

不同朝向的五叶地锦对墙体的降温效果及生理机制

魏永胜^{1,2}, 芦新建³, 赵廷宁^{3,4}, 周心澄^{3,4}, 王堃²

(1. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国农业大学 动物科技学院, 北京 100094;

3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 4. 北京林业大学 边坡绿化研究所, 北京 100083)

摘要: 研究攀缘植物对墙体的降温作用及生理学机制, 为垂直绿化的植物选择及生态效应的定量化研究提供依据, 以不同朝向的五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia* 为材料, 对墙体温度, 蒸腾速率, 冠层温度, 叶片对入射光的反射、透射及以叶绿素荧光参数表示的潜在光能利用能力等指标进行分析。结果表明, 不同朝向的五叶地锦对墙体的降温效果存在显著差异, 东、南、西、北 4 个朝向日平均降温值依次为 (5.4 ± 0.61) , (3.3 ± 0.48) , (3.1 ± 0.47) 和 (0.48 ± 0.07) °C。降温值除受墙体温度 ($r = 0.879 4$) 影响外, 和蒸腾速率 ($r = 0.770 3$)、冠层温度 ($r = 0.645 8$) 和透射率 ($r = 0.504 4$) 及叶绿素荧光参数 F_0 ($r = 0.475 8$) 等生理生态指标存在显著的正相关关系。同时表明, 五叶地锦不适于北向墙体绿化。因此, 在垂直绿化选择植物种时, 应同时考虑植物的蒸腾速率及其对光的反射、透射及利用能力。图 1 表 5 参 20

关键词: 植物学; 五叶地锦; 墙体; 降温效果

中图分类号: S718.5; Q149 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)04-0518-06

Cooling and physiology with *Parthenocissus quinquefolia* on walls oriented in cardinal directions

WEI Yong-sheng^{1,2}, LU Xin-jian³, ZHAO Ting-ning^{3,4}, ZHOU Xin-cheng^{3,4}, WANG Kun²

(1. College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3. Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Slope Revegetation Institute, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To determine differences in cooling as well as physiological characteristics from *Parthenocissus quinquefolia* covering four walls facing north, east, south, and west, a non-contact infrared temperature thermometer (Optris Minisight ms⁺), an Li-1600 steady state porometer, and a hand-held OS-30p chlorophyll fluorometer were employed to examine temperatures of a bare wall, a plant-covered wall, a canopy, and a leaf as well as determine ambient air temperature, transpiration and stomatal resistance, leaf albedo and transmission, and basic parameters of *P. quinquefolia* chlorophyll fluorescence: F_0 , F_m , and F_v/F_m , and a correlation analysis were also utilized. Results of day temperature deviations showed plant-covered walls had significantly greater mean cooling values for east ($P < 0.05$), south ($P < 0.05$), and west ($P < 0.05$) orientations compared to bare walls. There were also significant positive correlations between cooler wall temperatures and bare wall temperatures ($r = 0.879 4$, $P < 0.000 1$), transpiration ($r = 0.770 3$, $P < 0.01$), canopy temperature ($r = 0.645 8$, $P < 0.01$), leaf transmission ($r = 0.504 4$, $P < 0.05$), and F_m ($r = 0.475 8$, $P < 0.05$). Thus, plants covering east-, south-, and west-facing walls would be beneficial. Additionally, transpiration, leaf albedo, leaf transmission, F_m , and F_v/F_m could be used as selection indexes. [Ch, 1 fig. 5 tab. 20 ref.]

收稿日期: 2009-09-18; 修回日期: 2009-11-13

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD16B06)

作者简介: 魏永胜, 副教授, 从事植物生理生态研究。E-mail: wysh70@126.com

Key words: botany; *Parthenocissus quinquefolia*; walls; cooling effect

攀援植物是一类不能自由直立, 须通过主茎的缠绕或攀缘器官的攀援才能在水平或垂直空间内生长的植物^[1-2], 被广泛地应用于垂直绿化, 以增加绿化面积, 提高绿化指数。对攀援植物的研究目前已经从分类、生长习性和应用等方面^[3-4]转入生态效益方面^[5-6], 如在释氧、固碳、增湿和降温等。张迎辉等^[6-7]通过蒸腾潜热计算了爬山虎 *Parthenocissus tricuspidata* 对周围 1 000 m³ 空气的降温增湿效果, 表明可以降温 0.45 °C, 增加湿度 0.39%。照射在植物表面的辐射能, 除通过蒸腾散失以外, 还应包括叶片的反射与透射、对外长波幅射(只有在植株温度高于环境温度时才发生)、光合作用固定能量及植株自身温度变化吸收或释放的能量^[8]。而关于这些组分对降温效果的影响却很少涉及。降温的对象也是更多地关注环境气温, 而很少对攀援植物所覆盖的下垫面(如墙体)的实际温度进行研究, 更缺少在不同朝向墙体上的攀援植物降温效果的研究资料。因此, 也就无从知道攀援植物对墙体的整体降温效果, 当然也无法进一步推算因降温对建筑物整体能量消耗(如空调耗电)的影响。本研究选择生长在不同朝向的五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia* 为材料, 研究它对不同朝向墙体的降温效果, 并通过蒸腾、光能利用效率(叶绿素荧光法)等指标解释其降温差异的生理学机制, 以期为攀援植物在垂直绿化中的合理利用及其生态效应的定量化研究提供依据。

1 材料与方 法

试验材料为生长于北京林业大学校园内学生公寓 3 号楼西和北 2 个朝向的墙体, 5 号楼东向墙体及南门值班室南墙上生长的五叶地锦。所选择五叶地锦均已生长到建筑物顶部, 覆盖宽度在 3 m 以上。

利用 Optris Minisight ms+ (Optris GmbH, Germany) 非接触红外测温仪测定各方位裸露墙体表面温度(T_{bw}), 植物覆盖下墙体表面温度(T_{uw})和植物冠层表面温度(T_c)。 T_{bw} 与 T_{uw} 的差值为降温值。测量时, 测温仪光学镜头离地高度为 1.5 m 左右, 与待测物距离约为 2.0 m(测量光斑的直径为 100 mm), 且垂直于待测平面, 每面墙体随机测定 5 个点, 点与点之间距离在 0.5 m 以上。被测墙体均为砖混结构, 五叶地锦覆盖厚度约为 0.3 m。测量时间为 8:00 - 20:00, 2 h 测定 1 次。

在 9:00 - 10:00 利用 Li-1600 稳态气孔计(Li-Cor, USA)测定五叶地锦叶片的蒸腾速率(T_r), 相对湿度(H_R), 叶面温度(T_L), 叶室温度(T_a)和光照强度。以光强测量仪直接对准太阳测量的结果为总光强(L_t), 垂直于叶片上表面 10 cm 测量的结果为反射光强(L_r), 紧贴叶片下表面并保持上表面与入射光垂直所测结果为透射光强(L_t)。各个朝向随机选 5 片叶测定, 并做标记后用于测定叶绿素荧光。

在 9:00 和 11:00 利用 OS-30p(Ospi-Sciences, Inc., USA)测定叶绿素荧光参数(F_o , F_m), 并计算 F_v / F_m , $F_v = F_m - F_o$ 。测定前, 夹上暗适应夹, 进行 15 min 暗适应。

数据用 SAS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同朝向裸露墙体、冠下墙体及冠层温度日变化规律

不同朝向的裸露墙体表面温度 T_{bw} 的日变化规律是显著不同的(图 1A), 4 条曲线均为明显单峰型, 且峰值依次出现, 东向墙体温度在 10:00 最先达到峰值, 其后是南向墙体, 在 14:00 出现, 最后是西向和北向墙体, 同时出现在 16:00。而五叶地锦覆盖下的墙体表面温度 T_{uw} 日变化(图 1B)不同于 T_{bw} , 主要体现在线型和峰值出现的时间不同。东向和南向的 T_{uw} 分别在 10:00 和 14:00 达到较高值后, 温度的升高较为缓慢, 且最高值显著低于 T_{bw} 。而西向和北向的 T_{uw} 峰值出现的时刻与 T_{bw} 相同, 但温度低于 T_{bw} 。4 个朝向的最高值均出现在 16:00。不同朝向五叶地锦冠层表面温度 T_c 的日变化如图 1C 所示, 东向 T_c 曲线为“M”型, 其他 3 个朝向的 T_c 日变化与 T_{bw} 相同, 且最高温度出现的时间也相同, 但数值均低于相应的 T_{bw} 。

不同朝向五叶地锦的降温效果以 $T_{uw} - T_{bw}$ 的值(T_d)来表示(表 1)。从朝向看, 位于东墙上的五叶

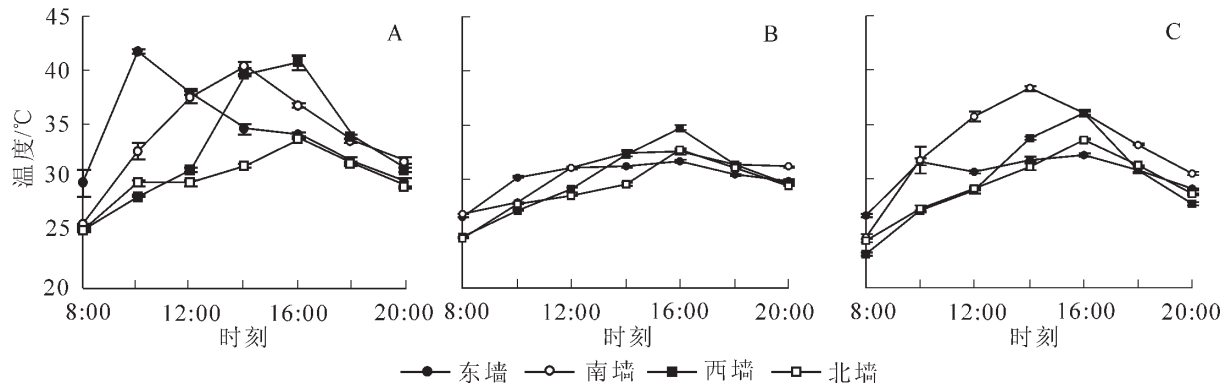


图1 不同朝向五叶地锦冠层(A)、冠层下墙体表面(B)和相应裸墙表面(C)温度日变化

Figure 1 Temperature diurnal variation of bare wall(A), wall under canopy(B) and canopy(C) of different orientations

地锦降温的效果最好, 墙体温度平均下降值为 $(5.40 \pm 0.61)^\circ\text{C}$, 而北墙上的则只有 $(0.48 \pm 0.07)^\circ\text{C}$ 。按时间分析, 10:00至16:00降温效果好, 降温在 $3.6 \sim 5.6^\circ\text{C}$ 。位于东墙的五叶地锦对墙体的降温效果在10:00可达 $(12.40 \pm 0.14)^\circ\text{C}$, 是所有时段与朝向中最高的, 其他3个朝向的降温最高值均出现在14:00。 T_d 与 T_{lw} 的Pearson相关系数为0.879 4($T_d = -15.90 + 0.58 T_{lw}$, $P < 0.000 1$), 若按多项式回归, 相关系数会更高, 为0.909 9, 则 $T_d = 15.90 - 1.30 T_{lw} + 0.03 T_{lw}^2$, 与 T_c 的相关系数为0.531 4($P < 0.000 1$), T_{lw} 与 T_c 的相关系数为0.806 8($P < 0.000 1$)。由此可见, T_c 与 T_d 均受到 T_{lw} 的强烈影响, 也表明, 在高温季节五叶地锦可以有效地降低墙体表面温度。但东、西和北3个朝向的 T_{lw} 日均值差异并不显著, 分别为 (30.40 ± 0.32) , (29.60 ± 0.69) 和 $(29.30 \pm 0.49)^\circ\text{C}$ ($P < 0.050 0$, $n = 35$), 显著低于南向的 $(32.90 \pm 0.74)^\circ\text{C}$ 。而日均降温值(表1)差异显著, 表明不同朝向墙体上的五叶地锦的生理生态特性对降温效果的影响是显著的。

表1 不同朝向有无五叶地锦的墙体表面温度差值的日变化

Table 1 Diurnal variation (T_d) of difference between T_{lw} and T_{lw} on different orientations

墙体朝向	墙体表面温度差值/ $^\circ\text{C}$							均值
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	
东墙	-6.7 ± 0.02 c	-12.4 ± 0.14 d	-7.2 ± 0.12 d	-5.1 ± 0.09 b	-3.1 ± 0.15 b	-2.2 ± 0.12 b	-1.0 ± 0.09 bc	-5.4 ± 0.61 c
南墙	0.7 ± 0.07 a	-2.6 ± 0.19 c	-4.6 ± 0.17 c	-8.7 ± 0.46 d	-3.7 ± 0.38 b	-2.7 ± 0.12 c	-1.4 ± 0.19 c	-3.3 ± 0.48 b
西墙	-0.2 ± 0.07 b	-2.1 ± 0.15 b	-2.3 ± 0.27 b	-7.5 ± 0.65 c	-6.9 ± 0.21 c	-2.3 ± 0.11 b	-0.4 ± 0.17 a	-3.1 ± 0.47 b
北墙	-0.3 ± 0.05 b	-0.8 ± 0.07 a	-0.2 ± 0.12 a	-1.1 ± 0.09 a	-0.7 ± 0.12 a	-0.1 ± 0.16 a	-0.1 ± 0.17 ab	-0.48 ± 0.07 a
均值	-1.6 ± 0.68 a	-4.5 ± 1.05 cd	-3.6 ± 0.60 bc	-5.6 ± 0.69 d	-3.6 ± 0.51 bc	-1.8 ± 0.24 ab	-0.75 ± 0.16 a	

说明: 不同小写字母表示同行数据差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同朝向五叶地锦叶片对入射光的反射、透射及蒸腾速率差异

不同朝向五叶地锦叶片对光的反射、透射及蒸腾等相关数据(表2)显示, 五叶地锦叶片所接受的有效光能辐射以东向和南向的高, 其次为西向, 而北向最低。而反射率在东向和南向高于西向和北向, 但东南之间, 西北之间差异不显著。透射率则以东向最高, 其他3个朝向间差异不显著, 均低于东向。反射率与透射率之和, 除东向和北向之间存在显著差异外, 其他任意2个朝向间均无差异。因此可以表明, 朝向对五叶地锦叶片反射能力和透射能力均有影响, 但对两者的和影响相对较小。各朝向叶片温度均低于或接近叶室温度, 差异不显著, 表明叶片与环境间的长波能量交换并不多。蒸腾速率以东向叶片最高, 其他3个朝向间差异不显著, 且低于东向。而气孔阻力则以西向叶片最高, 而其他3个朝向间差异不显著。

表 2 不同朝向五叶地锦叶片光利用特性及相关生理指标

Table 2 *Parthenocissus quinquefolia* leaves characteristics of different orientations

墙体朝向	入射光强/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	反射率/%	透射率/%	(反射率+透射率)/%	透射/反射	相对湿度/%	叶片温度/ $^{\circ}\text{C}$	气室温度/ $^{\circ}\text{C}$	蒸腾速率/ ($\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)	气孔阻力 / ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)
东	452.8 ± 19.7 a	9.1 ± 0.3 a	5.8 ± 0.3 a	14.9 ± 0.5 a	0.39 ± 0.02 b	39.3 ± 0.1 c	25.7 ± 0.3 b	26.2 ± 0.1 b	9.0 ± 2.0 a	1.8 ± 0.4 b
南	294.0 ± 15.0 a	9.1 ± 0.7 a	3.5 ± 0.3 b	12.6 ± 0.9 ab	0.71 ± 0.07 a	32.4 ± 0.0 d	28.2 ± 0.2 a	28.1 ± 0.2 a	1.4 ± 0.3 b	15.6 ± 3.7 a
西	173.4 ± 9.8 c	7.8 ± 0.7 ab	5.3 ± 0.3 b	13.1 ± 0.6 ab	0.70 ± 0.09 a	44.8 ± 0.0 a	23.9 ± 0.1 c	24.3 ± 0.1 c	4.2 ± 0.4 b	2.7 ± 0.2 b
北	55.6 ± 3.8 d	7.0 ± 0.7 b	4.7 ± 0.5 b	11.7 ± 0.9 b	0.63 ± 0.03 a	42.0 ± 0.0 b	23.7 ± 0.1 c	23.9 ± 0.1 d	2.3 ± 0.2 b	5.2 ± 0.5 b

说明：不同小写字母表示同行数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同朝向五叶地锦叶片的叶绿素荧光特性

对不同朝向五叶地锦的荧光参数的双因素方差分析(表 3)表明，长期在不同朝向生长的五叶地锦荧光参数 F_o 和 F_v/F_m 在不同时刻有显著差异。而 F_m 相对稳定，不随时间变化。但进一步的分析(表 4)表明，对于 F_o ，随冠层温度的升高，东向、南向和西向五叶地锦的 F_o 降低，但北向的增加。 F_m 的变化趋势与 F_o 相同。而 F_v/F_m 相对变化较小，北向 2 个时刻的值均较低，而其他 3 个朝向的值接近。变异系数(表 4)分析也表明， F_v/F_m 更为稳定。因此，生在东向、南向和西向五叶地锦对光能的潜在利用能力高于北向的五叶地锦。

表 3 时间和朝向对叶绿素荧光参数 F_o 、 F_m 及 F_v/F_m 影响的方差分析

Table 3 ANOVA of time and orientation effects on fluorescence parameters F_o , F_m and F_v/F_m

统计量	F_o		F_m		F_v/F_m	
	时间	朝向	时间	朝向	时间	朝向
F 值	17.69**	6.69**	0.08	13.11**	25.09**	37.65**
P	0.000 2	0.001 1	0.785 5	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1

说明： $n_{\text{时间}}=20$ ； $n_{\text{朝向}}=10$ 。

表 4 不同时间和朝向的五叶地锦叶片叶绿素荧光参数及变异系数

Table 4 Fluorescence parameters of *Parthenocissus quinquefolia* leaves of different orientations and time

参数	时刻	不同墙体朝向荧光参数及变异系数							
		东		南		西		北	
		数值	变异系数/%	数值	变异系数/%	数值	变异系数/%	数值	变异系数/%
F_o	9:00 - 10:00	73.4 ± 0.98 a	2.98	56.0 ± 1.26 c	5.05	77.0 ± 1.08 a	2.81	62.4 ± 1.78 b	6.37
	11:00 - 12:00	55.4 ± 1.03 c	4.16	47.6 ± 1.21 d	5.68	48.2 ± 2.31 d	10.72	73.0 ± 2.00 a	6.12
F_m	9:00 - 10:00	295.2 ± 2.96 a	2.24	299.6 ± 4.58 a	3.46	240.0 ± 10.99 c	9.16	147.2 ± 16.8 d	25.5
	11:00 - 12:00	266.0 ± 5.75 b	4.84	232.2 ± 8.27 c	7.97	239.5 ± 4.21 c	3.93	232.2 ± 7.15 c	6.89
F_v/F_m	9:00 - 10:00	0.75 ± 0.002 b	0.65	0.81 ± 0.002 a	0.53	0.68 ± 0.11 c	3.24	0.56 ± 0.30 d	11.99
	11:00 - 12:00	0.79 ± 0.006 a	1.84	0.79 ± 0.006 a	1.79	0.79 ± 0.007 a	1.90	0.68 ± 0.008 c	2.89

说明：不同小写字母表示同一指标数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 对墙体的降温值与各因素的相关性

通过这些数据对五叶地锦降温效果中各组分的地位进行判断仍很困难。因此，将所有数据按下式进行标准化： $X = (x_i - x_m)/e_s$ 。利用标准化后的数据计算降温值与各因素的相关系数 r (表 5)。数据表明，除气孔阻力(R_s)外，降温值与其他因子均呈正相关，但仅与蒸腾速率(T_r)，冠层温度(T_c)，叶绿素荧光参数(F_m)，透射率及其与反射率之和的相关性达到显著水平 ($P < 0.05$, $n=20$)。

表5 降温效果与环境 and 生理因素的相关性

Table 5 Correlation test of cooling value between condition and physiological factors

	冠层温度	F_o	F_m	F_v/F_m	蒸腾速率	气孔阻力	叶面温度	反射率+透射率	反射率	透射率
相关系数	0.645 8*	0.424 1	0.475 8*	0.324 2	0.770 3**	-0.404 1	0.119 5	0.563 1**	0.344 4	0.504 4*
F	0.002 1	0.062 4	0.034 0	0.163 1	0.000 1	0.077 2	0.615 7	0.009 7	0.137 1	0.023 3

说明: $n_{\text{时间}} = 20$; $n_{\text{朝向}} = 10$ 。

3 讨论

植被可以缓解城市热岛效应已成为一个共识^[9-10]。目前的研究热点主要集中于植被效应的定量化^[11-12], 通过数学模型计算植被对环境温度的影响^[13-14], 以及因此而减少的制冷能源消耗^[15-17]等。如 Alexandri 等^[16-17]计算结果表明, 在香港, 有植被的屋顶气温比没植被的低 8.4 °C, 可降低制冷能耗 32% 以上。但上述研究中所用植物的相关参数多是经验估计值, 如 Alexandri 等^[16]在进行模拟计算时, 植被的反光率和气孔阻力分别取值为 0.30 和 $1 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。不同植物种类因其叶片特性不同, 反射能力和气孔阻力差异是很大的。同一种植物生长在不同环境下, 差异也很大。如本研究中, 东侧墙体上五叶地锦叶反射率为 $(9.1 \pm 0.3)\%$, 而北侧只有 $(7.0 \pm 0.7)\%$, 气孔阻力东侧的为 $(1.8 \pm 0.4) \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$, 而南侧可高达 $(15.6 \pm 3.7) \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。因此, 应对具体植物展开研究。

绿化植物在高温季节降低环境温度, 可包括对环境空气和下垫面影响 2 个方面。绿化方式可有平面和垂直 2 种。绿化植物在平面中有乔、灌、草, 而垂直绿化中则主要是攀缘植物。目前, 研究最多的是对环境空气温度的降温效果^[5-7, 18], 其次是对下垫面的降温效果研究, 如杜克勤等^[19]的研究表明, 在夏季行道树、攀缘植物和草坪可以使下垫面温度分别比对应的裸地低 2.2 ~ 3.2, 2.7 ~ 3.9 和 9.8 °C, 降温的主要方式是通过蒸腾作用产生的。我们的研究结果也表明, 五叶地锦可以有效降低墙体温度 0.5 ~ 5.5 °C。但这里是对垂直墙体的降温效果, 而不是对水平下垫面的影响。此外, 降温效果会因所处的朝向不同而产生差异, 按东南西北顺序依次降低。造成这种差异的原因, 是由于所处墙体温度、蒸腾、冠层温度、叶片对入射光的反射、透射及利用能力等不同。尽管蒸腾是主要的生理因素(相关系数最高, $r = 0.77$), 但高的蒸腾意味着高的失水, 因此, 选择垂直绿化用植物时, 不能仅考虑蒸腾。叶片对入射光的反射、透射及利用能力也与降温效果呈显著的正相关关系, 这就为植物的选择提供了更科学的依据。此外, 同一种植物在不同朝向降温效果显著不同, 尤其是在北向墙体上, 降温效果最低。这固然受墙体温度的影响, 但其生理生态特征明显不同。如, 在 16:00, 东向和北向墙体温度分别为 34.1 °C 和 33.8 °C, 但降温值却分别为 3.1 °C 和 0.7 °C, 而蒸腾及潜在光能利用能力的却有着显著差异。这表明, 五叶地锦种植在建筑物北侧并不是理想选择。夏汉平等^[20]的研究结果也表明, 异叶爬墙虎 *Parthenocissus heterophylla* 在长时间遮光后出现明显落叶现象, 不是遮光环境下的首选植物, 其优势弱于薜荔 *Ficus pumila*。因此, 在不同的朝向上应选择不同的植物种。

综上所述, 不同朝向的五叶地锦有着不同的降温效果, 对北向墙体的降温效果并不理想。降温的效果主要受墙体温度、蒸腾、冠层温度、叶片对入射光的反射、透射及利用能力等的影响。对于蒸腾、冠层温度、叶片对入射光的反射、透射及利用能力等生理生态因子对降温效果的精细计算则有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 蔡永立, 郭佳. 藤本植物适应生态学研究进展及存在问题[J]. 生态学杂志, 2000, **19** (6): 28 - 33.
CAI Yongli, GUO Jia. Progress and problem of vine adaptive ecology [J]. *Chin J Ecol*, 2000, **19** (6): 28 - 33.
- [2] 陶建平, 钟章成. 支持物倾角对攀援植物栝楼形态和生长的影响[J]. 生态学报, 2003, **23** (1): 1 - 7.
TAO Jianping, ZHONG Zhangcheng. Effects of support angles on the morphology and growth in the herbaceous climber *Trichosanthes kirilowii* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (1): 1 - 7.

- [3] 涂淑萍, 傅波. 攀援植物在城市绿化中的应用研究[J]. 江西农业大学学报, 1996, **18** (4): 464 - 469.
TU Shuping, FU Bo. A study on application of climbers in urban greening [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 1996, **18** (4): 464 - 469.
- [4] 肖松江, 孙振元, 杨中艺, 等. 3 种爬山虎属植物 23 个生态型的耐荫性研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006, **45** (2): 73 - 77
XIAO Songjiang, SUN Zhenyuan, YANG Zhongyi, *et al.* Shade-tolerance of 23 ecotypes within three species of *Parthenocissus* spp. collected from southern and middle parts of China [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2006, **45** (2): 73 - 77.
- [5] 刘光立, 陈其兵. 成都市 4 种垂直绿化植物生态学效应研究[J]. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2004, **25** (3): 259 - 262.
LIU Guangli, CHEN Qibing. Study on the ecological benefits of four kinds of vertical plant in Chengdu [J]. *J China West Norm Univ Nat Sci*, 2004, **25** (3): 259 - 262.
- [6] 张迎辉, 姜成平, 赵文飞, 等. 城市垂直绿化植物爬山虎的生态效应[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (6): 669 - 672.
ZHANG Yinghui, JIANG Chengping, ZHAO Wenfei, *et al.* Ecological effects of urban climbing plant *Parthenocissus tricuspidata* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (6): 669 - 672.
- [7] 杨士弘. 城市绿化树木的降温增湿效应研究[J]. 地理研究, 1994, **13** (4): 74 - 80.
YANG Shihong. A study on the effect of decreasing temperature and increasing humidity of urban afforestation trees [J]. *Geogr Res*, 1994, **13** (4): 74 - 80.
- [8] 关裕宓. 植物的能量利用与热机原理初探[J]. 北京林业大学学报, 1994, **16** (1): 75 - 94.
GUAN Yufu. The principle of heat-engine in plants [J]. *J Beijing For Univ*, 1994, **16** (1): 75 - 94.
- [9] PICOT X. Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth, case study: Pizza della Scienze, Milan, Italy [J]. *Energ Build*, 2004, **36** (4): 329 - 334.
- [10] DIMOUDI A, IKOLOPOULOU M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits [J]. *Energ Build*, 2003, **35**: 69 - 76.
- [11] YU Chen, HIEN W N. Thermal benefits of city parks [J]. *Energ Build*, 2006, **38**: 105 - 120.
- [12] KIKEGAWA Y, GENCHI Y, KONDO H, *et al.* Impacts of city-block-scale counter measures against urban heat island phenomena upon a building's energy consumption for air conditioning [J]. *Appl Energ*, 2006, **83**: 649 - 668.
- [13] ZHANG J Q, FANG X P, ZHANG H X, *et al.* A heat balance model for partially vegetated surfaces [J]. *Infrared Phys & Technol*, 1997, **38**: 287 - 294.
- [14] TAHA H, DOUGLAS S, HANEY J. Mesoscale meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetation [J]. *Energ Build*, 1997, **25**: 169 - 177
- [15] CA V T, ASAEDA T, ABU E M. Reductions in air-conditioning energy caused by a nearby park [J]. *Energ Build*, 1998, **29**: 83 - 92
- [16] ALEXANDRI E, JONES P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment comparison with experimental results [J]. *Build Environ*, 2006, **42**: 2835 - 2849.
- [17] ALEXANDRI E, JONES P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates [J]. *Build Environ*, 2008, **43**: 480 - 493.
- [18] 唐鸣放, 白雪莲. 城市草坪的生态热效益[J]. 重庆环境科学, 2001, **23** (1): 14 - 15.
TANG Mingfang, BAI Xuelian. Ecological thermal effect of lawn on urban environment [J]. *Chongqing Environ Sci*, 2001, **23** (1): 14 - 15.
- [19] 杜克勤, 刘步军, 吴昊. 不同绿化树种温湿度效应的研究[J]. 农业环境保护, 1997, **16** (6): 266 - 268.
DU Keqing, LIU Bujun, WU Hao. Temperature and humidity effects of different plants [J]. *Agro-Environ Prot*, 1997, **16** (6): 266 - 268.
- [20] 夏汉平, 蔡锡安, 彭彩霞. 5 种爬藤植物垂直绿化的效果比较[J]. 草业学报, 2007, **16** (3): 93 - 100.
XIA Hanping, CAI Xi'an, PENG Caixia. Comparison of five lianas for vertical greening [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2007, **16** (3): 93 - 100.