



舒钰,高天宏.茶条槭秋季叶色变化相关生理性指标的研究[J].黑龙江农业科学,2025(4):68-72.

茶条槭秋季叶色变化相关生理性指标的研究

舒钰^{1,2},高天宏²

(1.黑龙江开放大学 继续教育学院,黑龙江 哈尔滨 150040; 2.黑龙江省林业科学研究所,黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要:为了探究茶条槭秋季叶色变化的机理,对茶条槭在不同叶色时期的多项生理指标进行了系统研究,包括色素种类与含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、游离脯氨酸(Pro)含量及丙二醛(MDA)含量。结果表明,茶条槭叶色变化主要由花青素的大量积累引发,总花青素含量在叶色变化过程中显著增加,红色叶片的花青素含量是绿色叶片的4.31倍。随着叶色由绿转红,可溶性糖含量从2.54%增加至8.96%,可溶性蛋白含量从0.25 mg·g⁻¹增加至0.35 mg·g⁻¹。绿色叶片时期的POD、SOD和CAT活性分别为45.52, 1985.21和153.28 U·g⁻¹;半红色叶片时期,这些酶活性显著提高,分别达到228.51, 7854.58和254.47 U·g⁻¹;而在红色叶片时期,酶活性又有所下降,分别为105.86, 514.25和78.52 U·g⁻¹。因此,建议在茶条槭的推广应用中,注重通过调控环境因素如光照、温度和土壤养分等,优化其生长条件,适当调节糖等营养元素的供应,增强茶条槭的叶色表现和抗逆性。

关键词:茶条槭;叶色变化;花青素;生理指标

茶条槭(*Acer ginnala*)属于槭树科槭属,其叶片清秀,树干挺直,花香气扑鼻,整体树形优美。秋季时,茶条槭叶色鲜红艳丽,其成熟前的翅果也呈现出迷人的红色,极具观赏性^[1]。茶条槭具有较强的可塑性,易于修剪整形,适合作为绿地观赏树种、行道树、绿篱或整形树使用,还可用于园林护坡绿化或片植成林。叶色是观赏植物的重要评价指标,是外界环境以及遗传作用的共同结果。大部分彩叶树叶片颜色会随着生长的不同阶段进行变化。叶片中的色素含量、种类,决定了叶片的颜色。同时叶色发生变化的过程,叶片的生理指标也在发生变化。通过对叶片中色素含量的测定,以及多种酶活性的测定,有助于充分了解彩叶植物叶色变化的机制。然而,对于茶条槭秋季叶色的变化研究目前仍处于初步阶段,特别叶色变化过程中的生理指标鲜有报道。故本研究以茶条槭为材料,测定其秋季叶色变化过程中的生理指标,包括色素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、游离脯氨酸含量(Pro)、丙二醛(MDA)含量等。综合分析不同叶色时期的生理指标,探索茶条槭叶色变化的生理机制,特别是花青素的积累与其他生理指标之间的关系,为理解植物色彩变化提供了新的

视角,进一步为彩叶植物的着色机理研究及茶条槭的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

材料选自于黑龙江省林业科学研究所,巴彦县茶条槭良种繁育中心,选择6株生长健壮、无虫害的茶条槭。分别在2022年7月15日、9月17日和10月8日9:00(均为晴朗天气)采集植株中部位当年生枝条的绿色叶片、半红色叶片以及红色叶片。每株茶条槭采集各颜色的叶片4片,放置50 mL离心管封闭,标记后,用液氮速冻后放置-80℃冰箱保存。

1.2 方法

可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、游离脯氨酸(Pro)含量参照王燕龙^[2]的方法。丙二醛(MDA)含量参照李合生^[3]的方法。色素含量的测定参照孙安然^[4]的方法。采Excel 2019和SPSS 20.0软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 茶条槭不同叶色时期色素含量

由图1可知,随着叶色从绿色逐渐变成红色,茶条槭叶片中的叶绿素含量呈现逐渐减低的趋

收稿日期:2024-08-01

基金项目:黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(YB2023-02)。

第一作者:舒钰(1982—),女,博士,副研究员,从事园林植物研究。E-mail:370194057@qq.com。

势,并且在不同叶色阶段之间差异显著。类胡萝卜素的含量也呈现逐渐减低的趋势,尤其是从绿色阶段到半红叶阶段的差异显著,而从半红叶到红叶的阶段差异则不显著。绿色叶片花青素含量为 $22.16\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,半红色叶片为 $35.212\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,红色叶片为 $95.582\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总花青素的含量在叶色变化过程中显著增加,红色叶片的花青素含量是绿色叶片的4.31倍。红色叶片叶绿素含量为 $0.355\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,半红色叶片为 $0.613\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,绿色叶片为 $1.822\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。红色叶片、半红色叶片和绿色叶片的类胡萝卜素含量分别为0.045,0.185和 $0.064\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。表明,茶条槭叶色的变化主要由叶绿素和类胡萝卜素的逐渐降低和花青素的逐渐增加所引起。花青素在茶条槭红色叶片中是主要的色素物质。

2.2 茶条槭不同叶色时期生理指标

由表1可知,茶条槭叶片在叶色从绿色到红色的过程中,可溶性糖含量显著增加,分别为2.54%、5.27%和8.96%。进一步证明,可溶性糖不仅是花青素合成的前体,还在植物体内扮演着重要的信号传递角色^[5-6]。此外,茶条槭叶片的可溶性蛋白含量在叶色变化过程中也表现出持续升高的趋势,绿色叶片、半红色叶片和红色叶片的含量分别为0.25,0.32和 $0.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,但半红色到红色的变化期间可溶性蛋白含量的增加并不显著。可溶性蛋白被认为是植物体内重要的渗透调节物质^[7],其增加有助于提高植物对不良环境的适应能力^[8]。游离脯氨酸在茶条槭叶片变红过程中显著增加,绿色叶片为 $72.54\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,半红色叶片上升到 $217.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,红色叶片达到 $647.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,是绿色叶片时期的8.92倍。丙二醛含量则呈现出先显著升高后显著降低的趋势,绿色叶片为 $22.54\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,半红色叶片上升到 $168.35\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,红色叶片下降至 $86.15\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

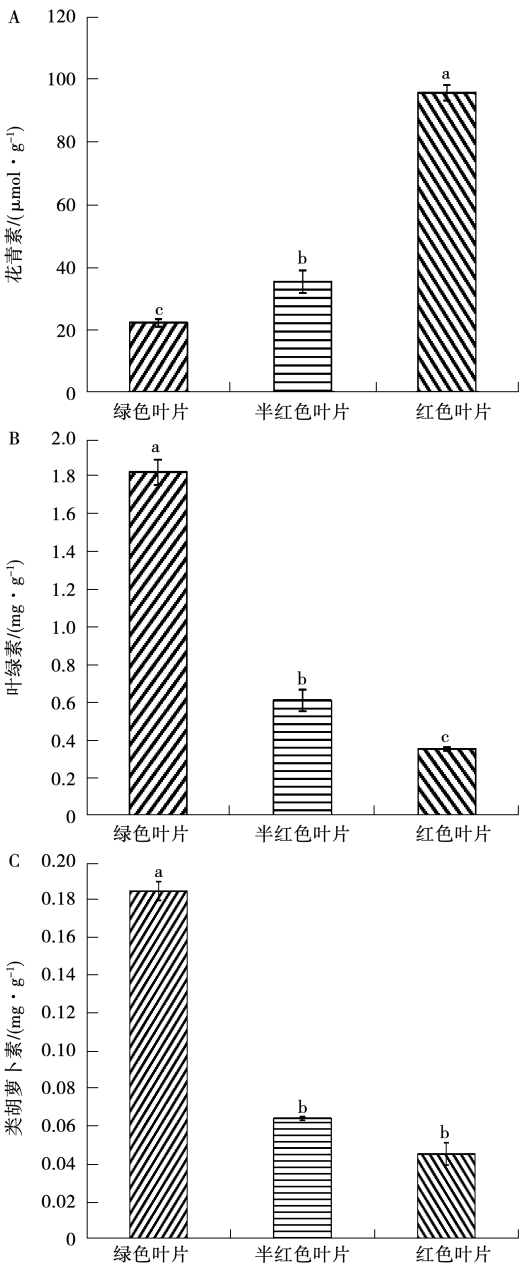


图1 茶条槭不同叶色色素含量

表1 茶条槭不同叶色时期生理指标

叶色时期	可溶性糖含量/%	可溶性蛋白含量/(mg·g ⁻¹)	Pro/(μg·L ⁻¹)	MDA/(μmol·g ⁻¹)
绿色	2.54±0.016 a	0.25±0.005 a	72.54±5.247 a	22.54±1.246 a
半红色	5.27±0.052 b	0.32±0.002 b	217.58±24.171 b	168.35±18.991 c
红色	8.96±0.984 c	0.35±0.004 b	647.24±54.955 c	86.15±11.058 b

注:不同小写字母表示不同叶色时期间存在显著差异(P<0.05)。

由表2可知,茶条槭在3个不同叶色时期叶片中过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性,整体呈现显著差异,具体表现为先升高后降低的趋势,峰值

出现在半红色叶片时期。绿色叶片时期的POD、SOD和CAT活性分别为45.52,1985.21和 $153.28\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$;半红色叶片时期的POD活性分别为228.51,7854.58和 $254.47\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$;红色叶片

时期的 POD、SOD 和 CAT 活性为 105.86,514.25 和 78.52 U·g⁻¹。这些结果表明,在叶片颜色变化的过程中,茶条槭叶片的抗氧化酶活性发生了显著变化,这可能是植物对外界环境变化的一种适应性响应。

表 2 茶条槭不同叶色时期酶活性

叶色时期	单位:U·g ⁻¹		
	POD	SOD	CAT
绿色	45.52±0.005 a	1985.21±0.016 b	153.28±0.016 b
半红色	228.51±0.002 c	7854.58±0.052 c	254.47±0.052 c
红色	105.86±0.004 b	514.25±0.004 a	78.52±0.004 a

注:不同小写字母表示不同叶色时期在 P<0.05 水平存在显著差异。

表 3 茶条槭不同叶色时期生理指标相关性分析

项目	叶绿素	类胡萝卜素	可溶性糖	可溶性蛋白	花青素	CAT	SOD	MDA	Pro
类胡萝卜素	0.936**	1							
可溶性糖	-0.875**	-0.904**	1						
可溶性蛋白	0.124	0.168	0.054	1					
花青素	0.478	-0.257	0.722*	0.598	1				
CAT	0.216	0.296	-0.208	0.077	-0.354	1			
SOD	0.924**	0.957**	-0.834**	0.278	-0.578	0.305	1		
MDA	0.889**	0.941**	-0.658*	0.506	-0.213	0.114	0.887**	1	
Pro	-0.687*	-0.706**	0.897**	0.224	0.927**	-0.198	-0.741*	-0.409	1
POD	0.947**	0.933**	-0.751*	0.011	-0.776*	0.214	0.954**	0.745*	-0.886**

注:**表示在 P≤0.01 水平差异极显著;*表示在 P≤0.05 水平差异显著。

3 讨论

叶片中色素的含量、种类是影响叶色的主要因素^[9],叶色中的主要呈色物质是花青素、类胡萝卜素、叶绿素^[10]。通过对不同叶色时期茶条槭色素含量的研究发现,茶条槭秋季红色主要的呈色物质是花青素,叶色由红变绿的过程中,叶绿素含量显著减少,花青素含量显著增加,类胡萝卜素含量也有减少但不显著。类似的色素变化现象也在其他槭树种类如岭南槭(*Acer tutcheri*)^[11]和鸡爪槭(*Acer palmatum*)^[12]的秋季叶色变化中观察到。当叶片中叶绿素含量较高,类胡萝卜素和花青素含量较低时,叶片呈现绿色^[2]。随着叶绿素的不断降解,花青素的大量合成,叶片的颜色由绿色慢慢变成红色,到红色时期,花青素的含量达到最高值。欧洲卫矛(*Euonymus europaeus*)^[13]和火炬树(*Rhus typhina*)^[14]的研究也表明,植物叶片由绿色变成红色,是由于花青素含量显著提高,而叶绿素含量显著降低的原因。

相关研究指出,糖对花青素的合成和代谢有

2.3 茶条槭不同叶色时期生理指标相关性分析

由表 3 可知,花青素的含量与 Pro 呈极显著正相关,相关系数高达 0.927,与 POD 呈显著负相关,相关系数为-0.776;叶绿素的含量与类胡萝卜素、SOD、MDA、POD 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.936,0.924,0.889 和 0.947。叶绿素与可溶性糖含量和游离脯氨酸分别呈极显著和显著负相关,相关系数分别为-0.875 和-0.687。类胡萝卜素也与 SOD、MDA、POD 呈极显著正相关,与可溶性糖含量和游离脯氨酸呈极显著负相关,相关系数分别为 0.957,0.941,0.933,-0.904 和-0.706。

重要影响,其作用可能与糖的磷酸化状态密切相关。那些能够被磷酸化的糖分子显著促进花青素的积累,而不能被磷酸化的糖则不具备诱导花青素积累的能力^[15]。花青素的合成需要糖作为前体,可溶性糖作为调节物质还参与了细胞内的信号传导^[16]等多种生理过程。茶条槭叶色变化过程中,可溶性糖的重要作用不容忽视。本研究观察到,在茶条槭叶片由绿色到红色的转色过程中,可溶性糖含量显著增加,与叶色的变化趋势一致。这一发现与北美红枫的类似研究结果相符^[17]。

此外,渗透调节是植物在逆境条件下的重要应对机制,通过调节细胞的渗透压来维持细胞稳定^[18]。在逆境条件下,植物会增加脯氨酸的含量,从而保护细胞膜系统和酶的结构,减缓蛋白质的降解速率^[19]。茶条槭在叶片转色过程中,不仅可溶性糖含量增加,而且可溶性蛋白和游离脯氨酸的含量也显著上升。特别是,游离脯氨酸与花青素含量呈正相关,这表明茶条槭叶色的变化是通过积累渗透物质来响应外界的某种胁迫。

在植物细胞衰老期间,过氧化物酶活性的增

加已被证明是抗氧化防御系统的一部分^[20]。在菊花的花瓣中,随着花瓣衰老时间的推移,过氧化物酶活性逐渐增加。这种增加伴随着其他抗氧化酶的增加,表明植物通过协调防御机制来控制延迟衰老。在萱草中,即使在花朵开放前过氧化物酶就开始升高,随萱草花瓣的衰老而降低^[21]。

在茶条槭叶片转色期间,环境温度逐渐下降。这种低温条件触发了植物防御系统中酶类的活性变化,包括过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)。这些酶的活性变化趋势与银杏(*Ginkgo biloba*)叶片在秋季变化的生理指标相似^[22],显示出茶条槭对外界环境变化的响应机制可能具有普遍性和保守性。而研究发现酶活性和其他生理指标大部分都有相关性。

低温对不同植物的花青素合成有着显著促进作用^[23]。例如,牡丹的花青素合成相关基因在低温条件下得到增强^[24]。柑橘在低温环境下,诸如PAL、CHS和DFR等基因显著上调,进而导致果肉中花青素增加^[25]。苹果在低温条件下,果皮中*MdMYBA*转录因子显著上调,从而促进花青素的积累^[26]。此外,*MdMYB73*在植物耐寒性中的调控作用被证实,过表达*MdMYB23*同样可增加拟南芥和转基因苹果中的花青素含量,并增强其耐寒性^[27]。高温环境则抑制了植物花青素的合成过程。拟南芥中,高温抑制了*TT8*、*TTG1*及*EGL3*转录因子的表达,从而导致花青素的合成减少^[28]。对紫菀的研究显示,高温条件下PAL和CHI酶的活性显著降低,影响了花青素的合成^[29]。温度通过影响转录因子的表达以及相关酶的活性,显著影响植物花青素的生物合成和积累。此外,建议进一步研究茶条槭在不同环境条件下的生理反应,以推动其在生态恢复、护坡绿化以及其他生态工程中的广泛应用,实现其生态和景观价值的双重提升。

4 结论

本研究表明,在茶条槭叶色由绿色转变为红色的变化过程中,叶绿素含量逐渐减少,而花青素含量显著增加。与绿色叶片相比,红色叶片的可溶性糖含量显著增加。可溶性蛋白含量和游离脯氨酸含量显著升高,这表明叶色变化可能是茶条槭响应某种胁迫的反应。基于以上发现,建议在利用茶条槭进行城市绿化、道路景观设计和园林美化时,注重通过调控环境因素如光照、温度和土壤养分等,优化其生长条件,通过合理的栽培管理

措施,适当调节糖等营养元素的供应,增强茶条槭的叶色表现和抗逆性。

参考文献:

- [1] 舒钰,崔岩.寒地野生茶条槭扦插技术研究[J].黑龙江农业科学,2023(10):47-51.
- [2] 王燕龙,车晓雨,李彦慧,等.狭叶白蜡秋季叶片呈色生理变化研究[J].河北农业大学学报,2023,46(4):55-64.
- [3] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:199-200.
- [4] 孙安然.三花槭秋季叶色变化生理及分子机制研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2023.
- [5] ZHU H, ZHANG T J, ZHANG P, et al. Pigment patterns and photoprotection of anthocyanins in the young leaves of four dominant subtropical forest tree species in two successional stages under contrasting light conditions[J]. Tree Physiology, 2016, 36(9): 1092-1104.
- [6] 梁玲,江洁蓓,张腾驹,等.不同色彩珙桐苞片与叶片的生理特性研究[J].植物研究,2020,40(4):505-513.
- [7] ZHAO M H, LI X, ZHANG X X, et al. Mutation mechanism of leaf color in plants: a review[J]. Forests, 2020, 11(8): 851.
- [8] 舒钰,刘晓东.PEG模拟干旱胁迫下磷肥对2种草坪草苗期抗旱性的影响[J].东北林业大学学报,2010,38(12):43-45.
- [9] ZHANG Q, WANG L L, LIU Z G, et al. Transcriptome and metabolome profiling unveil the mechanisms of *Ziziphus jujuba* Mill. peel coloration[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 125903.
- [10] YAO Z, WEISHENG W, YING S, et al. Integrated transcriptome and metabolome analysis reveals anthocyanin biosynthesis mechanisms in pepper (*Capsicum annuum* L.) leaves under continuous blue light irradiation[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1):210-210.
- [11] XIE Y T, PEI N C, HAO Z Z, et al. Juvenile leaf color changes and physiological characteristics of *Acer tutcheri* (Aceraceae) during the spring season[J]. Forests, 2023, 14(2): 328.
- [12] 黄可,王小德,柳翼飞,等.红枫春季叶色变化与色素含量的相关性[J].浙江农林大学学报,2012,29(5):734-738.
- [13] 卓启苗,丁彦芬,余慧,等.欧洲卫矛秋冬转色期叶色变化的生理机制[J].西北植物学报,2018,38(6):1072-1079.
- [14] 楚爱香,张要战,田永芳.几种秋色叶树种秋冬转色期叶色变化的生理特性[J].东北林业大学学报,2012,40(11):40-43.
- [15] ZHENG Y J, TIAN L, LIU H T, et al. Sugars induce anthocyanin accumulation and flavanone 3-hydroxylase expression in grape berries[J]. Plant Growth Regulation, 2009, 58(3): 251-260.
- [16] BOLOURI-MOGHADDAM M R, LE ROY K, XIANG L, et al. Sugar signalling and antioxidant network connections in plant cells[J]. The FEBS Journal, 2010, 277(9): 2022-2037.
- [17] 李力.北美红枫呈色生理机制及叶色调控[D].重庆:西南大学,2016.
- [18] LI H L, YU K D, AMOO O, et al. Site-directed mutagenesis

- of the carotenoid isomerase gene *BnaCRTISO* alters the color of petals and leaves in *Brassica napus* L. [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 801456.
- [19] YANG J, WANG X R, ZHAO Y. Leaf color attributes of urban colored-leaf plants[J]. *Open Geosciences*, 2022, 14(1): 1591-1605.
- [20] SI F F, WANG X, DU X X, et al. Transcriptome sequencing and screening of anthocyanin-related genes in the leaves of *Acer truncatum bunge* [J]. *Biochemical Genetics*, 2022, 60(6): 1845-1864.
- [21] WANG M, CHEN L, LIANG Z J, et al. Metabolome and transcriptome analyses reveal chlorophyll and anthocyanin metabolism pathway associated with cucumber fruit skin color[J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 386.
- [22] 魏晓东,陈国祥,徐艳丽,等. 银杏叶片衰老过程中光合生理特性及叶绿体超微结构的变化[J]. *植物研究*, 2008, 28(4): 433-437.
- [23] 王凤华,郭佳,吴正景,等. 植物花青素合成的环境调控研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2024, 43(2): 78-83.
- [24] 牡丹妮,张超,高树林,等. 低温对牡丹切花花色和花青素苷合成的影响[J]. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(2): 295-302.
- [25] LO PIERO A R, PUGLISI I, RAPISARDA P, et al. Anthocyanins accumulation and related gene expression in red orange fruit induced by low temperature storage[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(23): 9083-9088.
- [26] BAN Y, HONDA C, HATSUYAMA Y, et al. Isolation and functional analysis of a MYB transcription factor gene that is a key regulator for the development of red coloration in apple skin[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2007, 48(7): 958-970.
- [27] AN J P, LI R, QU F J, et al. R2R3-MYB transcription factor MdMYB23 is involved in the cold tolerance and proanthocyanidin accumulation in apple[J]. *Plant Journal*, 2018, 96(3): 562-577.
- [28] ROWAN D D, CAO M S, KUI L W, et al. Environmental regulation of leaf colour in red 35S; PAP1 *Arabidopsis thaliana* [J]. *New Phytologist*, 2009, 182(1): 102-115.
- [29] SHAKED-SACHRAY L, WEISS D, REUVENI M, et al. Increased anthocyanin accumulation in *Aster* flowers at elevated temperatures due to magnesium treatment [J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 114(4): 559-565.

Study on Physiological Indicators Related to Leaf Color Changes of *Acer tataricum* subsp. *ginnala* in Autumn

SHU Yu^{1,2}, GAO Tianhong²

(1. School of Continuing Education, Heilongjiang Open University, Harbin 150040, China; 2. Heilongjiang Forestry Science Research Institute, Harbin 150081, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism behind the autumn leaf color change in *Acer tataricum* subsp. *ginnala*, this study systematically examined various physiological indices at different leaf color stages, including pigment types and contents, soluble sugar content, soluble protein content, peroxidase (POD) activity, superoxide dismutase (SOD) activity, catalase (CAT) activity, free proline content (Pro), and malondialdehyde (MDA) content. The results indicated that the leaf color change in *Acer ginnala* was primarily driven by the significant accumulation of anthocyanins, with the total anthocyanin content increasing substantially during the color change process. The anthocyanin content in red leaves was 4.31 times higher than in green leaves. As the leaf color changed from green to red, the soluble sugar content increased from 2.54% to 8.96%, and the soluble protein content rose from 0.25 mg·g⁻¹ to 0.35 mg·g⁻¹. During the green leaf stage, the activities of POD, SOD, and CAT were 45.52, 1 985.21, and 153.28 U·g⁻¹, respectively. In the semi-red leaf stage, these enzyme activities increased significantly to 228.51, 7 854.58, and 254.47 U·g⁻¹, respectively. However, in the red leaf stage, enzyme activities decreased to 105.86, 514.25, and 78.52 U·g⁻¹, respectively. This change is considered a response strategy of the plant to external stress, likely related to temperature variations. Therefore, it is recommended that in the promotion and application of *A. tataricum* subsp. *ginnala*, emphasis should be placed on optimizing its growth conditions by regulating environmental factors such as light, temperature, and soil nutrients, while appropriately adjusting the supply of nutrients like sugars, to enhance the leaf color performance and stress resistance of *A. tataricum* subsp. *ginnala*.

Keywords: *Acer tataricum* subsp. *ginnala*; leaf color change; anthocyanin; physiological indicators