

鹿皮胶多肽-铁螯合物对缺铁性贫血幼鼠的改善作用

赵春娇, 游世琳, 刘文轩, 李银清*
(长春中医药大学药学院, 吉林长春 130117)

摘要：该研究探讨了以鹿皮胶为原料，经蛋白酶酶解和氯化亚铁（FeCl₂·4H₂O）处理制备鹿皮胶肽-铁螯合物（Deer Skin Gelatin Peptide-Fe, DSGP-Fe），对 DSGP-Fe 的补血作用进行初步药效学研究。利用傅里叶红外光谱和扫描电镜对其结构进行分析；采用饲喂缺铁饲料联合放血法建立缺铁性贫血模型，造模成功后，给予对应药物，直至 Hb 值 >110 g/L。结束后，检测小鼠脏器指数、铁代谢相关血清因子指标、肝损伤相关指标、氧化应激指标。表征结果显示，DSGP-Fe 是疏松的块状结构，Fe²⁺ 主要与鹿皮胶肽（Deer Skin Gelatin Peptide, DSGP）中的氨基、羧基等螯合活性基团结合形成 DSGP-Fe。琥珀酸亚铁片、DSGP 和 DSGP-Fe 可提高 IDA 幼鼠体质量（42.3、35.7、41.8 g）、脾脏指数（3.58、3.91、3.63 mg/g）和肝脏指数（2.31%、2.02%、2.28%），升高 SI（32.52、27.35、35.47 mg/L）、SF（34.34、32.21、36.34 ng/L）和 TSAT（7.49%、7.25%、7.32%）水平，降低 TIBC（4.34、3.77、4.84 mg/L）水平，GSH（13.34、11.34、14.65 μmol/g prot）、SOD（209.35、193.52、216.58 U/mg prot）活性显著升高，ALT（27.34、20.77、20.34 U/L）、AST（61.34、50.21、50.34 U/L）、MDA（1.54、1.67、1.52 nmol/mg prot）含量显著降低。综上所述，DSGP-Fe 对缺铁性贫血幼鼠具有明显的补铁、调节铁代谢的作用，以及提高抗氧化能力，因此 DSGP-Fe 可作为新的潜在铁源，为鹿皮胶开发铁强化剂提供新思路。

关键词：鹿皮胶多肽-铁螯合物；结构表征；缺铁性贫血；铁代谢

文章编号：1673-9078(2025)09-65-72

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0863

The Ameliorating Effect of Deer Skin Gelatin Polypeptide-iron Chelate against Iron Deficiency Anemia in Young Mice

ZHAO Chunjiao, YOU Shilin, LIU Wenxuan, LI Yinqing*

(School of Pharmacy, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130117, China)

Abstract: In this study, a deer skin gelatin peptide-Fe (DSGP-Fe) chelate was prepared using deer skin gelatin as the raw material, which was subjected to proteolytic hydrolysis and ferrous chloride (FeCl₂·4H₂O) treatment, and the preliminary pharmacological study was carried out on its blood-supplementing effect. The structure was analyzed using Fourier infrared spectroscopy and scanning electron microscopy; an iron-deficiency anemia model was established by a combination of feeding an iron-deficient diet and bloodletting. After the model was successfully established, the corresponding medication was given until the Hb value was higher than 110 g/L. At the end of the experiment, the organ indexes, iron metabolism-related serum factor indexes, liver injury-related indexes, and oxidative stress indexes of the mice were measured.

引文格式：

赵春娇,游世琳,刘文轩,等.鹿皮胶多肽-铁螯合物对缺铁性贫血幼鼠的改善作用[J].现代食品科技,2025,41(9):65-72.

ZHAO Chunjiao, YOU Shilin, LIU Wenxuan, et al. The ameliorating effect of deer skin gelatin polypeptide-iron chelate against iron deficiency anemia in young mice [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 65-72.

收稿日期：2024-06-18；修回日期：2024-08-14；接受日期：2024-08-21

基金项目：吉林省科技发展项目（20210204007YY）

作者简介：赵春娇（2000-），女，硕士，研究方向：中药药性理论及中药作用机制研究，E-mail：2794164957@qq.com

通讯作者：李银清（1981-），女，博士，副研究员，研究方向：中药及分子药理学，E-mail：liagh@foxmail.com

Characterization results show that DSGP-Fe had a loose bulk structure, in which Fe^{2+} mainly bound to the chelating active groups such as amino and carboxyl groups in deer skin gelatin peptide (DSGP) to form DSGP-Fe. Ferrous succinate tablets, DSGP and DSGP-Fe increased the IDA group's body weight (42.3, 35.7, 41.8 g), splenic index (3.58, 3.91, 3.63 mg/g) and hepatic index (2.31%, 2.02%, 2.28%), SI (32.52, 27.35, 35.47 mg/L), SF (34.34, 32.21, 36.34 ng/L) and TSAT (7.49%, 7.25%, 7.32%) levels, decreased their TIBC (4.34, 3.77, 4.84 mg/L) levels, raised their GSH (13.34, 11.34, 14.65 $\mu\text{mol/g prot}$) and SOD (209.35, 193.52, 216.58 U/mg prot) activities, and reduced ALT (27.34, 20.77, 20.34 U/L), AST (61.34, 50.21, 50.34 U/L), and MDA (1.54, 1.67, 1.52 nmol/mg prot) contents. In conclusion, DSGP-Fe exerted significant effects on iron supplementation, regulation of iron metabolism, and enhancement of anti-oxidative stress capacity in young mice with iron-deficiency anemia. Therefore, DSGP-Fe can be used as a new potential source of iron, and provides a new idea for the development of iron fortifiers from deer skin gelatin.

Key words: deer skin gum polypeptide iron chelate; structural characterization; iron deficient anemia; iron metabolism

缺铁性贫血是指缺铁导致的红细胞生成减少而引起的贫血^[1], 是新生儿期最常见的营养障碍^[2]。目前, 治疗缺铁性贫血的药物有一百余种, 虽有一定程度的治疗效果, 但患者均有不同程度的胃肠刺激反应, 并且对肝脏的影响较大^[3,4]。

鹿皮胶是一种药食同源的动物药, 具有多种功效和丰富的营养价值, 蛋白含量极高, 含有多种氨基酸^[5]。以往研究多集中在含量测定、质量标准研究等方面^[6-8], 关于鹿皮胶肽铁螯合物的制备、结构表征及对缺铁性贫血的治疗作用的研究笔者未见文献报道。根据实验室前期对鹿皮胶成分分析发现^[9], 鹿皮胶内含有丰富的具有与铁离子结合优势的氨基酸, 如 Glu、Asp、Lys、His、Ser 和 Cys 等^[10]。因此, 它可能是金属离子螯合肽的极好来源。然而, 鹿皮胶本身大分子蛋白质, 存在难以完全消化的问题, 所以水解鹿皮胶获得生物利用率更高的活性肽是必要的。本研究通过酶解和螯合的方法制备了 DSGP-Fe, 并对其结构和对缺铁性贫血的治疗作用进行了考察。这些研究结果为鹿皮胶的发展和探索一种安全有效的新型铁补充剂的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鹿皮, 长春世鹿鹿业集团有限公司; 鹿皮胶 (采用清水煎煮制得), 实验室自制; 氯化亚铁、抗坏血酸, 上海源叶生物科技有限公司; 氢氧化钠、氯化钠、无水乙醇等其他试剂, 国药集团化学试剂有限公司; ELSIA 试剂盒, 上海酶联生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

UV-1780 紫外可见分光光度计, 岛津仪器 (苏

州) 有限公司; TGL16E 台式高速冷冻离心机, 长沙英泰仪器有限公司; Epsilon 2-4 LSCplus 型真空冷冻干燥机, Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH 公司; Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪, Perkin Elmer; TESCAN MIRA4 扫描电镜扫描电子显微镜, 国仪量子技术 (合肥) 股份有限公司; infinite M200 Pro 酶标仪, 瑞士迪肯公司。

1.3 实验动物

50 只 SPF 级 21 d 断乳 ICR 雄鼠, 小鼠许可证号: No.SCXK (辽) 2020-0001, 购自辽宁长生生物技术股份有限公司, 饲养于长春中医药大学实验动物中心。饲养期间所有幼鼠采用不锈钢笼盒, 注意避免其他来源的铁摄入。所有动物可以自由摄取去离子水和指定饲料。动物实验伦理号为 2024158。

1.4 DSGP-Fe 制备方法

根据参考文献^[11]中的方法制备 DSGP, 配制质量浓度为 1% 的 DSGP 溶液, 加入质量分数为 0.1% 抗坏血酸, 加入氯化亚铁 (DSGP: Fe^{2+} 质量比为 5:1), 将混合物在 pH 值 4、50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 搅拌 30 min, 反应完成后, 加入 6 倍体积的无水乙醇静置, 4 000 r/min 离心 10 min, 用无水乙醇洗涤沉淀后再次离心, 反复 3 次, 收集沉淀冻干, 得 DSGP-Fe, 于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存。用紫外分光光度计测得 DSGP-Fe 螯合物得率为 54.13%。

1.5 傅里叶红外光谱

DSGP 和 DSGP-Fe 的样品通过红外分光光度计使用 KBr 压片法表征, 测定 4 000~400 cm^{-1} 内的吸收光谱, 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数 32 次, 得 FT-IR 谱图。

1.6 扫描电镜

取少量样品于双面导电胶上, 喷金 200 s, 形成导电层, 置于电子扫描显微镜中观察样品的形貌, 调整放大倍数, 观察样品形貌并拍摄, 放大倍数 10 k, 20 kV, 5 μm 。

1.7 DSGP-Fe对IDA幼鼠的影响

1.7.1 动物实验与实验设计

适应性饲养 1 周后尾静脉取血, 检测 Hb 水平, 大于 110 g/L 表明小鼠处于正常状态。按 Hb 值水平小鼠随机分为空白组 10 只、IDA 组 40 只, 空白组饲喂对照饲料 (TP 0306C), 饮用纯净水; IDA 组饲喂缺铁饲料 (TP 0306), 饮用去离子水, 其间辅以尾静脉放血 (每周 2 次, 每次 0.2 mL)^[12], 持续 56 d。56 d 后取血, 检测 Hb < 90 g/L 即成功建立 IDA 缺铁性贫血幼鼠模型。

按照《中国居民膳食营养素参考摄入量》^[13]推荐摄入量及体表面积折算的等效剂量比值, 每日按照 20 mL/kg 定时灌胃 1 次, 结合实验前期的预实验结果, 故拟定如下分组和 ICR 幼鼠的灌胃剂量:

空白组: 正常饮食, 灌胃纯净水;

模型组: 缺铁喂养, 灌胃去离子水;

阳性药组: 缺铁喂养, 灌胃琥珀酸亚铁片 52 mg/(kg·bw);

DSGP 组: 缺铁喂养, 灌胃 DSGP 2.4 g/(kg·bw);

DSGP-Fe 组: 缺铁喂养, 灌胃 DSGP-Fe 20 mg/(kg·bw)。

每日记录摄食量, 每周称量一次体质量、检测一次 Hb 值。当 Hb 值 > 110 g/L 视为恢复, 小鼠禁食不禁水 12 h, 异氟烷麻醉, 眼眶取血后脱颈处死小鼠。

1.7.2 脏器指数

立即收集肝脏和脾脏并称重, 每个器官的相对质量是根据最终体质量计算的。器官系数计算如下:

$$L = \frac{m_l}{m} \quad (1)$$

$$S = \frac{m_s}{m} \quad (2)$$

式中:

L ——肝脏指数, %;

m_l ——肝脏质量, g;

S ——脾脏指数, mg/g;

m_s ——脾脏质量, mg;

m ——小鼠最终体质量, g。

1.7.3 血液学、生化和铁分析

使用自动血液分析仪检测 Hb、RBC、HCT、MCV、MCH、MCHC、RDW-CV 水平。全血静置 2 h, 4 $^{\circ}\text{C}$, 12 000 r/min 离心 15 min, -80 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。

使用市售试剂盒评估 SI、TIBC、ALT、AST、GSH、SOD、MDA、SF 和组织铁水平。TSAT 通过将 SI 浓度除以 TIBC 含量来间接计算。

1.7.4 组织病理学分析

取各组小鼠肝脏组织于质量分数为 4% 多聚甲醛中固定, 石蜡包埋、切片, 进行 HE 染色, 显微镜下 400 $\times$, 标尺 20 μm 进行观察并采集照片, 观察病例变化情况。

1.8 统计分析

每个实验做三次平行, 使用 SPSS 22.0 进行显著性分析, Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 傅里叶红外光谱分析

利用特征基团的红外吸收峰位移判断与 Fe^{2+} 结合的活性基团类型。如图 1 所示, DSGP 与亚铁离子结合形成 DSGP-Fe 时, 酰胺 A 带的 N-H 和 O-H 伸缩振动引起吸收峰增加, 从 3 314.17 cm^{-1} 移动到 3 319.34 cm^{-1} , 且强度增强。可推测 DSGP 中的 N 端氨基和侧链中的氨基 (如 Lys、Arg 和 Asp 的残基侧链) 与 Fe^{2+} 螯合后形成了 N-Fe, 导致 N-H 的振动频率发生了变化。DSGP 光谱中的 1 654.62 cm^{-1} 、1 541.93 cm^{-1} 对应于酰胺 I 带 (C=O) 和酰胺 II 带 (N-H 和 C-N), 在 Fe^{2+} 的作用下分别向移动至 1 655.27 cm^{-1} 和 1 540.85 cm^{-1} , 可归因于 DSGP 中的酰胺键参与了螯合反应^[14]。螯合反应后羧基的特征波数从 1 450.73 cm^{-1} 移动到 1 451.19 cm^{-1} , 表明铁螯合位点与肽链中的羧酸基团 (如肽链中的 C 端羧基和谷氨酸残基) 相关。1 400.21 cm^{-1} 处特征峰是由羧基振动引起^[15], 在 DSGP 与 Fe^{2+} 结合后此峰消失。DSGP 光谱中 1 242.42 cm^{-1} 和 1 082.44 cm^{-1} 处出现了 C-O 单键伸缩振动引起的吸收峰, 与 Fe^{2+} 结合后分别移动至 1 241.93 cm^{-1} 和 1 083.84 cm^{-1} 。这很可能是由于 C-O- 与 Fe^{2+} 配位形成的。综上, DSGP 与 Fe^{2+} 的螯合位点主要对应于羧基氧原子和

氨基氮原子。

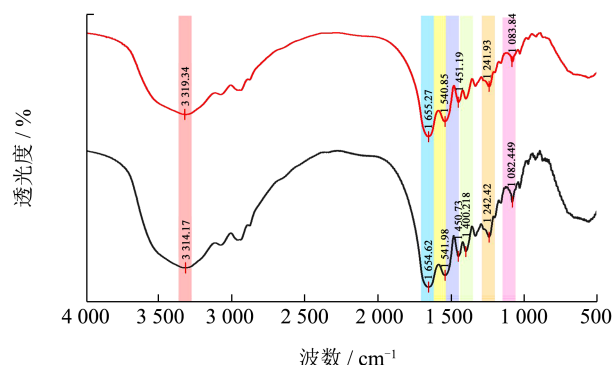


图1 DSGP和DSGP-Fe的傅里叶红外光谱图

Fig.1 Fourier transform infrared spectra of DSGP and DSGP-Fe

2.2 扫描电镜观察分析

用SEM观察DSGP和DSGP-Fe的微观结构,如图2所示。DSGP表现出排列整齐的层状结构。然而,当DSGP与 Fe^{2+} 结合时,表面完整性被打破,呈现出疏松多孔的结构,其原因可能在于DSGP与 Fe^{2+} 在螯合过程中的相互作用,而不是两者之间简单的物理混合,导致的多肽表面原有的致密结构被破坏,这一结果与海参卵水解物与铁结合的研究结果一致^[16]。

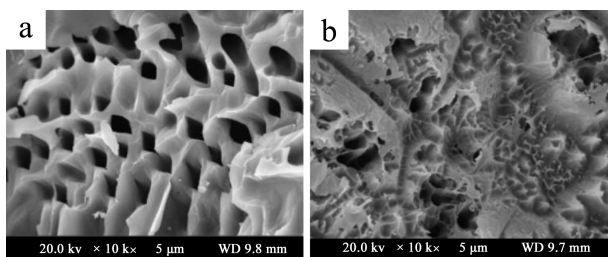


图2 DSGP和DSGP-Fe的扫描电镜图

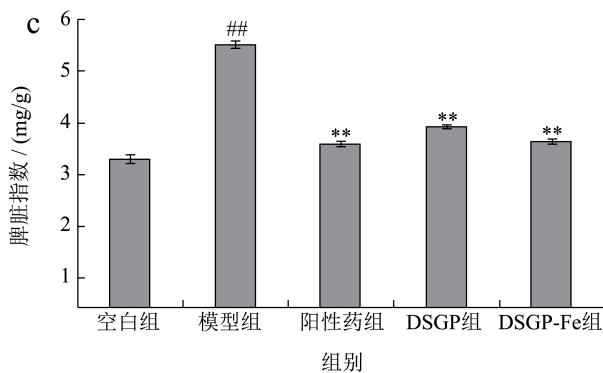
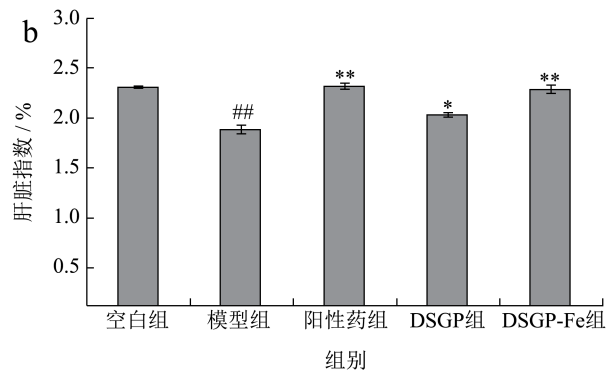
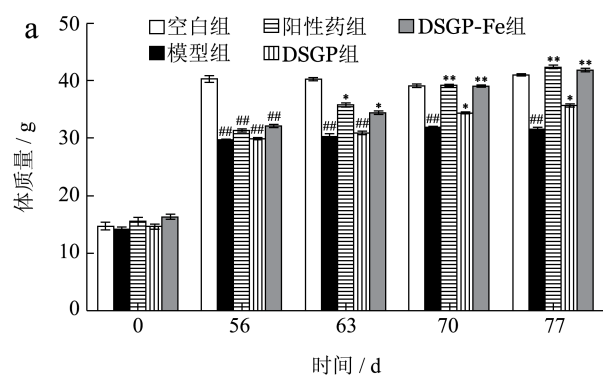
Fig.2 SEM images of DSGP and DSGP-Fe

注: a为DSGP; b为DSGP-Fe。

2.3 幼鼠生长体质量和脏器指数变化

由图3a可知,当IDA模型成功建立时,空白组体质量(40.3 g)与IDA组(29.66、31.32、29.89、32.03 g)存在统计学意义($P < 0.01$)。给药3周后,与模型组比较,给药组小鼠体质量(42.3、35.7、41.8 g)显著升高($P < 0.01$, $P < 0.05$)。肝脏和脾脏是铁代谢的重要场所,由图3b、3c、3d可知,模型组与空白组相比,肝脏指数(1.87%)

显著降低($P < 0.01$),脾脏指数(5.52 mg/g)升高($P < 0.01$),脾脏肥大, Linberg等^[17]研究证实,机体为补偿缺铁和Hb减少,进入溶血状态,导致脾脏肥大。与模型组相比,给药组小鼠肝脏指数(2.31%、2.02%、2.28%)升高($P < 0.01$, $P < 0.05$),脾脏指数(3.58、3.91、3.63 mg/g)降低($P < 0.01$),脾脏肥大改善。王梦莹^[18]研究结果也表明铁螯合物具有显著升高肝脏指数、降低脾脏指数(5.79、0.4 g/g)的作用,肝脏指数高于DSGP组,脾脏指数低于DSGP组,均与阳性药组无显著差异,表明DSGP-Fe可补充身体对铁的需要,缓解贫血引起的脾脏肥大,恢复机体生长状态达到正常水平。



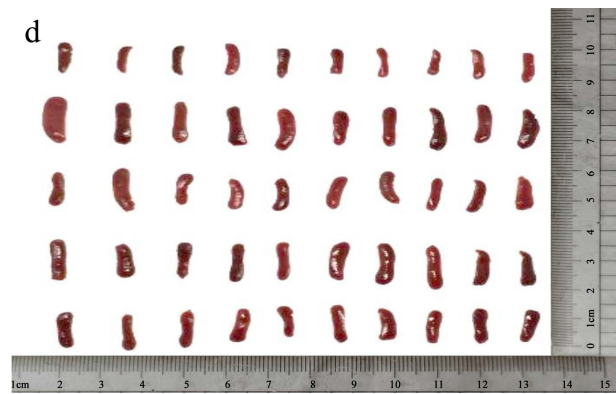


图 3 给药后对小鼠体质量及肝脏指数及脾脏指数的影响
Fig.3 Effects on body weight, liver index and spleen index of mice after administration

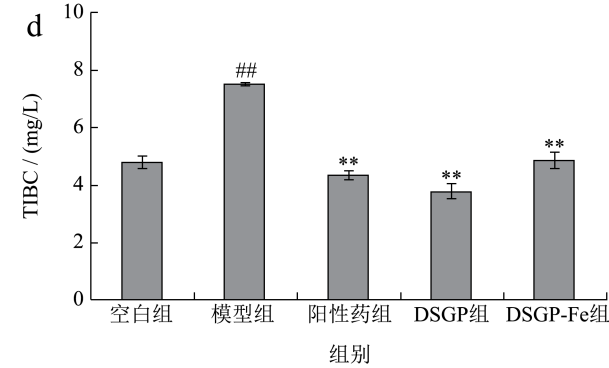
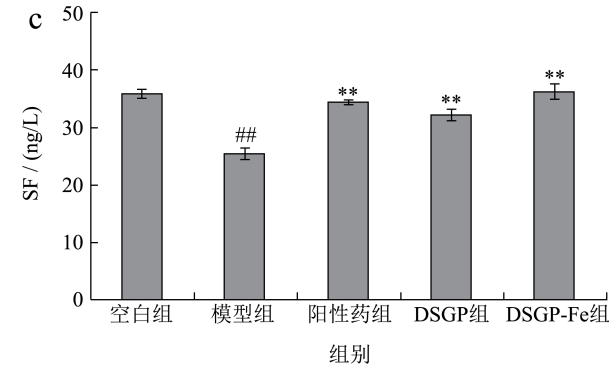
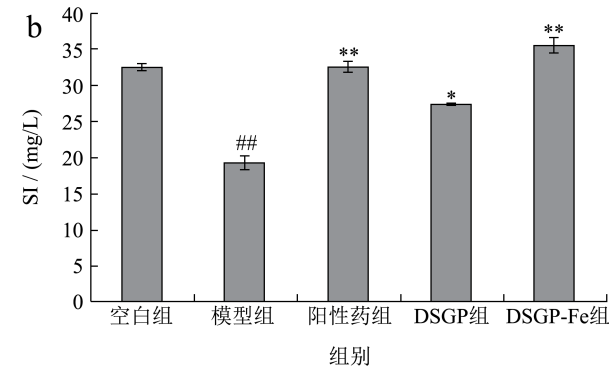
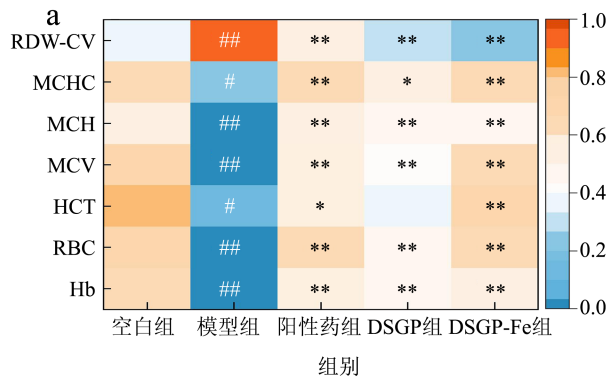
注：a-体质量；b-肝脏指数；c-脾脏指数；d-脾脏形态；与正常组相比，#表示 $P<0.05$ ，##表示 $P<0.01$ ；与模型组相比，*表示 $P<0.05$ ，**表示 $P<0.01$ 。

2.4 血液学分析和铁代谢指标考察

IDA 的临床血液学和铁代谢评价特征为 Hb、HCT、SI、SF 降低和 TIBC、RDW-CV 增加^[19,20]。与空白组比较，模型组的 Hb (71.62 g/L)、RBC ($6.45\times10^{12}/L$)、HCT (28%)、MCV (30.92 fl)、MCH (10.30 pg)、MCHC (239.38 g/L)、SI (19.24 mg/L)、SF(25.53 ng/L) 和 TSAT(2.56%) 水平降低 ($P<0.01$)，RDW-CV (17.48%)、TIBC 水平升高 (7.50 mg/L) ($P<0.01$)；

给药组干预后，与模型组比较，Hb (139.37、123.84、136.49 g/L)、RBC ($10.96\times10^{12}/L$ 、 $8.06\times10^{12}/L$)、HCT (43.5%、41.7%、44.3%)、MCV (41.3、40.85、42.00 fl)、MCH (13.99、11.45、13.40 pg)、MCHC (269.98、256.17、282.21 g/L)、SI (32.52、27.35、35.47 mg/L)、SF (34.34、32.21、36.34 ng/L) 和 TSAT (7.49%、7.25%、7.32%) 均显著升高 ($P<0.01$, $P<0.05$)，RDW-CV (15.86%、14.97%、14.81%)、TIBC (4.34、3.77、4.84 mg/L) 水平显著降低 ($P<0.01$)。Hb、RBC、HCT、MCV、MCH、MCHC 和 RDW-CV 的异常变化反映了红细胞对铁的需求和利用状况^[21]；铁代谢指标的改善，包括增加血铁浓度和提高铁利用率，可以促进红细胞的合成和修复，从而改善贫血症状^[22]。综上所述，DSGP-Fe 对幼鼠缺铁性贫血症的治疗有积极作

用，可能是铁缺乏的潜在铁源，DSGP-Fe 在缓解缺铁性贫血方面比 DSGP 更加有效。



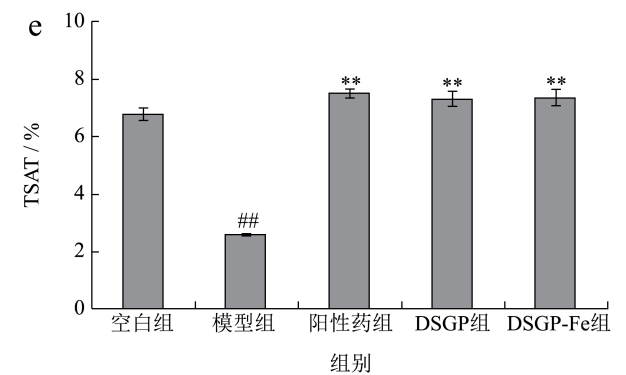


图 4 不同给药组对 IDA 幼鼠 Hb、RBC、HCT、MCV、MCH、MCHC、RDW-CV、SI、SF、TIBC 和 TSAT 的影响
Fig.4 The effects of different administration groups on Hb, RBC, HCT, MCV, MCH, MCHC, RDW-CV, SI, SF, TIBC and TSAT in IDA rats

注：a 为标准化后幼鼠血液学参数热图，b 为 SI，c 为 SF，d 为 TIBC，e 为 TSAT。与正常组相比，# 表示 $P<0.05$ ，## 表示 $P<0.01$ ；与模型组相比，* 表示 $P<0.05$ ，** 表示 $P<0.01$ 。

2.5 DSGP-Fe对IDA幼鼠组织铁含量的影响

表 1 不同给药组对IDA幼鼠组织铁含量的影响
Table 1 Effects of different administration groups on iron content in IDA young rats

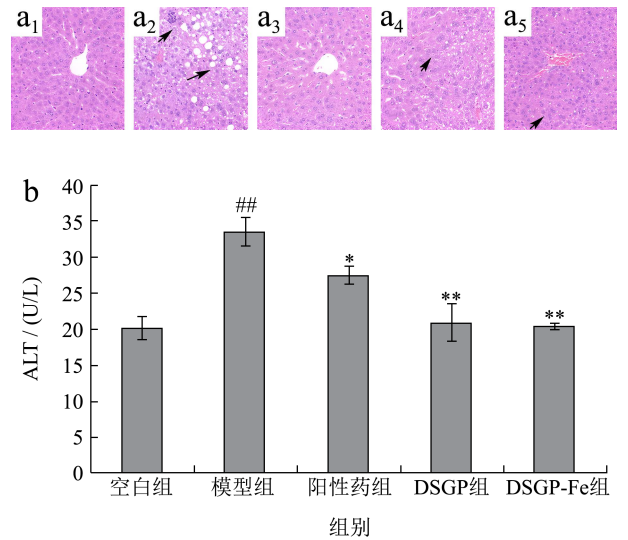
组别	铁含量/($\mu\text{mol/g prot}$)			
	肝脏	脾脏	小肠	肾
空白组	10.01 $\pm$ 0.32	27.04 $\pm$ 0.76	1.56 $\pm$ 0.85	13.72 $\pm$ 0.29
模型组	4.32 $\pm$ 0.44	5.32 $\pm$ 0.45	0.58 $\pm$ 0.63	7.54 $\pm$ 0.93
阳性药组	8.76 $\pm$ 0.81	10.56 $\pm$ 1.04	1.23 $\pm$ 0.38	8.98 $\pm$ 0.76
DSGP 组	5.57 $\pm$ 1.0	7.37 $\pm$ 0.53	0.84 $\pm$ 0.43	7.93 $\pm$ 0.32
DSGP-Fe 组	7.63 $\pm$ 0.98	9.96 $\pm$ 0.31	1.43 $\pm$ 0.84	8.54 $\pm$ 0.67

通过检测组织铁含量，可以直接了解药物补充的铁是否被有效吸收和利用，在组织中储存和分布的情况，从而直观地反映药物对改善机体铁缺乏状态的效果^[23]。表 1 显示了铁在组织的积累情况。与空白组比较，模型组小鼠肝脏（-5.69 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、脾脏（-21.72 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、小肠（-0.98 $\mu\text{mol/g prot}$ ）和肾（-6.18 $\mu\text{mol/g prot}$ ）铁含量显著降低（ $P>0.01$ ）；与模型组比较，DSGP 组肝脏（1.25 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、脾脏（2.05 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、小肠（0.26 $\mu\text{mol/g prot}$ ）和肾（0.39 $\mu\text{mol/g prot}$ ）铁含量上升不显著（ $P>0.05$ ），DSGP-Fe 组和阳性药组肝脏（3.31、4.44 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、脾脏（4.46、5.24 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、小肠（0.85、0.65 $\mu\text{mol/g prot}$ ）和肾（1.00、11.44 $\mu\text{mol/g prot}$ ）铁含量在补铁后升高（ $P<0.05$ ， $P<0.01$ ），说明 DSGP-Fe 可以通过

特定的吸收机制进入血液，随着血液循环，被转运至各个组织器官，从而逐渐补充组织中缺乏的铁含量，改善各组织因缺铁而导致的功能异常，进而改善缺铁性贫血状态。

2.6 DSGP-Fe通过提高IDA幼鼠的抗氧化能力，减轻肝损伤和氧化应激

缺铁会导致肝脏抗氧化系统失衡，导致氧化应激和肝损伤^[24,25]。光学显微镜下观察幼鼠染色肝脏形态，见下图 5a，空白组肝组织结构正常，肝细胞排列有序，胞体轮廓清晰，胞浆致密，未见明显变性；模型组肝结构异常，肝细胞排列紊乱，细胞界限模糊，大量细胞脂肪变性，胞浆可见圆形空泡，如黑色箭头所示；小叶内可见少量炎症细胞浸润，如红色箭头所示；DSGP-Fe 组肝组织结构正常，与空白组相当；DSGP 与阳性药组肝组织损伤程度均较模型组有所改善，其中阳性药组治疗效果最佳，少量肝细胞轻度脂肪变性。此外，还检查了与肝细胞损伤相关的指标^[26,27]。与空白组比较，模型组小鼠 AST（77.53 U/L）、ALT（33.50 U/L）和 MDA（3.34 nmol/mg prot）水平显著升高（ $P<0.01$ ），GSH（7.72 $\mu\text{mol/g prot}$ ）和 SOD（113 U/mg prot）显著下降（ $P<0.01$ ）；与模型组比较，阳性药组、DSGP 组和 DSGP-Fe 组小鼠 AST（61.34、50.21、50.34 U/L）、ALT（27.34、20.77、20.34 U/L）和 MDA（1.54、1.67、1.52 nmol/mg prot）水平降低（ $P<0.05$ ， $P<0.01$ ），GSH（13.34、11.34、14.65 $\mu\text{mol/g prot}$ ）、SOD（209.35、193.52、216.58 $\mu\text{mol/g prot}$ ）显著上升（ $P<0.01$ ）。因此，DSGP、DSGP-Fe 可以通过提高 IDA 幼鼠的抗氧化能力，减轻肝损伤和氧化应激达到对 IDA 幼鼠的治疗作用，且 DSGP-Fe 的治疗作用优于琥珀酸亚铁片。



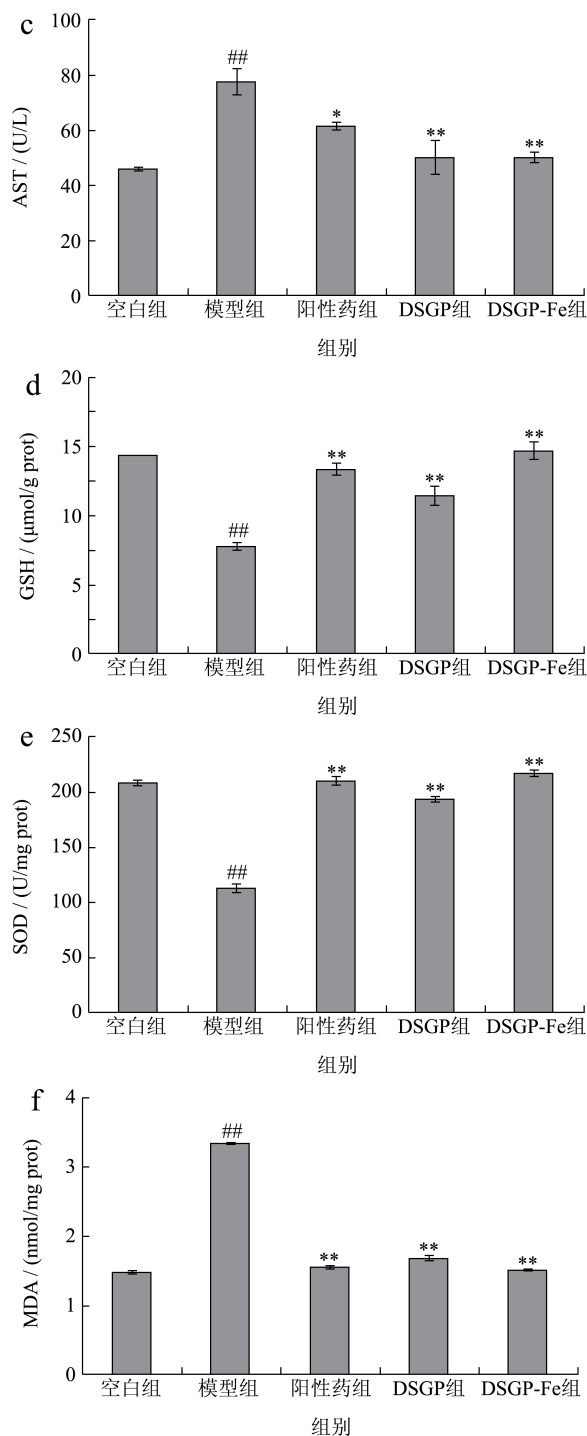


图5 H&E 染色肝切片的病理分析和不同给药组对 IDA 幼鼠的 ALT、AST、GSH、SOD 活性和 MDA 含量的影响

Fig.5 Effects of different administration groups on GSH content, SOD activity and MDA content in liver of IDA young rats

注: a 为幼鼠染色肝脏形态 (a₁~a₅ 分别为空白组、模型组、阳性药组、DSGP 组、DSGP-Fe 组), b 为 ALT, c 为 AST, d 为 GSH, e 为 SOD, f 为 MDA。与正常组相比, # 表示 $P<0.05$, ## 表示 $P<0.01$; 与模型组相比, * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$ 。

3 结论

通过对 DSGP-Fe 结构分析发现, DSGP-Fe 是疏松的块状结构, Fe^{2+} 主要与 DSGP 中的氨基、羧基等螯合活性基团结合形成 DSGP-Fe。通过对幼鼠体重、脏器指数、血液指标和肝脏铁含量的测定, 以及病理切片的观察, DSGP-Fe 在铁的吸收和利用方面比 DSGP 更有效, 与琥珀酸亚铁片相似但副作用更小, 同时未发现铁过载现象。综上所述, 采用灌胃方法给予 IDA 幼鼠 DSGP-Fe 治疗, 对小鼠缺铁性贫血症的治疗有积极作用, 可能是铁缺乏的潜在铁源, 因而它有望开发成为一种有效的铁强化剂。

参考文献

- [1] 罗青, 禄璐, 闫亚美, 等. 枸杞粉及其多糖对环磷酰胺致免疫低下小鼠免疫及肠道菌群的调节作用[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 137-148.
- [2] MAZGAJ R, LIPINSKKI P, SZUDZIK M, et al. Comparative evaluation of sucrosomal iron and iron oxide nanoparticles as oral supplements in iron deficiency anemia in piglets [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(18): 9930.
- [3] 赖莉敏, 瞿礼萍, 刘思莉, 等. 蚕沙提取物对缺铁性贫血小鼠铁代谢的影响及抗氧化作用研究[J]. 中药新药与临床药理, 2021, 32(5): 627-631.
- [4] 恰木斯亚·吐尔逊哈里, 美拉依·吉恩斯, 武嘉林. 阿胶强骨口服液对大鼠缺铁性贫血的改善及其对铁代谢的调节作用机制初探[J]. 中南药学, 2021, 19(12): 2549-2554.
- [5] 吴孟华, 黄勇, 徐浩坤, 等. 鹿胶的本草考证[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(5): 1188-1193.
- [6] 高文军, 张争明, 张娇, 等. 鹿皮胶浓缩工艺优化及质量控制指标研究[J]. 中药材, 2022, 45(11): 2703-2707.
- [7] 蒋梦彤, 黄潇正, 蔡朔, 等. 基于 Label-free 定量多肽组学的鹿角胶与鹿皮胶糖基化肽研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(14): 3487-3493.
- [8] 张行, 韩冬, 李星辰, 等. 鹿皮胶制备工艺及增免活性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2025, 47(2): 348-354.
- [9] 靳梓微, 张荣华, 赵春娇, 等. 鹿皮胶氨基酸成分及其药食同源组方的免疫增强作用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 37-46.
- [10] 周莹, 石景, 邹烨, 等. 食源性肽铁螯合物研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 418-425.
- [11] 祝超智, 温耀涵, 许龙, 等. 牛血红蛋白肽的酶解工艺优化及其亚铁螯合物结构、稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 75-87.
- [12] 李敏, 梁大连, 邵珠德, 等. 阿胶肽-铁螯合物对缺铁性贫血小鼠的初步药效学研究[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(4): 852-854.

- [13] 中国营养学会.中国居民膳食营养素参考摄入量[M].北京:中国轻工业出版社,2000.
- [14] WANG C, WANG C, LI B, et al. Zn(II) chelating with peptides found in sesame protein hydrolysates: identification of the binding sites of complexes [J]. Food Chemistry, 2014, 15(9): 594-602.
- [15] 胡太超,陶荣珊,李庆杰,等.鹿血多肽的制备工艺及抗氧化能力研究[J].食品工业科技,2014,35(17):107-110.
- [16] SUN N, CUI P, JIN Z, et al. Contributions of molecular size, charge distribution, and specific amino acids to the iron-binding capacity of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) ovum hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2017, 1(9):627-636.
- [17] LINBERG R, CONOVER C D, SHUM K L, et al. Hemoglobin based oxygen carriers: how much methemoglobin is too much [J]. Artif Cells Blood Substit Immobil Biotechnol, 1998, 26(2): 133-148.
- [18] 王梦莹.食源性低聚肽铁改善大鼠缺铁性贫血的效果研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [19] JDIAAZ C, MJMAIF E, ILOPEZ A, et al. Influence of nutritional iron deficiency anemia on DNA stability and lipid peroxidation in rats [J]. Nutrition, 2008, 24(11-12): 1167-73.
- [20] 蔡永梅.缺铁性贫血患者sTfR、SF、SI、UIBC、TRF检测的临床意义研究[J].中国医学工程,2023,31(11):98-102.
- [21] HU S, LIN S, FENG Q, et al. Iron complexes with Antarctic Krill-Derived Peptides show superior effectiveness to their original protein-iron complexes in mice with iron deficiency anemia [J]. Nutrients, 2023, 15(11): 2510.
- [22] KUMAR R, SHARMA V, DAS S, et al. *Arthrospira platensis* (Spirulina) fortified functional foods ameliorate iron and protein malnutrition by improving growth and modulating oxidative stress and gut microbiota in rats [J]. Food Function, 2023, 14(2): 1160-1178.
- [23] ZHANG Y, GUO T, HUANG L, et al. Protective effect of *Angelica sinensis* polysaccharide on pregnant rats suffering from iron deficiency anemia via regulation of the hepcidin-FPN1 axis [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256(2): 128016.
- [24] 马婕,李燕.儿童青少年缺铁性贫血的营养干预进展[J].预防医学情报杂志,2023,39(6):717-722.
- [25] 阮素凤.不同剂量补铁对早产儿缺铁性贫血、铁调素及生长发育的影响的真实世界研究[D].成都:四川大学,2021.
- [26] GANIE S, NAIK R, ALI A, et al. Preparation, characterization, release and antianemic studies of guar gum functionalized Iron complexes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 31(7): 1495-1504.
- [27] HARAHAH H, JAHARI A B, HUSAINNI M A, et al. Effects of an energy and micronutrient supplement on iron deficiency anemia, physical activity and motor and mental development in undernourished children in Indonesia [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2000, 54(5): S114-9.