

# 工程仿生领域猪笼草叶笼研究现状及发展趋势

王立新, 李山山

(河北科技大学机械工程学院, 石家庄 050018)

**摘要:** 猪笼草叶笼能够捕集昆虫并将其消化成生长所需营养元素, 依据宏/微观形貌结构差异可划分为盖子、口缘、滑移区与消化区等区域。口缘密布楔形盲孔的辐射状沟脊结构可使液膜产生定向移动, 滑移区形貌结构呈现抑制昆虫附着、低黏附超疏水等特性, 受到学者普遍关注并逐步成为研究热点。本文从口缘与滑移区在工程仿生领域的研究现状入手, 介绍其形貌结构特征与功能特性, 重点关注以其为仿生原型制备液膜定向传输、昆虫滑移捕集、超疏水等功能表面的研究进展, 并对未来需要关注的研究方面进行分析。该综述能加深对叶笼形貌结构与功能特性的认识, 还可为功能表面仿生研制提供新思路。

**关键词:** 工程仿生学; 猪笼草叶笼; 口缘; 滑移区; 超疏水表面; 定向传输

**中图分类号:** TB17      **文献标志码:** A      **文章编号:**

## Research progress and development prospect of *Nepenthes* pitcher in engineering bionics field

WANG Lixin, LI Shanshan

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

**Abstract:** *Nepenthes* pitcher has evolved particular structures to effectively capture and digest insects to obtain sufficient growing nutrients. The pitcher can be typically distinguished by several parts depending on its difference in macro-morphology and micro-structure, including lid, peristome, slippery zone and digestive zone. The peristome consists of radial ridges, making liquid film generate a continuously unidirectional transport. The slippery zone contains structures with micro-nano scale parameters, presenting the properties of anti-attachment and superhydrophobicity. The structures and properties of the pitcher have attracted numerous studies and become the hot topic. In this review, based on the research progress of peristome and slippery zone in the engineering bionics field, we introduced their morphological structures and functional properties. Especially, we focused on the progress of the bionic fabrication of functional surfaces used in liquid film unidirectional transport, insect slippery trapping and superhydrophobicity, and highlighted several aspects should be paid attention to in near future. This review enriches the understanding of structures and properties of *Nepenthes* pitcher, also provides the bionic ideas for fabricating functional surfaces.

**Keywords:** engineering bionics; *Nepenthes* pitcher; peristome; slippery zone; superhydrophobicity surface; unidirectional transport

食虫性植物猪笼草 (*Nepenthes*) 大多生存于土壤贫瘠地区, 依靠位于叶片末端的叶笼 (pitcher) 捕集昆虫并将其消化成生长所需的营养元素<sup>[1-3]</sup>。基于显著不同的宏/微观形貌结构及功能特性, 叶笼可划分为盖子、口缘、滑移区和消化区等部分 (图 1)。穹幕状盖子能够保护叶笼内部免遭雨水、灰尘等污染物的侵染, 还可抑制叶笼底部消化液蒸发<sup>[4]</sup>; 近期研究发现盖子可充当弹弩, 在雨滴的激发下产生扭杆弹簧式振动, 致使昆虫弹落至叶笼底部<sup>[5]</sup>。口缘由朝向叶笼内部延伸的辐射状沟脊构成并密布盲孔状蜜腺, 呈现各向异性和湿滑特征, 能够吸引蚂蚁、苍蝇等昆虫并促其滑移至叶笼内部<sup>[6-8]</sup>。滑移区覆盖着由微米级骨体和纳米级蜡质晶体组成的微纳复合结构, 能够有效抑制昆虫附着功能并呈现低黏附超疏水特性<sup>[9-10]</sup>。消化区密布能够分泌蛋白酶、几丁质酶、有机酸等物质的消化腺, 可将捕获昆虫消化成氮磷等生长所需的营养元素并可传输至根部<sup>[11]</sup>。

叶笼因其独特的形貌结构与捕食昆虫功能受到学者普遍关注, 主要集中在形貌结构表征、捕食昆虫效率、抑制昆虫附着机理、功能表面仿生研制等方面。随着哈佛大学 Aizenberg 在 *Nature* 发文宣布以滑移区蜡质晶

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-21; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 河北省高等学校青年拔尖人才资助项目 (BJ20170111); 国家自然科学基金 (51205107)

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研究。

E-mail: wanglx@hebestu.edu.cn

体为仿生原型成功制备润滑油注入式微孔结构超滑表面<sup>[12]</sup>，以及北京航空航天大学陈华伟团队在 *Nature* 发文揭示口缘的液膜定向搬运机制<sup>[13]</sup>，叶笼逐步成为工程仿生领域的研究热点。本文评述猪笼草叶笼的口缘与滑移区在工程仿生领域的研究进展，重点关注以其为仿生原型制备液膜定向传输、昆虫滑移捕集、超疏水等功能表面的研究，并对后续研究需要关注的方面进行分析。



图1 猪笼草叶笼结构

Fig. 1 The structures of *Nepenthes alata* pitcher

## 1 口缘结构功能特性与仿生应用

### 1.1 口缘形貌结构与功能特性

口缘具有瓶口状宏观形貌，表层覆盖着湿滑膜状物质并呈现亮丽颜色（图 2a）<sup>[6]</sup>。显微状态下，口缘表面呈现延伸至叶笼内部的辐射状沟脊结构（图 2b）），并密布楔形盲孔阵列（图 2c））。临近滑移区的沟脊内边缘底部分布齿形结构，齿形结构上侧呈现微米尺度的蜜孔（图 2d））。归因于口缘表面的微米级辐射状沟脊结构及其产生的毛细作用，蜜孔分泌的花蜜状物质可由口缘内部延展到外侧并形成湿滑膜层，致使被花蜜吸引的蝴蝶、蚂蚁、苍蝇等昆虫滑落至叶笼底部<sup>[7, 14]</sup>。测试结果显示口缘具有较小水滴接触角（ $40^\circ$ ）与较高表面自由能（ $60 \text{ mN/m}$ ），预示具有亲水特性，从而保障口缘能够长久维持湿滑特征<sup>[15]</sup>。

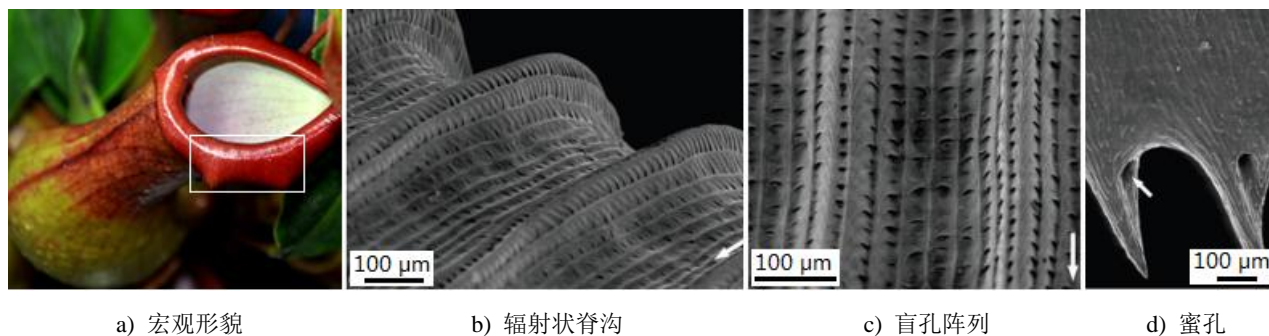


图2 口缘宏观形貌和微结构（箭头指向叶笼底部）

Fig. 2 The macro-morphology and micro-structures of peristome

口缘研究已由过去的形貌结构表征、物化特性测试、滑移捕集昆虫机理等扩展到现在的液膜定向传输机制、仿生模型构建与功能表面研制。近期，北京航空航天大学陈华伟团队在 *Nature* 发文报道了液膜在口缘区域的定向传输现象，即水滴能够沿着口缘表面的辐射状沟脊结构从底部传输至顶部，最终延展成覆盖整个脊沟结构的液膜，以此保障口缘区域的持久湿滑特性。这是因为辐射状沟脊结构密布的楔形盲孔阵列产生梯度泰勒毛细升与闭口梯度泰勒毛细升，使得水滴能够连续正向填充楔形盲孔，而在相反方向上楔形盲孔的拱形轮廓可有效阻碍水滴传输<sup>[13]</sup>。该项研究不仅发现了植物表面液膜无动力定向连续搬运现象，还揭示了微纳结构与界面材料特性对液膜无动力定向传输的影响机制，为液膜无动力定向传输功能表面的仿生研制奠定重要

理论基础。

## 1.2 以口缘为仿生原型研制功能表面

辐射状沟脊结构及液膜定向传输特性使口缘成为绝佳的仿生原型，用以研制可控微流体、药物输送、无动力农业灌溉、机械自润滑等应用于工程领域的液膜定向传输功能表面，相关研究已得到开展。北京航空航天大学陈华伟团队基于口缘微纳尺度的沟脊结构，采用紫外光刻技术在 SU-8 型环氧树脂基体表面制得由具有锐角边缘和弧形轮廓的凹坑阵列构成的沟槽结构；功效测试证实凹坑的锐角边缘和弧形轮廓对液膜定向传输发挥关键作用，仿生制备的功能表面能够实现液膜迅速、远距离及无动力定向传输<sup>[16]</sup>。虽已研制具有润湿梯度和非对称微纳结构的功能表面实现液膜无动力定向传输，但仍存在液滴种类受限、传输速度低等限制其实际应用的问题。因此，该团队将热敏性高分子材料聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAAm) 嫁接到由聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 制得的口缘表面，从而仿生制得可实现水滴定向传输的温控功能表面；测试结果表明水滴的定向传输可通过动态操控功能表面温度实现，并呈现显著的定向传输可逆性和稳定性<sup>[17]</sup>。采用立体光刻技术制备的功能表面能够提高定向传输液滴的表面张力和黏度，极大拓宽了以口缘为仿生原型制备功能表面在微流体器具、油水分离、生物毒性测试等方面的应用范围<sup>[18-19]</sup>。

以口缘为仿生原型研制液膜定向传输功能表面，缘于口缘微纳多尺度结构因具有锐角边缘和楔形轮廓而可使液滴产生钉扎效应 (pinning effect) 泰勒毛细升作用<sup>[20]</sup>。从研究现状来看，具有液膜定向传输特性的功能表面研制处于起步阶段，后续研究需要结合激光微纳加工技术在金属基材表面制备口缘形貌结构，以将液膜无动力定向传输功能表面的应用范围扩展至机械工程领域。

## 2 滑移区结构功能特性与仿生应用

### 2.1 滑移区形貌结构特征

滑移区位于口缘下部，表面覆盖末端朝向叶笼内部弯曲的月骨体，以及形状不规则、排列致密、杂乱无序的蜡质晶体层 (图 3a)。每个月骨体对应着增大交叠的细胞体，形成具有不对称凸面的表层轮廓 (图 3b)，致使滑移区形貌结构呈现显著的各向异性。蜡质晶体层由形状不规则但可辨别轮廓的片状物构成，近乎垂直排列于滑移区基体且紧密交错成网状，因此产生轮廓不规则的孔洞 (图 3c)。蜡质晶体层又可分为形貌结构显著不同的顶层和底层，顶层蜡质晶体排列较为疏松且呈现相对较大的形貌结构。滑移区的这种形貌结构未随猪笼草种属的不同而呈现显著差异<sup>[21-23]</sup>。

滑移区形貌结构纵向扫描显示，月骨体上侧高度变化缓慢而产生“缓坡”结构，下侧高度变化剧烈而形成“悬崖”结构 (图 4a-c)<sup>[10]</sup>；蜡质晶体表面相对较为光滑，仅呈现微米级高度变化 (图 4d-f)。蜡质晶体层厚度约为 3 μm，顶层蜡质晶体通过直径约为 0.5 μm 细杆与底层蜡质晶体连接<sup>[24]</sup>。学者观测了四种猪笼草滑移区的表面结构，发现月骨体具有~10 μm 级的三维结构参数，而蜡质晶体具有微-纳米级的三维结构参数，月骨体的形貌结构特征致使滑移区表面呈现较大粗糙度 ( $Ra=1.84-3.45 \mu m$ )；不同种属猪笼草的滑移区结构特征参数存在差别，不仅导致表面粗糙度的不同，还使昆虫附着功能抑制效果呈现差异<sup>[25-26]</sup>。滑移区表面的多尺度复合结构能够抑制昆虫附着功能，在限制捕获昆虫从叶笼内部逃脱过程中发挥重要作用。学者对于滑移区研究，由过去的形貌结构特征、昆虫附着功能抑制机理、昆虫捕集滑板仿生制备等方面，转变成现阶段各向异性超疏水机理、超疏水表面仿生研制等方面。

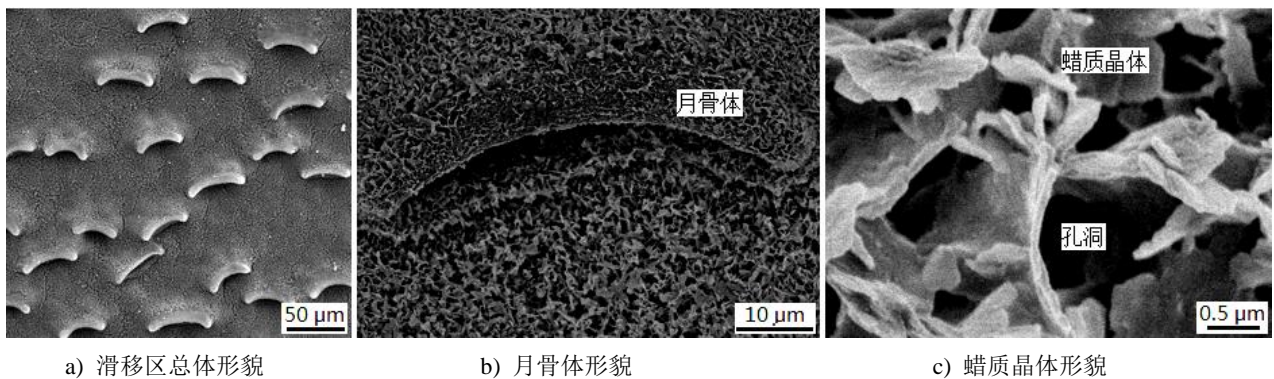


图 3 滑移区形貌结构

Fig.3 Morphology and structures of the slippery zone



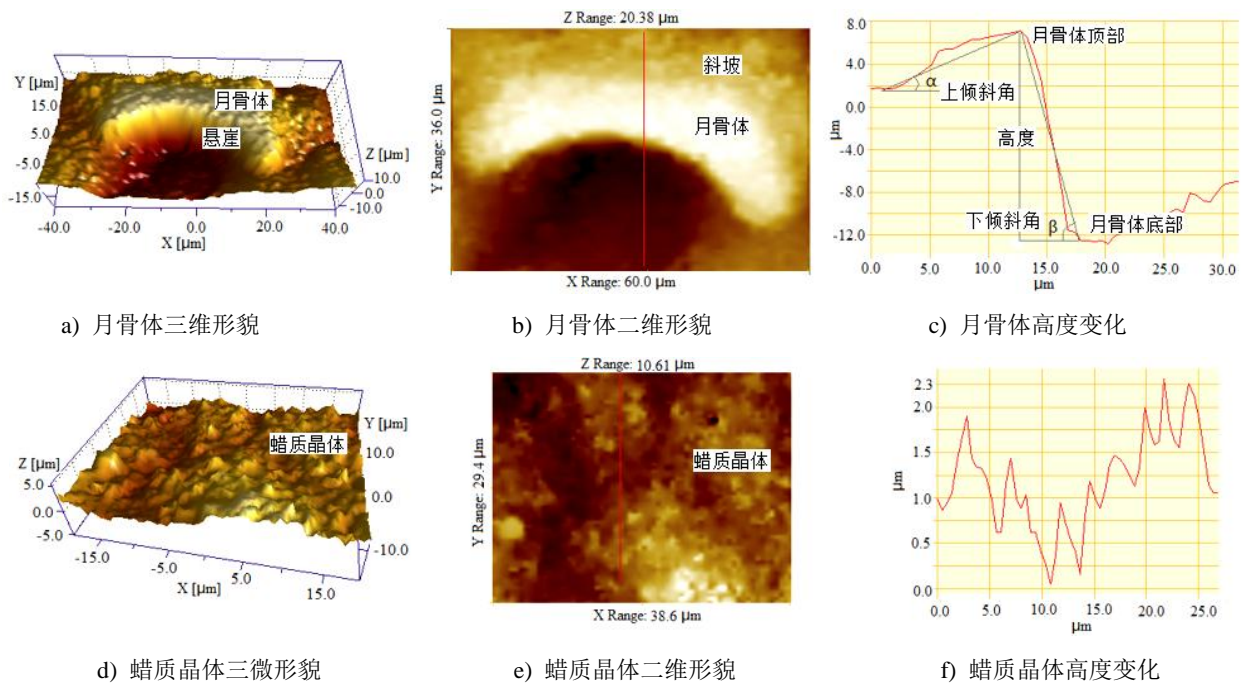


图4 滑移区形貌结构的三维扫描

Fig. 4 3D scanning of the morphology structures in slippery zone.

## 2.2 滑移区反附着机理与昆虫捕集滑板仿生研制

滑移区在工程仿生领域的应用首先体现在其能有效抑制昆虫附着功能,学者基于该背景开展滑移区形貌结构对昆虫附着功能影响规律研究,试图揭示滑移区减附机理,为致灾农业昆虫捕集滑板研制提供仿生原理。通过自然进化,昆虫附着系统形成了爪、爪垫结构,用以在接触面上稳固停留或自由行走<sup>[27-28]</sup>。接触面粗糙度较大时,依靠具有尖硬末端的爪形成机械锁合;接触面粗糙度较小时,依靠具有柔软易变形表皮或刚毛的爪垫获取足够接触面积,以此产生附着力供爬行或附着需要<sup>[29-31]</sup>。滑移区对昆虫附着功能的有效抑制是通过蜡质晶体、月骨体对爪、爪垫的限制实现,学者对此开展了广泛研究。

Gaume 观察了苍蝇在滑移区的附着行为,其不能在滑移区表面行走或起飞,这源于蜡质晶体能够沾染爪垫,以及月骨体在朝向叶笼顶部方向上可有效限制爪形成机械锁合,从而导致附着功能显著降低<sup>[32]</sup>。滑移区对甲虫附着功能的显著抑制是通过 2 种机理实现,即顶层蜡质晶体污染爪垫,导致黏附作用急剧降低;底层蜡质晶体减少爪垫附着面积,进一步降低附着功能<sup>[21]</sup>。对于体重较轻昆虫,滑移区蜡质晶体具有足够机械强度以能经受住该类昆虫所施加的侧向力,蜡质晶体表面合适的粗糙度能有效抑制附着功能<sup>[24]</sup>。蝗虫在 4 种猪笼草滑移区的摩擦力测试结果证实滑移区能够显著抑制蝗虫附着功能,这源于蜡质晶体对爪垫的沾染,以及月骨体形貌结构特征能够降低爪垫的附着面积;附着功能抑制程度随猪笼草种属的不同而存在差异,指出月骨体与蜡质晶体的结构参数差异是造成抑制程度存在差异的主要原因<sup>[25-26]</sup>。东南大学王玉娟团队研究发现滑移区片状蜡质晶体具有较好的力学稳定性,不会导致昆虫附着系统污染,其表面粗糙度能够降低昆虫附着系统的接触面积,从而降低用以产生有效附着行为的粘附力和摩擦力<sup>[33-34]</sup>。虽未有定论揭示滑移区减附机理,但其对昆虫附着功能的抑制是不争的事实,这为致灾农业昆虫捕集滑板的仿生研制奠定了良好基础。

随着研究深入,滑移区因月骨体导致的结构各向异性及对昆虫附着行为的影响机理吸引了学者关注。上世纪初期,学者最初假定由具有末端低垂形貌的月骨体招致的滑移区结构各向异性可显著影响昆虫附着行为,即昆虫爪能够抓取倒置的滑移区表面结构,但试验未能呈现所期望的现象<sup>[35-36]</sup>。后续行为试验证实了上述假说,自然生长状态放置的滑移区可有效阻止昆虫抓取,而倒置的滑移区可提供稳固结构用于昆虫抓取,预示月骨体能够显著影响昆虫附着<sup>[4,32]</sup>。进一步研究发现,月骨体依据其末端低垂的形貌结构使滑移区呈现显著的各向异性,甲虫在自然生长状态放置的滑移区表面较易产生滑移行为,而在倒置的滑移区表面则产生较强的附着行为<sup>[37]</sup>。近期研究证实,滑移区因月骨体产生的各向异性能够显著影响蚂蚁在其表面的爬行行为和摩擦力<sup>[38]</sup>。笔者所在研究团队开展了滑移区反附着机理的系统研究,源于爬行行为观察、摩擦力测试、形貌结构表征、力学模型分析等方面的数据显示,滑移区月骨体依靠二重斜坡结构显著影响昆虫附着系统的附

着功能，表现为朝向叶笼顶部方向能有效限制昆虫附着系统的爪形成机械锁合，而在朝向叶笼底部方向能增强昆虫附着系统的爪形成机械锁合；基于研究结果，对滑移区反附着机理进行了阐释：滑移区主要依靠具有二重斜坡形貌结构的月骨体有效限制昆虫爪形成机械锁合，从而显著抑制昆虫附着功能，而蜡质晶体在抑制昆虫附着功能过程中仅起到辅助作用<sup>[10]</sup>。对滑移区形貌结构特征、反附着机理的详细研究，为以滑移区为仿生原型研制致灾农业昆虫捕集滑板提供了重要理论基础，相应研究已得到开展并已取得初步成效。

蝗虫、飞蛾等绝大多数致灾农业昆虫依靠其视觉器官的感光细胞对不同波谱或频率的光刺激作出反应，在宏观上表现出对光源的趋向行为。飞蛾趋光已是不争的事实，对于蝗虫趋光行为的研究也已开展。蝗虫趋光行为受到光源波谱与强度影响，特定强度的蓝紫 LED 灯组合光源可使蝗虫表现出较为明显的趋光反应<sup>[39]</sup>；特定频率的频闪光源也会显著增强蝗虫的趋光响应<sup>[40]</sup>，耦合振动、干扰等机械刺激的可见光源不仅能够提高蝗虫的运动敏感性，还会增强蝗虫对刺激光源的趋向运动速度<sup>[41-42]</sup>。对光源的趋向特性为飞蛾、蝗虫等致灾农业昆虫的光电诱导滑移捕集治理奠定了理论可行性。源于自然进化的结果，昆虫附着系统形成具有尖硬末端的爪和柔软表皮/刚毛结构的爪垫，能够产生机械锁合与柔性接触以用于在接触面稳固附着和自由行走<sup>[27,43]</sup>。研制具有特殊表面结构的捕集滑板，高效抑制昆虫附着系统形成的机械锁合与柔性接触，可实现致灾农业昆虫的光电诱导滑移捕集治理。基于该研究背景，学者开展了以滑移区为仿生原型研制致灾农业昆虫捕集滑板的研究。

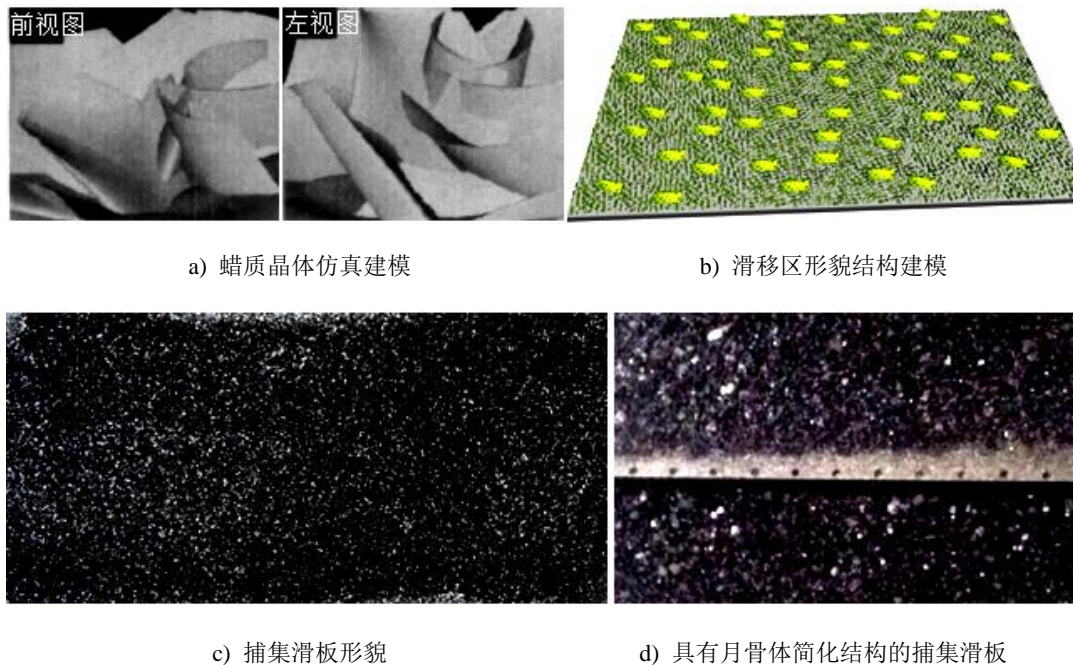


图 5 致灾农业昆虫捕集滑板仿生设计与制备

Fig. 5 Bionic design and fabrication of the agricultural insects slippery trapping plate

中国农业大学周强团队基于为捕集滑板构建仿生模型的研究目标，在表征滑移区蜡质晶体结构特征基础上，采用计算机图形技术和 OpenGL 工作平台构建了蜡质晶体微形貌结构的仿真模型（图 5a）），为捕集滑板仿生模型构建奠定了设计方面的理论基础<sup>[44]</sup>。为在仿生模型中构建月骨体，采用 3DMax 软件设计了滑移区形貌结构（图 5b）），为捕集滑板研制提供了可参考的设计方法<sup>[45]</sup>。基于构建的仿生模型，以鳞片状可膨化石墨作为蜡质晶体的替代物，采用高压静电吸附技术将石墨吸附于基板粘合剂表面，从而制得蝗虫捕集滑板（图 5c））；功效测试结果显示，蝗虫在捕集滑板与滑移区的附着力之比是 0.94-1.05，仿生制备捕集滑板以 32° 倾斜角安装于光电诱导蝗虫滑移捕集机时，对诱集蝗虫的滑移率可达 82.4%，预示达到了较好的仿生效果<sup>[46]</sup>。为扩大仿生捕集滑板的使用范围，考虑月骨体和蜡质晶体对蝗虫、飞蛾、蚂蚁等致灾农业昆虫附着功能协同抑制前提下，在仿生模型中构建了月骨体的简化结构并保留了其二重斜坡的倾斜角（23° 和 76°），采用激光微纳加工技术在金属基材表面制备捕集滑板基层，利用高压静电吸附技术将微米级鳞片状石墨吸附于基层，以此制得致灾农业昆虫捕集滑板（图 5d））；测试结果显示蝗虫在捕集滑板的附着力约为其在滑移区的 1.11 倍，表明仿生制备的致灾农业昆虫捕集滑板对昆虫附着功能具有较好抑制效果<sup>[47]</sup>。以滑移区表面结构为仿生原型研制致灾农业昆虫捕集滑板已开展，但后续工作需要关注如何提高仿生模型构建精度，以使制



备捕集滑板的形貌结构更接近仿生原型并具备功效的持久性，以扩大致灾农业昆虫捕集滑板使用范围。

### 2.3 滑移区超疏水机理与超疏水表面仿生研制

超疏水表面是指水滴接触角大于  $150^\circ$  且滚动角小于  $10^\circ$  的材料表面，在自清洁、防腐蚀、抑冰、海洋防污及船舰减阻等工程领域具有重要应用前景<sup>[48-51]</sup>。目前超疏水表面存在因微形貌结构易遭破坏而导致功效耐久性低、制备工艺复杂及成本高等问题<sup>[52-53]</sup>，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，据此形成超疏水表面研制的新思路可为主要难点的解决提供契机<sup>[54-55]</sup>。猪笼草叶笼在捕食昆虫过程中难免遭受粉尘、翅膀鳞片等污染物的污染，维持滑移区较高洁净度对稳定持久发挥反附着功能极其重要。实际上，宏观形貌下的滑移区呈现较为洁净的景象（图 2a）），表明滑移区具有低黏附超疏水现象。滑移区超疏水现象预示其可以作为仿生原型用于超疏水表面仿生研制，学者已开展滑移区润湿行为、超疏水机理等方面的研究。

Gorb 测试了水、二碘甲烷和乙二醇等极性/非极性液滴在红瓶猪笼草滑移区的润湿行为，接触角分别为  $160^\circ$ 、 $130^\circ$  和  $135^\circ$ ；表面自由能为  $4\text{mN/m}$ ，预示具有较强超疏水特性<sup>[15]</sup>。北京航空航天大学张德远团队研究指出，滑移区由月骨体和蜡质晶体组成的微纳复合结构决定了其超疏水特性，其中蜡质晶体发挥主要作用<sup>[56]</sup>；滑移区在朝向叶笼内部方向的水滴滚动角为  $3^\circ$ ，表明滑移区具有低黏附超疏水特性<sup>[38]</sup>。笔者所在团队在研究滑移区反附着机理与仿生研制致灾农业昆虫捕集滑板的基础上，开展了滑移区润湿行为研究。红瓶 (*N. alata*)、米兰达 (*N. miranda*)、印度 (*N. khasiana*) 等 3 种猪笼草滑移区对水滴的接触角介于  $128-156^\circ$ ；基于月骨体、蜡质晶体的结构特征，采用 Cassie-Baxter 模型分析了形貌结构对接触角的影响规律，指出不同种属猪笼草滑移区的接触角存在差异是源于结构参数不同而导致液-固接触面积的不同<sup>[57]</sup>。上述对滑移区润湿特性研究，并未构建模型量化阐述形貌结构特征对滚动角的影响规律，亦未涉及超疏水机理分析揭示。

各向异性超疏水表面因能在不同方向上呈现显著差异的润湿行为而在沙漠集水、生物医学、微流体器具等方面有着巨大应用潜力<sup>[58-60]</sup>。月骨体末端朝向叶笼内部弯曲的形貌结构致使滑移区表面呈现各向异性，显著影响昆虫附着行为的同时对液滴润湿行为也产生明显影响。测试结果显示朝向叶笼底部方向的水滴滚动角为  $3^\circ$ ，而在相反方向的则为  $10^\circ$ <sup>[38]</sup>。滑移区各向异性超疏水现象为各向异性超疏水表面研制提供了潜在的仿生原型，后续研究需要关注滑移区形貌结构特征对滚动角的影响规律，以此阐明各向异性超疏水机理，为各向异性超疏水表面研制奠定理论基础。

现阶段，以滑移区为仿生原型研制超疏水表面已得到开展，主要采用制备微孔结构并注入润滑液的仿生研制思路。哈佛大学 Aizenberg 首先提出低表面能润滑液注入式微孔结构超滑表面 (Slippery Liquid-Infused Porous Surface)，以特氟隆 (Teflon) 为原材料在基体表面制得蜡质晶体微纳孔状结构，并以氟化液 FC-70 作为填充微纳孔状结构的润滑液，制得超疏水表面 (图 6)；测试结果显示该表面对水、油的滚动角为  $3^\circ$  和  $5^\circ$ ，接触角滞后小于  $2.5^\circ$ ，呈现较强的疏水/油及抑霜/冰特性、压力稳定性 (抗  $675\text{ atm}$ ) 和自修复能力<sup>[12,61]</sup>。中科院兰州化物所张俊平采用氟硅酮纳米丝在载玻片表面制备微纳孔状结构并以全氟聚醚润滑液填充，以此制得超疏水表面，其对多种液滴均表现出超低的滚动角，并具有优异的稳定性和透明度<sup>[62]</sup>。浙江大学谷长栋在镁铝合金表面构筑了双层疏水抑冰抗腐蚀结构，底层为与基体致密牢固结合的层状双金属氢氧化物，表层为多孔纳米片状结构并填充润滑液，该仿生超疏水表面赋予镁铝合金优异持久的疏水抑冰抗腐蚀功能<sup>[63]</sup>。对于润滑液注入微孔结构式超疏水表面，润滑液能够改变液滴接触状态，由在传统超疏水表面的液-固 (Wenzel 模型)、液-气-固 (Cassie-Baxter 模型) 接触转变为液-润滑液-固接触。注入微纳结构的低表面能润滑液，在毛细作用下迅速蔓延成均匀膜层，替代微纳结构内部的空气层，致使液滴形成稳固浸润状态并呈现较高接触角<sup>[55,64]</sup>。现有研究为超疏水表面仿生研制提供了新的技术基础。

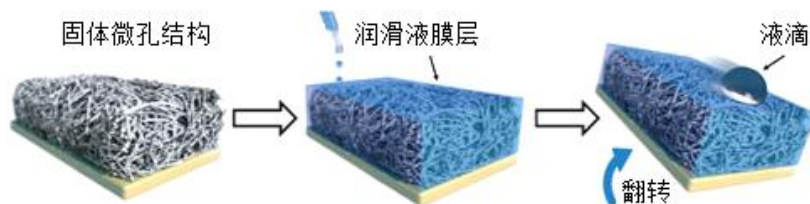


图 6 润滑液注入式超疏水表面 Fig. 6 Lubricant-infused superhydrophobic surface

现阶段，多采用激光微纳加工、刻蚀、喷砂-电刷镀等方法在金属基材表面制备微纳复合结构，再以电化学沉积法修饰氟碳硅烷、十二烷硫醇、硬脂酸等低表面能物质，以此赋予金属基材表面超疏水、油水分离、

抗腐蚀等特性<sup>[65-69]</sup>。金属基材超疏水表面制备过程涉及的电化学沉积，提高了制备工艺的复杂程度并产生了环境污染。因此，金属基材表面制备滑移区（仿生原型）微纳复合结构，结合润滑液注入式超疏水表面制备的理论基础，形成金属基材超疏水/各向异性超疏水表面研制的新途径和新理论，将会是超疏水表面仿生制备的研究趋势之一。

### 3 结语

源于自然选择，猪笼草叶笼已进化成与生存环境相匹配的形貌结构并呈现奇特功能。叶笼口缘因具有密布楔形盲孔阵列的辐射状沟脊结构而呈现液膜定向传输功能，在宏观上表现为能将沟脊结构内边缘底部蜜腺分泌的花蜜定向传输至外边缘顶部，形成均匀分布于口缘结构的花蜜膜层，使口缘保持持久湿滑特性。据此学者仿生研制了用于可控微流体、药物输送、无动力农业灌溉、机械自润滑等工程领域的液膜定向传输功能表面。基于激光微纳加工技术在金属基材表面制备口缘形貌结构，把液膜无动力定向传输功能表面的应用范围扩展至机械工程领域，将会是该方面后续研究的发展趋势。叶笼滑移区具有由微米级骨体和纳米级蜡质晶体构成的微纳复合结构，在功能特性方面表现出对抑制昆虫附着功能与超疏水/各向异性超疏水现象。学者据此仿生研制了用于致灾农业昆虫机械化捕集治理的捕集滑板，以及用于自清洁、抑冰、抗腐蚀等方面的润滑液注入式超疏水表面。以设计、加工等方面作为切入点提高仿生模型的构建精度，使制备捕集滑板的形貌结构更接近仿生原型并具备功效持久性，将会是以滑移区为仿生原型研制致灾农业昆虫捕集滑板的研究趋势；学习滑移区超疏水/各向异性超疏水机理，用以指导金属基材超疏水/各向异性超疏水表面仿生制备，将会是以滑移区为仿生原型制备超疏水表面的研究趋势。

### 参考文献/References:

- [1] ELLISON A, GOTELLI N. Energetics and the evolution of carnivorous plants-Darwin's most wonderful plants in the world[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(1): 19-42.
- [2] THORNHAM D, FEDERLE W. Setting the trap: cleaning behavior of *Camponotus schmitzi* ants increases long term capture efficiency of their pitcher plant host, *Nepenthes bicalcarata*[J]. *Functional Ecology*, 2012, 26(1): 11-19.
- [3] WANG Lixin, ZHOU Qiang. *Nepenthes* pitchers: surface structure, physical property, anti-attachment function and potential application in mechanical controlling plague locust[J]. *Chinese Science Bulletin*. 2014, 59(21): 2513-2523.
- [4] GAUME L, GORB S, Rowe N. Function of epidermal surfaces in the trapping efficiency of *Nepenthes alata* pitchers[J]. *New Phytologist*, 2002, 156(3): 479-489.
- [5] BAUER U, PAULIN M, ROBERT D, et al. Mechanism for rapid passive-dynamic prey capture in a pitcher plant[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(43): 13384-13389.
- [6] BOHN H, FEDERLE W. Insect aquaplaning: *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(39): 14138-14143.
- [7] BAUER U, BOHN H, FEDERLE W. Harmless nectar source or deadly trap: *Nepenthes* pitchers are activated by rain, condensation and nectar[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 275(1632): 259-265.
- [8] BAUER U, WILLMES C, FEDERLE W. Effect of pitcher age on trapping efficiency and natural prey capture in carnivorous *Nepenthes rafflesiana* plants[J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(8): 1219.
- [9] GORB E, BAUM M, GORB S. Development and regeneration ability of the wax coverage in *Nepenthes alata* pitchers: a cryo-SEM approach[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(10): 3078.
- [10] 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.
- [11] GORB E, KASTNER V, PERESSADKO A, et al. Structure and properties of the glandular surface in the digestive zone of the pitcher in the carnivorous plant *Nepenthes ventrata* and its role in insect trapping and retention[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(17): 2947-2963.
- [12] WONG T, KANF S, TANG S, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, 477(7365): 443-447.
- [13] CHEN Huawei, ZHANG Peifei, ZHANG Liwen, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Nature*, 2016, 532(7597): 85-89.
- [14] BAUER U, FEDERLE W, SEIDEL H, et al. How to catch more prey with less effective traps: explaining the evolution of temporarily inactive traps in carnivorous pitcher plants[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 282: 20142675.

- [15] GORB E, GORB S. Physicochemical properties of functional surface in pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* Blanco (*Nepenthaceae*)[J]. *Plant Biology*, 2006, 8(6): 841-848.
- [16] CHEN Huawei, ZHANG Liwen, ZHANG Peifei, et al. A novel bioinspired continuous unidirectional liquid spreading surface structure from the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Small*, 2017, 13(4): 1601676.
- [17] ZHANG Peifei, CHEN Huawei, LI Li, et al. Bioinspired smart peristome surface for temperature-controlled unidirectional water spreading[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(6): 5645-5652.
- [18] LI Chuxin, LI Ning, ZHANG Xinshi, et al. Uni-directional transportation on peristome-mimetic surfaces for completely wetting liquids[J]. *Angewandte Chemie*, 2016, 55(48): 15212-15216.
- [19] LI Chuxin, WU Lei, YU Cunlong, et al. Peristome-mimetic curved surface for spontaneous and directional separation of micro water-in-oil drops[J]. *Angewandte Chemie*, 2017, 56(44): 13623-13628.
- [20] ZHANG Pengfei, ZHANG Liwen, CHEN Huawei, et al. Surfaces inspired by the *Nepenthes* peristome for unidirectional liquid transport[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(45): 1702995.
- [21] 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.
- [22] RIEDEL M, EICHNER A, MEIMBERG H, et al. Chemical composition of epicuticular wax crystals on the slippery zone in pitchers of five *Nepenthes* species and hybrids[J]. *Planta*, 2007, 225(6): 1517-1534.
- [23] WANG Lixin, ZHOU Qiang, ZHENG Yongjun, et al. Composite structure and properties of pitcher surface of carnivorous plant *Nepenthes* and its influence on insect attachment system. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(12): 1657-1664.
- [24] SCHOLZ I, BUCKINS M, DOLGE L, et al. Slippery surfaces of pitcher plants: *Nepenthes* wax crystals minimize insect attachment via microscopic surface roughness[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(7): 1115-1125.
- [25] WANG Lixin, ZHOU Qiang. Numerical characterization of surface structures of slippery zone in *Nepenthes alata* pitchers and its mechanism of reducing locust's attachment force[J]. *Advances in Natural Science*, 2010, 3(2): 152-160.
- [26] WANG Lixin, ZHOU Qiang. Friction force of locust *Locusta migratoria manilensis* (Orthoptera, Locustidae) on slippery zones surface of pitchers from four *Nepenthes* species[J]. *Tribology Letters*, 2011, 44(3): 345-353.
- [27] WANG Lixin, Zhou Qiang, XU Shuyan. Role of locust *Locusta migratoria manilensis* claws and pads in attaching to substrates[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(8): 789-795.
- [28] PEREZ G, PERESSADKO A, SCHWARZ U, et al. Material structure, stiffness, and adhesion: Why attachment pads of the grasshopper (*Tettigonia viridissima*) adhere more strongly than those of the locust (*Locusta migratoria*) (Insecta: Orthoptera)[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2006, 192(11): 1233-1243.
- [29] DAI Z, GORB S, SCHWARZ U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae)[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(16): 2479-2488.
- [30] BEUTEL R, GORB S. Ultrastructure of attachment specializations of hexapods (Arthropoda): Evolutionary patterns inferred from a revised ordinal phylogeny[J]. *Journal of Zoological Systematics & Evolutionary Research*, 2001, 39(4): 177-207.
- [31] KIM T, BHUSHAN B. Adhesion analysis of multi-level hierarchical attachment system contacting with a rough surface[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2007, 21(1): 1-20.
- [32] GAUME L, PERRET P, GORB E. How do plant waxes cause flies to slide? Experimental tests of wax-based trapping mechanisms in three pitfall carnivorous plants[J]. *Arthropod Structure & Development*, 2004, 33(1): 103-111.
- [33] 毕可东, 宋小闯, 王玉娟, 等. 猪笼草蜡质滑移区表面反粘附特性的研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 103-109.  
BI Kedong, SONG Xiaochuang, WANG Yujuan, et al. Anti-adhesion mechanisms of *Nepenthes* waxy slippery zone surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(23): 103-109
- [34] 王玉娟, 宋小闯, 陈云飞. 猪笼草捕虫笼超滑表面黏附特性测量和抗黏稳定性分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(2): 259-264.  
WANG Yujuan, SONG Xiaochuang, CHEN Yunfei. Measurement of adhesion properties and analysis of anti-adhesion stability on super-slippery surfaces of *Nepenthes* pitchers[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2017, 47(2): 259-264.
- [35] BOBISUT O. Über den funktionswechsel der spaltöffnungen in der gleitzone der *Nepenthes-kannen*[J]. *Akad Wiss Wien Sitzungsber*, 1910, 1: 3-10.
- [36] KNOLL F. Über die ursache des ausgleitens der insektenbeine an wachsbedeckten pflanzenteilen[J]. *Jahrbücher Für Wissenschaftliche Botanik*, 1914, 54: 448-497.
- [37] GORB V, GORB S. The effect of surface anisotropy in the slippery zone of *Nepenthes alata* pitchers on beetle attachment[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011, 2(1): 302-310.



- [38] ZHANG Peifei, CHEN Huawei, ZHANG Deyuan. Investigation of the anisotropic morphology-induced effects of the slippery zone in pitchers of *Nepenthes alata*[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(1): 79-87.
- [39] 刘启航, 周强, 牛虎力. 蝗虫对光谱光照特性趋光反应的对比及数学模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 252-256.  
LIU Qihang, ZHOU Qiang, NIU Huli. Comparison and mathematical analysis of locust phototactic response to spectral illumination[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 252-256.
- [40] 刘启航, 周强. 频闪光源和交变光源对蝗虫趋光响应的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 260-265.  
LIU Qihang, ZHOU Qiang, . Experiment of locust phototactic response to flash and cosine alternating light[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(3): 260-265.
- [41] 牛虎力, 王立新, 周强. 光源与机械刺激下蝗虫的运动行为[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 148-152.  
NIU Huli, WANG Lixin, ZHOU Qiang. Influence of light and mechanical stimuli on behavior of locust [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 148-152.
- [42] 王立新, 牛虎力, 周强. 气扰刺激与波谱光源耦合作用下蝗虫的诱导捕集试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 108-115.  
WANG Lixin, NIU Huli, ZHOU Qiang. Locust induced trapping experiment based on coupling effect of air disturbance stimulation and spectrum light source[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 108-115.
- [43] BITAR L, VOIGT D, ZEBITZ C, et al. Attachment ability of the codling moth *Cydia pomonella* L. to rough substrates[J]. Journal of Insect Physiology, 2010, 56(12): 1966-1972.
- [44] 周强, 周荣伟, 王立新, 等. 仿生光滑表面显微结构计算机仿真与设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 201-205.  
ZHOU Qiang, ZHOU Rongwei, WANG Lixin, et al. Computer simulation and design on bionic slippery microstructure surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 201-205.
- [45] 王立新, 周强, 刘启航. 猪笼草滑移区表面结构参数表征与捕集滑板仿生设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 233-235.  
WANG Lixin, ZHOU Qiang, LIU Qihang. Dimensions of surface structures of slippery zone in *Nepenthes* pitchers and bionic design of locust trapping plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 233-235.
- [46] 王立新, 周强. 基于猪笼草叶笺滑移区仿生的蝗虫捕集滑板功效测试[J]. 农业机械学报, 2011, 41(5): 222-225.  
WANG Lixin, ZHOU Qiang. Function testing of locust slippery plate manufactured based on waxy zone of *Nepenthes* pitchers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 41(5): 222-225.
- [47] 王立新, 黄凤山, 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 (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 34-40.
- [48] TIAN Ye, SU Bin, JIANG Lei. Interfacial material system exhibiting superwettability[J]. Advanced Materials. 2014, 26(40): 6872-6897.
- [49] 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.
- [50] 李小磊, 张磊, 马晓雯, 等. 基于微肋板伸缩疏水/超疏水表面设计及其润湿性调控[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 167-174.  
LI Xiaolei, ZHANG Lei, MA Xiaowen, et al. Design and wettability control of hydrophobic/superhydrophobic surfaces based on the extendable micro-rib[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 167-174.
- [51] 王立新. 东亚飞蝗体表润湿性测试及疏水机理分析[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(5): 411-417.  
WANG Lixin. Wettability measurement and hydrophobicity mechanism analysis of body surface in locust *Locusta migratoria manilensis*[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(5): 411-417.
- [52] 屈孟男, 侯琳刚, 何金梅, 等. 功能化超疏水材料的研究与发展[J]. 化学进展, 2016, 28(12): 1774-1787.  
QU Mengnan, HOU Lingang, HE Jinmei, et al. Research and development of functional superhydrophobic materials[J]. Progress in Chemistry, 2016, 28(12): 1774-1787.
- [53] 吕婷, 王媛怡, 陈庆民. 全氟癸基硅烷 (PTES) 修饰微纳结构超疏水表面耐久性研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(1): 184-190.  
LV Ting, WANG Yuanyi, CHEN Qingmin. Durability research of superhydrophobic surfaces prepared on micro/nano structure substrate modified by PTES[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2017, 53(1): 184-190.
- [54] SOJOURI H, WANG M, BOSCHER N, et al. Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces[J]. Soft Matter, 2016, 12(7): 1938-1963.
- [55] 郑海坤, 常士楠, 赵媛媛. 超疏水/超润滑表面的防结冰机理及其应用[J]. 化学进展, 2017, 29 (1): 102-118.  
ZHENG Haikun, CHANG Shinan, ZHAO Yuanyuan. Anti-icing & icephobic mechanism and applications of

- superhydrophobic/ultra slippery surface[J]. *Progress in Chemistry*, 2017, 29(1): 102-118.
- [56] 张鹏飞, 张德远, 陈华伟. 猪笼草内表面微观结构及其浸润性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 341-345.  
ZHANG Peifei, ZHANG Deyuan, CHEN Huawei. Microstructure and wettability character of *Nepenthes*' pitcher surfaces[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 341-345.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] CAO Moyuan, XIAO Jiasheng, YU Cunming, et al. Hydrophobic/hydrophilic cooperative janus system for enhancement of fog collection[J]. *Small*, 2015, 11(34): 4379-4384.
- [60] LIU Yan, LI Shuyi, NIU Shichao, et al. Bio-inspired micro-nano structured surface with structural color and anisotropic wettability on Cu substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 379: 230-237.
- [61] KIM Philseok, WONG Tak-Sing, ALVAREGA Jack, et al. Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(8): 6569-6577.
- [62] ZHANG Junping, WANG Aiqin, SEEGER Stefan. *Nepenthes* pitcher inspired anti-wetting silicone nanofilaments coatings: preparation, unique anti-wetting and self-cleaning behaviors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(8): 1074-1080.
- [63] ZHANG Jialei, GU Changdong, TU Jiangping. Robust slippery coating with superior corrosion resistance and anti-icing performance for AZ31B Mg Alloy protection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(12): 11247-11257.
- [64] SMITH J, DHIMAN R, ANAND S, et al. Droplet mobility on lubricant-impregnated surfaces[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(6): 1772-1780.
- [65] 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.
- [66] LIU Yan, XUE Jingze, LUO Dan, et al. One-step fabrication of biomimetic superhydrophobic surface by electrodeposition on magnesium alloy and its corrosion inhibition[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 491: 313-320.
- [67] SONG Yan, LIU Yan, ZHAN Bin, et al. Fabrication of bioinspired structured superhydrophobic and superoleophilic copper mesh for efficient oil-water separation[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2017, 14(3): 497-505.
- [68] LIU Yan, LI Xinlin, JIN Jingfu, et al. Anti-icing property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 400: 498-505.
- [69] 李晶, 李红, 杜锋, 等. 喷砂-电刷镀制备疏水耐腐蚀复合结构[J]. *科学通报*, 2017, 62(12): 1307-1314.  
LI Jing, LI Hong, DU Feng, et al. Fabricated composite structure with hydrophobicity and anti-corrosion by sandblasting and electro-brush plating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(12): 1307-1314.