

DOI: 10.5846/stxb201405120974

于盈盈,胡聃,王晓琳,李元征,韩风森.城市不同遮阴环境下光强和光质特征.生态学报,2015,35(23): - .
Yu Y Y, Hu D, Wang X L, Li Y Z, Han F S. Characteristics of light intensity and light quality in different types of shade environments in urban areas. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): - .

城市不同遮阴环境下光强和光质特征

于盈盈, 胡 聃*, 王晓琳, 李元征, 韩风森

中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:城市的发展伴随着大量高层建筑的出现,城市建筑作为人工构筑物,形成了与自然环境不同的人工遮阴环境,这种人工环境可能会对其下生长的植物产生一定的影响。为了研究人工建筑遮阴与自然遮阴环境之间的差异,我们对北京市典型高层建筑遮阴和冠层遮阴光环境进行了测量,发现建筑和冠层显著改变其遮阴微环境的光强和光质。两种遮阴下光合有效辐射分别为天空自然辐射的 9.09% 和 5.50%,遮阴处的光合有效辐射均小于 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 低于多数城市植物的光饱和点。与天空自然辐射相比,建筑遮阴处蓝光在光合有效辐射中所占比例(B/P)、蓝光与红光的比例(B/R)以及蓝光与远红光的比例(B/FR)升高,且高于冠层遮阴,红光与远红光的比例(R/FR)没有显著变化,而冠层遮阴下 R/FR 则低于天空自然辐射。建筑遮阴下光质的改变可能会对植物的光合产生积极作用,并可能影响到植物的形态及生理反应。窄波段和宽波段两种不同积分方法对 R/FR 没有显著影响,采用宽波段积分得到的 B/R 低于窄波段,但降低幅度很小,在植物光合生理研究方面两种积分方法可以通用。

关键词:城市光环境;建筑遮阴;光谱变化;城市植物

Characteristics of light intensity and light quality in different types of shade environments in urban areas

YU Yingying, HU Dan*, WANG Xiaolin, LI Yuanzheng, HAN Fengsen

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, China Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: high-rise buildings were erected urban development China and many other countries. Considering that artificial structures and buildings have special morphology material and distribution pattern, they might form artificial shade environment different natural shade formed by trees. To study the differences between artificial and natural shade in urban area, we measured light environment of typical artificial shade created by urban buildings and canopy shade created by trees in August with a portable fiber optic spectroscope (ULS2048XL, Avantes Inc., The Netherlands). The results showed that buildings and tree canopy the shade microenvironment at different levels. Both types of shade caused attenuation of light intensity. The total daytime photosynthetic active radiation (PAR) building shade was reduced to 9.09% of the natural sky radiation sunny days, whereas the total PAR canopy shade was reduced to 5.50% of natural sky radiation. The hourly values of the PAR in the two types of shade were under $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and under $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for most daytime hours building shade. These values were lower than the light saturation points of most urban plants. Different types of shade also affect the light quality, such as the ratio of blue/PAR (B/P), blue/red (B/R), blue/far-red (B/FR), and red/far-red (R/FR). Due to light reflection and scattering, the ratio of blue light in PAR (0.360 ± 0.009) building shade was significantly higher than the ratio of the natural sky radiation and canopy shade. Because of absorption and utilization of the

基金项目:国家自然科学基金项目(70873121);城市与区域生态国家重点实验室专项基金(SKLURE2013-1-01);中国科学院“一三五”创新项目(YSW2013-B04)

收稿日期:2014-05-12; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hudan@rcees.ac.cn

blue light by canopy, the B/P ratio was canopy shade. The ratios of B/R and B/FR building shade were also higher than those in the other two light environments. The B/R ratio building shade was 1.196 ± 0.036 , whereas it was 0.666 ± 0.022 under natural sky radiation. There was no significant difference in the R/FR ratio between natural sky radiation and building shade, reaching 1.048 ± 0.068 and 1.108 ± 0.093 , respectively. However, the R/FR ratio canopy shade (0.422 ± 0.111) was lower than in the other two light environments. Light quality of urban building shade may be beneficial to the photosynthesis of urban plants and may change some aspects of plant physiology and morphology by influencing phytochrome and blue light receptors. We calculated the R/FR ratio by integrating two different bands used studies and found that the two methods of integration had no significant effect on the results. The values of the B/R ratio calculated by integration of the wide band were lower than those of the narrow band, but the differences were very small. Therefore, the two types of integration methods be universally applied in plant photosynthetic and physiological studies. We also measured the light environment of lightfleets formed by buildings. The results indicated that lightfleets by glass reflection improve light intensity of the building shade, which may be significant to urban plants grown low light. a reference for future studies the impact of urban environment, urban configuration of greening species, and landscape planning on plant growth.

Key Words: Urban light environment; Shade by building; Changes in light quality; Urban plants

近些年,中国城市化高速发展,同时伴随着各种高层建筑的大量增加。以北京市为例,到 2003 年年末累计建成高层建筑达 1.3 亿 m^2 ^[1],其中,1949—2003 年,共建成 10 层以上高层住宅约 8600 万 m^2 ,约占同期高层建筑总面积的 78%^[2]。高层建筑的形状和格局形成了独特的近地面微环境特征,尤其是光环境的改变。这种光环境特征的改变对于生长在近地面空间的城市植物来说至关重要,光强的降低和光质的改变可能影响植物的光合和光的形态建成^[3-6],并导致其能够向人类提供的生态服务功能发生改变。

建筑遮阴使得进入城市近地面空间的短波辐射产生大量衰减,可降至到 21%—95%的空地日照水平^[7],Hamerlynck^[8]发现在新泽西州典型建筑遮阴环境下,光强可降至 $10\text{—}15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间,小于全光照的 1.5%。此外,建筑遮阴下光质也发生改变。Gaskin 等^[9]研究了建筑和林冠下的遮阴光谱,认为相对于林冠遮阴,建筑过滤掉更少的蓝光,林冠下红蓝光的比例与遮光布下没有差异,但是这个结果和部分研究^[10-11]相矛盾,通常认为林冠下蓝光要被冠层过滤掉更多。Bell 等^[12]针对单株乔木和独栋建筑等不同类型的遮阴材料测量了其下遮阴光谱,发现建筑遮阴下红光与远红光的比例没有显著变化,但是蓝光在波长 400—800 nm 的短波辐射中所占的比例大于乔木遮阴下,其测量时没有区分晴天与多云天。目前关于城市遮阴光环境的研究内容相对分散,数量较少且缺乏系统细致的测量研究,部分结果存在差异。而目前城市建筑物的形状、材料、布局等呈现多样化的趋势,这使得建筑物其对下光环境的影响更加复杂。因此,本研究选择典型城市高层建筑和乔木群落冠层遮阴环境进行对比研究,分析城市不同遮阴环境下的光强和光质变化特征,为研究城市环境对植物的影响、植物对城市环境的适应机制、绿化设计以及城市规划等提供参考依据。

1 实验方法

1.1 实验地点及内容

实验地点位于北京市三至五环之间两个高层住宅小区内(北纬 $40^{\circ}00'25''\text{—}29''$,东经 $116^{\circ}20'12''\text{—}22''$;北纬 $39^{\circ}58'02''\text{—}09''$,东经 $116^{\circ}20'02''\text{—}10''$),遮阴建筑为钢筋混凝土高层建筑,楼高 40 m 以上,建筑表面为灰色和暗红色磨砂外墙砖,测量光斑的实验小区玻璃为绿色低辐射镀膜玻璃。遮阴乔木群落为行道树白蜡,树高约 12 m,平均胸径为 17.6 cm。

实验时间为 2012 年 8 月的晴天,城市遮阴共选择 3 种类型:天空自然辐射(Sky)、建筑遮阴(Building shade)和冠层遮阴(Canopy shade)。建筑遮阴选择高层建筑群中独栋高层建筑的遮阴处,距离最近的其它建筑位于实验建筑西向水平距离 21.4 m,以及东北向水平距离 61.4—72.5 m 的高层建筑,高度不超过实验建筑。

日测量从 6 点到 19 点,每隔 1 小时测量一次,每种遮阴类型有 9 条全天曲线,126 个测量值。

在 10:00、14:30 和 17:00 三个时点分别测量建筑遮阴中光斑的光强光质变化特征,测量地点位于小区 2 (北纬 39°58'02" —09",东经 116°20'02" —10") 的高层建筑群中,光斑是由于建筑上玻璃反光引起的,在某一点持续时间以秒至分钟计,因此测量了同一地点的遮阴处和光斑处的光环境以作对比,每个时点有 6 组重复。

测量仪器为便携式光纤光谱仪(爱万提斯 Avantes, ULS2048XL, 荷兰)。

1.2 参数选择

光强和光质各参数所用波段说明见表 1,光强参数选择对植物影响最大、植物生理研究常用的短波波段,即光合有效辐射(Photosynthetically active radiation,简称 PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),波长范围为 400—700 nm。

由于以往文献对于红光远红光比例采用的波段范围有所不同^[11-12],有采用光敏色素吸收峰(655—665)/(725—735)进行研究,也有采用宽波段(600—700)/(700—800)进行研究,因此本文对两种常用的波段范围均作了分析,蓝光红光比例亦然。

表 1 光强和光质参数选择波段说明

Table 1 Introduction of band used for parameters of light quantity and light quality

参数 Parameters	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (PAR)	蓝光比例 Blue light/PAR (B/P)	红光比例 Red light/PAR (R/P)	蓝光远红光 比例 Blue light /far-red light (B/FR)	红光远红光 比例 1 Red light /far-red light (R/FR)	红光远红光 比例 2 Red light /far-red light (R/FR)	蓝光红光 比例 1 Blue light /red light (B/R)	蓝光红光 比例 2 Blue light /red light (B/R)
波段 Wave band (nm)	400—700	(400—500) /(400—700)	(600—700) /(400—700)	(400—500) /(700—800)	(655—665) /(725—735)	(600—700) /(700—800)	450/638	(400—500) /(600—700)

1.3 数据处理方法

均值间比较采用单因素方差分析,LSD-t 检验,通过 SPSS 19.0 实现。波段的积分使用 matlab 8.0 编程计算。本文中数据表示为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 城市不同遮阴环境下光强变化特征

不同遮阴环境的光合有效辐射(PAR)日曲线均呈单峰形(图 1a),天空自然辐射下 6 时至 19 时总光强为 $11859.40 \pm 343.00 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,建筑遮阴和冠层遮阴分别只有天空的 9.09% 和 5.50%。天空日最大光合有效辐射出现在正午 12 时,为 $1489.95 \pm 67.16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,建筑遮阴和冠层遮阴日最大值分别只有 $133.10 \pm 27.41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $88.08 \pm 19.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。两种遮阴环境的每时点光强均在 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下(图 1b)。

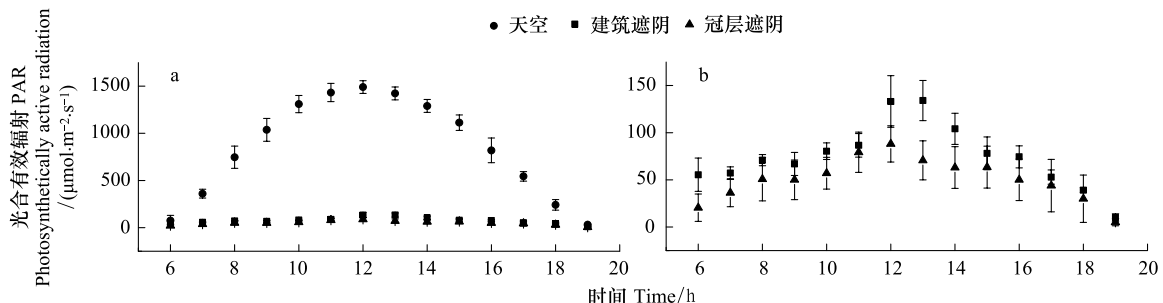


图 1 城市不同遮阴环境光合有效辐射日变化

Fig. 1 Changes in photosynthetically active radiation for different types of shade environments in urban areas

由于天空自然辐射与两种遮阴环境光强值相差较大,因此图 1(b)单独显示了图 1(a)中建筑与冠层两种遮阴环境之间的对比。本文中除图 4 外,其它图中图例均如本图所示

2.2 城市不同遮阴环境下光质变化特征

2.2.1 不同光质参数比例变化特征

蓝光在光合有效辐射中所占的比例(B/P)在一天之中波动很小(图 2a),除傍晚 19 时。傍晚蓝光比例上升。三种光环境中 B/P 日均值在建筑遮阴下最高(表 2),在冠层遮阴下最低。B/P 在上下午之间没有显著差异($P>0.05$)。红光比例(R/P)日均值最高为天空自然辐射,冠层下比建筑遮阴下高出0.024,天空下 R/P 在傍晚 19 时下降(图 2b)。因为远红光波动相对其他波段更大,因此蓝光远红光比例(B/FR)日曲线相对 B/P 和 R/P 曲线波动更大(图 2c)。天空下 B/FR 在傍晚 19 时显著高于其它时点,遮阴处则没有出现此现象。B/FR 日均值顺序分别为建筑遮阴>天空>冠层遮阴(表 2)。

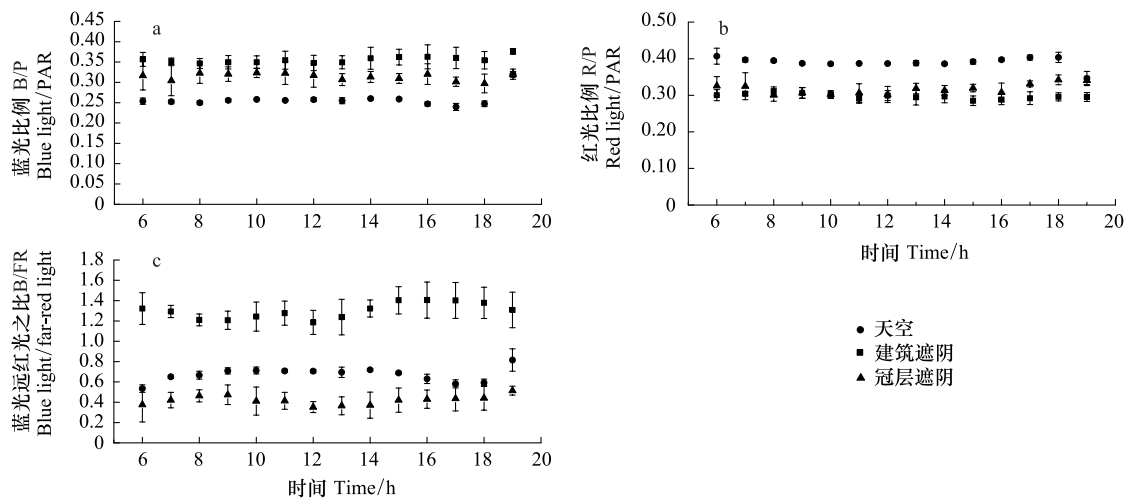


图 2 城市不同遮阴环境光质参数日变化

Fig. 2 Changes in B/P, R/P, B/FR for different types of shade environments in urban areas

天空下蓝光红光比例(B/R)在傍晚 19 时与 B/P 一样有显著上升,建筑遮阴和冠层遮阴下这种趋势不明显(图 3a)。建筑遮阴下 B/R 显著高于冠层遮阴和天空(表 2)。天空下红光远红光比例(R/FR)在早晚降低(图 3c),冠层遮阴和建筑遮阴 R/FR 日曲线则呈现正午低于上下午的趋势。

表 2 城市不同遮阴环境光合有效辐射及光质参数对比

Table 2 Comparison of light intensity and light quality for different types of shade environments in urban areas

参数 Parameters	光合有效辐射 PAR/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	蓝光比例 B/P	红光比例 R/P	蓝光远红光 比例 B/FR	红光远红光 比例 1 R/FR	红光远红光 比例 2 R/FR	蓝光红光 比例 1 B/R	蓝光红光 比例 2 B/R
		(400—500) /(400—700)	(600—700) /(400—700)	(400—500) /(700—800)	(655—665) /(725—735)	(600—700) /(700—800)	450/638	(400—500) /(600—700)
天空 Sky	11859.40±343.00a	0.258±0.002a	0.393±0.003a	0.686±0.069a	1.104±0.077aA	1.048±0.068aA	0.715±0.010aA	0.666±0.022aB
建筑遮阴 Building Shade	1077.88±115.17b	0.360±0.009b	0.296±0.005b	1.300±0.130b	1.180±0.089aA	1.108±0.093aA	1.263±0.035bA	1.196±0.036bB
冠层遮阴 Canopy Shade	651.95±188.27c	0.313±0.004c	0.320±0.004c	0.421±0.099c	0.473±0.105bA	0.422±0.111bA	1.037±0.028cA	0.986±0.073cB

日总光强、日均光质参数为均值±标准差(n=9),小写字母表示不同类型遮阴环境间参数的比较,大写字母表示参数在同一类型遮阴环境下不同波段积分之间的比较,不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.2.2 不同波段积分结果对比

蓝光红光比例 B/R 和红光远红光比例 R/FR 日曲线变化趋势没有因为积分波段的不同而发生变化(图 3)。在 3 种不同的遮阴环境中,两种不同波段积分得到的 R/FR 日均值均没有显著差异(表 2)。但 B/R 则在

三种遮阴环境中出现显著差异,(400-500)/(600-700)波段积分得到的 B/R 要低于 450/638 的方法,差值在 0.049-0.067 之间。

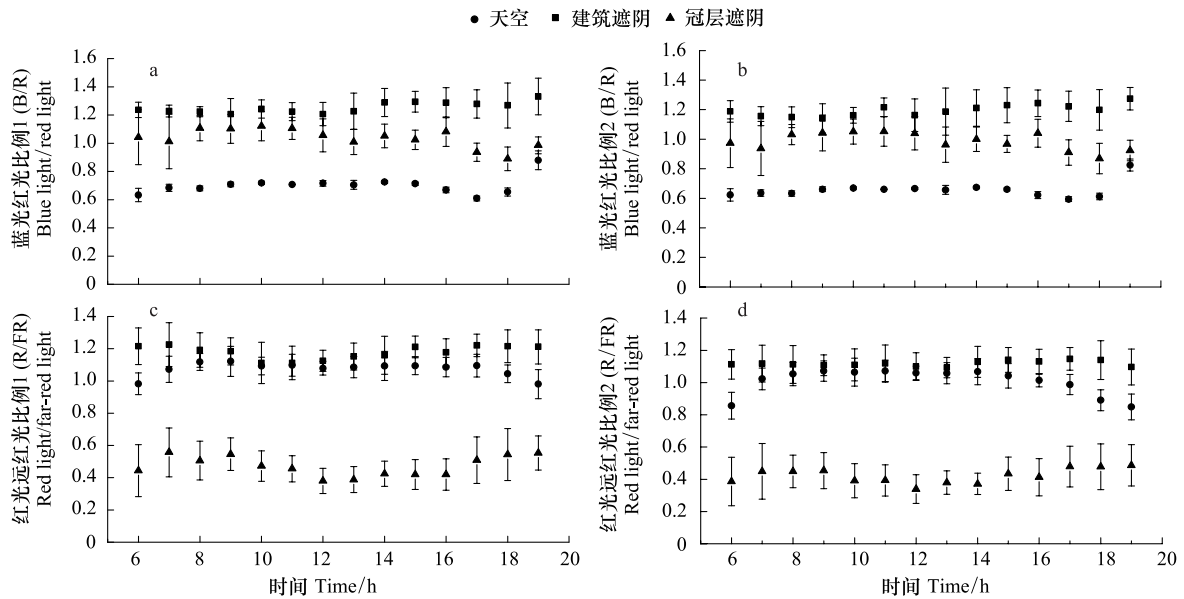


图 3 城市不同遮阴环境下不同波段积分 B/R 和 R/FR 日变化

Fig. 3 Changes of B/R and R/FR for different levels of shade environments in urban areas

图 3(a) 采用 450/638 波段积分,图 3(b) 采用 (400-500)/(600-700) 波段积分,图 3(c) 采用 (655-665)/(725-735) 波段积分,图 3(d) 采用 (600-700)/(700-800) 波段积分

2.3 城市不同遮阴环境下光强与光质的关系分析

在建筑遮阴和冠层遮阴下,红光远红光比例 R/FR 与入射 PAR 比例均呈极显著的对数关系(图 4),冠层遮阴下 $R/FR = 0.195\ln(PAR_t/PAR_i) + 1.078$,建筑遮阴下 $R/FR = 0.151\ln(PAR_t/PAR_i) + 1.534$,两者 P 值均小于 0.001。冠层遮阴下,蓝光比例 B/P 与 PAR 呈显著的对数关系,但建筑遮阴下,这种关系并不显著。

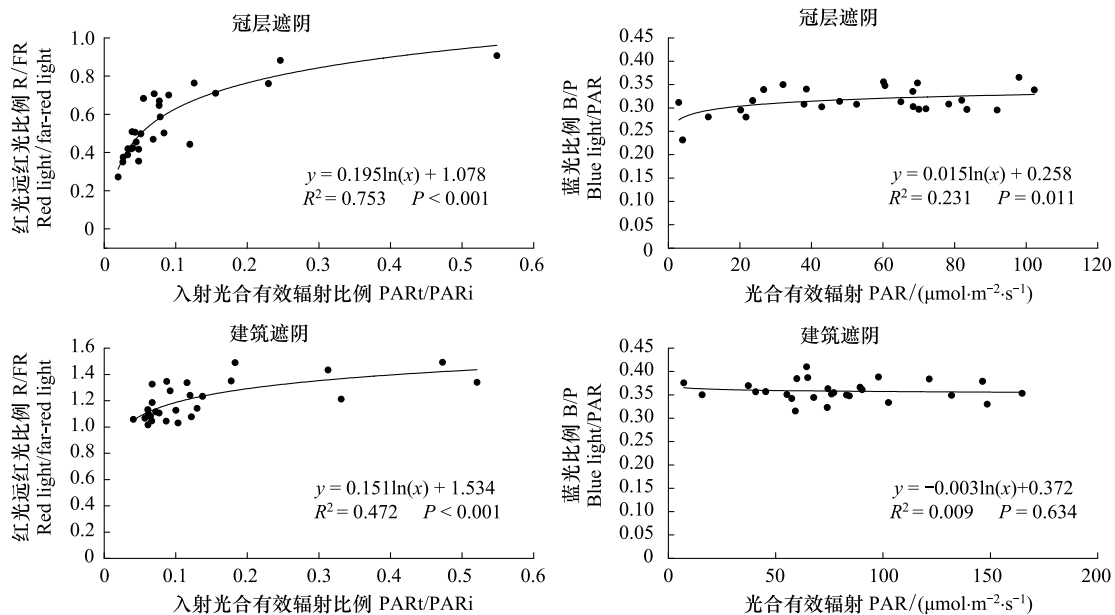


图 4 城市不同遮阴环境下光强与光质的关系

Fig. 4 Relationship of light intensity and light quality for different types of shade environments in urban areas

入射光合有效辐射比例(PAR_t/PAR_i)指遮阴环境下 PAR 与天空自然环境下 PAR 之比

2.4 建筑遮阴下光斑特征分析

遮阴处和光斑处光强在三个不同时间点均有显著差异(表3),光斑的光强要高出遮阴处 213.01%—307.54%。除 17:00 时 R/FR 在遮阴和光斑处没有显著差异,其余时点光质各参数在二者间均有显著差异,但差值很小,B/P 差值在 0.035—0.083 之间,R/P 差值在 0.019—0.047 之间,B/FR 差值在 0.291—0.469 之间,R/FR 和 B/R 差值分别在 0.131—0.162 和 0.192—0.425 之间。

表 3 建筑遮阴下光斑的光强及光质特征

Table 3 Characteristics of light intensity and light quality of lightflecks under building shade

参数 Parameters	光合有效辐射 PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	蓝光比例 B/P (400—500) /(400—700)	红光比例 R/P (600—700) /(400—700)	蓝光远红光比例 B/FR (400—500) /(700—800)	红光远红光比例 R/FR (600—700) /(700—800)	蓝光红光比例 B/R (400—500) /(600—700)
10:00 遮阴 Shade	98.42±17.16a	0.352±0.002a	0.305±0.004a	1.224±0.008a	1.097±0.010a	1.158±0.003a
光斑 Lightflecks	308.06±61.85b	0.317±0.002b	0.324±0.003b	0.933±0.005b	0.966±0.006b	0.966±0.004b
14:30 遮阴 Shade	76.56±18.03a	0.331±0.004a	0.329±0.003a	1.049±0.006a	1.073±0.018a	1.075±0.021a
光斑 Lightflecks	247.53±67.29b	0.248±0.003b	0.376±0.003b	0.591±0.082b	0.911±0.055b	0.650±0.049b
17:00 遮阴 Shade	5.55±3.47a	0.346±0.008a	0.313±0.006a	1.233±0.110a	1.103±0.082a	1.102±0.008a
光斑 Lightflecks	22.60±188.27b	0.276±0.010b	0.351±0.008b	0.764±0.104b	0.972±0.099a	0.785±0.009b

光强、光质参数为均值±标准差(n=6),不同字母表示遮阴与光斑之间差异显著($P<0.05$)

3 讨论与结论

城市作为人工生态系统,与自然生态系统相比,形成了独特的城市环境特征。建筑等人工构筑物由于材料、结构以及多样的分布形态,可对周边环境造成不同程度的影响^[13-14]。人工建筑与自然林冠对于入射光的截获可能因材质和形态的不同而有所不同,继而使得近地面植物所处的以光强和光质为特征的光环境因而有所不同。

晴天时,建筑拦截入射太阳辐射,可使得遮阴处近地面光合有效辐射降至天空自然辐射的 9.09%(表2),略高于行道树白蜡遮阴下的 5.50%,Clark 等^[15]也曾报道建筑遮阴时辐射能可以小于太阳辐射的 10%。建筑遮阴处全天大部分时间光强不超过 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,早晚光强可降至 $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下。大部分城市植物的光补偿点在 $4-40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[8, 16-17] 之间,光饱和点在 $200-1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[16-17] 之间,因此许多植物能够在建筑遮阴处生长。但对于光补偿点和光饱和点较高的喜阳植物来说,相对天空自然辐射,遮阴处低光强会缩短日光合作用时间,降低光合速率,进而影响其生长及固碳量。同时,建筑遮阴处的低光强可能会影响到城市植物的物种组成^[18]。因此,建筑对光强的衰减对于园林植物移植以及基于生态服务功能的绿化规划等具有重要意义。

相对于天空自然辐射和林冠遮阴,建筑遮阴下蓝光比例升高(表2),这与 Gaskin 和 Bell 的研究结论是一致的^[9, 12]。植物所处的环境中,是直接辐射、散射和反射的综合结果,建筑拦截直接辐射的红光和蓝光,但散射蓝光较多,被建筑表面折射到阴影中,Ustin 等^[19]研究发现,有时散射可以贡献蓝光的 25%,Iqbal^[20]也指出,短波光的散射比整个光谱更强。因此,建筑遮阴下,蓝光占光合有效辐射的比例升高,蓝光红光比例 B/R 增大。冠层遮阴下,由于冠层叶片光合作用吸收利用红蓝光,冠层下散射蓝光很少,因此蓝光比例 B/P 要低于建筑遮阴下。因为蓝光和红光的变化,使得建筑遮阴处 B/R 显著高于天空和冠层遮阴(表2)。Takemiya 等^[21]发现在接近光补偿点的低光强时,蓝光促使叶绿体在细胞表面富集及气孔孔径增加,从而增加了光合固碳的效率(约 5%)。有研究表明随着蓝光比例的增加,黄瓜和玫瑰的净光合速率有上升的趋势^[22-23],其对植物的影响与光强类似。因此建筑遮阴下蓝光比例的上升可能对遮阴处植物的光合行为有积极的作用。

蓝光远红光的比例 B/FR 在三种遮阴环境中的顺序为建筑遮阴>天空>冠层遮阴(表2),这与 Bell 的研究结果一致^[12]。直接辐射的远红光可以穿透树冠,但是被建筑遮挡,使得建筑遮阴处的比例降低,B/FR 升高。

Ahmad^[24]指出,光敏色素和蓝光受体在一些种中可能存在共同作用,以影响植物的某些性状,如下胚轴伸长的抑制及花青素的产生等,Nagashima 等^[25]也提到,尽管方向的生长依赖于向光素,这个反应的大小被光敏色素和隐花色素所调节。因此,虽然没有研究报道建筑遮阴下 B/FR 的改变会直接影响植物的光合,但是其光合和形态可能会被光质影响下的蓝光受体和光敏色素之间的关系间接影响。

天空和建筑遮阴下红光远红光比例 R/FR 没有显著差异,Griffith^[26]也提到建筑遮阴在某种意义上属于“中性”遮阴。但冠层遮阴处显著低于二者,冠层下 R/FR 的降低与许多自然群落研究结果一致,这是由红光被冠层吸收利用,远红光可以穿透林冠到近地面引起的。冠层下 R/FR 的降低可能引起植物光合下降、叶面积减少、株高增加、生物量分配模式改变等一系列生长参数发生变化^[3-4]。

在傍晚时分,自然和林木遮阴处 B/P 的上升和 R/FR 的下降与许多研究结果一致^[27-28],这是早晚受太阳高度角及大气和水汽影响,散射蓝光和远红光增加的结果。此外,建筑遮阴处日均红光比例 R/P 略低于冠层遮阴,与 Bell 的结果不一致^[12],这可能与西向建筑遮挡有关,使得傍晚时建筑遮阴下的 R/P 略低于冠层遮阴下。

冠层下 R/FR 与入射光合有效辐射比例呈显著的对数关系(图 4),Pecot 对长叶松森林的研究也呈相同的趋势^[11]。建筑遮阴下二者也呈对数关系,参数与冠层遮阴下略有不同,这在一定程度上反映了建筑对红光和远红光的拦截特征。此外,冠层遮阴下 B/P 与 PAR 呈对数关系,但建筑遮阴下这种关系并不显著,说明建筑遮阴下光谱可能受到周围建筑物的高度、方向、相对位置及建筑表面反射等因素影响而变化更复杂。

使用不同波段对 R/FR 进行积分,对结果没有显著影响(表 2),意味着在进行其它光谱测量研究和光与植物相关控制实验时,两种波段积分均可。虽然对 B/R 的两种积分方法结果有显著差异,但这种微小的差异可能不会显著影响植物的光合和形态^[22-23],可以认为其与 R/FR 一样,两种波段积分方法可以通用。

三个不同时点的建筑遮阴处光斑的光强明显高于遮阴处,这对于建筑遮阴下的植物来说可能具有重要的意义。在高层建筑群中重度建筑遮阴可能使近地面光强降至全日照的 4%甚至更低^[8,29],玻璃反光光斑是植物在弱光环境中利用更多光能的途径之一,这种类似于自然林木冠层下的光斑可以使城市植物在极低光强时亦能维持生长和正向碳平衡。

从对天空、建筑遮阴和冠层遮阴的研究结果可以看出,城市不同遮阴环境下光环境的差异主要体现在光合有效辐射和部分光质参数的改变。遮阴使光强降低,与天空自然辐射相比,建筑遮阴下蓝光比例 B/P、蓝光红光比例 B/R 和蓝光远红光比例 B/FR 升高,且高于冠层遮阴,红光远红光比例 R/FR 没有显著变化,光质对植物的光合可能起到积极的作用。对于更多城市建筑形态、布局对光环境的影响及城市植物对建筑遮阴下光强光质改变的阈值反应尚需要更多的实验研究。

参考文献 (References):

- [1] 北京市地方志编纂委员会. 北京志 • 建筑志. 北京: 北京出版社, 2003.
- [2] 胡世德. 北京近年高层建筑发展分析. 建筑技术, 2005, 36(6): 408-411.
- [3] Valladares F, Saldana A, Gianoli E. Costs versus risks: Architectural changes with changing light quantity and quality in saplings of temperate rainforest trees of different shade tolerance. *Austral Ecology*, 2012, 37(1): 35-43.
- [4] Bertamini M, Muthuchelian K, Nedunchezian N. Shade effect alters leaf pigments and photosynthetic responses in Norway spruce (*Picea abies* L.) grown under field conditions. *Photosynthetica*, 2006, 44(2): 227-234.
- [5] 陈亚军, 朱师丹, 曹坤芳. 两种光照下木质藤本和树木幼苗的生理生态学特征. *生态学报*, 2008, 28(12): 6034-6042.
- [6] 胡启鹏, 郭志华, 李春燕, 马履一. 不同光环境下亚热带常绿阔叶树种和落叶阔叶树种幼苗的叶形态和光合生理特征. *生态学报*, 2008, 28(7): 3262-3270.
- [7] Kjelgren R K, Clark J R. Photosynthesis and leaf morphology of *Liquidambar styraciflua* L. under variable urban radiant-energy conditions. *International Journal of Biometeorology*, 1992, 36(3): 165-171.
- [8] Hamerlynck E P. Chlorophyll fluorescence and photosynthetic gas exchange responses to irradiance of Tree of Heaven (*Ailanthus altissima*) in contrasting urban environments. *Photosynthetica*, 2001, 39(1): 79-86.

- [9] Gaskin T A. Light quality under saran shade cloth. *Agronomy Journal*, 1965, 57(3) : 313-314.
- [10] Navrátil M, Špunda V, Marková I, Janouš D. Spectral composition of photosynthetically active radiation penetrating into a Norway spruce canopy: the opposite dynamics of the blue/red spectral ratio during clear and overcast days. *Trees*, 2007, 21(3) : 311-320.
- [11] Pecot S D, Horsley S B, Battaglia M A, Mitchell R J. The influence of canopy, sky condition, and solar angle on light quality in a longleaf pine woodland. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(6) : 1356-1366.
- [12] Bell G E, Danneberger T K, McMahon M J. Spectral irradiance available for turfgrass growth in sun and shade. *Crop Science*, 2000, 40: 189-195.
- [13] 邵海荣, 周道英. 建筑物的遮阴效应及对绿化的影响. *北京林业大学学报*, 1996, 18(2) : 37-44.
- [14] Bonan G B. The microclimates of a suburban Colorado (USA) landscape and implications for planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 49(3) : 97-114.
- [15] Clark J R, Kjelgren R K. Conceptual and management considerations for the development of urban tree plantings. *Journal of Arboriculture*, 1989, 15(10) : 229-236.
- [16] 陈月华, 廖建华, 覃事妮. 长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(10) : 116-120.
- [17] 常博明. 天津市六种园林植物耐阴性研究及应用 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
- [18] Godefroid S, Koedam N. Urban plant species patterns are highly driven by density and function of built-up areas. *Landscape Ecology*, 2007, 22(8) : 1227-1239.
- [19] Ustin S L, Curtiss B. Spectral characteristics of ozone-treated conifers. *Environmental and Experimental Botany*, 1990, 30(3) : 293-308.
- [20] Iqbal M. *An Introduction to Solar Radiation*. New York: Elsevier, 1983: 115-118.
- [21] Takemiya A, Inoue S, Doi M, Kinoshita T, Shimazaki K. Phototropins promote plant growth in response to blue light in low light environments. *The Plant Cell Online*, 2005, 17(4) : 1120-1127.
- [22] Hogewoning S W, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. Blue light dose - responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(11) : 3107-3117.
- [23] Terfa M T, Solhaug K A, Gislerrød H R, Olsen J E, Torre S. A high proportion of blue light increases the photosynthesis capacity and leaf formation rate of *Rosa*× *hybrida* but does not affect time to flower opening. *Physiologia Plantarum*, 2013, 148(1) : 146-159.
- [24] Ahmad M, Cashmore A R. The blue-light receptor cryptochrome I shows functional dependence on phytochrome A or phytochrome B in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 1997, 11(3) : 421-427.
- [25] Nagashima A, Suzuki G, Uehara Y, Saji K, Furukawa T, Koshiha T, Sekimoto M, Fujioka S, Kuroha T, Kojima M, Sakakibara H, Fujisawa N, Okada K, Sakai T. Phytochromes and cryptochromes regulate the differential growth of *Arabidopsis* hypocotyls in both a PGP19 - dependent and a PGP19 - independent manner. *The Plant Journal*, 2008, 53(3) : 516-529.
- [26] Griffith T M, Sultan S E. Shade tolerance plasticity in response to neutral vs green shade cues in *Polygonum* species of contrasting ecological breadth. *New Phytologist*, 2005, 166(1) : 141-148.
- [27] Battaglia M A. *The Influence of Overstory Structure on Understory Light Availability in a Longleaf Pine (Pinus palustris Mill.) Forest* [D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [28] Baraldi R, Rossi F, Facini O, Fasolo F, Rotondi A, Magli M, Nerozzi F. Light environment, growth and morphogenesis in a peach tree canopy. *Physiologia Plantarum*, 1994, 91(2) : 339-345.
- [29] 于盈盈, 胡聘, 郭二辉, 肖强, 柳敏, 张小飞. 城市遮阴环境变化对大叶黄杨光合过程的影响. *生态学报*, 2011, 31(19) : 5646-5653.