

叶片表面微细观结构对润湿性的影响

郑江韬^{a,b}, 杨翼龙^b, 柴恩豪^b, 刘倩^b, 边宇峰^b, 鞠杨^{a,b}

(中国矿业大学(北京) a. 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室

b. 力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 探究叶片表面微细观结构对其润湿性的影响因素, 以及控制机理。**方法** 以银杏 (*Ginkgo biloba*, *G. biloba*)、二乔玉兰 (*Magnolia soulangeana*, *M. soulangeana*) 和二球悬铃木 (*Platanus acerifolia*, *P. acerifolia*) 3 种处于落叶期初段的叶片样本为研究对象, 测量 3 种叶片正背面的接触角, 结合环境扫描电子显微镜图像, 对比分析不同叶片正面和背面微细观结构及其对接触角的影响。**结果** 实验结果表明, 落叶期初段银杏、二乔玉兰和二球悬铃木叶片正面均表现出弱亲水性, 接触角分别为 54.40°~66.80°、57.93°~74.87°、55.73°~82.23°。在银杏叶片背面, 无论是顺纹理还是逆纹理方向, 均表现出疏水特征, 顺纹理方向的接触角为 122.63°~135.10°, 逆纹理方向的接触角为 103.03°~134.13°。二乔玉兰和二球悬铃木的背面为中性润湿, 接触角分别为 82.87°~96.37°、90.50°~97.47°。**结论** 不同类型叶片的表面微结构显著不同, 同种类型叶片正背面微结构也表现出较大差异。3 种叶片背面接触角均大于正面接触角, 其中银杏叶片正背面的接触角存在显著差异。叶片表面微细观结构的不同是造成叶片正背面润湿性差异的主要原因之一, 尤其是多层级突触结构导致银杏背面表现出较强的疏水性质。叶片表面微细观结构对润湿性的影响机理将为不同润湿性需求的表面设计提供参考。

关键词: 微细观结构; 润湿性; 接触角; 环境扫描电镜; 表观接触面积

中图分类号: O647.5; TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)07-0288-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.07.026

Effect of Leaf Surface Microstructure on Wettability

ZHENG Jiang-tao^{a,b}, YANG Yi-long^b, CHAI En-hao^b,
LIU Qian^b, BIAN Yu-feng^b, JU Yang^{a,b}

(a. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, b. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Understanding wettability property of a solid material is crucial in surface processing technology and surface engineering. Previous researches show that the wettability of a material is far from a constant value but influenced by the environmental factors such as temperature and humidity, and the surface roughness such as surface microstructure and

收稿日期: 2022-06-04; 修订日期: 2022-09-08

Received: 2022-06-04; Revised: 2022-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (52274045); 大学生创新项目 (202106014); 中央高校基本科研业务费 (2023JCCXMT01)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52274045); Undergraduate Training Program for Innovation (202106014); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023JCCXMT01)

作者简介: 郑江韬 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多相流体运移。

Biography: ZHENG Jiang-tao (1989-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: multiphase flow in porous media.

引文格式: 郑江韬, 杨翼龙, 柴恩豪, 等. 叶片表面微细观结构对润湿性的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 288-298.

ZHENG Jiang-tao, YANG Yi-long, CHAI En-hao, et al. Effect of Leaf Surface Microstructure on Wettability[J]. Surface Technology, 2023, 52(7): 288-298.

hierarchical structures.

Recent bionics studies, such as the nearly spherical droplet on lotus leaf and the upward water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*, have inspired researchers to understand the affecting factors on the surface wettability and thus develop artificial surfaces with practical applications. The microstructure of a material surface, especially the hierarchical microstructure or the multiscale microstructure, is one of the main factors affecting the wettability. However, a leaf at its different growth stages shows varied wettability. Moreover, the wettability of upper surface and backside surface of the same leaf usually shows notable difference. There is still not a consensus of the controlling mechanism of leaf surface microstructure on its wettability.

In this study, the contact angle on the upper surface and backside surface of *Ginkgo biloba*, *Magnolia soulangeana* and *Platanus acerifolia* leaves in their early deciduous period was measured. Combined with the multiscale microstructure observation by environmental scanning electron microscopy (ESEM), the effect of leaf surface microstructure on wettability was investigated.

The typical microstructures on the upper surface and backside surface of the leaves at different scales were characterized firstly. Then, the effect of leaf surface microstructure on wettability was investigated. The basic assumption was that the material property of the upper surface and backside surface of one leaf was the same. It was found that the upper surfaces of the three plants leaves showed weak hydrophilicity in their early deciduous period, the contact angles ranged from 54.40°-66.80°, 57.93°-74.87° and 55.73°-82.23° respectively. The backside surface of *Ginkgo biloba* leaf showed hydrophobic characteristics along the directions in parallel and perpendicular to the texture directions and the contact angles ranged from 122.63°-135.10° and 103.03°-134.13° respectively. The backside surfaces of *Magnolia soulangeana* and *Platanus acerifolia* leaves showed neutral wettability and the contact angles ranged from 82.87°-96.37° and 90.50°-97.47° respectively.

As the ESEM results show, the microstructures in the leaves of the three investigated plants exhibit large differences. For the same leaf, the microstructure morphologies in its upper side surface and backside surface show distinct differences, especially for the *Ginkgo biloba*. The difference between the leaf microstructures is thus considered as the main reason that leads to the distinct wettability between the upper surface and backside surface. Higher levels of microstructure complexities in the backside surface of leaves, such as the stoma structures, account for the higher contact angles measured on the backside surface for the three kinds of leaves. Among them, the contact angle measured on the backside surface of *Ginkgo biloba* leaf is much larger than that on its upper surface. It is considered that the hierarchical microstructure in the backside surface of *Ginkgo biloba* leaf leads to its hydrophobic property, even though its upper surface shows weak hydrophilicity. The study elaborates the effects of microstructure on wettability, which can shed light on the design and fabric of biomimetic multifunctional surfaces for different wettability needs.

KEY WORDS: microstructure; wettability; contact angle; ESEM; surface contact area

润湿性是固体材料表面的重要特性之一,反映了不混溶两相流体与固体表面接触时的性质^[1]。材料润湿性受到流体间及流体与固体壁面分子间相互作用力的控制^[2],通常采用接触角(即“液-气”界面的切线与“固-液”交界线之间的夹角)定义该种液体与固体表面保持接触的能力^[3]。材料表面的润湿性是实际生活及工程应用中必须考虑的因素。在生活中,婴儿纸尿裤快速吸水^[4]、奶粉冲调过程中的结块^[5]、猪笼草捕虫袋口保持湿润^[6]等现象均与材料的润湿性紧密相关。在实际工程中,防污表面涂层^[7]、飞机抗结冰表面^[8-9]、不同植物农药喷雾残余量设计^[10-11]、非常规油气开发的闷井技术(提高采收率)等也与材料润湿性密切相关^[12]。由此可见,探究材料的表面润湿性及其影响因素,对实际生活及工程应用具有重要的意义。

润湿性除了由固体材料本身的物理性质决定外,还受到由表面微结构^[6, 13-18]、环境温度^[19-21]、激光或紫外光照射所致的表面改性^[22],以及表面活性剂^[23-25]或纳米颗粒^[26-29]的加入等多种因素的影响。材料表面润湿性的多样性及其在不同因素影响下的变化机理已成为当前的研究热点^[30]。Quéré^[15]综述了材料表面微结构及粗糙性对润湿性的影响,并指出多层级微结构是实现材料表面超疏水性质的必要因素。舒平华等^[13]指出,岩石表面粗糙度随着压密程度的提高而减小,导致接触角逐渐增大,最终趋于稳定。Saji^[31]总结了基于蜡质层的人造超疏水表面在防腐、抗污、食品工业等方面的开发利用。Sharma 等^[32]提取了白花牛角瓜叶片表面的蜡质,并将其作为涂层,研制出可生物降解且具有疏水性的纸张。Pandey 等^[33]提取了荷叶表面的蜡质,并将其添加至多孔 PDMS 海绵

块中重结晶,开发出一种可重复利用的纳米复合油水分离材料。Klamerus-Iwan 等^[19]研究发现,随着模拟降雨水温的升高,同一区域范围内选取的植物叶片的接触角呈下降趋势。Zhao 等^[22]利用不同时长紫外光照射,实现了光敏材料由疏水向亲水性质的转变。部分学者认为,植物叶片表面蜡质层的化学组成和微纳尺度的多层级结构是影响其润湿性的 2 个主要因素^[34]。对于部分植物,叶片表面的微观形貌是决定其润湿性的关键因素^[35-36]。

近年来,随着高精度环境扫描电子显微镜(Environmental Scanning Electron Microscopy, ESEM)、X 射线微米 CT(X-ray CT)观测手段的进步,尤其是仿生学中对动植物表面微细观结构的观测结果,极大地提高了人们对材料润湿行为,以及它受微细观结构影响的认知。部分学者借助扫描电镜观测分析了微细观结构对材料润湿性质的控制机理。例如,江雷^[14]认为,荷叶表面微纳尺度多层级结构(hierarchical structure)是导致其表面超疏水的根本原因。邱宇辰等^[17]发现,花生叶表面的微结构是其表面呈现疏水特性的关键因素。Feng 等^[37]认为,微纳米尺度乳突阵列状结构是影响玫瑰花瓣超疏水性的主要因素。Chen 等^[6]指出,猪笼草捕虫袋口缘区表面“鸭嘴状”盲孔的梯度楔形角,使其表现出超亲水性质,并可实现液体克服重力的定向输运。王立新等^[38]测量了不同生长期八宝景天叶片正背面的润湿性,结合扫描电镜观测指出,表面凸包结构是叶片正背面的接触角存在显著差异的因素。叶片的润湿性受到植物自身性质、生长期、表面微结构及环境等多因素的影响,具有明显的差异,为进一步揭示叶片表面润湿行为控制机理带来极大的困难。

随着仿生学对生物表面微细观结构探究的不断深入,许多学者尝试通过改变材料表面微细观结构,实现材料润湿性的改变。例如, Yang 等^[39]验证了一种基于 3D 打印技术实现仿生结构的新型高效油水分离方法。杨玉山等^[40]成功制备出与玫瑰花瓣表面结构相同的超疏水木材。通过模仿荷叶的自清洁效应^[41],人们已成功开发出既疏水又疏油的具有自洁抗污功能的涂料、涂层玻璃及纺织材料。

目前,针对叶片润湿性的仿生研究大多集中在荷叶、玫瑰花瓣、芦苇等在生长初期和成熟期表现出超疏水性质的植物,且更多关注叶片正面的润湿性质,而对植物叶片正背面的润湿性及其受表面微观影响的系统性研究仍有待深入。为了定量分析植物叶片润湿性及受表面微结构影响的控制机理,文中首先采用 ESEM 观测银杏、二乔玉兰、二球悬铃木 3 种植物叶片正背面的微细观结构,并对其典型特征进行定量表征;其次,测量在气温相同但气象条件不同的 2 日中 3 种植物叶片正背面的接触角;最后,通过对比叶片正背面的接触角,结合 ESEM 观测图像分析叶片表面

微细观结构对其接触角的影响。

1 实验

1.1 材料

取样点选在中国矿业大学(北京)学院路校区校园内,共选取了 3 种落叶植物:银杏、二乔玉兰、二球悬铃木。取样时应满足以下条件:植物均为中国北方的常见物种,不包括濒危或保护植物;在实验期间(北京,2021-10-21—2021-11-06),植物叶片处于落叶期初段,未进入最终衰老落叶期;将叶片样本采集处理后,在最短时间内完成实验测量及数据收集工作^[42]。

接触角测量和 ESEM 观测使用的样本为同一高度(约 2 m)下生长状态良好且成熟度较高的叶片^[43],同时考虑不同时段外界环境对叶片表面微细观结构的影响,样本的采集时间大致相同,均为早晨 7:00—7:30。将采集到的样本放入密封袋,进行短时间保存,以避免受到外界环境的污染。

叶片表面的接触角及微细观结构形貌因测量位置的选取而异,尤其是接触角会受到叶片突出叶脉的影响。裁切用于实验的样品时尽可能避开叶脉,尽量选取正、背面上无明显叶片脉络的区域。其中,用于 ESEM 观测的叶片的裁切尺寸为 1 cm×1 cm,用于接触角测量的样品的裁切尺寸为 2 cm×0.5 cm。需要说明的是,银杏叶的背面布满长条形脉络,选取平行纹理(顺纹理)和垂直纹理(逆纹理)2 个方向进行裁切,用于接触角测量实验。

1.2 接触角观测实验

选取环境气温相同但气象情况具有差异的 2 日(2021-10-31 和 2021-11-06)进行接触角测量实验,在中国矿业大学(北京)精细勘探与智能开发全国重点实验室(室温环境)进行实验。实验装置包括单色光源射灯、亚克力支架、放置样品的载玻片等。实验数据通过数码相机(Nikon D7500)收集,镜头为 85 mm 定焦镜头,选用参数:感光度 ISO 为 50,光圈为 F16,快门速度为 1/250,白平衡为白炽灯模式,快门释放为无线控制。该组参数设置可保证在实验环境下获得高清画面,用于接触角的准确提取。

将实验样品用双面胶固定在载玻片上^[44],以保证样品表面的平整性。在实验前用清水冲洗样品,以去除叶片表面黏附的灰尘和杂质,避免其对测量结果造成影响。将样品在室温下干燥后进行接触角测量实验。实验液体选用蒸馏水,将液滴的体积控制在 4 μL (直径约为 2 mm)左右^[45-47]。每种叶片分别进行 2 组正、背面接触角实验,考虑到液滴蒸发及叶片吸水等因素的影响^[43],实验从水滴落在叶片表面的瞬间开始计时,记录了水滴在 30 s 和 60 s 时叶片的状态,并测量其接触角。

1.3 ESEM 观测

ESEM 是一种表征物质微观形貌的观察手段, 相较于普通扫描电镜, 它无须进行脱水及镀金导电处理, 可在自然环境下直接观测二次电子图像, 获得样品的表面形貌、成分、取向等高分辨率结果。实验采用北京科技大学国家材料服役安全科学中心的环境扫描电子显微镜 (Quanta FEG 450, FEI) 观察了银杏、二乔玉兰、二球悬铃木 3 种植物叶片正、背面的微细观结构。观测区域为叶片正、背面无叶脉区域, 每个样品选取 3 个位置, 分别获得了放大倍数为 100、500、1 000、2 000 倍的电镜扫描图像。

2 结果与分析

2.1 叶片表面润湿性

3 种不同植物叶片正、背面接触角的测试结果如图 1 所示。选用 ImageJ 软件 (ImageJ Wiki, Maryland, USA) 对收集到的实验数据进行分析, 利用接触角测量插件 (Contact Angle, nih.gov) 首先将实验照片转为灰度图, 标定基线后, 分别在水滴顶点两侧再各标记 4 个点, 尽量保证标记点的对称性。2 个日期的接触角测量数据见表 1, 其中测试 1—测试 3 为同一液滴在软件中重复测得的 3 组接触角数值, 以减小因测试中人为标记导致的数据误差, 取其平均值为接触角的最终数值。在 2021-10-31 时, 银杏背面顺纹理的接触角为 $122.63^{\circ}\sim 126.07^{\circ}$, 逆纹理接触角为 $103.03^{\circ}\sim 116.93^{\circ}$; 二乔玉兰背面的接触角为 $82.87^{\circ}\sim 90.17^{\circ}$, 二球悬铃木背面的接触角为 $90.50^{\circ}\sim 95.13^{\circ}$ 。

在 2 个测量日中, 叶片样品正背面接触角的对比情况如图 2 所示。如图 2a—b 所示, 银杏、二乔玉兰和二球悬铃木 3 种叶片的正面均表现出弱亲水性, 银杏叶片正面的接触角最小, 二乔玉兰和二球悬铃木次之。对比图 2a 和 b 可知, 3 种叶片在第 2 个测量日的正面接触角相较于第 1 个测量日有所下降。在第 2 个测量日, 银杏正面的接触角平均下降了 9.48° , 二乔玉兰正面的接触角平均下降了 12.39° , 二球悬铃木正面的接触角平均下降 17.39° 。

银杏背面无论是顺纹理还是逆纹理方向均表现出疏水特征, 而二球悬铃木和二乔玉兰的背面则均表现为中性润湿。对比图 2a 和 b 可以发现, 3 种叶片背面在第 2 个测量日的接触角相较于第 1 个测量日均微增长, 第 2 个测量日时银杏背面顺纹理的接触角平均上升了 7.47° , 逆纹理的接触角上升了 16.19° , 二乔玉兰的接触角上升了 5.18° , 二球悬铃木的接触角上升了 2.14° 。

3 种叶片背面的接触角均大于其正面的接触角。其中, 银杏叶片背面无论是顺纹理还是逆纹理的接触角均远大于正面的接触角, 背面接触角与正面接触角的差值为 $36.23^{\circ}\sim 80.70^{\circ}$, 而二乔玉兰和二球悬铃木叶片背面接触角与正面接触角的差值分别为 $8.00^{\circ}\sim 38.44^{\circ}$ 和 $8.27^{\circ}\sim 41.74^{\circ}$ 。

2.2 叶片表面微细观结构

2.2.1 银杏

银杏叶片正、背面放大 100、500、1 000、2 000 倍的 ESEM 图像如图 3 所示。由图 3a₁ 可知, 银杏叶正面微细观结构呈现深浅交替的条纹状分布, 图像的

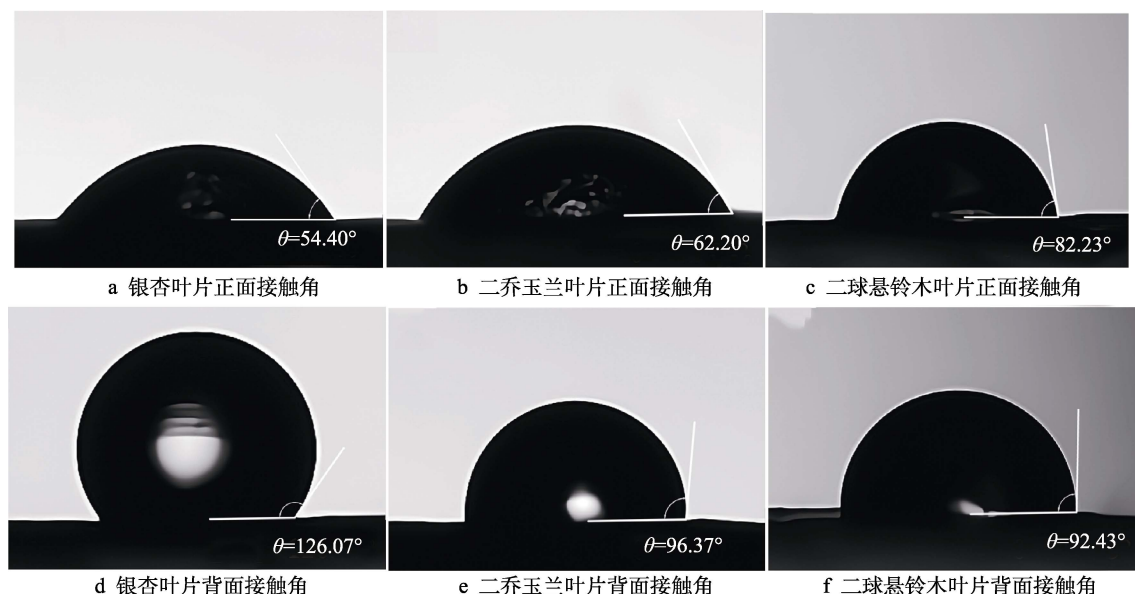


图 1 3 种叶片样本正背面接触角

Fig.1 Contact angles of the upper surface and backside surface of the three leaf samples: a) contact angle of the upper surface of *G. biloba*; b) contact angle of the upper surface of *M. soulangeana*; c) contact angle of the upper surface of *P. acerifolia*; d) contact angle of the backside surface of *G. biloba*; e) contact angle of the backside surface of *M. soulangeana*; f) contact angle of the backside surface of *P. acerifolia*

表 1 在 2 个测量日中 3 种样品正背面的接触角数值

Tab.1 Contact angles measured on the upper surface and backside surface of the three samples for 2 days

Dates	Species	Surfaces	Contact angles/(°)			
			Test 1	Test 2	Test 3	Average values
2021-10-31	<i>G. biloba</i>	Upper Surface 1	65.70	64.80	65.20	65.23
		Upper Surface 2	66.40	67.30	66.70	66.80
		Backside surface parallel to texture 1	122.50	122.30	123.10	122.63
		Backside surface parallel to texture 2	125.40	126.90	125.90	126.07
		Backside surface perpendicular to texture 1	104.10	102.50	102.50	103.03
		Backside surface perpendicular to texture 2	115.60	117.40	117.80	116.93
	<i>M. soulangeana</i>	Upper Surface 1	70.00	70.02	69.90	70.03
		Upper Surface 2	74.40	75.10	75.10	74.87
		Backside Surface 1	82.70	83.20	82.70	82.87
		Backside Surface 2	90.00	89.40	91.10	90.17
	<i>P. acerifolia</i>	Upper Surface 1	71.50	70.70	70.80	71.00
		Upper Surface 2	82.40	82.90	81.40	82.23
		Backside Surface 1	90.50	90.50	90.50	90.50
		Backside Surface 2	94.80	95.30	95.30	95.13
2021-11-06	<i>G. biloba</i>	Upper Surface 1	54.30	54.30	54.60	54.40
		Upper Surface 2	58.60	58.70	58.70	58.67
		Backside surface parallel to texture 1	128.80	128.40	128.40	128.53
		Backside surface parallel to texture 2	135.40	134.90	135.00	135.10
		Backside surface perpendicular to texture 1	118.60	118.50	117.50	118.20
		Backside surface perpendicular to texture 2	133.60	133.70	135.10	134.13
	<i>M. soulangeana</i>	Upper Surface 1	58.10	57.80	57.90	57.93
		Upper Surface 2	62.50	62.30	61.80	62.20
		Backside Surface 1	87.20	87.20	86.70	87.03
		Backside Surface 2	96.70	96.20	96.20	96.37
	<i>P. acerifolia</i>	Upper Surface 1	55.80	55.20	56.20	55.73
		Upper Surface 2	62.50	63.10	62.60	62.73
		Backside Surface 1	92.90	91.90	92.50	92.43
		Backside Surface 2	97.60	97.10	97.70	97.47

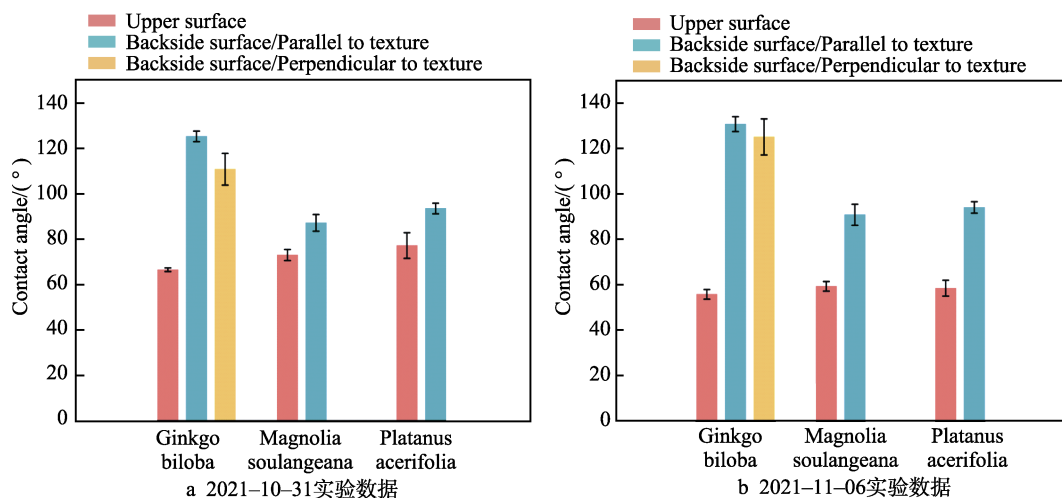


图 2 叶片样本正背面的接触角平均值

Fig.2 Average contact angle values measured on the upper surface and backside surface of the leaf samples: a) experimental data on October 31, 2021; b) experimental data on November 6, 2021

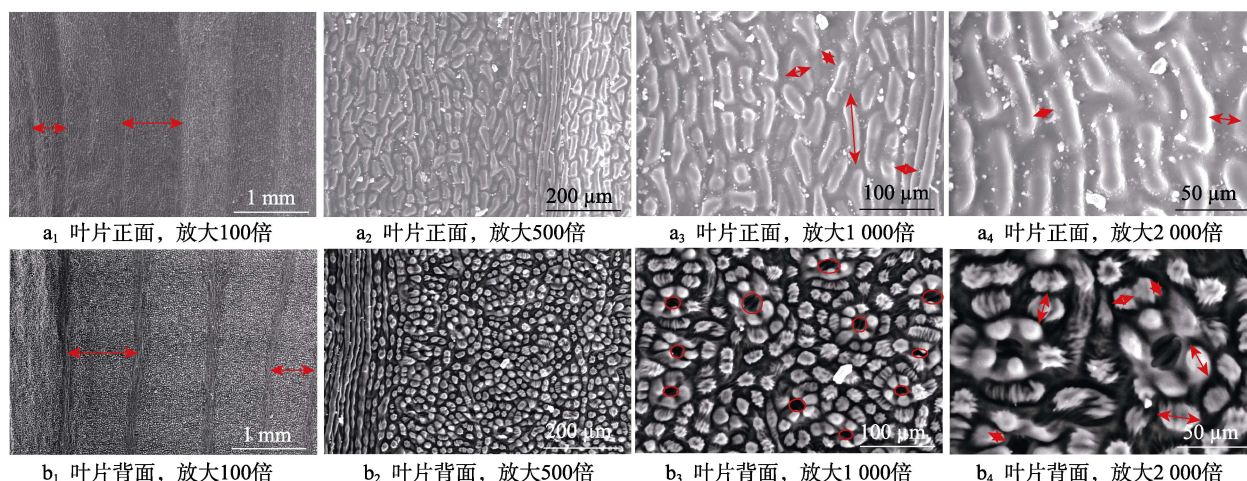


图 3 银杏叶表面 ESEM 图像

Fig.3 ESEM images of *G. biloba* leaf surface: a₁) upper surface morphologies magnified for 100 times; a₂) upper surface morphologies magnified for 500 times; a₃) upper surface morphologies magnified for 1 000 times; a₄) upper surface morphologies magnified for 2 000 times; b₁) backside surface morphologies magnified for 100 times; b₂) backside surface morphologies magnified for 500 times; b₃) backside surface morphologies magnified for 1 000 times; b₄) backside surface morphologies magnified for 2 000 times

深浅程度能够反映叶片表面结构的凹凸情况,颜色较深表示其凹陷程度较大,较浅表示其凸起较明显^[48]。通过分析图像可知,银杏叶正面条纹特征宽度为 0.39~0.75 mm。从图 3a₂ 可以看出,在每个条纹区间内分布着密集且大致平行的微米尺度的棱槽结构。这些构成叶片较大尺度条纹的棱槽结构在条纹凸起和凹陷区域并未表现出显著差异。对图 3a₃ 中凸起的棱状结构进行尺寸标注后发现,该类型结构单元长度为 17.68~87.75 μm,宽度为 11.53~28.26 μm,长宽比约为 1.53~3.11。分析图 3a₄ 银杏叶正面放大 2 000 倍图像可以发现,每条棱的凸起程度及之间的槽宽大致相同,间距为 10.16~17.64 μm。凸起棱结构呈长条形特征,表面平整度高,整体构成了规律性强的凸起结构。通过计算可知该特征结构的表面密度约为 4 2140 个/cm²。

从图 3b₁ 可以发现,银杏叶背面的微细观结构整体呈条纹分布,条纹由颜色较深且宽度较窄的带状微细观结构组成,条纹间隔宽度为 0.52~0.87 mm。由放大 500 倍的图 3b₂ 可见,银杏叶背面微结构相较于正面更复杂,包含形成条纹分隔的带状结构、表面较为光滑的近圆形凸起结构、表面粗糙的近圆形凸起结构(其表面分布着次级条形突触)、气孔等微结构,这些微结构相较于正面,其排列密度更大。对放大 1 000 倍的图 3b₃ 中的气孔进行标注,通过进一步分析发现,在该放大倍数下,银杏叶背面约有 11 个气孔,经换算后可知银杏叶背面的气孔密度约为 8 914 个/cm²。结合图 3b₄ 中同一位置的 2 000 倍放大形貌可知,分布在气孔周围的微结构为表面较光滑、近圆形的凸起结构,直径为 9.12~20.43 μm,约 4~5 个该微结构包围 1 个气孔,其表面密度约为 35 656 个/cm²。另一部分表面带有次级突触的近圆形凸起结构,特征尺寸为 8.30~25.49 μm,在该放大倍数下能看到约 28

个该样式的多层级突触,经换算后可知其表面密度约为 90 761 个/cm²。

2.2.2 二乔玉兰

二乔玉兰叶片正、背面放大 100、500、1 000、2 000 倍的 ESEM 图像如图 4 所示。从放大 100 倍的图 4a₁ 可见,二乔玉兰叶片正面被明显的脉络分隔成面积较大的独立区域,且存在分布较为稀疏的绒毛。在此放大倍数下能够观察到 42~44 根绒毛,其长度为 0.11~0.33 mm,间距为 0.17~1.36 mm,经换算后可知其表面密度约为 348 根/cm²。从图 4a₂—a₃ 可以看出,除绒毛结构外,上面还分布着微米尺度的曲线形结构,彼此相连,相互交错排列,且形状变化无特定规律。对图 4a₄ 进行标注后发现,正面的曲线形结构的宽度为 4.51~12.85 μm。

从图 4b₁ 可以发现,二乔玉兰叶片背面的分隔情况与正面相似,区别在于(从图 4b₂ 二乔玉兰背面放大 500 倍的图像可见)背面存在分布较密集的气孔,约能观察到 40 个,间距为 15.05~267.41 μm,经换算后可知气孔的表面密度约为 8 103 个/cm²。进一步对比放大 500 倍的图 4a₃ 和 b₃ 可以发现,二乔玉兰叶片背面具有与正面类似的曲线状结构。对图 4b₄ 进行标注后发现,其背面宽度为 3.57~5.98 μm,小于正面宽度。通过分析整体图像发现,二乔玉兰叶片图像的对比度小于银杏的,排除 ESEM 试验过程中叶片表面处理差异的影响,认为二乔玉兰表面的微细观结构的凹凸程度更低,叶片正背面更平整。

2.2.3 二球悬铃木

二球悬铃木叶片正、背面放大 100、500、1 000、2 000 倍的 ESEM 图像如图 5 所示。从图 5a₁ 可以看出,二球悬铃木正面被明显的叶片脉络分割成形状和

面积均不规则的区块。从图 5a₂ 可以发现, 其表面呈现类似于网状的微米级结构, 并在红色圆圈标注的结点处汇聚, 在该放大倍数下能观察到 4~5 个结点, 经换算后其密度为 810~1 013 个/cm²。如图 5 中箭头所示, 不规则凸起结构的长度为 25.19~42.60 μm, 宽度为 16.71~32.18 μm, 长宽比为 1.32~1.51。分析图 5a₃ 可知, 部分条状结构汇聚在一起, 形成了如图 5a₂ 所示的叶片网状结构。结合二球悬铃木正面放大 2 000 倍的图像 (图 5a₄), 推断紧密相连的不规则凸起结构向边界方向呈凹陷状态, 其表面呈现出网状结构跨过区块边界沿不同方向延伸的状态。

与正面相比, 二球悬铃木背面的微细观结构具有类似性。对比二球悬铃木正面相同放大倍数下的图像 (图 5b₁、b₂) 可以发现, 叶片脉络形状和分隔叶片不规则凸起结构具有功能相似性。结合图 5b₃、b₄ 进一步分析可知, 正背面的差异在于背面具有形状不规则的褶皱状结构, 且在该结构之间嵌入了大量气孔。从二球悬铃木背面放大 1 000 倍的图像 (图 5b₃) 可知, 气孔间距为 10.41~115.77 μm, 在该放大倍数下能观察到约 33 个气孔, 经换算后可知气孔密度约为 26 742 个/cm²。与二乔玉兰相比, 二球悬铃木背面的气孔结构分布密度更大, 且排列更紧密。

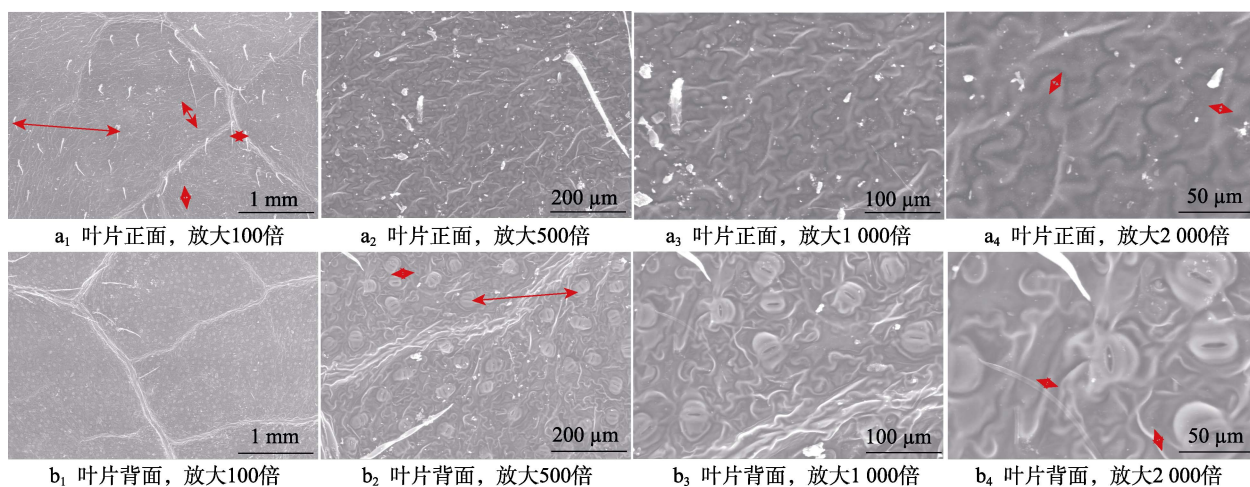


图 4 二乔玉兰叶表面 ESEM 图像

Fig.4 ESEM images of *M. soulangeana* leaf surface: a₁) upper surface morphologies magnified for 100 times; a₂) upper surface morphologies magnified for 500 times; a₃) upper surface morphologies magnified for 1 000 times; a₄) upper surface morphologies magnified for 2 000 times; b₁) backside surface morphologies magnified for 100 times; b₂) backside surface morphologies magnified for 500 times; b₃) backside surface morphologies magnified for 1 000 times; b₄) backside surface morphologies magnified for 2 000 times

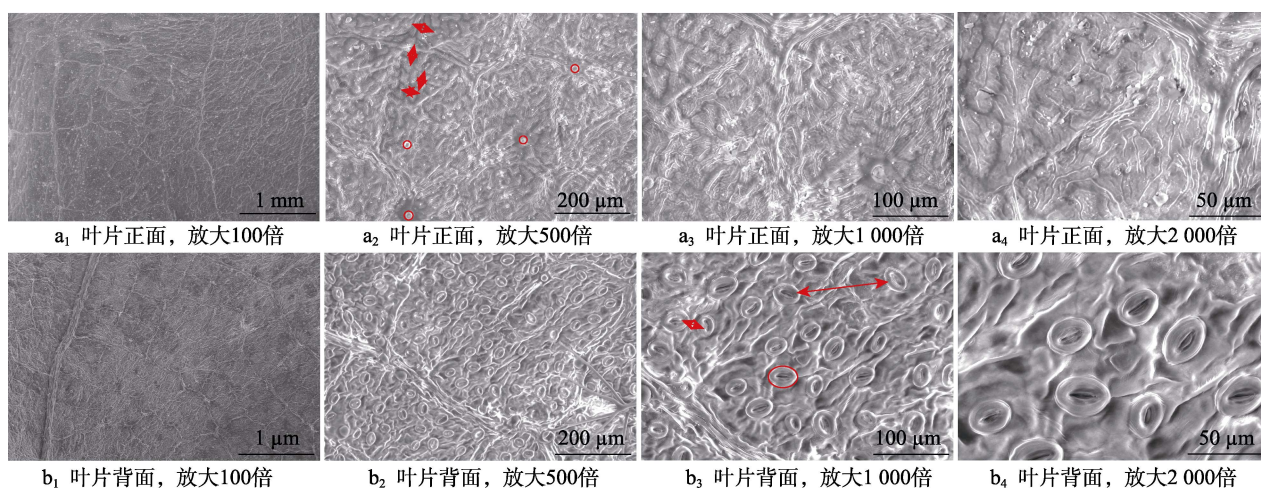


图 5 二球悬铃木叶表面 ESEM 图像

Fig.5 ESEM images of *P. acerifolia* leaf surface: a₁) upper surface morphologies magnified for 100 times; a₂) upper surface morphologies magnified for 500 times; a₃) upper surface morphologies magnified for 1 000 times; a₄) upper surface morphologies magnified for 2 000 times; b₁) backside surface morphologies magnified for 100 times; b₂) backside surface morphologies magnified for 500 times; b₃) backside surface morphologies magnified for 1 000 times; b₄) backside surface morphologies magnified for 2 000 times

2.3 微细观结构对润湿性的影响

2.3.1 同种叶片正背面对比

3 种叶片正背面的润湿性均表现出一定差异。从接触角测量结果来看, 银杏叶正背面的润湿性差距最大, 而二乔玉兰和二球悬铃木叶正背面润湿性的差异性较小。分析 3 种叶片正背面的 ESEM 扫描图像(图 3—5)可以发现, 银杏叶正背面的微细观结构显著不同, 二乔玉兰和二球悬铃木叶片正背面微细观结构的差异较小。在接触角测量实验中, 将液滴体积控制在 $4\ \mu\text{L}$ 左右, 结合接触角数据可以计算液滴和叶片的实际接触面积, 进一步分析叶片正背面接触角差异的影响因素。这里假设同种叶片正面和背面本身的物理性质差异较小, 导致其润湿性差异的主要原因为叶片正背面微细观结构的不同。

对于银杏叶片, 正背面具有显著差异的微细观结构是导致其润湿性不同的主要影响因素。银杏叶正面分布着微米尺度棱槽结构, 表面具有平整度高、排列规律性强等特点, 表观面积约占叶片面积的 31.50%。当实验液滴落在银杏叶片正面稳定后, 上面有 $2\ 828\sim 3\ 800$ 个长条形棱槽结构, 该结构与液滴接触的表观面积为 $2.11\sim 2.84\ \text{mm}^2$ 。需要说明的是, 在落叶初期, 叶片与新生叶片、成熟叶片表现出较大不同, 微米尺度棱槽结构不再完全限制液滴的浸入, 液滴可以在微米尺度棱槽结构表面延展, 并受其导向性的影响, 宏观表现为银杏叶片正面具有较高的润湿性。银杏叶背面的近圆形凸起结构的表观面积约占叶片面积的 27.70%, 表面带有次级突触的近圆形凸起结构, 约占叶片面积的 21.58%。这 2 种微细观结构(尤其是带有次级突触的结构)是导致其背面接触角远大于正面接触角的主要因素。当实验液滴落在银杏叶片背面稳定后, 有 $989\sim 3\ 185$ 个近圆形凸起结构位于液滴与叶片接触面下, 表观接触面积为 $0.22\sim 0.70\ \text{mm}^2$ 。其中, 气孔周围表面较光滑的近圆形凸起结构有 $279\sim 898$ 个, 表观接触面积为 $0.05\sim 0.15\ \text{mm}^2$ 。表面带有次级突触的近圆形凸起结构为 $710\sim 2\ 287$ 个, 表观接触面积为 $0.17\sim 0.54\ \text{mm}^2$ 。近圆形凸起结构和次级突触结构阻止了液体向下方和四周的扩展, 凸起结构间复杂的空隙空间导致“固-液”界面间的空气滞留, 造成银杏叶背面具有疏水性质的宏观表现。

二乔玉兰叶片正背面较平整, 叶片上曲线形微细观结构是其基本组成要素, 正面和背面整体呈现较高的相似性。正背面微细观结构的主要差异在于正面的绒毛结构和背面的气孔结构, 使得二乔玉兰叶片正背面的接触角存在差异。正面绒毛结构的密度高于背面密度, 当液滴在二乔玉兰叶片正面稳定时, 只有 $19\sim 29$ 根绒毛位于液滴之下。从 ESEM 图可以看出, 该绒毛结构基本平铺在叶片表面, 对接触角的影响较小。二乔玉兰叶背面具有的气孔结构的表观面积约占叶片

面积的 9.1%, 当液滴在二乔玉兰叶片背面稳定时, 与液滴接触的气孔为 $250\sim 361$ 个, 气孔结构与液滴的表观接触面积为 $0.28\sim 0.41\ \text{mm}^2$, 气孔是二乔玉兰叶片背面接触角大于正面接触角的主要原因。

二球悬铃木叶片正背面同样较为平整, 正背面的微细观结构整体上表现出较大的相似性, 主要区别是背面具有气孔结构, 导致二球悬铃木叶片正背面接触角的差异。二球悬铃木叶背面的气孔结构表观面积约占叶片面积的 13.0%, 在测量接触角时, 当液滴在叶片背面稳定时, 与液滴接触的气孔为 $801\sim 979$ 个。气孔结构与液滴的表观接触面积为 $0.39\sim 0.48\ \text{mm}^2$, 气孔结构同样是二球悬铃木叶片背面接触角大于正面接触角的主要原因。

2.3.2 不同种类叶片对比

在 2 日的实验过程中, 3 种叶片的正面表现出弱亲水性, 其中银杏叶片正面接触角略小于二乔玉兰和二球悬铃木叶片的正面接触角。银杏叶片正面的微细观结构与二乔玉兰和二球悬铃木相比差异明显。在落叶初期, 银杏叶片正面微米尺度棱槽结构有利于液体在表面的延展, 并具有一定的导向作用。二乔玉兰叶正面的曲线形结构排列无特定变化规律, 结构之间相互连接, 液体易沿着该结构延伸和铺展。二球悬铃木叶正面的微细观结构主要由网状结构和非规则凸起结构组成, 2 种结构紧密排布于二球悬铃木叶正面。其中, 不规则凸起结构相对平整, 无规则延伸的网状结构能够引导液体的铺展。在落叶初期, 3 种叶片的正面微细观结构相对有利于液滴的铺展, 这使得三者的表观接触角均较低, 润湿性较好。

3 种叶片背面润湿性的差异状况与其表面微细观结构紧密相关。银杏叶片背面不论按顺纹理还是逆纹理所测的接触角均显著高于二乔玉兰和二球悬铃木。分析 ESEM 扫描图像可知, 区别主要在于银杏叶片背面的凸起结构高度更高, 且部分凸起结构表面包含次级微细观结构, 这会阻碍液滴沿微细观结构的扩展, 这是导致银杏叶片背面接触角显著高于二乔玉兰和二球悬铃木的主要原因。对于二乔玉兰和二球悬铃木, 二者叶片背面均表现出中性润湿性, 如前所述其背面分布的气孔结构是导致其背面接触角大于正面的主要原因。虽然二球悬铃木叶片背面气孔结构数量约为二乔玉兰的 3 倍, 与气孔的表观接触面积约为二乔玉兰的 1.5 倍, 但是二者背面表现出较接近的润湿性。分析 ESEM 扫描图像, 从图像的深浅对比度判断二乔玉兰和二球悬铃木叶片背面相对平整, 且在观测尺度范围内二者均未发现次级微细观结构。

2.3.3 银杏叶背面顺逆纹理差异

针对银杏叶背面明显的纹理, 此次实验进行了顺纹理和逆纹理方向接触角的测试。假设纹理结构会使液滴顺纹理方向移动, 因而在实验前预测其逆纹理方

向的接触角将高于顺纹理方向的。测试结果显示,第 1 个实验日期中,银杏叶背面逆纹理方向所测得的 2 次接触角均低于顺纹理方向的接触角,平均差距为 14.37° 。在第 2 个实验日期中,银杏叶背面逆纹理方向的接触角仍小于顺纹理方向的接触角,平均差距为 5.65° 。结合 ESEM 图像分析可知,银杏叶背面的近圆形凸起结构会对液滴扩展起到阻碍作用,尤其是表面带有次级突触的多层级凸起结构,宏观上表现出更大的接触角。形成纹理分隔的带状微细观结构具有与正面条形结构类似的液滴导向作用,表现出更好的液滴扩展作用。由于带状微细观结构的宽度较窄,对于顺纹理样品接触角,液滴左右两侧仅有少部分面积受到带状微细观结构的牵引。对于逆纹理样品接触角,液滴左右两侧的更大面积受到带状微细观结构的牵引,最终导致银杏叶片背面顺纹理的接触角更大。值得指出的是,在 2 个观测日期中,逆纹理方向的接触角均表现出更大的离散性,这是由于逆纹理方向带状或近圆形凸起微结构会影响三相接触线的最终平衡位置。

3 讨论

3.1 气象差异及生长周期的影响

此次实验选取的 3 种植物均为阔叶树,在实验期间已处于落叶初期,落叶期的植物叶片相较于其他生长期更为缺水,且经历长期阳光照射后,其叶片正面均表现出比叶片生长初期和成熟期更强的亲水性。在实验日早晨采集样本时,环境气温均为 11°C 。虽然 2 次测量日期仅间距 7 d (第 1 次实验日期为 2021-10-31,第 2 次实验日期为 2021-11-06),但处于落叶初期的植物叶片受到昼夜环境温差、叶片本身含水量、叶片生长周期等因素的影响,导致 2 次测量结果表现出一定差异,基本规律为 3 种植物叶片正面接触角表现出一定程度的下降,而叶片背面接触角略微上升。

3.2 接触角测定时间

对于本身润湿性较强的表面,液体更易在其上实现浸润和铺展。对于本身润湿性较弱的表面,表面微细观结构会限制液体的进一步浸润和铺展,该浸润和铺展过程会经历一定时间。在实验中记录了 30 s 和 60 s 时叶片样品正背面的接触角,前文呈现的结果均为 30 s 时的观测结果。相较于 30 s 时的接触角测量结果,在 60 s 时接触角仅下降了 $0.17^{\circ}\sim 4.40^{\circ}$,表明 30 s 时液滴已基本稳定。

3.3 液滴在叶片表面所处的润湿状态

润湿现象来源于范德华力作用下液体在固体表面的延展行为,一般发生在固体、液体和气体的三相体系中。固体与液体的接触形式有差异,具体可将润

湿现象分为沾湿、浸湿和延展 3 种类型^[49]。

作为 2 种经典的润湿性模型, Wenzel 模型^[50]和 Cassie-Baxter 模型^[51]解释了液体在粗糙固体表面的不同接触状态。在 Wenzel 状态下,通常认为液体会浸入固体表面微细观结构的空隙之间,更易在相对平整的表面铺展,亲水性表面的表观接触角将更小、亲水性更强。Cassie-Baxter 模型与 Wenzel 模型的不同点在于,液滴接触到粗糙表面后,并不能进入微结构之间的空隙。相对于 Wenzel 状态,在 Cassie-Baxter 状态下由于空气的存在,液体与表面之间的接触面积将会减少,表面接触角更大。部分植物叶片表面的超疏水特性一般处于 Cassie-Baxter 状态。

在实验过程中发现,当液滴未完全脱离滴定针头,与银杏叶片背面接触时,液滴更易停留在针头,与样品可自然分离,且不出现润湿现象。物体表面的多层级结构是其表面液滴处于 Cassie-Baxter 状态的特征条件之一,考虑到银杏叶背面复杂的多层级结构,推测当液滴与表面接触时,多层级结构之间的空气滞留为液滴达到 Cassie-Baxter 状态提供了客观条件。二乔玉兰和二球悬铃木叶片表面较平整,推测实验测试中其表面液滴处于 Wenzel 状态,但不排除二者背面气孔处于 Cassie-Baxter 状态。

4 结论

研究了落叶初期银杏、二乔玉兰和二球悬铃木 3 种植物的润湿性,以及其叶片表面微细观结构对润湿性的影响。实验结果表明,在落叶初期,3 种植物叶片正面均表现出弱亲水性,银杏叶片正面的接触角最小,二乔玉兰和二球悬铃木次之。三者背面的润湿性具有较大差异,二球悬铃木和二乔玉兰叶片的背面为中性润湿,而银杏背面无论是顺纹理还是逆纹理方向均表现出疏水特征。叶片表面微细观结构的不同是造成叶片正背面润湿性差异的主要原因。在落叶初期,银杏叶片正面微米尺度的棱槽结构有利于液体的铺展,背面密集分布的近圆形凸起(尤其是表面带有次级突触的多层级凸起结构)阻碍了液滴的铺展,导致其背面接触角远大于正面接触角。二乔玉兰和二球悬铃木叶片的正面和背面均较平整,且正面和背面的微细观结构整体呈现较高的相似性,二者背面的接触角稍大于正面的接触角。二乔玉兰和二球悬铃木叶片背面的气孔结构是导致背面接触角稍大的主要原因。该研究结果揭示了叶片微细观结构对润湿性的影响,同时对液滴在叶片表面所处的状态进行了讨论,相关问题还需更多的实验验证。

参考文献:

- [1] ZHANG Liang, ZHAO Ning, XU Jian. Fabrication and

- Application of Superhydrophilic Surfaces: A Review[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, 28(8/9): 769-790.
- [2] CHI Jun-jie, ZHANG Xiao-xuan, WANG Yue-tong, et al. Bio-Inspired Wettability Patterns for Biomedical Applications[J]. Materials Horizons, 2021, 8(1): 124-144.
- [3] HUHTAMÄKI T, TIAN Xue-lin, KORHONEN J T, et al. Surface-wetting Characterization Using Contact-angle Measurements[J]. Nature Protocols, 2018, 13(7): 1521-1538.
- [4] KAKONKE G, TESFAYE T, SITHOLE B, et al. Review on the Manufacturing and Properties of Nonwoven Superabsorbent Core Fabrics Used in Disposable Diapers [J]. International Journal of Chemical Sciences, 2019, 17(1): 302.
- [5] JI Jun-fu, FITZPATRICK J, CRONIN K, et al. Assessment of Measurement Characteristics for Rehydration of Milk Protein Based Powders[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 151-161.
- [6] CHEN Hua-wei, ZHANG Peng-fei, ZHANG Li-wen, et al. Continuous Directional Water Transport on the Peristome Surface of *Nepenthes Alata*[J]. Nature, 2016, 532(7597): 85-89.
- [7] GUAN Yu, CHEN Rong-rong, SUN Gao-hui, et al. The Mussel-Inspired Micro-nano Structure for Antifouling: A Flowering Tree[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 603: 307-318.
- [8] PISCITELLI F, CHIARIELLO A, DABKOWSKI D, et al. Superhydrophobic Coatings as Anti-Icing Systems for Small Aircraft[J]. Aerospace, 2020, 7(1): 2.
- [9] ZENG Dan, LI Yong, HUAN Da-jun, et al. Robust Epoxy-modified Superhydrophobic Coating for Aircraft Anti-Icing Systems[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 628: 127377.
- [10] HE Li-fei, DING Lei, ZHANG Peng, et al. Impact of the Equilibrium Relationship Between Deposition and Wettability Behavior On the High-efficiency Utilization of Pesticides[J]. Pest Management Science, 2021, 77(5): 2485-2493.
- [11] ZHENG Li, CAO Chong, CHEN Zhuo, et al. Efficient Pesticide Formulation and Regulation Mechanism for Improving the Deposition of Droplets on the Leaves of Rice (*Oryza Sativa L*)[J]. Pest Management Science, 2021, 77(7): 3198-3207.
- [12] ZHENG Jiang-tao, LEI Wen-hai, JU Yang, et al. Investigation of Spontaneous Imbibition Behavior in a 3D Pore Space Under Reservoir Condition by Lattice Boltzmann Method[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(6): e2021JB021987.
- [13] 舒平华, 姚军, 严侠. 不同压制条件下岩石颗粒润湿性变化特征研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(12): 347-351.
- SHU Ping-hua, YAO Jun, YAN Xia. Research on the Variation Characteristics of Wettability of Rock Particles under Different Pressing Conditions[J]. Science Technology and Industry, 2021, 21(12): 347-351.
- [14] 江雷. 从自然到仿生的超疏水纳米界面材料[J]. 化工进展, 2003, 22(12): 1258-1264.
- JIANG Lei. Nanostructured Materials with Superhydrophobic Surface—From Nature to Biomimesis[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(12): 1258-1264.
- [15] QUÉRÉ D. Wetting and Roughness[J]. Annual Review of Materials Research, 2008, 38: 71-99.
- [16] ENSIKAT H J, DITSCHKE-KURU P, NEINHUIS C, et al. Superhydrophobicity in Perfection: The Outstanding Properties of the Lotus Leaf[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2011, 2: 152-161.
- [17] 邱宇辰, 刘克松, 江雷. 花生叶表面的高黏附超疏水特性研究及其仿生制备[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(2): 403-408.
- QIU Yu-chen, LIU Ke-song, JIANG Lei. Peanut Leaves with High Adhesive Superhydrophobicity and Their Biomimetic Materials[J]. Scientia Sinica Chimica, 2011, 41(2): 403-408.
- [18] E J Q, JIN Yu, DENG Yuan-wang, et al. Wetting Models and Working Mechanisms of Typical Surfaces Existing in Nature and Their Application on Superhydrophobic Surfaces: A Review[J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5: 1701052.
- [19] KLAMERUS-IWAN A, BŁOŃSKA E. Canopy Storage Capacity and Wettability of Leaves and Needles: The Effect of Water Temperature Changes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 534-540.
- [20] ABU HASSAN H, GHAZALI M J, MERIC C, et al. Wettability Effect of the Surface Morphologies of *Musa acuminata* Leaves[J]. BioResources, 2019, 14(4): 8331-8344.
- [21] NEOG D, BORGOHAIN P. Effect of Temperature on Sandstone Rock Wettability Behaviour: A Study on the Barail Sandstone Outcrop of the Upper Assam Basin[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(2): 138.
- [22] ZHAO Ben-zhong, MACMINN C W, JUANES R. Wettability Control on Multiphase Flow in Patterned Microfluidics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(37): 10251-10256.
- [23] LIU Sheng-yu, LIU Xiao-yang, GUO Zhong-ya, et al. Wettability Modification and Restraint of Moisture Re-adsorption of Lignite Using Cationic Gemini Surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 508: 286-293.
- [24] ZHOU Qun, QIN Bo-tao, WANG Jun, et al. Effects of Preparation Parameters on the Wetting Features of Surfactant-magnetized Water for Dust Control in Luwa Mine, China[J]. Powder Technology, 2018, 326: 7-15.
- [25] GUO Jian-ying, XIA Yang-chao, LIU Yu-tao, et al. Microscopic Adsorption Behaviors of Ionic Surfactants on Lignite Surface and Its Effect on the Wettability of Lignite: A Simulation and Experimental Study[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 345: 117851.
- [26] 余跃惠, 曾琦, 董浩, 等. 纳米材料改变岩石矿物润湿性的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 2997-3005.
- SHE Yue-hui, ZENG Qi, DONG Hao, et al. Development of Changing Rock Mineral Wettability with Nanomaterials[J]. Science Technology and Engineering, 2021,

- 21(8): 2997-3005.
- [27] DIVANDARI H, HEMMATI-SARAPARDEH A, SCHAFFIE M, et al. Integrating Synthesized Citric Acid-coated Magnetite Nanoparticles with Magnetic Fields for Enhanced Oil Recovery: Experimental Study and Mechanistic Understanding[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 425-436.
- [28] SALEH S, NEUBAUER E, BOROVINA A, et al. Wettability Changes Due to Nanomaterials and Alkali—A Proposed Formulation for EOR[J]. Nanomaterials, 2021, 11(9): 2351.
- [29] 卢晓, 张亮, 王曦, 等. 电子封装用 Sn-Ag-Cu 低银无铅钎料研究进展及发展趋势[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 118-136.
- LU Xiao, ZHANG Liang, WANG Xi, et al. Research Progress and Prospect of Low-Ag Lead-free Sn-Ag-Cu Solder in Electronic Packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 118-136.
- [30] HAN Dong-dong, CAI Qing, CHEN Zhao-di, et al. Bioinspired Surfaces with Switchable Wettability[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8: 692.
- [31] SAJI V S. Wax-based Artificial Superhydrophobic Surfaces and Coatings[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 602: 125132.
- [32] SHARMA P, MADHYASTHA H, MADHYASTHA R, et al. An Appraisal of Cuticular Wax of *Calotropis procera* (Ait) R Br: Extraction, Chemical Composition, Biosafety and Application[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 368: 397-403.
- [33] PANDEY K, BINDRA H S, JAIN S, et al. Sustainable Lotus Leaf Wax Nanocuticles Integrated Polydimethylsiloxane Sorbent for Instant Removal of Oily Waste from Water[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 634: 127937.
- [34] WANG Gui-yuan, GUO Zhi-guang, LIU Wei-min. Interfacial Effects of Superhydrophobic Plant Surfaces: A Review[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(3): 325-345.
- [35] NGUYEN S, WEBB H, MAHON P, et al. Natural Insect and Plant Micro-/Nanostructured Surfaces: An Excellent Selection of Valuable Templates with Superhydrophobic and Self-Cleaning Properties[J]. Molecules, 2014, 19(9): 13614-13630.
- [36] KIAMERUS-IWAN A, LAGAN S ZAREK MMARCIN Z, et al. Variability of Leaf Wetting and Water Storage Capacity of Branches of 12 Deciduous Tree Species[J]. Forests, 2020, 11(11): 1158.
- [37] FENG Lin, ZHANG Ya-nan, XI Jin-ming, et al. Petal Effect: A Superhydrophobic State with High Adhesive Force[J]. Langmuir, 2008, 24(8): 4114-4119.
- [38] 王立新, 李山山. 八宝景天叶片表面润湿性测试与疏水机理分析[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(1): 1-8.
- WANG Li-xin, LI Shan-shan. Wettability Measurement and Hydrophobicity Mechanism Analysis of Leaf Surface of *Hylotelephium Erythrostictum*[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(1): 1-8.
- [39] YANG Yang, LI Xiang-jia, ZHENG Xuan, et al. 3D-Printed Biomimetic Super-Hydrophobic Structure for Microdroplet Manipulation and Oil/Water Separation[J]. Advanced Materials, 2018, 30(9): 1704912.
- [40] 杨玉山, 沈华杰, 邱坚. 基于模板印刷法的仿生超疏水木材的研制[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(6): 187-191.
- YANG Yu-shan, SHEN Hua-jie, QIU Jian. Biomimetic Superhydrophobic Wood Based on Template Imprint[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2018, 38(6): 187-191.
- [41] MAYAMA H. Secret of Lotus Leaf: Importance of Double Roughness Structures for Super Water-Repellency[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2018, 31(6): 705-710.
- [42] WANG Hui-xia, SHI Hui, LI Yang-yang, et al. The Effects of Leaf Roughness, Surface Free Energy and Work of Adhesion on Leaf Water Drop Adhesion[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e107062.
- [43] PAPIEROWSKA E, SZPORAK-WASILEWSKA S, SZEWIŃSKA J, et al. Contact Angle Measurements and Water Drop Behavior on Leaf Surface for Several Deciduous Shrub and Tree Species from a Temperate Zone[J]. Trees, 2018, 32(5): 1253-1266.
- [44] YI Mei-rong, WU Li-ting, LIU Lu-qi, et al. Research on the Typical Microstructures and Contact Angles of Hydrophobic Plant Leaves[J]. Micro & Nano Letters, 2020, 15(4): 250-254.
- [45] ROSADO B H P, HOLDER C D. The Significance of Leaf Water Repellency in Ecohydrological Research: A Review[J]. Ecohydrology, 2013, 6(1): 150-161.
- [46] MATOS I S, ROSADO B H P. Retain or Repel? Droplet Volume Does Matter when Measuring Leaf Wetness Traits[J]. Annals of Botany, 2016, 117(6): 1045-1052.
- [47] KNOLL D, SCHREIBER L. Influence of Epiphytic Micro-organisms on Leaf Wettability: Wetting of the Upper Leaf Surface of *Juglans regia* and of Model Surfaces in Relation to Colonization by Micro-organisms[J]. New Phytologist, 1998, 140(2): 271-282.
- [48] 刘彦汝, 王林锋, 戴振东. 植物叶表面微米级结构表征[J]. 电子显微学报, 2017, 36(1): 54-62.
- LIU Yan-ru, WANG Lin-feng, DAI Zhen-dong. Characterization of Micro-scale Structures on Plant Leaf Surfaces[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2017, 36(1): 54-62.
- [49] BARTELL F E, OSTERHOF H J. Determination of the Wettability of a Solid by a Liquid[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1927, 19(11): 1277-1280.
- [50] WENZEL R N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [51] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of Porous Surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.

责任编辑: 彭颀