哈尔滨城区 26 个落叶阔叶树种秋叶颜色及其养分指示意义*

相淑洁[1,2,3] 王兴昌[2,4]

1 东北林业大学林学院 哈尔滨 150040
2 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室 哈尔滨 150040
3 白山市望天鹅国有林总场 吉林白山 134300
4 东北林业大学生态学院 哈尔滨 150040

摘要:【目的】探讨衰老叶颜色及其养分的指示作用,旨在丰富景观色彩,改善城市生态环境。【方法】以地处哈尔滨的东北林业大学主校区 26 个阔叶树种为研究对象,基于衰老叶颜色指数和养分的关系,记录落叶物候,采集衰老叶并测定其颜色指数和氮浓度,评价彩叶植物资源。【结果】衰老叶为红紫色的树种叶变色至凋落结束日的时间显著长于其他颜色树种,红叶树种观赏期较长;衰老叶越红的树种相对红度指数越高、相对绿度指数和绿红植被指数越低;衰老叶 N 含量为 5.38~20.39 mg·g^{-1},仅 2 个树种完全重吸收。衰老叶 N 含量与各颜色指数均存在显著相关关系,其中衰老叶 N 含量分别与比值绿度指数和相对红度指数呈显著正、负相关(R^2=0.31)。衰老叶颜色越红,养分浓度越低,绿色衰老叶的 N 含量是红叶的 2.3 倍。【结论】衰老叶变色具有一定的养分指示作用,秋叶变色是养分保守策略的体现;应用观赏期长和观赏价值较高的红叶树种有利于提高城市绿化景观,丰富景观色彩,提高生活品质。

关键词:衰老叶;彩叶树种;颜色指数;养分重吸收度;衰老叶 N 含量
DOI:10.12169/zgcsly.2024.04.09.0004

Autumn Leaf Color and the Indicative Significance for Nitrogen of 26 Deciduous Broad-leaved Tree Species in Harbin

Xiang Shujie[1,2,3] Wang Xingchang[2,4]

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Sustainable Forest Ecosystem Management, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. General Station, Wangtian'e State-Owned Forest Farm, Baishan 134300, Jilin, China; 4. School of Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract:【Objective】 Autumn leaf color change is an important research topic in urban forestry and landscape architecture. Exploring the role of senescent leaf color and its nutrient indication is of great significance to select and apply tree species for urban greening in northern China. 【Method】 The study chooses the 26 deciduous broad-Leaved tree species in the main campus of Northeast Forestry University in Harbin City. Based on the relationship between the color index and nutrients of senescent leaves, the phenology of fallen leaves is recorded, and senescent leaves are collected to measure the color index and nitrogen concentration so as to evaluate colored-leaf plant resources. 【Result】 Tree species with red-purple senescent leaves have a significantly longer coloration period compared to other colored tree

收稿日期:2024-04-09
*基金项目:国家自然基金项目(32171765)
第一作者:相淑洁(1999-),女,硕士生,助理工程师,研究方向为森林资源保护与利用。E-mail:635577686@qq.com
通信作者:王兴昌(1982-)男,博士,副教授,研究方向为森林生态学。E-mail:xcwang_ cer@nefu.edu.cn

species, which indicates that red-leafed tree species have a longer ornamental period. The tree species with redder senescent leaves have higher red chromatic coordinate, lower green chromatic coordinate, and lower green red vegetation index. The N-content of senescent leaves ranges from 5.38 mg g^{-1} to 20.39 mg · g^{-1}, which can be completely reabsorbed by only two tree species. There is a significant correlation between the N-content of senescent leaves and each color index. The N-content of senescent leaves has significant positive correlation with proportional greenness index and significant negative correlation with relative redness index (R^2 = 0.31). The redder the color of senescent leaves is, the lower the nutrient concentration is. The N-content of green senescent leaves is 2.3 times that of red leaves.【Conclusion】The coloration of senescent leaves has a certain function of nutrient indication, and the autumn leaf coloration reflects conservative nutrient strategy. The application of red-leaf tree species with a long ornamental period and higher ornamental value is conducive to improving urban greening landscape, enriching landscape colors and improving the quality of life.

Keywords: senescent leave; colored-leaf trees; color index; nutrient resorption proficiency; senescent leaf N-content

叶片是植物进行光合作用的主要器官，对植物生长发育过程起重要作用[1]。在温带地区，植物秋季叶片自然脱落成凋落叶，秋季叶变色是温带地区的著名景观事件，这一景观事件的成因和意义，既是城市林业与风景园林的重要关注点，也是植物生态生理学的古老命题，研究人员在叶片变色机理和生态学意义方面做了大量工作[2-4]。秋叶呈色是由秋季叶色素变化引起，红色主要由花青素引起，橙黄色主要为类胡萝卜素本色，而绿色则是叶绿素主导。这些色素的变化，往往与叶衰老过程中的养分变化和重吸收有千丝万缕的联系[2,5]。因此，探究叶片颜色与养分的关系尤为重要。

植物叶片的凋落是一个动态过程，凋落节律是植物主要功能策略之一，近年对植物秋季凋落物候的研究较少，对物候的研究大多集中在春季物候[6-7]。不同森林类型凋落物的季节模式不同，我国东北地区温带森林的凋落模式均呈单峰型(除了常绿针叶林)，凋落高峰出现在9—10月，不同群落叶凋落高峰出现的时间不同[8-10]，优势树种叶凋落高峰出现的时间有差异，紫椴（*Tilia amurensis*）叶凋落高峰出现在9月中旬，且持续时间较长，而蒙古栎（*Quercus mongolica*）、色木槭（*Acer pictum* subsp. *mono*）和榆树（*Ulmus pumila*）叶集中凋落于10月初[8]，中国典型温带森林46个落叶树种中，凋落叶养分与落叶日期显著负相关[11]。北方秋季叶片凋落受许多因素影响，不同树种凋落高峰出现的时间也不尽相同[12]，温度、降雨、光照强度等气候因子改变也会影响秋季叶片的衰老和凋落[13]，秋季彩叶树种选择还应该考虑叶变色和凋落物候差异，温带树木的叶片尽管都集中在秋季凋落，然而由于树种不同，叶片脱落时间具有较大的差异[11,14-15]。东北地区城市绿化的彩叶树种资源研究仍然很少，这限制了城市绿化树种的秋季叶色和叶物候搭配。

在众多养分元素中，N是中高纬度生态系统普遍存在的限制植物生长的因子[16]。衰老叶片营养物质的含量，也被称为重吸收度，是衡量一种营养物质在衰老叶片中减少到最低水平的指标[17]。Tateno和Trkeda[18]研究发现，落叶开始时间与衰老叶N浓度的相关性不显著，较晚的落叶高峰促进了叶片养分吸收，降低了衰老叶中N含量[19]。研究表明，叶花青素与养分存在一定的负相关性[20]，红叶植物衰老叶的N含量更低[2,11]，关于秋叶颜色的研究大多集中在秋色呈色机理和影响因子等方面而关于养分与衰老叶颜色的关系的研究较少，因此衰老叶养分是否影响衰老叶的颜色变化也是值得探讨的问题[21-22]。彩叶植物的叶色在园林绿化中备受重视，但影响颜色变化规律的理论研究较少。

本文在东北林业大学主校区内采集26种阔叶树种衰老叶，利用扫描仪获得衰老叶图片分析秋叶颜色指数，并测定衰老叶N含量，定量分析阔叶绿化树种衰老叶不同树种叶片颜色变化与衰老叶片中养分含量的关系，探究树木颜色变化的养分指示作用。

1　研究区概况

东北林业大学（45°72′N，126°63′E）位于黑龙江省哈尔滨市，常年平均气温为 4.2 ℃，属于半湿润温带大陆性季风气候。冬季在极地大陆冷气团控制下，气候寒冷、干燥；夏季受太平洋副热带气团影响，降水集中，气候温暖、湿润[23]。

2　研究方法

2.1　样品收集及处理

在校园内选取 26 个阔叶树种（表 1），每个乔木或灌木重复 5 个植株，在 9—10 月秋季变色落叶期，每两天对这些标记的植株进行人工监测，通过目测估计叶片着色和冠层中的残留百分比，约全株叶片 50%变色记录叶片变色日[11]，以叶大规模凋落为凋落高峰日，叶完全凋落为凋落结束日计算各植株的变色起始时间、凋落开始时间、凋落高峰时间、凋落时长、凋落结束时间，即每年起始日到记录日，同时在凋落高峰前后，在地面随机采集 10～20 片新鲜的凋落叶（衰老叶），尽量选择完整的叶片，用扫描仪（Epson Perfection V19）扫描获得新鲜衰老叶图片（300 dpi），每个植株 3 组样本，每组样本 10 个叶片（大叶树种 5 个叶片）。用 Photoshop CC 2019 进行处理扫描图像，根据叶片像素与背景像素以及扫描分辨率计算叶面积，提取每张图像叶片的红、绿、蓝（R、G、B）3 个通道的 DN 值，将所有像素的 DN 值取平均值。根据物候相机的算法[24]，计算衰老叶的颜色指数（表 2）。衰老叶扫描后于 75℃烘干 24 h，用电子天平称量，获得干质量（0.001 g），再利用叶面积与质量计算比叶质量（LMA）。将衰老叶粉碎后，用 H_2SO_4－H_2O_2消煮法制备待测液，并用连续流动分析仪（AA3，SEAL，德国）测定衰老叶 N 含量。

表 1　东北林业大学主校区秋叶颜色试验树种及类群

树种	拉丁名	生长型	叶片质地	颜色类型	变色程度	来源
紫叶稠李	*Prunus virginiana*	乔木	纸质	紫色	完全变色	引入
北美红枫	*Acer rubrum*	乔木	革质	红色	完全变色	引入
五叶地锦	*Parthenocissus quinquefolia*	木质藤本	纸质	红色	完全变色	引入
紫丁香	*Syringa oblata*	乔木	纸质	红色	完全变色	乡土
蒙古栎	*Quercus mongolica*	乔木	革质	棕褐色	完全变色	乡土
紫椴	*Tilia amurensis*	乔木	纸质	棕褐色	完全变色	乡土
色木槭	*Acerpictum* subsp. *mono*	乔木	纸质	黄橙色	完全变色	乡土
花楸树	*Sorbus pohuashanensis*	乔木	纸质	黄橙色	完全变色	乡土
辽椴	*Tilia mandshurica*	乔木	纸质	黄色	完全变色	乡土
山皂荚	*Gleditsia japonica*	乔木	纸质	黄色	完全变色	引入
朝鲜槐	*Albizia kalkora*	乔木	纸质	黄色	完全变色	乡土
山楂	*Crataegus pinnatifida*	乔木	纸质	黄色	完全变色	乡土
稠李	*Prunus padus*	乔木	纸质	黄色	完全变色	乡土
东北杏	*Prunus sibirica*	乔木	纸质	黄色	完全变色	乡土
白桦	*Betula platyphylla*	乔木	纸质	黄色	完全变色	乡土
旱柳	*Salixmatsudana*	乔木	纸质	黄色	完全变色	引入
长白忍冬	*Lonicera ruprechtiana*	灌木	纸质	黄色	完全变色	乡土
榆叶梅	*Prunus triloba*	灌木	纸质	黄色	半变色	乡土
胡桃楸	*Juglans mandshurica*	乔木	纸质	黄绿色	完全变色	乡土
水曲柳	*Fraxinus mandshurica*	乔木	纸质	黄绿色	完全变色	乡土
榆树	*Ulmus pumila*	乔木	纸质	黄绿色	完全变色	乡土
暴马丁香	*Syringa reticulata* subsp. *amurensis*	乔木	纸质	黄绿色	完全变色	乡土
北京丁香	*Syringa reticulata* subsp. *pekinensis*	乔木	纸质	黄绿色	半变色	引入
小叶杨	*Populus simonii*	乔木	革质	黄绿色	半变色	引入
枫杨	*Pterocarya stenoptera*	乔木	纸质	黄绿色	半变色	引入
梓	*Catalpa ovata*	乔木	纸质	绿色	不变色	引入

表 2 颜色指数公式汇总

颜色指数	计算公式
比值绿度指数（Ratio greenness index）[25]	$G_{GR}=G/R$
相对绿度指数（Green chromatic coordinate）[26]	GCC=G/（R+G+B）
相对红度指数（Red chromatic coordinate）[26]	RCC=R/（R+G+B）
绝对绿度指数（Green excess index）[27]	GEI=2G-（R+B）
绿红植被指数（Green red vegetation index）[28]	GRVI=（G-R）/（G+R）

注：R、G、B 分别代表红、绿、蓝 3 个通道的亮度。

2.2 数据处理

利用颜色指数公式计算出颜色指数，采用独立样本 t 检验分析 26 个种间物候参数差异，并用 Pearson 相关分析检验凋落物候参数之间的相关性，对衰老叶颜色指数和凋落物候进行不同颜色类型的方差分析，用单因素方差分析（ANOVA）和邓肯法（Duncan）比较凋落物候与颜色类型之间的差异，探究不同颜色类型树种叶衰老物候差异。利用简单线性回归分析颜色指数随单位质量 N 含量的变化趋势，比较不同颜色指数与衰老叶 N 含量的相关性。用 SPSS27.0 进行数据处理和分析，采用 SigmaPlot15.0 作图。

3 结果与分析

3.1 衰老叶颜色差异

东北林业大学校园秋季彩叶植物资源较为丰富，衰老叶颜色大体可以分为 5 类：红紫色、棕褐色、黄橙色、黄绿色和绿色（图 1）。其中，黄橙叶色的树种最多（11 种），其次为红色（5 种）、黄绿色（7 种）、棕色（2 种）、绿色（1 种）。颜色类型与颜色指数表征的信息一致（表 3）。衰老叶越红的树种相对红度指数越高；衰老叶越绿的树种，比值绿度指数与相对绿度指数越高；衰老叶呈棕褐色的树种，颜色指数偏向于衰老叶呈红紫色（图 2）。

表 3 不同颜色类型树种凋落叶颜色指数方差分析

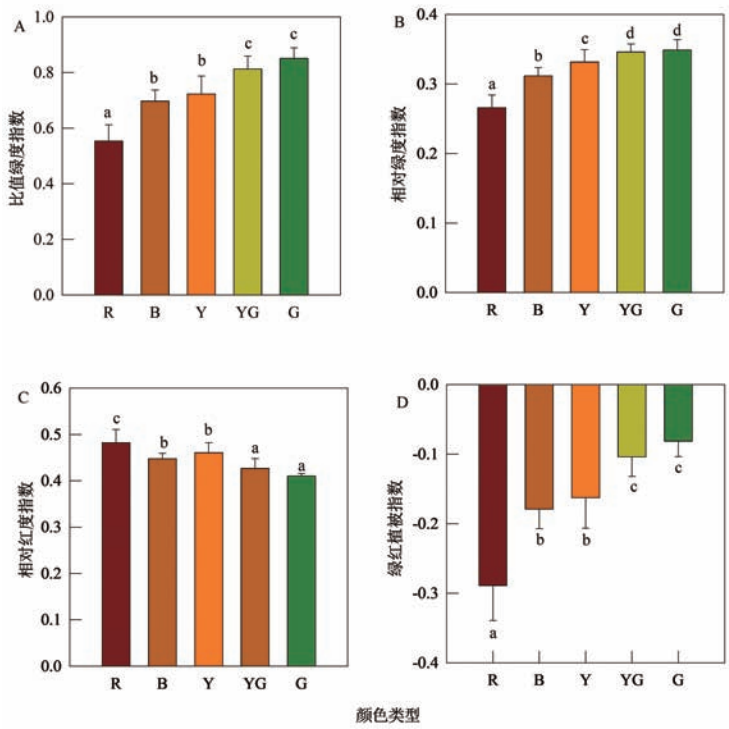
颜色指数	统计量	
	F	*P*
比值绿度指数	50.694	<0.001
相对绿度指数	64.741	<0.001
相对红度指数	21.725	<0.001
绿红植被指数	52.040	<0.001

3.2 叶衰老物候差异

由图 3 可知，秋季叶物候参数存在显著相关性，叶片开始变色日与凋落高峰日、凋落结束日呈显著正相关（$P<0.01$），凋落高峰日和凋落结束日呈显著正相关（$P<0.01$）。由表 4 可知，灌木树种和小乔木相较于大多数大乔木树种叶变色开始日晚，如北京丁香、紫叶稠李变色开始日较晚，凋落结束日也较晚。叶片开始变色最早的树种凋落期也较短，大多数树种在凋落高峰期迅速进入凋落结束期。

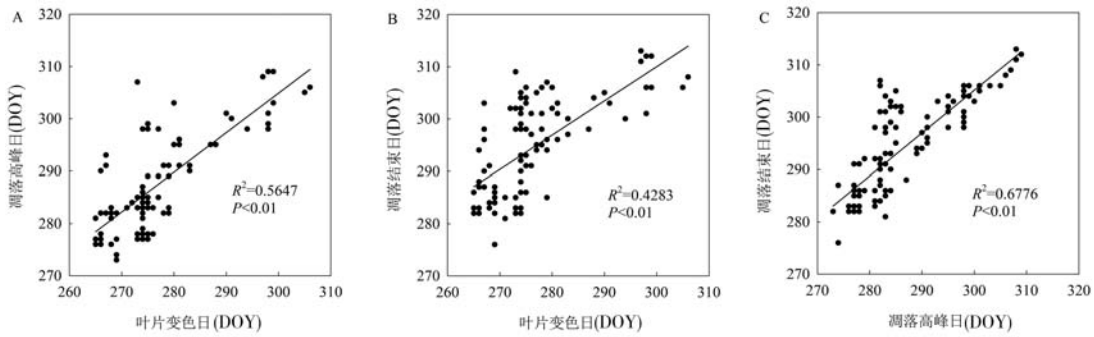


图 1 典型衰老叶颜色



注：不同小写字母代表同一变色类别下不同颜色变化间差异显著；变色类型：R 红色，B 棕褐色，Y 黄橙色，YG 黄绿色，G 绿色；下同。

图 2　叶颜色类型之间颜色指数比较



注：DOY 即日序数，全称 Day of year，指一年中的第几天。

图 3　叶衰老物候参数之间的关系

表 4　各树种叶凋落物候参数

树种	叶片变色日（DOY）	凋落高峰日（DOY）	凋落结束日（DOY）
白桦	265. 8±0. 84	281. 6±0. 55	286. 4±2. 07
北美红枫	266. 8±0. 45	291. 6±1. 34	298. 8±4. 09
辽椴	267. 4±3. 71	277. 2±0. 84	283. 2±2. 17
水曲柳	268. 6±2. 51	280. 8±2. 86	282. 4±1. 52
朝鲜槐	268. 6±0. 55	276. 6±0. 55	284. 6±1. 52
花楸树	270. 5±2. 95	280. 0±2. 70	286. 8±4. 51
山楂	272. 2±1. 79	276. 4±1. 34	281. 0±2. 83
紫椴	272. 8±3. 49	276. 0±2. 35	287. 4±3. 78
山皂荚	273. 0±1. 73	283. 3±0. 58	285. 7±0. 58
紫叶稠李	273. 4±0. 89	285. 4±0. 89	301. 6±0. 55
暴马丁香	273. 8±0. 45	280. 2±1. 64	291. 8±4. 60
胡桃楸	274. 0±0. 00	285. 7±2. 31	287. 3±1. 15
色木槭	274. 0±3. 54	279. 6±2. 79	284. 2±1. 30

表 4(续)

树种	叶片变色日（DOY）	凋落高峰日（DOY）	凋落结束日（DOY）
蒙古栎	274. 2±0. 45	283. 8±0. 84	299. 0±6. 96
榆树	274. 2±0. 84	300. 0±3. 94	302. 8±4. 44
五叶地锦	275. 7±1. 15	298. 0±0. 00	305. 7±0. 58
稠李	276. 0±4. 00	285. 2±3. 35	298. 6±0. 89
长白忍冬	277. 3±2. 08	290. 3±1. 15	294. 7±1. 53
小叶杨	277. 4±1. 34	282. 4±0. 55	303. 2±3. 03
紫丁香	278. 6±3. 36	290. 2±7. 60	297. 0±5. 24
枫杨	279. 0±2. 00	290. 3±1. 15	295. 3±1. 15
榆叶梅	279. 2±2. 17	292. 0±5. 39	300. 2±2. 59
东北杏	290. 7±3. 51	297. 7±2. 52	300. 3±2. 52
北京丁香	294. 6±0. 45	299. 8±1. 34	305. 4±4. 09
旱柳	297. 6±0. 89	308. 4±0. 55	311. 8±0. 84
梓	303. 0±4. 36	303. 0±4. 36	305. 0±3. 61

注：表中数值为日平均值±标准误。

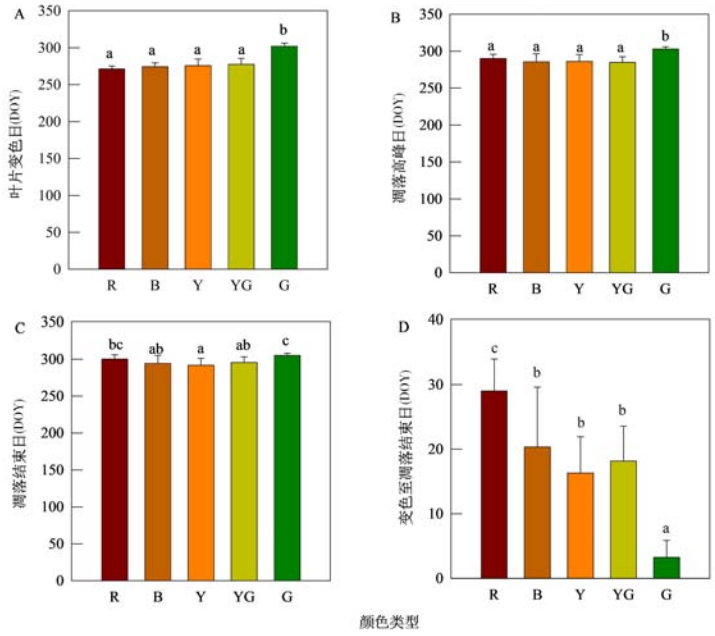


图 4 秋叶颜色类型之间叶衰老物候参数比较

5 种衰老叶颜色类型之间叶衰老物候参数差异显著（表 5、图 4）。秋叶从红紫叶树种到绿叶树种，开始变色日逐渐延迟（图 4A）。红叶树种最先开始变色，经历多次霜冻后凋落结束，即红紫叶树种从开始变色到凋落结束时间较长（图 4D）。秋季衰老叶呈绿色的树种，开始变色和凋落高峰的日期较晚（图 4B~C）。以上表明红紫叶树种同时具有更好的颜色视觉和更长的秋叶观赏期。

表 5 不同秋叶颜色类型叶衰老物候参数的方差分析

叶衰老物候参数	统计量	
	F	*P*
变色时间日	12.730	<0.01
凋落高峰日	4.237	<0.01
凋落结束日	4.44	<0.01
变色至凋落结束日	19.816	<0.01

不同颜色类型叶凋落物候 Duncan 多重比较结果也表明，秋季为绿色树种的叶变色日和凋落高峰日均显著高于衰老叶为其他颜色的树种（图 4A~B）；秋叶为黄橙色的树种凋落结束日显著低于衰老叶为红紫色和绿色（图 4C）；秋叶为棕色、黄橙色、黄绿色的树种变色至凋落结束日没有显著差异。红紫叶树种变色至凋落结束日显著高于其他颜色树种，绿叶树种变色至凋落结束日显著低于其他颜色树种（图 4D），红紫叶树种秋季观赏期明显长于其他树种。

3.3 衰老叶 N 含量与颜色关系

衰老叶 N 含量变化范围为 5.38~20.39 mg · g^{-1}，平均为 11.07 mg · g^{-1}。仅 2 个树种<7 mg · g^{-1}（花楸和北美红枫，占 26 个树种的 8%），属于完全重吸收；而 13 个树种>10 mg · g^{-1}（占 26 个树种的 50%），属于不完全重吸收，其余 11 个树种（占 26 个树种的 42%）介于完全重吸收与不完全重吸收之间。

衰老叶颜色显著影响衰老叶 N 含量（图 5），而且衰老叶 N 含量与各颜色指数均存在显著的线性关系（图 6）。秋季衰老叶片中颜色越绿的叶片 N 含量越高、越红的 N 含量越低。其中，比值绿度指数、相对红度指数、绿红植被指数与凋落叶 N 含量相关性较好。

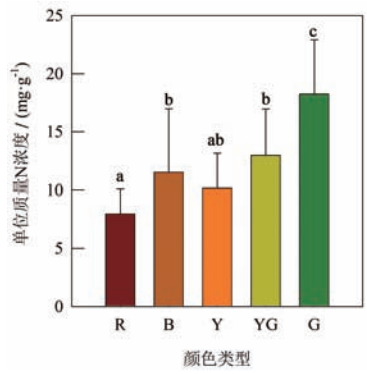


图 5 衰老叶 N 含量与颜色类型的关系

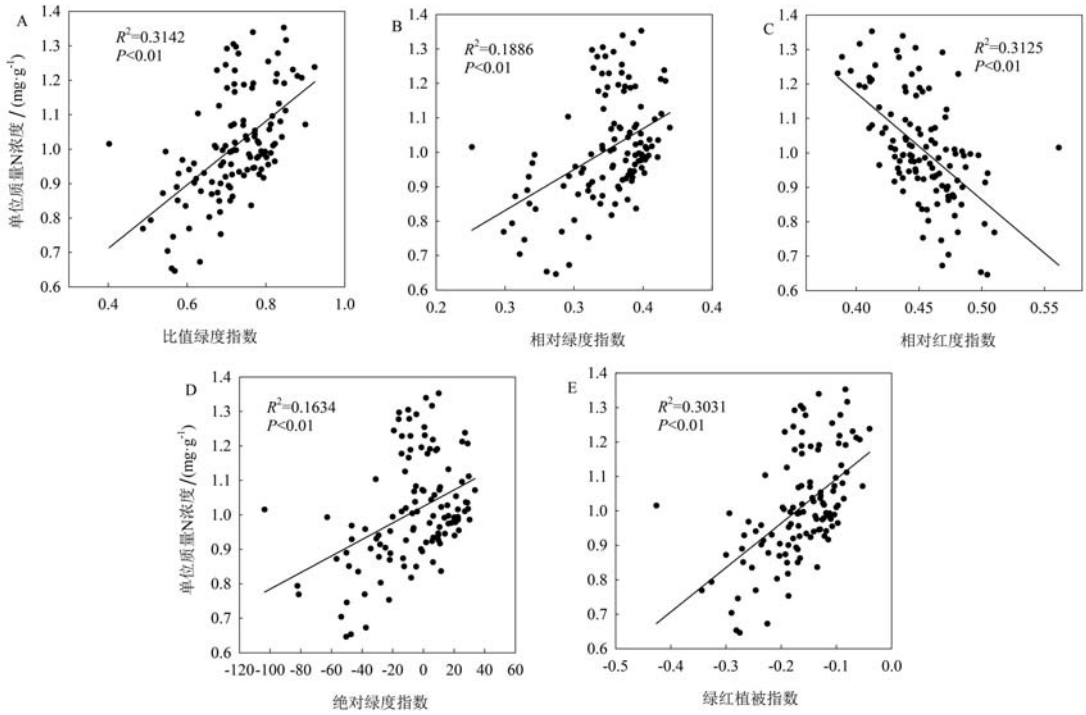


图 6　衰老叶 N 含量与颜色指数的关系

4　讨论

温带树木的叶片尽管都集中在秋季凋落，然而由于树种不同，叶片脱落时间具有较大的差异[14]。凋落物候受许多因素影响，同一地点不同树种凋落高峰出现的时间也不尽相同[12]，而温度、降雨、光照强度等气候因子改变也会影响同一树种秋季叶片的衰老和凋落[13]。本研究表明，东北林业大学校园大部分乡土树种的凋落高峰较早，且持续时间短，色木槭、辽椴、紫椴、山楂、水曲柳、朝鲜槐、花楸凋落开始时间集中在 9 月下旬，凋落高峰时间在 10 月上旬；叶片红紫色树种凋落开始至凋落结束时间较长，紫叶稠李、北美红枫、五叶地锦凋落期长达 30 天。因此，红紫色秋叶树种不仅颜色美丽，而且具有较长的秋叶观赏期。

环境对衰老叶中的色素有很大影响。温度可以显著影响叶片中花青素和叶绿素的含量[29]，同时也影响着花青素的稳定性，其中低温能显著保持花青素的稳定性[30]，低温条件下花青素含量增加，有利于红色的表现；在高温条件下，花青素的降解降低叶红色[31-32]。当温度变低时，衰老叶片为红色的植物的颜色会变红，这说明红叶树种的抗寒能力可能会比其他颜色物种抗寒能力强。此外，光照强度与花青素含量呈正相关，与叶绿素含量和类胡萝卜素含量呈负相关[33]，日照时间长短等外部因素的变化均会导致树叶色深浅的变化[34]。土壤中的养分状况也对彩叶呈色有影响，适度缺氮、缺磷或者二者同时缺少均可以引起花青素增加[35]，说明土壤的营养缺乏也可能是红叶物种更丰富的潜在原因[36]。对于某些物种，当土壤 pH 微酸性或中性时叶片呈黄色，随着 pH 的升高，叶片转为黄绿色[37]。

凋落叶养分被认为是养分回收度，回收度越低表明植物养分策略越保守[18]。东北林业大学校园主要阔叶树种衰老叶 N 含量较高，绝大部分属于不完全重吸收（>10 mg · g^{-1}）或介于完全重吸收与不完全重吸收（7~10 mg · g^{-1}）之间，暗示这些城市绿化树种大多数不受 N 元素限制，这与帽儿山天然次生林的结果类似[11]。值得注意的是，凋落叶 N 含量随相对红度指数升高而降低，随相对绿度指数和绿红植被指数增加而增加。以上表明颜色指数可以在一定程度上指示植物的养分保守性，间接支持花青素促进养分重吸收假说[2,38]。

多种秋叶颜色搭配可以提高园林绿化的景观

效果，起到良好的装饰作用，对提高居住环境品质和城市建设品位具有积极的促进作用。若只从观赏价值角度讲，栽植秋季观赏期长的树种，有利于城市美化，如引入的红紫色树种（紫叶稠李、五叶地锦、北美红枫）凋落期相对较长，树种的观赏期也就较长。北美红枫在美国、加拿大等地被广泛用于园林造景、庭院绿化和行道树建设等，国内引种栽培优良品种，红叶观赏期最长可达2个月[39]。因哈尔滨秋季降温较快，昼夜温差大等原因，北美红枫观赏期缩短至1个月左右；而同为槭树科槭树属植物的乡土树种色木槭，衰老叶颜色较北美红枫浅，为黄橙色，开始变色时间较晚，红叶观赏期10天左右，观赏价值低于北美红枫。

东北地区受气候条件的限制，绿化树种相对缺乏，色彩比较单调，更有必要加强彩叶树种的应用，引入秋季观赏期较长的秋叶色红紫色树种，如北美红枫。然而，乡土树种在在相对不良的自然环境下，依旧能够完全显示出植物的生物学特征和良好的观赏作用[40]。乡土树种有积极性的叶色变化，很多乡土植物在不同季节下，叶色的变化非常明显[41]。例如，同为红叶树种的乡土槭属树种三花槭（*Acer triflorum*）、紫花槭（*Acer pseudosieboldianum*）、茶条槭（*Acer tataricum* subsp. *ginnala*）叶也为红色，但红叶期长度尚缺乏研究。近年来由于园林观赏需要较多引进外地或者国外树种，导致乡土树种渐渐被大家忽视，因此，未来可以结合乡土树种适应性强、病虫害少和外来树种色彩丰富等优点，对观赏性较强的乡土树种加以开发利用，即推荐挖掘乡土彩叶植物资源的同时，引入观赏期长和观赏价值高的外来树种，从而改善城市生态环境，提高城市景观价值。

5 结论

东北林业大学校园的主要阔叶树种的秋季衰老叶颜色变化较大，红、棕、黄、绿色调均有；不同颜色的衰老叶物候差异体现在变色时间和凋落期的长短，衰老叶红色的树种开始变色和凋落高峰的日期较早，结束日较晚，因此红叶树种观赏期较长；衰老叶的颜色变化与养分有一定的相关性，红叶树种的养分浓度较低，叶片变红具有一定的养分指示作用。因此，应用观赏期长和观赏价值较高的红叶树种有利于提高城市绿化景观，丰富景观色彩，提高生活品质。

致谢：本研究承蒙国家自然基金（32171765）支持，特致殷切谢意。由衷感谢潘君、宋慧敏、郭艳敏和胡桂荣对研究的帮助。

参考文献

[1]梁秋霞,曹刚强,苏明杰,等.植物叶片衰老研究进展[J].中国农学通报,2006,22(8):282-285.

[2]LEV-YADUN S.The phenomenon of red and yellow autumn leaves: Hypotheses, agreementsand disagreements [J]. Journal of Evolutionary Biology,2022,35(10):1245-1282.

[3]LO PICCOLO E, LANDI M. Red-leafed species for urban "greening" in the age of global climate change[J]. Journal of Forestry Research,2021,32(1):151-159.

[4]陈勇,李嘉杰,赵志刚,等.广州市石门国家森林公园彩叶林树种组成及季相变化[J].中国城市林业,2024,22(6):85-91.

[5]TAN X, WANG W H, GAO L, et al.The difference in leaf color quality of Cotinus coggygria during the coloration peak period affected by soil and topographic heterogeneity[J].Catena,2023,228:107140.

[6]CHABOTB F, HICKS D J.The ecology of leaf life spans[J]. Annual Review of Ecology and Systematics,1982,13:229-259.

[7]MORIN X, LECHOWICZ M J, AUGSPURGER C, et al. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century[J].Global Change Biology,2009,15(4):961-975.

[8]宋慧敏.帽儿山次生杂木林凋落物氮、磷归还与重吸收及其误差分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2022.

[9]武启骞,王传宽,张全智.6种温带森林凋落量年际及年内动态[J].生态学报,2017,37(3):760-769.

[10]张新平,王襄平,朱彪,等.我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素[J].植物生态学报,2008,32(5):1031-1040.

[11]WANG X C,WANG Q,CHEN Y,et al.Coloration and phenology manifest nutrient variability in senesced leaves of 46 temperate deciduous woody species[J].Journal of Plant Ecology,2022,15(4):700-710.

[12]原作强,李步杭,白雪娇,等.长白山阔叶红松林凋落物组成及其季节动态[J].应用生态学报,2010,21(9):2171-2178.

[13]ESTIARTE M,PEÑUELAS J.Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency [J]. Global Change Biology,2015,21(3):1005-1017.

[14]范春楠,郭忠玲,郑金萍,等.磨盘山天然次生林凋落物数量及动态[J].生态学报,2014,34(3):633-641.

[15]WANG X C,SONG H M,LIU F,et al.Timing of leaf fall and changes in litter nutrient concentration compromise estimates of nutrient fluxes and nutrient resorption efficiency[J].Forest Ecology and Management,2022,513:120188.

[16]KILLINGBECK K T,HAMMEN-WINN S L,VECCHIO P G,et al.Nutrient resorption efficiency and proficiency in fronds and trophopods of a winter-deciduous fern,*Dennstaedtia punctilobula*[J].International Journal of Plant Sciences,2002,163(1):99-105.

[17]KILLINGBECK K T.Nutrients in senesced leaves:keys to the search for potential resorption and resorption proficiency[J].Ecology,1996,77(6):1716-1727.

[18]TATENO R,TAKEDA H.Nitrogen resorption efficiency of 13 tree species of a cool temperate deciduous forest in Central Japan[J].Journal of Forest Research,2018,23(2):91-97.

[19]NIINEMETS U,TAMM U.Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands[J].Tree Physiology,2005,25(8):1001-1014.

[20]金晓玲,刘晓玲,徐志毅,等.槭树秋季叶片呈色机理及化学物质的调控[J].湖南生态科学学报,2019,6(1):42-48.

[21]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].The New Phytologist,2022,233(1):22-29.

[22]申奥,朱教君,闫涛,等.辽东山区主要阔叶树种叶片养分含量和再吸收对落叶时间的影响[J].植物生态学报,2018,42(5):573-584.

[23]赵戈榕,汪永英,刘燕,等.校园内植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响[J].科技通报,2022,38(11):108-115.

[24]刘帆,王传宽,王兴昌.近地遥感在森林冠层物候动态监测中的应用[J].应用生态学报,2018,29(6):1768-1778.

[25]ADAMSEN F J,PINTER P J,BARNES E M,et al.Measuring wheat senescence with a digital camera[J].Crop Science,1999,39(3):719-724.

[26]GILLESPIE A R,KAHLE A B,WALKER R E.Color enhancement of highly correlated images.II.Channel ratio and "chromaticity" transformation techniques[J].Remote Sensing of Environment,1987,22(3):343-365.

[27]WOEBBECKE D M,MEYER G E,VON BARGEN K,et al.Color indices for weed identification under various soil,residue,and lighting conditions[J].Transactions of the ASAE,1995,38(1):259-269.

[28]SHIGETO K,MAKOTO N.An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera[J].Annals of Botany,1998,81(1):49-54.

[29]张力,于晓英,冯岳东,等.温度影响彩叶植物叶片呈色的研究进展[C]//园艺学文集 5.长沙:湖南农业大学园艺园林学院,2010.

[30]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.

[31]ISLAM M S,JALALUDDIN M,GARNER J O,et al.Artificial shading and temperature influence on anthocyanin compositions in sweetpotato leaves[J].HortScience,40(1):176-180.

[32]胡可,韩科厅,戴思兰.环境因子调控植物花青素苷合成及呈色的机理[J].植物学报,2010,45(3):307-317.

[33]王永格,卜燕华,舒健骅,等.光照强度对'丽红'元宝枫秋季叶色变化的影响[J].西北林学院学报,2015,30(2):70-76.

[34]李红秋,刘石军.光强度和光照时间对色叶树叶色变化的影响[J].植物研究,1998,18(2):58-69.

[35]孙明霞,王宝增,范海,等.叶片中的花色素苷及其对植物适应环境的意义[J].植物生理学通讯,2003,39(6):688-694.

[36]ZOHNER C M,BENITO B M,FRIDLEY J D,et al.Spring predictability explains different leaf-out strategies in the woody floras of North America,Europe and East Asia[J].Ecology Letters,2017,20(4):452-460.

[37]袁涛,苏雪痕.彩叶木本花卉金叶莸的引种与栽培[J].园艺学报,2004,31(1):112-114.

[38]JOLY S.Red and yellow pigments in autumn leaves are associated with higher nitrogen resorption[J].Journal of Evolutionary Biology,2022,35(1):180-182.

[39]姚飞.7 种红花槭在北京的生态适应性评价[J].林业科技开发,2014,28(2):29-32.

[40]张寄英.北方乡土植物与现代城市园林景观建设探究[J].山西林业,2022(S2):76-77.

[41]李许文,唐小清,叶自慧,等.基于近自然林理论的生态景观林带建设探讨:以广州市科韵路为例[J].中国城市林业,2014,12(2):10-13.