李伟炳, 杨海霞, 王锋, 等. 酸枣芽茶提取物体外抗氧化活性及对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 1−11. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100073
LI Weibing, YANG Haixia, WANG Feng, et al. *In Vitro* Antioxidant Activity of *Zizyphus Jujube* Bud Tea Extract and Its Anti-aging Effects on *Caenorhabditis elegans*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 1−11. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100073

·特邀主编专栏—茶饮品全产业链生产关键技术研究与应用（客座主编: 尹军峰、张建勇、许勇泉、崔宏春）·

酸枣芽茶提取物体外抗氧化活性及对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用

李伟炳[1,2,3], 杨海霞[1,2,3], 王　锋[1,2,3,*], 杨青珍[1,2,3], 齐英舰[1,2,3]
（1.山西农业大学食品科学与工程学院, 山西太谷 030801;
2.运城学院生命科学系, 山西运城 044000;
3.运城学院特色果品品质调控与应用实验室, 山西运城 044000）

摘　要: 目的：为了初步探究酸枣芽茶乙醇和水提取物的抗氧化活性及对秀丽隐杆线虫抗衰老的作用。方法：本研究以酸枣芽茶为原料，测定不同浓度的乙醇（25%、50%、75%）提取物和不同温度（50、75、100 ℃）水提取物的总黄酮、总酚含量、体外抗氧化活性，筛选最优乙醇提取物和水提取物对秀丽隐杆线虫抗衰老作用的影响。结果：50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物活性最优，总黄酮含量分别为 266.15、177.61 mg/g，总酚含量分别为 399.07、278.65 mg/g，能保持较高的自由基清除水平以及总还原能力和总抗氧化能力（P<0.05）；两种提取物均可延长线虫最长寿命（分别延长 20.83%、8.33%，P<0.05）、提高抗逆环境存活率（抗紫外线辐射、抗高温热损伤、抗双氧水氧化，P<0.05），且能提升线虫体内超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）活性，降低超氧阴离子（$O_2^{-\cdot}$）、过氧化氢（H_2O_2）和丙二醛（malondialdehyde，MDA）等的含量（P<0.05）。但二者存在差异，50% 乙醇提取物比 100 ℃ 水提取物在提高线虫体内 CAT 活性，降低 MDA 的含量，延长线虫自然寿命（P<0.05）方面的效果更优；而 100 ℃ 水提取物则在提高线虫体内 SOD 活性（P<0.05），降低线虫体内 $O_2^{-\cdot}$ 和 H_2O_2 含量（P<0.05）和提升线虫抗逆环境能力（P<0.05）方面表现更好。结论：酸枣芽茶乙醇和水提取物均有较好的体外抗氧化活性及延缓秀丽隐杆线虫衰老的作用。

关键词: 酸枣芽茶, 提取方式, 抗氧化, 秀丽隐杆线虫, 抗衰老
中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0001−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100073
本文网刊:

In Vitro Antioxidant Activity of *Zizyphus Jujube* Bud Tea Extract and Its Anti-aging Effects on *Caenorhabditis elegans*

LI Weibing[1,2,3], YANG Haixia[1,2,3], WANG Feng[1,2,3,*], YANG Qingzhen[1,2,3], QI Yingjian[1,2,3]
（1.College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;
2.Life Science Department, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;
3.Characteristic Fruit Quality Control and Application Laboratory, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China）

Abstract: Objective: To preliminarily investigate the antioxidant activity of ethanol and water extracts from *Zizyphus jujube* bud tea and their anti-aging effects on *Caenorhabditis elegans*. Methods: Using *Zizyphus jujube* bud tea as raw material, this study determined the total flavonoid and total phenol contents, as well as *in vitro* antioxidant activity of ethanol extracts with different concentrations (25%, 50%, 75%) and water extracts at different temperatures (50, 75, 100 ℃). The optimal

收稿日期: 2025−10−13
基金项目: 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目（20230045）; 山西省回国留学人员科研资助项目（2023-170）。
作者简介: 李伟炳（1997−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: liweibing1919@163.com。
*** 通信作者:** 王锋（1978−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: w-971@163.com。

ethanol extract and water extract were selected to evaluate their anti-aging effects on *Caenorhabditis elegans*. Results: The 50% ethanol extract and 100 ℃ water extract exhibited optimal activity, with total flavonoid contents of 266.15 and 177.61 mg/g, respectively, and total phenol contents of 399.07 and 278.65 mg/g, respectively. Both extracts maintained high levels of free radical scavenging capacity, total reducing power, and total antioxidant capacity (P<0.05). Additionally, both extracts extended the lifespan of *C. elegans* (by 20.83% and 8.33%, respectively, P<0.05), enhanced survival rates under stress conditions (anti-ultraviolet radiation, anti-high-temperature heat damage, anti-hydrogen peroxide oxidation, P<0.05), and increased the superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities in *C. elegans* while reducing contents of superoxide anion ($O_2^{-\cdot}$), hydrogen peroxide (H_2O_2), and malondialdehyde (MDA) (P<0.05). Notably, there were distinct differences between the two extracts. The 50% ethanol extract had a superior effect compared to the 100 ℃ water extract in enhancing CAT activity, reducing MDA content, and prolonging the natural lifespan of nematodes (P<0.05). The 100 ℃ water extract, by contrast, exhibited better performance in increasing SOD activity (P<0.05), decreasing the levels of $O_2^{-\cdot}$ and H_2O_2 (P<0.05), and improving the nematodes' tolerance to adverse environments (P<0.05). Conclusion: Both ethanol and water extracts of *Zizyphus jujube* bud tea exhibit significant *in vitro* antioxidant activity and can delay the aging of *Caenorhabditis elegans*.

Key words: *Zizyphus jujube* bud tea; extraction method; antioxidant activity; *Caenorhabditis elegans*; anti-aging

生物衰老是一个不可逆转且机理复杂的退行性过程,随年龄的增长而发生变化,其特征表现为机体基本生理功能下降以及组织器官退化等[1]。与衰老有关的研究表明,当机体氧化还原状态达不到平衡时,其活性氧和活性氮超过机体的抗氧化能力,使细胞及组织受到损伤,从而加快机体衰老甚至产生退行性疾病[2]。因此,提高机体抗氧化能力能够有效延缓衰老的进程,植物作为天然的抗氧化剂,其提取物对研究抗氧化功能食品具有重要的科研价值。

酸枣属(*Ziziphus*)植物因富含黄酮、酚类等活性成分,具有抗氧化、抗衰老潜力,成为近年来的研究热点[3]。国内外关于酸枣属植物的营养物质和活性功能的研究已取得一定进展:WANG 等[4] 研究发现酸枣叶的总黄酮、总酚含量及抗氧化活性显著优于酸枣树花、茎、果实及种子;张琰等[5] 通过对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除率的比较,发现酸枣叶乙醇提取物有较强的清除氧化自由基的能力;杨观兰等[6] 研究发现南酸枣叶总黄酮对 DPPH 自由基、羟基自由基具有较强的清除作用,对 Fe^{3+}具有较好的还原能力。

秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)具有易于实验室培养、生命周期短的显著优势,其衰老表型(如自然寿命、抗逆环境能力)直观易观测,且基因与人类高度保守,是抗衰老研究领域广泛认可的模式生物,可有效用于验证天然产物或化合物的抗衰老活性[7−8]。SUN 等[9] 以秀丽隐杆线虫模型研究酸枣叶提取物的抗衰老作用,发现酸枣叶提取物可以提高线虫抗氧化应激能力,提高线虫体内抗氧化酶活性,降低丙二醛的含量,延长线虫寿命。

酸枣芽茶是以酸枣树初春嫩芽为原料,经炒制、杀青制成的药食同源饮品。酸枣芽茶活性物质主要通过热水提取出来,主要以水溶性活性物质为主,开发利用单一,而对酸枣芽茶的其他有机溶剂提取方式的活性成分及功能的研究和开发利用较少。

鉴于此,本研究以酸枣芽茶为材料,测定不同浓度乙醇(25%、50%、75%)提取物和不同温度(50、75、100 ℃)水提取物中总黄酮及总酚含量、体外抗氧化活性和对秀丽隐杆线虫抗衰老的影响,为酸枣芽茶从传统饮品向抗衰老功能食品开发利用提供理论依据,助力挖掘酸枣芽茶的经济价值与市场潜力。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

酸枣芽茶　山西省汾阳市田村提供,采摘初春四月的酸枣嫩芽,经过手工炒制及杀青后制得酸枣芽茶;1,1-二苯基-2-苦基肼、乙二胺四乙酸二钠、聚乙烯吡咯烷酮、L-蛋氨酸、氮蓝四唑、核黄素、胆固醇、5-氟-2'-脱氧尿苷(5-Fluoro-2'-Deoxyuridine, FUDR)、硫酸钛、α-萘胺、冰乙酸、钼酸铵、硫酸镁、对氨基苯磺酸、硫代巴比妥酸　上海源叶科技有限公司;无水乙醇、过氧化氢、浓硫酸、浓盐酸、浓氨水、丙酮、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠　洛阳市化学试剂厂;2,2-连氮基-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐、福林酚、DL-二硫苏糖醇　合肥博美生物科技有限公司;亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、三氯乙酸、碳酸钠、没食子酸、氯化钙、次氯酸钠、氯化钠　天津市大茂化学试剂厂;蛋白胨、胰蛋白胨、酵母浸粉、琼脂粉　北京奥博星生物技术有限公司;铁氰化钾、三氯化铁、盐酸羟胺　天津市瑞金特化学品有限公司;以上试剂均为分析纯;尿嘧啶缺陷型大肠杆菌 OP50、N2 野生型秀丽隐杆线虫　天津科技大学食品添加剂与营养调控研究室。

L5 型紫外可见分光光度计　上海仪电分析仪器有限公司;BM122128 型实体显微镜　上海光学仪器厂;BM1000 型光学显微镜　南京江南永新光学有限公司;SPX-100B-Z 型生化培养箱　上海博讯实业有限公司设备厂;BSC-1100 II A2-L 型生物安全柜　济南鑫贝西生物技术有限公司;BXYC-LX2200 型立式智能精密摇床　上海博讯医疗生物仪器股份有限公司设备厂;UPR-II-20L 型优普系列超纯水机　四川优普超纯科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　酸枣芽茶醇提物及水提物制备　参考 WANG 等[10] 的方法稍作修改，称取 3 份酸枣芽茶，每份 10 g，按 1∶20 的比例，分别置于 200 mL 25%、50% 和 75% 乙醇溶液中，40 ℃ 水浴 48 h；再次称取相同质量的酸枣芽茶取三份，分别置于 200 mL 50、75 ℃ 水浴和 100 ℃ 沸水浴中 30 min。水浴结束后，使用布氏漏斗过滤酸枣芽茶溶液，通过旋转蒸发去除醇提物中的乙醇。将酸枣芽茶溶液速冻，经真空冷冻干燥制成粉末。

1.2.2　酸枣芽茶提取物总黄酮和总酚含量测定

1.2.2.1　酸枣芽茶总黄酮含量测定　参考刘展眉等[11] 的方法稍作修改，以芦丁为标曲，得标准曲线方程为 Y=0.2003X−0.028（R^2=0.9994）（X 为 mg/mL）。取酸枣芽茶提取物粉末 0.2 g 溶于 2 mL 的 70% 乙醇中，取 0.05 mL 酸枣芽茶提取物，根据标准曲线的制作要求加入试剂，结合标准曲线分别计算醇提物和水提物总黄酮的含量，单位为 mg/g，每个样品平行测定 3 次。总黄酮含量的计算公式为：

$$\text{总黄酮含量(mg/g)} = \frac{C \times V_t \times V}{m \times V_S} \qquad \text{式（1）}$$

式中：C 为由标准曲线算出待测液样品总黄酮的浓度，mg/mL；V_t 为样品定容总体积，mL；V 为样品提取液总体积，mL；m 为样品取样质量，g；V_S 为显色时吸取的待测液的体积，mL。

1.2.2.2　酸枣芽茶总酚含量测定　参考王凯慧[12] 的方法稍作修改，以没食子酸为标曲，得标准曲线方程为 Y=0.6492X+0.1391（R^2=0.9996）。取酸枣芽茶提取物粉末 0.2 g 溶于 2 mL 的蒸馏水中，取 0.01 mL 酸枣芽茶提取物，根据标准曲线的制作要求加入试剂，结合标准曲线分别计算醇提物和水提物总酚的含量，单位为 mg/g，每个样品平行测定 3 次。总酚含量的计算公式为：

$$\text{总酚含量(mg/g)} = \frac{C \times V_t \times V}{m \times V_S} \qquad \text{式（2）}$$

式中：C 为由标准曲线算出待测液样品总酚的浓度，mg/mL；V_t 为样品定容总体积，mL；V 为样品提取液总体积，mL；m 为样品取样质量，g；V_S 为显色时吸取的待测液的体积，mL。

1.2.3　酸枣芽茶提取物体外抗氧化活性测定

1.2.3.1　DPPH 自由基清除率测定　参考 JO 等[13] 的方法稍作改动，取浓度为 0.03125、0.0625、0.125、0.25、0.5、1.0 mg/mL 的醇提物和水提物溶液各 1 mL 于离心管中，加入 1 mL DPPH 溶液，摇匀后避光反应 30 min，在 540 nm 处测定吸光值，每个样品平行测定 3 次，维生素 C（Vitamin C，V_C）为阳性对照。DPPH 自由基清除率计算公式为：

$$\text{DPPH自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{Ai - Aj}{Ac}\right) \times 100 \qquad \text{式（3）}$$

式中：Ai 为样品与 DPPH 溶液反应的吸光值；Aj 为用无水乙醇替代 DPPH 溶液的对照组吸光值；Ac 为用无水乙醇与 DPPH 溶液混合的空白组吸光值。

1.2.3.2　ABTS 阳离子自由基清除率测定　参考 RUMPF 等[14] 的方法略作改动，取浓度为 0.0625、0.125、0.25、0.5、1.0、2.0 mg/mL 的醇提物和水提物溶液各 80 μL 于离心管中，加入 1.5 mL ABTS 溶液，摇匀后避光反应 10 min，在 734 nm 处测定吸光值，每个样品平行测定 3 次，V_C 为阳性对照。ABTS 阳离子自由基清除率公式为：

$$\text{ABTS阳离子自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100 \qquad \text{式（4）}$$

式中：A_1 为样品与 ABTS 溶液反应的吸光值；A_0 为用无水乙醇与 ABTS 溶液混合的空白组吸光值。

1.2.3.3　总还原能力测定　参考黄瑜等[15] 的方法略作修改，采用铁氰化钾还原法，取浓度 1.0 mg/mL 的醇提物、水提物、1.0 mg/mL 的 V_C（阳性对照）及蒸馏水（空白）各 0.5 mL 于试管中，加入 1.25 mL 的磷酸盐缓冲液（0.01 mol/L，pH7.2~7.4）和 2.5 mL 质量分数 1% 的铁氰化钾，混匀后置于 50 ℃ 水浴 20 min，冷却后加入 2.5 mL 质量分数 10% 的三氯乙酸终止反应，将试管放入离心机中 3000 r/min 离心 10 min，取上清液 1.25 mL，加入 0.25 mL 质量分数 10% 的三氯化铁及 1.25 mL 蒸馏水并混匀。在 700 nm 处测定吸光值，每个样品平行测定 3 次。总还原能力百分率计算公式为：

$$\text{总还原能力百分率(\%)} = \left(\frac{A_1 - A_0}{A_{V_C} - A_0}\right) \times 100 \qquad \text{式（5）}$$

式中：A_1 为样品的吸光值；A_0 为空白（蒸馏水）的吸光值；A_{V_C} 为 V_C 阳性对照的吸光值。

1.2.3.4　总抗氧化能力测定　参考 BILAL 等[16] 的方法略作修改，采用磷钼酸法，取浓度为 1.0 mg/mL 的醇提物、水提物、1.0 mg/mL 的 V_C（阳性对照）及蒸馏水（空白）各 0.5 mL 于试管中，依次加入 1.0 mL 0.6 mol/L 的稀硫酸，1.5 mL 28 mmol/L 磷酸钠缓冲液，1.5 mL 4 mmol/L 钼酸铵，避光环境中 90 ℃ 水浴 90 min，流水冷却。在 695 nm 处测定吸光值，每个样品平行测定 3 次。总抗氧化能力百分率计算公式为式（6）：

$$\text{总抗氧化能力百分率(\%)} = \left(\frac{A_1 - A_0}{A_{V_C} - A_0}\right) \times 100 \qquad \text{式（6）}$$

式中：A_1 为样品的吸光值；A_0 为空白（蒸馏水）的吸光值；A_{V_C} 为 V_C 阳性对照的吸光值。

1.2.4　酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫寿命及抗逆环境的影响

1.2.4.1　线虫和大肠杆菌 OP50 的培养　参考张

余威等[17] 的方法略作修改，配制 500 mL 线虫生长的培养基（nematode growth medium, NGM），取大肠杆菌 OP50 菌液划线培养后，挑取单菌落在 37 ℃，220 r/min 条件培养 12 h 至其对数生长期（OD595 nm=1.00），将菌液涂布至 NGM 培养基表面使其长出薄薄的一层菌苔，转移线虫至菌苔中，20 ℃ 恒温培养 48 h。

1.2.4.2 线虫同期化处理和给药途径 参考梁前程等[18] 的方法稍作修改，以 5 mol/L 氢氧化钠溶液与 5% 次氯酸钠溶液按 1∶2 的体积比混合配制裂解液，取适量无菌水将平板内的虫卵及线虫冲洗至离心管中，加入裂解液，涡旋并离心，用无菌水反复冲洗沉淀 3 次，将虫卵转移至 NGM 平板中，20 ℃ 恒温条件下培养 2 d 后虫卵发育成 L4 期的线虫，即可完成同期化。

参考吉宗慧等[19] 及黎梓玉等[20] 的方法稍作改动，在正式实验前，乙醇提取物和水提取物分别取 0.25、0.5、1.0 mg/mL 三个浓度梯度进行线虫给药预实验，结果显示两种提取物 1.0 mg/mL 浓度组线虫的运动能力及自然寿命均高于 0.25、0.5 mg/mL 浓度组，其活性效果更优。基于此，选择 1.0 mg/mL 醇提物和水提物为最终干预浓度进行线虫给药实验。正式实验时，乙醇提取物和水提取物分别取终浓度 1.0 mg/mL 加入到 NGM 培养基以及大肠杆菌 OP50（OD595 nm=1.00）中，以不加样品的大肠杆菌 OP50 作为对照组，同时加入除菌后的终浓度为 200 μmol/L 的 FUDR 抑制线虫的繁殖，用于线虫寿命及抗逆环境的测定，线虫体内抗氧化测定则不加入 FUDR，以保证获取大量的线虫，测定线虫体内 SOD、CAT 活性及 $O_2^{-\cdot}$、H_2O_2、MDA 的含量。

1.2.4.3 线虫寿命测定 参考 HUI 等[21] 的方法稍作修改，同步培养 L4 时期的线虫，分别挑取 30 条至乙醇提取组和水提取组的 NGM 平板中，置于 20 ℃ 生化培养箱中进行培养并记为第 1 d，每天记录线虫存活与死亡的数量并挑出死亡的线虫，直至最后一条线虫死亡为止，实验重复 3 次。

1.2.4.4 线虫抗逆环境存活率测定 参考 LIN 等[8] 的方法稍作修改，给药培养 5 d 后，将线虫转移至生物安全柜中，紫外灯照射 1 h 后，每 12 h 记录一次线虫的死亡数量并挑出死亡的线虫，直至存活率为 20%。参考 ZHANG 等[22] 的方法稍作修改，给药培养 5 d 后，将线虫的培养温度由 20 ℃ 升高至 30 ℃，预热 1 h，转移至 35 ℃ 条件下，每 1 h 记录一次线虫的死亡数量并挑出死亡的线虫，直至存活率为 20%。参考赵小萌等[23] 的方法稍作修改，给药培养 7 d 后，将线虫转移至含有终浓度为 0.01 mol/L 双氧水的 NGM 平板中，每 20 min 记录一次线虫的死亡数量并挑出死亡的线虫，直至存活率为 20%，以上实验重复 3 次。

1.2.5 线虫体内抗氧化活性测定 将线虫分别转移至乙醇提取组、水提取组和对照组 NGM 平板中，20 ℃ 恒温培养 5 d，将线虫冲洗至离心管中并记录其质量，研磨、离心，取上清液备用。参考 LIN 等[24] 的方法测定 SOD，以每分钟每克线虫的反应体系对氮蓝四唑光化还原的抑制为 50% 为一个活性单位（U/g）表示。参考 DU 等[25] 的方法测定 CAT，以每克线虫每分钟吸光值减少 0.01 为 1 个酶活性单位（U/g）。参考 LEI 等[26] 的方法，测定每克线虫中的 $O_2^{-\cdot}$ 含量，结果单位以 μg/g 表示。参考 LIN 等[27] 的方法，测定每克线虫中的 H_2O_2 含量，结果单位以 μmol/g 表示。参考 FAROOQ 等[28] 的方法，测定每克线虫中的 MDA 含量，结果单位以 nmol/g 表示，以上实验重复 3 次。

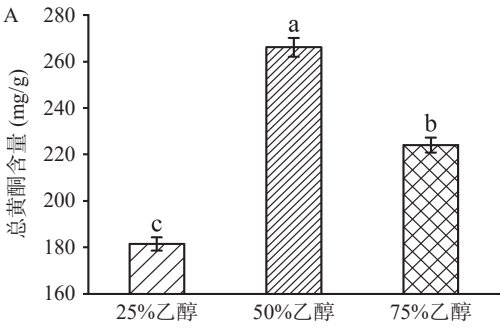
1.3 数据处理

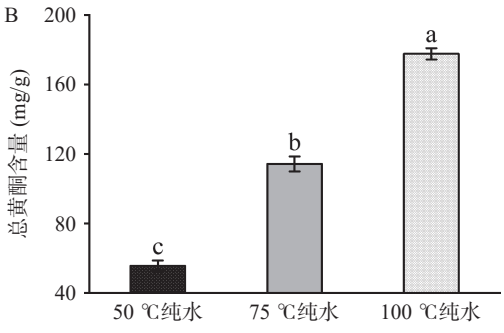
每组重复进行 3 次，数据用平均值±标准误（$\bar{x}$±SE）表示。用 Excel 2019 及 Origin 2021 软件作图，用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析和 Duncan's 多重比较，差异显著水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同溶剂提取条件对酸枣芽茶总黄酮及总酚含量的影响

如图 1A、图 1B 所示，在总黄酮含量测定中，50% 乙醇提取物总黄酮含量为 266.15 mg/g，比 25%、75% 乙醇提取物分别高出 46.69% 与 18.79%（$P<0.05$）；100 ℃ 水提取物总黄酮含量为 177.61 mg/g，比 50、75 ℃ 水提取物分别高出 219.79% 与 55.46%（$P<0.05$）。如图 1C、图 1D 所示，在总酚含量测定中，50% 乙醇提取物总酚含量为 399.07 mg/g，比 25%、75% 乙醇提取物分别高出 28.48% 与 20.35%（$P<0.05$）；100 ℃ 水提取物总酚含量为 278.65 mg/g，比





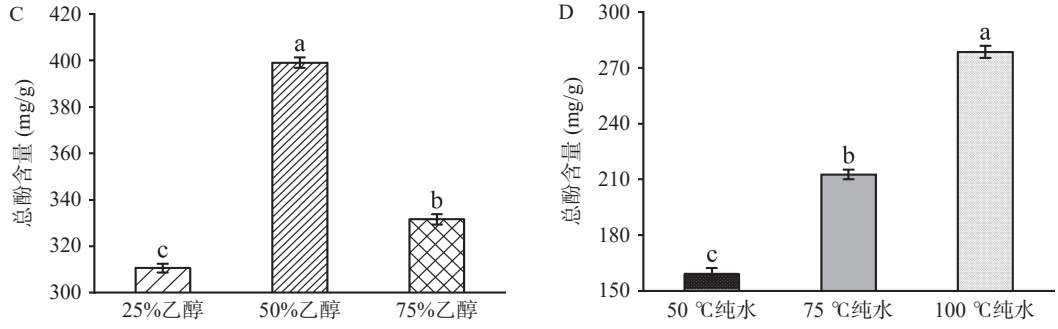


图 1　不同溶剂提取条件对酸枣芽茶总黄酮(A、B)及总酚(C、D)含量的影响

Fig.1　Effects of different solvent extraction conditions on the content of total flavonoids (A, B) and total phenols (C, D) in *Zizyphus jujube* bud tea

注：不同字母表示差异显著(P<0.05)，图 2~图 3、图 5~图 6 同。

50、75 ℃ 水提取物分别高出 75.19% 与 31.05%(P<0.05)。这可能是由于黄酮类物质为中等极性化合物，依据相似相溶原理，50% 乙醇的极性与酸枣芽茶中黄酮类物质的极性匹配度最优，故溶出量最高，总酚中包含黄酮类、酚酸类的复合物，其极性特征与黄酮类物质相近，因此溶剂提取条件对总酚含量的影响规律与总黄酮相似[29]；100 ℃ 高温通过增强植物细胞破壁效果，提升黄酮类与酚类物质的溶解度，显著提高了总黄酮和总酚溶出量，因此总黄酮与总酚含量高于 50 ℃ 与 75 ℃ 提取组。

2.2　酸枣芽茶提取物对 DPPH 自由基及 ABTS 阳离子自由基清除率的影响

已有研究报道通过 50% 乙醇洗脱酸枣叶中的黄酮和多酚，能够有效去除活性氧自由基[30]，本研究采用不同溶剂提取的酸枣芽茶提取物测定清除自由基的能力。DPPH 自由基的清除率如图 2A、图 2B 所示，50% 乙醇提取物 IC_{50} 为 0.698 mg/mL，显著优于 25% 乙醇提取物(P<0.05)，但与 75% 乙醇提取物差异不显著；100 ℃ 水提取物IC_{50} 值为 0.450 mg/mL，显著优于 50、75 ℃ 水提取物(P<0.05)。ABTS 阳离子自由基的清除率如图 2C、图 2D 所示，50% 乙醇提取物 IC_{50} 为 0.827 mg/mL，显著优于 25%、75% 乙醇提取物(P<0.05)；100 ℃ 水提取物的 IC_{50} 值为 0.889 mg/mL，显著优于 50、75 ℃ 水提取物(P<0.05)。50% 乙醇提取物对 DPPH 自由基的清除能力最优，黄酮类是 DPPH 自由基清除的核心组分，而 50% 乙醇提取物中总黄酮含量高于 25%、75% 乙醇提取物，为其强清除能力提供了物质基础[6]；100 ℃ 水提取物的 DPPH 自由基清除能力最优，推测是高温条件下选择性富集了高浓度、高活性的水溶性黄酮苷类组分，这些物质能够高效清除 DPPH 自由基[31]；50% 乙醇提取物对 ABTS 阳离子自由基的清

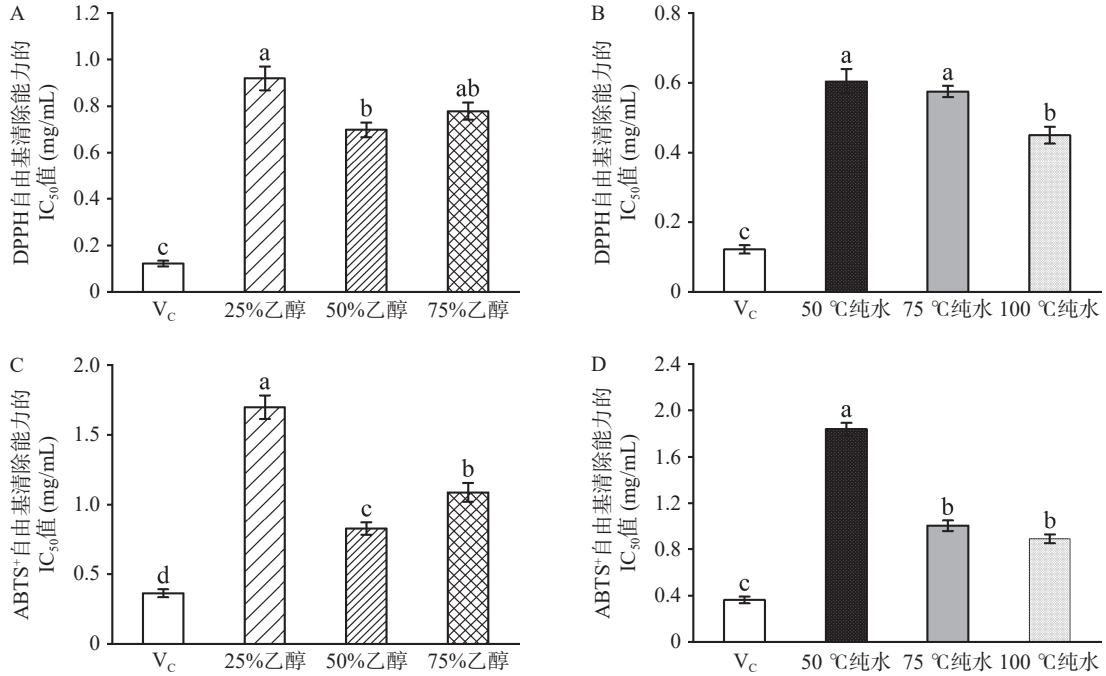


图 2　酸枣芽茶提取物对 DPPH 自由基清除能力(A、B)及 ABTS 阳离子自由基清除能力(C、D)的影响

Fig.2　Effects of *Zizyphus jujube* bud tea extracts on DPPH radical scavenging capacity (A, B) and ABTS cation radical scavenging rate (C, D)

除能力最优，50% 乙醇提取物的总酚含量(399.07 mg/g)在乙醇体系中最高，因此表现出较强的 ABTS 阳离子自由基清除活性；100 ℃ 高温能深度破坏酸枣芽茶的细胞壁结构，不仅加速游离酚类物质溶出，还能释放出结合在纤维素、木质素等基质上的聚合酚，这类成分对 ABTS 阳离子自由基具有更强的捕获能力[32]。

2.3　不同溶剂提取条件对酸枣芽茶总还原能力及总抗氧化能力的影响

总还原能力结果显示(图 3A、图 3B)，25% 乙醇提取物总还原能力百分率为 20.37%，显著优于 50%、75% 乙醇提取物(P<0.05)；100 ℃ 水提取物总还原能力百分率为 21.58%，显著优于 50、75 ℃ 水提取物(P<0.05)。25% 乙醇提取物的总还原能力最优，推测是由于 25% 乙醇更易富集酸枣芽茶中低极性还原性酚类单体，此类成分的电子转移能力较强，是总还原能力的核心贡献组分[33]；而 100 ℃ 水提取物的强还原能力，则与高温促进黄酮苷、酚酸类物质溶出有关，这些物质提高了提取物的还原能力，这与杨观兰等[6] 研究南酸枣叶黄酮总还原能力的结果相一致。总抗氧化能力结果显示(图 3C、图 3D)，50% 乙醇提取物总抗氧化能力百分率为 20.49%，显著优于 25%、75% 乙醇提取物(P<0.05)；100 ℃ 水提取物总抗氧化能力百分率为 15.37%，显著优于 50、75 ℃ 水提取物(P<0.05)。50% 乙醇提取物的总抗氧化能力最优，与其总黄酮、总酚含量最高有直接关联，黄酮与酚类组分可通过清除自由基提升抗氧化能力，100 ℃ 水提取物的总抗氧化能力最优，则是因为高温下溶出的黄酮与酚酸形成了多组分抗氧化网络[34]，进一步增强了活性效能。

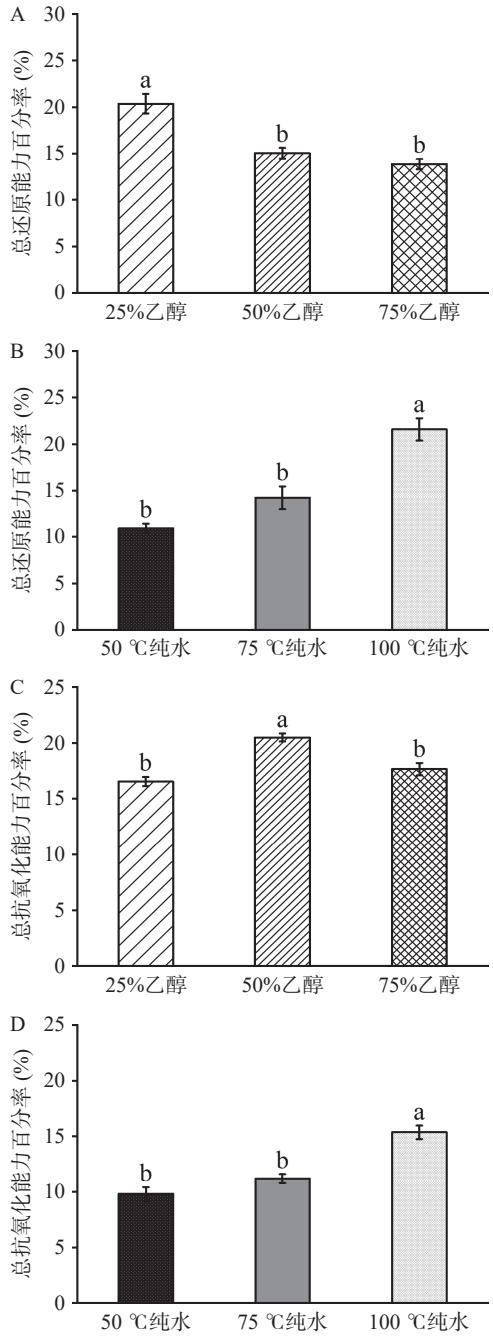


图 3　不同溶剂提取条件对酸枣芽茶提取物总还原能力(A、B)及总抗氧化能力百分率(C、D)的影响

Fig.3　Effects of different solvent extraction conditions on the total reducing ability (A, B) and total antioxidant capacity percentage (C, D) of *Zizyphus jujube* bud tea extract

综上结果可知，不同浓度的乙醇(25%、50%、75%)提取物中，50% 乙醇提取物的总黄酮、总酚含量、DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基清除能力及总抗氧化能力最好；一方面，不同温度(50、75、100 ℃)水提取物中，100 ℃ 水提取物的总黄酮、总酚含量、DPPH 自由基，ABTS 阳离子自由基清除能力、总还原能力及总抗氧化能力最好。另一方面，50% 乙醇提取物比 100 ℃ 水提取物的总黄酮、总酚含量高，ABTS 阳离子自由基清除能力及总抗氧化能力强。因此，本研究以 50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物，以秀丽隐杆线虫为模型，进一步探讨酸枣芽茶提取物的抗衰老作用。

2.4　酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫寿命及抗逆环境的影响

氧化应激能够损伤细胞，影响代谢平衡，破坏组织功能，加速机体的衰老[35]。线虫的寿命测定是研究线虫体内抗氧化的一项直观指标，由图 4A、表 1 所示，自给药第 1 d 起至线虫全部死亡，50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物给药组线虫最长寿命分别为 29 d 与 26 d，比对照组寿命 24 d 分别延长 20.83%、8.33%(P<0.05)。平均寿命分别为 22.40、19.57 d，比对照组 18.47 d 分别提高 21.28%、5.96%(P<0.05)，中位寿命分别为 21.5、20.5 d，比对照组 19 d 分别提高 13.16%、7.89%。

紫外线辐射能够使生物体内产生过量的自由基，对体内组织造成损伤从而减少寿命[36]。如图 4B 所示，在紫外线照射后 84 至 192 h 内，对照组线虫存活率持续下降，并于 192 h 时降至 17.78%。相比之下，50% 乙醇提取物组和 100 ℃ 水提取物组在同一时间范围内的线虫存活率均显著高于对照组，平均存活

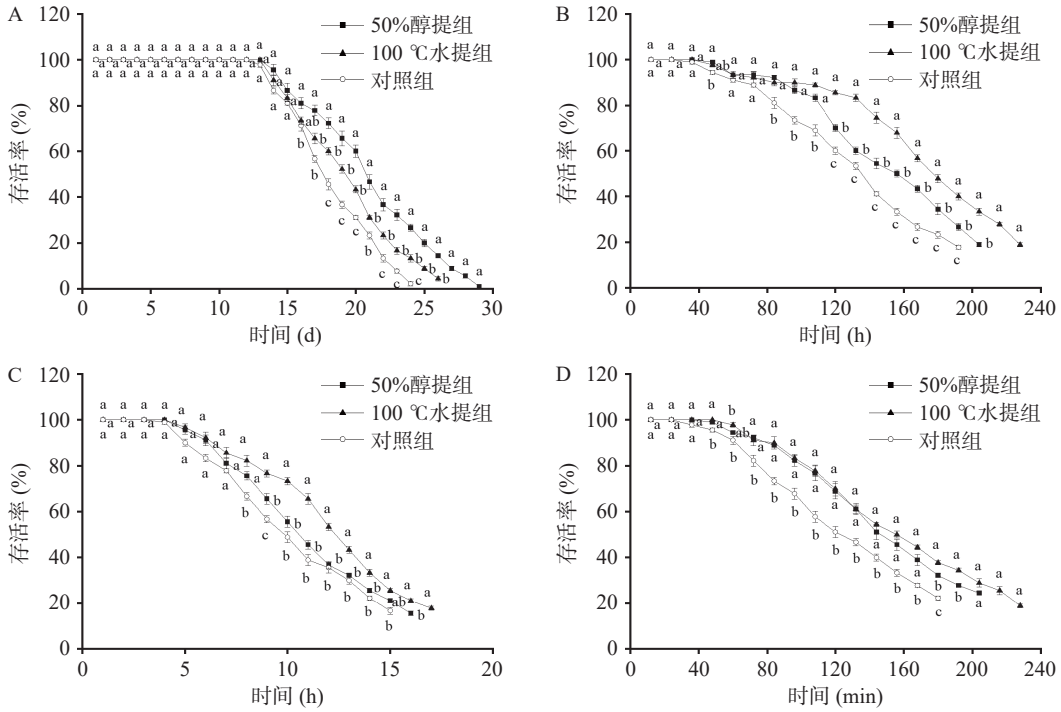


图 4　酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫寿命及抗逆环境的影响

Fig.4　Effects of *Zizyphus jujube* bud tea extract on the lifespan and stress resistance of *Caenorhabditis elegans*

注: A. 正常饲养环境; B. 紫外线辐射损伤; C. 高温热损伤; D. 双氧水氧化损伤; 同一时间不同曲线上的不同字母表示差异显著(P<0.05)。

表 1　秀丽隐杆线虫寿命及抗逆环境实验数据统计

Table 1　Statistical analysis of lifespan and stress resistance assay data of *Caenorhabditis elegans*

指标	分组	实验线虫数(条)	平均寿命	中位寿命	最长寿命
寿命	50%乙醇提取组	30	22.40±0.30^{a} d	21.5±3.14^{a} d	29±0.91^{a} d
	100 ℃水提取组	30	19.57±0.11^{b} d	20.5±1.57^{b} d	26±0.91^{b} d
	对照组	30	18.47±0.11^{c} d	19±1.57^{c} d	24±0.91^{c} d
抗紫外线辐射损伤	50%乙醇提取组	30	170.00±2.40^{a} h	156±1.57^{a} h	204±0.91^{a} h
	100 ℃水提取组	30	152.00±2.40^{b} h	177±1.81^{b} h	228±0.91^{b} h
	对照组	30	128.00±1.57^{c} h	135±1.57^{c} h	192±0.91^{c} h
抗高温热损伤	50%乙醇提取组	30	10.82±0.30^{a} h	10.56±2.40^{a} h	16±0.91^{a} h
	100 ℃水提取组	30	9.65±0.11^{b} h	12.33±1.57^{b} h	17±0.91^{b} h
	对照组	30	8.74±0.111^{c} h	9.86±1.57^{c} h	15±0.91^{c} h
抗双氧水氧化损伤	50%乙醇提取组	30	138.60±0.30^{a} min	146.4±3.27^{a} min	192±0.91^{a} min
	100 ℃水提取组	30	129.57±0.11^{b} min	156±1.57^{b} min	228±0.91^{b} min
	对照组	30	118.47±0.11^{c} min	123.0±2.40^{c} min	180±0.91^{c} min

注: 不同小写英文字母表示同列数据差异显著, P<0.05。

率分别较对照组提高 25.52% 和 51.28%(P<0.05)。此外, 对照组线虫的最大存活时间为 192 h, 50% 乙醇提取物组和 100 ℃ 水提取物组线虫的最大存活时间分别延长至 204 h 和 228 h。

线虫的最适生长温度为 20 至 25 ℃, 在 35 ℃ 高温条件下线虫体内会产生过量的活性氧, 其生理代谢也会紊乱, 加剧线虫的死亡[37]。如图 4C 所示, 在 35 ℃ 高温胁迫条件下, 对照组线虫存活率随时间显著下降(P<0.05), 并于 15 h 时降至 16.67%。在 8~15 h 内, 100 ℃ 水提取物给药组线虫存活率显著高于对照组, 平均存活率较对照组提高 43.65%(P<0.05)。对照组线虫的最大存活时间为 15 h, 而 100 ℃ 水提取物给药组线虫的最大存活时间延长至 17 h。在 8~9 h 内, 50% 乙醇提取物给药组线虫存活率为 70.56%, 显著高于对照组(P<0.05), 其平均存活率较对照组提高 14.42%。

双氧水具有强氧化性和腐蚀性, 线虫暴露于双氧水环境中会引发强氧化应激, 对线虫造成氧化损伤。如图 4D 所示, 在双氧水处理条件下, 对照组线虫存活率随时间显著下降, 并于 180 min 时降至 22.22%。在 72 至 180 min 内, 50% 乙醇提取物组和 100 ℃ 水提取物组线虫的存活率均显著高于对照组(P<0.05), 平均存活率分别较对照组提高 27.00% 和 31.42%(P<0.05)。此外, 对照组线虫的最大存活时间为 180 min, 而 50% 乙醇提取物组和 100 ℃ 水提取物组线虫的最大存活时间分别延长至 204 和 228 min。

孙艳等[38] 研究酸枣属植物提取物的抗氧化作用，其通过优化工艺获得酸枣叶黄酮，以秀丽隐杆线虫为模型，发现黄酮能够提高线虫在逆环境下的抵抗能力并延长寿命，本研究中酸枣芽茶提取物提高线虫抗逆环境效果与这一结果相一致。

2.5 酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫体内 SOD、CAT 活性的影响

SOD 是一种抗氧化防御酶，通过清除生物体内的 $O_2^{-}\cdot$，保护细胞免受氧化损伤[39]。由图 5A 可知，线虫通过酸枣芽茶提取物给药后，其体内的 SOD 活性显著高于对照组，与对照组相比，50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物给药组分别提高了 43.49% 和 91.29%，且均达到差异水平（P<0.05）。

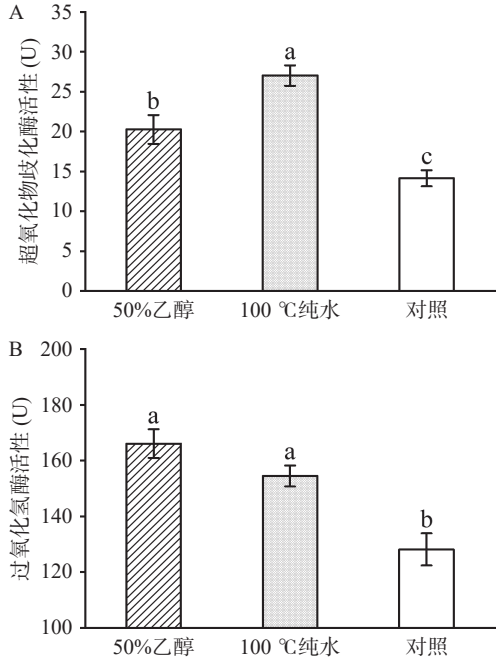


图 5 酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫体内 SOD（A）、CAT（B）活性的影响

Fig.5 Effects of *Zizyphus jujube* bud tea extracts on the activities of SOD (A) and CAT (B) in *Caenorhabditis elegans*

CAT 是一种含金属抗氧化酶，能够催化 H_2O_2 分解为水和氧气，保护细胞免受活性氧损伤[40]。如图 5B 所示，线虫在酸枣芽茶提取物给药后体内 CAT 活性较对照组有显著提升（P<0.05），50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物给药组较对照组分别提高了 29.61% 和 20.53%，且具有显著差异水平（P<0.05）。这可能由于 50% 乙醇提取物与 100 ℃ 水提取物的总黄酮含量较高，其中的黄酮类组分可通过提供电子辅助 SOD 清除 $O_2^{-}\cdot$，间接增强 SOD 的酶促反应效率[41]；50% 乙醇提取物与 100 ℃ 水提取物的总酚含量较高，其中的酚酸组分可与 CAT 的活性中心结合，增强其催化过氧化氢分解的能力[42]。

2.6 酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫体内 $O_2^{-}\cdot$、H_2O_2 和 MDA 含量的影响

生物体在逆环境中会产生 $O_2^{-}\cdot$，经过一系列反应生成活性氧，对生物体细胞产生氧化损伤[43]。由图 6A 可知，线虫通过酸枣芽茶两种提取物给药后其体内的 $O_2^{-}\cdot$ 含量明显下降，与对照组相比较，50% 乙醇和 100 ℃ 水提取物给药组 $O_2^{-}\cdot$ 含量分别降低 9.81% 与 23.32%，且具有显著差异（P<0.05）。过量的 H_2O_2 能够在线虫体内产生大量的自由基，导致线虫的细胞结构及其功能发生氧化损伤，破坏细胞的新陈代谢[44]。如图 6B 所示，经过给药后线虫体内的 H_2O_2 含量显著低于对照组，与对照组比较，50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物给药组比对照组 H_2O_2 含量分别降低了 14.58% 和 31.91%，且均达到差异水平（P<0.05）。MDA 是膜脂过氧化后的产物，可以改变生物体内的核酸与蛋白质，使其丧失生物功能[45]。如图 6C 所示，给药组线虫体内 MDA 含量显著低于对照组，与对照组进行比较，50% 乙醇提取物和 100 ℃ 水提取物给药组较对照组分别降低 72.17% 和 53.42%，且具有显著差异水平（P<0.05）。50% 乙醇提取物与 100 ℃ 水提取物含有黄酮类化合物，可激活内源性 SOD 等抗氧化酶系统，加速 $O_2^{-}\cdot$ 的歧化分解，两种提取物还含有酚酸物质并且能够激活

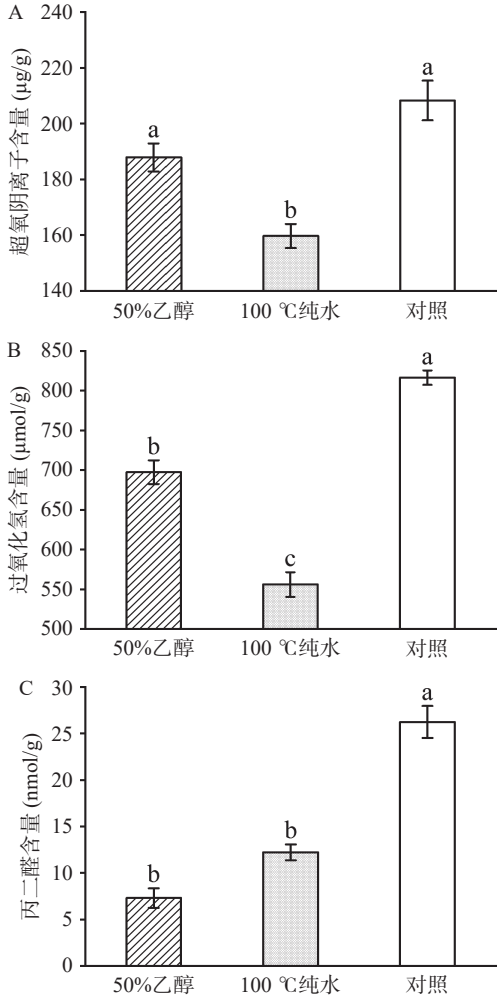


图 6 酸枣芽茶提取物对秀丽隐杆线虫体内 $O_2^{-}\cdot$（A）、H_2O_2（B）、MDA（C）含量的影响

Fig.6 Effects of *Zizyphus jujube* bud tea extract on the content of $O_2^{-}\cdot$ (A), H_2O_2 (B), and MDA (C) in *Caenorhabditis elegans*

CAT 的活性，加快 H_2O_2 的分解，同时两种提取物中的酚类物质可通过酚羟基提供氢原子，中和脂质过氧化链式反应中的关键自由基，阻断 MDA 前体形成[46]。以上结果表明，酸枣芽茶两种提取物能够降低线虫体内 $O_2^{-}\cdot$、H_2O_2 和 MDA 等氧化分子的含量，对线虫具有抗氧化保护作用，这与孙艳等[38] 研究酸枣叶黄酮可有效降低秀丽隐杆线虫体内 MDA 的含量，进而减轻氧化损伤并发挥保护作用的研究结果一致。

综合线虫实验发现，50% 乙醇提取物与 100 ℃ 水提取物都可以通过提高 SOD、CAT 抗氧化酶的活性(图 5)，降低体内 $O_2^{-}\cdot$、H_2O_2 和 MDA 的含量(图 6)，进而显著延长线虫寿命(图 4、表 1)。50% 乙醇提取物比 100 ℃ 水提取物在提高线虫体内 CAT 活性(图 5B)，降低 MDA 的含量(图 6C)，延长线虫自然寿命的效果更优(图 4A)；而 100 ℃ 水提取物则在激活线虫体内 SOD 活性(图 5A)、清除 $O_2^{-}\cdot$和 H_2O_2 和提升线虫抗逆环境能力方面表现更好(图 6A、图 6B)。

3　结论

本实验通过测定不同提取条件(乙醇浓度梯度、水温梯度)下酸枣芽茶提取物的总黄酮、总酚的含量、体外抗氧化活性及对秀丽隐杆线虫抗衰老的作用，结果表明：在乙醇提取体系中，50% 乙醇提取物的总黄酮和总酚含量最高，对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基的清除能力及总抗氧化能力最优；在水提取体系中，100 ℃ 水提取物的总黄酮和总酚含量显著高于中低温组，对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基的清除率、总还原能力及总抗氧化能力表现最优。50% 乙醇提取物与 100 ℃ 水提取物均能显著提升线虫体内 SOD、CAT 活性，降低 $O_2^{-}\cdot$、H_2O_2 及 MDA 含量，同时显著延长秀丽隐杆线虫自然寿命，提高线虫在紫外线、35 ℃ 高温、双氧水胁迫下的存活率，由此可见，酸枣芽茶两种提取物均具备较强的体外、体内抗氧化能力及延缓线虫衰老的作用。50% 乙醇提取物主要通过提高线虫体内 CAT 活性，降低线虫体内 MDA 的含量，延长线虫自然寿命效果更优；而 100 ℃ 水提取物则通过激活 SOD 活性、清除 $O_2^{-}\cdot$和 H_2O_2 提升线虫抗逆环境能力方面表现更好。

本研究为酸枣芽茶在抗衰老功能食品开发与利用中提供理论和数据支持。后续还需进一步探讨酸枣芽茶提取物延缓衰老的分子通路及作用机理。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] MILITELLO R, LUTI S, GAMBERI T, et al. Physical activity and oxidative stress in aging[J]. Antioxidants, 2024, 13(5): 557.

[2] SELVARAJ N R, NANDAN D, NAIR B G, et al. Oxidative stress and redox imbalance: Common mechanisms in cancer stem cells and neurodegenerative diseases[J]. Cells, 2025, 14(7): 511.

[3] HUA Yue, XU Xiaoxue, GUO Sheng, et al. Wild jujube (*Zizi-phus jujuba* var. *spinosa*): A review of its phytonutrients, health benefits, metabolism, and applications[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(26): 7871−7886.

[4] WANG Zijuan, AN Xiaowen, CHITRAKAR B, et al. Spatial and temporal distribution of phenolic and flavonoid compounds in sour jujube (*Ziziphus. acidojujuba* Cheng et Liu) and their antioxidant activities[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2023, 78(1): 46−51.

[5] 张琰, 杜晨晖. 山西多地主产区酸枣叶醇提物抗氧化活性与抑菌作用比较研究[J]. 饲料研究, 2024, 47(7): 82−87. [ZHANG Yan, DU Chenhui. Comparative study on antioxidant activity and bacteriostasis of ethanol extracts from *Zizyphus jujuba* leaves in main producing areas of Shanxi Province[J]. Feed Research, 2024, 47(7): 82−87.]

[6] 杨观兰, 钟朝玲, 张强, 等. 响应面优化南酸枣叶总黄酮的提取及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 133−137. [YANG Guanlan, ZHONG Chaoling, ZHANG Qiang, et al. Optimization of extraction of total flavonoids from *Choerospondias axillaris* leaves by response surface methodology and analysis of antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(9): 133−137.]

[7] LI Rong, YI Qingping, WANG Jinsong, et al. Paeonol promotes longevity and fitness in *Caenorhabditis elegans* through activating the DAF-16/FOXO and SKN-1/Nrf2 transcription factors[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2024, 173: 116368.

[8] LIN J Z, YU J M, WANG X, et al. Research progress on the anti-aging effect of polysaccharides of traditional Chinese medicine: Using *Caenorhabditis elegans* as an animal model[J]. The FASEB Journal, 2025, 39(6): e70454.

[9] SUN Yan, ZHANG Yanqing, QI Wuqin, et al. Saponins extracted by ultrasound from *Zizyphus jujuba* Mil var. Spinosa leaves exert resistance to oxidative damage in *Caenorhabditis elegans*[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(1): 541−554.

[10] WANG Feng, CHO B O, SHIN J Y, et al. *Humulus japonicus* extract alleviates oxidative stress and apoptosis in 6-hydroxydopamine-induced PC12 cells[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2022, 12(5): 197−206.

[11] 刘展眉, 邹启文, 张汉辉, 等. 荔枝果实不同部位提取物的总黄酮含量及其稳定性、抗氧化、美白活性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(11): 274−283. [LIU Zhanmei, ZOU Qiwen, ZHANG Hanhui, et al. Analysis of total flavonoids content, stability, antioxidant and whitening activities of extracts from different parts of *Litchi* fruit[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(11): 274−283.]

[12] 王凯慧. 樱桃番茄品种重要物质含量测定、功能性分析及优异品种筛选[D]. 哈尔滨：东北农业大学, 2023. [WANG Kaihui. Determination of important substances, functional analysis and selection of excellent varieties of cherry tomato[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.]

[13] JO Y J, CHO H S, CHUN J Y. Antioxidant activity of *β*-cyclodextrin inclusion complexes containing trans-cinnamaldehyde by DPPH, ABTS and FRAP[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(6): 807−814.

［14］ RUMPF J, BURGER R, SCHULZE M. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123470.
［15］ 黄瑜, 张锡宇, 赵海桃, 等. 沙棘叶提取物的体外抗氧化及乙酰胆碱酯酶抑制能力[J]. 精细化工, 2024, 41(2): 391−400. ［HUANG Yu, ZHANG Xiyu, ZHAO Haitao, et al. *In vitro* antioxidant activities and acetylcholinesterase inhibition ability of *Hippophae rhamnoides* L. leaves extract[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(2): 391−400.］
［16］ BILAL H M, SHARIF A, MALIK M N H, et al. Aqueous ethanolic extract of *Adiantum incisum* Forssk. protects against type 2 Diabetes mellitus via attenuation of α-amylase and oxidative stress[J]. ACS Omega, 2022, 7(45): 37724−37735.
［17］ 张余威, 赵文俊, 李伟杰, 等. 灭活芽孢杆菌 DU-106 对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用[J]. 食品科学, 2023, 44(23): 134−141. ［ZHANG Yuwei, ZHAO Wenjun, LI Weijie, et al. Anti-aging effect of inactivated *Bacillus* sp. DU-106 in *Caenorhabditis elegans*[J]. Food Science, 2023, 44(23): 134−141.］
［18］ 梁前程, 李昊东, 陶仙, 等. 杜仲叶环烯醚萜类成分及其抗衰老活性[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 235−242. ［LIANG Qiancheng, LI Haodong, TAO Xian, et al. Iridoid constituents and anti-aging activity of eucommiae folium[J]. Food Science, 2025, 46(11): 235−242.］
［19］ 吉宗慧, 张文静, 李盈姿, 等. 儿童用中成药一捻金及其拆方对秀丽线虫幼虫生长和神经行为的影响[J]. 毒理学杂志, 2022, 36(4): 275−279,291. ［JI Zonghui, ZHANG Wenjing, LI Yingzi, et al. The effects of Yinianjin and its disassembled prescriptions on growth and neurobehavior of *Caenorhabditis elegans* during larval stage[J]. Journal of Toxicology, 2022, 36(4): 275−279,291.］
［20］ 黎梓玉, 宋兵兵, 潘明雪, 等. 卡拉胶寡糖对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 39−46. ［LI Ziyu, SONG Bingbing, PAN Mingxue, et al. Anti-aging effect of carrageenan oligosaccharides on *Caenorhabditis elegans*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 39−46.］
［21］ HUI H P, XIN A Y, CUI H Y, et al. Anti-aging effects on *Caenorhabditis elegans* of a polysaccharide, O-acetyl glucomannan, from roots of *Lilium davidii* var. *unicolor* Cotton[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 846−852.
［22］ ZHANG Xue, CHEN Qi, CHEN Linzhen, et al. Anti-aging in *Caenorhabditis elegans* of polysaccharides from *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. Molecules, 2024, 29(6): 1276.
［23］ 赵小萌, 龚春森, 陈树兴, 等. 驼乳免疫球蛋白 G 对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用[J]. 食品科学, 2024, 45(22): 112−117. ［ZHAO Xiaomeng, GONG Chunmiao, CHEN Shuxing, et al. Anti-aging effect of camel milk immunoglobulin G on *Caenorhabditis elegans*[J]. Food Science, 2024, 45(22): 112−117.］
［24］ LIN Chunxiu, CHEN Yue, LIN Yizi, et al. Antistress and anti-aging activities of *Caenorhabditis elegans* were enhanced by *Momordica* saponin extract[J]. European Journal of Nutrition, 2021, 60(4): 1819−1832.
［25］ DU F, XU J N, LI D, et al. The identification of novel and differentially expressed apple-tree genes under low-temperature stress using high-throughput Illumina sequencing[J]. Molecular Biology Reports, 2015, 42(3): 569−580.
［26］ LEI Y B, YIN C Y, LI C Y, et al. Differences in some morphological, physiological, and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 127(2): 182−191.
［27］ LIN C X, XIAO J, XI Y, et al. Rosmarinic acid improved antioxidant properties and healthspan via the IIS and MAPK pathways in *Caenorhabditis elegans*[J]. BioFactors, 2019, 45(5): 774−787.
［28］ FAROOQ MA, LI L, ALI B, et al. Oxidative injury and antioxidant enzymes regulation in arsenic-exposed seedlings of four *Brassica napus* L. cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14): 10699−10712.
［29］ 匡海学. 中药化学[M]. 2 版. 北京: 中国中医药出版社, 2011. ［KUANG Haixue. Chemistry of traditional Chinese medicine[M]. 2nd ed. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2011.］
［30］ 王紫娟. 酸枣中多酚和黄酮类化合物的时空分布及其生物活性[D]. 保定: 河北农业大学, 2022. ［WANG Zijuan. Spatial and temporal distribution of phenolic and flavonoid compounds in sour jujube(*Ziziphus. acidojujuba* Cheng et Liu) and their biological activities[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022.］
［31］ 冯程程, 于筠, 王春玲. 不同贮藏温度下鲜切紫甘薯褐变相关因素研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 244−249,253. ［FENG Chengcheng, YU Jun, WANG Chunling. Browning related factors of fresh-cut purple sweet potato under different storage temperatures[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 244−249,253.］
［32］ 袁冬寅, 张芬, 陈家献, 等. 不同虫茶及其植物原料的抗氧化作用效果比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 310−319. ［YUAN Dongyin, ZHANG Fen, CHEN Jiaxian, et al. Comparison of antioxidant effects of different insect teas and their plant raw materials[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 310−319.］
［33］ SPIEGEL M, KAPUSTA K, KOŁODZIEJCZYK W, et al. Antioxidant activity of selected phenolic acids-ferric reducing antioxidant power assay and QSAR analysis of the structural features[J]. Molecules, 2020, 25(13): 3088.
［34］ MERECZ-SADOWSKA A, SADOWSKI A, ZIELIŃSKA-BLIŹNIEWSKA H, et al. Network pharmacology as a tool to investigate the antioxidant and anti-inflammatory potential of plant secondary metabolites-A review and perspectives.[J] International Journal of Molecular Sciences. 2025, 26(14): 6678.
［35］ GU Y P, HAN J X, JIANG C P, et al. Biomarkers, oxidative stress and autophagy in skin aging[J]. Ageing Research Reviews, 2020, 59: 101036.
［36］ ANSARY T M, HOSSAIN M R, KAMIYA K, et al. Inflammatory molecules associated with ultraviolet radiation-mediated skin aging[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(8): 3974.
［37］ ZHANG S Y, QIN Z C, SUN Y Y, et al. Genistein promotes anti-heat stress and antioxidant effects via the coordinated regulation of IIS, HSP, MAPK, DR, and mitochondrial pathways in *Caenorhabditis elegans*[J]. Antioxidants (Basel), 2023, 12(1): 125.
［38］ 孙艳, 崔旭盛, 刘静, 等. 酸枣叶黄酮的提取工艺优化及其抗秀丽隐杆线虫氧化损伤活性[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 143−150. ［SUN Y, CUI X S, LIU J, et al. Optimization of extraction process of flavonoids from *Ziziphus jujuba* Mill var. spinosa

leaves and its antioxidant damage activity in *Caenorhabditis elegans*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 143−150.]

[39] GUTTERIDGE J M, HALLIWELL B. Free radicals and antioxidants in the year 2000. A historical look to the future[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2000, 899: 136−47.

[40] BAKER A, LIN C C, LETT C, et al. Catalase: A critical node in the regulation of cell fate[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2023, 199: 56−66.

[41] PIETTA P G. Flavonoids as antioxidants[J]. Journal of Natural Products, 2000, 63(7): 1035−42.

[42] KILANI-JAZIRI S, MOKDAD-BZEOUICH I, KRIFA M, et al. Immunomodulatory and cellular anti-oxidant activities of caffeic, ferulic, and p-coumaric phenolic acids: a structure-activity relationship study[J]. Drug and Chemical Toxicology, 2017, 40(4): 416−424.

[43] ANDRÉS C M C, PÉREZ DE LA LASTRA J M, ANDRÉS JUAN C et al. Superoxide anion chemistry-its role at the core of the innate immunity[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(3): 1841.

[44] ZHOU L, PENG Y, WANG Q, et al. An ESIPT-based two-photon fluorescent probe detection of hydrogen peroxide in live cells and tissues[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2017, 167: 264−268.

[45] WU X, CAI H, LIAO R, et al. Bio-inspired carbon dots as malondialdehyde indicator for real-time visualization of lipid peroxidation in depression[J]. Small, 2024, 20(46): e2400671.

[46] PROKAI L, RIVERA-PORTALATIN N M, PROKAI-TATRAI K. Quantitative structure-activity relationships predicting the antioxidant potency of 17β-estradiol-related polycyclic phenols to inhibit lipid peroxidation[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(1): 1443−1454.