



不同水肥组合对贵州金花茶生长和活性物质的影响

吴帆, 夏浪, 张月, 谢鑫, 陈民

引用本文:

吴帆, 夏浪, 张月, 等. 不同水肥组合对贵州金花茶生长和活性物质的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(4): 445–453.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5059>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GIS与Maxent模型的金花茶潜在适生区与保护研究

Studies on Potential Suitable Growth Areas and Protection of *Camellia nitidissima* Based on GIS and Maxent Model

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 24–32 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3796>

不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 31–40 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响

Effect of Nitrogen Forms on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Metabolism of *Clematis*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 276–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4281>

海滨木巴戟的生理生态特征研究

Eco-physiological Characteristics of *Morinda citrifolia*

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 33–39 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3811>

盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

向下翻页，浏览PDF全文

不同水肥组合对贵州金花茶生长和活性物质的影响

吴帆^{1,2}, 夏浪¹, 张月¹, 谢鑫¹, 陈民¹

(1. 贵阳康养职业大学药学院, 贵阳 550081; 2. 贵州省药用资源康养产品工程研究中心, 贵阳 550081)

摘要: 为探讨不同水肥耦合条件对贵州金花茶(*Camellia huana*)生长及生理生化指标的影响, 选取生长势相似的贵州金花茶, 设定 3 种灌水量和 4 级肥力处理, 在生长季结束后, 测定其生物量、株高、地径等生长指标, 并测定叶片的总黄酮、总酚、总糖、总氨基酸、丙二醛、脯氨酸、过氧化氢酶及酸性磷酸酶含量。结果表明, 在各类水肥耦合模式中, W₂F₂ 组合[浇水量 800 mL/ind.、施肥量(N-P-K) 1.6-1.0-1.0 g/ind.]更有利于贵州金花茶的生长和活性成分的积累, 地上生物量、总生物量、总酚、总黄酮等多个指标也达到峰值。因此, 建议在推广种植贵州金花茶时, 采用 W₂F₂ 组合的水肥管理措施, 可促进贵州金花茶的生长和次生代谢产物合成, 显著提升植株的胁迫适应性与品质。

关键词: 贵州金花茶; 水肥耦合; 活性物质; 胁迫

doi: 10.11926/jtsb.5059 CSTR:32235.14.jtsb.5059

Effects of Water and Fertilizer Coupling on the Growth and Active Substances of *Camellia huana*

WU Fan^{1,2}, XIA Lang¹, ZHANG Yue¹, XIE Xin¹, CHEN Min¹

(1. College of Pharmacy, Guiyang Healthcare Vocational University, Guiyang 550081, China; 2. Guizhou Provincial Engineering Research Center of Medical Resourceful Healthcare Products, Guiyang 550081, China)

Abstract: To explore the effects of different water and fertilizer coupling conditions on the growth and physiological and biochemical indicators of *Camellia huana* in Guizhou, plants with similar growth vigor were selected, and three irrigation volumes and four levels of fertility were set. At the end of the growing season, the biomass, plant height, ground diameter and other growth indicators were measured, and the contents of total flavonoids, total phenols, total sugars, total amino acids, malondialdehyde, proline, catalase and acid phosphatase in leaves were determined. The results showed that among various water and fertilizer coupling patterns, the W₂F₂ combination [irrigation volume of 800 mL/ind., fertilizer application (N-P-K) 1.6-1.0-1.0 g/ind.] was more conducive to the growth and accumulation of active components of *C. huana*, and multiple indicators such as aboveground biomass, total biomass, total phenols and total flavonoids reached their peaks. Therefore, it was recommended that when promoting the cultivation of *C. huana*, the water and fertilizer management measures of the W₂F₂ combination be adopted, which can promote the growth and secondary metabolite synthesis of *C. huana*, and significantly improve the stress adaptability and quality of the plants.

Key words: *Camellia huana*; Water and fertilizer coupling; Active substance; Stress

贵州金花茶(*Camellia huana*)为山茶科(Theaceae)山茶属金花茶组(Sect. *Chrysanth* Chang)多年生常绿灌木, 主要分布在我国广西、贵州罗甸等地^[1], 其

含有酚类、抗坏血酸、可溶性糖、黄酮类等多种活性成分^[2-3], 具有抗炎抑菌、降血糖、抗氧化、抗抑郁等作用^[4-6]。贵州金花茶作为金花茶组中的最

收稿日期: 2025-09-09 接受日期: 2025-12-23

基金项目: 贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教技[2024]288 号)资助

This work was supported by the Project for Natural Science Research of Department of Education of Guizhou (Grant No. [2024]288).

作者简介: 吴帆(1991 年生), 男, 博士, 研究方向为药用植物遗传育种。E-mail: eiknarf@126.com

北缘种, 其喜排水良好、肥力适中的疏松土壤^[7]。据此, 若要在我国其他地区广泛推广种植, 需要充分考虑土壤中水肥耦合效应。不恰当的水肥比例不仅影响其正常生长发育, 同时会造成体内药用活性成分的转变或含量流失^[8]。穆寅生等^[9]在研究水分胁迫对流苏(*Chionanthus retusus*)的生理影响时, 认为土壤水分含量过高会导致流苏幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量、净光合速率(Pn)及气孔导度(Gs)等明显下降。肥料是植物生长中重要的养份来源, 当养分充足时, 植物表现为叶片大而绿, 分枝多, 花大等特点^[10], 而养分缺失或者较少时, 则表现为叶片发黄, 产量降低等^[11]。田秋等^[12]报道适宜的氮添加可以增强川黄檗(*Phellodendron chinense*)抗胁迫能力, 并且显著提高氮代谢相关基因表达量。水肥两者之间的相互效应, 主流认为有 3 种相互作用: 协同作用^[13]、拮抗作用^[14]和叠加作用^[15], 由此探究植物在不同水肥作用下的物质含量变化显得更为重要, 合理的水肥比不仅可以促进植物生长, 还能防止过度施肥下的水体与土壤污染, 增进生态环境的良性循环。水肥耦合的相关研究在我国农业系统中已取得较为成熟的应用, 但是对于地方特有物种的报道较少, 针对贵州金花茶开展系统性的水肥耦合试验鲜有报道。

据此, 本文选取长势相近, 无病虫害的贵州金花茶植株为试验材料, 设置 3 个水量梯度, 4 个肥度梯度。在生长季结束后, 对其生物量、生长指标进行检测, 同时测定其体内黄酮、氨基酸等活性物质及脯氨酸、丙二醛等相关抗氧化物质含量, 探究贵州金花茶生长与其有益成分与土壤不同水肥组合的关系, 为后续贵州金花茶的种植推广提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

贵州金花茶(*Camellia huana*)幼苗由广西南宁青秀区长塘镇金花茶小镇(108.69°42'98" E, 22.80°77'62" N)提供。选取长势一致、无病虫害和机械损伤的 2 a 生播种容器苗作为试验材料。

所用土壤为营养土, pH 6.70~7.01, 容重为 1.21 g/cm³, 全氮为 402 mg/kg, 碱解氮为 45.12 mg/kg, 有效磷为 24.23 mg/kg, 速效钾为 37.25 mg/kg。将植株通过盆栽育苗方式放置于室内[贵阳康养职业

大学药用植物园(106°61'06" E, 26°61'97" N), 年均温度为 19.0 °C, 空气湿度白天为 45%~60%, 夜晚为 75%~90%, 光照强度为自然光强的 75%], 以上述土壤为基础缓苗 30 d。

1.2 方法

试验设计 采用双因素随机区组设计, 实验因素为水分梯度: 200 mL/ind. (W₀)、400 mL/ind. (W₁)、800 mL/ind. (W₂); 肥力梯度: 氮-磷-钾(N-K-P): 0.0-0.0-0.0 g/ind. (F₀)、0.8-0.5-0.5 g/ind. (F₁)、1.6-1.0-1.0 g/ind. (F₂)、2.4-1.5-1.5 g/ind. (F₃), 以 F₀ 作为对照, 共 12 个处理。将硝酸钙[Ca(NO₃)₂, 分析纯, 沪试]、磷酸二氢钾(KH₂PO₄, 分析纯, 沪试)充分溶解于纯化水中后进行浇水, 每 4 d 一次。

样品采集与指标测定 在贵州金花茶生长季结束后, 每处理选取 3 株生长正常的容器苗, 分别测定生物量: 用千分之一电子天平称量根、茎、叶干重, 分别计算地上生物量、地下生物量及总生物量; 苗高和地径: 利用卷尺和游标卡尺测定; 总黄酮、总糖、总酚、总氨基酸含量: 分别按总黄酮(TF)试剂盒(Sinobestbio, 上海)、总糖试剂盒(原鑫生物, 上海)、总酚(TP)试剂盒(Sinobestbio, 上海)、总氨基酸(AA)试剂盒(Sinobestbio, 上海)步骤进行测定; 过氧化氢酶、酸性磷酸酶、脯氨酸、丙二醛含量: 分别按过氧化氢酶(CAT)试剂盒(原鑫生物, 上海)、酸性磷酸酶(ACP)试剂盒(Sinobestbio, 上海)、脯氨酸(Pro)试剂盒(Sinobestbio, 上海)、丙二醛(MDA)试剂盒(Sinobestbio, 上海)步骤进行测定。

1.3 数据分析

采用 WPS office 软件对原始数据进行初步整理, 使用 SPSS 26.0 软件进行差异显著性分析, 采用 Duncan 法进行多重比较。作图与相关性分析使用 OriginPro 2021.0 软件。所有测量均重复 3 次, 数据取平均值。

2 结果和分析

2.1 对生物量的影响

在水分影响方面, 从图 1 可见, 除 F₁ 处理外, 其他处理地上生物量和总生物量均在 W₂ 处理下达最高, 其中地上生物量达 40.1 g、总生物量达 58.24 g, 显著高于 W₀ 与 W₁ ($P < 0.05$); 而水分对地下生物量的影响在 W₁ 时达到峰值, 为 19.61 g, 表明适度水分最有利于植株地下生物量积累。

在肥力影响方面, 增施肥料显著影响生物量 ($P<0.05$)。其中, 地上生物量在 F_2 时达峰值, 较 F_0 显著提升; 总生物量表现为 $F_2>F_1>F_3>F_0$, 说明适量施肥(F_2)对生物量形成具有显著促进作用, 过量(F_3)或缺乏(F_0)均产生抑制作用。地下生物量的变化趋势略有不同, 在 F_1 时最高, F_0 处理下最低。

总体而言, 水肥耦合对贵州金花茶地上部分的影

响效果要高于地下部分。其中, 在施肥量相同的前提下, 随着浇水量的增加, 贵州金花茶的地上、地下和总生物量呈现逐步升高的趋势; 在浇水量相同的前提下, 随着施肥量的增加, 三者呈现先升高后缓慢降低的趋势。在各水肥组合类型中, W_2F_2 组合表现相对较好, 地上生物量及总生物量最高, 分别达到 40.01、58.24 g, 与其他处理间的差异显著($P<0.05$)。

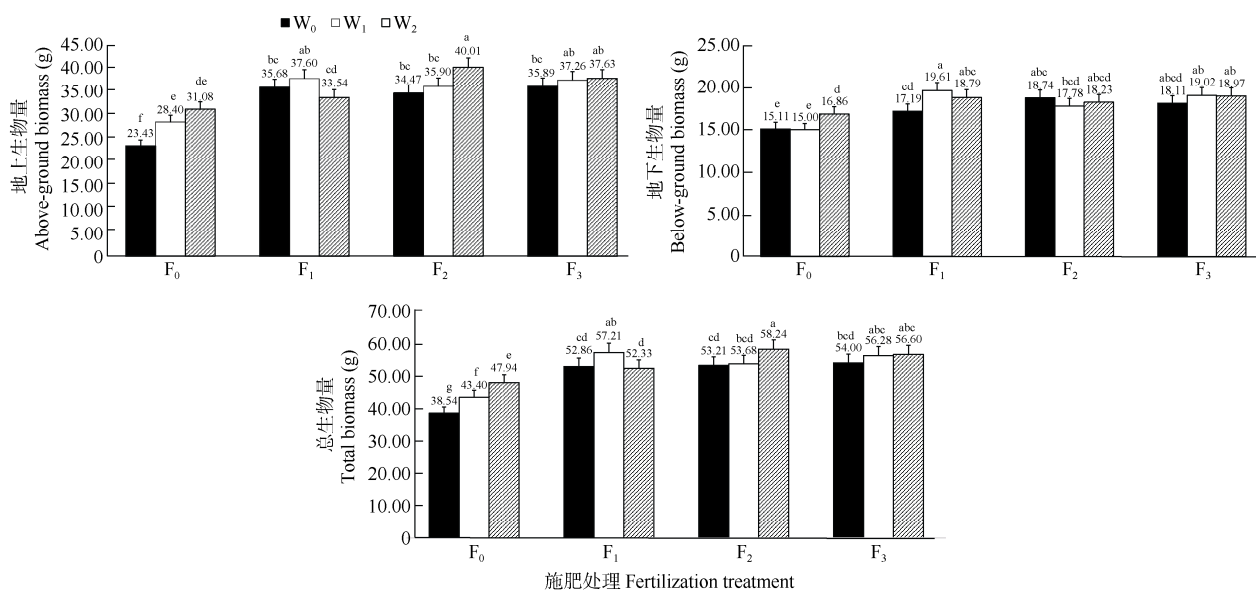


图 1 不同水肥组合对贵州金花茶生物量的影响。 F_0 : N-K-P 0.0-0.0-0.0 g/ind.; F_1 : N-K-P 0.8-0.5-0.5 g/ind.; F_2 : N-K-P 1.6-1.0-1.0 g/ind.; F_3 : N-K-P 2.4-1.5-1.5 g/ind.; W_0 : 浇水 200 mL/ind.; W_1 : 浇水 400 mL/ind.; W_2 : 浇水 800 mL/ind.。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 1 Effect of water and fertilizer coupling on biomass of *Camellia huana*. F_0 : N-K-P 0.0-0.0-0.0 g/ind.; F_1 : N-K-P 0.8-0.5-0.5 g/ind.; F_2 : N-K-P 1.6-1.0-1.0 g/ind.; F_3 : N-K-P 2.4-1.5-1.5 g/ind.; W_0 : 200 mL/ind. water; W_1 : 400 mL/ind. water; W_2 : 800 mL/ind. water; Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

2.2 对株高与地径的影响

由图 2 可见, 当肥力不变, 在不同水分处理下, 株高呈现 2 种变化趋势, 即持续升高或升高后降低。株高在 W_1 处理下最大, 显著高于水分胁迫的 W_0 ($P<0.05$)。地径变化趋势与株高一致, 同样在 W_1 处理下最粗, 而在 W_0 处理下最细。这表明适度水分(W_1)有利于促进金花茶茎干的纵向伸长与径向加粗。

施肥对植株生长也具有显著影响。株高随肥力增加表现为先促进后抑制, 在 F_1 处理下最高, 显著高于不施肥的 F_0 。地径生长响应类似, 在 F_1 时达到峰值, F_0 时最小。这说明适量施肥(F_1)能有效促进生长, 但肥力不足(F_0)或过量(F_3)均会产生限制。

总体而言, 水肥耦合效应对贵州金花茶株高的影响效应要高于地径。其中 W_1F_1 和 W_2F_3 组合最佳,

与对照的差异均达到显著水平($P<0.05$)。另一方面, 相同浇水量下, 贵州金花茶的地径随着施肥量的增加呈现先升高后下降的趋势, 同样在 W_1F_1 组合下达到峰值。由此可见, W_1F_1 组合对贵州金花茶株高与地径增长最为有效。

2.3 水肥耦合效应对贵州金花茶活性成分的影响

水分条件显著影响金花茶活性成分的含量, 但不同活性成分的变化趋势差异显著($P<0.05$)。在施肥量不变的前提下, 随着浇水量的增加, 总酚含量基本呈现下降趋势, 以 W_2 处理最高; 总糖含量呈现先升高后下降的趋势, 以 W_1 处理最高; 黄酮和总氨基酸含量变化趋势相似, 均呈先升高后降低的变化过程, 均以 W_2 处理最高(图 3)。

在相同浇水量下, 随施肥量的增加, 总酚含量基本呈先升高后下降的趋势, 以 F_2 处理最高; 总糖

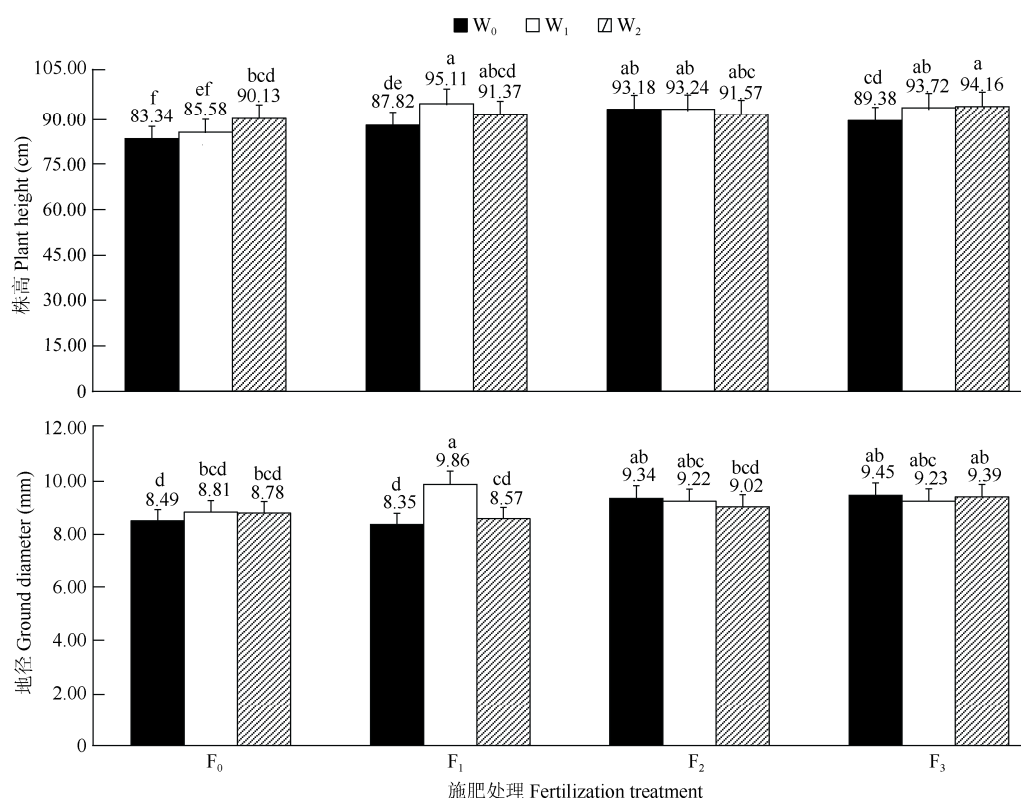


图 2 不同水肥组合对贵州金花茶株高与地径的影响

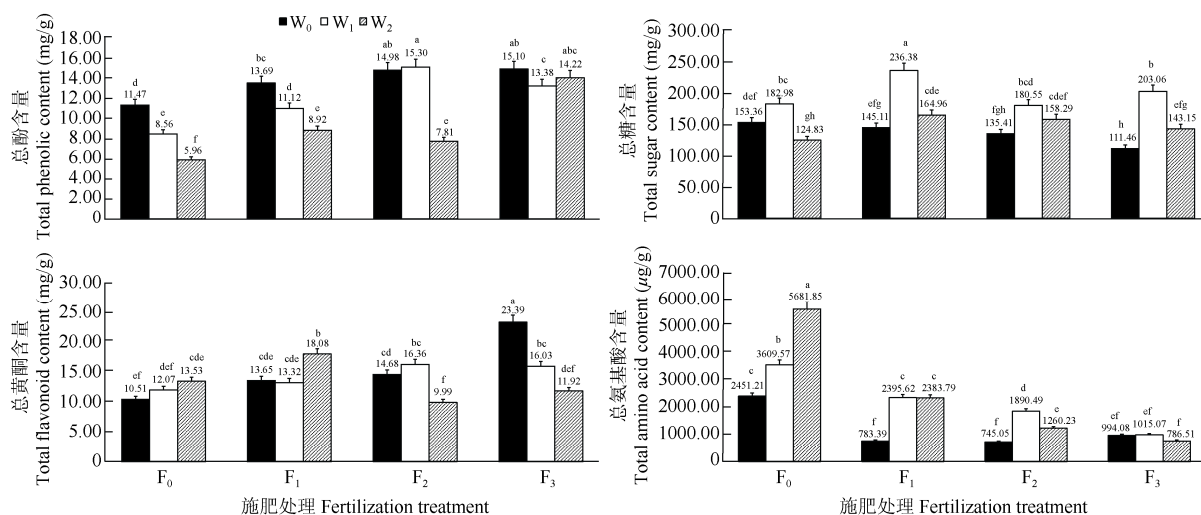
Fig. 2 Effect of water and fertilizer coupling on plant height and ground diameter of *Camellia huana*

图 3 不同水肥组合对贵州金花茶活性成分的影响

Fig. 3 Effect of water and fertilizer coupling on active components in *Camellia huana*

含量的变化,与水分影响相似,基本呈先升高后下降的趋势,以 F₁ 处理最高,最低为 F₃ 处理;黄酮含量呈先增后降的趋势,以 F₃ 处理最高,与其他处理间均存在显著差异($P<0.05$);总氨基酸含量均呈逐渐下降的趋势,以 F₁ 处理最低。

水肥交互作用对 4 种活性成分的影响均达显著水

平($P<0.05$)。总酚与总黄酮含量均以 W₂F₃ 处理最高;总糖与总氨基酸含量则分别以 W₁F₁、W₂F₀ 处理下积累最多。总体而言,水肥耦合效应对贵州金花茶各活性成分含量存在不同程度的增益,但存在明显阈值。

2.4 对耐逆性相关指标的影响

从图 4 可见,水分条件显著影响金花茶的逆境

生理响应。其中,脯氨酸含量均随水分胁迫的缓解而显著降低,以 W_0 处理最大;而丙二醛(MDA)含量正好相反,随浇水量的增加而逐渐升高,以 W_2 处理最大;酸性磷酸酶(ACP)活性对水分的响应呈逐渐升高的趋势,以 W_2 处理最高;过氧化氢酶(CAT)呈先升后降趋势,以 W_1 处理最高,而在严重干旱(W_0)与渍水(W_2)条件下活性受到抑制。

在施肥水平对耐逆性指标的调控影响方面,脯氨酸含量由无明显变化到逐渐下降;丙二醛含量从逐渐降低向无明显变化过渡,表明适量施肥有助于

缓解植株的胁迫状态。另一方面,2个抗氧化酶活性变化几乎一致:当浇水量保持恒定时,随施肥量的增加,ACP和CAT活性均呈先升高后下降的趋势,分别以 F_1 和 F_2 处理最大。

不同水肥组合对耐逆指标的影响结果表明,脯氨酸与MDA含量在水肥双缺的 W_0F_0 处理下积累最多,在 W_2F_1 和 W_0F_2 处理下含量最低;相反,ACP和CAT活性分别以 W_1F_1 和 W_1F_2 处理最大。综合分析表明,适宜水分(W_1)与均衡施肥(F_2)的协同配合,能最有效激活植株体内的保护酶系统。

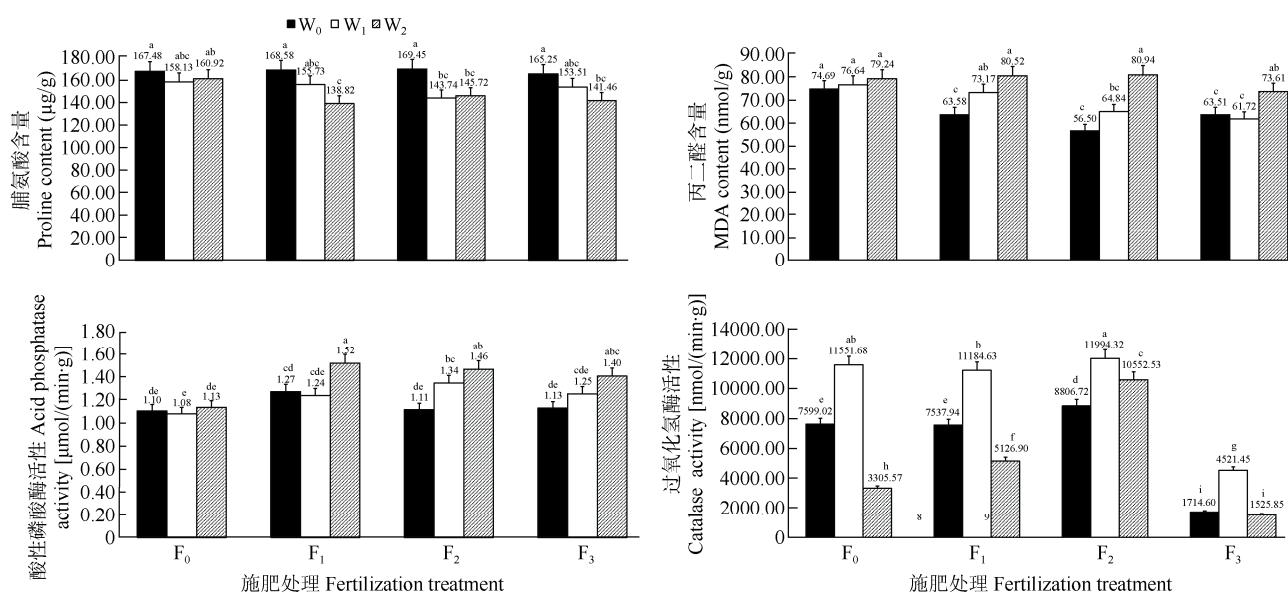


图4 不同水肥组合对贵州金花茶抗逆境指标的影响

Fig. 4 Effect of water and fertilizer coupling on stress resistance indexes of *Camellia huana*

2.5 相关性分析

相关性分析结果表明,贵州金花茶的生长、品质及抗逆性指标间呈现出协同与权衡并存的复杂网络(表1)。生长指标之间协同性显著,地上、地下与总生物量两两呈极显著正相关($r=0.71\sim0.98$),且它们与株高也呈极显著正相关($r=0.74\sim0.80$),但地径与株高存在极显著负相关($r=-0.62$),提示形态建成中可能存在资源分配冲突。在代谢层面,总酚与总黄酮含量呈显著正相关($r=0.37$),但二者与初生代谢产物显示出不同关联,总酚与总氨基酸呈极显著负相关($r=-0.74$),而总糖与株高及过氧化氢酶活性分别呈显著和极显著正相关($r=0.34, 0.52$),提示次生代谢与初生代谢路径间存在竞争。抗逆指标中,丙二醛与总酚、总黄酮含量呈显著负相关($r=-0.71, -0.42$),表明酚类物质可能有助于减轻膜脂过氧化;

同时,酸性磷酸酶活性与多个生长指标呈正相关($r=0.38\sim0.48$),而与脯氨酸含量呈极显著负相关($r=-0.66$),体现了不同抗逆策略之间的功能分离。这些内在关联表明,水肥调控通过影响资源在生长、初级代谢、次级代谢及胁迫响应之间的分配,综合塑造了植株的最终表型。

3 讨论和结论

3.1 水肥耦合对贵州金花茶生长的影响

一般而言,木本植物的生长发育,从宏观角度分析,包括株高、地径及对应生物量的积累。其中株高和地径的数值变化反映了植物生长的直观变化,而生物量的积累,反映了植物体内有机物质的转换和营养物质的吸收^[16],对于植物而言,合适的

表 1 各物质相关性分析

Table 1 Analysis of the correlation among various substances

性状 Trait	AGB	UGB	TB	H	DGH	TP	TF	TS	TAA	Pro	MDA	ACP	CAT
AGB	1.00												
UGB	0.71**	1.00											
TB	0.98**	0.83**	1.00										
H	0.74**	0.79**	0.80**	1.00									
DGH	0.48**	0.40*	0.48**	-0.62**	1.00								
TP	0.26	0.25	0.27	0.26	0.33*	1.00							
TF	0.20	0.28	0.23	0.17	0.16	0.37*	1.00						
TS	0.16	0.21	0.18	0.34*	0.31	-0.08	-0.20	1.00					
TAA	-0.48**	-0.44**	-0.50**	-0.28	-0.22	-0.74**	-0.16	0.02	1.00				
Pro	-0.23	-0.20	-0.24	-0.24	-0.04	0.14	0.03	-0.22	0.03	1.00			
MDA	-0.20	-0.22	-0.22	-0.19	-0.24	-0.71**	-0.42*	0.03	0.51**	-0.35*	1.00		
ACP	0.48**	0.38*	0.48**	0.42*	-0.01	-0.08	-0.01	0.14	-0.28	-0.66**	0.37*	1.00	
CAT	-0.06	-0.20	-0.10	-0.07	0.01	-0.11	-0.39*	0.52**	0.05	-0.01	0.03	-0.04	1.00

AGB: 地上生物量; UGB: 地下生物量; TB: 总生物量; H: 株高; DGH: 地径; TP: 总酚; TF: 总黄酮; TS: 总糖; TAA: 总氨基酸; Pro: 脯氨酸; MDA: 丙二醛; ACP: 酸性磷酸酶; CAT: 过氧化氢酶; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。

AGB: Above-ground biomass; UGB: Below-ground biomass; TB: Total biomass; H: Height; DGH: Ground diameter; TP: Total phenol; TF: Total flavonoid; TS: Total sugar; TAA: Total amino acid; Pro: Proline; MDA: Malondialdehyde; ACP: Acid phosphatase; CAT: Catalase. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

水肥耦合模式下,可以显著提高株高、地径、生物量等指标^[17]。本研究结果表明,在水肥耦合作用下,地上生物量和总生物量的积累要高于地下生物量。其中,当浇水量为 800 mL/ind.、N-P-K 施肥量 1.6-1-1 g/ind.时,贵州金花茶生物量积累要优于水肥耦合模式更高或更低的其他类型。陈士超等^[18]分析了水肥耦合对蛋白桑(*Morus aluminosa*)生物量积累和生长的影响,认为如果施肥量或灌水量过低,会显著影响蛋白桑的株高、基径和地上生物量。另一方面,如果过量施肥或灌水,导致水肥耦合不当,则植物各器官的生长及生物量的积累均会明显减弱^[19]。本研究结果表明,株高、地径和各类生物量的积累,随着浇水量和施肥量的增加,呈现先升高后下降的变化趋势,和前人^[20]研究结果一致。土壤肥力应维持在植物能适应的范围,水分过高会导致植物根系呼吸和水代谢受损,进而无法正常发育;而当水分维持在适宜范围,土壤肥力过高又会导致植物细胞内外渗透压失衡,进而引起植物严重失水,导致植物无法正常生长^[21]。

3.2 水肥耦合对贵州金花茶活性成分的影响

本研究结果表明贵州金花茶的总酚和总黄酮含量在不同梯度的水肥耦合处理下,均呈现先升高后下降的趋势,且均以 W₂F₂ 处理最高。研究表明黄酮类化合物本身就是酚类的一大分支,都来源于苯丙氨酸经由苯丙烷途径合成^[22]。黄酮类等酚类次

生代谢产物都是植物抵御活性氧物质,胁迫时活性氧增多,植株会同步提升各种酚类(包括黄酮)的积累来清除自由基,导致两者变化趋势相似^[23]。

另一方面,当植物处于逆境环境时,一般会通过合成糖类物质调节细胞渗透压以适应环境^[24]。本研究结果表明总糖含量随着施肥量和浇水量的增加呈现先升高后下降的趋势,在 W₁F₁ 处理下(浇水量 400 mL/ind., N-K-P 施肥量 0.8-0.5-0.5 g/ind.)达到峰值,表明当浇水量和施肥量超过上述指标时,环境已对贵州金花茶产生胁迫,需要加以控制。值得注意的是,郑志松等^[25]、张丽莹等^[26]对小麦(*Triticum aestivum*)和黄瓜(*Cucumis sativus*)进行水肥耦合实验时,报道两者体内氨基酸含量会随着水肥耦合程度的增加而增加,认为可能是因为需要大量氨基酸合成可溶性蛋白,以调节渗透压。本研究的氨基酸含量变化要更复杂一点,整体呈现逐渐下降的趋势,和前人^[25-26]研究结果相反,可能是物种差异,或是急速的水肥耦合效应影响贵州金花茶合成氨基酸的效率,具体原因可能需要后续更深层次的机理层面实验来证实。

3.3 水肥耦合对贵州金花茶抗逆境指标的影响

本研究结果表明,随着水肥耦合处理程度的加深,脯氨酸含量总体趋势上逐步下降。脯氨酸含量低则意味着胁迫程度较轻或水肥条件相对适宜,植物无需大量合成脯氨酸即可维持渗透平衡。Liu 等^[27]

对金银花(*Lonicera japonica*)的水肥耦合实验结果表明,脯氨酸含量随氮和水的增加呈显著下降趋势,合理的水肥配比既强化了渗透调节,又减轻了膜脂质过氧化损伤,与本研究结果相似。而随着浇水量的不断增加,丙二醛含量逐渐升高;随着施肥量的增加,其含量从最开始的逐渐降低,向无明显变化过渡。丙二醛含量的升高反映了细胞膜脂质过氧化损伤程度,越高的丙二醛意味着越强的氧化压力^[28]。由此可推断水分积累对于贵州金花茶的胁迫影响要高于肥力。吴帆等^[29]在针对金花茶种植时也提出建议,种植地土壤环境应以磷元素含量高、钾元素适中、氮元素含量适当低,且排水良好的湿润土壤为佳。

随着施肥量的增加,酸性磷酸酶活性先升高后下降;随着浇水量逐渐升高,酸性磷酸酶活性逐渐升高。Zhang 等^[30]分析水肥耦合对紫花苜蓿(*Medicago sativa*)磷酸酶活性的影响,认为高施磷肥可抑制磷酸酶活性;水分不足时,磷酸酶活性下降,此时增施磷肥可部分恢复其活性,与本文结果相互验证。Zhang 等^[30]的研究还表明,当土壤肥力不足时,植物通过上调酸性磷酸酶活性来增强土壤中有机的矿化,以满足自身对磷的需求。

随着水肥耦合效应的增加,过氧化氢酶的活性呈现先升高后下降的趋势。表明适中水分与肥力配比可延缓过氧化氢酶活性衰减并持续清除 ROS。在 Chaekar 等^[31]对干旱胁迫下茶树(*Camellia sinensis*)的抗氧化酶活性的研究结果表明,随着胁迫程度的加深,其过氧化氢酶活性显著提升,与本文结果相类似。此外,同样的低水条件下,随着肥力的增加,其含量也在降低,可以推测低水低肥环境对贵州金花茶构成了一定的外界胁迫。在其他物种的水肥耦合实验中同样有相似的发现。Qu 等^[32]在研究玉米(*Zea mays*)滴灌交替实验中指出,在低盐低水环境下,玉米氧化氢酶活性均显著高于其他水肥组合,这优化了玉米在干旱条件下的抗逆能力。

3.4 水肥耦合对贵州金花茶生长和活性物质的影响及其经济效益分析

本研究表明,水肥耦合对贵州金花茶生长及活性物质积累的调控存在显著的权衡效应,直接决定其生产的经济效益。一方面,均衡的水肥供应能最大程度地促进地上、地下及总生物量、株高等形态指标的协同增长,同时维持较高的总糖水平与过氧化氢酶活性,这符合资源最大化投入促进初级生长代谢的规律^[33]。另一方面,轻度水分胁迫配合中等

肥力虽在一定程度上抑制生长,却能有效诱导总酚、总黄酮等次生代谢产物的显著积累,并伴随脯氨酸含量增加及丙二醛含量受到抑制,体现了植物在适度逆境下将资源从生长转向防御性代谢的适应性策略。这种“生长-品质”的负相关关系,本质上源于植物体内碳氮资源在不同代谢路径间的竞争性分配。因此,其经济效益分析必须基于明确的生产目标,若以获取高产茶鲜叶(生物量)为导向,W₂F₂模式通过实现最高产量而可能获得最佳规模收益;若以开发高附加值功能性产品(提取活性成分)为目标,则 W₁F₁模式通过提升原料单位价值及可能降低的水肥投入,可创造更优的利润空间。引入精准水肥管理技术,根据市场需求的动态变化,在生长季的不同阶段灵活切换管理模式,有望成为在单位面积上最大化整合经济效益的未来方向。

本研究通过分析贵州金花茶在不同水肥耦合处理下各项生长、生理及活性成分指标的变化,系统探究了水肥耦合对其生长发育与代谢产物积累的影响机制。结果表明,适宜的水肥供应可协同促进贵州金花茶地上和地下总生物量、株高和地径等形态指标的增长,并不同程度调控总酚、总黄酮等活性成分的含量。综合各项指标表现,建议在类似生态区推广种植贵州金花茶时,可采用水肥组合 W₂F₂[浇水量 800 mL/ind., N-P-K 施肥量 1.6-1.0-1.0 g/ind.]进行管理,该处理在促进植株整体生长的同时,亦有利于活性物质的积累,从而为金花茶的科学栽培提供技术参考,并为后续相关功能产品的开发提供优质原料支撑。

参考文献

- [1] WU F, LIU G H, XIE X, et al. Effects of future climate change on distribution pattern of *Camellia petelotii* [J]. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci), 2024, 39(3): 144-151. [吴帆, 刘国豪, 谢鑫, 等. 未来气候变化对金花茶分布格局的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(3): 144-151. doi: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202307020.]
- [2] LIU H, LIU Q, CHEN Y, et al. Full-length transcriptome sequencing provides insights into flavonoid biosynthesis in *Camellia nitidissima* petals [J]. Genes, 2023, 850: 146924. doi: 10.1016/j.gene.2022.146924.
- [3] ZHAO M, XIAN X Y, YAN M Q, et al. A new oleanane-type triterpenoid saponin with α -glucosidase inhibitory activity from *Camellia nitidissima* [J]. J Asian Nat Prod Res, 2023, 25(9): 890-898. doi: 10.1080/10286020.2022.2152012.
- [4] LI M H, DU H Z, KONG G J, et al. Nuclear magnetic resonance-based

- metabolomics approach to evaluate the prevention effect of *Camellia nitidissima* Chi on colitis-associated carcinogenesis [J]. *Front Pharmacol*, 2017, 8: 447. doi: 10.3389/fphar.2017.00447.
- [5] ZHANG H L, WU Q X, QIN X M. *Camellia nitidissima* Chi flower extract alleviates obesity and related complications and modulates gut microbiota composition in rats with high-fat-diet-induced obesity [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(12): 4378–4389. doi: 10.1002/jsfa.10471.
- [6] GONG W, TANG J, WEI Y Y, et al. Isolation, purification, structural characterization of polysaccharide from *Camellia nitidissima* Chi and its antioxidant activities *in vitro* [J]. *Food Mach*, 2021, 37(6): 184–190. [龚雯, 唐婕, 韦雅渊, 等. 金花茶多糖分离纯化、结构表征及其体外抗氧化性 [J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 184–190. doi: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.06.031.]
- [7] XU C R, ZHANG J C, LONG H Y, et al. Study on the flowering biological characteristics of *Camellia huana* [J]. *Guizhou For Sci Technol*, 2022, 50(3): 12–16. [徐超然, 张家才, 龙海燕, 等. 贵州金花茶开花生物学特性研究 [J]. *贵州林业科技*, 2022, 50(3): 12–16. doi: 10.16709/j.cnki.gzlykj.2022.03.012.]
- [8] ZHANG H, HAO C L, MENG F S, et al. Effects of different irrigation quota on yield and soil moisture of maize with drip irrigation under film mulch [J]. *Crops*, 2016(1): 105–109. [张昊, 郝春雷, 孟繁盛, 等. 膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米产量及土壤水分的影响 [J]. *作物杂志*, 2016(1): 105–109. doi: 10.16035/j.issn.1001-7283.2016.01.019.]
- [9] MU Y S, LIU W J, ZHANG G X. Effects of flooding stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of *Chionanthus retusus* seedlings from different provenances [J]. *J NE A&F Univ (Nat Sci)*, 2022, 50(7): 73–83. [穆寅生, 刘文静, 张鸽香. 淹水胁迫对不同种源流苏树幼苗光合与叶绿素荧光参数的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 73–83. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.07.009.]
- [10] FU X F, ZHU Y, HUANG J, et al. Effects of N, P and K fertilization treatments on the growth and nutrient contents in leaves of *Mangifera persiciformis* C. seedlings [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2019, 37(5): 629–635. [付晓凤, 朱原, 黄杰, 等. 氮磷钾配比施肥对扁桃幼苗生长及叶片养分含量的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(5): 629–635. doi: 10.16036/j.issn.1000-2650.2019.05.007.]
- [11] MA D C, YU Z G, WANG L H, et al. Effects of nitrogen-phosphorus-potassium ratio fertilization on physiology and biomass accumulation of *Erythralum scandens* Bl. [J]. *Plant Sci J*, 2022, 40(6): 839–852. [马道承, 余注光, 王凌晖, 等. 氮磷钾配比施肥对赤苍藤生理及生物量积累的影响 [J]. *植物科学学报*, 2022, 40(6): 839–852. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.60839.]
- [12] TIAN Q, JIAO J, ZHANG X J, et al. Physiological and biochemical mechanism of nitrogen promoting the growth and berberine accumulation of *Phellodendron chinense* schneid seedlings [J/OL]. *Mol Plant Sci*, [2023-04-12]. [田秋, 焦晶, 张学静, 等. 氮促进川黄檗幼苗生长和小檗碱积累的生理生化机理 [J/OL]. *分子植物育种*, [2023-04-12]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230412.1115.004.html>]
- [13] LI Y, QI Y, WANG X H, et al. Interactive effects of CO₂ and nitrogen application on water use efficiency [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2023, 41(1): 228–234. [李裕, 齐月, 王小恒, 等. 水限制环境 CO₂ 与施氮交互作用对春小麦水分利用效率的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(1): 228–234. doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2023.01.27.]
- [14] LI Y P, SU J, ZHOU F M, et al. Effect of drought and salt on germination and oxidation resistance protection in *Medicago polymorpha* [J]. *J Grassl Forage Sci*, 2019(3): 24–35. [李亚萍, 苏剑, 周发明, 等. 干旱和盐胁迫对金花菜种子萌发及幼苗抗氧化保护酶活性的影响 [J]. *草业科学*, 2019(3): 24–35. doi: 10.3969/j.issn.2096-3971.2019.03.005.]
- [15] LI Y M, SUN Y X, LIAO S Q, et al. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato [J]. *Agric Water Manage*, 2017, 186: 139–146. doi: 10.1016/j.agwat.2017.02.006.
- [16] ZHANG G X, YANG L F, HUANG G Y, et al. Effects of water and fertilizer coupling on vegetative growth of 1-year-old *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée & H. Lév.) L. K. Fu & Nan Li [J]. *Plant Sci J*, 2026, 44(2): 236–245. [张广欣, 杨兰芳, 黄桂云, 等. 水肥耦合对南方红豆杉营养生长的影响 [J]. *植物科学学报*, 2026, 44(2): 236–245. doi: 10.11913/psj.2095-0837.24246.]
- [17] ZHANG M Y, HUANG X L, ZHU L Q, et al. Effects of different fertilization proportions on growth of *Podocarpus macrophyllus* seedlings [J]. *Guangxi For Sci*, 2018, 47(3): 285–289. [张明月, 黄相玲, 朱栗琼, 等. 不同施肥配比对罗汉松幼苗生长的影响 [J]. *广西林业科学*, 2018, 47(3): 285–289. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2018.03.007.]
- [18] CHEN S C, WANG J, GUO F Q, et al. Effects of different water and nitrogen coupling on physiological indexes and yield of protein mulberry [J]. *J Agric Sci Technol*, 2025, 27(6): 240–249. [陈士超, 王举, 郭富强, 等. 不同水氮耦合对蛋白桑生理指标及产量的影响 [J]. *中国农业科技导报(中英文)*, 2025, 27(6): 240–249. doi: 10.13304/j.nykjdb.2024.0096.]
- [19] YANG H X, XU F, YANG X H, et al. Effects of different water and nutrient treatments on growth and biomass distribution of *Eucalyptus urophylla* clones [J]. *Bull Bot Res*, 2022, 42(4): 667–676. [杨会肖, 徐放, 杨晓慧, 等. 不同水肥处理对尾叶桉苗木生长及生物量分配的影响 [J]. *植物研究*, 2022, 42(4): 667–676. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2022.04.016.]
- [20] CHEN J, LIU L T, WANG Z B, et al. Nitrogen fertilization increases

- root growth and coordinates the root-shoot relationship in cotton [J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 880–893. doi: 10.3389/fpls.2020.00880.
- [21] LIU W G. Regulation of maize plant growth and water use by varying soil bulk density under different soil water conditions [D]. Xianyang: Northwest A&F University. [刘晚苟. 不同土壤水分条件下容重对玉米生长和水分利用的调控 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2001.]
- [22] WANG W D, XIN H H, WANG M L, et al. Transcriptomic analysis reveals the molecular mechanisms of drought-stress-induced decreases in *Camellia sinensis* leaf quality [J]. Front Plant Sci, 2016, 7: 385. doi: 10.3389/fpls.2016.00385.
- [23] SHOMALI A, DAS S, ARIF N, et al. Diverse physiological roles of flavonoids in plant environmental stress responses and tolerance [J]. Plants, 2022, 11(22): 3158. doi: 10.3390/plants11223158.
- [24] YIN M Y, YANG Y, TANG Y X, et al. Effects of formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Gardenia asminoides* seedlings [J]. J CS Univ For Technol, 2022, 42(5): 83–90. [尹梦雅, 杨艳, 汤玉喜. 配方施肥对黄栀子幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 83–90. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2022.05.009.]
- [25] ZHENG Z S, WANG C Y, NIU J Y, et al. Effects of irrigation and fertilization coupling on protein and amino acids contents in grains of winter wheat [J]. Chin J Eco-Agric, 2011, 19(4): 788–793. [郑志松, 王晨阳, 牛俊义, 等. 水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 788–793. doi: 10.3724/SP.J.1011.2011.00788.]
- [26] ZHANG L Y, WANG R L, ZHANG J S, et al. Effects of water and fertilizer coupling on nitrogen metabolism of cucumber under soilless culture in greenhouse [J]. Acta Hort Sin, 2011, 38(5): 893–902. [张丽莹, 王荣莲, 张俊生, 等. 水肥耦合对温室无土栽培黄瓜氮代谢的影响 [J]. 园艺学报, 2011, 38(5): 893–902. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2011.05.014.]
- [27] LIU Y, LI Y, ZHANG Q C, LI Y L. Water-fertilizer coupling impacts osmotic regulation substances in *Lonicera caeruleae* seedlings [J]. Pol J Environ Stud, 2022, 31(3): 2717–2728. doi: 10.15244/pjoes/145602.
- [28] ZULFIQAR F, ASHRAF M. Proline alleviates abiotic stress induced oxidative stress in plants [J]. J Plant Growth Regul, 2023, 42(8): 4629–4651. doi: 10.1007/s00344-022-10839-3.
- [29] WU F, ZHANG Y, XIE X, et al. Suggestions on introduction, breeding and development of *Camellia petelotii* in Guizhou Province [J]. Chin Wild Plant Res, 2023, 42(12): 90–95. [吴帆, 张月, 谢鑫, 等. 贵州省金花茶引种选育与发展建议 [J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(12): 90–95. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2023.12.016.]
- [30] ZHANG A M, LIU Y C, LI X L, et al. Coupling effect of water and fertilizer on phosphatase activities of alfalfa soil [J]. Ecol J, 2016, 35(11): 2896–2902. [张艾明, 刘云超, 李晓兰, 等. 水肥耦合对紫花苜蓿土壤磷酸酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2896–2902. doi: 10.13292/j.1000-4890.201611.034.]
- [31] SAFAEI CHAEIKAR S, MARZVAN S, JAHANGIRZADEH KHAIVI S, et al. Changes in growth, biochemical, and chemical characteristics and alteration of the antioxidant defense system in the leaves of tea clones (*Camellia sinensis* L.) under drought stress [J]. Sci Hort, 2020, 265: 109257. doi: 10.1016/j.scienta.2020.109257.
- [32] QU Z M, CHEN Q, YIN S H, et al. Effects of drip irrigation coupled with controlled release potassium fertilizer on maize growth and soil properties [J]. Agric Water Manage, 2024, 301: 108948. doi: 10.1016/j.agwat.2024.108948.
- [33] YU J, HU M M, XU S C, et al. Unraveling the differential responses of *Camellia reticulata* to drought, cold, and combined stress through physiological characteristics and lipid metabolism [J]. Ind Crops Prod, 2025, 234: 121618. doi: 10.1016/j.indcrop.2025.121618.