

不同生境条件下光照强度对蓝花楹 光合色素含量及开花的影响*

孙莹¹ 石锦安^{1**} 邵小鹏¹ 李帆² 李青^{1,3} 高遐¹ 钟秋¹ 赵文舟¹

¹四川农业大学风景园林学院 成都 611130

²比利时根特大学生物科学工程学院 根特 9000

³四川省遂宁市林业局 遂宁 629000

摘要 探明同种植物在不同生境条件下的生长发育特性是实现高品质植物配置与造景的有效途径。以四川省成都市温江区温江公园(W)、光华大道(G)、四川农业大学成都校区四教B区(B)及C区(C)4个试验点成年蓝花楹(*Jacaranda mimosifolia* D. Don)为研究试材,采用数字式照度计测量同一时段不同生境下以及不同时段不同生境下的光照强度,同时测定叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)含量。结果显示:在观测期内蓝花楹的叶绿素含量及组分因生境条件不同而各异,在各生境下Chl a约占总量的79%,与Chl总量的相关性达到极显著水平($R^2 = 0.88$, $P < 0.001$); Chl b约占总量的21%,与Chl总量的相关性也达到极显著水平($R^2 = 0.81$, $P < 0.001$),但不及Chl a。在开花物候期内,各生境下光照强度对光合色素含量的影响也不一致,表现出光照强度显著高于B、C而树龄低于W的G,其Chl、Chl a、Chl b、Car含量皆显著低于C、B、W($P < 0.05$)。在开花的物候表现上,经历萌芽、抽梢、展叶后约40 d,太阳辐射强度日均总量2 100 W/m²或在当日12:00-14:00辐射强度达到或大于470 W/m²并持续4 d以上的蓝花楹即可进入开花状态。本研究表明,在蓝花楹开花物候期前后光照强度对其开花有显著影响,开花物候表现与光合色素含量及变化无关系。图5表2参36

关键词 蓝花楹; 生境; 光照强度; 光合色素含量; 开花

CLC Q945.79 : S688.9

Effects of light intensity on photosynthetic pigment content and flowering of *Jacaranda mimosifolia* D. Don in different habitats*

SUN Ying¹, SHI Jin'an^{1**}, SHAO Xiaopeng¹, LI Fan², LI Qing^{1,3}, GAO Xia¹, ZHONG Qiu¹ & ZHAO Wenzhou¹

¹Faculty of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

²Department of Plant Production, Faculty of Bioscience Engineering, University of Ghent, Ghent 9000, Belgium

³Forestry Bureau of Suining City, Suining 629000, China

Abstract This paper attempts to explore the effects of light intensity on the growth and development and flowering of *Jacaranda mimosifolia* D. Don, so as to provide some technical and theory support for landscape management in specific habitats. The test materials were 20–60 year old adult *J. mimosifolia* D. Don from 4 different habitats in Wenjiang of Chengdu, Sichuan Province, including Wenjiang Park (W), Guanghua Avenue (G), Sichuan Agricultural University region B (B) and region C (C). The solar radiation intensity was measured for different habitats in the same period, or for different habitats in different periods by using digital luxmeter (250 lx/(W m²)). The experiment also determined the content of chlorophyll (Chl), chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b) and carotenoids (Car) during the flowering phenophase. The results showed that the content and composition of Chl was different depending on the habitats, among which Chl a accounted for 79% ($R^2 = 0.88$, $P < 0.001$) and Chl b accounted for 21% ($R^2 = 0.81$, $P < 0.001$). During the flowering phenophase, the *J. mimosifolia* in habitat G, though of similar age with those of the other three ones, had significantly lower content of Chl, Chl a, Chl b and Car ($P < 0.05$). Plants under 2 100 W/m² daily or 470 W/m² during 12:00-14:00 began spiking (an elongated flowering branch protruding through the base) in 4 days after sprouting and leafing. The results indicated that light intensity influences the flowering of *J. mimosifolia* D. Don in different habitats.

Keywords *Jacaranda mimosifolia*; habitat; light intensity; photosynthetic pigment content; flowering

收稿日期 Received: 2015-07-21 接受日期 Accepted: 2015-09-11

*国家农业科技成果转化项目(2011GB2F000016)和四川省科技创新苗子工程(2015032)资助 Supported by the Ministry of Science and Technology (2011GB2F000016), and the Sichuan Science and Technology Innovation Talent Project (2015032)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: shija5778@126.com)

蓝花楹 (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) 是一种开淡蓝色花的高大乔木, 已在我国的华南、西南地区等大中城市的绿地系统建设上得到了较为广泛的园林应用^[1]. 但在实际引种与植物配置时发现, 因微小生境条件的差异, 蓝花楹的生长发育 (特别是开花物候期上) 表现出了较大的差异. 针对这种现象, 经过近5年对蓝花楹生长发育的生物学习性观察发现, 除其它条件一致外, 因其具体生境条件微小变化即光照条件的不同, 蓝花楹在开花物候表现上则有很大的不同. 就产生这种差异的原因, 经查阅已有关于蓝花楹生长发育的研究发现, 仅有温、湿度对其生长发育影响的研究^[2], 尚未见蓝花楹开花与“光”关系的相关报道.

然而, 在光对植物开花影响的相关研究上, 除光是启动开花的因子外, 国内多为研究一、二年生的草本或藤本植物为对象, 且多用遮阴棚以控制透光率进行研究. 高庆玉等^[3]、沈伟其等^[4]、王晓冬等^[5]采用遮阴方法分别处理树莓 (*Rubus corchorifolius* L. f.)、蔺草 (*Juncus ef fusus*) 和郁金香 (*Tulipa gesneriana* L.) 以研究其花芽分化以及开花率. 国外部分学者采用光通量密度值 (PPF) 研究光对植物开花的影响, Wang YT^[6]研究蝴蝶兰 (*Phalaenopsis orchid*) 抵达花期前的光需求发现, 在60、160 mol m⁻² s⁻¹环境中的蝴蝶兰每天照射12 h后平均于34 d、28 d各自进入花期; Seddigh M等^[7]研究发现, 与在光周期成花诱导 (PFI) 期间进行光量子通量 (PPF) 处理的绣线菊 (*Spiraea salicifolia* L.) 花量相比, 于PFI提前24 d进行照射的一组花期的花量更多, 且在PFI之后进行450-600 mol m⁻² s⁻¹ PPF处理的植株生殖生长和营养生长达到最佳的平衡状态. Maas FM等^[8]研究月季 (*Rosa hybrida*) 发现, 其主枝的花芽分化率远高于侧枝, 在PPF为270 mol m⁻² s⁻¹的环境下, 主枝和侧枝的开花率分别为89%和33%, 而在90 mol m⁻² s⁻¹的环境中, 开花率分别下降为6%和0%. 但关于大型观花乔木植物在具体生境条件下光照强度与其开花的关系仍未见报道.

为此, 以生长在四川成都温江区的成年蓝花楹为试材, 针对其具体生境的光强差异, 分别对四川成都地区的温江公园、光华大道以及四川农业大学成都校区内的蓝花楹开花所需的相关生态因子 (光照强度) 开展研究, 并对不同生境条件下蓝花楹叶片中的叶绿素 (Chl) 与类胡萝卜素 (Car) 含量进行测定, 以期找出蓝花楹开花所需的光能需求, 为今后蓝花楹在具体的生境下如何进行植物造景提供相关理论依据.

表1 4个试验地点的蓝花楹种植及长势情况

Table 1 Planting and growth status of *Jacaranda mimosifolia* in different habitats

地点 Habitat	株数 Number	树龄 Age	冠径 (A/m × m) Crown diameter	生长情况 Growth	配置方式 Application method	生境类型 Habitat description	花期观测 Flowering
G	6	25	7 × 7	繁茂, 叶色浓郁 Exuberance and dark green leaves	列植 Linear planting	城市道路绿地系统, 为全日照, 场地开阔 City roadway greenbelt system, full sunlight, open area	历年开花繁盛 Bloom and flourish
W	6	60	11 × 11	繁茂, 叶色浓郁 Exuberance and dark green leaves	群植 Group planting	公园绿地系统, 为全日照, 树冠高于周边建筑物 Park Green System, full sunlight, canopy above the building	历年开花繁盛 Bloom and flourish
B	2	20	5 × 5	叶量少, 叶色浅绿 Fewer and yellowish green leaves	列植 Linear planting	41 m × 81 m 围合建筑空间内 (北) 41 m × 81 m enclosed building space (north)	有极少花量 Scarce flowers
C	2	20	3.5 × 3.5	叶量极少, 叶色黄绿 Scarce and yellowish green leaves	列植 Linear planting	41 m × 81 m 围合建筑空间内 (南) 41 m × 81 m enclosed building space (south)	历年未开花 Non-flowering

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014年4月至2014年5月分别在四川成都温江公园、光华大道以及四川农业大学成都校区内进行. 试材设定温江公园为W、光华大道为G、四川农业大学校园为B和C (B靠近四教B区, C靠近四教C区) (图1) 4处的约20-60年生成年蓝花楹 (表1).

四川农业大学成都校区园内B区及C区生境较为特殊 (图1), 阴影I为上午8:00投射阴影, 此时蓝花楹皆处于光照直射范围内, 而自9:30至15:30时段内生境C不受太阳直射光照, 即阴影II. 从16:00至18:00, 太阳西落, 阴影III此时集中于生境B. 而温江公园 (W) 及光华大道 (G) 均全日照即无遮挡生境.

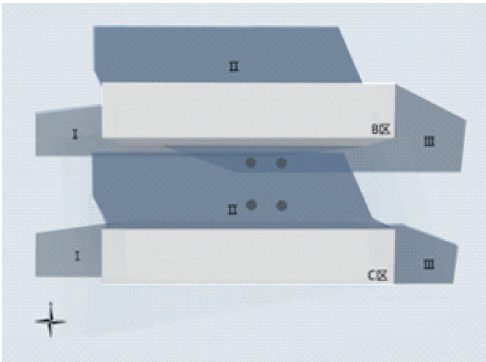


图1 观测期内B、C生境白天太阳直射变化示意图. 阴影I: 8:00; 阴影II: 9:30-15:30; 阴影III: 16:00-18:00.
Fig. 1 Diurnal changes of shadow areas of regions B and C. Shadow I: 8:00; Shadow II: 9:30-15:30; Shadow III: 16:00-18:00.

1.2 观测方法

于花期正午取各生境每株蓝花楹树冠东南西北四个方位、上中下三层次以及内外两部分共24个叶片样本, 采用 Lichtenthaler^[9]以及舒展等^[10]简化后的方法测定其Chl与Car含量. 采用上海美谱达仪器有限公司 (2012.07) 生产的紫外分光光度计 (UV-1200型) 进行测定.

根据研究内容, 试验从蓝花楹萌芽、抽梢、展叶后至花枝显现的40 d内, 分别在不同生境下进行太阳辐射强度的测定. 对4处生境样地中的蓝花楹分别编号后, 利用照度计于固

定位置(每棵树冠外围50 cm处平面周长上选取13个定点)、固定时间(8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00)进行光强值的测定. 测量光强使用数字式照度计(产地深圳、型号VICTOR 1010A、分辨力0.1 lx).

1.2.1 光合色素的测定与计算 采用舒展等Chl含量测定的简化法^[10]进行取样、浸提、比色后,再采用Lichtenthaler等^[9]对Arnon公式进行修改后的公式算得各色素浓度(mg/L),最终计算出叶片组织中各色素含量(mg/g).

1.2.2 光照强度的测量与计算 照度计所测光通量(lx)是表示物体被照亮程度,而太阳辐射达到植物表面产生的辐射效应,则可用太阳辐射强度(W/m^2)表达^[11-12],张福漫认为以太阳辐射强度表达“光”对植物的作用更为恰当^[13]. 根据加阿斯特拉的资料^[13],波长为400-700 nm的太阳光,太阳辐射强度与光照强度之间的换算系数为 $250 \text{ lx}/(W \cdot m^{-2})$,即可得出各生境于不同时间点、水平面上的太阳辐射强度值(W/m^2).

1.2.3 试验数据处理与分析 将各个生境2014年4月18日至5月27日40 d所测08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00的瞬时太阳辐射强度利用积分原理和Excel软件得出太阳辐射强度日总量及其日均值. 对同一生境于不同时间点的太阳辐射强度值、同一时间点(时间段)于不同生境条件下的太阳辐射强度值以及光合色素含量进行方差分析(One-way ANOVA).

方差分析运用SPSS17.0统计软件进行分析,EXCEL2010作图.

2 结果与分析

2.1 不同生境条件下日均太阳辐射强度与蓝花楹光合色素含量关系

由图2可知,在蓝花楹Chl组成中,叶绿素a(Chl a)约占

79%,二者之间的相关程度达到极显著水平($R^2 = 0.88$, $P < 0.001$),且Chl含量于不同生境的变化趋势与Chl a一致;叶绿素b(Chl b)占Chl总量维持在21%,二者之间的相关程度也达到极显著水平($R^2 = 0.81$, $P < 0.001$),但其与不同生境Chl含量变化并不完全一致,说明于开花期间主要是Chl a含量的变化导致Chl总量的变化. 树龄相近、生境有较大差异的B、C和G,其光合色素含量与所测太阳辐射强度日均值整体呈负相关($r \approx -0.139$),B、C所测Chl、Chl a、Chl b、Car含量均显著高于G($P < 0.05$). 而所在生境类型与G相仿、树龄较大的W,其光合色素含量与所测太阳辐射强度日均值均高于G.

2.2 不同生境条件下太阳辐射强度对开花的影响

2.2.1 不同生境条件下太阳辐射强度的逐日变化 以2014年4月18日至5月27日这一时间尺度对蓝花楹所在的生境观测发现,就总趋势来说,W、G、B、C生境太阳辐射强度日总量均呈上升趋势,但由于生境C、B遮光时长及直射时段与W、G不同,其辐射强度的增长系数存在较大差异. 生境G、W太阳辐射日总量的增长系数($K_G = 26.479$, $K_W = 27.862$)高于生境B、C($K_B = 15.949$, $K_C = 13.080$);就每日各时间点而言,G、W生境太阳辐射强度显著高于B、C(图4),而生境W、G于5月24日至5月27日辐射强度均高于 $2 \text{ } 100 \text{ } W/m^2$,且所在蓝花楹于27日有花枝显现. B、C在此观测期内皆未见花枝.

2.2.2 不同生境在不同时段的太阳辐射强度变化 经方差分析花期前后不同生境于不同时间点所测太阳辐射强度(图4)可知,蓝花楹开花生境(G、W)太阳辐射能强度显著高于不开花所在生境(B、C),且一天内强度主要集中于12:00到14:00时间段内,而此时段生境B、C所测值总体不足G、W所测值的0.5倍. 且自蓝花楹展叶后至花枝显现前所测辐射日总量(图3)可以看出,B、C生境在辐射强度大于 $1 \text{ } 500 \text{ } W/m^2$ 的晴朗天气下仅为G、W的0.5倍,由此可见在开花关键的物候期内其生境下蓝花楹接收辐射强度相对不足,从而表现出

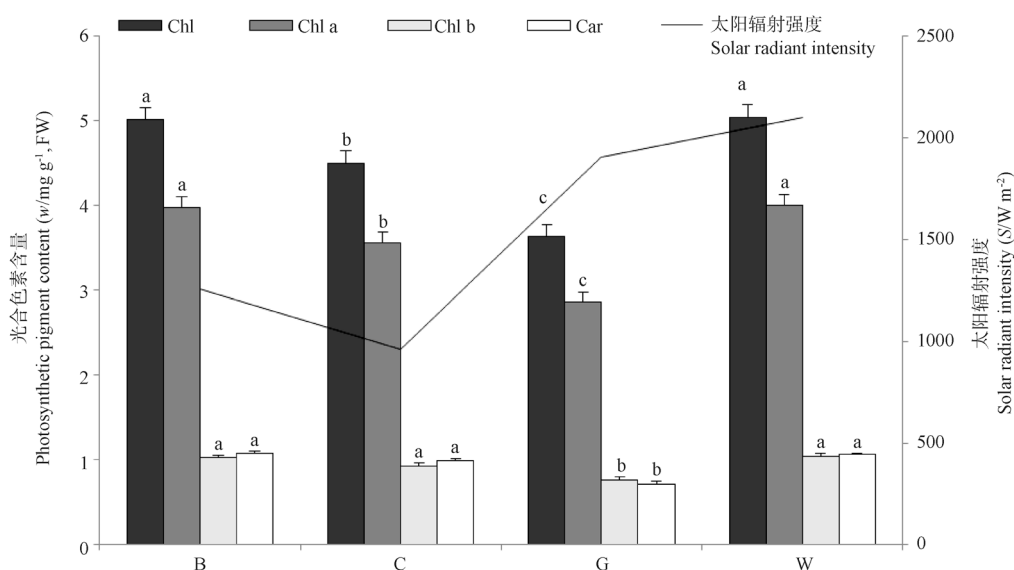


图2 不同生境蓝花楹于开花时间的光合色素含量及太阳辐射强度值. Chl: 叶绿素总量; Chl a: 叶绿素a; Chl b: 叶绿素b; Car: 类胡萝卜素总量. 不同字母表示不同生境下光合色素含量差异显著($P < 0.05$).

Fig. 2 Photosynthetic pigment content and solar radiant intensity of *Jacaranda mimosifolia* in different habitats. Chl: chlorophyll; Chl a: chlorophyll a; Chl b: chlorophyll b; Car: carotenoids. Different letters indicate significant difference in photosynthetic pigment content from different habitats at 0.05 level.

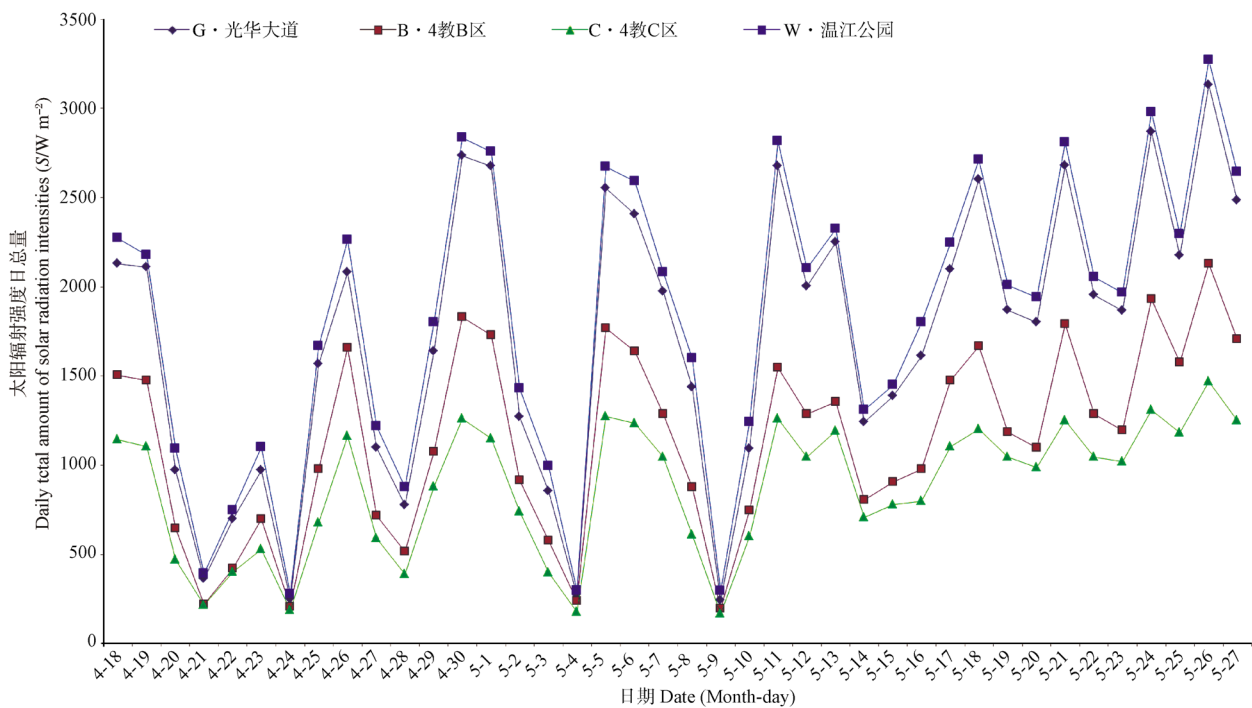


图3 2014年(4月15日-5月27日)不同生境太阳辐射强度日总量变化曲线。
Fig. 3 Daily change of solar radiation intensities in different habitats in 2014 (04. 15–05. 27).

表2 4个试验地点的蓝花楹在观测期40 d内开花与太阳辐射强度日均值及光合色素
Table 2 Daily mean values of solar radiation intensity and photosynthetic pigment content of *Jacaranda mimosifolia* in 4 different habitats during observation period

生境 Habitat	太阳辐射强度 Solar radiant intensity (S/W m ⁻²)	光合色素 Photosynthetic pigment						开花现象 Flowering performance
		Chl (w/mg g ⁻¹)	Chl a (w/mg g ⁻¹)	Chl b (w/mg g ⁻¹)	Chl a/Chl b (r/%)	Car/Chl (r/%)	Car (w/mg g ⁻¹)	
G	1906.063a	3.63c	2.87c	0.76b	408.13a	19.53b	0.7183b	开花 Flowering
W	2099.874a	5.04a	4.00a	1.04a	384.98a	21.28a	1.0629a	开花 Flowering
B	1255.342b	5.01a	3.99a	1.03a	388.66a	21.84a	1.0871a	不开花 Non-flowering
C	964.5238c	4.50b	3.56b	0.93a	383.40a	22.21a	0.9911a	不开花 Non-flowering

Chl: 叶绿素总量; Chl a: 叶绿素a; Chl b: 叶绿素b; Car: 类胡萝卜素总量. 不同的字母 (abcd) 表示不同生境下光合色素含量差异显著 ($P < 0.05$).
Chl: chlorophyll; Chl a: chlorophyll a; Chl b: chlorophyll b; Car: carotenoids. Different letters indicate significant difference in photosynthetic pigment content from different habitats at 0.05 level.

开花的物候现象.

2.2.3 不同生境在同一时段内的太阳辐射强度 由图4可知, 12:00-14:00为一日之内接收辐射强度的最强的时段. 根据图5还可见从5月24日起连续4 d至5月27日, 生境G于12:00-14:00太阳辐射强度总量达到或大于470 W/m²时蓝花楹进入花期, 即有花枝出现, 但B、C因2 h内光强均达不到470 W m⁻², 故未开花.

2.3 蓝花楹开花物候表现及其光合色素含量与太阳辐射强度的关系

根据所测数据并计算分析 (表2) 可知, 在蓝花楹开花物候期间因各自生境条件 (遮光与不遮光) 的差异, 开花期间生境W、G太阳辐射强度日均值显著高于生境B、C ($P < 0.05$), 导致开花物候存在较大差异. 在此时, 光合色素含量及变化与生境的太阳辐射强度也表现出不同的差异, 生境G所测Chl含量、Chl a含量、Chl b含量、Car含量、Car/Chl值皆显

著低于生境W、B、C ($P < 0.05$), 说明蓝花楹开花物候期内其叶片光合色素含量不仅与所在生境太阳辐射强度有关, 与其树龄等其他因素也相关, 但与开花物候表现未见相关关系.

3 结论与讨论

研究环境中各种因子与植物的关系是植物造景的理论基础^[14]. 光是自然界中影响植物生长发育最重要的因子之一, 作为环境信号调节植物整个生命周期的许多生理过程, 并最终表现为组织和器官的建成^[15-17]. 在不同环境下, 植物将资源按不同的比例分配到营养生长和生殖生长上, 实现组织和器官上的差异以适应环境变化获得最大的生存和繁殖利益^[18-19]. 本研究以成年蓝花楹为试材, 在不同光环境下测得的光照强度与其在开花物候表达以及光合色素含量变化上经观察和方差分析可以看出, 在不同生境下因光照强度不同而导致在相同物候表达上的显著差异以及光合色素含量的

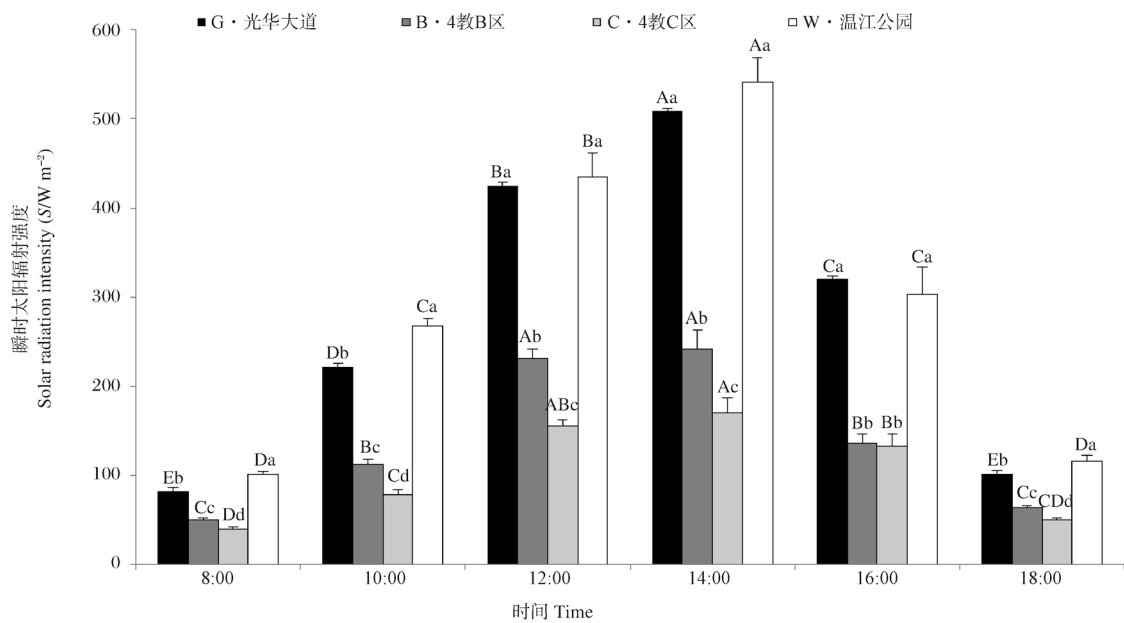


图4 2014年4、5月不同生境在每天不同时间点的太阳辐射强度值。不同大写字母表示相同生境不同时间点太阳辐射能差异显著 ($P < 0.05$) ; 不同小写字母表示相同时间点不同生境差异显著。

Fig. 4 Changes of solar radiation intensitiy at different time points in different habitats (2014. 04–2014. 05). Different uppercase letters indicate significant difference among time points of the same habitat at 0.05 level; different lowercase letters indicate significant difference among different habitats of the same time point at 0.05 level.

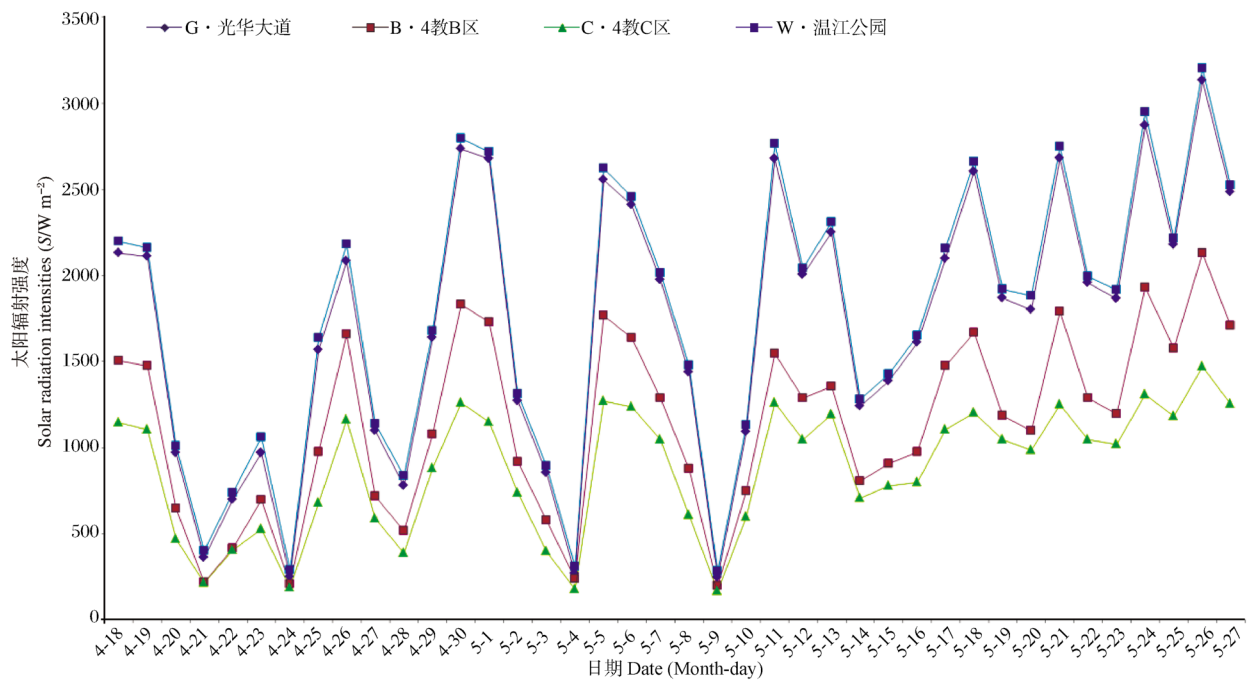


图5 生境W、G、B、C在每天12:00-14:00时段的太阳辐射强度总量。

Fig. 5 Total solar radiation intensity during 12:00–14:00 of the 4 habitats (W, G, B, C).

不同。

3.1 不同生境条件下太阳辐射强度对蓝花楹叶绿素含量的影响

光是合成叶绿素必要条件之一^[20-21], 从本研究结果中可以看出, 无论是在自然条件下 (G、W), 还是有建筑的遮荫下 (B、C) 蓝花楹都可在一定光照下合成自身生长发育所

需的光合色素。但因具体的生境下光照强度及红光、蓝光比例不同^[22-23]对光合色素含量仍有一定的影响 (图2), 产生这种现象的原因应该是与具体生境下除光照时间 (光周期) 一致外, 主要受到了光强^[24-26]、光质^[27]和树龄大小^[28-29]及其他因子的影响。但据相关研究表明, 矮牵牛 (*Petunia hybrida* Vilm) 在开花的不同时期Chl含量有较大变化^[30], 郑

郁善、陈松河等测量绿竹 (*Dendroclamopsis oldhami*)、孝顺竹 (*Bambusa multiplex*) 等7种竹类植物的Chl、Car含量,发现相较不开花的竹类,开花竹类的光合色素含量均有不同程度的降低,说明开花影响其光合色素的含量^[31-32]。但由表2可以看出,蓝花楹的光合色素含量并不是导致植物开花的直接因素。

3.2 不同生境条件下太阳辐射强度与蓝花楹开花的关系

光是诱导植物开花的重要条件。以大尺度来说,在特定的维度对于多数同种植物,每年大约都在相同的日子开花^[16],对于具体生境的各种植物,其光周期诱导随所在环境条件(特别是光照强度)不同而有所改变^[33]。从本研究中不难看出,光照强度在对蓝花楹开花物候表现上起到主导的决定作用,即在其完成营养生长基础上,太阳辐射强度日总量达到2 100 W/m²或12:00-14:00最大辐射强度达到或高于470 W/m²时连续4 d以上的光强成年蓝花楹即可进入开花状态(图3、图4、图5)。生境B、C因遮光达不到其开花所需的光照强度要求,故与W、G在开花物候期上有很大差异($P < 0.05$)。这种物候差异的原因正是因各自生境下光照强度不一致所致。作为吸收光能进行光化学反应的PSII所吸收的不同波段光(红光与蓝光)携带的能量不同^[34],导致W、G与B、C在开花物候表现差异。此外,诱导植物开花除需一定的光照强度外,光敏色素对于植物花期起重要作用^[35]。报道表明,水稻光敏色素(除phyB外)介导的光信号在短日条件下促进开花,在长日条件下延迟开花^[36]。可见,植物开花除了要有足够的光照强度,同时还有相应的光敏色素在此时的生理生化作用。

综上所述,20-60年生的蓝花楹在四川省成都市温江区是能正常开花的,若有长期遮光的影响(如C区)则不能完成生殖生长与发育。虽然在这4个不同的生境条件下均能完成光合色素的合成,但与其是否开花无关。当然,本研究仅从光照强度上对上述4种生境下蓝花楹光合色素的含量以及开花与否作了初步研究,关于光质、光敏色素作用、温度以及树木营养状况等与开花的关系均还有待进一步探究。

参考文献 [References]

- 邢福武. 中国景观植物(下)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 1247 [Xing FW. Landscape plants of China (II) [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009: 1247]
- 石锦安. 蓝花楹年生长发育特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012 [Shi JA. Study on the characteristics of growth and development of *Jacaranda mimosifolia* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012]
- 高庆玉, 蒋明凤, 张丙秀, 焦奎宝. 光照处理对树莓品种费尔杜德花芽分化的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43 (10): 69-72 [Gao QY, Jiang MF, Zhang BX, Jiao KB. Effect of light on flower bud differentiation of raspberry Fertod Zamatos [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2012, 43 (10): 69-72]
- 沈伟其, 张国平, 桂文光. 光照对蒹葭生长和草茎开花率的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (5): 577-580 [Shen WQ, Zhang GP, Gui WG. Effect of light on the growth and stem flowering rate of mat rush [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13 (5): 577-580]
- 王晓冬, 张华艳, 韩红娟. 光照强度对郁金香生长和开花的影响[J]. 北方园艺, 2010, 23 (23): 87-89 [Wang XD, Zhang HY, Han HJ. Effect of illumination intensities on growth and florescence of *Tulipa gesneriana* L. [J]. *N Horticult*, 2010, 23 (23): 87-89]
- Wang YT. *Phalaenopsis orchid* light requirement during the induction of spiking [J]. *Hort Science*, 1995, 30 (1): 59-61
- Seddigh M, Joliff GD. Light intensity effects on meadow foam growth and flowering [J]. *Crop Sci*, 1994, 34 (2): 497-503
- Maas FM, Bakx EJ. Effects of light on growth and flowering of *Rosa hybrida* 'Mercedes' [J]. *J Am Soc Horticult Sci*, 1995, 120 (4): 571-576
- 郝再斌. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 46-49 [Hao ZB. Plant physiology experiment [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 46-49]
- 舒展, 张晓素, 陈娟, 陈根云, 许大全. 叶绿素测定含量的简化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46 (4): 399-402 [Shu Z, Zhang XS, Chen J, Chen GY, Xu DQ. The simplification of chlorophyll content measurement [J]. *Plant Physiol Commun*, 2010, 46 (4): 399-402]
- 王景红. 果树气象服务基础[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 3-14 [Wang JH. Weather service of fruit [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 3-14]
- 包云轩. 气象学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 38 [Bao YX. Meteorology [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2007: 38]
- 张福漫. 设施园艺学[M]. 3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 129 [Zhang FM. Protected horticulture [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2001: 129]
- 苏雪痕. 植物造景[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998: 27-46 [Su XH. Plant Landscape [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998: 27-46]
- 匡双便, 徐祥增, 孟珍贵, 张广辉, 杨生超, 陈中坚, 魏富刚, 陈军文. 不同透光率对三七生长特征及根皂苷含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21 (2): 279-286 [Kuang SB, Xu XZ, Meng ZG, Zhang GH, Yang SC, Chen ZJ, Wei FG, Chen JW. Effects of light transmittance on plant growth and root ginsenoside of *Panax notoginseng* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, 21 (2): 279-286]
- 王忠. 植物生理学[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 352 [Wang Z. Plant Physiology [M]. 4th ed. Beijing: China Agricultural Press, 2002: 352]
- 宫地重远. 现代植物生理学. 光合成[M]. 东京: 日本朝仓书店, 1992: 1-149 [Gong D. Modern Plant Physiology. Photosynthetic [M]. Tokyo: Asakura Publishing Co. Ltd, 1992: 1-149]
- 王文杰, 李文馨, 许慧男, 祖元刚, 王宇. 不同生境白屈菜生活史型特征及其与不同器官单宁、黄酮、生物碱含量的关系[J]. 生态学报, 2008, 28 (11): 5228-5237 [Wang WJ, Li WX, Xu HN, Zu YG, Wang Y. Characters of life cycle forms of *Chelidonium majus* populations indifferent habitats and their correlation to the contents of tannin, flavones and alkaloids in different organs [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28 (11): 5228-5237]
- 周海燕, 王金牛, 付秀琴, 向双, 王彦星, 高景, 吴彦. 不同光环境对中国南方草地3种灌木表型可塑性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20 (6): 962-970 [Zhou HY, Wang JN, Fu XQ, Xiang S, Wang YX, Gao J, Wu Y. Effects of light environments on the phenotypic plasticity of three shrubs in southern China grassland [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, 20 (6): 962-970]
- Fromme P, Melkozernov A, Jordan P. Structure and function of

- photosystem I: interaction with its soluble electron carriers and external antenna systems [J]. *FEBS Lett*, 2003, **555** (1): 40-44
- 21 Stenbaek A, Jensen PE. Redox regulation of chlorophyll biosynthesis [J]. *Phytochemistry*, 2010, **71** (8): 853-859
 - 22 Bell GE, Danneberger TK, McMahon MJ. Spectral irradiance available for turf grass growth in sun and shade [J]. *Crop Sci*, 2000, **40** (1): 189-195
 - 23 Johnson GN, Scholes JD, Horton P, Young AJ. Relationships between carotenoid composition and growth habit in British plant species [J]. *Plant Cell Environ*, 1993, **16** (6): 681-686
 - 24 Sui XL, Mao SL, Wang LH. Effect of low light on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll a fluorescence during leaf development of sweet pepper [J]. *J Integr Agric*, 2012, **10** (10): 1633-1643
 - 25 Nyitrai P, Sárvári É, Keresztes Á, Láng F. Organization of thylakoid membranes in low light grown maize seedlings. Effect of lincomycin treatment [J]. *Plant Physiol*, 1994, **144** (3): 370-375
 - 26 孙小玲, 许岳飞, 马鲁沂, 周禾. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (8): 989-999 [Sun XL, Xu YF, Ma LL, Zhou H. A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (8): 989-999]
 - 27 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 中国农业科学, 2005, **38** (2): 369-375 [Xu K, Guo YP, Zhang SL. Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. *Sci Agric Sin*, 2005, **38** (2): 369-375]
 - 28 马小伟, 郑春芳, 刘伟成, 施孟如, 仇建标, 彭欣, 黄丽, 陈少波. 中国红树林最北缘引种区不同季节和树龄秋茄生理特征比较[J]. 科技通报, 2013, **29** (3): 58-64 [Ma XW, Zheng CF, Liu WC, Shi MR, Chou JB, Peng X, Huang L, Chen SB. Comparison of physiological characteristics of different aged transplanted *Kandelia obovata* trees in summer and winter in the northern transplanted area of China [J]. *Bull Sci Technol*, 2013, **29** (3): 58-64]
 - 29 戚元春, 肖昆仑, 王小德, 钱小平, 丁水龙. 环西湖不同树龄古樟树生理特性及复壮对比[J]. 中国农学通报, 2012, **28** (25): 32-38 [Qi YC, Xiao KL, Wang XD, Qian XP, Ding LS. Physiological characteristics and rejuvenation comparison of ancient *Cinnamomum camphora* at different ages in the around west lake area of Hangzhou [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, **28** (25): 32-38]
 - 30 何开跃, 谢寅峰, 艾畅, 陈天华. 矮牵牛开花过程中核酸和叶绿素含量的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, **28** (6): 95-97 [He KY, Xie YF, Ai C, Chen TH. Variation in contents of nucleic acid and chlorophyll during florescence process of *Petunia hybrida* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2004, **28** (6): 95-97]
 - 31 郑郁善, 高培军, 陈礼光, 吴擢溪. 绿竹开花生理生化特性研究[J]. 林业科学, 2003, **39** (3), 143-147 [Zheng YS, Gao PJ, Chen LG, Wu ZX. A study on the physiological and biochemical character of flowering for *Dendroclamopsis oldhami* [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39** (3): 143-147]
 - 32 陈松河. 厦门地区8年来竹子开花现象及其类型[J]. 江西农业学报, 2007, **19** (7): 74-75 [Chen SH. Study on flowering phenomenon and types of bamboo in Xiamen area in past eight years [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2007, **19** (7): 74-75]
 - 33 周云龙. 植物生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 295-299 [Zhou YL. Plant biology [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2003: 295-299]
 - 34 曹婷婷, 罗时荣, 赵晓艳, 梁慧敏, 王宏波, 杨经国. 太阳直射光谱和天空光谱的测量与分析[J]. 物理学报, 2007, **56** (9): 5554-5557 [Cao TT, Luo SR, Zhao HM, Wang HB, Yang JG. Measurement and analysis of direct sunlight and skylight spectra [J]. *Acta Phys Sin*, 2007, **56** (9): 5554-5557]
 - 35 顾建伟, 刘婧, 薛彦久, 臧新, 谢先芝. 光敏色素在水稻生长发育中的作用[J]. 中国水稻科学, 2011, **25** (2): 130-135 [Gu JW, Liu J, Xue YJ, Zhang X, Xie XZ. Phytochrome functions in rice development [J]. *Chin J Rice Sci*, 2011, **25** (2): 130-135]
 - 36 Ishikawa R, Shinomura T, Takano M, Shimamoto K. Phytochrome dependent quantitative control of Hd3a transcription is the basis of the night break effect in rice flowering [J]. *Genes Genet Syst*, 2009, **84** (2): 179-184