

黑木耳蛋白多糖复合物对染铅小鼠全血及小肠的影响

冯 嫣 高雨卉 张梦娜

(吕梁学院,山西 吕梁 033000)

摘要: [目的] 旨在探讨同笼饲养方式下黑木耳蛋白多糖复合物(PPC)对小鼠排铅的调控作用。[方法] 选择 60 只昆明小鼠随机分为:空白对照组(NC)、染铅模型组(Pb)、PPC 组、染铅组和 PPC 同笼饲养组(Co-Pb+Co-PPC 组),饲养 8 周后,以全自动血细胞分析仪测定红细胞和血红蛋白的浓度;ICP-MS 测定小鼠全血、小肠、粪便中铅的含量;ELISA 试剂盒用来检测血清中脂多糖(LPS)含量及小肠溶菌酶、 β -防御素和 sIgA 的水平。[结果] 与 NC 组比,Pb 组血铅、小肠铅、粪便铅及 LPS 含量显著升高($P < 0.05$);红细胞数量、血红蛋白浓度、溶菌酶、 β -防御素、sIgA 含量显著下降($P < 0.05$);与 Pb 组比,Co-Pb 组血铅、小肠铅含量显著下降($P < 0.05$),血红蛋白浓度和粪便铅含量显著升高($P < 0.05$);红细胞数量、溶菌酶含量、 β -防御素、sIgA 含量升高,差异不明显;PPC、Co-PPC 组 LPS、血铅、小肠铅含量均显著下降($P < 0.05$),血红蛋白浓度、粪便铅含量、溶菌酶、 β -防御素、sIgA 含量显著升高($P < 0.05$),红细胞数量差异不明显。[结论] PPC 可以促进小鼠排铅和改善血液和小肠状况。

关键词: 同笼饲养;黑木耳蛋白多糖复合物;铅;全血;小肠

Effects of *Auricularia auricular* protein-polysaccharide complex on whole blood and small intestine of lead-infected mice

FENG Yan GAO Yuhui ZHANG Mengna

(Lyuliang University, Lyuliang, Shanxi 033000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the regulatory effect of *Auricularia auricular* protein-polysaccharide complex (PPC) on lead (Pb) excretion in mice under co-cage rearing. [Methods] Sixty Kunming mice were randomized into blank control (NC), model (Pb), PPC, Co-Pb, and Co-PPC groups. After 8 weeks of feeding, the concentrations of red blood cells and hemoglobin are measured by a fully automated hematology analyzer. ICP-MS is employed to determine the Pb content in the whole blood, small intestine, and feces of mice. The ELISA kit is used to measure the content of lipopolysaccharides (LPS) in the serum and the levels of lysozymes, β -defensins, and sIgA in the small intestine. [Results] Compared with the NC group, the Pb group has increased levels of Pb in the blood, small intestine, and feces and LPS in the serum ($P < 0.05$) and decreased red blood cell count, hemoglobin concentration, and levels of lysozymes, β -defensins, and sIgA ($P < 0.05$). Compared with the Pb group, the Co-Pb group shows decreases in Pb content in the blood and small intestine ($P < 0.05$), increases in the hemoglobin concentration and fecal Pb content ($P < 0.05$), and insignificant increases in red blood cell count and levels of lysozymes, β -defensins, and sIgA. The PPC and Co-PPC groups show declines in the levels of LPS in the serum and Pb in the blood and small intestine ($P < 0.05$), elevations in the hemoglobin concentration, fecal Pb content, and levels of lysozymes, β -defensins, and sIgA ($P < 0.05$), and no significant difference in red blood cell count. [Conclusion] PPC can promote Pb excretion and improve blood and small intestine conditions in mice.

基金项目: 山西省基础研究计划自然科学研究青年项目(编号:202303021212283);山西省高等学校大学生创新创业训练项目(编号:20241331);山西省高等学校科技创新计划项目(编号:2023L375)

通信作者: 冯嫣(1986—),女,吕梁学院副教授,硕士。E-mail:422644129@qq.com

收稿日期: 2024-08-01 **改回日期:** 2025-09-15

引用格式: 冯嫣,高雨卉,张梦娜. 黑木耳蛋白多糖复合物对染铅小鼠全血及小肠的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 129-135.

Citation: FENG Yan, GAO Yuhui, ZHANG Mengna. Effects of *Auricularia auricular* protein-polysaccharide complex on whole blood and small intestine of lead-infected mice[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 129-135.

Keywords: co-cage rearing; *Auricularia auricular* protein-polysaccharide complex; lead; whole blood; small intestine

铅(Pb)作为一种常见且具有悠久应用历史的重金属环境污染物,广泛存在于自然与人类活动环境中。通过长期低剂量呼吸道与消化道暴露,铅可逐渐在机体多种组织与器官中蓄积,并对骨骼系统、神经系统、造血系统及生殖系统等造成多方面的毒性损害^[1]。然而,目前临幊上针对铅中毒的治疗仍广泛采用依地酸钙钠、二巯丁二钠等传统螯合剂。这类药物在促进铅排泄的同时,也会造成体内锌、铜、铁等必需元素的流失,导致依赖这些微量元素的酶活性下降,并可能引发肾功能损伤等副作用^[2],亟需研制出在排铅的同时对其他微量元素影响较小的物质。

黑木耳(*Auricularia auricular*),性平味甘,具有滋补、润燥、养血益胃、润肺的作用^[3],属于真菌门担子菌纲^[4],黑木耳富含蛋白质、氨基酸、多糖、黄酮类化合物及钙、铁、磷等人体所需的矿物质元素,具有很高的研究和利用价值^[5]。黑木耳多糖可以有效降低血液黏稠度,有效预防血栓的形成,能够防止白细胞降低,提高机体免疫力,预防多种老年性疾病^[6]。同时还具备调节肠道功能、抑制肿瘤生长等生理活性,并可作为优质的膳食纤维来源,具有多种健康促进作用^[7]。尽管其营养功效已得到广泛验证,但传统水提醇沉工艺在提取过程中会产生大量副产物——菌渣,其中富含营养价值较高的蛋白质成分^[8]。黑木耳蛋白属于优质食用菌蛋白,其营养价值优于许多常见的动植物蛋白来源。黑木耳蛋白质的溶解性和持水性均优于大豆蛋白,拥有很高的研究价值^[9]。除免疫调节作用外,黑木耳蛋白还表现出抗肿瘤、降血糖、降血脂及抗氧化等多种生物活性^[10]。研究^[11]显示,黑木耳内的多糖和蛋白质能够有效缓解铅毒性所诱导的氧化应激反应,显著降低其毒性效应,使用天然多糖蛋白复合物排出铅的方法安全性高、副作用小、排铅对机体必需元素代谢影响极小。

在多糖—蛋白复合物的相关研究中,戴春群^[12]探讨了抗坏血酸预处理对糖尿病大鼠肾脏缺血再灌注后肾小球内皮表面多糖—蛋白复合物的影响,发现补充该复合物能够显著缓解糖尿病大鼠因肾缺血再灌注所造成组织损伤。嵇蓉^[13]针对海藻硫酸多糖蛋白复合物的有效活性成分的构成特点,研究了纯化后海藻多糖蛋白复合物在体内、外的抗肿瘤机制,发现经海藻多糖蛋白复合物(PSPPC)处理后,荷瘤小鼠免疫功能低下状态得到改善;PSPPC能够一定程度地增强细胞杀伤活性,并且能够提高淋巴细胞增殖功能。陈刚等^[14]开展了蜈蚣多糖蛋白复合物的提取分离及其抗肿瘤活性研究,发现蜈蚣多糖蛋白

白复合物(SPPC)对多种癌细胞增殖均有明显的抑制作用;SPPC可明显提高荷瘤小鼠腹腔巨噬细胞吞噬功能和胸腺指数,增强NK细胞毒性和IL-2活性;SPPC为一种新的具有抗肿瘤活性的多糖蛋白复合物,其作用机制与调节机体免疫功能有关。目前对于黑木耳蛋白多糖复合物(PPC)的相关研究甚少,PPC作为活性成分及稳定剂的相关报道也少,大多是有关其他原料中蛋白—多糖的自组装。

研究拟建立铅暴露小鼠模型，并利用 PPC 进行干预，部分染铅小鼠将与 PPC 干预小鼠共同饲养，通过比较分析全血铅含量、血红蛋白水平及小肠屏障功能相关指标，并探究同笼饲养方式下黑木耳蛋白多糖复合物对染铅小鼠全血和小肠的影响，以期为木耳开发为一种促排铅保健功能食品提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

黑木耳蛋白多糖复合物:PPC粉末中蛋白占71.34%,多糖占15.68%,水分占6.7%,灰分占6.2%,吕梁学院实验室自制;

乙酸铅、硝酸、高氯酸:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

LZM 试剂盒、 β -防御素试剂盒、sIgA ELISA 试剂盒：
上海江莱生物科技有限公司。

1.1.2 仪器

电感耦合等离子发射光谱仪:Optima 5300DV型,美国PE公司;

酶标仪: Spectramax i3X 型, 美国 Molecular Devices 公司;

石墨消解仪:GDI42-200S型,云祥(天津)仪器有限公司;

冷冻离心机：Eppendorf centrifuge 5417R 型，德国 Eppendorf公司。

1.2 方法

1.2.1 动物分组及处理 选用斯贝福(北京)生物技术有

限公司[SCXK(京)2019-0010]的SPF级雄性昆明小鼠,周龄为3周。饲养工作在山西农业大学实验动物管理中心完成,该机构持有[SYXK(晋)2020-0003]许可证。维持22℃恒温环境,55%湿度与20lx光照强度,12 h明暗交替,自由摄食与饮水。经过7 d适应期后,随机划分成5组:空白对照组(NC)、铅暴露模型组(Pb)、黑木耳蛋白多糖复合物干预组(PPC)、共栖铅暴露组(Co-Pb)及共栖

PPC 干预组 (Co-PPC), 各组 15 只。基于文献调研与预试验结果, 模拟自然暴露情境: 除 NC 组外, 其余各组给予含 1 g/L Pb^{2+} 的水溶液作为唯一饮用水源。PPC、Po-PPC 组每日灌胃一次 400 mg/kg 的 PPC 溶液; NC、Pb 及 Co-Pb 组灌胃等体积生理盐水。持续 8 周后, 禁食 12 h 安乐处死小鼠, 采集血液、肠内容物及粪便标本。

1.2.2 血液学指标检测方案 采用全自动血细胞分析技术进行红细胞计数与血红蛋白浓度测定。血清脂多糖水平检测则严格遵循商品化试剂盒操作规范执行。

1.2.3 生物样本铅含量分析流程 取适量全血、肠道组织及粪便样品置于专用消化容器中。参照 GB 5009.12—2017 标准方法, 采用石墨消解系统湿法消解程序。最终采用电感耦合等离子体质谱技术 (ICP-MS) 定量分析铅元素。

1.2.4 肠道免疫指标检测 分别按照相应检测试剂盒说明书要求测定溶菌酶活性、 β -防御素含量及分泌型免疫球蛋白 A (sIgA) 水平。

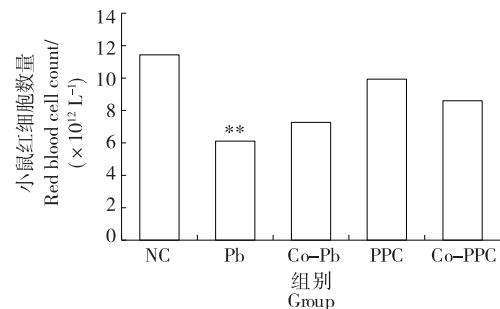
1.3 数据处理

数据以平均值 \pm 标准差的形式表示。采用 Excel 2021 软件绘制柱状图, 利用 SPSS 27.0 软件进行差异显著性分析。 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 PPC 对染铅小鼠红细胞、血红蛋白及血清脂多糖的影响

2.1.1 红细胞数量 由图 1 可知, 与 NC 组相比, Pb 组红细胞数量极显著降低 ($P < 0.01$)。与 Pb 组相比, Co-Pb 组、PPC 组、Co-PPC 组红细胞数量增多, 但差异不显著。Co-PPC 相较于 Co-Pb, 红细胞数量呈上升趋势, 但无显著差异。红细胞具有红细胞膜, 因此具有可塑性和弹性, 膜可以控制进出红细胞的物质, 阻挡有毒物质和有毒重金属, 能够使机体维持正常生理活性^[14]。试验中, Pb 组小鼠比 NC 组小鼠红细胞数量极显著降低, 表明 Pb 会增加红细胞脆性和膜通透性, 使小鼠自身造血能力受到损伤, 甚至可能会患上贫血。Pb 还会导致红细胞中增加的游离原卟啉络合体内的锌离子形成锌卟啉, 从而对造血系统产生危害^[15]。PPC 组与 Co-PPC 组中观察到的红细胞数量上升现象明显可见, 铅暴露引发的红细胞减少状况由此得到缓解。红细胞脆性状态的改善及膜通透性变化的修复作用被 PPC 物质所证实。Co-Pb 组血清样本内红细胞计数数值较 Pb 组呈显著升高趋势, 试验数据表明: 同笼饲养条件下的 Co-PPC 小鼠与 Co-Pb 小鼠之间存在着某种相互作用机制。铅毒性对红细胞膜通透性的损害程度通过此种共居方式得以减轻, 可能是动物共居行为促使血液系统防御功能增强, 进而针对铅暴露造成的



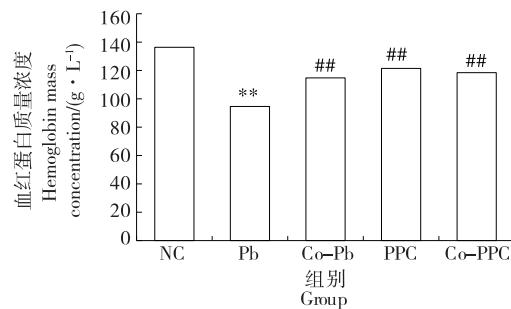
** 表示与 NC 组相比差异极显著 ($P < 0.01$)

图 1 PPC 对小鼠红细胞数量的影响

Figure 1 Effect of PPC on the red blood cell count in mice

危害产生了抵抗效果。

2.1.2 血红蛋白浓度 由图 2 可知, 与 NC 组相比, Pb 组血红蛋白质量浓度极显著降低 ($P < 0.01$)。与 Pb 组相比, Co-Pb、PPC、Co-PPC 组血红蛋白质量浓度极显著升高。Co-PPC 相较于 Co-Pb, 血红蛋白质量浓度明显升高, 具有极显著性差异 ($P < 0.01$)。铅暴露导致小鼠血红蛋白质量浓度显著下降, 可能是血红素合成酶的活性受到 Pb 显著抑制, 二价铁离子与原卟啉的结合过程由此受阻, 血液系统中血红素的生物合成因此呈下降趋势, 血红蛋白质量浓度降低。PPC 组与 Co-PPC 组均能够显著逆转铅暴露所引起的血红蛋白质量浓度降低, 表明 PPC 具有缓解铅对血液系统毒性的作用。同时, Co-Pb 组小鼠的血红蛋白质量浓度显著高于 Pb 组, 提示 Co-PPC 与 Co-Pb 小鼠共同饲养可能通过个体间交互减轻铅所致的血液损害。推测该保护效应可能与 Co-PPC 小鼠肠道菌群向 Co-Pb 小鼠的传递有关, 其机制涉及菌群结构调节及多种代谢通路的变化, 包括甘油磷脂代谢、花生四烯酸代谢、亚油酸代谢、泛醌及其他萜醌生物合成、 α -亚麻酸代谢、糖基磷脂酰肌醇锚定生物合成以及谷胱甘肽代谢等。这些代谢途径的



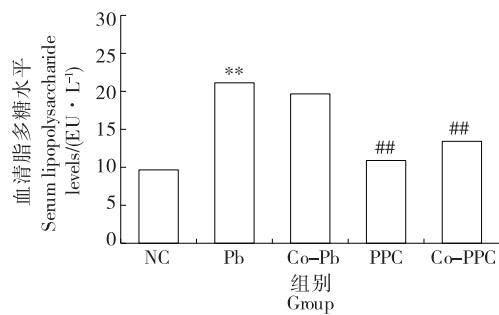
** 表示与 NC 组相比差异极显著 ($P < 0.01$); ## 表示与 Pb 组相比差异极显著 ($P < 0.01$)

图 2 PPC 对小鼠血红蛋白质量浓度的影响

Figure 2 Effect of PPC on the hemoglobin mass concentration in mice

协同作用可能有助于改善肠道屏障功能并促进整体肠道健康。后续研究应重点关注共饲养模型中菌群交互是否对铅暴露小鼠的肠道屏障具有保护作用,并对相关微生物组及代谢组学机制进行深入探讨。

2.1.3 血清脂多糖水平 由图3可知,与NC组相比,Pb组脂多糖水平上升,差异极显著($P<0.01$)。与Pb组相比,Co-Pb组脂多糖水平下降,但无明显差异,PPC、Co-PPC组脂多糖水平极显著降低($P<0.01$)。Co-PPC相较于Co-Pb,脂多糖水平下降,无显著差异。在正常生理状态下,人和动物血清中的脂多糖水平通常维持在较低范围。当肠道屏障结构受损或通透性增加时,肠道内的细菌及内毒素易发生易位,可能引发局部甚至系统性感染,导致脂多糖由肠道进入血液循环,并可诱发全身炎症反应。铅暴露可显著提高血清脂多糖水平,其机制可能与铅抑制含巯基细胞酶的活性、促进氧自由基生成,并改变抗氧化酶系统功能有关,这些变化共同加剧了对肠道屏障的氧化损伤。研究显示,PPC与Co-PPC处理均能够显著抑制铅引起的血清脂多糖升高,说明PPC有助于缓解铅对机体血液系统的毒性作用。此外,Co-Pb组血清脂多糖水平低于Pb组,提示Co-PPC与Co-Pb小鼠共饲养可能通过个体间交互作用减轻铅的危害。推测共饲养环境可能促进了Co-PPC小鼠有益菌群向Co-Pb小鼠的传递,从而调节后者肠道菌群组成,增强屏障功能并改善健康状态。后续研究应重点关注共饲养模式下两组小鼠之间肠道菌群的交互作用是否参与减轻铅所致肠道屏障损伤,并对相关菌群结构及功能进行深入分析。



**表示与NC组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与Pb组相比差异极显著($P<0.01$)

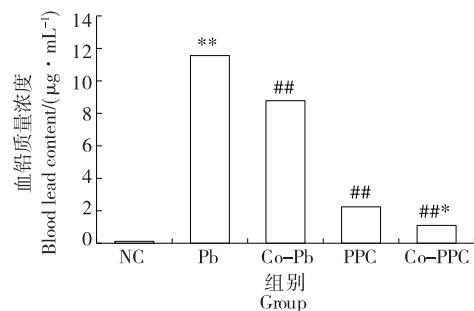
图3 PPC对小鼠血清脂多糖的影响

Figure 3 Effect of PPC on the serum level of LPS in mice

2.2 PPC对小鼠全血、小肠、粪便中铅含量的影响

2.2.1 血铅含量 由图4可知,与NC组相比,Pb组小鼠全血中铅质量浓度显著上升($P<0.01$)。在给予不同干预后,与Pb组相比,Co-Pb组、PPC组及Co-PPC组动物的血铅水平均出现极显著下降($P<0.01$)。此外,Co-PPC组较

Co-Pb组显示出更明显的降低效果,血铅含量差异显著($P<0.05$)。Pb组的血铅含量显著提高,可能是Pb进入动物体内,主要蓄积在血液中。PPC、Co-PPC组血铅含量显著下降,表明无论是单独饲养还是与Co-Pb组同笼饲养,PPC处理均能有效促进小鼠体内铅的排出。Co-PPC小鼠与Co-Pb小鼠同笼饲养可减缓铅的吸收,提示同笼饲养可能通过某种方式交流减缓铅的吸收。

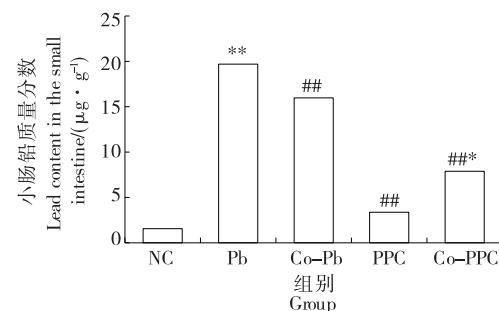


**表示与NC组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与Pb组相比差异极显著($P<0.01$);*表示与Co-Pb组相比差异显著($P<0.05$)

图4 PPC对小鼠血铅含量的影响

Figure 4 Effect of PPC on the lead content in the blood of mice

2.2.2 小肠中的铅含量 由图5可知,与NC组相比,Pb组小鼠小肠组织中的含铅量极显著增加($P<0.01$)。在干预处理后,Co-Pb组、PPC组及Co-PPC组小鼠小肠铅含量均较Pb组极显著下降($P<0.01$)。进一步组间比较显示,Co-PPC组小鼠小肠铅含量显著低于Co-Pb组($P<0.05$)。Pb组相比NC组,小肠铅含量明显升高,Pb可能会附着在小肠壁上,无法正常代谢,会有大量Pb残留在小肠中,破坏小鼠的排泄能力。PPC、Co-PPC组小肠铅含量显著下



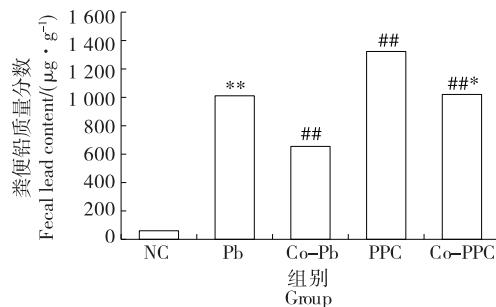
**表示与NC组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与Pb组相比差异极显著($P<0.01$);*表示与Co-Pb组相比差异显著($P<0.05$)

图5 PPC对小鼠小肠铅含量的影响

Figure 5 Effect of PPC on the lead content in the small intestine of mice

降,Co-Pb组小肠铅含量显著下降,表明无论是单独饲养还是与Co-Pb组同笼饲养,PPC处理均能促进小鼠对铅的排泄作用^[16-18],减少小鼠全血和小肠中铅的累积,进而降低染铅小鼠机体铅水平。Co-Pb组小鼠可能是受到了Co-PPC组小鼠肠道菌群的影响,缓解铅对肠道屏障功能的损伤。

2.2.3 粪便中的铅含量 由图6可知,与NC组相比,Pb组粪便中铅含量极显著提高($P<0.01$)。与Pb组相比可知,Co-Pb组、PPC组、Co-PPC组粪便中铅含量极显著变化($P<0.01$)。对于Co-Pb组,Co-PPC组粪便中铅含量显著升高($P<0.05$)。Pb组粪便铅含量明显升高,染铅会导致小鼠粪便中铅含量的蓄积。PPC组与Co-PPC组粪便铅含量显著上升,可能是PPC提高了小鼠的代谢能力,从而降低染铅小鼠机体铅水平。表明无论是单独饲养还是与Co-Pb组同笼饲养,PPC处理均可以促进小鼠对铅的排泄,Co-Pb组可能是受到了Co-PPC组的肠道菌群交流的影响,增加Co-Pb组小鼠肠道菌群的丰度,使小肠代谢能力升高,使机体排铅能力上升。Co-PPC组也可能是受到了Co-Pb组肠道菌群的影响,小肠代谢能力有一定程度的降低,减少了粪便中铅的蓄积。



**表示与NC组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与Pb组相比差异极显著($P<0.01$);*表示与Co-Pb组相比差异显著($P<0.05$)

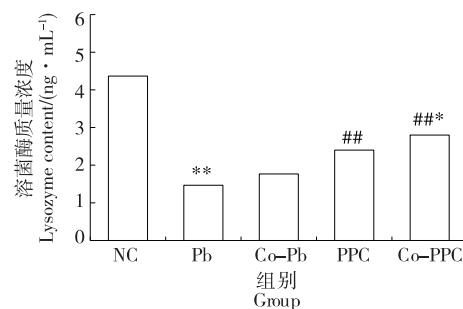
图6 PPC对小鼠粪便铅含量的影响

Figure 6 Effect of PPC on the lead content in the feces of mice

2.3 PPC对小肠组织溶菌酶、 β -防御素、sIgA的影响

2.3.1 溶菌酶含量 由图7可知,与NC组相比,Pb组的溶菌酶含量极显著下降($P<0.01$)。对于Pb组,Co-Pb组溶菌酶含量上升,但差异不显著;PPC组、Co-PPC组溶菌酶含量极显著上升($P<0.01$)。Co-PPC组溶菌酶含量显著高于Co-Pb组($P<0.05$)。溶菌酶是一种天然抗菌肽,主要由小肠潘氏细胞合成并分泌,可通过清除肠道有害微生物以维护肠道健康。试验发现,铅能够显著降低小肠内溶菌酶含量,说明铅对小鼠肠道造成了损伤,PPC和

Co-PPC均可逆转上述变化,减轻铅引起的肠道组织损伤,并增强肠屏障的完整性。Co-Pb组与Pb组对比,小肠的溶菌酶含量差异不显著,猜测可能与其混养周期有关。Co-PPC组与PPC组对比,溶菌酶含量升高,可能是Co-PPC组受到Co-Pb组肠道菌群的影响,使PPC逆转局势程度增大,因而溶菌酶含量增多。

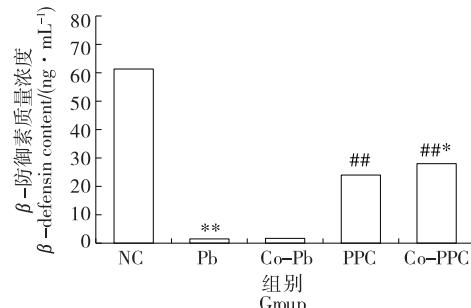


**表示与NC组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与Pb组相比差异极显著($P<0.01$);*表示与Co-Pb组相比差异显著($P<0.05$)

图7 PPC对小鼠溶菌酶含量的影响

Figure 7 Effect of PPC on the lysozyme content in mice

2.3.2 β -防御素含量 由图8可知,与NC组相比,Pb组小鼠肠道中 β -防御素的表达水平极显著下降($P<0.01$)。干预后,与Pb组比较,Co-Pb组 β -防御素虽略有回升,但差异不显著;而PPC组和Co-PPC组极显著升高($P<0.01$)。此外,Co-PPC组的 β -防御素含量显著高于Co-Pb组($P<0.05$)。 β -防御素作为一种由潘氏细胞分泌的天然抗菌肽,可有效清除肠道病原微生物,参与肠黏膜屏障的保护。铅暴露显著抑制了 β -防御素的表达,提示其可能通过该机制破坏肠道屏障结构。研究中,PPC及Co-PPC干预均表现出逆转这一有害效应的作用。Co-Pb组与Pb组对比, β -防御素含量差异不显著,猜测可能与其混养周期有关。Co-PPC组与PPC组相比, β -防御素含量上升,可能



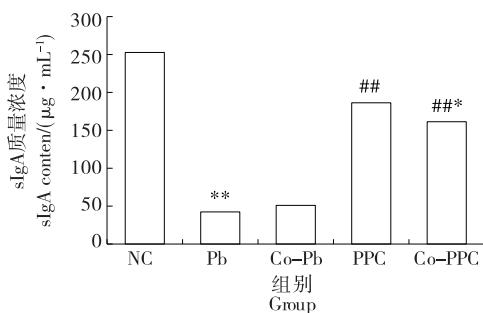
**表示与NC组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与Pb组相比差异极显著($P<0.01$);*表示与Co-Pb组相比差异显著($P<0.05$)

图8 PPC对小鼠 β -防御素含量的影响

Figure 8 Effect of PPC on the β -defensin content in mice

Co-PPC 组受到 Co-Pb 组微生物群的传播, PPC 上调有益菌群丰度, 减轻铅暴露对肠道屏障的损害, 从而使 β -防御素含量增多。

2.3.3 sIgA 含量 由图 9 可知, 与 NC 组相比, Pb 组小鼠肠道 sIgA 的表达水平极显著降低($P<0.01$)。经干预后, Co-Pb 组 sIgA 含量较 Pb 组有所回升, 但差异未达到显著性水平; PPC、Co-PPC 组 sIgA 含量极显著升高($P<0.01$)。Co-PPC 组 sIgA 含量显著高于 Co-Pb 组($P<0.05$)。sIgA 是肠黏膜免疫系统中的关键免疫分子, 作为宿主抵抗肠道病原体入侵的首道免疫屏障, 是肠道免疫力的主要效应因子。铅显著降低了 sIgA 含量, 表明铅暴露对小鼠肠道造成了损伤, 并破坏了其屏障功能。而经 PPC 和 Co-PPC 干预后, 肠道屏障结构及功能均得到一定改善, 损伤程度有所减轻。Co-Pb 组与 Pb 组对比, 小肠 sIgA 含量差异不显著, 猜测可能与其混养周期有关。Co-PPC 组与 PPC 组相比, β -防御素含量上升, 可能是 Co-PPC 组受到 Co-Pb 组肠道有益菌菌群的交互, 使 PPC 逆转局势程度增大, 溶菌酶含量增多。



**表示与 NC 组相比差异极显著($P<0.01$);##表示与 Pb 组相比差异极显著($P<0.01$);*表示与 Co-Pb 组相比差异显著($P<0.05$)

图 9 PPC 对小鼠 sIgA 含量的影响

Figure 9 Effect of PPC on the sIgA content in mice

3 结论

通过构建染铅小鼠模型, 探讨了黑木耳蛋白多糖复合物在同笼饲养方式下对小鼠排铅及血液、小肠功能的影响。结果显示, 染铅模型组小鼠的血铅、小肠铅、粪便铅及血清脂多糖含量显著升高, 红细胞数量、血红蛋白质量浓度及小肠溶菌酶、 β -防御素、分泌型免疫球蛋白 A 含量显著下降。经黑木耳蛋白多糖复合物干预后, 小鼠血铅和小肠铅含量显著降低, 粪便铅含量显著升高, 血红蛋白质量浓度及小肠免疫相关物质水平明显改善; 同笼饲养的染铅组小鼠血液和小肠指标也有一定改善。这表明黑木耳蛋白多糖复合物可促进小鼠排铅, 改善铅暴露导致的血液系统损伤和小肠屏障功能异常, 且同笼饲养可

能通过菌群交流辅助缓解铅毒性。

研究证实了黑木耳蛋白多糖复合物的排铅作用, 但尚未直接验证同笼饲养中菌群传递的具体机制, 缺乏肠道菌群组成及代谢通路的检测数据。未来研究可从 3 个方面深入:①通过宏基因组测序分析同笼饲养小鼠肠道菌群结构差异, 明确关键菌群的作用;②检测肠道屏障相关紧密连接蛋白表达及炎症因子水平, 阐明黑木耳蛋白多糖复合物保护肠道屏障的分子机制;③开展剂量效应研究, 确定黑木耳蛋白多糖复合物的最佳干预剂量, 为其开发为功能性排铅食品提供更全面的试验依据。

参考文献

- ABELSOHN A R, SANBORN M. Lead and children: clinical management for family physicians[J]. Canadian Family Physician, 2010, 56(6): 531-535.
- 初金鑫, 韩宝芹, 蔡文娣, 等. 羧甲基壳聚糖钙对染铅小鼠治疗性排铅作用的研究[J]. 中国海洋药物, 2007(1): 28-30.
- CHU J X, HAN B Q, CAI W D, et al. Study on lead expelling effect of carboxymethyl chitosan calcium in lead poisoned mice [J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2007(1): 28-30.
- SHUI G H, WONG S P, LEONG L P. Characterization of antioxidants and change of antioxidant levels during storage of *Manilkara zapota* L. [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(26): 7 834-7 841.
- 颜戊利, 王林静. 食用菌矿物质含量测定和营养评价[J]. 食品科技, 2010, 35(7): 81-84.
- YAN W L, WANG L J. Measurment of mineral elements and nutritional evaluation of edible mushrooms[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(7): 81-84.
- 郝文芳. 黑木耳胶原蛋白的分离提取及其功能特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008: 1-66.
- HAO W F. Study on the extraction and functional characteristic of collagen from *Auricularia auricula*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008: 1-66.
- XU S Q, ZHANG Y J, JIANG K. Antioxidant activity in vitro and in vivo of the polysaccharides from different varieties of *Auricularia auricula*[J]. Food & Function, 2016, 7(9): 3 868-3 879.
- 郑钧予, 丑建栋, 彭晓龙, 等. 复合酶法提取黑木耳多糖方法优化[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 183-185, 199.
- ZHENG J Y, CHOU J D, PENG X L, et al. Study on compound enzymatic hydrolysis of jew's-ear's polysaccharides[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences 2015, 43(3): 183-185, 199.
- 宗昱丞. 香菇中蛋白—多糖复合物的分离鉴定及其在 Pickering 乳液中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 10-15.
- ZONG Y C. Isolation and identification of protein-polysaccharide complex from shiitake mushroom and its application in pickering emulsion[D]. Wuxi: Jiangnan

- University, 2022: 10-15.
- [9] 徐秀卉, 杨波. 超声波法提取黑木耳多糖的工艺[J]. 药学与临床研究, 2011, 19(2): 189-190.
- XU X H, YANG B. Study on extraction techniques of polysaccharides from *Auricularia auriculajudae* by ultrasonic wave[J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2011, 19(2): 189-190.
- [10] 樊黎生, 张声华, 吴小刚. 微波辅助提取黑木耳多糖的研究 [J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(10): 142-144, 148.
- FAN L S, ZHANG S H, WU X G. Studies on the microwave-assisted extraction method of polysaccharides from *Auricularia auricula*[J]. Food and Fermentation Industries, 2005, 31(10): 142-144, 148.
- [11] 赵蕴华, 火少畔, 李英华, 等. 国内天然产物排铅作用研究进展[J]. 中国工业医学杂志, 2023, 36(5): 467-469.
- ZHAO Y H, HUO S Y, LI Y H, et al. Research progress on the lead - removing effect of natural products in China[J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2023, 36(5): 467-469.
- [12] 戴春群. 抗坏血酸对糖尿病大鼠肾脏缺血—再灌注后肾小球内皮多糖—蛋白复合物的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 1-5.
- DAI C Q. The effects of ascorbic acid on glomerular endothelial cell protein complex in diabetic rats with renal ischemia-reperfusion injury[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016: 1-5.
- [13] 嵇蓉. 纯化后海藻硫酸多糖蛋白复合物抗肿瘤作用研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2006: 11-20.
- JI R. Study of purified sulfated polysaccharide-protein complex on tumor inhibition[D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, Chinese People's Liberation Army, 2006: 1-5.
- [14] 陈刚, 朱玲新, 周倩, 等. 蜈蚣多糖蛋白复合物的提取分离及其抗肿瘤活性研究[J]. 医学导报, 2007(11): 97.
- CHEN G, ZHU L X, ZHOU Q, et al. Extraction, separation, and antitumor activity of *Centipede* polysaccharide complex [J]. Medical Review, 2007(11): 97.
- [15] 王变利, 张蕊, 李林林, 等. 红细胞膜流动性的研究进展[J]. 生命的化学, 2024, 44(1): 1-8.
- WANG B L, ZHANG R, LI L L, et al. Research progress of erythrocyte membrane fluidity[J]. Chemistry of Life, 2024, 44 (1): 1-8.
- [16] 何晓庆, 罗进斌, 裴淑华. 职业性铅接触工人血铅及血液指标的变化[J]. 中国农村卫生事业管理, 2015, 35(9): 1 141-1 143.
- HE X Q, LUO J B, QIU S H. Changes of blood lead and blood cell parameters of lead-exposed workers[J]. Chinese Rural Health Service Administration, 2015, 35(9): 1 141-1 143.
- [17] 卢星如, 吴蕊, 艾洪湖, 等. 绣球菌多糖对铅诱导小鼠肾脏氧化应激和自噬损伤的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(12): 8 097-8 110.
- LU X R, WU R, AI H H, et al. Effects of *Sparassis latifolia* polysaccharide on oxidative stress and autophagy injury of kidney in mice induced by lead[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(12): 8 097-8 110.
- [18] 翟晨. 广叶绣球菌多糖对铅所致小鼠骨骼钙代谢紊乱的调控作用[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022: 3-27.
- ZHAI C. Regulatory effects of *Sparassis latifolia* polysaccharides on lead-induced skeletal calcium metabolism disorders in mice[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022: 3-27.