

铜锌复合胁迫对番茄幼苗生长及光合特性的影响

张云芳, 陈楚, 程晓敏, 陈高 (淮北师范大学生命科学学院, 安徽省资源植物生物学重点实验室, 安徽淮北 235000)

摘要 以番茄品种“金鹏一号”为试材, 通过沙培试验, 研究了铜锌复合胁迫对番茄幼苗生长以及光合特性的影响。结果表明, 铜、锌的处理浓度为 0.010~1.000 mmol/L 时, 番茄生长受到抑制, 且抑制效应随处理浓度和时间的增加而逐渐增强; 当铜、锌的处理浓度均为 1.000 mmol/L 且处理 15 d 时, 与对照相比, 番茄的株高、地上部鲜重和根鲜重显著下降, 分别下降 35.4%、48.7% 和 71.6%; 叶片的叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著下降, 分别减少 31.3%、87.5%、94.7%、89.6%, 而胞间二氧化碳浓度变化不显著。表明铜、锌浓度大于 0.010 mmol/L 时, 番茄的生长和光合作用被抑制。

关键词 番茄; 铜锌复合胁迫; 光合特性
中图分类号 X 503.231 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2022)14-0139-03
doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.14.033



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Copper and Zinc Combined Stress on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Solanum lycopersicum* L. Seedlings
ZHANG Yun-fang, CHEN Chu, CHENG Xiao-min et al (School of Life Sciences, Huaibei Normal University, Anhui Key Laboratory of Resources and Plant Biology, Huaibei, Anhui 235000)

Abstract Effects of copper and zinc combined stress on the growth and photosynthetic characteristics of tomato seedlings were studied through sand culture experiments with *Solanum lycopersicum* cultivar “Jinpeng No. 1”. The results showed that, when the treatment concentration of copper and zinc was 0.010–1.000 mmol/L, tomato growth was inhibited, and the inhibitory effect gradually increased with the increase of treatment concentration and time. When the treatment concentration of copper and zinc were both 1.000 mmol/L, compared with the control, the plant height, aboveground fresh weight and root fresh weight of tomato seedlings were decreased by 35.4%, 48.7%, 71.6% respectively, and the chlorophyll content was decreased by 31.3%. Meanwhile, the net photosynthetic rate, stoma conductance and the transpiration rate were reduced by 31.3%, 87.5%, 94.7%, 89.6%, while the intercellular carbon dioxide concentration did not change significantly. The results showed that when the concentration of copper and zinc is higher than 0.010 mmol/L, the growth and photosynthesis of tomato seedlings are inhibited.

Key words *Solanum lycopersicum*; Copper-zinc combined stress; Photosynthetic characteristics

铜(Cu)、锌(Zn)是植物必需的微量元素, 主要作为酶的辅助因子, 参与植物的光合作用、呼吸作用、碳水化合物和蛋白质的代谢等过程, 对植物的生长和发育起着重要的生理调控作用^[1-3]。然而, 植物生长所需的 Cu、Zn 生理浓度较低, 一般在 5~20 和 10~100 mg/kg, 过量的 Cu、Zn 会对植物产生毒害作用, 严重影响植物的生长发育^[4-5]。近年来, 国内工农业进入高速发展时期, 工业三废的大量排放以及农药、化肥的滥用, 重金属污染已成为主要的土壤污染类型, 污染土壤的重金属元素主要包括镉(Cd)、汞(Hg)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、锌(Zn)等^[6-7]。我国设施蔬菜由于国内需求的增加而发展迅速, 但设施蔬菜生产复种指数高、农化用品投入量大、生产环境封闭等特点, 导致设施菜田土壤重金属持续累积, 生态环境风险加剧^[8]。贾丽等^[9]研究表明, Cu、Zn 是设施菜田土壤中主要污染元素, 且随种植年限的增加而累积趋势明显, 不仅影响设施蔬菜的生长及品质, 同时可以通过膳食途径进入人体, 对人体健康产生潜在危害。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)是我国栽培面积最大、最重要的设施大棚蔬菜^[10], 重金属污染对番茄生长的影响已有相关报道, 包括 Cd、Cu、Zn 的单一胁迫^[11-16]以及 Cd-Cu、Cd-Zn 的复合胁迫^[14-15, 17-18], 但 Cu-Zn 复合胁迫对番茄幼苗生长的影响研究较少, 仅在蓖麻^[19]、观赏草^[20]、包菜^[21]、芦

竹^[22]、珠芽蓼^[23]等植物上有所报道。为此, 笔者主要探讨 Cu-Zn 复合胁迫对番茄幼苗生长及光合特性的影响, 以确定番茄幼苗生长对 Cu、Zn 的耐受范围, 为设施蔬菜的安全生产以及复合污染的环境生态效应评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试番茄品种为“金鹏一号”, 购自淮北市种子子公司。

1.2 试验方法 番茄种子经 55 ℃ 浸泡 15 min, 消毒后平铺于含有 2 层湿润滤纸的培养皿中, 置于恒温光照培养箱中催芽。种子露白后播种于蛭石中, 室温下培养。种子萌发长出真叶后, 选取长势一致的幼苗移栽至装有石英砂的塑料小花盆, 每盆 2 株, 每天定时浇灌 Hoagland 营养液(pH 5.8)。待幼苗长出 5~6 片真叶时, 用含不同浓度的 Cu、Zn 营养液处理 15 d(表 1)。处理 5、10、15 d 时, 测定番茄幼苗的叶绿素含量和光合参数, 处理 15 d 后收取番茄幼苗, 测定相关形态指标。

表 1 复合胁迫中铜、锌的添加量
Table 1 The amounts of copper and zinc in combined stress

处理 Treatment	mmol/L	
	外源铜离子 Exogenous Cu	外源锌离子 Exogenous Zn
CK	0	0
T ₁	0.001	0.001
T ₂	0.010	0.010
T ₃	0.100	0.100
T ₄	1.000	1.000

基金项目 安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2017B020)。
作者简介 张云芳(1977—), 女, 安徽固镇人, 讲师, 硕士, 从事遗传毒理学研究。
收稿日期 2021-10-09

1.3 测定项目与方法

1.3.1 幼苗形态指标。取不同处理下的植株,用直尺测量幼苗的株高,用电子天平称量幼苗地上部分及根的鲜重。

1.3.2 叶片光合生理指标。用 LI-6400 便携式光合测定仪(美国 LI-COR 公司)测定植株叶片的光合参数,包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。光强设定为 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,测定时间为 09:00—11:00,取各处理植株相同部位的叶片进行测定。

1.3.3 叶绿素含量。用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪(日本 Konica 公司)测定叶片叶绿素的相对含量。选择不受遮挡的倒 2 叶进行测定。

1.4 数据分析 采用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计,以 SPSS 20.0 软件 Duncan 氏法进行数据差异显著性分析,应用 SigmaPlot 12.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 铜锌复合胁迫对番茄幼苗长势的影响 由表 2 可知,低浓度 Cu-Zn(T_1 ,0.001 mmol/L Cu-Zn)处理对番茄幼苗的生长影响不明显,番茄的株高、地上部鲜重、根鲜重与对照相近,无显著差异。随着 Cu-Zn 处理浓度的升高,抑制效应加剧,抑制程度与 Cu-Zn 浓度呈正相关。与对照相比,中高浓度 Cu-Zn(0.010~1.000 mmol/L Cu-Zn)处理的番茄株高降低了 13.8%~26.1%,地上部鲜重降低了 17.2%~48.7%,根鲜重降低了 41.5%~71.6%,差异均显著。

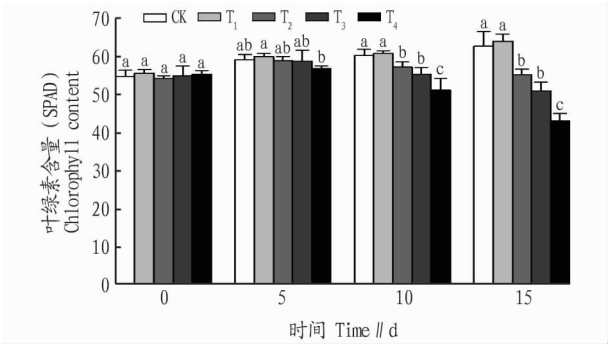
表 2 铜锌复合胁迫对番茄幼苗形态指标的影响(处理 15 d)
Table 2 Effects of Cu and Zn combined stress on morphological characteristics of tomato seedlings(15 d)

处理 Treatment	株高 Plant height cm	根鲜重 Root fresh weight//g/株	地上部鲜重 Shoot fresh weight//g/株
CK	31.37±0.19 a	7.01±0.11 a	19.43±0.79 a
T ₁	31.17±1.09 a	6.98±0.40 a	18.76±0.83 a
T ₂	27.03±0.68 b	4.10±0.25 b	16.09±0.12 b
T ₃	25.03±0.59 c	2.70±0.59 c	14.17±0.40 c
T ₄	23.17±1.65 d	1.99±1.08 c	9.97±0.20 d

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments($P < 0.05$)

2.2 铜锌复合胁迫对番茄叶绿素含量的影响 叶绿素是参与植物光合作用的重要色素,与植物生长密切相关。由图 1 可知,随 Cu-Zn 复合胁迫浓度和时间的增加,番茄叶片的叶绿素含量总体呈逐渐下降趋势。处理 5 d 时, T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 处理的叶绿素含量与对照相比无显著差异;处理 10~15 d 时, T_1 处理与对照相比无显著差异,而 T_2 、 T_3 和 T_4 (0.010~1.000 mmol/L Cu-Zn)处理的叶绿素含量均显著低于对照。处理 15 d 时, T_2 、 T_3 和 T_4 处理的叶绿素含量下降幅度最大,分别较对照减少 12.0%、18.8%、31.3%。

2.3 铜锌复合胁迫对番茄光合特性的影响 由图 2 可知,随着 Cu-Zn 复合处理时间和浓度的增加,番茄叶片的光合性能总体呈下降趋势。 T_2 、 T_3 和 T_4 (0.010~1.000 mmol/L Cu-Zn)处理 5~15 d,番茄植株的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments($P < 0.05$)

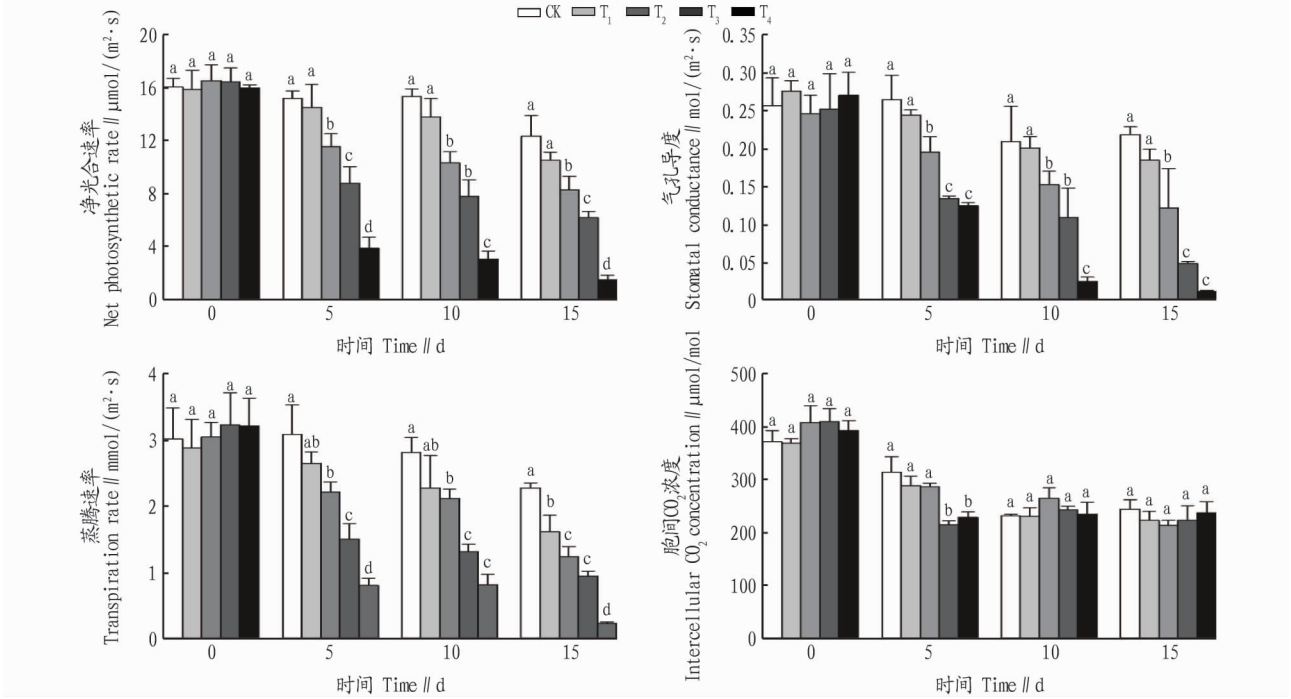
图 1 铜锌复合胁迫对番茄叶绿素含量的影响
Fig.1 Effects of Cu and Zn combined stress on the chlorophyll content of tomato seedlings

蒸腾速率(T_r)逐步下降,与对照相比差异显著;处理 15 d 时, T_2 、 T_3 和 T_4 处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 降幅达到最大,较对照分别减少 32.5%~87.5%、44.5%~94.7%和 45.6%~89.6%。此外, T_1 (0.001 mmol/L Cu-Zn)处理 5~10 d,番茄植株的 P_n 、 G_s 和 T_r 均呈下降趋势,但与对照差异不显著,处理 15 d 时仅 T_r 下降显著。各 Cu-Zn(0.001~1.000 mmol/L Cu-Zn)处理的胞间二氧化碳浓度(C_i),整体上与对照相比接近,只在处理 5 d 时 T_3 和 T_4 处理的 C_i 显著低于对照。

3 讨论

Cu、Zn 作为植物的必需营养元素,在植物的生长与发育过程中发挥重要作用,但过量 Cu 或 Zn 会导致植物代谢紊乱,产生毒害并抑制植物的生长^[4-5]。该试验结果表明,低浓度 Cu-Zn(0.001 mmol/L Cu-Zn)处理对番茄生长势无明显影响,而中高浓度 Cu-Zn(0.010~1.000 mmol/L Cu-Zn)复合处理明显抑制番茄的生长,其株高、地上和地下部分的鲜重显著下降,且随着处理时间的延长,植株受害愈严重。研究表明,Cu-Zn 复合处理对包菜、西瓜、水仙花的幼苗表现出低促高抑效应^[21,24-25]。许志敏等^[20]、朱志国等^[22]和赵玉红等^[23]在观赏草、芦竹和珠芽蓼中研究发现,低浓度的 Cu-Zn 复合处理可以对幼苗产生轻度伤害。上述研究中低浓度 Cu-Zn 复合处理的生理效应不尽相同,可能与试验设计的 Cu-Zn 处理浓度以及植物对 Cu 或 Zn 的耐受性有关。该试验中,Cu-Zn 复合处理对根系的毒害及抑制高于地上的茎叶,这与许志敏等^[20]、孙金金等^[26]研究结果一致。这是因为大量的 Cu 和 Zn 在根中积累,加剧根系的毒害,导致根系发育不良与功能受损,进而造成水分和营养物质的吸收障碍,在一定程度上抑制地上部分的生长。

Cu、Zn 与植物光合过程的电子传递以及叶绿素的合成密切相关^[1-3]。然而,Cu、Zn 浓度过高会导致叶绿素的结构和功能遭到破坏,分解加速^[4-5,27-28]。该研究发现,中高浓度 Cu-Zn 复合处理 15 d,叶绿素含量显著下降,这与前人研究结果相一致^[16,27-28];随着 Cu-Zn 复合胁迫的增强,番茄的光合性能显著下降,依据前人研究,导致 P_n 降低的因素可依据



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments ($P < 0.05$)

图2 铜锌复合胁迫对番茄光合特性的影响
Fig.2 Effects of Cu and Zn combined stress on the photosynthetic characteristics of tomato seedlings

C_i 值的变化分为气孔限制和非气孔限制^[29]。该研究中, 0.100~1.000 mmol/L Cu-Zn 复合处理 5 d 时, 与对照相比, 番茄的 P_n 、 G_s 、 C_i 均显著下降, 而叶绿素含量下降不显著, 这表明 Cu-Zn 短期处理 P_n 下降的主要原因是气孔限制; 0.010~1.000 mmol/L Cu-Zn 复合处理 15 d 时, 番茄的 P_n 、 G_s 和叶绿素含量显著下降, 而 C_i 变化不显著, 这表明 Cu-Zn 长期处理 P_n 下降的主要原因是非气孔限制, 与叶肉细胞光合活性被抑制有关^[30-31]。Cu-Zn 复合胁迫下, 番茄根系生长受阻, 吸水性能下降, 为维持水分平衡, 叶片部分气孔关闭, 蒸腾作用减弱, 因此 G_s 和 T_r 下降显著, 这与张义凯等^[32] 研究结果一致。

以上表明, 0.001 mmol/L Cu-Zn 复合处理下, 番茄无明显受害反应, 超过 0.010 mmol/L Cu-Zn 复合处理, 番茄的生长受到抑制, 光合性能下降。

参考文献

[1] MARSCHNER H. Marschner's mineral nutrition of higher plants [M]. New York: Academic Press, 2011.

[2] YRUELA I. Copper in plants [J]. Brazilian journal of plant physiology, 2005, 17(1): 145-156.

[3] BROADLEY M R, WHITE P J, HAMMOND J P, et al. Zinc in plants [J]. New phytologist, 2007, 173(4): 677-702.

[4] CHAPMAN H D. Diagnostic criteria for plants and soils [M]. Berkeley, CA: University of California, 1966.

[5] JAIN R, SRIVASTAVA S, SOLOMON S, et al. Impact of excess zinc on growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and oxidative stress of sugarcane (*Saccharum* spp.) [J]. Acta physiologiae plantarum, 2010, 32(5): 979-986.

[6] GAO X, PENG Y T, ZHOU Y Y, et al. Effects of magnesium ferrite biochar on the cadmium passivation in acidic soil and bioavailability for pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Journal of environmental management, 2019, 251: 1-9.

[7] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.

[8] 黄标, 胡文友, 虞云龙, 等. 我国设施蔬菜产地土壤环境质量及管理对策 [J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(Z1): 194-202.

[9] 贾丽, 乔玉辉, 陈清, 等. 我国设施菜田土壤重金属含量特征及影响因素 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 263-274.

[10] 严逸男, 刘明月, 周相勋, 等. 秋葵连作土壤浸提液对番茄生长的障碍研究 [J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(1): 81-91.

[11] 林忠全, 李佳繁, 康友宏, 等. 土壤外源镉污染对番茄幼苗生长影响研究 [J]. 北方园艺, 2009(5): 81-83.

[12] 赖秋羽, 魏树和, 代惠萍, 等. 番茄光合荧光特性及其镉吸收对土壤镉污染的响应 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4737-4742.

[13] 张敏, 姜春辉, 崔秀敏. 外源 NO 供体硝普钠 (SNP) 对铜胁迫下番茄幼苗生理生化指标的影响 [J]. 植物生理学报, 2013, 49(2): 144-152.

[14] 王逸筠, 胡美美, 崔秀敏, 等. 铜、镉胁迫下外源 NO 介导的番茄解毒途径 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4199-4207.

[15] 赵晓祥, 冯璐, 王宇晖. 镉、铜单一及复合胁迫下番茄幼苗生理响应及联合毒性的研究 [J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 1176-1184.

[16] 孙卓, 李亚迪, 纪建伟. 番茄幼苗叶绿素荧光参数对镉胁迫的响应 [J]. 北方园艺, 2016(24): 41-44.

[17] 崔秀敏, 吴小宾, 李晓云, 等. 铜、镉毒害对番茄生长和膜功能蛋白酶活性的影响及外源 NO 的缓解效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 349-357.

[18] 丁海东, 齐乃敏, 朱为民, 等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及其脯氨酸与谷胱甘肽含量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 53-55.

[19] 文艳鹏, 罗蕊, 王志妍, 等. 蓖麻种子萌发和幼苗生长对重金属铜、镉离子胁迫响应 [J/O]. 分子植物育种, 2021-03-08 [2021-10-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210308.0905.004.html>.

[20] 许志敏, 刘燕珍, 陈琳, 等. 铜锌复合胁迫对 8 种观赏草种子萌发特性及幼苗生长的影响 [J]. 河南农业科学, 2020, 49(3): 129-137.

[21] 邹文桐, 曹智, 林茂兹. 铜锌复合胁迫对包菜种子萌发、幼苗生长及子叶若干生理指标的影响 [J]. 种子, 2018, 37(3): 92-95.

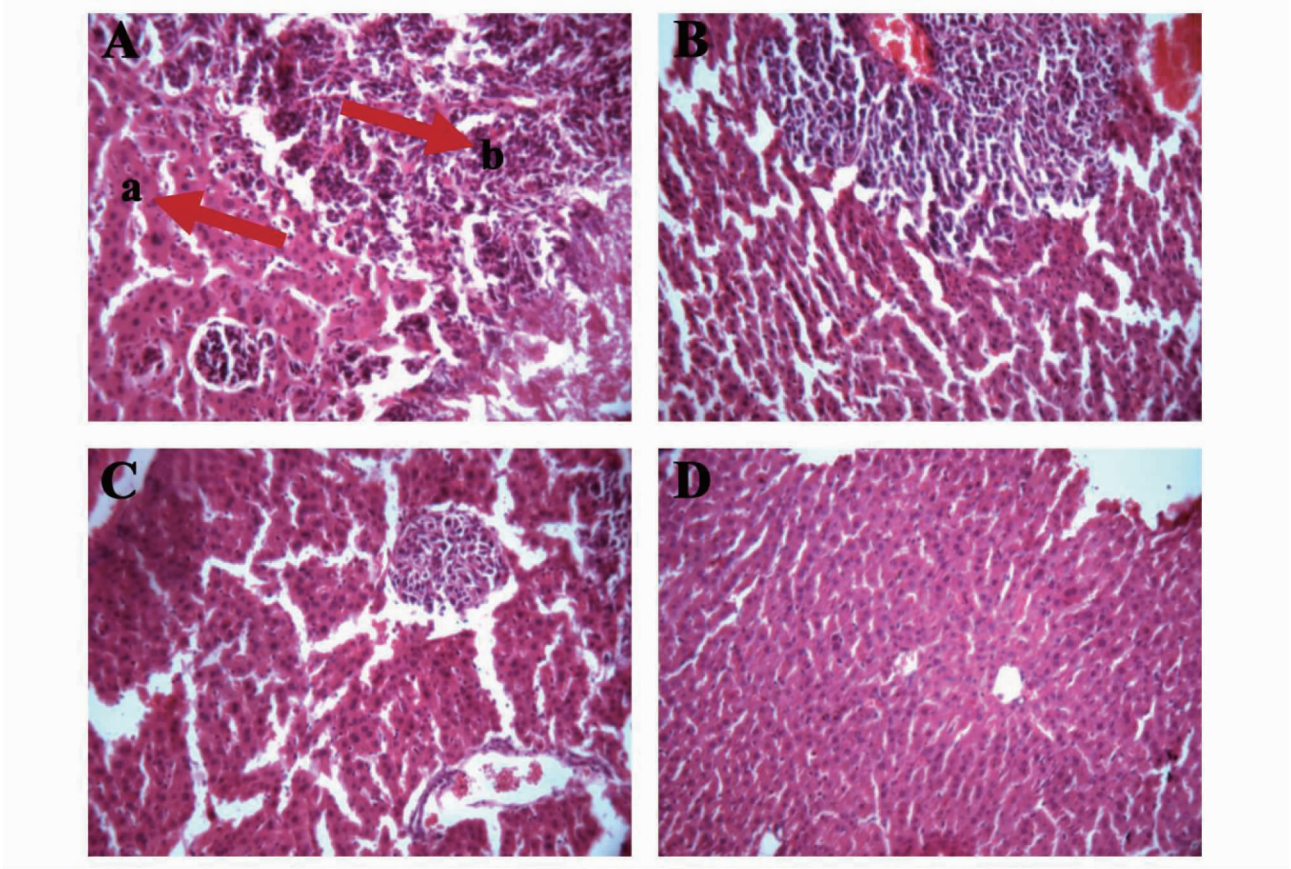
[22] 朱志国, 周守标. 铜锌复合胁迫对芦竹生理生化特性、重金属富集和土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 276-280, 288.

[23] 赵玉红, 蒙祖庆, 牛敬雨, 等. 铜、镉胁迫对珠芽蓼芽萌发及生理生化特性的影响 [J]. 草地学报, 2014, 22(1): 116-121.

[24] 华玉丹, 王晓芬, 李娟, 等. 铜、镉及其复合污染对西瓜种子萌发的影响 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 71-73, 100.

移,延长生存期。因此,当肠癌肝转移患者使用卡培他滨几个疗程产生耐药后,可以考虑将藤黄与卡培他滨联用,这为

治疗肠癌肝转移提供了新的联合给药方法,有望明显延长肠癌肝转移患者的生存期。



注:A.对照组;B.藤黄组;C.卡培他滨组;D.藤黄联合卡培他滨组。图中标有 a 区域的部分属于正常肝细胞,标有 b 区域的部分属于肿瘤细胞
Note: A. Control group; B. Gamboge group; C. Capecitabine group; D. Gamboge combined with Capecitabine group

图 4 模型小鼠 HE 染色肝脏病理切片

Fig.4 HE-stained liver pathological sections of model mice

参考文献

[1] 李变丽,陈华国,赵超,等.中药抗结直肠癌的作用机制研究进展[J].天然产物研究与开发,2020,32(12):2132-2141.
[2] 侯文珍,裴丽霞,周锦勇,等.中医药防治大肠癌肝转移研究进展[J].辽宁中医杂志,2020,47(3):203-206.
[3] 竺平,谷云飞,杨柏霖,等.有毒中药对人结肠癌 HCT116 和 SW480 细胞的生长抑制作用[J].南京中医药大学学报,2013,29(4):351-354.
[4] 张成文.卡培他滨片联合介入治疗大肠癌肝转移疗效分析[J].现代肿瘤医学,2015,23(12):1705-1707.
[5] SOBRERO A, ACKLAND S, CLARKE S, et al. Phase IV study of bevacizumab in combination with infusional fluorouracil, leucovorin and irinotecan (FOLFIRI) in first-line metastatic colorectal Cancer[J]. Oncology, 2009, 77(2): 113-119.
[6] 竺平,谷云飞,杨柏霖,等.藤黄对人结肠癌 HCT116 细胞裸鼠原位移植模型的作用[J].世界华人消化杂志,2014,22(4):476-482.
[7] 魏建昌,张通,杨平,等.藤黄酸对人结肠癌细胞凋亡及 Bax, Bcl-2 和 Caspase-3 表达的影响[J].实用医学杂志,2016,32(11):1745-1748.
[8] 杜相宇,唐德才.芪术抗癌方及其联合 5-氟尿嘧啶对 CT26.WT 结肠癌

原位移植瘤模型小鼠肿瘤组织中凋亡相关蛋白表达的影响[J].中医杂志,2020,61(12):1090-1094.
[9] 宋大迁,熊盈,方金,等.活体成像下评价脾脏注射法大肠癌肝转移动物模型[J].现代肿瘤医学,2016,24(14):2187-2190.
[10] 王学良.抵当汤对小鼠结肠癌细胞脾种植肝转移模型影响的实验研究[D].广州:南方医科大学,2004.
[11] 张星垚.多西紫杉醇与藤黄酸联合抑制肺癌骨转移的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2018.
[12] 冯冰玉,祖元刚,魏亮,等.青蒿素-β-环糊精包合物联合双硫仑抑制肠癌肝转移的体内活性研究[J].特产研究,2020,42(1):6-10.
[13] 胡艳.DHA 偶联牛血清白蛋白负载多西紫杉醇肿瘤靶向纳米粒的制备、表征及体内外活性评价[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.
[14] XU J M, QIN X Y, WANG J P, et al. Chinese guidelines for the diagnosis and comprehensive treatment of hepatic metastasis of colorectal cancer [J]. Journal of cancer research and clinical oncology, 2011, 137(9): 1379-1396.
[15] OTCHY D, HYMAN N H, SIMMANG C, et al. Practice parameters for colon cancer[J]. Diseases of the colon & rectum, 2004, 47(8): 1269-1284.

(上接第 141 页)

[25] 申晓慧,郭伟,冯鹏,等.铜-锌复合胁迫对凤仙花萌发及幼苗生长的影响[J].农业灾害研究,2014,4(5):16-17.
[26] 孙金金,鱼小军,王金辉,等.重金属 Cu²⁺、Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 对 8 种禾草种子萌发和幼苗生长的影响[J].草地学报,2018,26(3):673-683.
[27] 尹博,王秀峰,姜春辉,等.外源油菜素内酯对番茄铜胁迫的缓解效应[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):162-168.
[28] 张莹,魏安智,杨途熙,等.锌胁迫对灰杨幼苗生长和光合特性的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(3):19-21.

[29] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual review of plant physiology, 1982, 33(1): 317-345.
[30] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
[31] 关义新,戴俊英,林艳.水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J].植物生理学通讯, 1995, 31(4): 293-297.
[32] 张义凯,韩小娇,金洪,等.外源 NO 对铜胁迫下番茄光合、生物发光特性及矿质元素吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):172-178.