

# 西安市常见绿化植物叶片润湿性能及其影响因素\*

王会霞<sup>1</sup> 石 辉<sup>1,3\*\*</sup> 李秧秧<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; <sup>2</sup> 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

<sup>3</sup> 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 利用接触角测定仪测定了西安市 21 种常见绿化植物叶片表面的接触角, 探讨了叶片表面特性如蜡质、绒毛、气孔对接触角的影响。结果表明, 植物叶片正背面、物种间的接触角差异均显著, 叶片正面和背面接触角大小在 40°~140°。接触角大小与变异系数呈负相关, 可能由于接触角小的润湿叶片在不同的生境和位置下, 受到环境条件的影响较大而出现大的变异; 接触角较大的非润湿性叶片, 环境物质滞留时间较短, 对叶片形态和组成影响较小, 因而出现小的变异。植物叶片表面的接触角随蜡质含量的升高而增大。表皮蜡质去除后大部分叶片接触角明显降低, 尤其是疏水性较强的银杏 (*Ginkgo biloba*)、月季 (*Rosa chinensis*) 和紫叶小檗 (*Berberis thunbergii*)。女贞 (*Ligustrum lucidum*) 正背面、加杨 (*Populus canadensis*) 背面等亲水型的叶片蜡质去除后接触角反而增大。叶片绒毛的多少及其形态、分布方式对接触角具有重要的影响, 不同的作用方式表现出润湿和不润湿的特征, 人为将其去除可以增加叶片的润湿性。背面气孔密度与气孔长度、保卫细胞长度呈负相关; 接触角则与气孔密度呈负相关, 与气孔长度呈正相关。

**关键词** 叶面润湿性; 接触角; 表皮蜡质; 叶片结构

**中图分类号** X 171 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)4-0630-07

**Leaf surface wettability of major plant species for urban greening in Xi'an and related affecting factors.** WANG Hui-xia<sup>1</sup>, SHI Hui<sup>1,3</sup>, LI Yang-yang<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>*School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;* <sup>2</sup>*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China;* <sup>3</sup>*State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 630-636.

**Abstract:** We measured the contact angle of water droplet on leaf surfaces of 21 major plant species for urban greening in Xi'an, and studied the effects of leaf surface characteristics such as epidermal wax, trichomes, and stomata on the contact angle. There existed significant differences in the contact angle among test plant species and between adaxial and abaxial leaf surfaces. The contact angle ranged from 40° to 140°, and was negatively correlated with its coefficient of variance. The greater variance of the contact angle on wettable leaves could be related to the greater effects of dust, acid rain, and other environmental substances on the leaf surface structure; while for nonwetable leaves, the relatively short retained time of environmental substances gave smaller effects on the leaf surface structure and composition. The contact angle increased with increasing epidermal wax content. After the removal of epidermal wax by chloroform, the leaf contact angle of most plant species, especially of hydrophobic species *Ginkgo biloba*, *Rosa chinensis* and *Berberis thunbergii*, decreased significantly. On the contrary, the removal of epidermal wax increased the leaf contact angle of a few hydrophilic species, such as the adaxial and abaxial leaf contact angle of *Ligustrum lucidum* and the abaxial leaf contact angle of *Populus canadensis*. The amount, morphology, and distribution of trichomes had great effects on the leaf contact angle. Different types of action pattern led to different wetting characteristics. Artificial removal of trichomes increased the leaf surface wettability. The stomatal density of abaxial leaf surface was

\* 国家自然科学基金重点项目(30230290)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室项目(10501-218)。

\*\* 通讯作者 E-mail: shihui06@126.com

收稿日期: 2009-10-28 接受日期: 2009-12-19

negatively correlated with guard cell length and stomatal pore length, while the contact angle of abaxial leaf surface was negatively correlated with stomatal density and positively with stomatal pore length.

**Key words:** leaf surface wettability; contact angle; epidermal wax; leaf anatomy.

城市绿化植物在改善城市大气环境方面发挥着巨大的作用,其重要生态功能就是滞尘减污效应。植物叶片可以截取和固定大气颗粒物而被认为是消减城市大气环境污染的重要过滤体。植物叶片的表面特性和本身的润湿性对滞尘能力有很大的影响。陈芳等(2006)发现,叶面粗糙、凹凸不平且密附细毛的植物具有较强的滞尘能力。高金晖等(2007)认为,白皮松、油松等针叶树滞尘能力显著高于其他被测物种的原因是针叶分泌的粘液对粉尘的粘附作用。Neinhuis 和 Barthlott(1998)发现,易润湿的山毛榉和橡树叶片滞尘能力强,而银杏叶片由于特殊的表面结构和疏水的蜡质而具有“自洁”的润湿特性。

润湿是一种流体从固体表面置换另一种流体的过程,一般是指水在固体表面置换空气的过程,固体表面的润湿性可以用接触角大小来表征(顾惕人等,1994),润湿性的大小可以表征叶面的特征。对于植物而言,叶片表面的润湿性由其化学组成和微观几何结构共同决定。Hall 和 Burke(1974)研究了新西兰 52 种植物叶片的润湿性,发现润湿性与叶面的显微结构、蜡质层厚度和绒毛有关。Wagner 等(2003)研究了表皮细胞突起程度对叶片润湿性的影响,发现表皮细胞突起产生的微细粗糙结构是表面疏水的主要原因。植物叶片的润湿性除受叶片结构、蜡质、绒毛等叶面特征的影响外,还受到外界各类污染物的影响。Adams 和 Hutchinson(1987)研究了酸雨对向日葵(*Helianthus annuus*)、萝卜(*Raphanus sativus*)、包菜(*Brassica oleracea*)、甜菜(*Beta vulgaris*)的影响,结果发现易润湿的向日葵和萝卜叶片更易受酸雨的影响,酸雨胁迫加速了叶片表面营养物质的流失。Schreuder 等(2001)的研究表明,臭氧胁迫加速了叶片表皮蜡质的破坏,但对润湿性、叶面水分散失和生物量形成的影响因物种而异。因此研究植物叶片的润湿性对于认识植物叶片滞尘机理、植物生长、抵抗酸雨臭氧等污染物胁迫具有重要的意义。

目前关于植物叶片润湿性的研究报道在我国较少。石辉等(2009)虽然对陕西省一些植物叶片的润湿性进行了测定,但缺少相关的叶片表面形态的

分析。本文采集了西安市 21 种常见的绿化植物叶片,测定了叶面与液态水的接触角,同时探讨了叶片的表面特性如表皮蜡质、气孔、绒毛等对叶片润湿性的影响,以期通过实验说明叶片表面形态对润湿性的影响,为下一步植物叶片滞尘机理的研究提供一些依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本研究的植物共 21 种,属于 14 个科,均来自于西安建筑科技大学校园,基本性状见表 1。于 2009 年 4 月 23—25 日采集成熟且具有充分光照的健康叶片,每种植物采集约 60 片。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 接触角测定** 液滴在固体表面处于平衡状态时,在液体所接触的固体与气相的分界面处做液滴表面的切线,此切线在液体一方与固体表面的夹角称为接触角( $\theta$ )。根据界面化学基本原理,接触角可以定量描述液体在固体表面上的润湿程度, $\theta=90^\circ$ 可作为润湿与不润湿的界限, $\theta<90^\circ$ 时可润湿, $\theta>90^\circ$ 时不润湿;对于接触角较大的情况下水滴在叶面团成球状的情形称作斥水性(顾惕人等,1994)。

在室温条件下,用静滴接触角/界面张力测量仪(JC2000C1,上海中晨科技发展有限公司)分别在 15 个叶片上测定叶片正背面的接触角。同一叶片沿中脉分开,分别用作正面和背面接触角的测定。选取叶片较平坦的表面并尽量避开叶脉,制成药 1 cm×1 cm 的样本,铺平后用双面胶粘于玻璃板上后置于静滴接触角/界面张力测量仪的载物台上,然后调节毛细管出水,在叶面上形成约 6  $\mu\text{l}$  大小的液滴,利用 CCD 成像(图像放大率 266 Pixel·mm<sup>-1</sup>)后采用量角法测定接触角大小。图 1 为水滴在 2 种典型的润湿和不润湿(斥水性)叶面上的形态。

**1.2.2 绒毛观察** 选取健康成熟叶片,用 10 倍便携式放大镜观察。

**1.2.3 气孔密度和气孔大小的观测** 用印迹法(郑淑霞和上官周平,2004)制成临时装片。用脱脂棉轻拭除去上下表皮的灰尘,用透明指甲油均匀涂抹

表1 西安市21种常见绿化植物生活习性和接触角大小

Tab. 1 Life form, leaf habit and contact angle data of selected plants leaves in Xi'an

物种	科	生活型	叶习性	正面接触角	背面接触角
三叶草 ( <i>Trifolium repens</i> )	豆科 Leguminosae	草本	常绿	134.7±4.8	79.1±7.4
樱花 ( <i>Prunus serrulata</i> )	蔷薇科 Rosaceae	乔木	落叶	65.8±5.9	99.9±4.1
悬铃木 ( <i>Platanus acerifolia</i> )	悬铃木科 Platanaceae	乔木	落叶	128.1±9.5	125.8±1.7
女贞 ( <i>Ligustrum lucidum</i> )	木犀科 Oleaceae	乔木	常绿	68.6±8.3	76.2±9.5
小叶女贞 ( <i>L. quihoui</i> )	木犀科	灌木	落叶	82.9±8.7	87.6±15.5
银杏 ( <i>Ginkgo biloba</i> )	银杏科 Ginkgoaceae	乔木	落叶	127.5±6.6	136.0±5.2
小叶黄杨 ( <i>Buxus sinica</i> )	黄杨科 Buxaceae	灌木	常绿	85.2±13.3	95.3±11.2
大叶黄杨 ( <i>Euonymus japonicus</i> )	卫矛科 Celastraceae	灌木	常绿	77.0±14.2	87.9±18.6
国槐 ( <i>Sophora japonica</i> )	豆科	乔木	落叶	131.8±8.9	135.4±3.1
月季 ( <i>Rosa chinensis</i> )	蔷薇科	灌木	落叶	100.5±6.9	133.3±2.9
栎树 ( <i>Koelreuteria paniculata</i> )	无患子科 Sapindaceae	乔木	落叶	97.7±5.0	41.5±19.6
鸡爪槭 ( <i>Acer palmatum</i> )	槭树科 Aceraceae	乔木	落叶	90.6±4.4	101.2±2.0
爬山虎 ( <i>Parthenocissus tricuspidata</i> )	葡萄科 Vitaceae	藤本	落叶	99.4±10.1	125.3±6.1
紫荆 ( <i>Cercis chinensis</i> )	豆科	乔木	落叶	95.1±15.0	103.8±3.9
紫叶小檗 ( <i>Berberis thunbergii</i> )	小檗科 Berberidaceae	灌木	落叶	130.0±2.6	133.6±3.9
榆叶梅 ( <i>Prunus triloba</i> )	蔷薇科	灌木	落叶	84.8±12.3	97.0±1.4
桃树 ( <i>P. persica</i> )	蔷薇科	乔木	落叶	42.3±8.2	92.7±10.1
丁香 ( <i>Syringa oblata</i> )	木犀科	灌木	落叶	101.5±11.2	73.7±12.9
加杨 ( <i>Populus canadensis</i> )	杨柳科 Salicaceae	乔木	落叶	67.3±4.9	68.9±11.7
海桐 ( <i>Pittosporum tobira</i> )	海桐科 Pittosporaceae	灌木	常绿	95.1±6.3	102.1±4.5
毛茛 ( <i>Swida walteri</i> )	山茱萸科 Cornaceae	乔木	落叶	80.2±15.0	84.4±7.4

数值为平均值±标准差。

在叶片上下表面,完全干燥后揭取,展平制成临时装片,每种植物各制3个临时装片,于数码显微镜(日本产BX51型奥林巴斯)下随机选取30个视野统计1mm×1mm面积上的气孔数目,然后随机选取50个气孔测定气孔长度和保卫细胞长度。

**1.2.4 蜡质含量的测定** 叶片蜡质含量的测定参考 Koch 等(2006)的方法。首先选取健康成熟的新鲜叶片数片,置于扫描仪(HP Scanjet G2410,日本)中扫描,然后用 Image J(National Institutes of Health, USA)图像分析软件计算叶片面积(S)。将扫描面积后的叶片置于烧杯中,加入20ml三氯甲烷浸泡60s后取出叶片,将提取液转入已称量的称量瓶( $W_0$ )中,用少量三氯甲烷润洗烧杯,润洗液一并转入称量瓶中,在通风橱中使三氯甲烷完全挥发,再以

0.0001g分析天平(良平FA2004,上海良平仪器仪表有限公司)称量( $W_1$ ),2次差值( $W_1-W_0$ )即为蜡质质量。 $(W_1-W_0)/S$ 即为单位叶面积的蜡质含量。

**1.2.5 数据处理** 用SPSS 11.5(SPSS Inc., Chicago, USA)软件进行数据统计分析。对不同物种的接触角数据进行单因素方差分析(ANOVA)以确定物种间是否存在显著差异。用成对t检验进行叶片正背面接触角差异的分析。用t检验进行蜡质去除前后叶片正背面接触角差异的分析。两变量之间的相关性用Pearson检验。采用Microsoft Excel软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物叶片的润湿性能

研究表明,21种测试物种间接触角具有显著差异( $P<0.001$ )。21种植物中有9种背面接触角显著大于正面(成对t检验, $P<0.05$ ),有3种正面接触角显著大于背面(成对t检验, $P<0.05$ ),其余9种正背面接触角无显著差异(成对t检验, $P>0.05$ )。所测定植物叶片正面接触角大小从桃树的42.3°到三叶草的134.7°,背面接触角大小则从栎树的41.5°到银杏的136.0°,接触角大小在40°~140°,平均为96.8°(表1)。

在所测定的21种植物中,正面接触角 $>90^\circ$ 的物

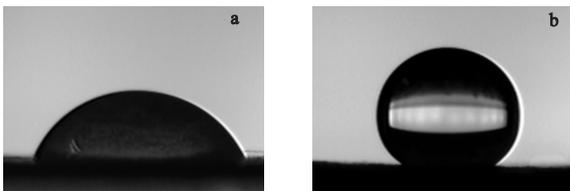


图1 水滴在2种典型的润湿(a)和不润湿(斥水性)(b)叶面上的形态

Fig. 1 Contacting states of water droplet on two typical plant leaf surfaces

a 大叶黄杨正面, b 银杏背面。

种有三叶草、国槐、紫叶小檗、银杏等 12 种,占测定总数的 57.1%, $<90^\circ$ 的有樱花、女贞、小叶女贞、桃树等 9 种,占测定总数的 42.9%。背面接触角 $>90^\circ$ 的物种有悬铃木、樱花、银杏、海桐等 13 种,占测定总数的 61.9%, $<90^\circ$ 的有栾树、加杨、女贞、毛楸等 8 种,占测定总数的 38.1%。

在实验中发现,叶面接触角较大时变异系数较小,二者之间负相关关系显著(Pearson 检验, $P < 0.01$ ,图 2)。这可能由于接触角越大时,特殊的表面结构和疏水的蜡质使叶片与水、附生生物、粉尘等的接触面积较小,导致与叶片表面的亲和力较小(Koch *et al.*, 2009),这些物质在叶片表面的停留时间较短,对叶片表面结构和化学组成影响相对较小,因此表现出叶片本身的特性而不易受外界干扰。而润湿的植物叶片与水的亲和力较大,水分易于铺展,叶片易受降水,病菌感染(Bunster *et al.*, 1989; Kumar *et al.*, 2004)以及酸雨(Haines *et al.*, 1985; Adams & Hutchinson, 1987)、臭氧(Schreuder *et al.*, 2001)、粉尘(Neinhuis & Barthlott, 1998)等污染物的影响;在不同的生境和位置条件下,叶片接收的各种污染物质不同,导致了润湿性高的叶片接触角空间和时间的变异变大。

## 2.2 叶片润湿性的影响因素

### 2.2.1 蜡质含量对叶片润湿性的影响

Koch 等(2009)认为叶片湿润性主要决定于叶片化学组成和微观几何结构,如蜡质晶体形态及其疏水性质等。蜡质是不亲水的,故在不考虑其他因素影响的情况时,叶片表面的润湿性取决于叶片表面蜡质的数量和结晶形态。Haines 等(1985)发现叶片表面被大量颗粒状蜡质覆盖的北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)润湿性较表皮少蜡质的其他物种差。Hanba

等(2004)对豌豆(*Pisum sativum*)和菜豆(*Phaseolus vulgaris*)叶片的润湿性研究发现,前者较后者的润湿性差与豌豆表面的蜡质层有关。

植物叶片表面的接触角随蜡质含量的升高而增大,但二者之间的正相关关系不显著(Pearson 检验, $P > 0.05$ , $r = 0.205$ ),可能与我们未考虑蜡质的结晶形态有关。蜡质对叶片润湿性的影响除受含量的影响外,还与蜡质单元体形态结构、化学组成等因素有关。为了说明蜡质对叶片润湿性的影响,我们将表皮蜡质去除前后的叶片接触角进行比较(图 3),发现表皮蜡质去除后大部分物种叶片表面接触角明显减小( $t$  检验, $P < 0.05$ ),尤其是疏水性较强的银杏、月季、紫叶小檗。紫叶小檗叶片正背面的接触角由 $130.0^\circ$ 和 $133.6^\circ$ 分别下降到 $77.4^\circ$ 和 $81.9^\circ$ ,银杏叶片正背面的接触角由 $127.5^\circ$ 和 $136.0^\circ$ 分别下降到 $80.6^\circ$ 和 $95.4^\circ$ 。而亲水型的女贞叶片正背面、栾树背面、加杨背面以及桃树正面在蜡质去除后接触角反而增大。Burton 和 Bhushan(2006)研究表明,超疏水的莲叶(*Nelumbo nucifera*)和芋叶(*Colocasia esculenta*)表面蜡质去除后叶片表面接触角下降到 $90^\circ$ 以下。他们认为叶片化学组成物质本身是亲水的,由于疏水的蜡质以及表面的突起而产生了疏水性。Boyce 等(1991)将疏水的香脂冷杉(*Abies balsamea*)叶片表面的蜡质去除后接触角也明显降低,而亲水的红云杉(*Picea rubens*)接触角增大。叶片表面的蜡质去除后部分物种的接触角增大,但一般不会超过 $100^\circ$ (Holloway, 1969)。叶片表面蜡质去除后接触角变化与有机溶剂破坏叶面结构和本身的物理特性,并在叶片表面产生的多孔结构有关(Boyce *et al.*, 1991)。

### 2.2.2 绒毛对润湿性的影响

绒毛是植物体表的一种附属结构,是植物对生长环境的适应性反应。绒毛的分布密度、形态、质地、类型都直接影响着水滴在叶面上的接触角。Brewer 等(1991)研究发现水滴和植物叶表面绒毛间存在 3 种作用规律,一是较低密度的绒毛并不影响水滴的滞留或润湿;二是较低密度的针状长绒毛刺破了水滴表面更易诱导水滴分散成膜;三是高密度绒毛可能形成绒毛冠层促使叶表水滴成珠而滑落。在研究的 21 种植物中,悬铃木、国槐、榆叶梅和毛楸表面着生绒毛,国槐和悬铃木叶片正背面均密被细小绒毛,这些细小的绒毛不容易刺破浸入表面的水膜,使得凸包与水膜间产生气泡,使水膜被抬起,从而表现出强的疏水性

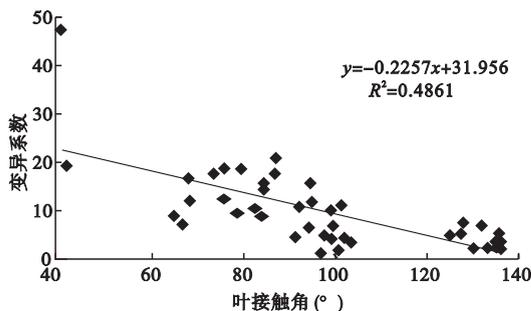


图 2 叶接触角与变异系数的相关性

Fig. 2 Correlation between leaf contact angle and coefficient of variance

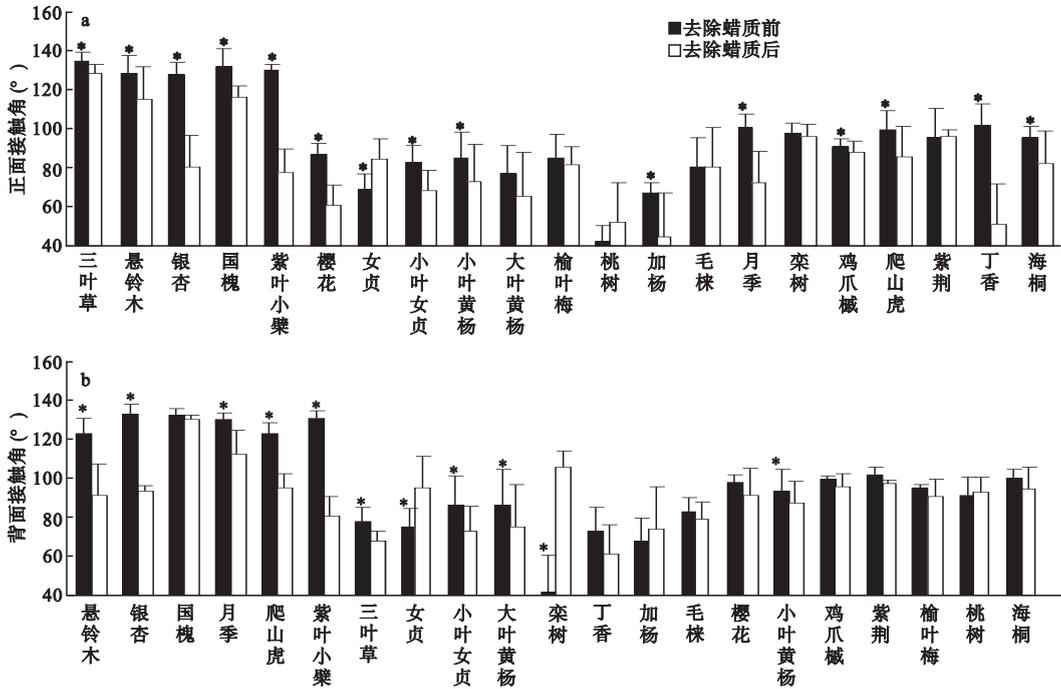


图3 植物叶片去除蜡质前后接触角变化

Fig. 3 Contact angles before and after wax removal

a 正面, b 背面, \* 表示有显著差异, *t* 检验,  $P < 0.05$ 。

(图4a)。榆叶梅正背面以及毛柞背面绒毛密度较小且呈较长的针状, 刺破水膜表面起到了引流的作用, 加速了水滴的铺展, 从而表现出亲水性(图4b)。

为进一步说明绒毛对叶片润湿性的影响, 将悬铃木表面的绒毛去除后重新测定接触角, 结果发现悬铃木叶片表面绒毛去除后正背面的接触角由  $128.1^\circ$  和  $125.8^\circ$  变为  $74.7^\circ$  和  $75.3^\circ$ , 降低了近  $50^\circ$ , 由原来的疏水转变为亲水。由此可见, 表面高密度分布的细小绒毛是悬铃木叶片疏水性的原因之一。

**2.2.3 气孔对叶片润湿性的影响** 在所研究的21种植物中仅三叶草和加杨上下表皮均具有气孔, 除三叶草外下表皮气孔密度大于上表皮。气孔密度与气孔长度、保卫细胞长度负相关关系显著 (Pearson 检验,  $P < 0.01$ , 图5)。由于叶片正面具有气孔的物

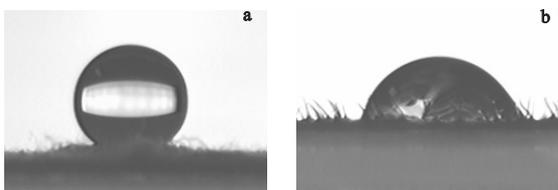


图4 水滴在2种典型的着生绒毛叶面上的形态

Fig. 4 Contacting states of water droplet on surfaces of two typical leaves with trichomes

a 悬铃木正面, b 榆叶梅正面。

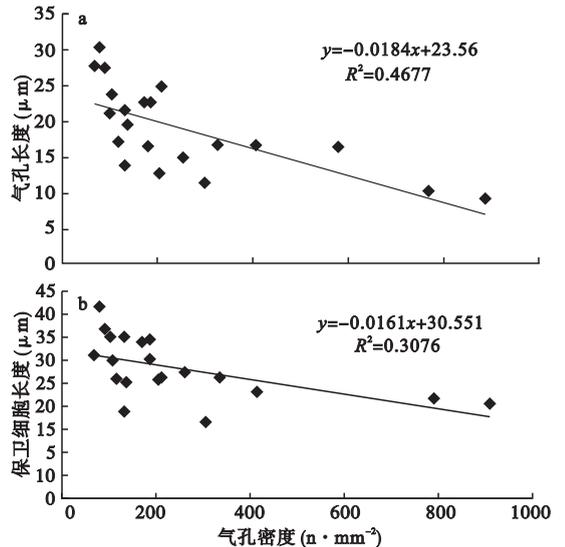


图5 气孔密度与气孔长度(a)、保卫细胞长度(b)相关性  
Fig. 5 Correlation between stomatal density and stomatal pore length (a), guard cell length (b)

种仅有2种, 为说明气孔密度、气孔长度和保卫细胞长度与接触角之间的关系, 仅用背面的数据进行分析, 结果表明, 接触角与气孔密度负相关关系显著 (Pearson 检验,  $P < 0.05$ , 图6a), 与气孔长度正相关关系显著 (Pearson 检验,  $P < 0.05$ , 图6b), 但与保卫细胞长度相关性不显著 (Pearson 检验,  $P > 0.05$ ,

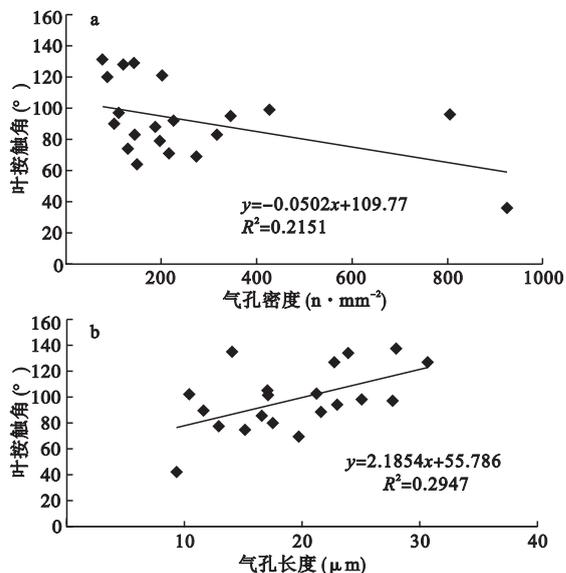


图6 接触角与气孔密度(a)、气孔长度(b)相关性  
Fig. 6 Correlation between contact angle and stomatal density (a), stomatal pore length (b)

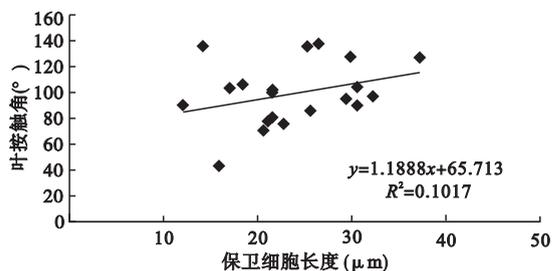


图7 接触角与保卫细胞长度相关性  
Fig. 7 Correlation between contact angle and guard cell length

$r = 0.319$ , 图7)。这与其他研究者的结果不同, Brewer(2007)和 Pandey(2003)等认为气孔密度大的叶片接触角大,他们认为接触角较大时水与叶面的接触面积较小,降低了叶面和光合气体之间的干扰。而 Kumar等(2004)的研究表明,叶片的润湿性与气孔密度没有相关性。气孔密度对植物叶片润湿性的影响,不同的研究者的研究结果则不同,表明气孔对叶面润湿性的影响可能还受其他因素的控制,对此需要进一步的研究。

### 3 结论

测定了21种常见绿化植物叶片的接触角,叶片正背面的接触角大小在40°~140°,平均为96.8°。研究表明,物种间接触角差异显著,成对 $t$ 检验表明12种植物叶片正背面之间的接触角有显著差异,其余9种无显著差异。接触角大小与变异系数之间出

现负相关关系,可能由于接触角小的润湿植物叶面在不同的生境和位置条件下,受到环境条件的影响较大而出现大的变异;接触角较大的非润湿性叶片,特殊的表面结构和疏水的蜡质使叶片与水、粉尘、病菌、酸雨、臭氧等污染物亲和力和较小,这些物质在叶片表面的停留时间较短,对叶片表面结构、特性影响相对较小,因此表现出叶片本身的特性而不易受外界干扰。

叶片表面蜡质、绒毛和气孔对叶片的润湿性有一定程度的影响。植物叶片的接触角随蜡质含量的升高而增大,二者之间的正相关关系不显著。蜡质对叶片润湿性的影响除受含量的影响外,还与蜡质单元体形态结构、化学组成等因素有关。有机溶剂去除叶片表面的蜡质破坏了叶面结构和本身的物理特性,并在叶片表面产生多孔结构。叶片表面蜡质去除后大部分物种接触角明显减小,尤其是疏水性较强的银杏、月季和紫叶小檗,下降了50°左右。而女贞正背面、加杨背面、栾树背面等亲水型的物种接触角反而增大。叶片绒毛的多少及其形态、分布方式对接触角具有重要的影响,不同的作用方式表现出润湿和不润湿的特征,人为将其去除可以增加叶片的润湿性。背面气孔密度与气孔长度、保卫细胞长度呈负相关,接触角则与气孔密度呈负相关,与气孔长度呈正相关。

### 参考文献

- 陈芳,周志翔,郭尔祥,等. 2006. 城市工业区园林绿地滞尘效应的研究——以武汉钢铁公司厂区绿地为例. 生态学杂志, **25**(1): 34-38.
- 高金晖,王冬梅,赵亮,等. 2007. 植物叶片滞尘规律研究——以北京市为例. 北京林业大学学报, **29**(2): 94-99.
- 顾惕人,朱步瑶,李外郎,等. 1994. 表面化学. 北京: 科学出版社.
- 石辉,李俊义. 2009. 植物叶片润湿性特征的初步研究. 水土保持通报, **29**(3): 202-205.
- 郑淑霞,上官周平. 2004. 近一世纪黄土高原区植物气孔密度变化规律. 生态学报, **24**(11): 2457-2464.
- Adams CM, Hutchinson TC. 1987. Comparative abilities of leaf surfaces to neutralize acidic raindrops. II. The influence of leaf wettability, leaf age and rain duration on changes in droplet pH and chemistry on leaf surfaces. *New Phytologist*, **106**: 437-456.
- Boyce RL, McCune DC, Berlyn GP. 1991. A comparison of foliar wettability of red spruce and balsam fir growing at high elevation. *New Phytologist*, **117**: 543-555.
- Brewer CA, Nuñez CI. 2007. Patterns of leaf wettability along

- an extreme moisture gradient in western Patagonia, Argentina. *International Journal of Plant Sciences*, **168**: 555–562.
- Brewer CA, Smith WK, Vogelmann TC. 1991. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant, Cell & Environment*, **14**: 955–962.
- Bunster L, Fokkema NJ, Schippers B. 1989. Effect of surface-active *Pseudomonas* spp. on leaf wettability. *Applied and Environmental Microbiology*, **55**: 1340–1345.
- Burton Z, Bhushan B. 2006. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces. *Ultramicroscopy*, **106**: 709–719.
- Haines BL, Jernstedt JA, Neufeld HS. 1985. Direct foliar effects of simulated acid rain. II. Leaf surface characteristics. *New Phytologist*, **99**: 407–416.
- Hall DM, Burke W. 1974. Wettability of leaves of a selection of New Zealand plants. *New Zealand Journal of Botany*, **12**: 283–298.
- Hanba YT, Moriya A, Kimura K. 2004. Effect of leaf surface wetness and wettability on photosynthesis in bean and pea. *Plant, Cell & Environment*, **27**: 413–421.
- Holloway PJ. 1969. The effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of Applied Biology*, **63**: 145–153.
- Koch K, Bhushan B, Barthlott W. 2009. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science*, **54**: 137–178.
- Koch K, Hartmann KD, Schreiber L, *et al.* 2006. Influences of air humidity during the cultivation of plants on wax chemical composition, morphology and leaf surface wettability. *Environmental and Experimental Botany*, **56**: 1–9.
- Kumar N, Pandey S, Bhattacharya A, *et al.* 2004. Do leaf surface characteristics affect Agrobacterium infection in tea [*Camellia sinensis* (L.) O Kuntze]? *Journal of Biosciences*, **29**: 309–317.
- Neinhuis C, Barthlott W. 1998. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak, and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability. *New Phytologist*, **138**: 91–98.
- Pandey S, Nagar PK. 2003. Patterns of leaf surface wetness in some important medicinal and aromatic plants of Western Himalaya. *Flora*, **198**: 349–357.
- Schreuder MDJ, van Hove LWA, Brewer CA. 2001. Ozone exposure affects leaf wettability and tree water balance. *New Phytologist*, **152**: 443–454.
- Wagner P, Fürstner R, Barthlott W, *et al.* 2003. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. *Journal of Experimental Botany*, **54**: 1295–1303.

---

作者简介 王会霞,女,1980年生,博士生,主要从事环境生态方面的研究。E-mail: dasenlin-80@163.com

责任编辑 王伟

---