

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.013

## [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠的亚慢性毒性

葛月月, 徐红梅, 束曼玉, 谭鹏振, 田杏杏, 苑华飞

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 文章研究不同染毒时间下离子液体(ionic liquids, ILs)四氟硼酸-1-十四烷基-3-甲基咪唑盐([C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>)对大鼠的亚慢性毒性作用。实验设置低剂量组、中剂量组、高剂量组([C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>的剂量分别为 12.5、25.0、50.0 mg/kg)和空白对照组。大鼠经口染毒 30、60、90 d 后,分别考察各组大鼠的体质量、血清生化指标、脏器系数和组织形态学变化。结果表明,与空白对照组相比,随着[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>染毒剂量的增加和染毒时间的延长,大鼠的体质量先降低后上升,肝脏系数增加,血清中谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)、直接胆红素(DBIL)、总胆红素(TBIL)、 $\gamma$ -谷氨酰转肽酶( $\gamma$ -GT)的水平和 AST 与 ALT 活力比值均逐渐上升。组织病理学检查显示,染毒组大鼠的肝脏、肾脏均有不同程度的损伤和病变。研究表明,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>亚慢性染毒可造成大鼠肝脏和肾脏的损伤,且该损伤作用呈现明显的剂量依赖性和时间依赖性。

**关键词:** 离子液体(ILs); 四氟硼酸-1-十四烷基-3-甲基咪唑盐([C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>); 大鼠; 亚慢性毒性; 肝脏毒性  
**中图分类号:** X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)06-0798-07

### Subchronic toxicity of [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> to rats

GE Yueyue, XU Hongmei, SHU Manyu, TAN Pengzhen, TIAN Xingxing, YUAN Huafei

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The subchronic toxicity of ionic liquid tetrafluoroborate-1-tetradecyl-3-methylimidazole salt ([C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>) to rats was studied in different exposure time. A blank control group and three exposed groups (12.5, 25.0, and 50.0 mg/kg) were set up in the experiment. After 30, 60, and 90 days of oral exposure, the changes of body weight, serum biochemical indexes, organ coefficients and histomorphology of rats in each group were investigated. The results showed that, compared with the blank control group, with the increase of exposure dose and exposure time of [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>, the weight gain of rats first decreased and then increased, the liver coefficient increased, and the serum levels of ALT, AST, ALP, DBIL, TBIL,  $\gamma$ -GT and the AST to ALT ratio gradually increased. Histopathological results showed that the liver and kidney of rats in the exposed group had different degrees of damage and pathological changes. The results showed that subchronic exposure of [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> could cause liver and kidney damage in rats, and the damage was dose-dependent and time-dependent.

**Key words:** ionic liquids (ILs); tetrafluoroborate-1-tetradecyl-3-methylimidazole salt ([C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>); rat; subchronic toxicity; liver toxicity

离子液体(ionic liquids, ILs)由阳离子(如咪唑、吡啶等)和典型的阴离子(Br<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、BF<sub>4</sub><sup>-</sup>等)组成<sup>[1]</sup>,被广泛用于电化学<sup>[2]</sup>、催化<sup>[3]</sup>、萃取<sup>[4]</sup>、有机合成<sup>[5]</sup>、液晶开发<sup>[6]</sup>及生物技术<sup>[7]</sup>等领域,因其具

有低蒸汽压、高溶解性和良好的化学稳定性等优点,一度被认为是传统挥发性有机溶剂的替代品<sup>[8]</sup>。越来越多的研究表明,ILs对细菌<sup>[9]</sup>、藻类<sup>[10]</sup>、玉米幼苗<sup>[11]</sup>、鱼类<sup>[12]</sup>和家蚕<sup>[13]</sup>等多种生物

收稿日期:2022-12-13;修回日期:2023-03-03

基金项目:安徽省自然科学基金面上资助项目(JZ2017AKZR0138)

作者简介:葛月月(1995—),女,安徽马鞍山人,合肥工业大学硕士生;

徐红梅(1969—),女,安徽安庆人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

都有毒性,其对环境及生物体的危害已引起广泛关注。尽管近年来对于 ILs 的毒性报道逐渐增多,但多为急性或亚急性研究,有关 ILs 长期毒性的研究并不多,而环境中的毒物对生物体的损害更多是低剂量、长期染毒的结果。因此,研究 ILs 长期染毒对生物体的毒性及其作用机制更具有实际意义。

本课题组前期对咪唑基 ILs ([C<sub>n</sub>mim]BF<sub>4</sub>) 毒性进行了研究,发现四氟硼酸-1-十四烷基-3-甲基咪唑盐([C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>)的毒性最强<sup>[14]</sup>,其对大鼠的肝脏、肾脏均有毒性<sup>[15]</sup>。本实验在前期研究的基础上,以 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 为研究对象,考察不同的染毒时间对大鼠的毒性作用,探究染毒时间与 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 毒性之间的关系,以期为 ILs 毒性数据库提供更多有价值的信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 离子液体

咪唑型 ILs [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 由中国科学院兰州化学物理研究所合成。

### 1.2 实验动物

健康 SD 大鼠 80 只(6 周龄),雌、雄各半,体质量为 120~140 g,由安徽医科大学动物养殖中心提供,生产许可证为 SCXK(皖)2021—001。大鼠饲养于标准动物房内(温度 20~22 °C、湿度 65%~75%),自然光照,动物自由饮水、饮食。

### 1.3 主要试剂和仪器

主要试剂有:0.9%氯化钠注射液(购于安徽丰原药业有限公司);甲醛(购于上海苏懿化学试剂有限公司)。主要仪器有:CT14RD 高速离心机(Thermo 公司);3100 全自动生化分析仪(日立有限公司)。

### 1.4 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 溶液的配制

分别称取 500、250、125 mg 的 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>,各自溶于 100 mL 蒸馏水中,依次配置质量浓度为 5.00、2.50、1.25 mg/mL 的 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 溶液。

### 1.5 动物染毒及指标检测

#### 1.5.1 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠的亚慢性染毒

大鼠适应性饲养 1 周后,根据 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 的半数致死量(LD<sub>50</sub>)值(249.8 mg/kg)<sup>[16]</sup>分别设置低剂量组、中剂量组、高剂量组 3 个染毒组,其剂量分别为 12.5、25.0、50.0 mg/kg;另设 1 个空白对照组。染毒组大鼠经口给予 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 染毒(按每 100 g 大鼠给予 1 mL 药液),每天 1 次;空白对照组大鼠灌胃等容积的蒸馏水。染毒后逐日观察,记录各组大鼠的中毒反应,包括外观特征、活动状态、死

亡数等,每周称量并记录大鼠体质量。分别在染毒的第 30、60、90 天将大鼠麻醉,腹主动脉取血后 3 500 r/min 离心 15 min,收集血清;解剖并分离大鼠肝、肾、脾和胸腺组织,用于指标检测。

#### 1.5.2 脏器指数

将分离的大鼠肝脏、肾脏、脾和胸腺组织用生理盐水清洗血污,滤纸吸干水分,称它们的质量,按  $C=(m_1/m_2) \times 100\%$  计算脏器系数。其中:C 为脏器系数; $m_1$  为器官湿质量; $m_2$  为大鼠体质量。

#### 1.5.3 血清生化指标

取各组大鼠血清,在全自动生化分析仪上分别检测谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)、白蛋白(ALB)、直接胆红素(DBIL)、总胆红素(TBIL)、 $\gamma$ -谷氨酰转肽酶( $\gamma$ -GT)的水平。

#### 1.5.4 组织病理学检查

取各组大鼠的肝、肾、脾和胸腺组织,分别用 10% 甲醛溶液固定,采用不同体积分数梯度的乙醇逐级脱水,石蜡包埋,切片机制片,脱蜡,苏木精-伊红(HE)染色,在显微镜(放大倍数为 100)下观察脏器组织病理学变化。

## 1.6 数据统计与分析

本文采用 Origin 2019 软件绘图,SPSS 26.0 统计分析数据,组间差异采用单因素方差(ANOVA)结合 LSD-t 检验比较。\* 表示相同染毒时间内,染毒组与空白对照组之间的差异,\*  $P < 0.05$ 、\* \*  $P < 0.01$ 、\* \* \*  $P < 0.001$ ;# 表示不同染毒时间下,同一剂量组之间的差异,#  $P < 0.05$ 、# #  $P < 0.01$ 、# # #  $P < 0.001$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠体质量的影响

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠体质量的影响如图 1 所示。从图 1 可以看出:空白对照组大鼠的饮食、活动等均表现正常;染毒组大鼠在染毒早期(15、30 d)表现出食欲降低、活动减少,大鼠体质量的增长量随着剂量的升高而显著下降,呈现明显的剂量相关性;随着染毒时间的延长(60、90 d)和剂量的增加,大鼠的毒性反应逐渐增强,低、中剂量组大鼠毛发凌乱、枯燥,高剂量组大鼠则出现精神萎靡不振、行动迟缓、呼吸喘促等中毒症状,各组大鼠体质量增长量却先下降后略升高。这可能是由于染毒初期大鼠对 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 的毒性刺激较为敏感,食欲降低、体质量下降,而后体质量增加的原因是染毒后引起组织水肿及增生。

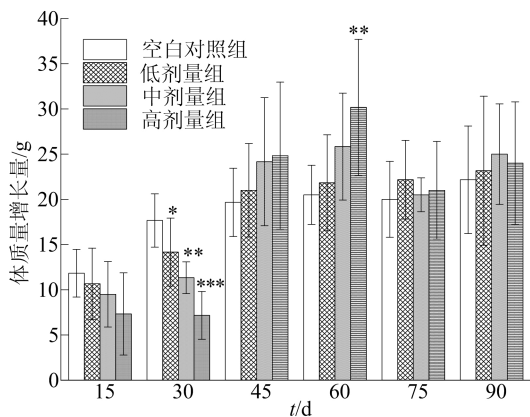


图 1 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠体质量的影响

2.2 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠脏器指数的影响

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠脏器指数的影响见表 1 所列。

从表 1 可以看出:当染毒时间相同时,大鼠肝脏指数随着染毒剂量的增加而逐渐增大;而当染毒剂量相同时,大鼠肝脏指数随着染毒时间的延长而增大,且高剂量组的变化尤为显著 ( $P < 0.05$ )。这表明[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠肝脏指数的影响呈现明显的剂量依赖性和时间依赖性。同时,由表 1 可知,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠肾脏、脾脏和胸腺指数在各染毒期没有明显的影响。

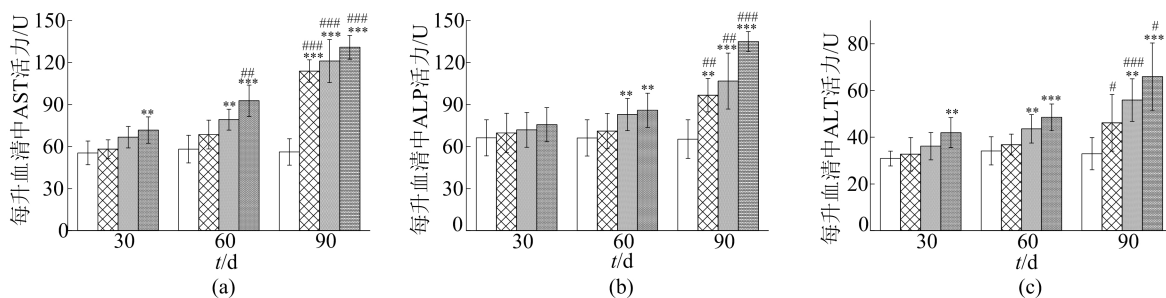
表 1 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠脏器指数的影响

脏器指数	染毒时间/d	空白对照组	低剂量组	中剂量组	高剂量组
肝脏指数	30	2.40±0.27	2.53±0.33	2.61±0.27	2.66±0.36
	60	2.44±0.23	2.61±0.16	2.68±0.32	(2.86±0.46) *
	90	2.47±0.51	2.72±0.35	2.78±0.30	(2.98±0.35) *
肾脏指数	30	0.50±0.03	0.51±0.04	0.51±0.04	0.51±0.05
	60	0.52±0.04	0.50±0.03	0.51±0.05	0.52±0.05
	90	0.50±0.03	0.49±0.05	0.51±0.06	0.52±0.07
脾脏指数	30	0.27±0.03	0.28±0.03	0.28±0.04	0.29±0.04
	60	0.28±0.03	0.27±0.04	0.27±0.06	0.27±0.03
	90	0.28±0.02	0.27±0.03	0.27±0.04	0.27±0.02
胸腺指数	30	0.16±0.01	0.17±0.03	0.16±0.02	0.15±0.02
	60	0.16±0.02	0.17±0.02	0.17±0.03	0.16±0.03
	90	0.17±0.03	0.16±0.02	0.15±0.02	0.17±0.03

2.3 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠血清生化指标的影响

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠血清生化指标的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出:与空白对照组相比,在染毒早期,低、中剂量组大鼠血清各项指标无明显变化,仅高剂量组大鼠血清中 ALT、AST、DBIL、TBIL、 $\gamma$ -GT 水平明显升高;当染毒时间(60 d)延长时,除高剂量组外,中剂量组大鼠血清的 ALT、AST、ALP、DBIL 和  $\gamma$ -GT 水平也显著升高;当染毒

时间(90 d)进一步延长时,各剂量组大鼠血清的上述指标均出现显著增加;同时 AST 与 ALT 活力比值随着染毒时间和染毒剂量的增加而增大;血清 ALB 水平在染毒早、中期(30、60 d),仅高剂量组出现明显下降,而当染毒时间延长至 90 d 时,中剂量组也出现了显著降低。结果表明,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠血清各项生化指标的影响不仅具有剂量依赖性,还呈现出明显的时间依赖性。



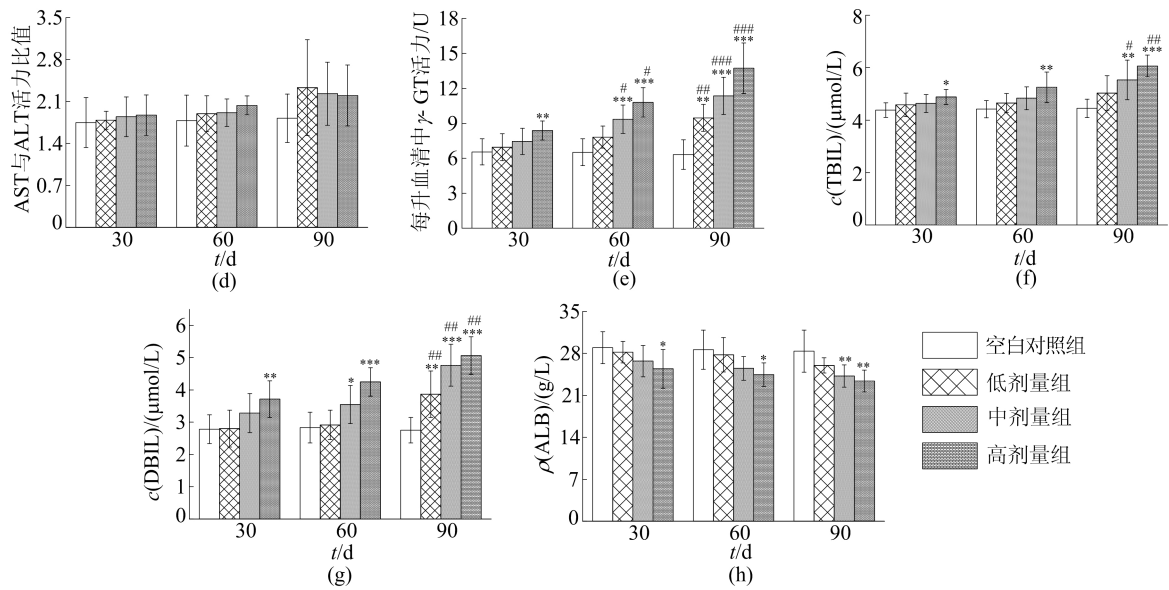


图 2 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠血清生化指标的影响

### 2.4 组织病理学分析

#### 2.4.1 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠肝脏组织的影响

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠肝脏组织的影响如图 3 所示。

从图 3 可以看出:空白对照组大鼠肝脏形态正常,肝细胞索排列整齐;染毒 30 d 后,随着染毒

剂量的增加,大鼠肝组织依次出现少量细胞水肿、炎性细胞浸润、大量水肿等病变;当染毒时间(60、90 d)进一步延长时,肝组织不仅出现中心静脉充血、扩大,大量炎性细胞浸润,还出现肝细胞点状坏死和灶性坏死,呈现出明显的剂量依赖性和时间依赖性。

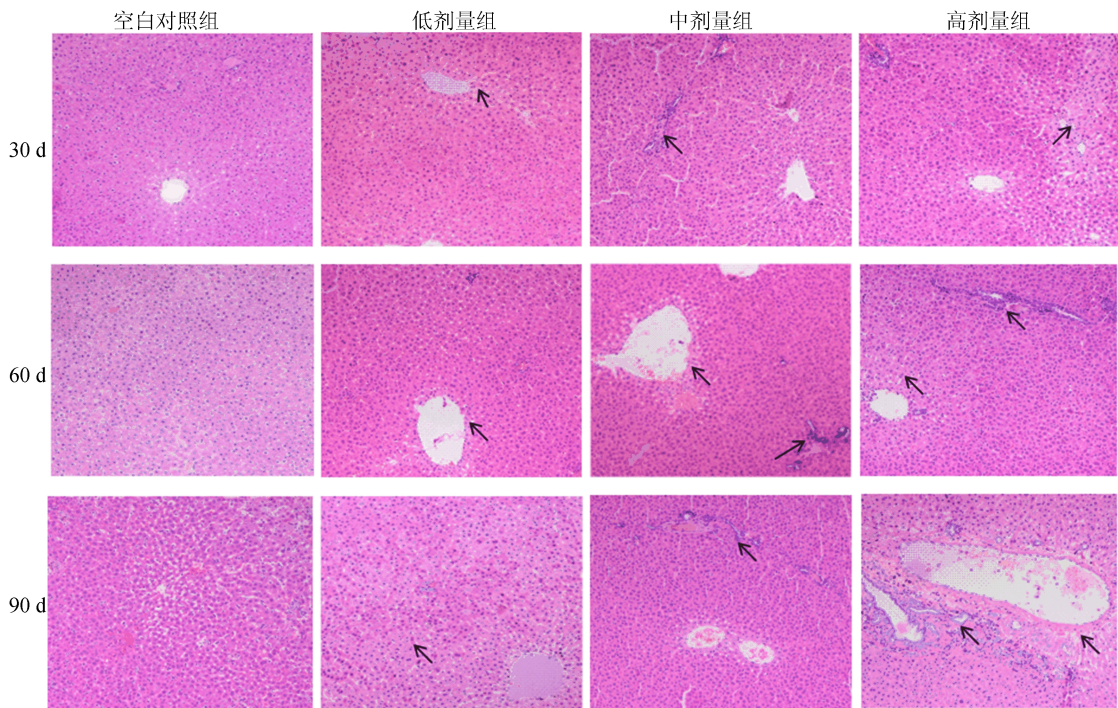


图 3 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 影响下的大鼠肝脏组织病理切片图

#### 2.4.2 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠肾脏组织的影响

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠肾脏组织的影响如图 4 所示。由图 4 可知:空白对照组大鼠肾小球和肾

小管结构清晰完整;[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 染毒 30 d 后,随着染毒剂量的增加,大鼠肾脏依次出现肾小管上皮细胞脱落、肾小管扩张、少量炎性细胞浸润等

病变;当染毒时间(60、90 d)进一步延长时,大鼠肾脏不仅出现肾间质水肿、出血、肾小球数量减

少、萎缩和大量炎性细胞浸润,还出现肾髓质坏死等病变,呈现出明显的剂量依赖性和时间依赖性。

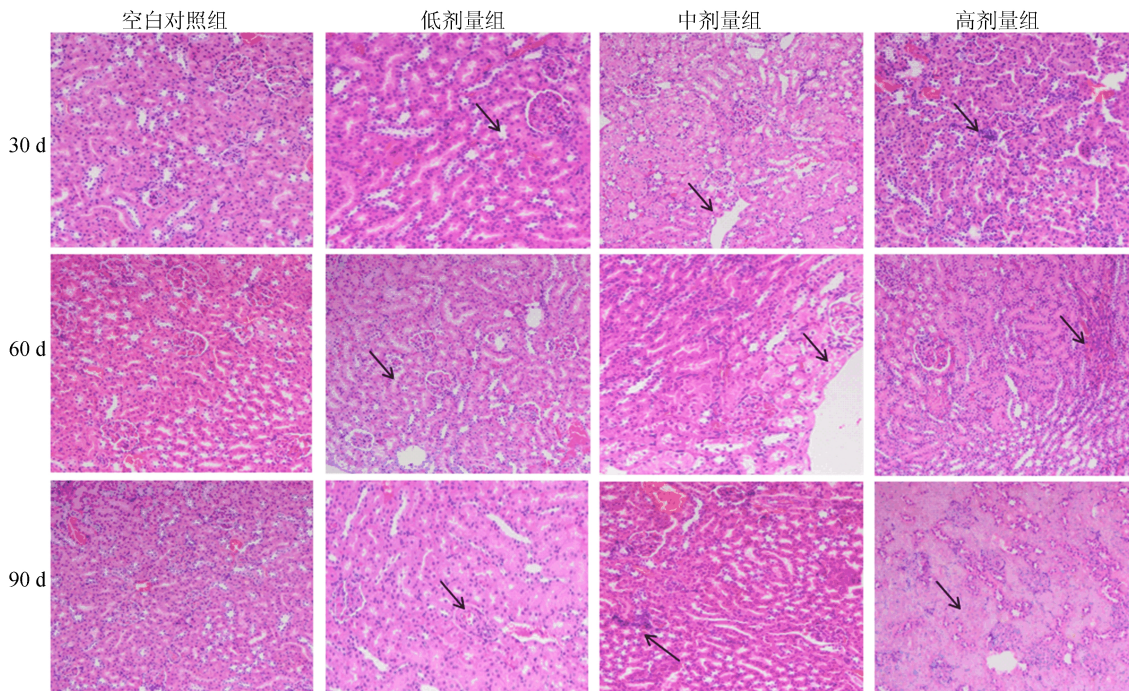


图 4 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 影响下的大鼠肾脏组织病理切片图

2.4.3 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠其他组织的影响

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠脾脏和胸腺组织的影响如图 5、图 6 所示。从图 5、图 6 可以看出:正常大鼠的胸腺和脾脏组织染色均匀,形态结构正常,脾脏红髓、白髓结构清晰,胸腺皮质内可见大量的

胸腺细胞,细胞小而密集,皮质髓质界限清楚;高剂量染毒 30、60、90 d 后,大鼠的脾和胸腺结构相对完整,与空白对照组比较未出现明显的异常和病变。结果表明,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 对大鼠的脾脏和胸腺没有明显的损害。

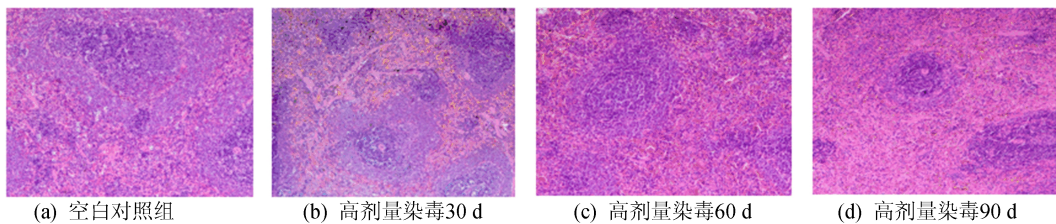


图 5 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 影响下的大鼠脾脏组织病理切片图

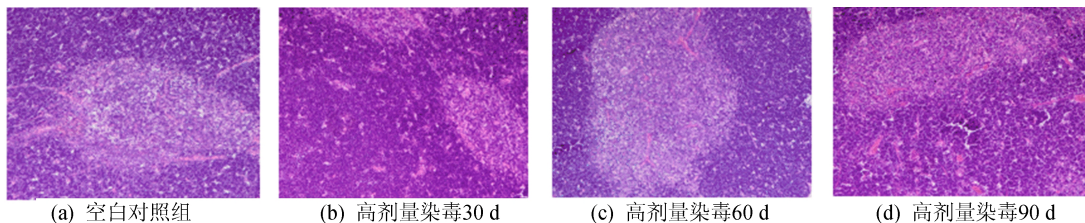


图 6 [C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 影响下的大鼠胸腺组织病理切片图

3 讨 论

文献[17]研究表明,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 急性染毒

可损害大鼠的肝脏,引起肝组织病变。本实验结果也显示,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub> 亚慢性染毒可对大鼠的肝脏产生显著毒性。肝脏是机体内物质代谢的主

要器官,也是外源性化合物侵害机体的主要靶器官<sup>[18]</sup>。

转氨酶对体内物质代谢起着重要作用,其中以ALT和AST最为重要。当肝细胞轻度病变时,细胞膜通透性增加,ALT从细胞中溢出;而当肝细胞严重受损危及线粒体时,AST就会被大量释放入血液<sup>[19]</sup>,同时肝细胞产生过量ALP<sup>[20]</sup>。因此,AST活力、ALT活力常用来评估肝损伤程度,AST与ALT活力比值可反映肝细胞坏死的严重程度<sup>[21]</sup>。血清内 $\gamma$ -GT主要来自肝脏,其在氨基酸和蛋白质的吸收、分泌和合成过程中起着非常重要的作用<sup>[22]</sup>。胆红素由肝脏产生,经胆道排泄,当肝细胞发生病变和肝内毛细胆管上皮被破坏时,肝内胆汁淤积,血清中胆红素水平升高<sup>[23]</sup>。ALB是血清总蛋白(TP)的组成成分之一,若ALB水平降低,则表明肝脏合成功能下降和慢性炎症的发生<sup>[24]</sup>。

本实验发现,[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>染毒后,各组大鼠血清的ALT、AST、ALP、DBIL、TBIL、 $\gamma$ -GT水平和AST与ALT活力比值均随着染毒剂量的增加和染毒时间的延长而显著升高,血清中ALB水平则随着染毒剂量的增加和染毒时间的延长而降低。这一结果表明[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>可对大鼠肝脏产生明显的毒性反应,引起肝脏指数增加、肝细胞变性或坏死,从而导致肝脏分泌与排泄功能受损,最终引起胆道梗阻和胆汁淤积。组织病理学结果显示:染毒组大鼠肝脏组织随着染毒剂量的增加和染毒时间的延长,依次出现肝细胞水肿、炎性细胞浸润、肝细胞坏死等病变。这表明[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>对大鼠肝脏的损伤作用具有剂量依赖性和时间依赖性。

[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>染毒可导致肾小管上皮细胞脱落、肾小管扩张、炎性细胞浸润等病变,且随着染毒剂量的增加和染毒时间的延长,其损害作用有增强的趋势。由此可见,不仅肝脏是[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>毒性作用的重要靶器官,肾脏也可能是[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>攻击的主要器官。

### [参 考 文 献]

[1] CVJETKO B M, RADOSEVIC K, RADOJCIC R I, et al. A brief overview of the potential environmental hazards of ionic liquids[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 99:1-12.

[2] YUAN F, CHI S, DONG S. Ionic liquid crystal with fast ion-conductive tunnels for potential application in solvent-

free Li-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 294: 249-259.

[3] STEINRUECK H P, WSSERSCHIED P. Ionic liquids in catalysis[J]. *Catalysis Letters*, 2015, 145: 380-397.

[4] HO T D, CANESTRARO A J, ANDERSON J L. Ionic liquids in solid-phase microextraction: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 695: 18-43.

[5] ALI M K, MOSHIKUR R M, WAKABAYASHI R, et al. Synthesis and characterization of choline-fatty-acid-based ionic liquids: a new biocompatible surfactant[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 551: 72-80.

[6] MACFARLANE D R, PRINGLE J M, HOWLETTA P C, et al. Ionic liquids and reactions at the electrochemical interface[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2010, 12: 1659-1669.

[7] PETROVIC V P, SIMIJONOVIC D, MILOVANOVIC V M, et al. Acetophenone mannich bases: study of ionic liquid catalysed synthesis and antioxidative potential of products[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(11): 181232.

[8] PERIC B, SIERRA J, MARTI E, et al. (Eco) toxicity and biodegradability of selected protic and aprotic ionic liquids[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261: 99-105.

[9] PAL S, SAR A, BISWAS R, et al. Assessment of bacterial community structure in saline sediment microcosms exposed for the first time to the ionic liquid 1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, 232(2): 51.

[10] CHEN B, DONG J, LI B, et al. Using a freshwater green alga *Chlorella pyrenoidosa* to evaluate the biotoxicity of ionic liquids with different cations and anions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 198: 110604.

[11] CHEN X, SUN H, ZHANG T, et al. Effects of pyridinium-based ionic liquids with different alkyl chain lengths on the growth of maize seedlings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 427: 127868.

[12] MA J, LI X, CUI M, et al. Negative impact of the imidazolium-based ionic liquid [C<sub>8</sub>mim]Br on silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*): long-term and low-level exposure[J]. *Chemosphere*, 2018, 213: 358-367.

[13] GAO K, LI B, CHEN R, et al. A feasibility study of using silkworm larvae as a novel *in vivo* model to evaluate the biotoxicity of ionic liquids[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 209: 111759.

[14] 徐红梅,任娜,宣怡红,等. 四氟硼酸 1-烷基-3-甲基咪唑离子液体对小鼠的急性经口毒性[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 298-303.

[15] 徐红梅,许峰,苑华飞,等. 离子液体[C<sub>14</sub>mim]Br对大鼠亚慢性毒性的初步研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 299-305.

[16] 徐红梅,苑华飞,魏海燕,等. 离子液体[C<sub>14</sub>mim]BF<sub>4</sub>对大鼠的急性毒性[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(9): 1268-1272.

集信号。SERS 基底具有极高的检测灵敏度,亚甲基蓝浓度为  $10^{-13}$  mol/L 时能够采集到其 SERS 信号。SERS 基底也具有良好的信号重现性,443  $\text{cm}^{-1}$  处峰值的 SERS 强度的 RSD 为 9.26%。

紫外吸收光谱表明:SERS 基底不存在时,硼氢化钠对亚甲基蓝的降解效果不显著,8 min 内仅降解 10.73%;存在 SERS 基底时,不仅能够原位实时观察降解过程,而且基底具有良好的催化效果,150 s 内亚甲基蓝的降解率高达 99.90%。

因此,本研究为催化反应的实时、原位监测提供了新的方向,并有可能在未来的环境监测和粮食安全领域得到应用。

### [参 考 文 献]

- [1] YONTAR A K, AVCIOGLU S, CEVIK S. Nature-based nanocomposites for adsorption and visible light photocatalytic degradation of methylene blue dye [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 135070.
- [2] 夏强,廖小刚,沈海丽,等.不同形貌  $\text{Co}_3\text{O}_4$  的制备及其活化过一硫酸盐降解亚甲基蓝的性能[J]. *无机化学学报*, 2022, 38(11): 2191-2201.
- [3] BABYSZKO A, WANAG A, SADLOWSKI M, et al. Synthesis and characterization of  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  as photocatalyst on methylene blue degradation[J]. *Catalysts*, 2022, 12(11): 1372.
- [4] QUAN Y N, SU R, YANG S, et al. In-situ surface-enhanced Raman scattering based on  $\text{MTi}_{20}$  nanoflowers: monitoring and degradation of contaminants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125209.
- [5] LI Z H, BA J H, ZHANG X, et al. Facile synthesis of Au nanoparticle-coated  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic composite nanospheres and their application in SERS detection of malachite green [J]. *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 241: 118532.
- [6] HE J, SONG G, WANG X, et al. Multifunctional magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GO}/\text{Ag}$  composite microspheres for SERS detection and catalytic degradation of methylene blue and ciprofloxacin [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 893: 162226.
- [7] MAZHANI M, ALULA M T, MURAPE D. SERS assisted monitoring of catalytic reduction reaction using silver-magnetic nanocomposites [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 265: 124487.
- [8] JUNG D, LIM C, SHIM H J, et al. Highly conductive and elastic nanomembrane for skin electronics [J]. *Science*, 2021, 373(6558): 1022-1026.
- [9] HEMMATI S, HARRIS M T, BARKEY D P, et al. Polyol silver nanowire synthesis and the outlook for a green process [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 2020: 9341983.
- [10] CHUNG D C K, LIN E S, PENG L H, et al. Efficient drop reactor processing of methylene blue degradation with silver nanowire catalysts [J]. *Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 610: 125749.
- [11] SONG L, XUB B, CHENG Q, et al. Instant interfacial self-assembly for homogeneous nanoparticle monolayer enabled conformal "lift-on" thin film technology [J]. *Science Advances*, 2021, 7(52): 1-10.
- [12] MIAO Y E, LEE H K, CHEW W S, et al. Catalytic liquid marbles: Ag nanowire-based miniature reactors for highly efficient degradation of methylene blue [J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(44): 5923-5926.
- [17] JODYNIS-LIEBERT J, NOWICKI M, MURIAS M, et al. Cytotoxicity, acute and subchronic toxicity of ionic liquid, didecyldimethylammonium saccharinate, in rats [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2010, 57 (2/3): 266-273.
- [18] WANG L, ZHENG M, ZHANG S, et al. Roles of mtDNA damage and disordered  $\text{Ca}^{2+}$  homeostasis in the joint toxicities of cadmium and BDE209 [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 186: 109767.
- [19] SOOKOIAN S, PIROLA C J. Liver enzymes metabolomics and genome-wide association studies: from systems biology to the personalized medicine [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2015, 21(3): 711-725.
- [20] KULLAK-UBLICK G A, ANDRADE R J, MERZ M, et al. Drug-induced liver injury: recent advances in diagnosis and risk assessment [J]. *Gut*, 2017, 66(6): 1154-1164.
- [21] ZHANG L X, YANG L V, XU A M, et al. The prognostic significance of serum gamma-glutamyltransferase levels and AST/ALT in primary hepatic carcinoma [J]. *BMC Cancer*, 2019, 19: 841.
- [22] 何晓莉,苗辉. AST、ALT 与  $\gamma$ -GT 检验在肝硬化患者中的应用价值分析 [J]. *数理医药学杂志*, 2021, 34 (11): 1718-1720.
- [23] WANG G W, ZHANG X L, WU Q H, et al. The hepatoprotective effects of *Sedum sarmentosum* extract and its isolated major constituent through Nrf2 activation and NF- $\kappa$ B inhibition [J]. *Phytomedicine*, 2019, 53(22): 263-273.
- [24] LI R J, ZHANG M, WANG Y, et al. Effects of sub-chronic exposure to atmospheric  $\text{PM}_{2.5}$  on fibrosis, inflammation, endoplasmic reticulum stress and apoptosis in the livers of rats [J]. *Toxicology Research*, 2018, 7(2): 271-282.

(责任编辑 闫杏丽)

### (上接第 803 页)

- [17] JODYNIS-LIEBERT J, NOWICKI M, MURIAS M, et al. Cytotoxicity, acute and subchronic toxicity of ionic liquid, didecyldimethylammonium saccharinate, in rats [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2010, 57 (2/3): 266-273.
- [18] WANG L, ZHENG M, ZHANG S, et al. Roles of mtDNA damage and disordered  $\text{Ca}^{2+}$  homeostasis in the joint toxicities of cadmium and BDE209 [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 186: 109767.
- [19] SOOKOIAN S, PIROLA C J. Liver enzymes metabolomics and genome-wide association studies: from systems biology to the personalized medicine [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2015, 21(3): 711-725.
- [20] KULLAK-UBLICK G A, ANDRADE R J, MERZ M, et al. Drug-induced liver injury: recent advances in diagnosis and risk assessment [J]. *Gut*, 2017, 66(6): 1154-1164.
- [21] ZHANG L X, YANG L V, XU A M, et al. The prognostic significance of serum gamma-glutamyltransferase levels and AST/ALT in primary hepatic carcinoma [J]. *BMC Cancer*, 2019, 19: 841.
- [22] 何晓莉,苗辉. AST、ALT 与  $\gamma$ -GT 检验在肝硬化患者中的应用价值分析 [J]. *数理医药学杂志*, 2021, 34 (11): 1718-1720.
- [23] WANG G W, ZHANG X L, WU Q H, et al. The hepatoprotective effects of *Sedum sarmentosum* extract and its isolated major constituent through Nrf2 activation and NF- $\kappa$ B inhibition [J]. *Phytomedicine*, 2019, 53(22): 263-273.
- [24] LI R J, ZHANG M, WANG Y, et al. Effects of sub-chronic exposure to atmospheric  $\text{PM}_{2.5}$  on fibrosis, inflammation, endoplasmic reticulum stress and apoptosis in the livers of rats [J]. *Toxicology Research*, 2018, 7(2): 271-282.

(责任编辑 闫杏丽)