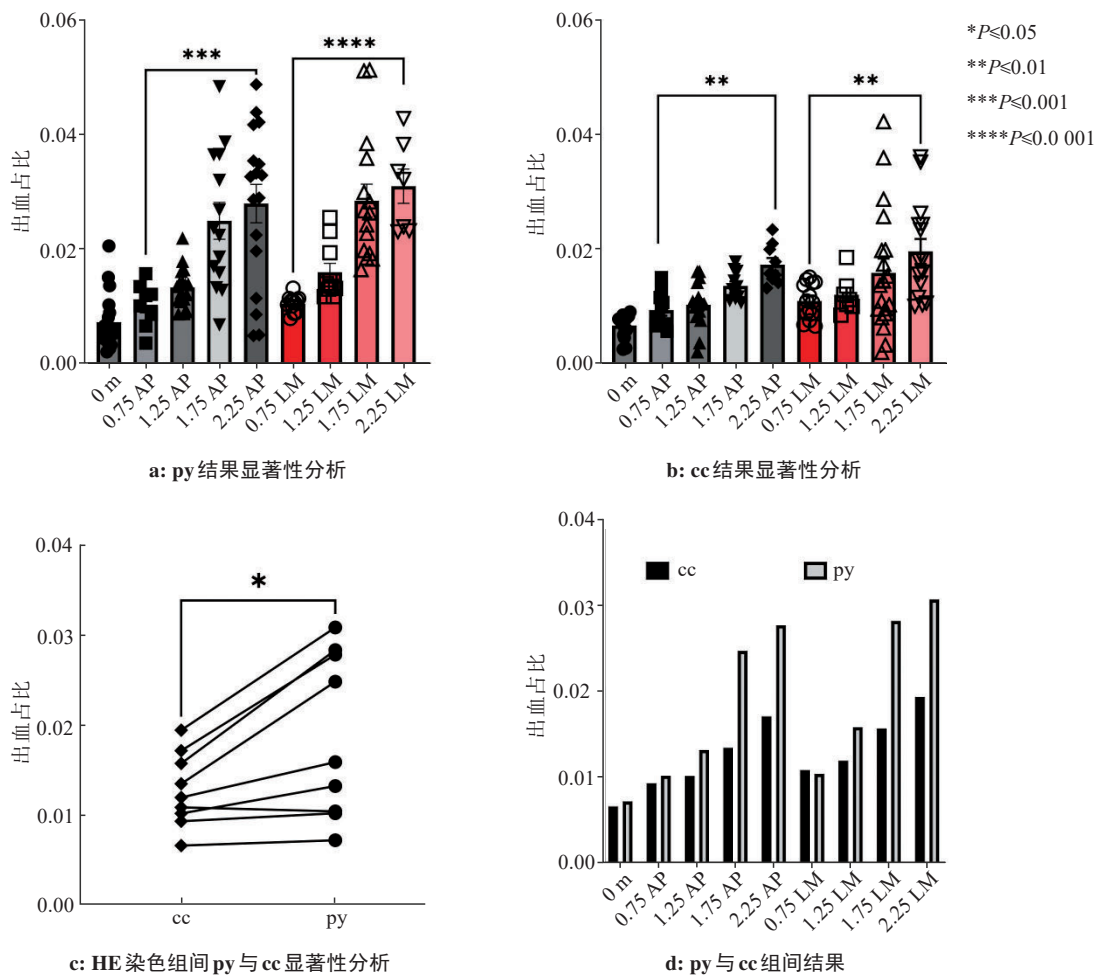


图2 组织病理学实验结果显著性分析

Figure 2 Significance analyses of histopathological experimental results

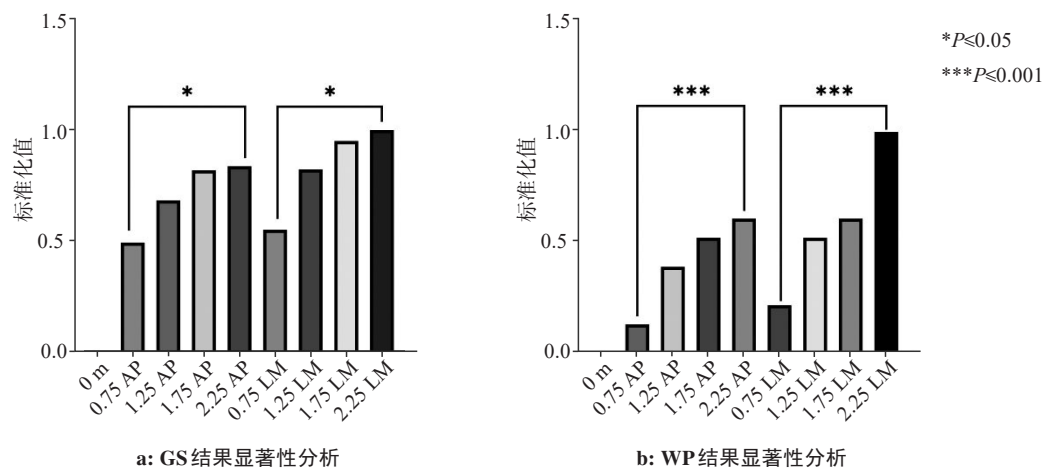


图3 动物行为学实验结果显著性分析

Figure 3 Significance analyses of the results of animal behavioral experiments

撞方向不同时,AP-py和LM-py、AP-cc和LM-cc之间的相关系数值为0.814、0.569;颅脑相同碰撞方向时,AP-py与AP-cc、LM-py与LM-cc之间的相关系数值为0.887、0.846;均呈现出0.01水平的显著性。因此,AP-py和LM-py、AP-cc和LM-cc、AP-py和AP-cc、

LM-cc和LM-py之间有着显著的正相关关系。由此可知相同碰撞方向,不同脑组织区域的器质性损伤程度不同;相同脑组织区域,碰撞方向不同,引发的器质性损伤程度不同。

从动物行为学的角度下,图4c、d是对AP组与

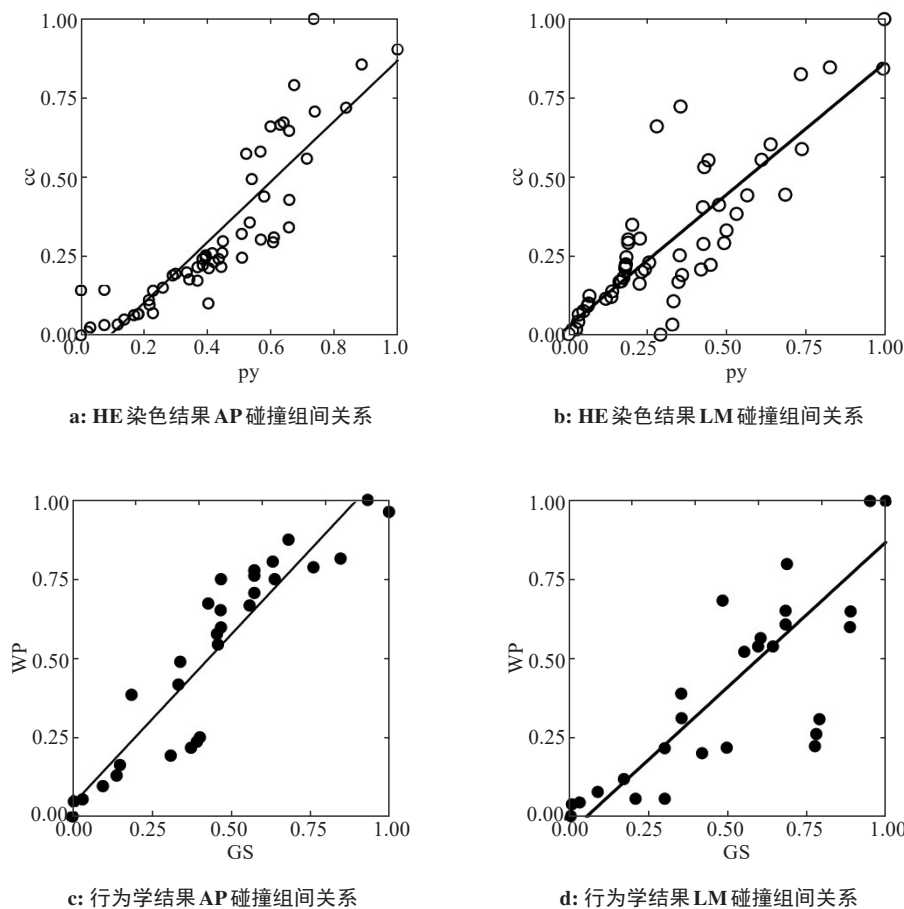


图4 组织病理学与行为学层面散点与趋势图

Figure 4 Scatter and trend charts at the levels of histopathology and behavioral science

表2 组织病理学结果py与cc的Pearson相关性分析

Table 2 Pearson correlation analyses of py and cc by histopathological results

相关性	AP-py	AP-cc	LM-py	LM-cc
AP-py	1.000	-	-	-
AP-cc	0.887**	1.000	-	-
LM-py	0.814**	0.725**	1.000	-
LM-cc	0.729**	0.569**	0.846**	1.000

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

LM组在不同碰撞等级水平下WP时长变化与GS峰值变化标准化后数据进行线性回归分析。无论是AP组还是LM组,碰撞高度和两个动物行为学实验标准化后数据成正比。结合Pearson相关系数去研究AP-GS、AP-WP分别和LM-GS、LM-WP的相关关系,由表3可知:颅脑碰撞方向不同时,AP-GS和LM-GS、AP-WP和LM-WP之间的相关系数值为0.871、0.874;颅脑相同碰撞方向时,AP-WP和AP-GS、LM-WP和LM-GS之间的相关系数值为0.921、0.849;均呈现出0.01水平的显著性。因此,AP-GS和LM-GS、AP-WP

和LM-WP、AP-WP和AP-GS、LM-WP和LM-GS之间有着显著的正相关关系。由此可知,相同碰撞方向,不同类型的行为学方法表征的功能性损伤程度不同;碰撞方向不同,同一类型的行为学方法表征的功能性损伤程度不同。

2.2.3 因子分析 根据SPSSAU进行因子分析,根据结果分析KMO(Kaiser-Meyer-Olkin, KMO)值,如果KMO值高于0.8,则说明非常适合进行因子分析。结合测试数据, KMO 值=0.833>0.800。Bartlett 检验对应 P 值小于0.05也说明适合进行因子分析(表4)。基于标准化后数据建立关系表达式:

$$\text{因子得分1} = 0.264 \times \text{py} + 0.260 \times \text{cc} + 0.263 \times \text{WP} + 0.252 \times \text{GS} \tag{2}$$

对4类实验数据进行因子分析,可提取出1个因子,由此可得到量化后的损伤程度值。各权重=各组得分/因子得分1(表5)。

根据各组别的权重,即可由综合损伤程度值:

$$\text{综合损伤程度值} = \text{py} \times 25.44\% + \text{cc} \times 25.01\% + \text{WP} \times 25.31\% + \text{GS} \times 24.25\% \tag{3}$$

获得各组别的损伤程度值见表6。

表3 动物行为学 WP与GS标准化数据的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson's correlation analyses of WP and GS standardized data

	AP-GS	AP-WP	LM-GS	LM-WP
AP-GS	1.000	-	-	-
AP-WP	0.921**	1.000	-	-
LM-GS	0.871**	0.716**	1.000	-
LM-WP	0.888**	0.874**	0.849**	1.000

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

表4 KMO 和 Bartlett 检验的成份得分系数矩阵

Table 4 Matrix of component score coefficient for KMO and Bartlett tests

KMO 值	Bartlett 球形度检验		
	近似卡方	df	P 值
0.833	36.509	6	0.000

表5 因子1 的关于4类实验数据的线性组合系数及权重结果

Table 5 Linear combination coefficients and weights of 4-class experimental data of factor 1

数据组别	综合得分系数	权重/%
py	0.508 7	25.44
cc	0.500 1	25.01
WP	0.506 0	25.31
GS	0.484 8	24.25

表7 各组综合损伤程度值与AP-HIC数据值及LM-HIC数据值

Table 7 Comprehensive injury degree, AP-HIC values and LM-HIC values in each group

AP组	综合损伤程度值	HIC	LM组	综合损伤程度值	HIC
对照组	0	0	对照组	0	0
0.75AP	0.238 0	31.503 6	0.75LM	0.306 7	51.536 4
1.25AP	0.399 3	132.426 9	1.25LM	0.529 3	84.002 9
1.75AP	0.653 1	230.992 9	1.75LM	0.789 4	116.922 9
2.25AP	0.784 2	435.539 5	2.25LM	1.000 1	307.331 3

AP- HIC 值更大;同一HIC 导致的损伤程度AP 小于LM,且随着HIC 增大,其AP 和LM 的综合损伤程度值差值越大。AP-HIC 与损伤程度值的关系以及LM-HIC 与损伤程度值的关系如图5 所示,数学关系见式(4)和式(5):

$y_1=706.2\times x^2-38.09\times x+4.24;R^2=0.996\ 3$ (4)

$y_2=331.9\times x^2-64.49\times x+13.23;R^2=0.918\ 9$ (5)

结合图5a 的数学关系公式(2)和(3),在综合损伤程度值0~1 内,在实际HIC 实验组的范围内

表6 AP组和LM组的损伤程度量化值

Table 6 Quantized values of degree of injury in AP and LM groups

组别	综合损伤程度值
0 m	0
0.75AP	0.238 0
1.25AP	0.399 3
1.75AP	0.653 1
2.25AP	0.784 2
0.75LM	0.306 7
1.25LM	0.529 3
1.75LM	0.789 4
2.25LM	1.000 1

2.3 HIC 部位与综合损伤程度的数学关系构建

结合加速度数据,HIC 的碰撞计算时间选为1 ms。单轴加速度传感器测试数据值与HIC 值见表7。随着碰撞高度增高至2.25 m,AP-HIC 达到435.539 5,损伤程度值为0.784 2;LM 组数据:当碰撞高度同样达到2.25 m 时,LM-HIC 达到307.331 3,损伤程度值为1.000 1。即损伤高度一致时,不同方向的HIC 有差异。

根据表7 中的数据,设AP-HIC 为 y_1 ,LM-HIC 为 y_2 ,综合损伤程度值为 x ,利用Graph prism 9.0 进行回归曲线拟合。根据拟合曲线可知:同一损伤程度时,

(31.503 6~435.539 5)均满足AP-HIC 值小于LM-HIC 值;但对于轻度创伤性脑损伤范围时,器质性损伤例如出血占比数据差异在不同碰撞部位处不明显,存在不适用的情况,有待进一步研究。借助综合损伤程度值,比较最优 R^2 值拟合出二者的数学关系实现对HIC 的优化。设AP-HIC 为 y ,LM-HIC 为 x ,利用Graph prism 9.0 将LM-HIC 与AP-HIC 的关系进行回归曲线拟合估计,可得基于此大鼠模型损伤程度下的LM-HIC 与AP-HIC 关系的拟合曲线。拟合结果和曲线图如图5b 所示,数学公式为:

$$y = 0.4053 \times x + 2.402; R^2 = 0.9980 \quad (6)$$

由拟合曲线公式(4)和图5b中可知,拟合曲线均在参考线 $y=x$ 的右下区域,即相同损伤程度值,AP-HIC值大于LM-HIC值,这也符合不同方向碰撞对应的颅骨结构差异。根据分析得出的AP-HIC值与

LM-HIC值的数学关系,可实现HIC在不同碰撞方向上适用范围的拓展,即可根据转换公式,将LM-HIC值转换为AP-HIC值,从而可以借助现存成熟的AP-HIC准则,对LM的损伤程度进行准确评估。

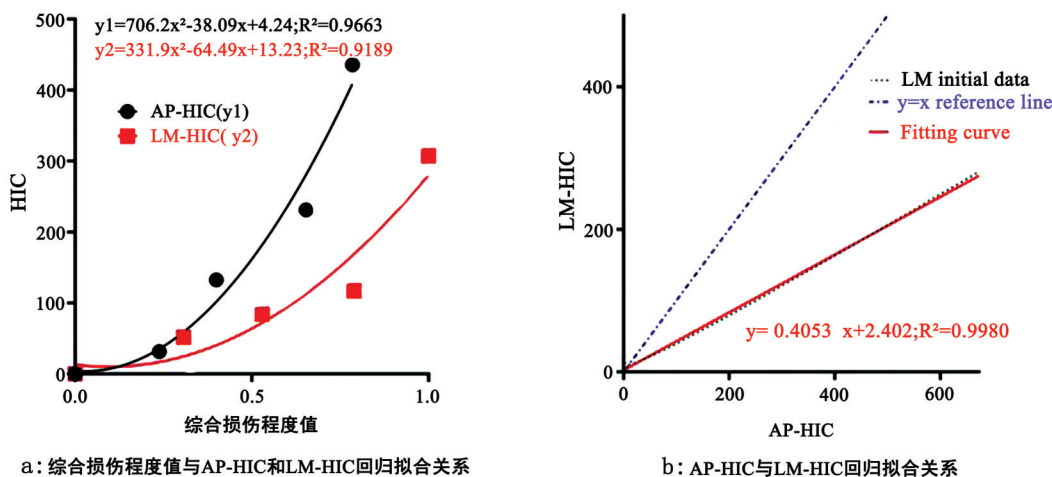


图5 数学关系拟合图

Figure 5 Mathematical relationship fitting results

3 讨论

本研究依托动物实验,对颅脑在不同方向碰撞情况下的损伤程度进行比对研究,从而对不同碰撞方向下的HIC值进行等效转换,期望能将经典AP-HIC准则用于LM-HIC。实验发现,随着碰撞程度的增加,AP组和LM组的cc和py区域的出血占比数据和动物行为学WP实验以及GS实验数据所展示的损伤程度越严重。对于不同碰撞部位和不同程度碰撞组别,HIC值也显示出差异性。组织病理学层面,颅脑受加速致伤,作用力经由颅骨结构传导至脑组织,因颅骨结构的不均匀性,撞击区和对侧区脑组织的应力分布存在较大差异。由于颅骨各部分结构、骨密度、刚性值存在差异,颅骨受力部位不同时,其脑组织损伤程度也存在差异^[31]。颅脑损伤部位的差异造成的脑组织结构性损伤与脑功能性损伤也存在差异。动物行为学层面,py是重要的运动传导束,是运动控制的基础,可影响躯体的整合性与协调性^[32-33]。动物行为学能反映颅脑组织的运动神经信号的传导能力,可对神经损伤程度进行量化评估^[34],因此本实验同时也采用动物行为学的损伤评估方法。实验所得结果与赵辉^[35]的有限元仿真结果较为一致,颞部损

伤的脑组织应力值大于额部损伤,在本研究是体现为相同碰撞程度,LM组的器质性损伤明显大于AP组;与刘文港^[36]的研究有一定差异,原因可能是其文献中的损伤打击锤与颅骨的接触面存在角度的区别。

实验得到了AP和LM综合损伤程度值的数学关系,且在相同综合损伤程度下AP-HIC值均大于LM-HIC值。以综合损伤程度值为中间变量,其AP-HIC和LM-HIC的数学关系初步表现为线性关系,且呈正相关,以此初步实现了大鼠颅脑LM-HIC值和AP-HIC值的等效转换。

4 结论与展望

由于HIC重点纳入颅脑AP碰撞的数据,考虑到颅脑AP和LM在结构和功能上存在的区别,难以直接借用HIC准确评估颅脑在LM碰撞情况下的损伤程度,因此对颅脑不同碰撞方向损伤程度的HIC进行拓展具有重要实际意义。本研究基于动物实验模型,以AP和LM加速碰撞致伤为研究方法,结合动物模型的器质性损伤和功能性损伤即综合损伤程度值,探究大鼠颅脑LM-HIC和AP-HIC的等效转换关系,初步实现了对大鼠颅脑LM-HIC值的合理修正。

未来可以考虑从以下几个方面进一步开展研究:提供更大的HIC范围;在较小HIC值时需采取其他有效损伤评估方法(如免疫组化技术);结合原发损伤和继发损伤对损伤程度进行动态综合评价;借助有限元仿真方法,将大鼠实验结果拓展至人体颅脑损伤准则的研究。

【参考文献】

- [1] 吴佳惠, 秦玄, 潘令仪, 等. 交通事故所致颅脑外伤患者生命质量调查及影响因素分析[J]. 中国康复, 2021, 36(12): 739-743.
Wu JH, Qin X, Pan LY, et al. A survey on quality of life of craniocerebral trauma patients caused by traffic accident and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2021, 36(12): 739-743.
- [2] 杨振. 基于有限元-多刚体混合行人计算模型的头部碰撞损伤研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
Yang Z. Research on head collision injury based on combined rigid-FE pedestrian model[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.
- [3] 张晓峰, 张明文, 于志虎, 等. 弥散张量成像联合磁共振波谱在颅脑损伤昏迷患者预后评定中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(4): 447-452.
Zhang XF, Zhang MW, Yu ZH, et al. Application of diffusion tensor imaging combined with magnetic resonance spectroscopy in prognostic assessment of comatose patients with traumatic brain injury[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(4): 447-452.
- [4] 程凡菊, 江竹君, 伍益凡. INR、CI、PLT与颅脑外伤迟发性颅内出血关系及联合检测价值[J]. 分子诊断与治疗杂志, 2022, 14(8): 1275-1278.
Cheng FJ, Jiang ZJ, Wu YF. Relationship between INR, CI, PLT and delayed intracranial hemorrhage in craniocerebral trauma and the value of joint detection[J]. Journal of Molecular Diagnosis and Therapy, 2022, 14(8): 1275-1278.
- [5] 刘畅. 轻型创伤性脑损伤后睡眠障碍和损伤部位的关系[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2022.
Liu C. Relationship between sleep disturbance and site of injury after mild TBI[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2022.
- [6] Zhou RZ, Zhang LY. Investigate the variations of the head impact response in a rodent head impact acceleration model by finite element modeling[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2020, 8: 172.
- [7] 米静雅. 基于多重数字化技术融合的颅脑损伤致伤方式鉴别及损伤机制研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2021.
Mi JY. The study of identification of modes and on mechanisms of head injury using the combined technique[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2021.
- [8] Zhou RZ. Development of rat head finite element model and tissue level biomechanical threshold for traumatic axonal injury[D]. Detroit: Wayne State University, 2020.
- [9] 阮世捷, 李超, 崔世海, 等. 颅骨厚度对颅内生物力学响应的影响[J]. 医用生物力学, 2021, 36(4): 560-567.
Ruan SJ, Li C, Cui SH, et al. The influence of skull thickness on intracranial biomechanical response[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2021, 36(4): 560-567.
- [10] Fernández-Liste A, González-Cantalapiedra A, Cascallana JL, et al. Modification of the Marmarou and Foda model of diffuse axonal injury (DAI) improves percentage survival of rats at 24 h and increases the amount of DAI identified[J]. J Forensic Sci, 2023, 68(4): 1228-1236.
- [11] 万佳. 创伤性脑损伤动物模型的研究进展[J]. 系统医学, 2022, 7(10): 179-182.
Wan J. Research progress on animal models of traumatic brain injury[J]. Systems Medicine, 2022, 7(10): 179-182.
- [12] Kallakuri S, Li Y, Zhou RZ, et al. Impaired axoplasmic transport is the dominant injury induced by an impact acceleration injury device: an analysis of traumatic axonal injury in pyramidal tract and corpus callosum of rats[J]. Brain Res, 2012, 1452: 29-38.
- [13] 王鹏成, 任长虹, 曾现伟, 等. 4种神经功能评分法在大鼠局灶性脑缺血模型中的比较研究[J]. 潍坊医学院学报, 2014, 36(2): 147-151.
Wang PC, Ren CH, Zeng XW, et al. Comparison study of four kinds of neurological function rating systems on focal cerebral ischemic models in rats[J]. Acta Academiae Medicinae Weifang, 2014, 36(2): 147-151.
- [14] Montoya D, Thollon L, Llari M, et al. Head injury criteria in child pedestrian accidents[J]. Int J Crashworthines, 2018, 23(5): 497-506.
- [15] 林策, 李磊子, 李庆锋. 民航座椅头部损伤判据(HIC)原理公式浅析[J]. 现代机械, 2022(5): 47-52.
Lin C, Li LZ, Li QF. Preliminary analysis of aircraft seat passenger head injury criteria (HIC) calculation formula[J]. Modern Machinery, 2022(5): 47-52.
- [16] 王振. 基于VRU碰撞事故再现的人体头部损伤评价准则有效性研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
Wang Z. Evaluation of effectiveness of head injury criteria based on VRU impact accident reconstruction[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021.
- [17] 刘金明, 马华星, 李奎, 等. 行人头部与车辆碰撞中旋转速度对颅脑组织响应影响[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(1): 70-78.
Liu JM, Ma HX, Li K, et al. The influence of rotational speed of pedestrian head-to-vehicle collision on brain tissue response[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(1): 70-78.
- [18] 刘金明. 基于真实事故再现的行人头部动态响应与损伤评价研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
Liu JM. Research on pedestrian head dynamic response and injury assessment via reconstruction of real world collisions[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2022.
- [19] 王正国. 国际交通医学[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2020.
Wang ZG. International traffic medicine[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2020.
- [20] 傅倩颖. 基于组织病理学的大鼠脑干原发性功能损伤程度研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
Fu QY. Study on the degree of primary functional injury of brain stem in rats based on histopathology[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [21] 石菁菁. 基于抓力-运动诱发电位的大鼠脑干锥体束继发功能损伤程度研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
Shi JJ. Study on the degree of secondary functional injury of rat brain stem pyramidal tract based on grip strength and motor evoked potential[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [22] 连春晓. 基于运动诱发电位的大鼠脑干功能损伤程度研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
Lian CX. Study on the degree of brainstem functional injury in rats based on motor evoked potentials[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [23] Gupte R, Brooks W, Vukas R, et al. Sex differences in traumatic brain injury: what we know and what we should know[J]. J Neurotrauma, 2019, 36(22): 3063-3091.
- [24] 石菁菁, 傅倩颖, 杨袖菊, 等. 基于抓力-运动诱发电位的大鼠脑干锥体束功能损伤程度研究[J]. 医用生物力学, 2023, 38(5): 1031-1036.
Shi JJ, Fu QY, Yang XJ, et al. Study on degree of functional injury for brainstem pyramidal tract in SD rats based on GS-MEP[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2023, 38(5): 1031-1036.
- [25] Wick MR. The hematoxylin and eosin stain in anatomic pathology-an often-neglected focus of quality assurance in the laboratory[J]. Semin Diagn Pathol, 2019, 36(5): 303-311.
- [26] Tripathy SK, Rath KC. Pedestrian head impact analysis on a vehicle and measures to reduce HIC value[J]. ECS Trans, 2022, 107(1): 10757.
- [27] Kaiser HF. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis[J]. Psychometrika, 1958, 23(3): 187-200.
- [28] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 第3版. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.
He XQ. Modern statistical analysis methods and applications[M]. 3rd ed. Beijing: China Renmin University Press, 2012.

- [29] 马凯丽. 基于因子分析法的M企业财务绩效评价研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
Ma KL. Research on M enterprises financial performance evaluation based on factor analysis method[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [30] 俞立平. 基于神经网络的非线性学术评价指标模拟权重研究—以因子分析评价为例[J]. 现代情报, 2021, 41(4): 133-145.
Yu LP. Research on simulated weights of nonlinear academic evaluation index based on neural network[J]. Journal of Modern Information, 2021, 41(4): 133-145.
- [31] Miino HY, Chen YW. Vehicle crash safety[M]. Beijing: People's Communications Press, 2016: 9-13.
- [32] 郝清, 丁思莹, 李冬雪, 等. 应用扩散张量成像技术对急性缺血性卒中机体功能障碍与锥体束损伤程度的相关性研究[J]. 磁共振成像, 2021, 12(1): 3-8.
Hao Q, Ding SX, Li DX, et al. Study on the correlation between body dysfunction and the degree of pyramidal tract injury in acute ischemic stroke by using diffusion tensor imaging technology[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2021, 12(1): 3-8.
- [33] 毛剑. 米诺环素可降低大鼠创伤性脑损伤后神经元凋亡并改善运动功能[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
Mao J. Minocycline attenuates neuronal apoptosis and improves motor function of traumatic brain injury in rats[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [34] Latchoumane CF, Betancur MI, Simchick GA, et al. Engineered glycomaterial implants orchestrate large-scale functional repair of brain tissue chronically after severe traumatic brain injury[J]. Sci Adv, 2021, 7(10): eabe0207.
- [35] 赵辉. 颅脑减速伤的发生机制研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2009.
Zhao H. Study on the occurrence mechanism of brain deceleration injury[D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2009.
- [36] 刘文港. 头部钝器打击伤和交通伤的有限元评价方法研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
Liu WG. Study on finite element evaluation method of blunt force trauma and traffic injury to the head[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.

(编辑: 谭斯允)