文章编号:1008-1542(2018)01-0001-08　　doi:10.7535/hbkd.2018yx01001

# 八宝景天叶片表面润湿性测试与疏水机理分析

王立新,李山山

(河北科技大学机械工程学院,河北石家庄　050018)

**摘　要**:为探寻用于超疏水表面制备的仿生原型,测试了八宝景天(*Hylotelephium erythrostictum*)叶片表面对水滴的润湿性,采用扫描电镜和三维形貌干涉仪对叶片表面微形貌结构进行观测并提取特征参数,基于 Wenzel 方程和 Cassie-Baxter 方程构建模型用以分析叶片表面的疏水机理。结果表明:润湿性随叶片类型的不同而呈现差异,其中新鲜幼叶正、反表面的接触角分别为(147.25 ± 3.79)°和(137.46 ± 4.03)°,新鲜幼叶反面的接触角高达 152.54°;叶片表面由排列连续致密且呈椭球形的凸包和交错排列成网状且形貌不规则但可辨别轮廓的蜡质晶体构成,不同类型叶片表面的凸包形貌呈现显著差异但蜡质晶体形貌未有明显区别;幼叶正、反表面的凸包具有相似的高度但分布密度和投影面积显著不同,蜡质晶体层的高度和面积比未有明显差异;微米级凸包和纳米级蜡质晶体的协同作用使叶片表面呈现疏水特性且蜡质晶体发挥关键作用。基于 Cassie-Baxter 方程构建的模型能够有效揭示叶片表面的疏水机理,并可为超疏水表面的仿生制备提供理论支持。

**关键词**:工程仿生学;润湿性;接触角;疏水机理;八宝景天叶片

**中图分类号**:TB17　　**文献标志码**:A

# Wettability measurement and hydrophobicity mechanism analysis of leaf surface of *Hylotelephium erythrostictum*

WANG Lixin, LI Shanshan

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

**Abstract**: To search a bionic prototype for fabrication of superhydrophobic surfaces, the wettability of water droplets on leaf surfaces of *Hylotelephium erythrostictum* is measured, and the micromorphology of these leaf surfaces is examined by scanning electron microscope and three-dimensional shape, and the characteristic parameter is extracted. Based on the Wenzel equation and Cassie-Baxter equation, theoretical models are proposed to analyze the leaf surface's hydrophobicity mechanism. Results present that the contact angles change remarkably with the variation of leaf types, the contact angle of water droplets on up side and low side of the fresh young leaf are recorded as (147.25 ± 3.79)° and (137.46 ± 4.03)°, and the greatest value is recorded as 152.54° when the water droplet contact with fresh young leaf's low side, demonstrating the fresh young leaf possesses superhydrophobic property. The leaf's surface morphology consists of convex halls and wax coverings, the ellipsoidal convex halls from young leaf show a continuous and dense arrangement with the similar height, the significant different distri-

收稿日期:2017-04-25;修回日期:2017-08-05;责任编辑:冯　民

基金项目:国家自然科学基金(51205107);河北省高等学校青年拔尖人才资助项目(BJ2017011)

第一作者简介:王立新(1981—),男,山东日照人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事机械仿生学方面的研究。

E-mail:wanglx@hebust.edu.cn

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 Lixin, LI Shanshan.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.

bution density and projected area. The wax coverings emerge as discernible platelet-formed wax crystals with an irregular pattern and overlap each other to generate numerous cavities, and the wax crystal's geometrical parameters from both sides of the young leaf exhibit extremely similar values. Both the micro-scaled convex halls and the nano-scaled wax crystals serve the function of making the leaf surface present hydrophobic property, but the wax crystals play an extremely important role. The theoretical model proposed based on the Cassie-Baxter equation can adequately elucidate the hydrophobic mechanism of leaf surface in *Hylotelephium erythrostictum*, and provides theoretical support for the bionic fabrication of superhydrophobic surface.

**Keywords**: engineering bionics; wettability; contact angle; hydrophobicity mechanism; leaf of *Hylotelephium erythrostictum*

荷叶表面因具有微米级乳突和纳米级蜡质晶体的复合结构而呈现超疏水效应[1-2]，由此开启了学者对超疏水表面的仿生研究。超疏水表面是指水滴的接触角大于150°的材料表面，其在自清洁、防腐蚀、农业机械防护等领域具有重要的应用前景[3-4]。微形貌结构是影响水滴在固体表面呈现较高接触角的重要因素，因此超疏水表面的制备主要是在具有微纳形貌结构的粗糙表面修饰低表面能物质，或在疏水材料表面构筑微纳尺度的形貌结构[5-6]。自然界中诸多动植物体表的多尺度形貌结构赋予其表面特殊的润湿性，例如荷叶表面的自清洁效应、花生叶片的高黏附超疏水现象，以及水稻叶片的各向异性超疏水现象[7-9]。这些具有微纳多尺度形貌结构的生物表面成为研究热点，为超疏水表面研制提供了典型的仿生原型。目前超疏水表面的制备仍存在工艺复杂、成本高昂等问题，如何解决这些问题将成为该领域未来长时间内所面临的主要难点；效法自然并获取较为理想的仿生原型，可为上述难点的解决提供突破契机[10-11]。而探寻新的仿生原型，测试其表面润湿行为并分析、揭示疏水机理，获取构建超疏水表面的新原理和新方法，可为超疏水表面研制提供重要的理论基础。

景天科植物八宝作为园林花卉普遍种植于尘土较多的公路两侧，但其叶片能够保持较为清洁的景象，这源于叶片表面具备的特殊润湿性而产生的自清洁效应。基于为超疏水表面简便、低成本制备探寻仿生原型的目的，本文测试了八宝景天叶片对水滴的润湿性，采用扫描电镜与三维形貌干涉仪对其表面微形貌结构进行了观测并统计获取了结构特征参数，基于Wenzel方程和Cassie-Baxter方程构建模型并推导获取数学方程分析阐释了其疏水机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 八宝景天叶片

测试用八宝景天(*Hylotelephium erythrostictum*)于2016年6月采集于石家庄市世纪公园，并继续在实验室内培育(见图1)。选取新鲜的幼叶、中叶与老叶用蒸馏水轻缓漂洗以除去表面杂质，分别剪取1 cm ×1 cm制成试验样本，部分样本放于洁净环境进行干燥，新鲜和干燥样本将用于润湿性测试和微形貌结构观测。

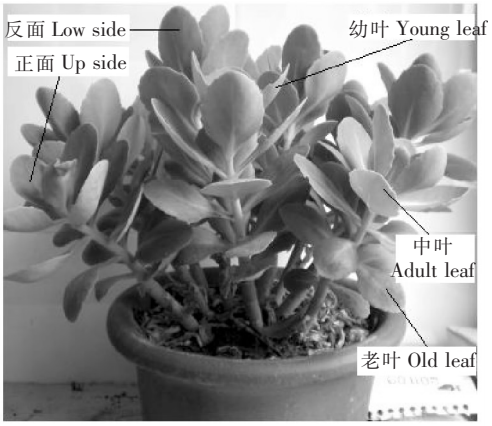



图1 用于测试叶片润湿性的八宝景天

Fig.1 *Hylotelephium erythrostictum* used to measure leaf's surface wettability

### 1.2 接触角测试

利用视频光学接触角测量仪SL-150S(美国Solon公司提供)测试水滴(纯净水)在试验样本的接触角，采用座滴法(sessile drop)使水滴(3～5 μL)与试验样本接触，接触角测量仪自带的高速成像系统采集相应图像并由软件Cast 2.0分析处理，获取接触角。每种试验样本重复测试12次并计算获取统计值，测试过程中的环境温度维持在28 ℃，相对湿度控制在65%。

### 1.3 表面微形貌观测及结构参数获取

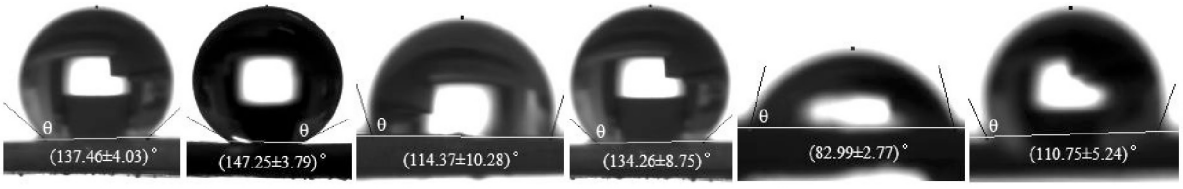
采用离子溅射镀膜仪(SCD-005，瑞士BAL-TEC公司提供)对完全干燥的幼叶、中叶、老叶等3类试验样本进行镀金处理，为抑制镀层对叶片表面微形貌结构参数的影响，控制镀层厚度约为10 nm；利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope(SEM)，S-4800，日本Hitachi公司提供)及附属图像分析软件对处

理好的试验样本进行微形貌观察并获取横向结构参数。采用三维白光形貌干涉仪(scanning white light interferometer(SWLI)，NV-5000，美国 Zygo 公司提供)对新鲜的幼叶、中叶、老叶等 3 类试验样本的正、反表面进行微形貌扫描观测并保存相应图像，利用设备附属的图像分析软件对图像进行处理并获取微形貌的纵向结构参数。

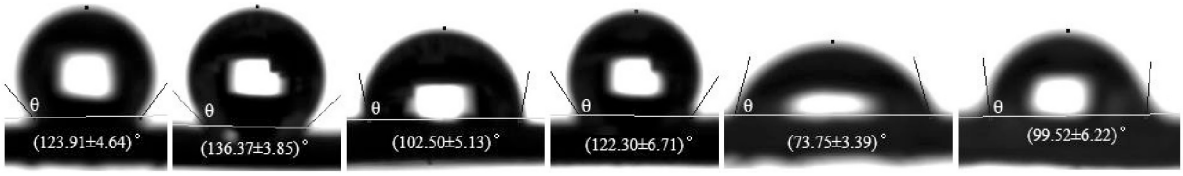
## 2　结果与分析

### 2.1　叶片表面接触角

水滴在八宝景天不同类型叶片表面的润湿程度呈现差异。新鲜幼叶反面可使水滴外形呈现近似完美的球状(见图 2 b))，而干燥老叶正面的水滴外形为球冠状(见图 2 k))，水滴在其他类型叶片表面的形状介乎于两者之间(见图 2)。统计获取的接触角信息(见图 2、图 3)显示，新鲜或干燥老叶的正面均不具有疏水特性，其接触角介于 67.98°～89.76°，而该两种类型叶片的反面却表现出一定程度的疏水特性(接触角为 86.69°～119.90°)；新鲜幼叶表现出相对最强的疏水特性，其中叶片反面的接触角最高可达 152.54°，呈现超疏水特性。值得注意的是，水滴在叶片反面的接触角要明显高于在正面的接触角(高 7.13%～34.93%)，其中新鲜幼叶表现出的差距最小，干燥老叶的差距最大，表明叶片反面具有相对较强的疏水特性；干燥叶片的接触角低于新鲜叶片的接触角(低 7.39%～11.13%)，降低程度未随叶片类型的不同而呈现显著差异。




a) 新鲜 幼叶 正面　b) 新鲜 幼叶 反面　c) 新鲜 中叶 正面　d) 新鲜 中叶 反面　e) 新鲜 老叶 正面　f) 新鲜 老叶 反面




g) 干燥 幼叶 正面　h) 干燥 幼叶 反面　i) 干燥 中叶 正面　j) 干燥 中叶 反面　k) 干燥 老叶 正面　l) 干燥 老叶 反面

图 2　水滴在八宝景天叶片表面的接触状态与接触角统计值

Fig.2　Contact state of water drops on leaf surfaces of *Hylotelephium erythrostictum* and their static values of contact angles

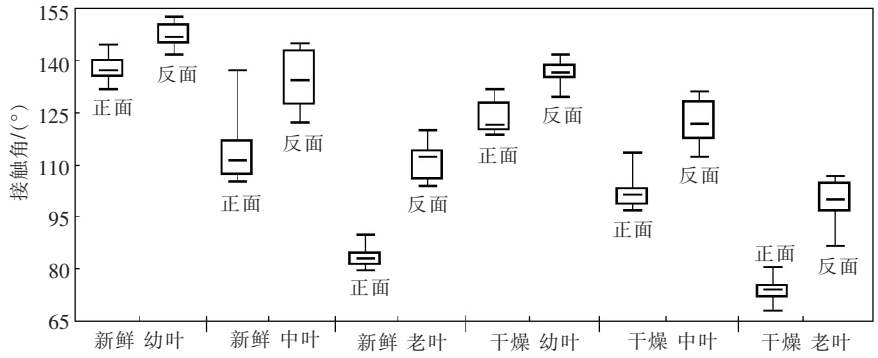
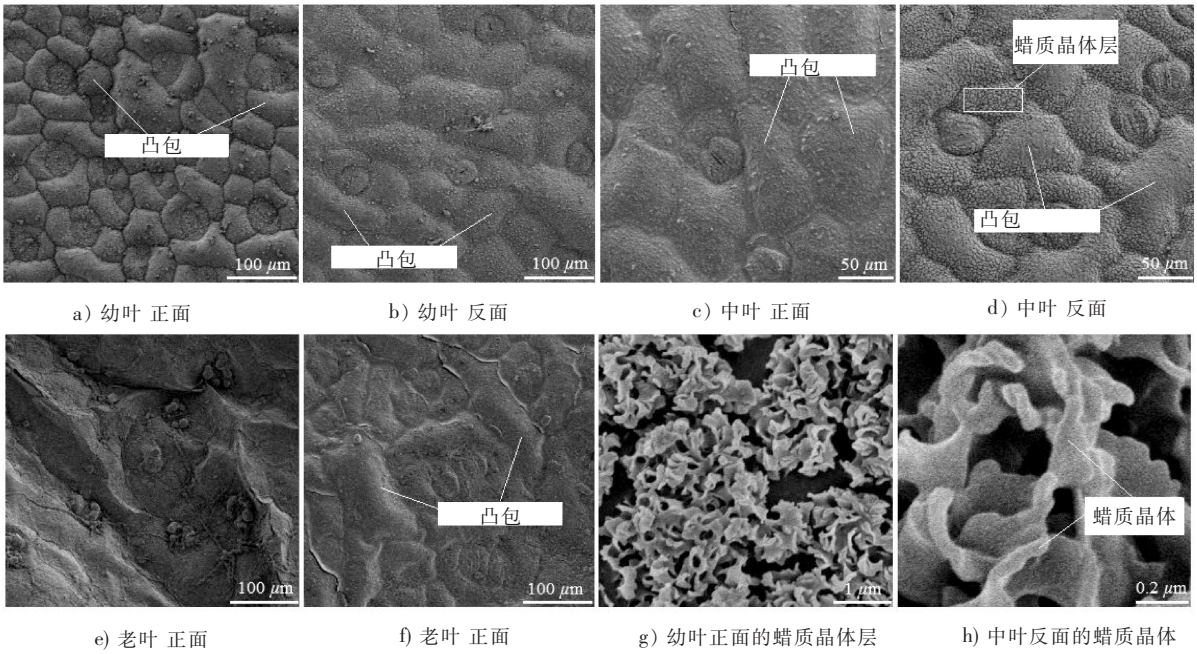



图 3　水滴在八宝景天叶片表面的接触角

Fig.3　Contact angles of water drops on leaf surfaces of *Hylotelephium erythrostictum*

### 2.2　叶片表面微形貌结构

SEM 观测结果表明，八宝景天叶片表面覆盖着微米尺度的凸包(convex hall)和纳米尺度的蜡质晶体层(wax covering)。凸包结构大多呈现椭球形且排列连续致密(见图 4 a)—图 4 f))，其中幼叶正面的凸包最为致密(见图 4 a))，老叶正、反表面呈现萎缩、褶皱及断裂的景象并附着较为明显的污染物，其凸包轮廓变得模糊不清(见图 4 e)、图 4 f))。高倍数扫描电镜照片显示，蜡质晶体层近乎均匀地覆盖在凸包表面(见图 4




a) 幼叶 正面　b) 幼叶 反面　c) 中叶 正面　d) 中叶 反面

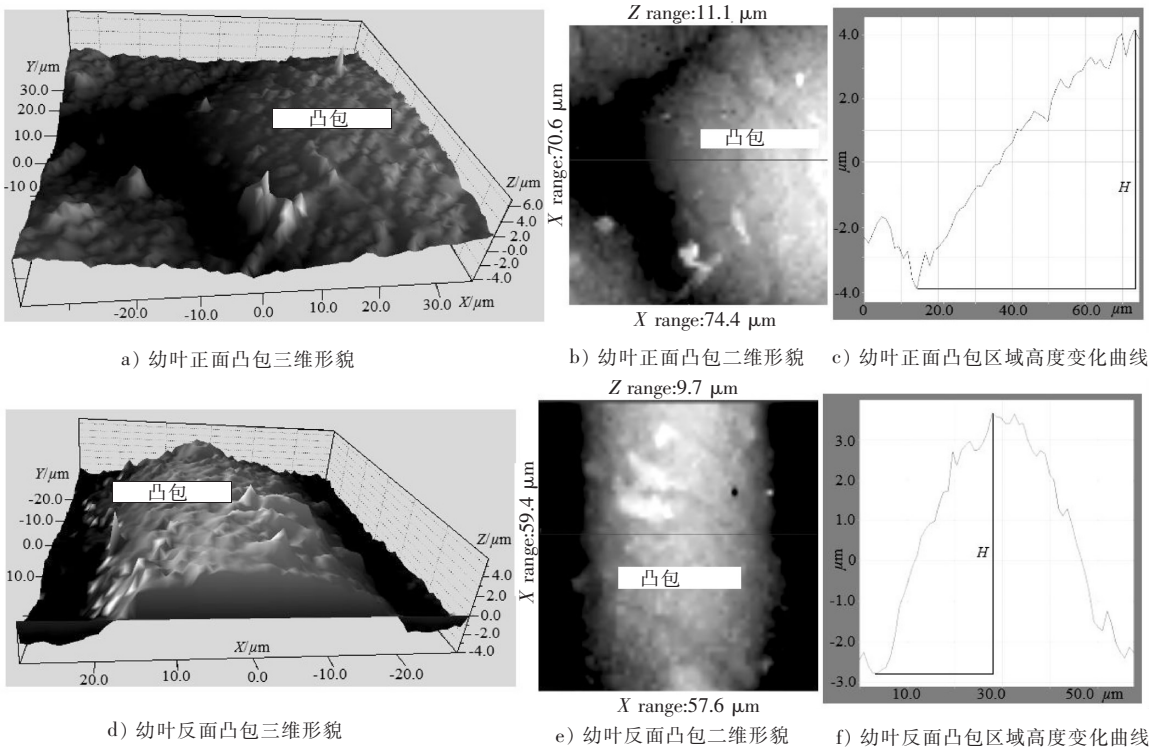
e) 老叶 正面　f) 老叶 正面　g) 幼叶正面的蜡质晶体层　h) 中叶反面的蜡质晶体

图 4　八宝景天叶片表面微形貌结构扫描电镜照片

Fig.4　SEM images of micro-structures in leaf surfaces of *Hylotelephium erythrostictum*

g)),由形状不规则但可辨别轮廓的纳米级片状蜡质晶体(wax crystals)组成,交错排列成致密网状且形成微纳级无序排列的空隙(见图 4 h)),这与猪笼草叶笼滑移区表面的蜡质晶体层极度相似[12-15]。凸包随着叶片类型或正反面的不同而呈现明显区别,具体表现为外形轮廓、结构大小、分布密度等方面;蜡质晶体层未在老叶表面明显呈现,在幼叶、中叶表面清晰可辨,而且其形貌轮廓、结构特征随着幼叶、中叶或正反面等叶片类型的不同未表现出显著区别。

SWLI 扫描获取八宝景天叶片的二维、三维结构图像,因幼叶表现出相对最强的疏水特性(119.5°～152.54°,见图 3),本文仅呈现幼叶表面微形貌的 SWLI 扫描观测结果。三维结构图像(见图 5 a)、图 5 d))显




a) 幼叶正面凸包三维形貌　b) 幼叶正面凸包二维形貌　c) 幼叶正面凸包区域高度变化曲线

d) 幼叶反面凸包三维形貌　e) 幼叶反面凸包二维形貌　f) 幼叶反面凸包区域高度变化曲线

图 5　八宝景天幼叶表面微形貌结构 SWLI 扫描照片

Fig.5　SWLI images of micro-structures in young leaf surfaces of *Hylotelephium erythrostictum*

示，幼叶正、反表面的凸包均呈现微米级起伏，形成“缓坡”结构；二维结构图像（图 5 b）、图 5 e））能够反映叶片表面沿某特定直线的高度变化（图 5 c）、图 5 f）），据此可以推算凸包与蜡质晶体层的高度信息。

基于获取的叶片表面微形貌结构图像，采用 SEM，SWLI 附属的图像处理软件与图像分析软件 ImageJ（ImageJ 1.38 e/Java，National Institute of Health，美国）对凸包、蜡质晶体的特征参数进行了分析提取，获得幼叶正、反表面凸包的分布密度、投影面积、简化半径、高度，以及蜡质晶体层的高度、蜡质晶体面积比等结构特征信息（见表 1）。结果显示：幼叶正面凸包的分布密度约为反面的 2.5 倍，投影面积约为反面凸包的 50%，高度略小于反面凸包的高度；幼叶正、反表面的蜡质晶体层在高度、面积比等特征参数方面未呈现明显差异。

表 1　八宝景天幼叶表面结构参数

Tab.1　Parameters of the surface structures in young leaf of *Hylotelephium erythrostictum*

| 参数类型 | 凸包 | | | | 蜡质晶体层 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 密度 $\rho$/mm$^2$ | 投影面积 $A$/$\mu$m$^2$ | 简化半径 $R$/$\mu$m | 高度 $H$/$\mu$m | 高度 $h$/$\mu$m | 蜡质晶体面积比 $R_{wc}$/% |
| 叶片正面 | 292.6±23.8 | 3 530.79±344.24 | 33.49±1.64 | 9.03±0.23 | 0.978±0.084 | 52.28 ±2.35 |
| 叶片反面 | 115.2±11.2 | 6 579.27±498.20 | 45.73±1.73 | 9.46±0.39 | 1.037±0.105 | 55.13±3.55 |

注：凸包密度与蜡质晶体面积比（蜡质晶体投影面积与表面总面积比值，总面积为蜡质晶体面积与其形成的孔洞面积之和）的测点样本数 $n=8$；凸包面积与简化半径的测点样本数 $n=40$；凸包高度与蜡质晶体层高度的测点样本数 $n=30$。

### 2.3　疏水机理分析

已有研究指出，形貌结构和化学成分是决定材料表面呈现疏水特性的关键因素[16]，绝大多数植物叶片表面覆盖着具有疏水特性的蜡质晶体[17]；水滴在光滑疏水材料表面的接触角难以超过 120°，表面微形貌结构及其产生的粗糙度能够增强材料的疏水特性[18-20]。因此，八宝景天叶片表面由微米级凸包和纳米级蜡质晶体构成的复合微纳形貌结构是使其呈现疏水现象的重要原因。基于 Wenzel 方程和 Cassie-Baxter 方程构建模型分析其疏水机理，即计算分析凸包和蜡质晶体的结构特征参数对接触角的影响规律。

WENZEL 认为非光滑表面的存在使实际固-液接触面积明显大于表观几何接触面积，导致疏水特性的增强，并提出方程用以定量描述表面非光滑因素对接触角的影响规律[21-22]，见式（1）。

$$\cos\theta = f_r \cos\theta_c, \tag{1}$$

式中：$\theta$ 和 $\theta_c$ 分别表示表观接触角（水滴在粗糙表面）和本征接触角（水滴在光滑表面），（°）；$f_r$ 表示实际固-液接触面积与表观几何接触面积（投影面积）的比值，即粗糙度系数。该方程适用的必要条件是固-液之间充分接触而无空气存在，实际上水滴与疏水特性较强的材料接触时，空气通常会被截留在疏水材料表面微形貌结构中并形成固-气-液复合接触界面。因此 CASSIE 和 BAXTER 对 Wenzel 方程进行了修订[23]，并提出新的方程用以分析计算液滴在固-气-液复合接触界面的接触角，见式（2）。

$$\cos\theta = f_{sl}(f_r \cos\theta_c + 1) - 1, \tag{2}$$

式中：$f_{sl}$ 表示液滴实际浸润固体面积与表观几何接触面积的比值。Wenzel 方程和 Cassie-Baxter 方程指出表面微形貌结构是使材料表面呈现较高接触角的关键因素，故可通过分析八宝景天叶片表面由微米级凸包和纳米级蜡质晶体构成的非光滑结构对接触角的影响规律来揭示其疏水机理。

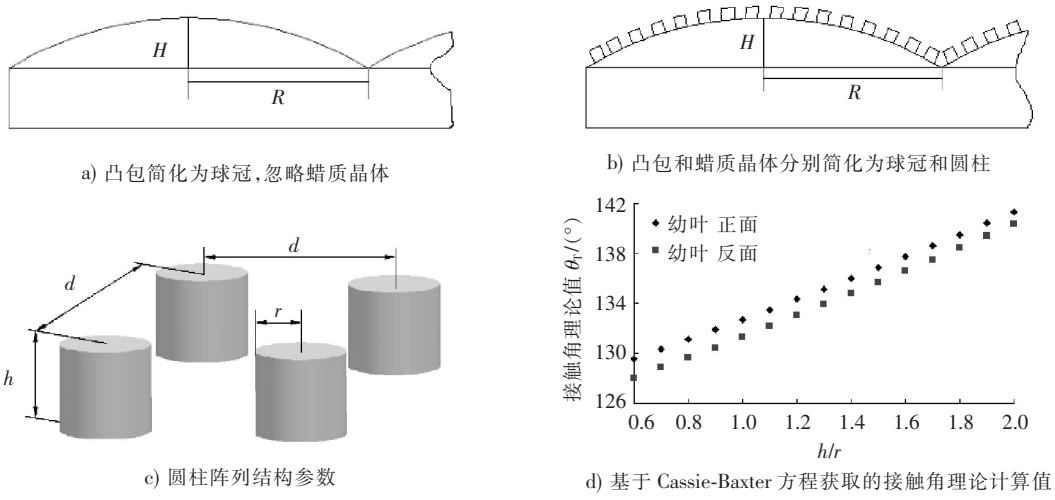
接触角测试过程中，水滴（3～5 $\mu$L）在幼叶表面的接触角为 119.57°～152.54°（见图 3），因此与幼叶表面的接触半径为 0.413～0.922 mm，分别能够覆盖 157.1～781.4（正面）和 61.9～307.6（反面）个凸包。此外，凸包相对较大的高度参数可显著提高叶片表面的非光滑程度，进而对接触角产生明显影响。为定量分析椭球形凸包对接触角的影响规律，基于凸包的结构特征将其简化成连续排列的球冠并忽略蜡质晶体层，构建模型（见图 6 a））；基于 Wenzel 方程推导获取用以描述凸包对水滴在叶片表面接触角影响关系的方程，见式（3）。

$$\cos\theta_T = \left[1 + \left(\frac{H}{R}\right)^2\right]\cos\theta_c, \tag{3}$$

式中：$\theta_T$ 和 $\theta_c$ 分别表示接触角理论计算值和本征接触角，（°）；$R$ 为球冠投影圆半径，球冠投影面积等于椭球形凸包的投影面积，故 $R$ 即为简化半径（见表 1），$\mu$m。研究证实水滴在植物表面光滑蜡质晶体因材料化学成分而产生的本征接触角为 100°[24-25]，故在本文的分析计算中取 $\theta_c=100°$。根据凸包的结构特征参数（见表 1），计算获取幼叶正、反表面对水滴的接触角分别为 100.81°和 100.51°，显著低于测试获取的接触角值（见图

2和图3),表明微米级凸包不是幼叶表面呈现较强疏水特性的主要因素。

幼叶表面覆盖的蜡质晶体层交错排列成网状且具有微纳尺度的结构特征参数,极有可能产生能够截留空气的孔洞,因此基于Cassie-Baxter方程分析凸包和蜡质晶体对幼叶表面疏水特性的影响机理。将凸包和蜡质晶体层分别简化成连续排列的球冠和等间距分布的圆柱体,构建幼叶表面微形貌结构的模型(图6 b)),圆柱体的结构特征参数如图6 c)所示。该模型中,影响表面非光滑程度的是球冠和圆柱体,由其产生的表面积可由式(4)计算取得。




a) 凸包简化为球冠,忽略蜡质晶体　b) 凸包和蜡质晶体分别简化为球冠和圆柱

c) 圆柱阵列结构参数　d) 基于Cassie-Baxter方程获取的接触角理论计算值

图6 八宝景天幼叶表面微形貌结构简化模型与接触角的理论计算值

Fig.6 Simplified model and the theoretical contact angle of the micro-structures in young leaf surfaces of *Hylotelephium erythrostictum*

$$A_r=\pi(R^2+H^2)+2\pi rh\left[\frac{\pi(R^2+H^2)R_{wc}}{\pi r^2}\right], \tag{4}$$

式中:$A_r$ 表示实际表面积,$mm^2$;$r$ 和 $h$ 分别表示圆柱体半径和高,$\mu m$;$R_{wc}$ 表示蜡质晶体投影面积与叶片表面投影面积的比值,即蜡质晶体面积比,%。据此可获取粗糙度系数 $f_r$,其表达式见式(5)。

$$f_r=\frac{A_r}{\pi R^2}=\left[1+\left(\frac{H}{R}\right)^2\right]\cdot\left(1+\frac{2hR_{wc}}{r}\right)。 \tag{5}$$

据此获取用以描述凸包(球冠)和蜡质晶体(圆柱体)对水滴在叶片表面接触角影响关系的方程,见式(6)。

$$\cos\theta_T=f_{sl}\left\{\left[1+\left(\frac{H}{R}\right)^2\right]\left(1+\frac{2hR_{wc}}{r}\right)\cos\theta_c+1\right\}-1, \tag{6}$$

式中:$\theta_T$ 表示接触角的理论值,(°);$\theta_c$ 为本征接触角,(°);$f_{sl}$ 表示液滴实际浸润固体面积与表观几何接触面积的比值,该模型认为水滴只与蜡质晶体上表面接触,故 $f_{sl}$ 等于蜡质晶体面积比,%。

叶片表面微形貌观测显示蜡质晶体呈现片状形貌且交错排列成网状(见图4 h)),难以准确获取其横向结构参数,因此对蜡质晶体简化结构圆柱体的半径参数 $r$ 仅参照其高度信息 $h$ 给出估算值。基于凸包、蜡质晶体的结构特征参数(见表1),计算获取幼叶表面对水滴接触角的理论值(见图6 d))。接触角理论值随着 $h/r$ 的增加而增大,当蜡质晶体半径与高度相等时,接触角理论值分别为132.72°和131.31°,低于新鲜幼叶表面的接触角测试值,但接近于干燥幼叶表面的接触角测试值(见图2、图3);当蜡质晶体高度为半径的2倍时,理论值分别为141.33°和140.39°,接近于新鲜幼叶表面对水滴接触角的测试值;当蜡质晶体高度为半径的2.9倍时,理论值分别为150.80°和150.40°,均呈现超疏水特性。因此,基于景天叶片表面微形貌结构仿生制备超疏水表面时,应最大限度地提高蜡质晶体的高度与半径比值,以使材料表面呈现较佳的超疏水特性。理论分析结果预示微米级凸包和纳米级蜡质晶体的协同作用使八宝景天叶片表面对水滴产生较大接触角,

但蜡质晶体发挥关键作用；基于 Cassie-Baxter 方程构建的模型可阐释叶片表面呈现较强疏水特性的机理，所构建的模型具备有效性并可为超疏水表面的仿生制备提供理论基础。

## 3　结　语

基于探寻超疏水表面仿生制备原型的目的，测试了八宝景天（*Hylotelephium erythrostictum*）叶片表面的润湿性，对叶片表面微形貌结构进行观测并提取特征参数，通过构建模型分析、阐释了叶片表面的疏水机理。不同类型叶片表面呈现显著差异的疏水特性，新鲜幼叶正、反表面的接触角分别为（147.25 ± 3.79）°和（137.46 ± 4.03）°，其中反面的接触角高达 152.54°，表明新鲜幼叶反面具有超疏水特性。叶片表面由微米级凸包和纳米级蜡质晶体构成，凸包排列连续致密且呈椭球形，蜡质晶体交错排列成网状且形貌不规则但可辨别轮廓，不同类型叶片表面的凸包形貌呈现明显差异但蜡质晶体形貌未有明显区别；幼叶正、反表面凸包的高度极其相似但具有显著不同的分布密度和投影面积，蜡质晶体层的高度和面积比未呈现明显差异。理论分析结果显示，微米级凸包和纳米级蜡质晶体的协同作用使叶片表面呈现疏水特性，但蜡质晶体发挥关键作用。基于 Cassie-Baxter 方程构建的模型与获取的数学方程能够分析阐释叶片表面的疏水机理，结果显示当蜡质晶体高度与半径的比值高于 2.9 时可使仿生制备的材料表面呈现超疏水特性（接触角＞150°），这为超疏水表面的仿生制备提供了理论基础。

**参考文献/References：**


[1] XIA Fan, JIANG Lei. Bio-inspired, smart, multiscale interfacial materials[J]. Advanced Materials, 2008, 20(15): 2842-2858.

[2] 孙艳红，杨晓东，杨卓娟，等. 典型状态下荷叶润湿性差异及其机理分析[J]. 农业工程学报，2014，30(13)：263-267.
SUN Yanhong, YANG Xiaodong, YANG Zhuojuan, et al. Difference in wettability of lotus leaves in typical states and its mechanism analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13): 263-267.

[3] LATTHE S, TERASHIMA C, NAKATA K, et al. Superhydrophobic surfaces developed by mimicking hierarchical surface morphology of lotus leaf[J]. Molecules, 2014, 19(4): 4256-4283.

[4] 杨成娟，李媛，梅雪松，等. 纳秒激光制备钛表面纹理结构及其润湿性研究[J]. 河北科技大学学报，2016，37(4)：315-321.
YANG Chengjuan, LI Yuan, MEI Xuesong, et al. Study on the fabrication of titanium surface texture by nanosecond laser and its wettability[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(4): 315-321.

[5] 柯清平，李广录，郝天歌，等. 超疏水模型及其机理[J]. 化学进展，2012，22(2/3)：284-290.
KE Qingping, LI Guanglu, HAO Tiange, et al. Superhydrophobicity: Theoretical models and mechanism[J]. Progress in Chemistry, 2012, 22(2/3): 284-290.

[6] 梁伟欣，张亚斌，王奔，等. 仿生超疏水性表面的生物应用[J]. 化学学报，2012，70(23)：2393-2403.
LIANG Weixin, ZHANG Yabin, WANG Ben, et al. Biological applications of biomimetic superhydrophobic surfaces[J]. Acta Chimica Sinica, 2012, 70(23): 2393-2403.

[7] 任露泉，王淑杰，周长海，等. 典型植物非光滑疏水表面的理想模型[J]. 吉林大学学报(工学版)，2006，36(sup2)：97-102.
REN Luquan, WANG Shujie, ZHOU Changhai, et al. Ideal models of the non-smooth hydrophobic surface of typical plants[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(sup2): 97-102.

[8] 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 Yuchen, LIU Kesong, JIANG Lei. Peanut leaves with high adhesive superhydrophobicity and their biomimetic materials[J]. Scientia Sinica Chimica, 2011, 41(2): 403-408.

[9] 张洪敏，汪涛，鱼银虎，等. 类蝴蝶翅膀表面微纳结构的制备及其疏水性[J]. 中国表面工程，2014，27(5)：131-136.
ZHANG Hongmin, WANG Tao, YU Yinhu, et al. Preparation and hydrophobic properties of the micro-nano structure of butterfly wing surface[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 131-136.

[10] YAO Xi, SONG Yanlin, JIANG Lei. Applications of bio-inspired special wettable surfaces[J]. Advanced Materials, 2011, 23(6): 719-734.

[11] 陈钰，徐建生，郭志光. 仿生超疏水性表面的最新应用研究[J]. 化学进展，2012，24(5)：696-708.
CHEN Yu, XU Jiansheng, GUO Zhiguang. Recent advances in application of biomimetic superhydrophobic surfaces[J]. Progress in Chemistry, 2012, 24(5): 696-708.

[12] GORB E, HASS K, HENRICH A, et al. Composite structure of the crystalline epicuticular wax layer of the slippery zone in the pitchers of the carnivorous plant Nepenthes alata and its effect on insect attachment[J]. The Journal of experimental biology, 2005, 208(24): 4651-4662.

[13] 王立新,黄风山,周强. 致灾农业昆虫捕集滑板表面结构仿生构建与性能验证[J]. 农业工程学报,2015,31(20):34-40.
WANG Lixin, HUANG Fengshan, ZHOU Qiang. Surface structure biomimetic design and performance testing of slippery trapping plate used for controlling agricultural insect[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 34-40.
[14] WANG Lixin, ZHOU Qiang. Surface hydrophobicity of slippery zones in the pitchers of two Nepenthes species and a hybrid[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19907.
[15] WANG Lixin, DONG Shiyun, ZHOU Qiang. Slippery surface of nepenthes alata pitcher: The role of lunate cell and wax crystal in restricting attachment ability of ant Camponotus japonicus Mayr[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(3): 373-387.
[16] BLOSSEY R. Self-cleaning surfaces-virtual realities[J]. Nature Materials, 2003,2(5): 301-306.
[17] KOCH K,DOMMISSE A, BARTHLOTT W. Chemistry and crystal growth of plant wax tubules of lotus (*Nelumbonucifera*) and nasturtium (*Tropaeolum majus*) leaves on technical substrates[J]. Crystal Growth Design, 2006,6(11): 2571-2578.
[18] NEELESH A. Mimicking the lotus effect: Influence of double roughness structures and slender pillars[J]. Langmuir,2004, 20(19): 8209-8213.
[19] KOCH K, BLECHER I, BARTHLOTT W, et al. The superhydrophilic and superoleophilic leaf surface of ruellia devosiana: A biological model for spreading of water and oil on surfaces[J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(4): 339-350.
[20] KOCH K, BENNEMANN M, BOHN H, et al. Surface microstructures of daisy florets (Asteraceae) and characterization of their anisotropic wetting[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 8(3): 036005.
[21] WENZEL R. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1936,28(8):988-994.
[22] WENZEL R. Surface roughness and contact angle[J]. Journal of Physical & Colloid Chemistry,1949,53(9):1466-1467.
[23] CASSIE A,BAXTER S.Wettability of porous surface[J].Transactions of the Faraday society,1944,40(6):546-551.
[24] WANG Jiadao, CHEN Haosheng, SUI Tao, et al. Investigation on hydrophobicity of lotus leaf: Experiment and theory[J]. Plant Science, 2009, 176(5): 687-695.
[25] BARTHLOTT W, MAILL M, BHUSHAN B, et al. Plant surfaces: Structures and functions for biomimetic innovations[J]. Nano-Micro Letters, 2017, 9(2): 23-38.

# 向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文11篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此,本编辑部特向这些专家表示敬意,对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

边义祥　陈国炜　崔海亭　弓爱君　顾承志　管俊芳
胡洪平　李　昂　李　争　梁光义　龙江启　卢志明
罗　晓　司友斌　王庆红　翁　灿　吴　坤　许金霞
许育新　闫喜龙　张彦萍　赵美蓉

(本刊编辑部)