

引用格式: 刘晟, 段晓暄, 阚鹭梅, 等. 施氮对美国红枫生长及叶片呈色的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(5): 1068–1077. LIU Sheng, DUAN Xiaoxuan, KAN Lumei, *et al.* Effects of nitrogen application on growth and leaf coloration of *Acer rubrum*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(5): 1068–1077.

施氮对美国红枫生长及叶片呈色的影响

刘 晟¹, 段晓暄¹, 阚鹭梅¹, 陈柯羽¹, 卢 彪^{1,2}, 刘 芸¹

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市荣昌区岚峰林场, 重庆 402460)

摘要: 【目的】西南低海拔地区秋季高温影响美国红枫 *Acer rubrum* 叶片呈色, 本研究基于氮素对植物衰老进程的延缓作用, 解析外源施氮对美国红枫生长和叶片呈色的影响。【方法】以美国红枫 ‘红冠’ *Acer rubrum* ‘Red Crown’ 为研究对象, 设置施用尿素梯度处理: ck(0 g·株⁻¹)、T1(50 g·株⁻¹)、T2(100 g·株⁻¹)、T3(150 g·株⁻¹)、T4(200 g·株⁻¹), 比较不同处理植株的生长指标、叶片形态指标、叶色指标和可溶性糖、叶色参数和彩度 (C^*), 同时将叶色转色期划分为 I~VI 等 6 个时期并记录最佳观赏期。【结果】T3、T4 的累计株高增长量和累计地径增长量显著大于 ck($P<0.05$); T4 的叶面积在 7、9 和 10 月显著高于 ck($P<0.05$), 比叶面积随施氮量增加而递减。在转色前期 (I), T4 总叶绿素和类胡萝卜素显著高于 ck($P<0.05$); 进入转色期 (II~VI), T4 的最大可溶性糖和花青苷含量均显著大于 ck($P<0.05$)。ck 的总叶绿素和类胡萝卜素质量分数在 II 期已经开始快速下降, 而 T4 的总叶绿素和类胡萝卜素质量分数在 II 和 III 期仍保持较高水平, 在 IV 期才开始下降。各处理的花青苷含量和可溶性糖质量分数的上升趋势存在显著差异: ck 的可溶性糖质量分数、花青苷含量和红绿色度 (a^*) 从 II 期开始显著增加 ($P<0.05$), 在 IV 期达到最大值; 而 T4 的可溶性糖、花青苷、叶色参数 a^* 在 IV 期才显著上升 ($P<0.05$), 较 ck 延迟了 20 d, 在 VI 期时, T4 的花青苷含量和 a^* 才达到最大值。叶绿素相对含量 (SPAD 值) 动态监测显示: ck 的 SPAD 值始终处于最低水平, 下降时间最早, 叶片最早开始转色; 相比之下, T4 的 SPAD 值最大, 叶片开始转色时间最晚, 其中 T4 的叶片转色时间较 ck 推迟 20 d, 最佳观赏时间较 ck 延长了 13 d。相关性分析表明: 累计株高增长量与累计地径增长量、叶面积呈正相关; 叶面积与总叶绿素、类胡萝卜素呈正相关, 与 a^* 、明度 (L^*) 呈负相关; 花色苷含量与 a^* 呈显著正相关 ($P<0.1$), 与叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素呈显著负相关 ($P<0.05$)。【结论】在西南低海拔地区秋季较高的气温条件下, 施氮能显著促进美国红枫生长, 增加叶片叶绿素质量分数, 延缓叶片衰老并推迟叶片转色时间。施加尿素为 150~200 g·株⁻¹ 时, 能延迟美国红枫叶片衰老, 并使其与低温相遇, 促进叶片花青素合成, 显著提高了美国红枫的叶色质量并延长了最佳观赏期。图 7 表 2 参 41

关键词: 美国红枫; 花青素; 衰老; 转色; 最佳观赏期

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2025)05-1068-10

Effects of nitrogen application on growth and leaf coloration of *Acer rubrum*

LIU Sheng¹, DUAN Xiaoxuan¹, KAN Lumei¹, CHEN Keyu¹, LU Biao^{1,2}, LIU Yun¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Lanfeng Forest Farm, Rongchang District, Chongqing 402460, China)

Abstract: [Objective] In the low-altitude regions of Southwest China, high autumn temperatures affect the leaf coloration of *Acer rubrum* (red maple). Based on the retarding effect of nitrogen on plant senescence, this study investigates the impact of nitrogen application on the growth and leaf coloration of *A. rubrum*. [Method] Using the cultivar *A. rubrum* ‘Red Crown’ as the test subject, urea was applied at different gradient treatments: ck (0 g·plant⁻¹), T1 (50 g·plant⁻¹), T2 (100 g·plant⁻¹), T3 (150 g·plant⁻¹), and T4 (200 g·plant⁻¹). Growth

收稿日期: 2025-08-12; 修回日期: 2025-10-03

基金项目: 重庆市林业局重大专项 (ZD 2022-3)

作者简介: 刘晟 (ORCID: 0009-0002-4278-159X), 从事经济林培育研究。E-mail: lius201520@163.com。通信作者: 刘芸 (ORCID: 0000-0002-6808-1295), 教授, 博士, 从事生态学、植物生理学研究。E-mail: utrecht@swu.edu.cn

indicators, leaf morphological traits, leaf color parameters, soluble sugar (SS) content, leaf color Lab values, and chroma (C^*) were measured. The leaf color transition period was divided into 6 stages (I–VI), and the optimal viewing period was recorded. [Result] The cumulative plant height growth (H) and ground diameter growth (GD) in T3 and T4 were significantly greater than those in ck ($P < 0.05$). The leaf area (LA) of T4 in July, September, and October was significantly higher than that of ck ($P < 0.05$). In the early color transition stage (I), the total chlorophyll (Chl) and carotenoid (Car) content in T4 were significantly higher than those in ck ($P < 0.05$). During the color transition period (II–VI), the maximum soluble sugar (SS) and anthocyanin (Ant) content in T4 were significantly higher than those in ck ($P < 0.05$). Chl and Car in ck began to decline rapidly in stage II, whereas those in T4 remained high in stages II and III and only started to decrease in stage IV. Significant differences were observed in the upward trends of Ant and SS among the treatment groups: SS, Ant, and the red-green chromaticity (a^*) in ck increased significantly from stage II, peaking in stage IV, whereas those in T4 only rose significantly in stage IV—20 days later than ck. By stage VI, Ant and a^* in T4 reached their maximum values. Dynamic monitoring of the relative chlorophyll content (SPAD) showed that ck had the lowest SPAD, with the earliest decline and leaf color transition. In contrast, T4 exhibited the highest SPAD, with the latest leaf color transition. The leaf color transition in T4 was delayed by 20 days compared to ck, and the optimal viewing period was extended by 13 days. Correlation analysis indicated that H was positively correlated with GD and LA, while LA was positively correlated with Chl and Car but negatively correlated with a^* and L^* ($P < 0.1$). Anthocyanin content was significantly positively correlated with a but negatively correlated with chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), and Car ($P < 0.05$). [Conclusion] Under the high autumn temperatures in low-altitude regions of Southwest China, nitrogen application significantly promotes the growth of *A. rubrum*, increases chlorophyll content, delays leaf senescence, and postpones leaf color transition. When urea is applied at $150\text{--}200\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$, leaf senescence is delayed, and exposure to low temperatures enhances anthocyanin synthesis, significantly improving leaf color quality and extending the optimal viewing period of *A. rubrum*. [Ch, 7 fig. 2 tab. 41 ref.]

Key words: *Acer rubrum*; anthocyanins; senescence; change color; best viewing period

美国红枫 *Acer rubrum* 为无患子科 Sapindaceae 槭树属 *Acer* 高大落叶乔木, 秋季叶片呈现艳丽的红色, 具有很高的观赏价值, 在中国多地都有引种栽培^[1-3]。美国红枫叶色主要与细胞色素含量和比例有关。色素主要包含叶绿素、类胡萝卜素及类黄酮三大类^[4], 其中类黄酮中的花青素是叶片变红变紫的关键色素^[5], 其合成途径是通过苯丙氨酸解氨酶等一系列酶促反应将苯丙氨酸转化为花青素^[6]; 该合成过程受到基因调控和外界环境因子的共同影响^[4, 7], 其中低温条件和光照是影响花青素合成的重要因子, 秋季低温天气能促进花青素合成, 使叶色更红艳^[8-9]。相反, 秋季气温过高, 花青素合成代谢缺少低温刺激, 合成量降低, 叶片还未完全转色就已提早落叶, 影响观赏价值^[10-11]。西南低海拔地区秋季气温普遍较高, 重庆 10 月平均气温仍保持在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。吴琰琰等^[8]研究表明: 气温过高会抑制美国红枫叶片转色过程中花青素合成和营养物质吸收再利用, 导致引种的美国红枫叶片不红、提早落叶等问题。

氮素是影响植物生长和衰老的重要因素, 较低的氮水平会加速衰老基因的表达, 而适当施氮能增加穗叶的氮浓度, 延缓叶片衰老^[12]。同时, 氮素是影响花青素合成代谢的关键元素之一, 低氮环境会刺激黄酮类合成途径基因的表达, 提高花青素积累^[13], 而高氮不仅不会促进花青素积累, 反而还会抑制花青素的合成^[14-16]。本研究利用氮素对植物衰老的调控作用——持续满足植物对氮的需求能减缓植物衰老, 适量增加氮能延长绿叶的维持时间^[17-18], 通过施氮延长美国红枫营养生长期, 延缓衰老, 推迟其秋季叶片转色时间, 使其转色期与低温相遇, 以期提高美国红枫的叶色质量, 并延长观赏期, 为西南低海拔地区美国红枫科学种植提供参考。

1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区歇马镇西南大学实验农场, 该地属于典型的亚热带湿润季风气候, 雨量充沛, 海拔为 198 m, 2024 年平均气温为 20.1 ℃, 9 月最高气温为 43.6 ℃, 1 月最低气温为 1.2 ℃, 年均日照时数为 1 299 h, 总降水量为 465.2 mm, 土壤类型为紫色土。土壤理化性质为: pH 6.6, 有机质 9.73 g·kg⁻¹, 全氮 0.78 g·kg⁻¹, 全磷 0.47 g·kg⁻¹, 全钾 12.05 g·kg⁻¹, 铵态氮 0.61 mg·kg⁻¹, 硝态氮 4.72 mg·kg⁻¹, 速效磷 27.79 mg·kg⁻¹, 速效钾 12.05 mg·kg⁻¹, 田间最大持水量 24.54%。

2 材料与方法

2.1 方法

采用田间试验, 于 2024 年 1 月在歇马试验田统一除草整地, 在 2024 年 2 月初选取健康、长势基本一致(高 140~160 cm、地径 15~17 mm)、无病虫害的 2 年生轻基质苗美国红枫栽种品种‘红冠’*A. rubrum* ‘Red Crown’, 划分出 5 m×20 m 的共 5 个小区, 每个小区之间至少间隔 1 m, 以株行距 2.5 m 随机栽植, 移栽时在底部施加 2 kg 有机肥(重庆三峡建设集团忠县柑桔有限公司的柑橘皮渣有机肥)作为基肥, 移栽后缓苗 1 个月。

采用单因素试验(表 1), 肥料为尿素(总氮质量分数为 46.40%)、过磷酸钙(P₂O₅ 质量分数为 12%)、硫酸钾(K₂O 质量分数为 20%)。磷肥(P)和钾肥(K)均按全年施用量 10 g·株⁻¹进行施肥。通过盆栽预试验发现施氮量超过 200 g·株⁻¹会抑制美国红枫生长, 因此, 氮肥按尿素施用量设置 5 个水平, 即 ck(0 g·株⁻¹)、T1(50 g·株⁻¹)、T2(100 g·株⁻¹)、T3(150 g·株⁻¹)、T4(200 g·株⁻¹)。每处理 12 株, 共

表 1 氮磷钾肥施用方案

Table 1 Fertilizer (N, P, K) application program			
处理	尿素/(g·株 ⁻¹)	磷/(g·株 ⁻¹)	钾/(g·株 ⁻¹)
ck	0	10	10
T1	50	10	10
T2	100	10	10
T3	150	10	10
T4	200	10	10

60 株。于 2024 年 3 月开始处理, 施肥以少施多次的原则, 根据美国红枫的生长规律, 3—9 月施用量占比, 尿素分别为 10%、10%、20%、20%、30%、10%、0%; 磷肥和钾肥均分别为 0%、0%、20%、20%、20%、30%、0%。施肥方式采用环施法。2024 年 4 月初开始按美国红枫生长规律测其生长指标和叶片性状指标; 自 9 月开始观察记录叶片转色时间(即叶片开始转色至转色结束), 并测量 SPAD (soil and plant analyzer development) 值。从 ck 叶片开始转色至 T3、T4 叶片转色结束, 划分 I~VI 共 6 个阶段, 其中 I~IV 阶段分别代表 ck 的转色前期、转色初期、转色中期和转色末期, I 阶段叶片转色数量小于 5%(转色前期)、II 阶段叶片转色数量为 5%~30%(转色初期)、III 阶段叶片转色数量为 >30%~70%(转色中期)、IV 阶段叶片转色数量 >70%~100%(转色末期); 由于不同处理导致叶片转色时间不同, V 和 VI 仅分别代表 T3、T4 的转色中期和转色末期, 其中 ck 的 IV 阶段同为 T3、T4 的转色初期。

2.2 测定指标及方法

2.2.1 生长指标 株高和地径通过钢卷尺和电子游标卡尺(精度 0.01 mm)测量, 采集叶片并去掉叶柄, 使用游标卡尺测量叶片厚度, 每个处理选取 10 片叶, 用智能叶面积测量系统(YMJ-C, 浙江托普云农科技股份有限公司)测定叶面积。称鲜质量后, 105 ℃ 杀青 30 min, 65 ℃ 烘干至恒量测量干质量, 计算比叶面积。

2.2.2 叶片生理指标和叶色参数 叶片叶绿素、类胡萝卜素采用丙酮-乙醇混合液浸提法提取, 花青苷采用体积分数为 1% 盐酸甲醇溶液浸提^[19]、可溶性糖用蒽酮比色法测定^[20]; 用 SONY α6000 相机在固定机位和光源下, 以 A4 纸为背景对叶片进行拍照, 用 Matlab 软件提取明度(L*)、红绿色度(a*)、黄蓝色度(b*), 并计算彩度(C*)^[21]。

2.2.3 观赏期观测 通过便携式 SPAD-502 叶绿素仪测定叶片 SPAD 值, 绘制 SPAD 值曲线, 同时观察植株整体叶片着色情况, 通过 SPAD 值的变化趋势和叶片着色时间来判断叶片衰老情况^[22-23]。通过连续观察美国红枫叶片着色情况, 记录观赏期和最佳观赏期(整株 2/3 叶片变色时为最佳观赏期开始, 整株落叶 1/2 为最佳观赏期结束)。

2.3 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据统计, SPSS 22.0 进行显著性差异分析 (Duncan 法进行多重比较); 利用 Origin 2018 制作图表, 用 R Studio 进行相关性分析和热图制作。

3 结果与分析

3.1 施氮对美国红枫生长的影响

施氮对美国红枫株高和地径的增长具有显著促进作用 (图 1)。T2、T3、T4 的累计株高增长量分别为 (43.74 ± 10.07) 、 (50.25 ± 9.11) 和 (53.06 ± 8.21) cm, 均显著高于 ck ($P < 0.05$); T3 和 T4 的累计地径增长量分别为 (6.51 ± 2.4) 、 (6.23 ± 2.3) mm, 显著高于 ck ($P < 0.05$)。各处理 3—6 月和 8—10 月的株高和地径增长量无显著差异; 但在 6—8 月生长关键期, T3 $[(24.85 \pm 3.59)$ cm] 和 T4 $[(23.90 \pm 5.10)$ cm] 株高增长量显著高于 ck ($P < 0.05$)。由图 2 可知: 总叶面积大小与施氮量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 7—8 月 T4 的叶面积显著高于 T2、T1 和 ck ($P < 0.05$); 而比叶面积随着氮施用量增加呈梯度下降, T4 的平均比叶面积最小, 7 月和 10 月 T4 的比叶面积显著小于 ck ($P < 0.05$)。

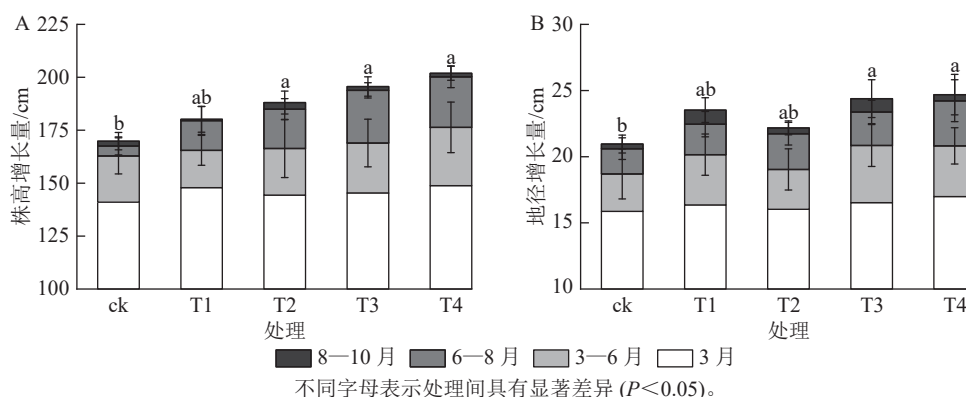


图 1 不同施氮处理对美国红枫株高和地径的影响

Figure 1 Effects of different nitrogen application treatments on plant height and ground diameter of *A. rubrum*

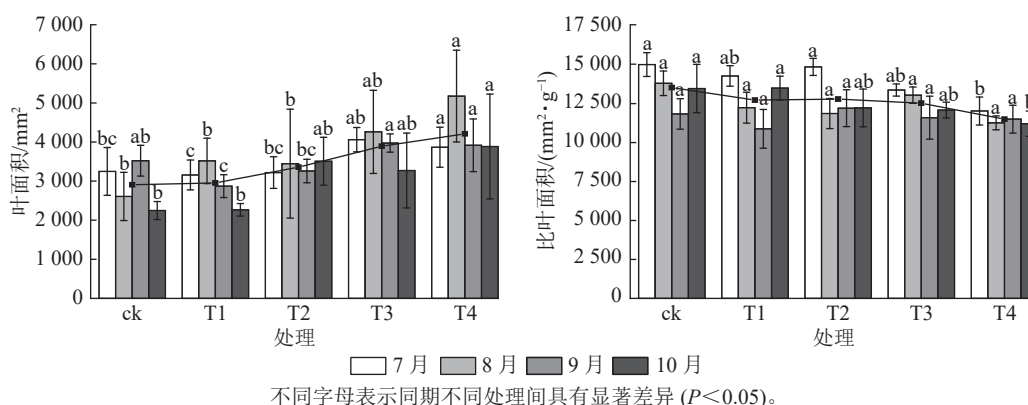
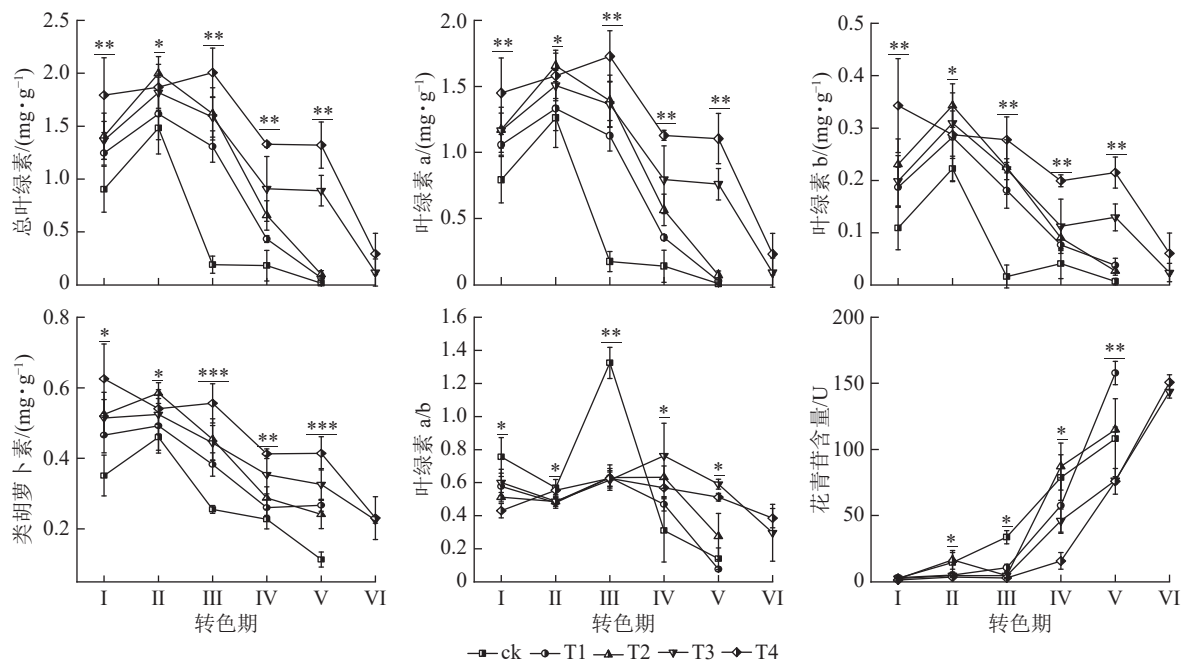


图 2 不同施氮处理对美国红枫叶面积和比叶面积的影响

Figure 2 Effects of different nitrogen application treatments on leaf area and specific leaf area of *A. rubrum*

3.2 施氮对美国红枫叶片色素的影响

整体上, 各组的色素质量分数及变化趋势存在显著差异 (图 3), 其中 T4 处理的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素质量分数相比其他处理在各时期 (除 II 期之外) 都保持最高水平; 在 I 期 T4 的总叶绿素 ($1.79 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和类胡萝卜素 ($0.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 显著大于 ck ($P < 0.05$); 进入转色期后, ck 的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素质量分数在 II 期开始快速下降, 而 T4 的总叶绿素和类胡萝卜素质量分数在 II 和 III 期仍保持较高水平, 在 IV 期才开始下降。各处理叶绿素 a/b 在 I、II 期无显著差别, 在 III 期 ck 的叶绿素 a/b (13.24) 迅速增加, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。呈现该变化可能与 ck 提早衰老, 叶片叶绿素分解速度过快有关。



I、II、III、IV 分别代表 ck 的转色前期、转色初期、转色中期和转色末期；V 和 VI 分别代表 T3、T4 的转色中期和转色末期。
*表示同期不同处理间具有显著差异 ($P<0.05$), **表示同期不同处理间具有极显著差异 ($P<0.01$)。

图3 不同施氮处理对美国红枫叶片色素的影响

Figure 3 Effects of different nitrogen application treatments on the pigment contents of *A. rubrum*

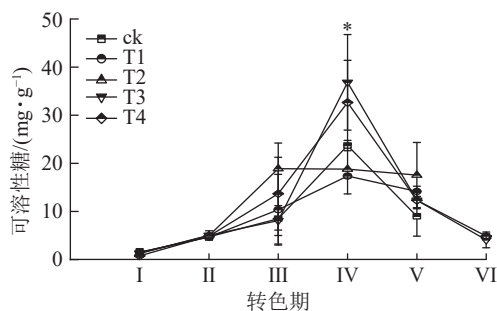
各处理花青苷含量变化存在明显差异,随着叶片开始转色,各处理花青苷含量不断上升,其中 ck 叶片最先开始转色,花青苷含量上升速度最快,Ⅲ期 ck 的花青苷含量显著高于其他处理组 ($P<0.05$);Ⅳ期 T1、T2 的花青苷含量快速上升,其中 T2 的花青苷含量超过 ck 达到最高;Ⅴ期 T1 组花青苷含量上升最快,此时 ck、T1、T2 叶片已完全变色并开始落叶;Ⅵ期时,ck、T1、T2 已完全落叶, T3 和 T4 叶片完全变色,花青苷含量达到最大值。

3.3 施氮对美国红枫叶片可溶性糖的影响

各处理叶片可溶性糖质量分数呈先上升后下降的趋势(图4)。在Ⅰ、Ⅱ期各处理可溶性糖质量分数大致相同,该阶段气温相对较高,各处理叶片刚刚开始衰老转色,可溶性糖质量分数变化差异不显著;进入Ⅲ期,可溶性糖质量分数普遍上升,其中 ck 的增速最快,可溶性糖增长到 $20.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, T2 次之,可溶性糖增长到 $18.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,此时 ck、T1 和 T2 叶片完全转色,而 T3 和 T4 仍未开始转色;到了Ⅳ期 T3 和 T4 叶片可溶性糖质量分数急速升高,分别增长到了 36.8 和 $32.7 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,显著超过其他处理 ($P<0.05$);此时 T3 和 T4 开始衰老转色, ck、T1 和 T2 叶片受低温刺激开始落叶;Ⅴ期各处理可溶性糖质量分数整体骤降, ck 的可溶性糖质量分数降低至 $9.0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;此时 ck、T1 和 T2 处理进入衰老末期,叶片快速脱落, T3 和 T4 进入转色中期;Ⅵ时期 T3 和 T4 可溶性糖质量分数继续下降,叶片到达衰老后期,叶片开始脱落。

3.4 施氮对美国红枫叶片叶色参数的影响

随着转色进程推进,各处理叶色参数和 C^* 的变化各不相同(表2), ck 的 L^* 在Ⅰ期显著大于 T3,而在Ⅴ期显著小于 T3 ($P<0.05$);各处理 a^* 在Ⅰ期差异不显著,但随着叶片转色进程推进,差异逐渐显



I、II、III、IV 分别代表 ck 的转色前期、转色初期、转色中期和转色末期; V 和 VI 分别代表为 T3、T4 的转色中期和转色末期。
*表示同列不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图4 不同施氮处理对美国红枫叶片可溶性糖质量分数的影响

Figure 4 Effects of different nitrogen application rates on soluble sugar content of *A. rubrum*

现；ck 的 a^* 在转色期 II~V 都显著大于 T4 ($P<0.05$)；并且 ck 的 a^* 从 II 期开始逐渐上升，IV 期达到最大值 (22.59 ± 3.08)；而 T4 处理 a^* 在 II、III 期甚至有所下降，当 IV 期才开始上升，VI 期达到最大值 (24.35 ± 3.08)。I 期 ck 的 b^* 与 T3、T4 有明显差异，其余时期各处理的 b^* 无显著差异。各处理 C^* 随着叶片转色呈现“V”型变化特征，且各处理间差异显著，在 I 期时，ck 的 C^* 与 T3、T4 有显著差异 ($P<0.05$)；IV 期时，ck 的 C^* 显著大于其他处理 ($P<0.05$)；T3 和 T4 的 C^* 在 I~IV 期变化不大，在 V 期急剧下降，而 VI 期时又上升，分别达到最大值 (29.64 ± 3.19 和 29.67 ± 4.40)。

表 2 不同施氮处理对美国红枫叶色参数的影响

Table 2 Effects of different nitrogen treatments on leaf color parameters of *A. rubrum*

转色期	L^*					a^*				
	ck	T1	T2	T3	T4	ck	T1	T2	T3	T4
I	19.87±2.98 a	17.01±3.26 ab	16.14±1.86 b	16.13±1.34 b	15.31±1.04 b	-6.55±0.74 a	-6.52±1.07 a	-6.46±0.79 a	-6.96±0.73 a	-6.79±0.69 a
II	16.15±1.70 a	15.88±1.09 a	17.16±0.53 a	16.13±1.04 a	17.01±1.03 a	-3.92±1.45 b	-0.93±3.64 a	-5.56±1.41 bc	-6.96±0.73 c	-7.11±0.26 c
III	14.71±4.56 a	15.47±2.88 a	16.65±1.90 a	15.60±1.49 a	16.05±1.79 a	13.52±6.43 a	-3.54±4.80 b	-10.73±0.70 c	-10.11±0.87 c	-9.87±0.82 c
IV	16.13±2.15 ab	13.58±2.69 b	15.27±3.02 ab	18.10±0.87 a	17.96±0.42 a	22.59±3.08 a	10.59±3.82 b	0.09±3.53 c	-0.85±8.91 c	-4.05±3.40 c
V	13.18±2.59 b	14.16±0.54 ab	9.98±2.57 c	17.34±1.00 a	14.60±2.48 ab	19.95±1.89 a	21.64±1.91 a	15.00±4.61 ab	10.50±6.29 b	0.32±6.12 c
VI				16.92±1.94	17.10±2.62				24.65±2.07	24.35±3.08

转色期	b^*					C^*				
	ck	T1	T2	T3	T4	ck	T1	T2	T3	T4
I	22.42±3.70 a	19.69±3.96 ab	18.89±2.87 ab	16.85±1.64 b	16.01±1.07 b	23.39±3.42 a	20.75±4.08 ab	19.97±2.92 ab	18.23±1.72 b	17.39±1.20 b
II	18.91±2.73 a	19.18±1.43 a	19.15±0.90 a	16.85±1.64 a	17.30±0.79 a	19.38±2.52 a	19.47±1.17 a	19.98±0.94 a	18.23±1.71 a	18.71±0.72 a
III	16.56±1.10 a	15.26±1.16 a	17.23±1.68 a	16.29±1.34 a	14.90±1.70 a	21.52±9.94 a	16.06±4.86 a	20.32±1.48 a	19.17±1.59 a	17.87±1.81 a
IV	18.55±3.55 a	12.59±3.36 a	12.90±4.96 a	15.37±2.91 a	17.56±1.39 a	29.26±4.43 a	16.61±4.37 b	13.44±4.23 b	17.00±3.15 b	18.26±1.29 b
V	14.15±3.52 a	14.08±2.11 a	9.52±3.01 a	10.08±2.96 a	10.32±4.86 a	24.51±3.57 ab	25.83±2.73 a	17.79±5.42 bc	14.71±6.50 c	11.52±5.13 c
VI				16.41±2.87	16.93±3.33				29.64±3.19	29.67±4.40

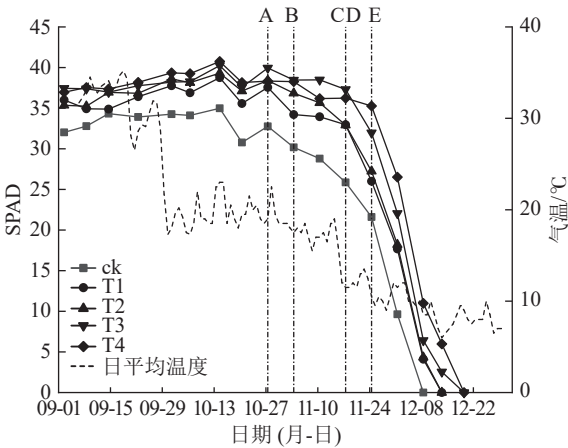
说明：数值为平均值±标准误。同一变量同一转色期不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3.5 施氮对美国红枫叶片转色和观赏期的影响

施氮量与美国红枫叶片 SPAD 值呈正相关 (图 5)，ck 总体 SPAD 值较小，下降最快，叶片开始转色时间 (A) 最早；T1~T4 的 SPAD 值随施氮量增加呈梯度增加，其中 T4 的 SPAD 值一直保持较高水平，下降时间较晚，叶片最晚开始转色 (E)。施氮量对美国红枫叶片转色和气温之间响应也有影响，ck、T1 分别在 10 月底和 11 月初叶片开始逐渐转色，此时日平均气温保持在 17~22 ℃，而当气温骤降至 10 ℃左右后，T2 和 T3 叶片才开始转色；而 T4 遇到低温后 SPAD 值未立刻下降，叶片开始转色时间为 11 月下旬。从图 6 可以看出：各处理不同时期的叶色变化差异明显，叶色随着时间呈现梯度性变化。T3 的观赏期长短 (33 d) 与其他处理有显著差异 ($P<0.05$)；ck 和 T1 转色时间较早，遇到低温条件后叶片提早落叶，导致最佳观赏期较短 (12 和 13 d)；T2、T3、T4 叶片转色较晚，但 T2 最佳观赏期 (14 d) 显著低于 T3 和 T4 (25 和 25 d) ($P<0.05$)。

3.6 美国红枫生长和叶片呈色的关系

从各指标的相关性分析可知 (图 7)，株高与地径、叶面积呈正相关，叶面积与叶绿素 a、叶绿素 b 和



虚线代表叶片开始变色，A、B、C、D、E 分别表示 ck、T1、T2、T3、T4 等 5 个处理开始转色的日期。

图 5 美国红枫各时期叶片 SPAD 值

Figure 5 Leaf SPAD value of *A. rubrum* in different periods

Figure 5 Leaf SPAD value of *A. rubrum* in different periods

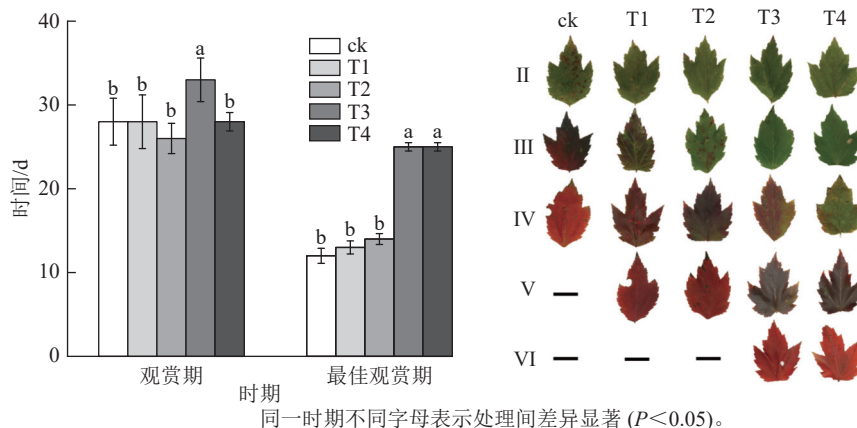


图6 不同施氮处理美国红枫的观赏期、最佳观赏期天数及叶色变化

Figure 6 Ornamental period, optimum ornamental period and leaf color change of *A. rubrum* under different nitrogen treatments

类胡萝卜素呈正相关，与 a^* 、 C^* 呈负相关；叶绿素 a 与叶绿素 b 和类胡萝卜素呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与花色苷和 a^* 呈显著负相关 ($P < 0.05$)；花色苷与叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素呈显著负相关 ($P < 0.1$)，与 a^* 呈显著正相关 ($P < 0.1$)，和 C^* 呈负相关； L^* 与叶绿素 a、叶绿素 b 和 C^* 呈正相关，与 b^* 显著正相关 ($P < 0.05$)。

4 讨论

氮是植物生长发育的必需营养元素之一，不同的施氮量会影响植物生物量的积累^[24]。KOCH 等^[25]发现施氮可以增加马铃薯 *Solanum tuberosum* 生长期的叶面积和叶片数量，提高对辐射和光子的拦截率，并对光合作用效率产生积极影响，促进马铃薯块茎膨大。适当施氮还有助于提高植株叶绿素含量、酶含量和酶活性^[26-27]，NASAR 等^[28]研究发现施氮能有效提高玉米 *Zea mays* 的株高和叶绿素含量，促进叶片光合作用，达到增产的目的；陈克玲等^[29]研究发现适当施氮能显著提高烟草 *Nicotiana tabacum* 叶片的叶绿素含量以及蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶、谷氨酸合成酶的活性。在本研究中，施氮显著促进美国红枫生长，提高了美国红枫株高、地径和叶面积，使叶片接收更多光能辐射，同时也增加了美国红枫叶片的光合色素含量，有利于美国红枫叶片营养物质的积累。

叶片衰老是受遗传和环境因素共同控制的过程，而叶绿素的分解是叶片衰老最重要的标志^[30]。WANG 等^[31]研究发现：添加养分能显著延缓落叶松松针的秋季衰老，成熟叶片氮浓度与叶片衰老时间之间呈正相关关系；较高的营养物质（如氮和磷）环境会使叶绿素降解较慢，延迟叶片衰老^[17, 32]。在本研究中，施氮显著延缓了美国红枫叶片叶绿素的分解，在 $200 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 施氮处理下叶绿素质量分数最高且叶绿素降解较慢，延长了叶片营养生长过程，推迟了叶片衰老；叶片可溶性糖增加也往往伴随着叶片衰老，又可以作为底物参与花青素的合成，并为花青素合成过程提供能量^[33]，本研究中对照的可溶性糖质量分数上升最早，但可溶性糖质量分数却不高，而 $200 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 施氮处理在 IV 期大幅提升可溶性糖储备，支撑花青素的合成。目前定义植物开始衰老的时间没有统一标准，但总体基于叶片衰老过程中发生的 3 个过程：叶片营养物质再分配，总叶绿素降解和叶片着色^[22]。通过连续测量不同时期的 SPAD 值，以

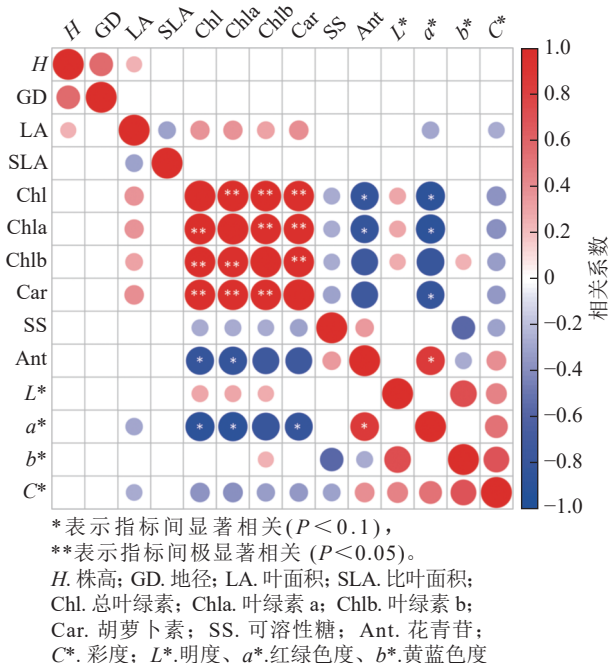


图7 美国红枫生长指标、色素和叶色参数的相关性分析

Figure 7 Heatmap of the correlation between growth indices, pigment content, and leaf color parameters of *A. rubrum*

及观察叶片着色情况,能一定程度反映植物的叶片衰老过程^[34-35]。本研究各处理 SPAD 值与施氮量呈正相关,对照的 SPAD 值最小,下降时间早,叶片过早转色且提早落叶;而在 200 g·株⁻¹施氮处理下 SPAD 值一直保持较高水平,SPAD 值下降时间较晚,叶片最晚开始转色,叶片转色时间相比对照推迟了 20 d;说明在西南低海拔地区,施氮可以推迟美国红枫叶片衰老,延缓叶片的转色时间,为后续与低温相遇创造条件。

叶片转色主要是由高温或低温和干旱引起的,其中温度比干旱对叶片转色方面的影响更大^[36]。较高的生长季气温和较低的秋季最低气温会诱导叶片着色日期提前^[37]。陆秀君等^[38]发现合适的氮磷钾配比能延长美国红枫幼苗观赏期;李林柯^[39]发现适当的水肥耦合处理既能促进‘红冠’生长,又可以提高叶片呈色质量,其中养分对呈色和观赏期的贡献率大于水分。本研究结果表明:在西南低海拔地区,夏季的高温 and 秋季持续维持 20 ℃ 以上的气温会导致美国红枫叶片提前衰老转色,缩短叶片观赏期,通过适当施氮可以延长叶片营养生长期,推迟美国红枫的叶片衰老过程,延缓叶片转色。花青素是叶片呈红呈彩的关键,而低温是影响花青素合成的主要因素^[40],低温能通过诱导转录因子 *SIAREB1* 的表达,影响脱落酸含量,进一步调控花青苷相关合成基因的表达^[41]。在西南低海拔地区,通过施氮推迟美国红枫叶片衰老过程,使观赏期与冬季的低温条件相遇,促进了叶片花青苷的合成,且施氮显著增加了叶片中可溶性糖质量分数,为花青苷合成代谢提供了底物和能量,进一步增加了美国红枫叶片花青苷含量,显著提高了美国红枫的叶色质量并延迟了最佳观赏期。

5 结论

适量施氮能显著提高美国红枫株高、地径和叶面积,增强光能捕获能力,并增加叶片叶绿素和类胡萝卜素质量分数,进而促进光合作用及营养物质积累;同时适量施氮可延缓叶绿素降解,推迟叶片衰老,延长营养生长期。本研究证实:在西南低海拔地区,秋季的较高温度易导致叶片提前衰老和转色,而适当施氮 (150~200 g·株⁻¹) 能通过延缓衰老进程,使其与低温条件相遇,促进叶片花青素的合成,有效提高美国红枫叶片可溶性糖质量分数和花青苷含量,显著提升美国红枫在西南低海拔地区的生长性能和秋季叶色观赏价值。

6 参考文献

- [1] 高焕章,赵振军,王斌成,等. 美国红枫不同品种秋色叶变化过程的观察[J]. 北方园艺, 2013(19): 83–86.
GAO Huanzhang, ZHAO Zhenjun, WANG Bincheng, et al. Observation on variation process of the fall-color leaf of different cultivars of *Acer rubrum* [J]. *Northern Horticulture*, 2013(19): 83–86.
- [2] 荣浩,徐立安. 美国红枫引种及研究应用进展[J]. 江苏林业科技, 2020, 47(4): 39–44.
RONG Hao, XU Li'an. Study reviews of *Acer rubrum* L. introduction and application [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2020, 47(4): 39–44.
- [3] 魏静,谭星,王昌盛,等. 引种美国红枫在两种紫色土区的生长和光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 97–105.
WEI Jing, TAN Xing, WANG Changsheng, et al. Comparison of growth and photosynthetic characteristics of introduced *Acer rubrum* on two purple soils [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 48(1): 97–105.
- [4] 洪丽,王金刚,龚束芳. 彩叶植物叶色变化及相关影响因子研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6): 152–156.
HONG Li, WANG Jin'gang, GONG Shufang. Progress in color changes and its influencing factors of color leaf plants [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(6): 152–156.
- [5] 王良再,胡彦波,张会慧,等. 植物叶片花青素的光破坏防御机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 835–841.
WANG Liangzai, HU Yanbo, ZHANG Huihui, et al. Photoprotective mechanisms of leaf anthocyanins: research progress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 835–841.
- [6] SOLFANELLI C, POGGI A, LORETI E, et al. Sucrose-specific induction of the anthocyanin biosynthetic pathway in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology*, 2006, 140(2): 637–646.
- [7] 姜卫兵,庄猛,韩浩章,等. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展[J]. 园艺学报, 2005, 32(2): 352–358.

- JIANG Weibing, ZHUANG Meng, HAN Haozhang, *et al.* Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, **32**(2): 352–358.
- [8] 吴琰琰, 刘玉民, 闫洋洋. 北美红枫秋季呈色的生理机制研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, **41**(5): 21–29.
WU Yanyan, LIU Yumin, YAN Yangyang. Study of the mechanism of physiological discoloration of North American red maple (*Acer rubrum* L.) [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2019, **41**(5): 21–29.
- [9] 车佳航, 李伟楠, 秦英之, 等. 木本植物叶色变异机制研究进展[J]. 植物学报, 2024, **59**(2): 319–328.
CHE Jiahang, LI Weinan, QIN Yingzhi, *et al.* Research progress of leaf color variation mechanism in woody plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2024, **59**(2): 319–328.
- [10] ZANI D, CROWTHER T W, MO Lidong, *et al.* Increased growing-season productivity drives earlier autumn leaf senescence in temperate trees [J]. *Science*, 2020, **370**(6520): 1066–1071.
- [11] ARCHETTI M, RICHARDSON A D, O'KEEFE J, *et al.* Predicting climate change impacts on the amount and duration of autumn colors in a New England forest[J/OL]. *PLoS One*, 2013, **8**(3): e57373[2025-08-05]. DOI: [10.1371/journal.pone.0057373](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057373).
- [12] DU Kang, ZHAO Wenqing, LÜ Zhiwei, *et al.* Optimal rate of nitrogen fertilizer improves maize grain yield by delaying the senescence of ear leaves and thereby altering their nitrogen remobilization[J/OL]. *Field Crops Research*, 2024, **310**: 109359[2025-08-05]. DOI: [10.1016/j.fcr.2024.109359](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109359).
- [13] ZHANG Yongqiang, LIU Zhongjuan, LIU Jianping, *et al.* GA-DELLA pathway is involved in regulation of nitrogen deficiency-induced anthocyanin accumulation [J]. *Plant Cell Reports*, 2017, **36**(4): 557–569.
- [14] PENA-NOVAS I, ARCHETTI M. A test of the photoprotection hypothesis for the evolution of autumn colours: chlorophyll resorption, not anthocyanin production, is correlated with nitrogen translocation [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2021, **34**(9): 1423–1431.
- [15] HUGHES N M, GEORGE C O, GUMPMAN C B, *et al.* Coevolution and photoprotection as complementary hypotheses for autumn leaf reddening: a nutrient-centered perspective [J]. *New Phytologist*, 2022, **233**(1): 22–29.
- [16] STEWART A J, CHAPMAN W, JENKINS G I, *et al.* The effect of nitrogen and phosphorus deficiency on flavonol accumulation in plant tissues[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2001, **24**(11): 1189–1197.
- [17] FU Y H, PIAO Shilong, DELPIERRE N, *et al.* Nutrient availability alters the correlation between spring leaf-out and autumn leaf senescence dates [J]. *Tree Physiology*, 2019, **39**(8): 1277–1284.
- [18] ALHABBAR Z, ISLAM S, YANG Rongchang, *et al.* Associations of NAM-A1 alleles with the onset of senescence and nitrogen use efficiency under Western Australian conditions[J/OL]. *Euphytica*, 2018, **214**(10): 180[2025-08-05]. DOI: [10.1007/s10681-018-2266-4](https://doi.org/10.1007/s10681-018-2266-4).
- [19] 吴焦焦, 田秋玲, 谭星, 等. 氮磷钾肥配施对黄栌生长和叶片呈色的影响[J]. 林业科学, 2021, **57**(11): 179–189.
WU Jiaojiao, TIAN Qiuling, TAN Xing, *et al.* Effects of combined application of N, P and K fertilizer on growth and leaf color of *Cotinus coggygia* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(11): 179–189.
- [20] 张亚平. 外源喷施化学物质对榉树叶色变化的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
ZHANG Yaping. *The Effects of Several Chemicals on Leaf Color Changes of Zelkova schneideriana* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.
- [21] 靳慧琴, 梁俊林, 贾诗雨, 等. 土壤酸化对红枫叶片呈色生理的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, **39**(5): 590–595, 625.
JIN Huiqin, LIANG Junlin, JIA Shiyu, *et al.* Effects of soil acidification on leaf color physiology of *Acer palmatum* ‘Atropurpureum’ [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, **39**(5): 590–595, 625.
- [22] MARIËN B, BALZAROLO M, DOX I, *et al.* Detecting the onset of autumn leaf senescence in deciduous forest trees of the temperate zone [J]. *New Phytologist*, 2019, **224**(1): 166–176.
- [23] ZHU Lingxiao, LIU Liantao, SUN Hongchun, *et al.* Physiological and comparative transcriptomic analysis provide insight into cotton (*Gossypium hirsutum* L.) root senescence in response[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, **12**: 748715[2025-08-05]. DOI: [10.3389/fpls.2021.748715](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.748715).
- [24] BOWN H E, WATT M S, CLINTON P W, *et al.* Influence of ammonium and nitrate supply on growth, dry matter partitioning, N uptake and photosynthetic capacity of *Pinus radiata* seedlings [J]. *Trees*, 2010, **24**(6): 1097–1107.
- [25] KOCH M, NAUMANN M, PAWELZIK E, *et al.* The importance of nutrient management for potato production part I :

- plant nutrition and yield [J]. *Potato Research*, 2020, **63**(1): 97–119.
- [26] NASAR J, SHAO Zeqiang, GAO Qiang, *et al.* Maize-alfalfa intercropping induced changes in plant and soil nutrient status under nitrogen application [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, **68**(2): 151–165.
- [27] OCHIENG' I O, GITARI H I, MOCHOGE B, *et al.* Optimizing maize yield, nitrogen efficacy and grain protein content under different N forms and rates [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, **21**(3): 1867–1880.
- [28] NASAR J, KHAN W, KHAN M Z, *et al.* Photosynthetic activities and photosynthetic nitrogen use efficiency of maize crop under different planting patterns and nitrogen fertilization [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, **21**(3): 2274–2284.
- [29] 陈克玲, 王德权, 宋德伟, 等. 施氮量对烟草品种上部叶生长发育及碳氮代谢的影响[J]. 华北农学报, 2025, **40**(1): 122–132.
- CHEN Keling, WANG Dequan, SONG Dewei, *et al.* Effects of nitrogen application rate on growth, development, carbon and nitrogen metabolism of upper leaves of different flue-cured tobacco varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2025, **40**(1): 122–132.
- [30] ANDERSON R, RYSER P. Early autumn senescence in red maple (*Acer rubrum* L.) is associated with high leaf anthocyanin content [J]. *Plants*, 2015, **4**(3): 505–522.
- [31] WANG Peilin, FU Chen, WANG Liying, *et al.* Delayed autumnal leaf senescence following nutrient fertilization results in altered nitrogen resorption [J]. *Tree Physiology*, 2022, **42**(8): 1549–1559.
- [32] FRIDLEY J D. Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions [J]. *Nature*, 2012, **485**(7398): 359–362.
- [33] 吴慧, 杨静, 潘一展. 外施营养液对美国红枫叶色变化的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(3): 86–88.
- WU Hui, YANG Jing, PAN Yizhan. Effect on the color changes of *Acer rubrum* L. leaves after spraying nutrient solutions [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(3): 86–88.
- [34] GUNDERSON C A, EDWARDS N T, WALKER A V, *et al.* Forest phenology and a warmer climate–growing season extension in relation to climatic provenance [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(6): 2008–2025.
- [35] KESKITALO J, BERGQUIST G, GARDESTROM P, *et al.* A cellular timetable of autumn senescence [J]. *Plant Physiology*, 2005, **139**(4): 1635–1648.
- [36] LIU Guohua, CHEN Xiaoqiu, ZHANG Qinghua, *et al.* Antagonistic effects of growing season and autumn temperatures on the timing of leaf coloration in winter deciduous trees [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(8): 3537–3545.
- [37] TANINO K K, KALCSITS L, SILIM S, *et al.* Temperature-driven plasticity in growth cessation and dormancy development in deciduous woody plants: a working hypothesis suggesting how molecular and cellular function is affected by temperature during dormancy induction [J]. *Plant Molecular Biology*, 2010, **73**(1): 49–65.
- [38] 陆秀君, 葛根塔娜, 梅梅, 等. N、P、K 配比施肥对美国红枫幼苗生长及叶色变化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, **35**(5): 9–15.
- LU Xiujun, Gegentana, MEI Mei, *et al.* Effects of ratio fertilization of N, P, K on seedling growth and leaf color change of American maple [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, **35**(5): 9–15.
- [39] 李林珂. 引种‘红冠’生长和呈色对水肥耦合的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- LI Linke. *Response of Introduced Acer rubrum ‘Red Champions’ Growth and Coloration to Water-fertilizer Coupling* [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [40] STEYN W J, WAND S J E, JACOBS G, *et al.* Evidence for a photoprotective function of low-temperature-induced anthocyanin accumulation in apple and pear peel [J]. *Physiologia Plantarum*, 2009, **136**(4): 461–472.
- [41] XU Zijian, WANG Jiachun, MA Yongbo, *et al.* The bZIP transcription factor SIAREB1 regulates anthocyanin biosynthesis in response to low temperature in tomato [J]. *The Plant Journal*, 2023, **115**(1): 205–219.