



澳门5种植物叶变色盛期对气候因子的响应

容文婷, 邢福武, 易绮斐

引用本文:

容文婷, 邢福武, 易绮斐. 澳门5种植物叶变色盛期对气候因子的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(6): 574–582.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4232>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

澳门九澳山海滨群落10种植物盛花期物候对极端气候事件的响应

Effects of Extreme Climate Events on Phenology at Flowering Period of 10 Species in Ka Ho Hill, Macao

热带亚热带植物学报. 2019, 27(1): 74–82 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3921>

澳门黑沙水库植物群落与主要种类物候特征研究

Studies on Plant Community and Phenological Characteristics of Hac Sa Reservoir in Macau

热带亚热带植物学报. 2016, 24(4): 367–374 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.04.002>

3种四照花一年生播种苗生长规律初探

Annual Growth Rhythm of 1-year-old Seedlings of Three *Cornus* Species

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 367–374 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4166>

全球气候变暖胁迫下的雅鲁藏布江流域植被覆盖度变化驱动机制探讨

Driving Mechanism of Vegetation Coverage Change in the Yarlung Zangbo River Basin under the Stress of Global Warming

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 209–217 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3685>

鼎湖山锥栗木质部形成及其对气候的响应

Xylem Formation and Response to Climate of *Castanea henryi* in Dinghushan Mountain

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 445–454 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4204>

澳门 5 种植物叶变色盛期对气候因子的响应

容文婷^{1,2}, 邢福武¹, 易绮斐^{1,3*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 仲恺农业工程学院, 广州 510225; 3. 中国科学院植物资源保护与可持续利用重点实验室, 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650)

摘要: 叶变色盛期是植物生长季结束时的重要物候指标。为探究澳门地区气候因子对植物叶变色盛期的影响, 利用 3 个固定物候监测样地 2012–2018 年的物候资料和气象数据, 对 5 种野生植物叶变色盛期的年际变化及其对前期各种气候因子的响应进行了研究。结果表明, 不同物种叶变色盛期不同, 集中在 12 月的有山乌柏(*Sapium discolor*)、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)和天料木(*Homalium cochinchinense*), 假苹婆(*Sterculia lanceolata*)的叶变色盛期在 5 月, 秤星树(*Ilex asprella*)集中在 1 月。不同样地共有种叶变色盛期不同, 大潭山样地秤星树的叶变色盛期显著早于九澳山样地, 松山样地假苹婆的叶变色盛期显著早于大潭山样地。叶变色盛期与春夏季温度的变化呈正相关, 与秋冬季呈负相关。叶变色盛期与冬、春季降水量的变化呈正相关, 与夏、秋季呈负相关。相对湿度与植物的叶变色盛期亦有显著相关性。温度是影响这 5 种植物叶变色盛期最主要的气候因子。

关键词: 叶变色盛期; 气候因子; 植物物候; 澳门

doi: 10.11926/jtsb.4232

Effects of Climatic Factors on Leaf Discoloration Peak Period of 5 Species in Macao

RONG Wen-ting^{1,2}, XING Fu-wu¹, YI Qi-fei^{1,3*}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Sustainable Utilization, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Leaf discoloration peak period (LDP) was an important phenological index at the end of plant growth season. In order to explore the influence of climatic factors on LDP of plants in Macao, China, the LDP annual changes of five wild plants and their responses to various climatic factors were studied based on the phenological and meteorological data of three phenological monitoring sites in Macao from 2012 to 2018. The results showed that the LDP varied among species, which *Sapium discolor*, *Toxicodendron succedaneum* and *Homalium cochinchinense* were in December, *Sterculia lanceolata* and *Ilex asprella* were in May and January, respectively. The LDP varied among monitoring sites, which *I. asprella* in Big Taipa Hill was significantly earlier than that in Ka Ho Hill, while that of *Sterculia lanceolata* in Guia Hill was obviously earlier than that in Big Taipa Hill. The LDP was positively correlated with the temperature in spring and summer, while negatively correlated with that in autumn and winter. The LDP was positively correlated with precipitation in winter and spring, while negatively correlated with that in summer and fall. The relative humidity was also significantly correlated with the LDP of these five species. Temperature was the most important climatic factor on the LDP of these five species.

收稿日期: 2020-04-10 接受日期: 2020-05-11

基金项目: 中国科学院华南植物园-澳门合作项目; 广东省科技计划项目(2018B030324003); 国家自然科学基金项目(31870699)资助
This work was supported by the Cooperation Project of South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences and Macao; the Planning Project for Science and Technology in Guangdong (Grant No. 2018B030324003), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31870699).

作者简介: 容文婷(1995~), 女, 研究生, 主要从事植物物候研究。E-mail: 2764652644@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yiqifei@scbg.ac.cn

Key words: Leaf discoloration peak period; Climatic factor; Plant phenology; Macao

植物物候是研究植物与环境条件(气象、水文、土壤)的周期变化之间相互关系的科学^[1], 包括植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等, 是植物长期适应季节性变化的环境而形成的生长发育节律^[2], 它不但能直观地指示自然季节的变化, 还能表现出植物对自然环境变化的适应^[2]。

目前多数研究表明^[3-8], 在近几十年全球气候变暖的背景下, 植物主要呈春季物候提前、秋季物候推迟、生长季延长的趋势。植物物候的研究多集中于春季展叶^[9-10]、开花期^[11-13]与气候变化之间的关系上, 而秋季物候的研究相对较少。有研究表明^[14-15], 近几十年来植物较长时间的生长可归因于秋季叶片的延长衰老, 而不是早春的出叶, 说明秋季物候在调节气候与生物圈相互作用中起着至关重要的作用^[16], 秋叶衰老标志着生态系统生长季节的结束^[17]。有研究表明, 北美东部秋天的红树比欧洲和亚洲更常见, 变红的物种也更丰富^[18]。

澳门地处南亚热带, 当地秋冬季的植物叶变色不如中国东北部^[5,19]和日韩^[20-21]、北欧^[22]等寒温带地区的明显, 叶变色的物种也不多, 此前王琳^[23]、唐春艳等^[24]对澳门植物群落物候进行了观察, 一些植物的叶色季相变化会对植被群落外貌产生较明显的影响, 形成红、黄色斑块。一般落叶树种秋色叶表现为红色, 如乌柏(*Sapium sebiferum*)、山乌柏(*S. discolor*)和野漆(*Toxicodendron succedaneum*); 而半落叶树种秋色叶表现为黄色, 如假苹婆(*Sterculia lanceolata*)。但目前对于澳门植物秋季物候的研究仍处于初步观察阶段, 气候变化对当地植物秋季物候的影响还没有深入的探讨, 为此, 本研究展开对当地5种秋叶变色较明显的植物秋叶变色物候期的研究, 利用近7年的资料比较植物秋叶变色盛期的年际差异和同一物种叶变色盛期在不同样地间的差异, 并分析其与温度、降水量等气候因子的关系, 为填补澳门地区目前秋季物候研究空白以及为当地郊野公园秋冬季的植物造景、树种选材等提供科学依据和参考。

1 研究区概况

澳门地处广东省珠江口之西南岸, 北与珠海市的拱北接壤, 西与珠海市的湾仔、横琴岛隔水相对,

东隔珠江口与香港相望^[25]。由澳门半岛、氹仔岛和路环岛组成, 其中松山位于澳门半岛正中心市政公园; 大潭山位于氹仔岛东部, 目前为澳门主要郊野公园之一; 九澳山位于澳门路环岛东边沿海。属南亚热带海洋性气候, 冬季较冷且干燥; 夏季温度较高, 雨量充沛。根据《2019 澳门年鉴》记载, 澳门年均降雨量 2 000 mm 以上, 4-9 月为雨季, 6 月雨量最多, 达 360 mm 以上; 10 月至翌年 3 月为旱季, 12 月雨量最少。年平均温度为 22.6℃, 1 月是最寒冷的月份, 平均温度 15.1℃, 月平均温度在 22℃ 以上的月份多达 7 个月, 具有夏长冬短的特点。多受热带风暴与台风的侵袭和影响, 其中 7 至 9 月是台风吹袭最多的月份。

2 材料和方法

2.1 材料

选取秋叶变色较明显的 5 种植物: 山乌柏(*Sapium discolor*)、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)、秤星树(*Ilex asprella*)、天料木(*Homalium cochinchinense*)和假苹婆(*Sterculia lanceolata*), 其中山乌柏和假苹婆分布于 3 个样地, 秤星树分布于大潭山和九澳山样地, 野漆分布于松山和九澳山样地, 天料木仅分布于大潭山样地。

气象数据源于澳门地球物理暨气象局(www.smg.gov.mo), 包括 2012 年 1 月至 2018 年 12 月各月的平均气温、降雨量和相对湿度。

2.2 方法

分别于大潭山、松山和九澳山 3 个代表不同植被类型的固定样地进行物候监测, 其中大潭山样地为高灌丛向乔木演替的典型群落, 松山样地为典型的南亚热带次生性常绿阔叶林群落, 九澳山样地为海滨灌丛群落。每个样地内设置 5 m×5 m 的小样方, 其中大潭山内设置 16 个小样方, 共 400 m²; 松山内设置 32 个小样方, 共 800 m²; 九澳角内设置 16 个小样方, 共 400 m²。对每个样方内胸径(离树基高 1.3 m 处)≥1 cm 的植株挂牌, 采用定点定株的人工观测方法, 每月至少观测 1 次(观测时间基本固定在每月中上旬), 其中生长旺季 3-5 月每月观测 2 次, 记录挂牌植株的物候情况。

2.3 物候期的界定和计算方法

植物的秋叶变色期分为变色始期、完全变色期、落叶始期和落叶末期 4 个主要的物候期。物候期的评判标准^[26]为：整株有 5% 以上的秋叶变色的时期为秋叶变色始期，整株有 95% 以上的秋叶变色的时期为秋叶完全变色期；整株有 5% 以上的落叶时为落叶始期，整株有 95% 以上的叶落时为落叶末期。为了减少误差，本研究以某植株的叶变色始期和落叶末期的中点作为其叶变色盛期(leaf discoloration peak period, LDP)，某物种的叶变色盛期为所有观测个体叶变色盛期的平均值， $LDP = \frac{\sum_{i=1}^n (FCD_i + EDD_i)/2}{n}$ ，式中，LDP 为叶变色盛期； FCD_i 为第 i 株植物叶变色始期； EDD_i 为第 i 株植物落叶末期； n 为观测植株数。

2.4 数据处理

采用儒略日(julian day)的统计方法，即将物候期转换为距离当年 1 月 1 日的天数。利用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据统计，运用 SPSS 22.0 软件

进行双变量 Pearson 相关分析、单因素方差分析等。

3 结果和分析

3.1 气候因子

根据澳门当地气候特点和农历季节变化规律，本研究将阳历的 3-5 月作为春季，6-8 月作为夏季，9-11 月作为秋季，12 至翌年 2 月作为冬季。从图 1 可以看出，大潭山 2012 年 1 月至 2018 年 12 月的月平均温度均略低于另 2 个样地，而松山和九澳山的月平均温度相近。降水量在 5 和 8 月较高，3 个样地的降水量在 5-9 月有较大的差异，九澳山的低于松山和大潭山，10 月至翌年 4 月 3 个样地的降水量差异较小。相对湿度在 3-5 月较高，12 月最低，其中松山的明显低于九澳山和大潭山。由于在不同样地间的坡度坡向不同，且日照时数仅在大潭山样地监测，其余 2 个样地没有日照时数的监测，因此本研究不讨论日照量的影响。总体来看，3 个样地的平均温度差异不大，九澳山的降水量最少，松山的相对湿度最小。

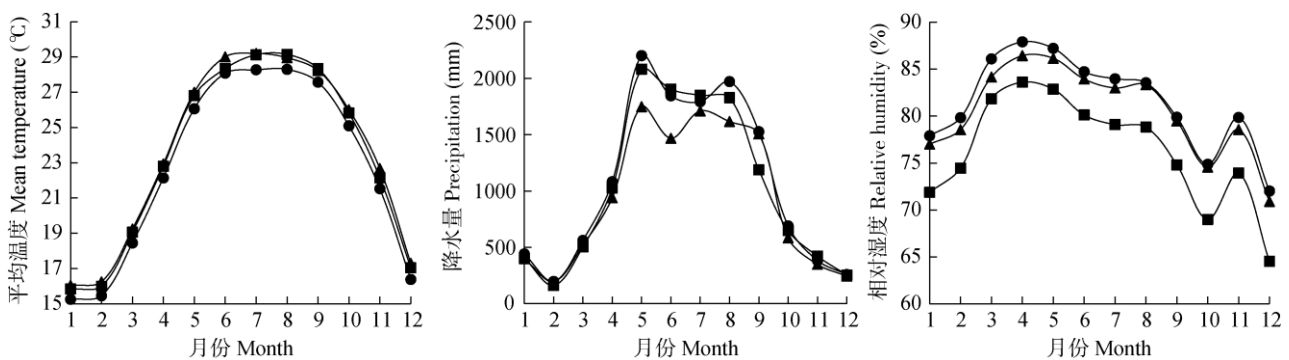


图 1 气候因子的月动态。●：大潭山；■：松山；▲：九澳山。

Fig. 1 Monthly changes in climatic factors. ●: Big Taipa hill; ■: Guia hill; ▲: Ko Ho hill.

3.2 叶变色盛期的年际变化

假苹婆的数量显著多于其余植物，且叶变色的数量变化较大；野漆的数量显著少于其余物种；山乌柏叶变色株数的变化最小(表 1)。在 2012-2018 年，秤星树的叶变色盛期在 12 月至翌年 3 月，集中在 1 月；天料木的在 11 月至翌年 2 月，以 12 月为主；山乌柏和野漆的在 10 月至翌年 1 月，集中在 12 月；假苹婆的在 5-6 月，主要在 5 月(表 2)。叶变色盛期年际标准差最小的是假苹婆(9.7 d)，说明其年际变化较稳定；而野漆的年际标准差最大

(33.5 d)，说明其年际变化幅度较大。5 种植物中，秤星树的叶变色盛期显著晚于其余 4 种植物($P < 0.05$)，假苹婆的叶变色盛期显著早于其余 4 种植物($P < 0.05$)，天料木、山乌柏和野漆之间的叶变色盛期差异不显著($P > 0.05$)。

表 3 为同一物种在不同样地的叶变色盛期的年际变化差异，平均而言，大潭山样地秤星树的叶变色盛期显著($P < 0.05$)早于九澳山样地的；而九澳山样地秤星树的叶变色盛期的年际变化大于大潭山样地的。松山样地假苹婆的叶变色盛期显著($P <$

0.05)早于大潭山样地的, 九澳山样地的介于其余 2 个样地之间, 差异不显著; 而大潭山样地假苹婆的叶变色盛期年际变化最大(33.5 d), 其次是九澳山样地的, 松山样地的最小(25.8 d)。山乌柏和野漆的叶变

色盛期在不同样地间的差异不显著; 松山样地野漆的叶变色盛期年际变化稍大于九澳山样地的, 松山样地山乌柏的叶变色盛期年际变化最大(47.9 d), 其次是九澳山样地的, 最小的是大潭山样地的(23.0 d)。

表 1 2012–2018 年 5 种植物叶变色的植株数量

Table 1 Number of 5 species with discolored leaves from 2012 to 2018

物种 Species	株数 Number of individual							平均 ± 标准差 Mean ± SD
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	142	43	66	65	112	136	131	99 ± 40.4a
秤星树 <i>Ilex asprella</i>	26	36	30	37	16	14	9	24 ± 11.1b
山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	11	13	11	12	13	11	12	12 ± 0.9bc
天料木 <i>Homalium cochinchinense</i>	5	5	6	4	4	3	2	4 ± 1.4bc
野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	4	5	2	2	3	2	2	3 ± 1.2c

数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Data followed different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Tables.

表 2 2012–2018 年 5 种植物的叶变色盛期

Table 2 Leaf discoloration peak period of 5 species from 2012 to 2018

物种 Species	叶变色盛期 Leaf discoloration peak period (d)							平均 ± 标准差 Mean ± SD
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
秤星树 <i>Ilex asprella</i>	393.1	387.6	382.4	408.5	442.6	399.1	336.1	392.8 ± 31.9a
天料木 <i>Homalium cochinchinense</i>	358.6	333.2	342.1	412.3	375.3	357.3	341.0	360.0 ± 27.0b
山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	369.8	349.0	357.4	385.5	380.9	365.8	294.7	357.6 ± 30.5b
野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	367.9	369.8	349.0	352.3	320.7	291.3	292.2	334.7 ± 33.5b
假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	146.2	134.3	155.5	145.1	137.6	159.2	156.8	147.8 ± 9.7c

表 3 2012–2018 年不同样地共有种的叶变色盛期

Table 3 Leaf discoloration peak period of common species in different sites from 2012 to 2018

物种 Species	样地 Site	叶变色盛期 Leaf discoloration peak period (d)							平均 ± 标准差 Mean ± SD
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
秤星树 <i>Ilex asprella</i>	大潭山 Big Taipa Hill	382.8	396.2	364.5	404.6	386.3	375.4	336.1	378.0 ± 22.6b
	九澳山 Ka Ho Hill	403.4	378.9	400.2	412.3	498.9	422.8	-	419.4 ± 41.6a
山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	大潭山 Big Taipa Hill	346.3	321.1	349.8	383.0	357.0	369.3	321.3	349.7 ± 23.0c
	松山 Guia Hill	389.0	353.4	330.3	387.6	376.1	383.6	256.7	353.8 ± 47.9c
	九澳山 Ka Ho Hill	374.0	372.5	392.0	386.0	409.5	344.5	306.0	369.2 ± 34.3c
野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	松山 Guia Hill	369.8	369.5	349.0	352.3	321.3	291.3	292.2	335.1 ± 33.7c
	九澳山 Ka Ho Hill	366.0	370.0	-	-	320.0	-	-	352.0 ± 27.8c
假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	大潭山 Big Taipa Hill	129.0	144.2	160.9	209.9	177.8	192.0	219.3	176.2 ± 33.5d
	松山 Guia Hill	158.5	141.9	132.7	134.0	81.6	108.5	107.3	123.5 ± 25.8e
	九澳山 Ka Ho Hill	151.0	116.8	172.9	91.5	153.6	177.1	144.0	143.8 ± 30.5de

3.3 叶变色盛期对气候因子的响应

不同气候因子对植物叶变色盛期有不同的影响。5 种植物的叶变色盛期与其当月、前 1–12 月各月的平均气温、降水量和相对湿度有极显著($P < 0.01$)或显著($P < 0.05$)的相关性。

3.3.1 温度的影响

秤星树的叶变色盛期与前 2、3、4 月(即 9–11

月)的均温呈极显著或显著负相关, 与前 8、9、10、11 月(即 2–5 月)的均温呈极显著或显著正相关(表 4), 说明其叶变色盛期随 9–11 月(秋季)温度的升高而提前, 随着 2–5 月(冬、春季)温度的升高而推迟。天料木的叶变色盛期与前 1、2、3 月(即 9–11 月)的均温呈极显著负相关, 与前 8、9、10 月(即 2–4 月)的呈极显著正相关, 说明其叶变色盛期随 9–11

月(秋季)温度的升高而提前,随着 2-4 月(冬、春季)温度的升高而推迟。山乌柏的叶变色盛期与当月、前 1、2 月和前 11、12 月(即 10 月至翌年 1 月)的均温呈极显著或显著负相关,与前 6、7、8、9 月(即 3-6 月)的呈极显著正相关,说明其叶变色盛期随着 10 月至翌年 1 月(秋冬季)温度的升高而提前,随着 3-6 月(春夏季)温度的升高而推迟。野漆的叶变色盛期与当月、前 1、2 月和前 11、12 月(即 10 月至翌年 1 月)的均温呈极显著或显著负相关,与前 6、7、8、9 月(即 3-6 月)的呈极显著正相关,说明其叶变色盛期随着 10 月至翌年 1 月(秋冬季)温度的升高而提前,随着 3-6 月(春夏季)温度的升高而推迟。假苹婆的叶变色盛期与当月、前 1、2 月(即 3-5 月)的均温呈极显著或显著正相关,与前 6、7 月(即去年 10、11 月)的呈极显著或显著负相关,说明其叶变色盛期随着 3-5 月(春季)温度的升高而推迟,随着 10-11 月(秋季)温度的升高而提前。

3.3.2 降水量的影响

秤星树的叶变色盛期与前 3 月(即 10 月)的降水量呈显著负相关,与前 9、12 月(即 4 月、1 月)的呈显著正相关(表 5),说明其叶变色盛期随着 10 月(秋季)降水量的增加而提前,随着 1、4 月(冬、春季)降水量的增加而推迟。天料木的叶变色盛期与前 4 月(即 8 月)的降水量呈显著负相关,与前 9、10 月(即 3 月、2 月)的呈显著正相关,说明其叶变色盛期随着 8 月(夏季)降水量的增加而提前,随着 2、3 月(冬、春季)降水量的增加而推迟。山乌柏的叶变色盛期与前 1、2、4 月(即 11、10、8)的降水量呈极显著或显著负相关,与前 8 月(即 4 月)的呈显著正相关,说

明其叶变色盛期随着 8、10、11 月(夏、秋季)降水量的增加而提前,随着 4 月(春季)降水量的增加而推迟。野漆的叶变色盛期与前 2 月(即 10 月)的降水量呈显著负相关,与前 7 月(即 5 月)的呈显著正相关,说明其叶变色盛期随着 10 月(秋季)降水量的增加而提前,随着 5 月(春季)降水量的增加而推迟。

3.3.3 相对湿度的影响

秤星树的叶变色盛期与前 10、11、12 月(即 1-3 月)的相对湿度呈极显著或显著正相关(表 6),说明其叶变色盛期随着 1-3 月(冬、春季)相对湿度的增加而推迟。天料木的叶变色盛期与前 4 月(即 8 月)的相对湿度呈显著负相关,与前 9、10 月(即 2、3 月)的呈显著正相关,说明其叶变色盛期随着 8 月(夏季)相对湿度的增加而提前,随着 2、3 月(冬、春季)相对湿度的增加而推迟。山乌柏的叶变色盛期与前 8、10 月(即 4 月、2 月)的相对湿度呈极显著或显著正相关,说明其叶变色盛期随着 2、4 月(冬、春季)相对湿度的增加而推迟。野漆的叶变色盛期与前 3 月(即 9 月)的相对湿度呈显著负相关,与前 8、9、10 月(即 2-4 月)的呈显著正相关,说明其叶变色盛期随着 9 月(秋季)相对湿度的增加而提前,随着 2-4 月(冬、春季)相对湿度的增加而推迟。假苹婆的叶变色盛期与前 3、10 月(即 2 月、去年 7 月)的相对湿度呈显著正相关,与前 6 月(即去年 11 月)的呈显著负相关,说明假苹婆的叶变色盛期随着 2 月、7 月(冬、夏季)相对湿度的增加而推迟,随着 11 月(秋季)相对湿度的增加而提前。

表 4 叶变色盛期与均温的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient between leaf discoloration peak period and average temperature

物种 Species	当月 Current	前 1 月 Last month	前 2 月 Last 2 month	前 3 月 Last 3 month	前 4 月 Last 4 month	前 5 月 Last 5 month	前 6 月 Last 6 month	前 7 月 Last 7 month	前 8 月 Last 8 month	前 9 月 Last 9 month	前 10 月 Last 10 month	前 11 月 Last 11 month	前 12 月 Last 12 month
1	0.038	-0.704	-0.848*	-0.882**	-0.822*	-0.632	-0.298	0.115	0.918**	0.904**	0.940**	0.783*	-0.053
2	-0.376	-0.925**	-0.925**	-0.924**	-0.742	0.366	0.512	0.729	0.947**	0.916**	0.927**	0.495	-0.623
3	-0.826*	-0.930**	-0.802*	-0.682	-0.239	0.441	0.950**	0.989**	0.968**	0.914**	0.200	-0.840*	-0.895**
4	-0.968**	-0.920**	-0.911**	-0.667	-0.341	0.729	0.921**	0.978**	0.967**	0.776*	0.103	-0.813*	-0.963**
5	0.955**	0.911**	0.800*	0.568	0.052	-0.124	-0.770*	-0.918**	-0.747	-0.716	-0.195	0.098	0.583

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. 1: 秤星树; 2: 天料木; 3: 山乌柏; 4: 野漆; 5: 假苹婆。下表同。

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. 1: *Ilex asprella*; 2: *Homalium cochinchinense*; 3: *Sapium discolor*; 4: *Toxicodendron succedaneum*; 5: *Sterculia lanceolata*. The same is following Tables.

表 5 叶变色盛期与降水量的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficient between leaf discoloration peak period and precipitation

物种 Species	当月 Current	前 1 月 Last month	前 2 月 Last 2 month	前 3 月 Last 3 month	前 4 月 Last 4 month	前 5 月 Last 5 month	前 6 月 Last 6 month	前 7 月 Last 7 month	前 8 月 Last 8 month	前 9 月 Last 9 month	前 10 月 Last 10 month	前 11 月 Last 11 month	前 12 月 Last 12 month
1	0.684	0.167	-0.448	-0.831*	-0.634	-0.325	-0.739	0.708	0.049	0.791*	0.727	0.470	0.808*
2	0.251	-0.050	-0.481	-0.343	-0.796*	-0.483	-0.460	-0.230	0.392	0.864*	0.847*	0.496	-0.322
3	0.249	-0.892**	-0.874*	-0.198	-0.837*	0.305	0.419	0.248	0.811*	0.290	0.444	0.128	-0.010
4	-0.814*	-0.856*	-0.736	-0.716	-0.194	-0.003	0.784*	0.657	0.558	0.660	0.125	-0.662	-0.808*
5	-0.276	0.205	-0.367	0.651	-0.385	-0.356	-0.509	-0.559	-0.141	0.534	-0.009	0.566	0.023

表 6 叶变色盛期与相对湿度的 Pearson 相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficient between leaf discoloration peak period and relative humidity

物种 Species	当月 Current	前 1 月 Last month	前 2 月 Last 2 month	前 3 月 Last 3 month	前 4 月 Last 4 month	前 5 月 Last 5 month	前 6 月 Last 6 month	前 7 月 Last 7 month	前 8 月 Last 8 month	前 9 月 Last 9 month	前 10 月 Last 10 month	前 11 月 Last 11 month	前 12 月 Last 12 month
1	0.269	0.076	0.276	-0.415	-0.401	-0.401	-0.420	0.507	-0.296	0.434	0.842*	0.915**	0.908**
2	0.488	0.033	-0.336	-0.149	-0.848*	-0.696	-0.440	-0.741	-0.267	0.764*	0.768*	0.606	0.474
3	0.459	-0.310	-0.238	-0.558	-0.374	-0.076	-0.329	0.127	0.854*	0.680	0.994**	0.195	0.304
4	-0.227	-0.529	-0.734	-0.856*	-0.653	-0.472	-0.540	0.051	0.757*	0.830*	0.839*	-0.047	-0.291
5	-0.685	-0.529	0.049	0.771*	-0.049	-0.084	-0.847*	0.399	-0.120	0.618	0.813*	0.467	-0.091

4 结论和讨论

4.1 叶变色盛期及共有种在不同样地的差异

在全球变暖的背景下, 气候对秋季叶片衰老的影响具有高度的变异性, 均有提前、延迟和不变模式的报道^[6,27-28]。由于本研究的物候资料有限, 不足以表征所有植物叶变色的变化趋势, 但通过 7 a 的观测表明, 这 5 种落叶树种或半落叶树种的叶变色盛期存在较大差异, 叶变色盛期的年际标准差为 9.7~33.5 d, 其中假苹婆的叶变色盛期最稳定, 野漆的变化最大, 这除了受物种自身生物特性、环境条件等的影响外, 还可能与物种植株数量的差异、物候资料的完整性等因素有关。

本研究不同样地共有种的比较表明, 大潭山样地秤星树的叶变色盛期显著早于九澳山样地的, 松山样地假苹婆的叶变色盛期显著早于大潭山样地的。大潭山的降水量和相对湿度都大于九澳山, 而松山的相对湿度是 3 个样地中最小的, 样地间干湿程度的差异可能是造成这 2 种植物在不同样地叶变色盛期显著差异的主要原因, 但除了气候的差异, 不同样地间的土壤含水量、土质、土壤养分、坡度坡向等环境条件也可能是导致共有种叶变色物候差异的原因。此外, 有研究表明物种间的物候差异除了受环境影响, 还由物种自身的生物差异、进化史上的亲缘关系等因素造成的, 要对其物候学潜

在驱动因素进行研究还必须考虑到物种的进化历史^[29]。不同物种间的物候对气候变化响应的差异会使生态相互作用失去同步, 从而威胁到生态系统的功能^[30]。

4.2 温度是影响叶变色盛期最主要的气候因子

植物的叶变色主要是由于秋冬季日照减少和温度降低引起叶绿素分解, 使存在于叶片中的类胡萝卜素(叶黄素)、花青素等呈现出来, 导致叶片变红、黄、橙色, 随后脱落^[18]。本研究结果表明, 5 种植物的叶变色盛期与前期的各种气候因子都具有显著相关性, 其中与温度的关系最为密切。目前也有研究^[19]证明生长季节平均温度是影响兴安落叶松(*Larix gmelinii*)春季物候期最主要的气候因子, Fu 等^[31]对欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)的研究表明, 秋叶衰老对温度的响应明显大于春叶生长对温度的响应。但不同季节气候因子的变化对植物叶变色盛期的影响不同, 如这 5 种植物的叶变色盛期与平均温度的关系表现出随春夏季温度的升高而推迟, 随秋冬季温度的升高而提前的规律, Menzel 等^[32]的研究表明春季和初夏的温度升高会促进叶片变色, 而秋季温度升高会延缓叶变色, 本研究结果与其相反, 可能是由于本研究目前仅累积了 7 a 的物候数据, 反映的是植物叶变色期受气候短期影响。另外, 本研究结果还表明, 所有的气候因子在距离

叶变色盛期前期较远的月份仍有较高的相关性,这可能与物种样本量的大小有关,也可能是受到气候因子的非线性影响,由此亦说明植物的叶变色盛期可能受到前期很长一段时间的气候积累所形成的自然现象。

5种植物中除了假苹婆的叶变色盛期与降水量没有显著相关外,其余物种与降水量的关系表现出随夏、秋季降水量的增加而提前,随冬、春季降水量的增加而推迟的规律。与相关研究相似,气候变暖会延缓叶变色,而干旱则会促进叶变色,但影响程度取决于物种^[33]。Fracheboud 等^[34]报道欧洲白杨树(*Populus tremula*)秋季衰老开始的主要诱因是光周期缩短, Delpierre 等^[35]报道温度、光周期和水分胁迫是秋季树木活动停止和休眠开始的主要影响因素。这都说明不同物种的叶变色盛期对不同气候因子的响应不同,但所有气候因子中温度是影响叶变色盛期最主要的气候因子。

4.3 适宜当地秋冬季造景的植物及展望

利用植物物候季相变化进行景观配置时,一些树木具有一定的相互替代功能,这就可创造出某种视觉或生态效果^[36]。澳门属南亚热带地区,常年气候温润,植被终年常绿,将秋叶变色明显的物种作为当季的主要景观植物,能为当地增添别具一格的景象,丰富植物季节的色彩变化。通过对澳门地区 7 a 植物物候的观察,山乌柏、野漆、乌柏是具有明显秋色叶的树种,在秋冬季整株树体可形成明显的黄橙、红色斑块,因此推荐作为当地郊野公园或邻近岛屿地区秋冬季植物景观配置的主要树种,由于乌柏仅在大潭山样地有 1 株高大乔木,其在当地数量甚少,因此本研究没有纳入统计,但这株树盖度占比大,每年秋冬季可全株变红,形成独特景象,建议当地推广培育栽种。

综上所述,5种落叶树种或半落叶树种的叶变色盛期存在较大差异;其中秤星树和假苹婆在不同样地的叶变色盛期差异显著;温度是影响它们叶变色盛期最主要的气候因子,温度与降水量与叶变色盛期的相关性表现出一定季节性规律,相对湿度与叶变色盛期的相关性没有明显的季节性规律。但由于本研究对样地环境条件的监测不够全面,如土壤含水量、土质养分含量、植物养分状况等,物候资料的积累有限、以及物种样本量的差异都会对结果造成一定误差,后续的研究建议增加样地间微气候

的观测、土壤养分含量等环境条件的监测措施,使研究更加深入和全面。

致谢 感谢澳门特别行政区市政署园林绿化厅张素梅和陈玉芬在项目进展中的支持和协调,同时感谢洪宝莹、陈道怡和欧远雄等参加野外调查。感谢澳门地球物理暨气象局提供气象资料。

参考文献

- [1] ZHAI J, YUAN F H, WU J B. Research progress on vegetation phenological changes [J]. *Chin J Ecol*, 2015, 34(11): 3237–3243. doi: 10.13292/j.1000-4890.20151023.030.
翟佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3237–3243. doi: 10.13292/j.1000-4890.20151023.030.
- [2] WANG L X, CHEN H L, LI Q, et al. Research advances in plant phenology and climate [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(2): 447–454.
王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展 [J]. *生态学报*, 2010, 30(2): 447–454.
- [3] YU R, SCHWARTZ M D, DONNELLY A, et al. An observation-based progression modeling approach to spring and autumn deciduous tree phenology [J]. *Int J Biometeorol*, 2016, 60(3): 335–349. doi: 10.1007/s00484-015-1031-9.
- [4] KOLÁŘOVÁ E, NEKOVÁŘ J, ADAMÍK P. Long-term temporal changes in central European tree phenology (1946–2010) confirm the recent extension of growing seasons [J]. *Int J Biometeorol*, 2014, 58(8): 1739–1748. doi: 10.1007/s00484-013-0779-z.
- [5] ZHONG S Y, ZHENG J Y, GE Q S. Change of autumnal leaf coloring of woody plants in eastern China for the last 40 years [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2010, 31(1): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2010.01.001.
仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 近 40 年中国东部木本植物秋季叶全变色期变化 [J]. *中国农业气象*, 2010, 31(1): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2010.01.001.
- [6] ZHONG S Y, ZHENG J Y, GE Q S. Dynamics of autumn phenophase of woody plants in Beijing region in 1962–2007 [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(11): 2352–2356. doi: 10.13287/j.1001-9332.2008.0401.
仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 1962–2007 年北京地区木本植物秋季物候动态 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2352–2356. doi: 10.13287/j.1001-9332.2008.0401.
- [7] CHMIELEWSKI F M, RÖTZER T. Response of tree phenology to climate change across Europe [J]. *Agric For Meteorol*, 2001, 108(2): 101–112. doi: 10.1016/S0168-1923(01)00233-7.
- [8] MENZEL A, SPARKS T H, ESTRELLA N, et al. European phenol-

- logical response to climate change matches the warming pattern [J]. *Glob Change Biol*, 2006, 12(10): 1969–1976. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x.
- [9] DU J, HE Z B, PIATEK K B, et al. Interacting effects of temperature and precipitation on climatic sensitivity of spring vegetation green-up in arid mountains of China [J]. *Agric For Meteorol*, 2019, 269–270: 71–77. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.02.008.
- [10] FU Y H, LIU Y J, DE BOECK H J, et al. Three times greater weight of daytime than of night-time temperature on leaf unfolding phenology in temperate trees [J]. *New Phytol*, 2016, 212(3): 590–597. doi: 10.1111/nph.14073.
- [11] HUANG W J, GE Q S, DAI J H, et al. Sensitivity of first flowering dates to temperature change for typical woody plants in Guiyang City, China [J]. *Prog Geogr*, 2017, 36(8): 1015–1024.
黄文婕, 葛全胜, 戴君虎, 等. 贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1015–1024.
- [12] CRAINE J M, WOLKOVICH E M, TOWNE E G, et al. Flowering phenology as a functional trait in a tallgrass prairie [J]. *New Phytol*, 2012, 193(3): 673–682. doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03953.x.
- [13] MCEWAN R W, BRECHA R J, GEIGER D R, et al. Flowering phenology change and climate warming in southwestern Ohio [J]. *Plant Ecol*, 2011, 212(1): 55–61. doi: 10.1007/s11258-010-9801-2.
- [14] JEONG S J, HO C H, GIM H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern hemisphere for the period 1982–2008 [J]. *Glob Change Biol*, 2011, 17(7): 2385–2399. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x.
- [15] SUN Q L, LI B L, ZHOU G Y, et al. Delayed autumn leaf senescence date prolongs the growing season length of herbaceous plants on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agric For Meteorol*, 2020, 284: 107896. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107896.
- [16] LIU Q, FU Y S, ZENG Z Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China [J]. *Glob Change Biol*, 2016, 22(2): 644–655. doi: 10.1111/gcb.13081.
- [17] PANCHEN Z A, PRIMACK R B, GALLINAT A S, et al. Substantial variation in leaf senescence times among 1360 temperate woody plant species: Implications for phenology and ecosystem processes [J]. *Ann Bot*, 2015, 116(6): 865–873. doi: 10.1093/aob/mcv015.
- [18] RENNER S S, ZOHNER C M. The occurrence of red and yellow autumn leaves explained by regional differences in insolation and temperature [J]. *New Phytol*, 2019, 224(4): 1464–1471. doi: 10.1111/nph.15900.
- [19] YANG L P, QIN Y, ZHANG C H, et al. Influence of climate change on the phenophase of *Larix gmelinii* in the Greater Khingan Mountains [J]. *Arid Zone Res*, 2016, 33(3): 577–583. doi: 10.13866/j.azr.2016.03.18.
杨丽萍, 秦艳, 张存厚, 等. 气候变化对大兴安岭兴安落叶松物候期的影响 [J]. *干旱区研究*, 2016, 33(3): 577–583. doi: 10.13866/j.azr.2016.03.18.
- [20] KOIKE T. Autumn coloring, photosynthetic performance and leaf development of deciduous broad-leaved trees in relation to forest succession [J]. *Tree Physiol*, 1990, 7(1/2/3/4): 21–32. doi: 10.1093/treephys/7.1-2-3-4.21.
- [21] PARK C K, HO C H, JEONG S J, et al. Spatial and temporal changes in leaf coloring date of *Acer palmatum* and *Ginkgo biloba* in response to temperature increases in South Korea [J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0174390. doi: 10.1371/journal.pone.0174390.
- [22] LEV-YADUN S, HOLOPAINEN J K. Why red-dominated autumn leaves in America and yellow-dominated autumn leaves in Northern Europe? [J]. *New Phytol*, 2009, 183(3): 506–512. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02904.x.
- [23] WANG L. Study on plant phenology of representative plant communities in Macau [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2014: 16–42.
王琳. 澳门代表性群落植物物候研究 [D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2014: 16–42.
- [24] TANG C Y, WANG L, XING F W, et al. Studies on plant community and phenological characteristics of Hac Sa Reservoir in Macau [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2016, 24(4): 367–374. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.04.002.
唐春艳, 王琳, 邢福武, 等. 澳门黑沙水库植物群落与主要种类物候特征研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(4): 367–374. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.04.002.
- [25] XING F W, QIN X S, YAN Y H. The flora of Macau [J]. *Bull Bot Res*, 2003, 23(4): 472–477. doi: 10.3969/j.issn.1673-5102.2003.04.022.
邢福武, 秦新生, 严岳鸿. 澳门的植物区系 [J]. *植物研究*, 2003, 23(4): 472–477. doi: 10.3969/j.issn.1673-5102.2003.04.022.
- [26] MAO W Z, CHEN H, TAN W, et al. Analysis on phenological observation technology [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2013, 41(1): 222–224. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2013.01.091.
毛万忠, 陈虹, 谭玮, 等. 物候观测技术研究 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(1): 222–224. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2013.01.091.
- [27] JEONG S J, MEDVIGY D. Macroscale prediction of autumn leaf coloration throughout the continental United States [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2014, 23(11): 1245–1254. doi: 10.1111/geb.12206.
- [28] CHEN L, HUANG J G, MA Q Q, et al. Long-term changes in the impacts of global warming on leaf phenology of four temperate tree species [J]. *Glob Change Biol*, 2019, 25(3): 997–1004. doi: 10.1111/gcb.14496.

- [29] DAVIES T J, WOLKOVICH E M, KRAFT N J B, et al. Phylogenetic conservatism in plant phenology [J]. *J Ecol*, 2013, 101(6): 1520–1530. doi: 10.1111/1365-2745.12154.
- [30] THACKERAY S J, HENRYS P A, HEMMING D, et al. Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels [J]. *Nature*, 2016, 535(7611): 241–245. doi: 10.1038/nature18608.
- [31] FU Y H, PIAO S L, DELPIERRE N, et al. Larger temperature response of autumn leaf senescence than spring leaf-out phenology [J]. *Glob Change Biol*, 2018, 24(5): 2159–2168. doi: 10.1111/gcb.14021.
- [32] MENZEL A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO [J]. *Clim Change*, 2003, 57(3): 243–263. doi: 10.1023/A:1022880418362.
- [33] 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]. *Glob Change Biol*, 2015, 21(3): 1005–1017. doi: 10.1111/gcb.12804.
- [34] FRACHEBOUD Y, LUQUEZ V, BJÖRKEN L, et al. The control of autumn senescence in European Aspen [J]. *Plant Physiol*, 2009, 149(4): 1982–1991. doi: 10.1104/pp.108.133249.
- [35] DELPIERRE N, VITASSE Y, CHUINE I, et al. Temperate and boreal forest tree phenology: From organ-scale processes to terrestrial ecosystem models [J]. *Ann For Sci*, 2016, 73(1): 5–25. doi: 10.1007/s13595-015-0477-6.
- [36] ZHAO X L, SHI C Y, HE B, et al. Spring phenological characteristics and phenophase classification of landscape greening tree species in Chongming Island of Shanghai [J]. *Chin J Ecol*, 2013, 32(9): 2275–2280. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0319.
- 赵小雷, 施朝阳, 何斌, 等. 上海崇明岛园林绿化树种的春季物候特征与物候相分类 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2275–2280. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0319.