

# 额济纳胡杨叶色变化特征及其影响气象因子分析

郭春燕<sup>1,2,3</sup>, 王 佳<sup>2</sup>, 郝玉珠<sup>2</sup>, 李 忠<sup>2\*</sup>, 刘文英<sup>4</sup>

(1 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010000; 2 内蒙古自治区气象服务中心, 呼和浩特 010000; 3 内蒙古自治区人工影响天气重点实验室, 呼和浩特 010000; 4 额济纳旗气象局, 内蒙古阿拉善左旗 750306)

**摘 要:**以额济纳胡杨林为研究对象,在秋季胡杨叶片转色不同时期,测定其叶色参数、色素含量,并分析同期的环境气象条件变化特征及其与叶色参数、色素含量的相关性,探寻秋季额济纳胡杨叶片变色的主要影响因素,为胡杨叶片衰老及黄叶物候景观气象服务奠定基础。结果表明:(1)在秋季额济纳胡杨叶片转色过程中,其叶色参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $C^*$  值均呈逐渐上升趋势, $b^*$  和  $h$  值先增大后减小,视觉上叶片颜色变化依次表现为绿色、浅黄、金黄和橘黄色。(2)胡杨叶片变色期间,叶片中叶绿素含量大幅度下降,叶黄素、类胡萝卜素含量有缓慢上升再小幅下降趋势,花色素苷含量变化不大,可溶性糖含量也表现为先增大后减少的态势;与变色始期相比,变色终期总叶绿素与类胡萝卜素比值累计下降了 97.5%。(3)在胡杨叶片变色同期,环境温度逐渐降低,气温日较差稳定维持在 14℃ 左右,直接辐射量逐渐减弱,平均空气相对湿度先增大后减小,但总体表现为增大趋势,蒸发量逐渐减小。(4)在胡杨叶片转色期间,叶色参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$  与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及叶绿素与类胡萝卜素比值均呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ );环境最高气温、最低气温、平均气温与叶色参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$  均表现为显著负相关关系( $P < 0.05$ ),而与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量以及叶绿素与类胡萝卜素比值均呈显著或极显著正相关关系;空气相对湿度与叶黄素、类胡萝卜素含量表现出显著或极显著正相关关系。研究发现,额济纳胡杨叶片在衰老变黄过程中逐渐显现出由浅到深的黄叶景观,这是叶绿素快速分解,类胡萝卜素含量相对升高的结果;气温是影响胡杨叶片衰老变黄的主要限制性气象因子,低温加速了叶绿素分解,较大的空气湿度有利于类胡萝卜素含量维持稳定,保持更长时间的黄叶景观。

**关键词:**额济纳;胡杨;衰老;叶色参数;色素含量;气象要素

中图分类号:Q945.79;S792.11 文献标志码:A

## Analysis of Variation Characteristics of Leaf Color of *Populus euphratica* and Influencing Meteorological Factors in Ejina

GUO Chunyan<sup>1,2,3</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>, HAO Yuzhu<sup>2</sup>, LI Zhong<sup>2\*</sup>, LIU Wenyong<sup>4</sup>

(1 Inner Mongolia Meteorological Science Institute, Huhhot 010000, China; 2 Inner Mongolia Meteorological Service Center, Huhhot 010000, China; 3 Inner Mongolia Key Laboratory of Manual Weather Modification, Huhhot 010000, China; 4 Ejina Meteorological Bureau, Alashan, Inner Mongolia 750306, China)

**Abstract:** Taking *Populus euphratica* in Ejina as the research object, we analyzed the characteristics of leaf color parameters, pigment contents of *P. euphratica* and meteorological conditions in different periods. The main influencing factors of leaf discoloration of *P. euphratica* were explored, which laid a research

收稿日期:2022-08-10;修改稿收到日期:2023-01-27

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2019MS04007);中央引导地方科技发展资金(2020ZY0019);内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx201704)

作者简介:郭春燕(1980—),女,博士,高级工程师,主要从事气象服务与应用气象研究。E-mail:yanzi\_guo123@163.com

\* 通信作者:李 忠,正研级高级工程师,主要从事气象服务研究。E-mail:13848138555@139.com

basis for leaf senescence of *P. euphratica* and meteorological service of yellow leaf phenology landscape in Ejina in autumn. The results showed that: (1) the leaf color parameters  $L^*$ ,  $a^*$  and  $C^*$  of *P. euphratica* showed a gradually rising tendency, the  $b^*$  and  $h$  values increased first and then decreased. The changes of leaf color showed green, light yellow, golden and orange in leaf color changing process. (2) During the discoloration period of *P. euphratica*, the content of leaf chlorophyll in leaves decreased significantly, while the lutein and carotenoids contents increased slowly first and then decreased slightly, the content of anthocyanin had little change, and the content of soluble sugar also increased first and then decreased. The ratio of total chlorophyll to carotenoids decreased by 97.5% at the end of discoloration compared with the initial stage. (3) In the same period of leaf discoloration of *P. euphratica*, the temperature gradually decreased, and the daily temperature range kept relatively stable at about 14 °C, the direct radiation gradually decreased, and the average relative humidity first increased and then decreased, but the overall performance was an increasing trend. The evaporation decreased gradually as a whole. (4) During the color changing period, leaf color parameters  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  were significantly negatively correlated with chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll contents and the ratio of chlorophyll to carotenoids ( $P < 0.01$ ). The maximum temperature, minimum temperature and average temperature showed significant negative correlation with leaf color parameters  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  ( $P < 0.05$ ), while they showed significant or extremely significant positive correlation with chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll contents and the ratio of chlorophyll to carotenoid. Air relative humidity showed a significant or extremely significant positive correlation with lutein and carotenoid. The study revealed that the leaves landscape of *P. euphratica* in Ejina gradually showed light to dark yellow in the process of senescence, which was the result of large and rapid decomposition of chlorophyll and relative increase of carotenoid content. Temperature was the main limiting meteorological factor affected the senescence and etiolation of *P. euphratica* leaves. Chlorophyll decomposition was accelerated at low temperature, and higher air humidity was conducive to keeping carotenoid content remain stable and maintaining a longer viewer period of yellow leaf landscape.

**Key words:** Ejina; *Populus euphratica*; leaf senescence; color parameters; pigment contents; meteorological elements

胡杨(*Populus euphratica*)为杨柳科杨属植物,系古地中海成分,是第三世纪残余的古老树种,也是中国西北地区唯一能够独自成林的乔木树种<sup>[1]</sup>,在干旱地区及绿洲生态系统中发挥着极其重要的作用。内蒙古自治区阿拉善盟额纳旗以胡杨林特色景观著称,内有胡杨林约 2.97 万  $\text{hm}^2$ ,是世界上仅存的三处大型胡杨林之一,另外两处位于新疆塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠和北非的撒哈拉沙漠<sup>[2]</sup>。额济纳胡杨林保护最为完整,被公认是最美丽、景色最壮观的原生态胡杨林。每到秋季,胡杨叶色如染,金黄明媚灿烂,在湛蓝天空映衬下,景色如诗如画,美不胜收。

作为绿洲建群植物种,胡杨在逆境中适应力极强。目前对于胡杨群落或植株的研究多集中在物候节律、生长规律<sup>[3]</sup>、抗逆性生理特性<sup>[4]</sup>、生态用水机理<sup>[5]</sup>、种群结构与分布格局<sup>[6-8]</sup>、繁殖特性和更新机制<sup>[9-12]</sup>、生态效益评价<sup>[13-14]</sup>以及旅游活动对胡杨林保护区植物群落的影响<sup>[15]</sup>等方面;对于枝叶等功能器官的相关研究,已在叶片解剖结构<sup>[16]</sup>、叶性状<sup>[17]</sup>、叶绿素荧光特性<sup>[18]</sup>、碳氮同位素及枝叶功能

性状<sup>[19-20]</sup>等方面取得了一些成果。额济纳胡杨林既是内蒙古西部地区重要的生态屏障,也带动了当地旅游业的长足发展。作为戈壁荒漠独具特色的秋色叶树种,额济纳胡杨林黄叶物候景观已入选全国首批“天气气候景观观赏地”<sup>[21]</sup>,其观赏价值顶峰时段集中在秋季叶黄时期。伴随着成熟叶片逐渐衰老变黄,黄叶物候景观随之形成。据观察:叶片从变黄初期到凋落持续时间大约在 1 个月左右,而其最佳观赏时间段也只在 10 d 上下,不同年份,变色早晚和速度有所不同。那么,胡杨叶片在转色过程中,颜色变化有什么样的规律?内部发生了怎样的生理变化?外部环境对变色产生了哪些影响?截至目前,尚未见到胡杨叶色变化机理及其影响因子方面的相关研究报道。因此,本研究通过观测胡杨秋季叶色的时序性表现,分析其成熟叶片的衰老、叶色转变过程中内在的生理变化,并且与当地同期气象条件相结合,探明胡杨叶色变化规律、内部生理特征及环境气象因子对变色的影响机理,为进一步研究胡杨叶片衰老变色及黄叶物候景观的形成发展、开展观赏期气象服务奠定理论基础。

## 1 研究区概况

额济纳胡杨林自然保护区地处内蒙古阿拉善盟额济纳旗境内(图 1),地理范围  $41^{\circ}30' \sim 42^{\circ}07' N$ 、 $101^{\circ}03' \sim 101^{\circ}17' E$ ,总面积  $262.53 \text{ km}^2$ ,核心区面积  $87.74 \text{ km}^2$ ,水分补给主要靠黑河中上游每年泄洪期对额济纳河的生态输水,地下水位  $1 \sim 3 \text{ m}$ 。气候极端干旱,年降水量  $37.9 \sim 49.3 \text{ mm}$ ,蒸发量  $3746 \sim 4213 \text{ mm}$ ,干燥度为  $11.0 \sim 13.7$ ,日照时间长,辐射强,大风日数多,土壤以林灌草甸土为主,并与固定、半固定风沙土、潮土等相间分布,属典型的荒漠地带<sup>[11]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样本选择及测定时间确定

试验于 2021 年进行。试验地选择在额济纳旗大漠胡杨林景区一道桥、二道桥地区,选择龄级接近、长势一致、生长良好的胡杨成年样本植株 50 株。经测定,样株胸径( $31.56 \pm 5.24$ ) cm,株高( $8.05 \pm 1.28$ ) m,冠幅约( $33.25 \pm 4.09$ )  $\text{m}^2$ ,且冠部全部为阔叶。试验地距离水源相对较近,属于冲积淤积滩地。秋季胡杨变色,在视觉上表现为景观整体颜色发生变化,依据秋色叶树种变色期定义<sup>[22]</sup>,结合胡杨自身特性,在本实验中,当供试样株数量的 20% 即 10 株树冠大约有 5% 以上叶片变为半黄,视为变色开始;当供试样株树冠 90% 以上叶片变黄时,视为叶全部变色。因此,叶变色期间,由人工定期观测记录叶变色情况。2021 年,胡杨叶片初始变色时间为 9 月 30 日,至 10 月 15 日叶全部变色。为了更清楚地分析叶色变化规律,所有测试从 9 月 25 日绿叶时期开始,每 5 d 进行 1 次。

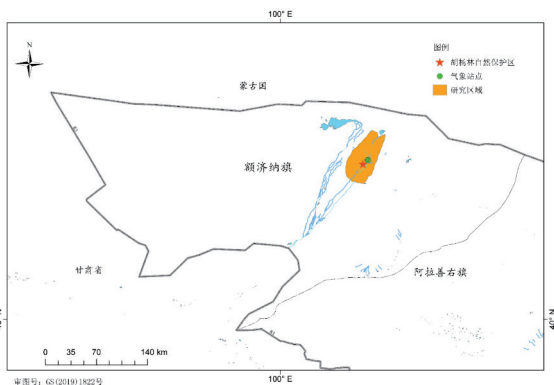


图 1 额济纳胡杨林自然保护区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical map of *P. euphratica* nature reserve in Ejina

### 2.2 测定指标及方法

胡杨叶色开始变化后,选择供试样株 10 株,每 5 d 于上午 9:00—10:00 采集每植株树冠中部东、西、南、北 4 个方向叶色相近的叶片 20 枚,共计 200 枚,混合均匀后,再从中抽取 50 枚叶片用于各项色素指标测定。叶片采摘后,迅速带回室内,当即完成各项叶色参数测定,随后置于小型液氮罐中冷冻保存。待试验结束,将所有冷冻样本叶片运输到实验室进行其他色素及成分指标测定。

**2.2.1 叶色参数** 叶色参数测定参照 Wang 等<sup>[23]</sup>方法进行,采用全自动 SR62 色差仪测定叶色参数, D65 光源,测色光斑直径为 4 mm,每叶片重复 3 次,记录  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。叶色参数是用来定量表征色泽在三维空间中变化的变量值<sup>[24]</sup>。其中, $L^*$  表示光泽明亮度, $L^*$  值越大,亮度越高,范围从 0(黑)~100(白); $a^*$  值表示红绿色差, $a^*$  值越大,红色越深, $a^*$  值越小,绿色越深; $b^*$  值表示黄蓝色差, $b^*$  值越大,黄色越深, $b^*$  值越小,蓝色越深<sup>[25-26]</sup>。同时,可通过以上参数计算饱和度 [ $C^* = (a^* + b^*)^{1/2}$ ] 和色相角 [ $h = \arctan(b^* / a^*)$ ]<sup>[27-28]</sup>。 $C^*$  值表示色彩饱和度,即颜色离开相同明度值灰色的程度,有强弱之分。 $h$  值表示色相角,色相是颜色的属性之一,即各类色彩的相貌称谓<sup>[26]</sup>。

**2.2.2 叶片色素及可溶性糖含量** 叶片色素含量委托内蒙古农业大学测定。叶绿素含量测定采用丙酮-乙醇混合液分光光度法<sup>[29]</sup>;叶黄素含量测定采用高效液相色谱分析方法<sup>[30]</sup>;类胡萝卜素含量通过丙酮提取后,采用高效液相色谱检测<sup>[31]</sup>;花色苷含量测定采用可见分光光度法<sup>[32]</sup>;可溶性糖含量测定采用铜还原碘量法<sup>[33]</sup>。每一批样本重复测定 3 次,结果取平均值。

### 2.3 叶色变化影响气象因子确定

因胡杨黄叶物候景色属典型的天气气候景观,其发生、发展与天气情况关联紧密,具有明显的规律性。因此,为了进一步探究叶色变化外部原因,需分析变色同期当地气象条件。本研究中采用额济纳旗国家基准气候站(1959 年建站)气象数据逐日观测值,气象要素包括气温、日照时数、相对湿度、直接辐射量、蒸发量等因子。

### 2.4 数据分析

采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行分析,数据统计与分析试验结果均以平均值  $\pm$  标准差表示。采用单因素方差分析(One way ANOVA)和 Pearson 相关分析对数据进行比较和相关显著性检验。

采用 Excel 2010 软件制作图表。

### 3 结果与分析

#### 3.1 额济纳胡杨林黄叶物候景色变化概况

额济纳胡杨叶片一般在9月中下旬开始变色,随着时间的推移,植株树冠黄色叶片逐渐增多,颜色也在发生着变化,叶色由绿色(A)逐渐转变表现为半黄(B)、浅黄(C)、金黄(D)、橘黄(E)几种色阶(图2);胡杨变色景观持续时间较短,大多在1个月以内。2021年初始变色日为9月30日,10月10日绝大部分树叶表现为金黄色,10月15日供试样株90%叶片均已变色,胡杨进入叶全部变色期,此时大约半数以上叶片视觉呈现为橘黄色,之后维持橘黄色直至进入落叶期。

#### 3.2 额济纳胡杨林变色过程中叶色参数变化特征

**3.2.1 叶色参数动态变化** 对不同变色时期的胡杨叶片进行了叶色参数测定,结果(图3)表明:额济纳胡杨在秋季叶片转色期间,叶色参数值发生了明显变化;随着时间的推移,总体上各叶色参数值均呈明显增大趋势,表现出相似的规律性。

其中,胡杨叶片  $L^*$  值、 $a^*$  值、 $C^*$  值最大值均出现在10月15日左右橘黄时期,数值分别为63.82、14.62、7.44,较9月25日绿叶时期的初始试验值分别增大29.29%、358.30%、88.35%;叶片  $b^*$  值在变色期间显著升高, $h$  值呈现出先减小后增大态势,胡杨植株由绿色(9月25日)变至金黄色(10月10日)过程中, $b^*$  值变幅为21.42~42.12, $h$  值变幅为64.12~75.74;叶片变色期间,所有叶色参数在不同时期之间均有显著性差异。以上结果表明:随着时间的推移,胡杨叶片绿色逐渐减弱,黄色表达的饱和度和明度逐渐增强,黄色不同程度逐渐加深,在视觉上依次出现浅黄、金黄、橘黄不同色阶的显色景观。

**3.2.2 叶色参数间相关性分析** 表1显示,在胡杨叶片变色期间,额济纳胡杨各叶色参数之间均表现为正相关关系,且均达到极显著水平( $P < 0.01$ ),这说明各叶色参数之间关系非常密切。

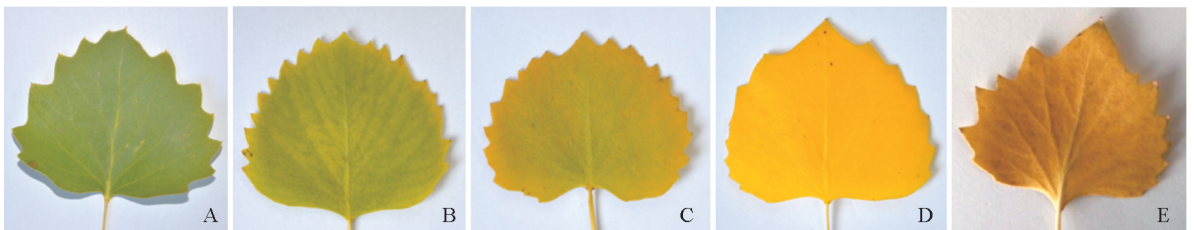
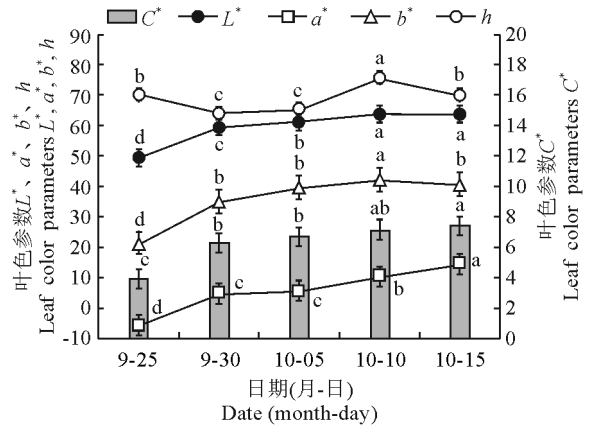


图2 额济纳胡杨叶片颜色变化

Fig. 2 Leaf color change of *P. euphratica* in Ejina

### 3.3 额济纳胡杨林变色过程中叶片色素和可溶性糖含量变化特征及其相关性

**3.3.1 叶片色素和可溶性糖含量动态变化** 胡杨秋季叶色变化与其叶片内所包含色素的种类、含量、动态比例以及一些营养物质有密切关系,是各类色



参数内小写字母表示不同时期间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。下同

图3 额济纳胡杨不同时期叶色参数动态变化

Lowercase letters within same color parameter indicate significant differences among different periods at 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below

Fig. 3 Dynamic changes of the leaf color parameters of *P. euphratica* in different periods

表1 额济纳胡杨叶色参数间相关性分析

Table 1 The correlation coefficients among the leaf color parameters in *P. euphratica*

参数 Parameter	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h$
$L^*$	1	0.865**	0.929**	0.941**	0.796**
$a^*$		1	0.838**	0.942**	0.775**
$b^*$			1	0.965**	0.810**
$C^*$				1	0.858**
$h$					1

注:\*\*表示在0.01水平显著相关,\*表示在0.05水平显著相关。下同

Note:\*\* indicates a significant correlation at the 0.01 level,\* indicates a significant correlation at the 0.05 level. The same as below

素如叶绿素、类胡萝卜素、花色素苷等共同作用的结果。其中,由图4,A可知,在绿叶时期(9月25日),额济纳胡杨叶片叶绿素含量处于最大值,总叶绿素、叶绿素a和叶绿素b含量分别在0.53 mg/g、0.33 mg/g和0.20 mg/g左右,叶绿素a含量高于叶绿素b;随着叶片逐渐变黄,叶绿素含量急剧下降,至10月15日,叶片总叶绿素含量下降至0.02 mg/g,较初始值降低了96.2%,在所有色素中占比也由65.16%降低到4.23%(图4,C),变幅为-60.93%。叶绿素a/叶绿素b值由初期1.61下降至0.94,说明叶绿素a含量减少速度更快。

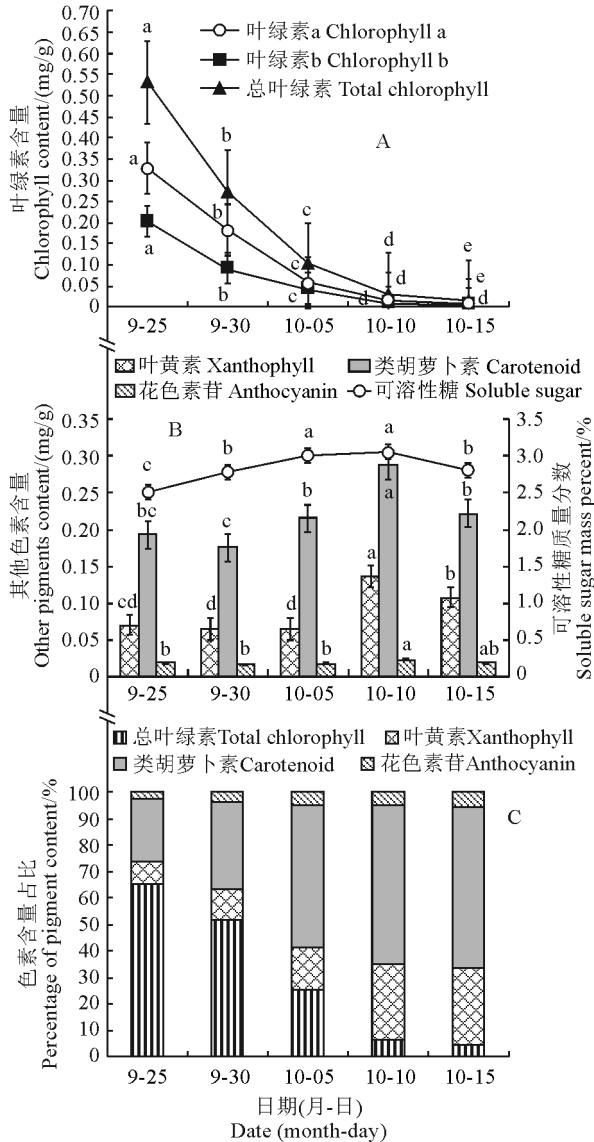


图4 额济纳胡杨不同时期叶片色素及可溶性糖含量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of leaf pigment and soluble sugar contents of *P. euphratica* in different periods in Ejina

同时,秋季胡杨叶片之所以呈现不同程度的黄色,是由于内部类胡萝卜素含量的动态变化所致,叶黄素是类胡萝卜素的一种,使叶片呈现黄色。各时期叶片类胡萝卜素、叶黄素、花色素苷及可溶性糖含量的测定结果表明:类胡萝卜素和叶黄素含量随着时间推移均大致表现出先增加后减少趋势(图4,B);至10月10日左右,胡杨叶片变为金黄色,类胡萝卜素和叶黄素含量均达到最大值,分别为0.29 mg/g和0.14 mg/g,约为初始值的1.5~2倍。在试验终期,胡杨叶片总叶绿素与类胡萝卜素比值由最初的2.75减小到0.07,减少了97.5%,而此时类胡萝卜素在总色素中占比为60.62%,其中叶黄素占29.53%(图4,C),二者较初期分别上升36.93%和20.8%。这说明秋季胡杨叶片变色的主要原因是叶绿素大幅度分解,使得类胡萝卜素含量相对升高所致。

另外,在胡杨叶片变色过程中,其花色素苷含量变化幅度不大(图4,B),在总色素中占比处于2.43%~5.62%之间(图4,C),峰值仅相当于同期类胡萝卜素所占比例的1/12。可溶性糖是植物体内重要的营养物质。秋季胡杨变色时,可溶性糖的质量分数也呈现出缓慢的先增加后减少趋势(图4,B),表现与类胡萝卜素一致。

**3.3.2 叶片色素含量和可溶性糖含量间相关性分析** 进一步分析胡杨叶片各色素含量之间相关性发现,叶片叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素三者含量之间互为极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),相关系数均在0.995以上;叶黄素、类胡萝卜素、花色素苷含量三者之间呈显著性正相关( $P < 0.05$ ),相关系数均在0.901以上,各色素含量与可溶性糖含量之间相关性均未达到显著水平(表2)。

### 3.4 额济纳胡杨林变色过程中同期气象条件变化特征

秋色叶树种的呈色与其所处环境条件密切相关,特别是气象因素直接影响着叶片中各类色素的合成与分解以及含量的动态变化,从而使得叶片呈现深浅不一的色彩。前人研究表明气温、光照、湿度等气象因子对叶绿素、花青素有影响<sup>[34-38]</sup>。本研究采用额济纳国家基准气候站数据,分析了叶色变化同期气象条件,以5d为一个时间间隔,计算平均值,其中日照时数和直接辐射量为每5d总量数值。结果(表3)表明,在额济纳胡杨秋季变色期间,其气温总体上逐渐下降,最高气温、最低气温、平均气温降幅为12.5℃左右,气温日较差基本维持在14℃

上下,平均相对湿度先增大后减小,高值出现在10月10日左右,达到42.6%。同时,每5d的总日照时数和直接辐射总量总体上呈减少态势,辐射量减少更为明显,试验终期较始期二者分别减少16.83%和42.87%,蒸发量也减小了42.09%。

### 3.5 气象因子与叶色参数、叶片色素含量的相关系数

**3.5.1 色素含量与叶色参数相关性** 胡杨叶片在变色过程中,外在色差表现和内部色素含量变化有着怎样的关系?相关分析结果(表4)表明:胡杨叶片叶色参数 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$ 与叶绿素a、叶绿素b、总

表2 额济纳胡杨叶片色素及可溶性糖含量间相关系数

Table 2 The correlation coefficients among the leaf pigment and soluble sugar contents in leaves of *P. euphratica*

色素及可溶性糖含量 Pigment and soluble sugar content	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total Chlorophyll	叶黄素 Xanthophyll	类胡萝卜素 Carotenoid	花色素苷 Anthocyanin	可溶性糖 Soluble sugar
叶绿素 a Chlorophyll a	1	0.995 **	0.999 **	-0.612	-0.652	-0.422	-0.847
叶绿素 b Chlorophyll b		1	0.996 **	-0.606	-0.617	-0.382	-0.850
总叶绿素 Total chlorophyll			1	-0.611	-0.640	-0.408	-0.851
叶黄素 Xanthophyll				1	0.901 *	0.934 *	0.472
类胡萝卜素 Carotenoid					1	0.926 *	0.682
花色素苷 Anthocyanin						1	0.361
可溶性糖 Soluble sugar							1

表3 额济纳胡杨叶色变化同期气象条件

Table 3 Meteorological factors during the same period of *P. euphratica* leaf color change in Ejina

气象要素 Meteorological factor	日期(月-日) Date(Month-day)				
	9-25	9-30	10-05	10-10	10-15
最高气温 Maximum temperature/℃	28.90	25.60	19.10	15.60	16.30
最低气温 Minimum temperature/℃	14.60	10.20	10.10	2.40	2.10
平均气温 Average temperature/℃	21.00	16.70	13.90	7.90	8.60
气温日较差 Diurnal temperature difference/℃	13.54	15.36	8.96	13.18	14.18
相对湿度 Relative humidity/%	25.80	22.60	29.40	42.60	30.40
总日照时数 Total sunshine durations(h)	49.90	53.60	32.30	41.40	41.40
直接辐射总量 Total direct radiative/(MJ/m <sup>2</sup> )	54.16	43.04	30.00	36.09	32.77
蒸发量 Evaporation/mm	6.70	5.76	5.84	3.98	3.88

表4 额济纳胡杨叶片色素含量与叶色参数间相关系数

Table 4 The correlation coefficients between the leaf pigments and color parameters of *P. euphratica*

色素、可溶性糖含量 Pigment and soluble sugar content	叶色参数 Color parameter				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h$
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.967 **	-0.941 **	-0.970 **	-0.965 **	-0.825
叶绿素 b Chlorophyll b	-0.992 **	-0.963 **	-0.986 **	-0.990 **	-0.884 *
总叶绿素 Total chlorophyll	-0.978 **	-0.951 **	-0.978 **	-0.976 **	-0.849
叶黄素 Xanthophyll	0.556	0.632	0.491	0.528	0.308
类胡萝卜素 Carotenoid	0.555	0.524	0.540	0.513	0.316
总叶绿素/类胡萝卜素 Total chlorophyll/ Carotenoid	-0.964 **	-0.937 **	-0.967 **	-0.961 **	-0.818
花色素苷 Anthocyanin	0.306	0.364	0.261	0.269	0.021
可溶性糖 Soluble sugar	0.852	0.683	0.888 *	0.823	0.816

表 5 气象条件与叶色参数间相关系数

Table 5 The correlation coefficients between the meteorological factors and color parameters of *P. euphratica*

气象要素 Meteorological factor	叶色参数 Color parameter				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h$
最高气温 Maximum temperature	-0.905*	-0.899*	-0.902*	-0.896*	-0.701
最低气温 Minimum temperature	-0.894*	-0.938*	-0.891*	-0.910*	-0.672
平均气温 Average temperature	-0.914*	-0.941*	-0.884*	-0.906*	-0.721
气温日较差 Diurnal temperature difference	-0.121	-0.045	-0.235	-0.111	-0.055
相对湿度 Relative humidity	0.536	0.502	0.520	0.492	0.301
总日照时数 Total sunshine durations	-0.521	-0.433	-0.600	-0.518	-0.345
直接辐射总量 Total direct radiative	-0.816	-0.813	-0.845	-0.812	-0.820
蒸发量 Evaporation	-0.841	-0.726	-0.782	-0.837	-0.644

表 6 气象条件与叶片色素含量相关系数

Table 6 The correlation coefficients between the meteorological factors and leaf pigments contents of *P. euphratica*

色素和可溶性糖含量 Pigment and soluble sugar content	气象要素 Meteorological factor			
	最高气温 Maximum temperature	最低气温 Minimum temperature	平均气温 Average temperature	相对湿度 Relative humidity
叶绿素 a Chlorophyll a	0.976*	0.878*	0.949*	-0.630
叶绿素 b Chlorophyll b	0.950*	0.891*	0.947*	-0.596
总叶绿素 Total chlorophyll	0.969*	0.885*	0.950*	-0.619
叶黄素 Xanthophyll	-0.735	-0.859	-0.822	0.899*
类胡萝卜素 Carotenoid	-0.780	-0.727	-0.779	0.995**
总叶绿素/类胡萝卜素 Total chlorophyll/Carotenoid	0.980**	0.881*	0.953*	-0.649
花色苷 Anthocyanin	-0.597	-0.649	-0.639	0.930*
可溶性糖 Soluble sugar	-0.814	-0.627	-0.755	0.673

叶绿素及总叶绿素/类胡萝卜素值呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),  $b^*$  值与可溶性糖含量呈显著正相关( $P < 0.05$ )。此外,其他色差值与色素及可溶性糖含量之间相关不显著。因  $b^*$  值大小直接代表了叶片黄色程度的深浅,由此初步判定可溶性糖含量也在一定程度上影响着叶片黄色饱和度的呈现。

**3.5.2 气象条件与叶色参数间相关性** 为深入研究气象条件对胡杨叶片变色的影响,将变色同期气象因子与叶色参数和色素含量做相关分析,结果(表 5)表明:叶色参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$  与最高气温、最低气温、平均气温均表现为显著负相关关系( $P < 0.05$ )。  $h$  值也与以上气象要素呈负相关关系,但未达到显著水平;所有色差值与气温日较差、日照时数、直接辐射量及蒸发量呈负相关,与空气相对湿度呈正相关,但均未达到显著水平。

**3.5.3 气象条件与色素含量间相关性** 将显著影响胡杨叶色的气象要素与色素含量进行相关性分

析,结果(表 6)表明:叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量及总叶绿素/类胡萝卜素值与最高气温、最低气温、平均气温均呈正相关关系,且达到显著或极显著水平;叶片叶黄素、类胡萝卜素、花色苷含量与空气相对湿度表现出显著或极显著正相关关系。另外,所有测定色素含量和可溶性糖含量与气温日较差、日照时间、直接辐射总量及蒸发量均未表现出显著相关性。

## 4 讨论

胡杨作为额济纳绿洲主体乔木,在秋季成熟叶片伴随着衰老变黄,形成黄叶物候景观,极具特色。叶片作为植物光合作用的重要场所,是衰老最敏感的器官之一<sup>[39]</sup>。叶色变化与叶片内所包含色素的种类、含量、动态比例有密切关系,是各类色素共同作用的结果。研究表明:叶片衰老过程中细胞内最早的结构变化发生在叶绿体,主要是因为叶绿素的

降解快于合成,叶片在形态上表现为黄化<sup>[40]</sup>。

叶色参数是用来定量表征叶片色泽变化的特征值。本试验研究结果表明:额济纳胡杨在秋季叶片转色期间,叶色参数值发生了明显变化。随着时间的推移,叶片 $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值、 $C^*$ 值均呈明显增大趋势,这与秋季银杏叶色变化研究结果<sup>[26]</sup>相似。胡杨在叶片变色过程中,绿色逐渐减弱、黄色表达的饱和度逐渐增强,叶片明亮度也逐步提升,整体在视觉上依次呈现出浅黄、金黄、橘黄几种不同色阶的景观。叶片在变色过程中,叶绿素含量急剧下降,叶黄素和类胡萝卜素含量稳定。试验终期总叶绿素与类胡萝卜素比值较始期减小了97.5%,这说明胡杨成熟叶片衰老逐渐变黄是缘于叶绿素大幅度分解,叶黄素和类胡萝卜素含量相对升高,使得黄色不同程度逐渐显现导致。另外,叶片衰老并不是一个被动的退化过程,而是在叶片发育后期,由植物内部某些因素控制的有序的衰败过程,是一系列有序调控的结果<sup>[41]</sup>,因此,对与胡杨叶片衰老相关的其他因素如蛋白质、酶、RNA、质膜等的分解和营养物质的再次利用等方面,需要后续开展更深入的研究。

彩叶树种呈色受自身内部遗传因素和外部环境条件共同作用,是一个复杂的过程。研究表明对彩叶植物叶片颜色产生重要影响的环境条件主要包括气温、光照、土壤和水分等<sup>[38,42-45]</sup>。普遍认为,低温会加速叶绿素的分解且限制其合成,使各类色素含量的比例发生变化,从而使叶片整体颜色逐步发生转变,这也是秋色叶植物叶色变化的主要原因之一<sup>[42]</sup>。白蜡<sup>[38]</sup>、“洒金”柏<sup>[43]</sup>等随秋季温度降低,叶绿素含量下降,此时类胡萝卜素起主导作用,叶片呈现黄色;紫叶李<sup>[37]</sup>、黄栌<sup>[32]</sup>等则是由于叶绿素减少、花色素苷含量上升使叶片呈现出红色。本研究结果表明:胡杨叶片转色期,环境气温逐渐降低,辐

射量减少,空气相对湿度总体增大。变色期间,气温与各叶色参数均表现为显著负相关( $P < 0.05$ ),而与叶绿素含量及总叶绿素与类胡萝卜素比值均呈显著或极显著正相关关系。更进一步说明:气温是影响叶片变色的主要限制因子。低温加速了胡杨叶片中叶绿素的分解,使得叶黄素、类胡萝卜素成为主体色素,叶片颜色变黄。同时发现:空气相对湿度与叶黄素、类胡萝卜素含量表现出显著或极显著正相关关系,对各叶色参数也有正相关影响,但未达到显著水平。这是由于额济纳地区四季干燥,日照时间长,辐射强。秋季大风、寒潮来临之前,树木尚未落叶,处于生长季末端。太阳辐射较春夏有所减弱,随着气温的下降,蒸发量减小,因而,此时整个胡杨林景区空气相对湿度则较前期有所增大,气象条件的综合变化有利于上述色素维持稳定,从而增强变色期间胡杨叶片色泽明度与饱和度。另外,胡杨生长所需水分主要靠黑河生态输水,不同年份间水分供应情况不同,因此,对于其余环境因子如土壤水分含量、酸碱程度和所含营养元素对叶色变化的影响,后续应进一步开展相关研究。

综上所述,额济纳胡杨叶片在衰老变黄过程中,各叶色参数总体上逐渐增大,随着时间的推移,由浅到深的黄叶景观逐渐显现。色素含量变化分析结果表明:胡杨叶片变黄是缘于叶绿素大幅度、快速分解,类胡萝卜素含量相对升高,使叶片呈现不同程度的黄色。气温是影响胡杨叶片衰老变黄的主要限制性气象因子,低温加速叶绿素分解,较大的空气湿度有利于类胡萝卜素维持稳定。本研究首次分析了秋季胡杨叶色变化特征及其与环境气象条件之间的关系,为深入了解胡杨叶片衰老过程中叶绿素降解代谢奠定了研究基础,也为胡杨黄叶物候景观气象服务提供预报参考。

## 参考文献:

- [1] 王根绪,程国栋. 干旱荒漠绿洲景观空间格局及其受水资源条件的影响分析[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 363-368.  
WANG G X, CHENG G D. The spatial pattern and influence caused by water resources in arid desert oases[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 363-368.
- [2] 刘普幸,陈发虎,勾晓华,等. 额济纳旗近 100 a 来胡杨年表的建立与响应分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 764-768.  
LIU P X, CHEN F H, GOU X H, et al. Establishment of tree-ring chronology and response analysis in past 100 years for

- Ejina Banner, Inner Mongolia[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 764-768.
- [3] 陈占仙,张明铁,菊花,等. 额济纳胡杨生长规律的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 65-69.  
CHEN Z X, ZHANG M T, JU H, et al. Research on the growing rule of *Populus euphratica* in Ejina[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 65-69.
- [4] 余伟莅. 额济纳胡杨物候节律及生理生态特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.



- [5] 萨如拉. 额济纳天然胡杨林生态用水机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [6] 李 军, 张秋良, 高润宏, 等. 额济纳绿洲胡杨种群结构与分布格局研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(2): 187-190.  
LI J, ZHANG Q L, GAO R H, et al. Study on the population structure and distribution pattern of *Populus euphratica* populations in Ejina oasis[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(2): 187-190.
- [7] 马 季, 高婷婷, 王 寅, 等. 额济纳胡杨空间分布格局及其与微生物异质性的关系研究[J]. 林业调查规划, 2020, **45**(3): 107-112.  
MA J, GAO T T, WANG Y, et al. Relationships between microhabitat heterogeneity and spatial distribution pattern of *Populus euphratica* in Ejina of Inner Mongolia[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2020, **45**(3): 107-112.
- [8] 戴晟懋, 孟 和, 高润宏. 荒漠绿洲额济纳胡杨与柽柳生态位分异过程研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(4): 179-183.  
DAI S M, MENG H, GAO R H. Study on ecological niche differential process of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in the Ejina oasis[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(4): 179-183.
- [9] 武逢平. 额济纳荒漠绿洲胡杨繁殖特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [10] 刘倩雯. 额济纳绿洲胡杨种子萌发及幼苗生长影响因子[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [11] 高润宏, 董 智, 张 昊, 等. 额济纳绿洲胡杨林更新及群落生物多样性动态[J]. 生态学报, 2005, **25**(5): 1 019-1 025.  
GAO R H, DONG Z, ZHANG H, et al. Study on regeneration process and biodiversity characteristic of *Populus euphratica* community in the Ejina Natural Reserve, Inner Mongolia of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(5): 1 019-1 025.
- [12] 郝兴明, 赵万羽, 陈忠升. 额济纳胡杨种群年龄结构与树干空心分布特征[J]. 干旱区地理, 2011, **34**(5): 794-799.  
HAO X M, ZHAO W Y, CHEN Z S. Population age structure and cavity distribution characters of *Populus euphratica* in Ejina[J]. *Arid Land Geography*, 2011, **34**(5): 794-799.
- [13] 高润宏, 张 巍, 郭晓红. 额济纳胡杨林生态效益评价及保护对策探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2000, **14**(S1): 74-77.  
GAO R H, ZHANG W, GUO X H. Discuss *Populus euphratica* forest of Ejina ecological effectiveness and protect countermeasure[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, **14**(S1): 74-77.
- [14] 程业森, 赵晨光, 高立平. 额济纳旗公益林动态监测及效益评价[J]. 防护林科技, 2017, (1): 42-47.  
CHENG Y S, ZHAO C G, GAO L P. Monitoring and evaluation of Ejina banner's forest for public benefit[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2017, (1): 42-47.
- [15] 丁翎羽. 旅游活动对额济纳胡杨林保护区植物群落的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [16] 董芳宇, 王文娟, 崔盼杰, 等. 胡杨叶片解剖特征及其可塑性对土壤条件响应[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(10): 2 047-2 057.  
DONG F Y, WANG W J, CUI P J, et al. Plasticity response of leaf anatomical characteristics of *Populus euphratica* in different soil conditions[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(10): 2 047-2 057.
- [17] THOMAS F M, YU R D, SCHÄFER P, et al. How diverse are *Populus "diversifolia"* leaves? Linking leaf morphology to ecophysiological and stand variables along water supply and salinity gradients[J]. *Flora*, 2017, **233**: 68-78.
- [18] 王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等. 胡杨异形叶光合系统 II 叶绿素荧光特性[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(10): 1 795-1 804.  
WANG H Z, HAN L, XU Y L, et al. Chlorophyll fluorescence characteristics of photosystem II of *Populus euphratica* heteromorphic leaves[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(10): 1 795-1 804.
- [19] 哈丽古丽·艾尼, 伊丽米努尔, 管文轲, 等. 不同生境胡杨叶片  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(6): 1 031-1 042.  
HALIGULI Aini, YILIMINUER, GUAN W K, et al. Response of leaf  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  and environmental factors in different habitats of *Populus euphratica*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(6): 1 031-1 042.
- [20] 魏国慧, 王志鑫, 梁文召, 等. 胡杨枝叶功能性状对地下水位梯度的响应与适应[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(6): 1 043-1 051.  
WEI Y H, WANG Z X, LIANG W Z, et al. Response and adaptation of twig-leaf functional traits of *Populus euphratica* to groundwater gradients[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(6): 1 043-1 051.
- [21] 央视新闻. 全国首批 15 个“天气气候景观观赏地”名单公布 [EB/OL]. <https://news.cctv.com/2022/05/14/ARTIhgqeuCl2zr8m19JwaBY220514.shtml>, 2022-05-14.
- [22] 陈有民. 园林树木学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [23] WANG L S, HASHIMOTO F, SHIRAIISHI A, et al. Petal Coloration and pigmentation of tree peony cultivars of Xibei (the Northwest of China) [J]. *J Jpn Soc Hort Sci*, 2000, **69**(2): 233.
- [24] 赵东辉, 高玉福, 荣立苹, 等. 紫花槭秋季叶片呈色生理变化研究[J]. 经济林研究, 2019, **37**(2): 114-119.  
ZHAO D H, GAO Y F, RONG L P, et al. Study on physiological change of *Acer pseudo-sieboldianum* leaf color in autumn [J]. *Non-Wood Forest Research*, 2019, **37**(2): 114-119.
- [25] 朱书香, 杨建民, 王中华, 等. 4 种李属彩叶植物色素含量与叶色参数的关系[J]. 西北植物学报, 2009, **29**(8): 1 663-1 669.  
ZHU S X, YANG J M, WANG Z H, et al. Relationship be-

- tween pigment contents and leaf color parameters of four leaf-colored species of *Prunus* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, **29**(8): 1 663-1 669.
- [26] 王燕龙,车晓雨,刘煜光,等.银杏秋季叶色参数及色素含量的变化研究[J].河北农业大学学报,2015,**38**(5): 28-32.  
WANG Y L, CHE X Y, LIU Y G, *et al.* Study on the changes of leaf color parameter and pigment content of *Ginkgo biloba* leaf in autumn[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2015, **38**(5): 28-32.
- [27] LUO M, HUNT R W G. The structure of the CIE 1997 color appearance model (CIECAM97s) [J]. *Color Research & Application*, 1998, **23**(3): 138-146.
- [28] 王改萍,张磊,姚雪冰,等.金叶银杏叶色变化特性分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,**44**(5): 41-48.  
WANG G P, ZHANG L, YAO X B, *et al.* An analysis of color variation characteristics of golden leaf ginkgo[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2020, **44**(5): 41-48.
- [29] 李小方,张志良.植物生理学实验指导[M].5版.北京:高等教育出版社,2016.
- [30] 韩蕾,宋曙辉.植物叶黄素的高效液相色谱分析测定[J].中国农学通报,2005,**21**(1): 73-75.  
HAN L, SONG S H. Determination of lutein in plants by high performance liquid chromatography[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, **21**(1): 73-75.
- [31] 颜少宾,张好艳,马瑞娟,等.桃果实类胡萝卜素测定方法的研究[J].果树学报,2012,**29**(6): 1 127-1 133.  
YAN S B, ZHANG Y Y, MA R J, *et al.* Study the measurement of carotenoids from the peach fruit[J]. *Journal of Fruit Science*, 2012, **29**(6): 1 127-1 133.
- [32] 葛雨萱,王亮生,周肖红,等.香山黄栌叶色和色素组成的相互关系及时空变化[J].林业科学,2011,**47**(4): 38-42.  
GE Y X, WANG L S, ZHOU X H, *et al.* Correlation between the leaf color and pigments composition of *Cotinus coggygria* in fragrant hills park and their temporal and spatial variation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, **47**(4): 38-42.
- [33] 中华人民共和国农业部蔬菜品质监督检验测试中心. NY/T 1278-2007 蔬菜及其制品中可溶性糖的测定铜还原碘量法[S]北京:中华人民共和国农业部,2007.
- [34] 齐艳玲,樊明寿,潘青华.紫叶李在高温高湿条件下色素含量及光合速率的研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2008,**29**(2): 27-30.  
QI Y L, FAN M S, PAN Q H. Impacts of high temperature and humidity on photosynthetic rate and pigments contents of purple-leaf plum leaves[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science Edition), 2008, **29**(2): 27-30.
- [35] 洪丽,王金刚,龚东芳.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 L, WANG J G, GONG S F. Progress in color changes and its influencing factors of color leaf plants[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, **41**(6): 152-156.
- [36] 费芳,王慧颖,唐前瑞.温度对红花檵木叶色的影响研究[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2008,**21**(2): 88-90.  
FEI F, WANG H Y, TANG Q R. Study on the impact of temperature on *Loropetalum chinese* var. *rubrum* leaves color[J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology* (Natural Sciences), 2008, **21**(2): 88-90.
- [37] 邵艳军,王迎辉,李亮,等.低温对彩叶植物紫叶李和紫叶小檗色素含量和膜透性的影响[C]//第六届中国植物逆境生理学与分子生物学学术研讨会论文摘要汇编,2010: 121.
- [38] 田丽媛.温湿度对北京5种秋色叶树种秋叶变色的影响[D].北京:北京林业大学,2012.
- [39] 赵新英.拟南芥棕榈酰基转移酶在叶片衰老过程中的功能解析[D].山东泰安:山东农业大学,2014.
- [40] 周玉堂,李拥军.植物叶片衰老的研究综述[J].湖北工程学院学报,2016,**36**(3): 55-59.  
ZHOU Y T, LI Y J. Research survey of plant leaf senescence [J]. *Journal of Hubei Engineering University*, 2016, **36**(3): 55-59.
- [41] 刘连涛,李存东,孙红春,等.棉花叶片衰老生理研究进展[J].中国农学通报,2006,**22**(7): 316-321.
- [42] LIU L T, LI C D, SUN H C, *et al.* Advances of research on cotton leaf senescence physiology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **22**(7): 316-321.
- [43] 齐睿.彩叶植物叶片转色期叶色表达与色素含量关系研究[D].郑州:河南农业大学,2019.
- [44] 付琳.‘洒金’柏叶色变化的生理特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [45] 史雅婷.金叶女贞和卵叶女贞叶色表达的差异研究[D].河北秦皇岛:河北科技师范学院,2016.
- [46] 潘晶晶.金叶复叶槭叶色呈色机理研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.

(编辑:裴阿卫)