综述与专论

DOI：10.11949/0438-1157.20200454

仿生雾水收集材料:从基础研究到性能提升策略

周威，陈立，杜京城，谭陆西，董立春，周才龙

（重庆大学化学化工学院，化工过程强化与反应国家地方联合工程实验室，重庆 400044）

摘要： 由于水资源污染、淡水资源日益匮乏，水危机已经严重影响到人们的日常生活。从晨雾中捕获水气则可以缓解干旱地区的缺水问题。受纳米布沙漠甲虫、仙人掌、蜘蛛丝等动植物自发捕集雾水的启发，构建特殊润湿性的仿生雾水收集材料备受关注。详细总结了仿生雾水收集材料的最新研究进展，讨论了仿生集水材料的设计和制备方法，并从雾水收集的四大仿生策略出发，介绍了提升雾水收集效率的设计方案。在此基础上，分析了当前仿生雾水收集过程存在的问题，展望了此类材料未来的发展趋势和方向。

关键词： 水危机；特殊润湿性；仿生材料；雾水收集；效率

中图分类号： TB 34　　**文献标志码：** A　　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）：**

文章编号： 0438-1157（2020）10-4532-21

Bio-inspired fog harvesting materials: from fundamental research to promotional strategy

ZHOU Wei, CHEN Li, DU Jingcheng, TAN Luxi, DONG Lichun, ZHOU Cailong

(*School of Chemistry and Chemical Engineering, National-Municipal Joint Engineering Laboratory for Chemical Process Intensification and Reaction, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: Nowadays, the water crisis has seriously affected people's daily life due to water pollution and the increasing shortage of fresh water. Capturing water from the morning fog can relieve water shortages in dry areas. Inspired by the spontaneous fog trapping of Namib desert beetles, cacti, spider silk, and other animals or plants, various bionic fog collection materials with special wetting properties have been constructed by researchers. This review summarizes the latest research progress of bio-inspired fog harvesting materials in detail, discusses the design and preparation method of constructing bionic water collection materials from the four major bio-inspired strategies of fog collection, and introduces the design schemes to improve the efficiency of fog harvesting. Furthermore, the problems existing in the current bionic water collection process are analyzed, and the development trend of the materials in the future is forecasted.

Key words: water crisis; special wettability; bioinspired material; fog harvesting; efficiency

收稿日期： 2020-04-29　　**修回日期：** 2020-06-30

通信作者： 谭陆西(1985—),男,博士,副教授,tanluxi@cqu.edu.cn;周才龙(1987—),男,博士,讲师,cezcl@cqu.edu.cn

第一作者： 周威(1996—),男,硕士研究生,2216863212@qq.com

基金项目： 国家自然科学基金项目(21776025);重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0309)

引用本文： 周威, 陈立, 杜京城, 谭陆西, 董立春, 周才龙. 仿生雾水收集材料:从基础研究到性能提升策略[J]. 化工学报, 2020, 71(10): 4532-4552

Citation: ZHOU Wei, CHEN Li, DU Jingcheng, TAN Luxi, DONG Lichun, ZHOU Cailong. Bio-inspired fog harvesting materials: from fundamental research to promotional strategy[J]. CIESC Journal, 2020, 71(10): 4532-4552

引 言

水虽是自然环境中最丰富的资源，但海水约占地球总水量的96.54%，能供人类饮用的淡水不到0.36%[1-2]。海水淡化和废水处理技术被认为是目前缓解淡水危机最有效的途径，但技术适用性、操作复杂性和成本效益等因素阻碍了这些成熟技术的应用和推广[3-4]。自然界中的动植物经过亿万年的进化和自然选择，其结构和功能已经达到近乎完美的程度。例如，荷叶及一些昆虫翅膀表面由于具有特殊的微观结构促使固-液界面形成气膜，从而实现水滴不能浸润的超疏水自清洁性[5-6]。基于此，大量的仿生疏水界面材料已应用于自清洁、油水分离等领域[7-8]。仿生学的设计思想不仅开启了上述领域的大门，同时也为解决淡水稀缺问题打开了另一扇窗。雾是悬浮在空气中的微米级水滴，被视为在沙漠、海岸和山脉等干旱地区获取淡水的潜在资源[9-10]。为了有效地从雾气中获取水，大自然中一些动植物的特殊结构为人类制造出先进的雾水收集材料提供了广泛的灵感来源。例如，纳米布沙漠甲虫的特殊润湿性背部图案使其能够在亲水凸起区域捕获并聚结雾气中的小水滴，然后输送到疏水的光滑区，结合这一特征，仿生甲虫的复合型润湿性图案材料已被应用于雾水的收集[11]；蜘蛛利用其丝上的润湿性差异和周期性纺锤结构构建的形状梯度操纵水滴定向移动，实现雾滴的捕获，而类蜘蛛丝的人造纤维也同样具有液滴定向运输和雾水收集能力[12]。此外，沙漠中的仙人掌[13]以及沼泽湿地中的水罐植物[14]等都具有类似的雾水收集和促进液滴定向移动的特点。事实上，在ISI Web of Science上以主题为“bio-inspired *AND water collection”检索到的文献数量近年来呈逐渐上升趋势(图1,截止到2020年6月20日)。最近，已有文献综述了上述三种动植物的集水机理以及对应集水材料的制备方法[15]，但并未总结出提升雾水收集效率的策略。仅单一地模仿这些动植物的结构特征，所研制出的人工微纳米材料的集水效率并不理想[16]。在此，简要总结出构建高效雾水收集表面的关键要素：相对疏水且光滑的集水表面有利于微型液滴的脱落，存在分级的微纳米级通道或者锥形结构的疏水表面能促进液滴运输，降低表面水分的再蒸发速率有利于提高捕集量。本文首先从界面润湿理论和液滴运输理论入手分别介绍了四种生物的集水机制，然后系统地介绍了仿生材料的制造方法和现状，并进一步评述了提升雾水收集效率的设计方案，最后指出了雾水收集材料存在的问题以及未来的发展方向。

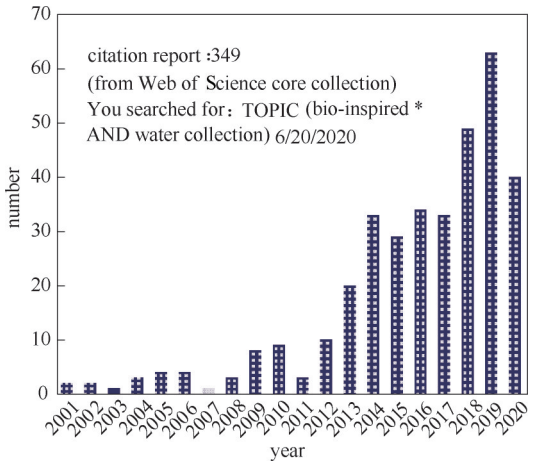


图1 在ISI Web of Science上检索的关于主题为“仿生集水”的文章数量

Fig.1 Number of articles on the topic “bio-inspired *AND water collection” retrieved from ISI Web of Science

1 基本润湿理论与集水机制

1.1 润湿性模型

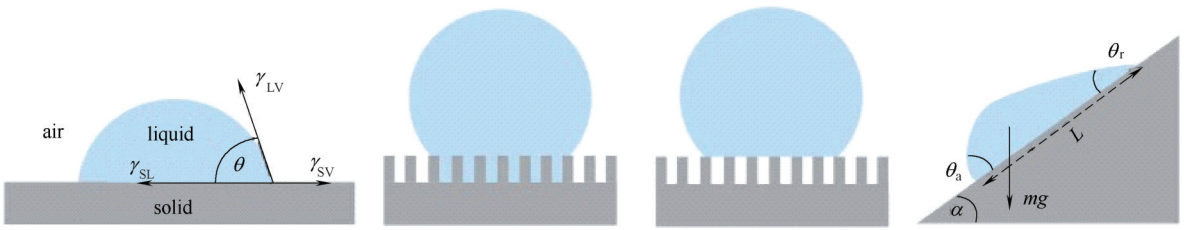
润湿性是指固体表面被液体润湿的能力或程度，当液滴与固体表面接触时，它们倾向于以相对较低的能量达到稳定状态。通常采用接触角(contact angle, CA)来表征液滴在固体表面的润湿程度。如果将液体放置在光滑的固体表面上，表面的润湿性可以用Young方程[17]来描述[图2(a)]：

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV}\cos\theta \tag{1}$$

式中，γ_{SV}、γ_{SL}和γ_{LV}分别表示固体/气体、固体/液体以及液体/气体之间的表面张力；θ是液滴在光滑固体表面上的本征接触角。由Young方程推导出的亲水和疏水之间的CA边界是90°，而最近一些研究认为65°是亲疏界面的更合理界限[18-19]，造成这种差异的主要原因是Young方程假设液体表面的水分子与固体相中的水分子是相同的[20]。但Young方程仅适用于完全光滑的固体表面，考虑到粗糙度、非均匀性等因素对界面的影响，Wenzel[21]提出了粗糙表面的新模型[图2(b)]，指出粗糙材料比光滑材料具有更大的表面积，并对接触角表达式进行如下修正：

$$\cos\theta^{*} = r\cos\theta \tag{2}$$

式中，r为粗糙因子，定义为实际表面积与投影



(a) Young 模型 (b) Wenzel模型 (c) Cassie模型 (d) Furmidge模型

图2 不同固体表面润湿性模型

Fig.2 Different wetting behaviors of solid surface

面积之比，因此$r \geqslant 1$，Wenzel方程表明，增加表面粗糙度使亲液表面更亲液而使疏液表面更疏液。Wenzel模型虽然说明了表观接触角是由表面微观形貌和表面化学组成共同决定但当表面呈现出较好的疏液态时，液体并不能完全浸润到粗糙表面内部，这时就出现了固-液-气三相共存的润湿状态。基于此，Cassie等[22]提出了另外一种模型[图2(c)]：

$$\cos\theta^* = f_{SL}\cos\theta + f_{LV}\cos\theta' \tag{3}$$

式中，f_{SL}、f_{LV}分别为液滴与固体接触和与空气接触的面积百分数($f_{SL}+f_{LV}=1$)；θ^*、θ'分别为液滴在粗糙表面的表观接触角和液体在理想空气表面的接触角($\theta'=180°$)。此外，对于液体排斥表面[图2(d)]的动态润湿性评价，Furmidge[23]提出了式(4)以概述动态润湿性：

$$mg\sin\alpha = \sigma w\left(\cos\theta_r - \cos\theta_a\right) \tag{4}$$

式中，m是液滴的质量；σ是液滴的表面张力；w是液滴的接触范围宽度；g是重力加速度；α是滑动角；θ_a、θ_r分别是前进接触角和后退接触角。在Furmidge方程中最重要的两个参数是接触角和滑动角(前进接触角与后退接触角之差用SA表示)，CA表示液体在固体表面的排斥程度，而SA则表明液滴在固体表面的附着力程度。上述四个方程从本质上解释了液滴在表面的静态和动态接触情况，为进一步分析液滴在材料表面的聚结、移动等行为以及雾水收集过程提供了坚实的理论基础。

1.2 自然生物的集水机理

自然生物体表面不仅表现出特殊的润湿性[24-26]，还具备使微型水滴聚结和定向移动的特征。2001年，Parker等[27]观察到纳米布沙漠甲虫[图3(a)]的背部凹凸表面包含着交替的蜡质疏水凹陷区域和非蜡质亲水凸起区域[图3(b)]。其中，亲水区域用来凝结空气中的雾水，当雾水达到一定体积时，甲虫依靠背部的疏水区运输水滴，最后输送到嘴里[图3(c)]。在沙漠中还生长着另一种具有优良集水能力的植物即仙人掌，Ju等[28]指出，仙人掌之所以能够抗旱，与它特殊的微观结构有着密切的关系。仙人掌表面覆盖着均匀的锥形刺[图3(d)]，其中，一根锥形刺的脊柱包含倒钩、渐变槽和底部的毛状体结构[图3(e)]，在雾水收集过程中，这三部分的协同作用可使水滴从尖的一端自发地滑动到仙人掌的根部[图3(f)]。另外，夏天清晨很容易观察到蜘蛛网上挂有露水[图3(g)]，这表明蜘蛛网能够有效地收集空气中的水分。2010年，Zheng等[29]对蜘蛛丝的定向集水现象进行了研究，发现随着环境湿度的增加，蜘蛛丝上原本蓬松的结点逐渐转变成为周期性的纺锤体结构[图3(h)]，在纺锤体和链接结构的作用下，蜘蛛丝结点处的雾水出现了定向移动的现象[图3(i)]。猪笼草极为湿润光滑的口缘区[图3(j)]也能实现液滴的无损运输，2016年，Chen等[30]通过解析猪笼草“嘴唇”(口缘区)的微观结构，揭示了猪笼草的口缘区能定向连续搬运液体的原因在于其多尺度的楔形盲孔组成了不对称沟槽[图3(k)]，该结构能在运输方向上优化并加强毛细上升，阻止反方向的回流，从而完成单方向的液滴搬运[图3(l)]。

上述这些生物之所以能够从雾中收集水分，其根本原因在于它们的特殊结构产生了表面能梯度和Laplace力梯度。图3(i)显示了表面粗糙度差异产生的表面能梯度力，与纺锤体结构相比，链接结构平行轴向粗糙度更小，即纺锤节的结构更亲水，表面能更高，所以液滴就会自发地从链接一侧运动到纺锤节一侧。由表面粗糙度差异产生的表面能梯度可描述见式(5)[31-32]：

$$F = \int_{L_1}^{L_2}\left(\cos\theta_a - \cos\theta_r\right)\gamma \mathrm{d}L \tag{5}$$

式中，L表示从疏水区到亲水区长度的积分变量；L_1是指疏水区的长度；L_2是指亲水区长度；γ是指水的表面张力。第二种驱动水滴定向移动的力来

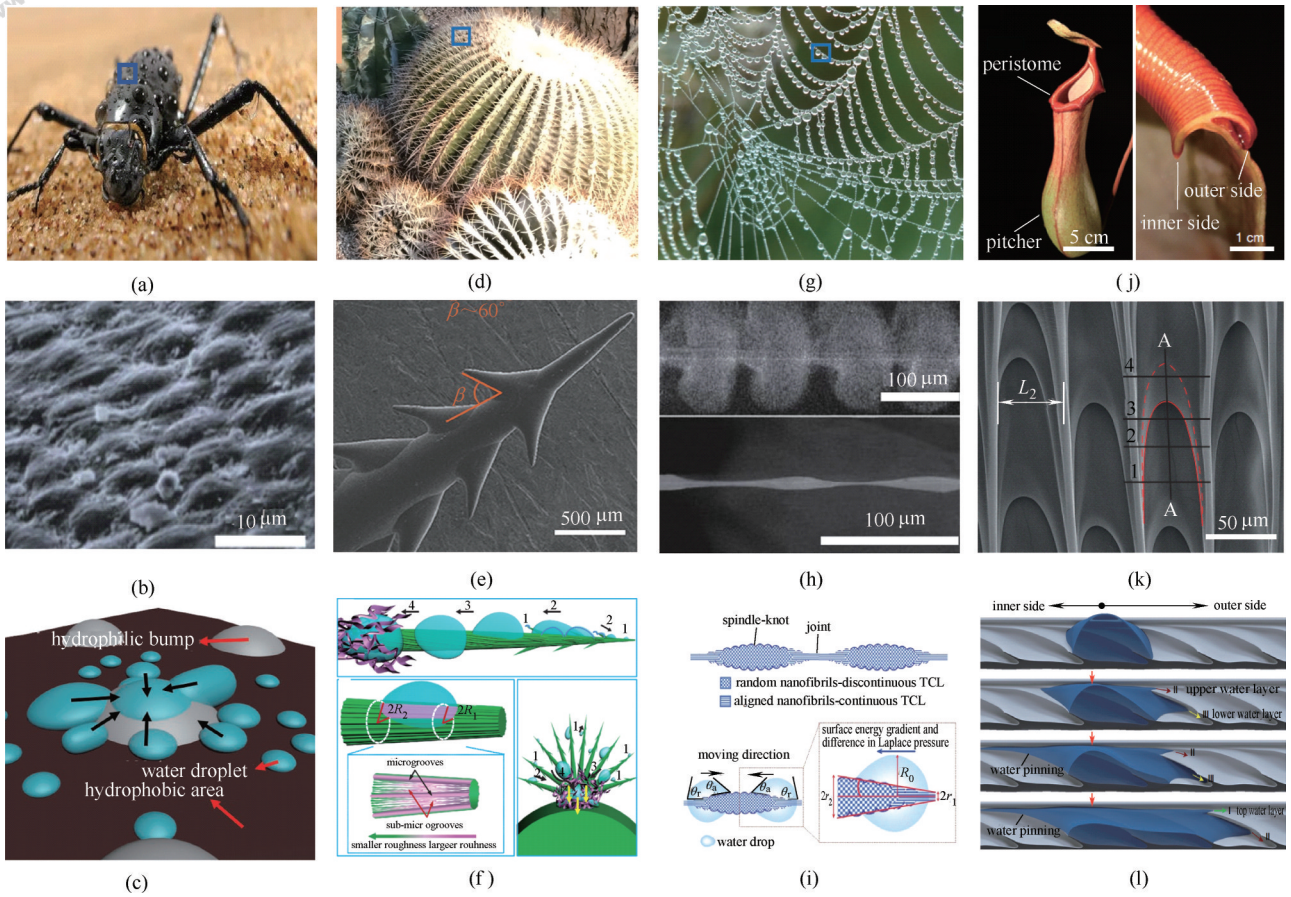


图 3　纳米布沙漠甲虫实物图(a),甲虫背部的凹陷纹理表面的扫描电镜图(b),水滴在甲虫背部运输的机制模型(c)[27];仙人掌实物图(d),仙人掌刺表面的扫描电镜图(e),水滴在锥形结构上移动的机制模型(f)[28];蜘蛛丝实物图(g),纺锤节和链接结构的扫描电镜图(h),水滴在纺锤节上移动的机制模型(i)[29];猪笼草口缘区结构实物图(j),猪笼草不对称沟槽结构的扫描电镜图(k),水滴在不对称沟槽表面运输的机制模型(l)[30]

Fig.3　The image of the Namib desert beetle (a). SEM image of the hollow textured surface on the beetle's back (b). The model of the droplet motion mechanism on the beetle's back (c)[27]. The picture of cactus (d). SEM image of cactus spiny surface (e). The mechanism model of water droplet movement on conical structure (f)[28]. The image of spider silk (g). SEM image of spindles and link structures (h). The model of the mechanism by which water droplets move on spindles (i)[29]. Optical images of the organ structure at the mouth margin of a pitcher plant (j). SEM image of asymmetrical grooves structure composed by wedge-shaped blind holes (k). The model of water droplet transport on asymmetric groove surface (l)[30]

自于几何形状产生的 Laplace 力[图 3(f)], 仙人掌的锥形刺状结构的顶端半径要明显小于底端,因此顶端产生的 Laplace 压力要大于底端,从而水滴在压力差的作用下实现了定向移动。由几何外形产生的 Laplace 力梯度可描述见式(6)[33]:

$$\Delta P = -\int_{r_1}^{r_2} \frac{2\gamma}{(r+R)^2} \sin\beta \mathrm{d}z \tag{6}$$

式中,r 是局部半径(r_1 和 r_2 是两个相对侧的脊柱局部半径);R 表示液滴半径;β 表示纺锤节或锥形脊柱疏水区域的半顶角;Z 是疏水区域直径的积分变量。总之,在一个相对干燥的环境中,大自然会迫使生活在那里的动植物进化出更为复杂的器官或结构来适应恶劣的环境。与仅调整润湿行为的荷叶或玫瑰相比,蜘蛛丝、甲虫背壳等能够进行定向雾水凝结和运输的结构似乎更加先进,因为它们需要多样化或异质结构设计,以形成混合润湿性或特殊的几何形状。

2　仿生集水材料的制备技术

受自然界中这些集水生物的启发,研究人员纷纷构建出一维或二维的仿生集水材料,如类蜘蛛丝纤维、仙人掌刺状椎体以及纳米布沙漠甲虫般的表面等。图 4 列出了一些现有的集水结构和相应材料的制作技术。

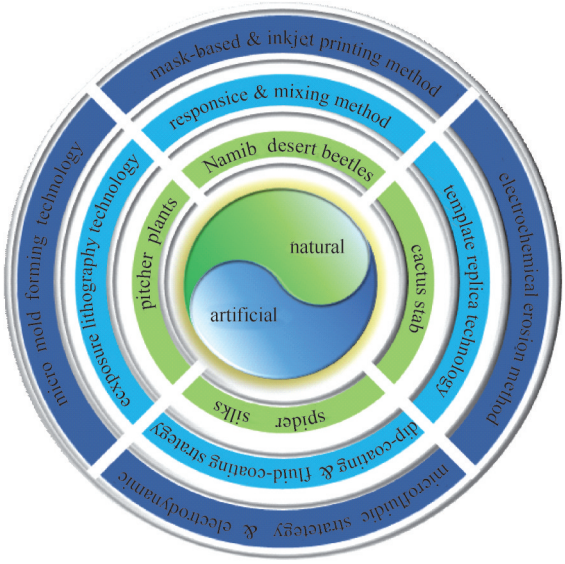


图4 仿生集水材料的制备方法一览图

Fig.4 Outline of the fabrication strategy of bio-inspired artificial materials with water-harvesting ability

2.1 仿纳米布甲虫背部图案表面

2.1.1 *物理或化学混合法* 混合法构建仿生特殊润湿性界面材料是将(超)亲水和(超)疏水材料直接混合在同一表面[34-35]。Wang等[36]采用物理混合法将亲水的聚苯乙烯(PS)通过热压工艺负载于经过1*H*,2*H*,2*H*-全氟癸烷醇(PEDT)改性的铜网上[图5(a)][36],结果表明,当加热温度为130℃,铜网50目(300 μm)时,样品的集水效果最佳,效率为159 mg·cm^{-2}·h^{-1}[图5(b)]。类似地,Cao等[37]将疏水铜网与亲水棉吸附剂结合成Janus体系,通过进一步改进,将二维的亲疏水复合体系转变为三维的协同体系实现了自发、定向、连续的集水过程。此外,混合法也可以是发生化学反应的化学混合[38]。Xu等[39]利用正十八烷基硫醇溶液对纳米Ag颗粒和纳米TiO_2颗粒的选择性修饰作用制备出超亲水/超疏水混合的CTA膜[图5(c)],在混合的膜表面上,含有TiO_2的超亲水区域用来捕获雾水,而具有Ag的超疏水区域引起微小水滴的滚动,该膜的集水效率高达1043 mg·cm^{-2}·h^{-1},此外由于纳米银的存在,膜表面还表现出良好的抗菌性能。

2.1.2 *智能响应法* 众所周知,在光、溶剂、pH、温度等外部条件发生改变时,智能响应材料会表现出一定的润湿性转换[40-41]。例如,二氧化钛在紫外线照射下能够变得更为亲水。Bai等[42]将二氧化钛浆料通过旋涂法沉积在玻璃基板上,并使用十七氟癸基三甲氧基硅烷(FAS)进行表面改性,使其获得超疏水性[图6(a)]。随后在紫外线的照射下,利用不同形状的挡板制备了各种超亲水图案[图6(b)]。相比其他图案而言,五角星形图案具有最佳的Laplace压力和表面能梯度组合,使有五角星形图案的表面表现出最佳的雾水收集效率[图6(c)]。类似地,Zahner等[43]利用紫外线引发的表面接枝技术,通过表面进行图案化改性,以形成具有规定几何形状的超亲水微图案。然而,光敏性材料在停止光照后会发生可逆的变化,即亲水的区域会逐渐恢复到疏水的性质,如何避免或降低光敏材料可逆性的研究应引起关注。

2.1.3 *喷墨打印法* 采用喷墨打印的直接图案化法和基于掩模的光刻法有望实现双重润湿性图案材料的大规模生产[44-45]。Zhang等[45]采用喷墨打印技术首次在超疏水表面制备出超亲水的微图案,他们将优化后的多巴胺溶液利用喷墨打印技术直接涂覆在超疏水表面上,随着多巴胺在空气中原位聚合反应的发生,疏水表面会形成超亲水的微图案。随后,Nishimoto等[46]也通过喷墨打印技术,在超亲水衬底上构建了超疏水图案。

2.1.4 *光刻法* 基于掩模的光刻技术也可以构造出预先设计好的图案,如Yu等[47]用不同规格的不锈钢网作为掩模,利用脉冲激光沉积技术(PLD)在二氧化硅-聚二甲基硅氧烷(silica PDMS)修饰的超疏水表面上制备出超亲水/超疏水图案化表面。结果表明,超亲水区域的大小和比例均影响着雾水收集效率,最优样品的集水效率高达5300 mg·cm^{-2}·h^{-1}。类似地,Moazzam等[48]通过微加工技术制作出含有圆形阵列的平板,然后将平板放置在经过聚丙烯修饰过的疏水膜和经过聚多巴胺修饰过的亲水膜之间,利用负光刻技术使多巴胺沉积在疏水表面形成亲水凸起。

2.2 仿蜘蛛丝的纤维结构

2.2.1 *浸涂法* 根据Plateau-Rayleigh不稳定性原理,高曲率纤维表面的液膜无法稳定存在,会自发地破裂成沿着纤维长轴方向规则分布的一系列液滴[49-50]。基于此,Bai等[51]选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚醋酸乙烯酯(PVAC)、聚苯乙烯(PS)和聚偏氟乙烯(PVDF)作为原料,通过浸涂法首次合成了类似蜘蛛丝的纺锤节[图7(a)],与其他三组表面相比,微型水珠能够在粗糙的PMMA结上获得较快的移动速度[图7(b)]。此外,Bai等[52]通过调节溶液的黏度、表面张力和提拉速度,研制出具有不同形状

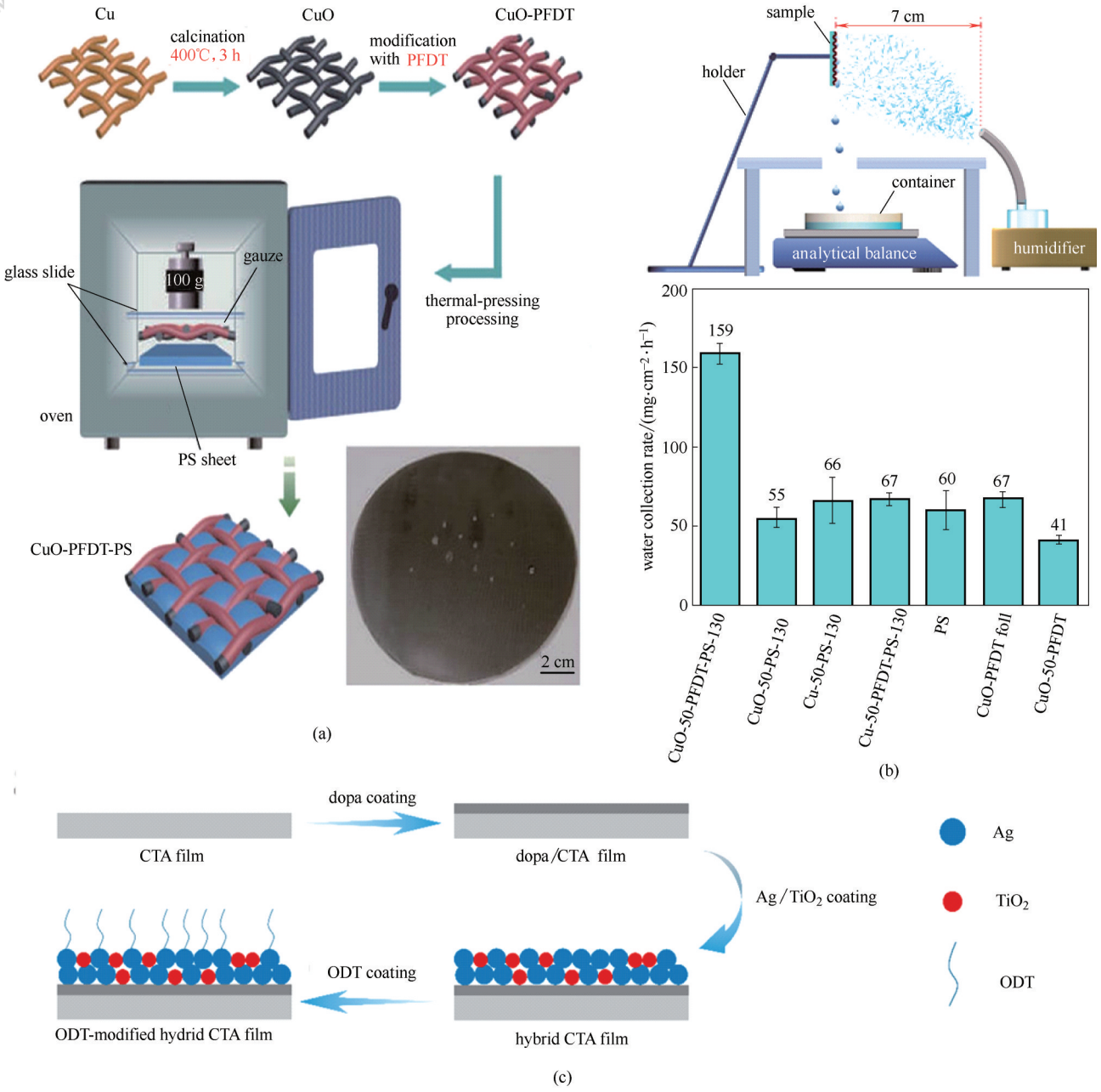


图 5　亲疏水复合表面制备过程示意图(a),雾水收集装置示意图以及不同样品的雾水收集效率对比(b)[36];超亲水/超疏水图案 CTA 膜的制备原理(c)[39]

Fig.5　Preparation procedure of the hydrophilic-superhydrophobic patterned composite surface (a). Schematic illustration of the fog-harvesting system, water collection rates of the different samples (b)[36]. Schematic illustration of fabricating superhydrophilic/superhydrophobic patterned CTA film (c)[39]

尺寸的周期性 PMMA 纺锤节,通过雾水收集实验,发现较大的纺锤形结的集水能力要比较小的纺锤节强。在此基础上,Chen 等[53]进一步证明,多级纺锤节可以造成连续的表面能和 Laplace 力梯度,并且纺锤节的尺寸大小与悬挂液滴的毛细黏附强弱有关。

2.2.2　液膜涂覆法　鉴于浸涂法存在难以制备出连续纺锤节纤维的缺点,Bai 等[54]开发出一种简单又实用的方法制备了大量的纺锤节纤维(图 8)。为了避免重力引起的液体流动,他们用两根毛细管将纤维水平固定在聚合物溶液中[PMMA 和 *N*,*N*-二甲基甲酰胺(DMF)]并使纤维一直处于拉紧状态,圆柱形聚合物薄膜由于 Rayleigh 不稳定而破裂成液滴,最后形成周期性的主轴结。

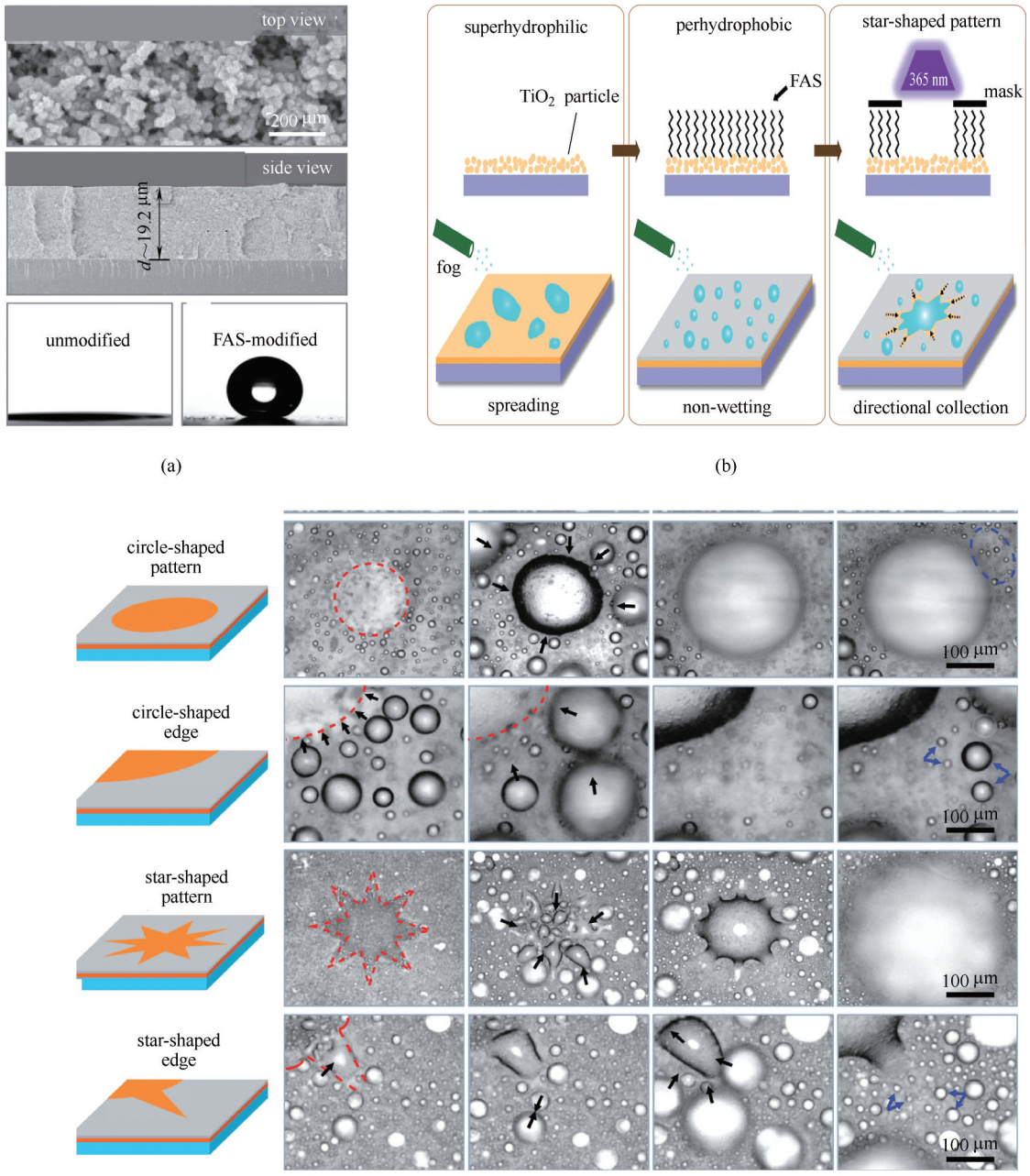


图6 二氧化钛颗粒形貌及润湿性(a),紫外光照法制备亲水星形图案表面(b),雾水收集过程的光学显微镜图(c)[42]

Fig.6 SEM image of TiO_2 particles and the wettability (a). Fabrication of star-shaped pattern surface under UV light irradiation (b). Water collection processes observed by an optical microscopy (c)[42]

2.2.3 *微流体法* 利用微流体法能够制备出含有磁性Fe_3O_4纳米粒子的挥发性油滴,在蒸发和干燥的过程有助于沉积磁性Fe_3O_4纳米粒子以获得纺锤节。He等[55]采用该思路成功制造出可调的磁性纺锤节微纤维,他们发现不同的磁场强度能够影响微纤维的移动、图案化和组装控制,此外,具有周期性磁性纺锤节的微纤维在自操控下可以形成蜘蛛网般的结构,以获得良好的雾水收集能力。更为重要的是,这种具有自我控制能力的微纤维对于细胞培养和组织工程等方面也具有很大的应用前景[56-57]。

2.2.4 *静电纺丝法* Tian等[58]利用静电纺丝技术合成了一种特殊的串珠结构纤维(BSHFs),在同轴喷射过程中,采用了低黏度可喷射的外液和高黏度可旋转的内液,使得亲水型的聚乙二醇微球成功地盖印在疏水聚苯乙烯管柱上形成串珠结构,串珠结构会发生一定的膨胀或收缩变化,让水滴能够在Laplace

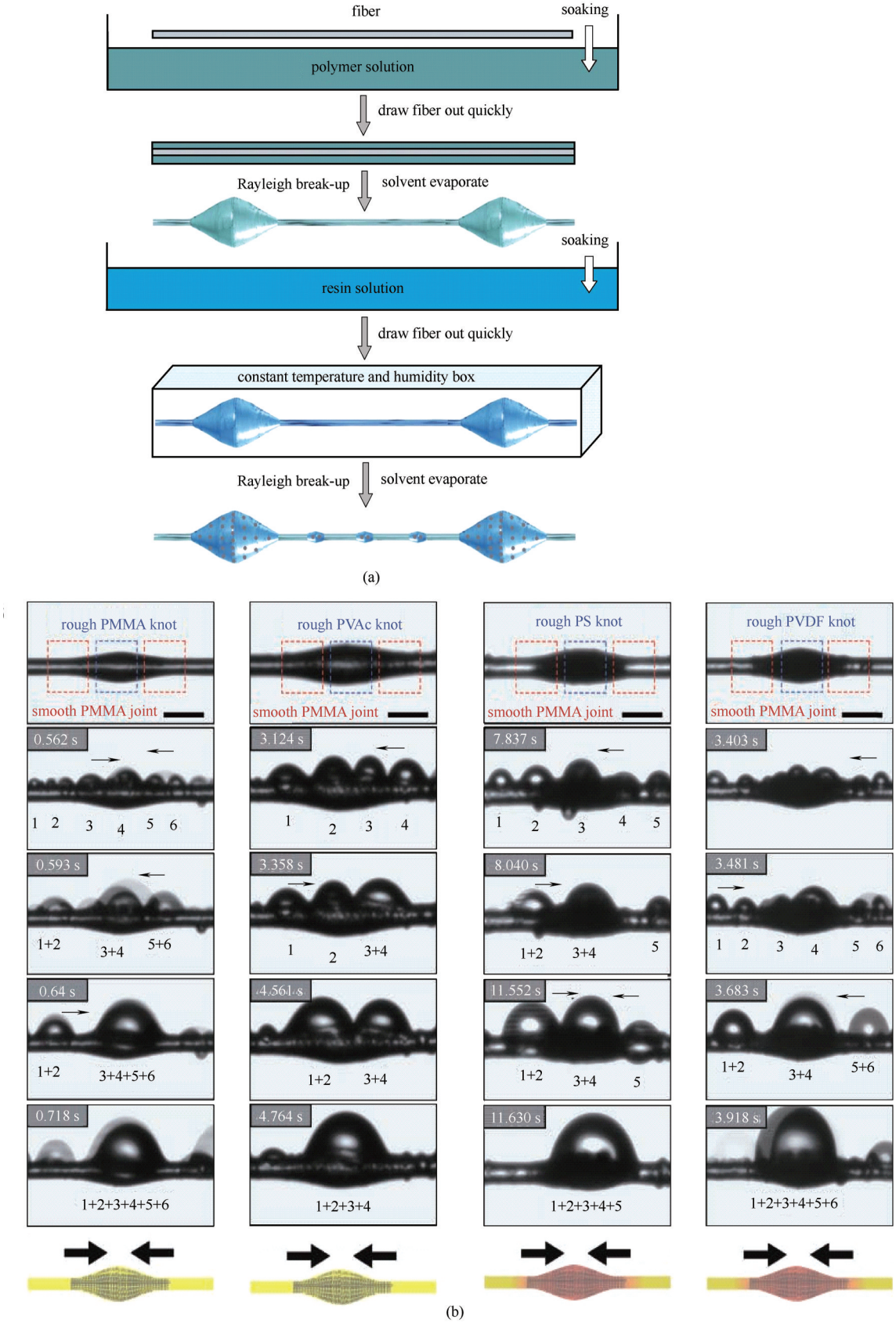


图 7　浸涂法制备仿生纤维流程(a),基于不同聚合物的纤维结点上的定向水滴移动过程(b)[51]

Fig.7　Fabrication process of bio-inspired fibers with dip-coating method (a). Directional droplet movement on different polymeric fiber nodes (b)[51]

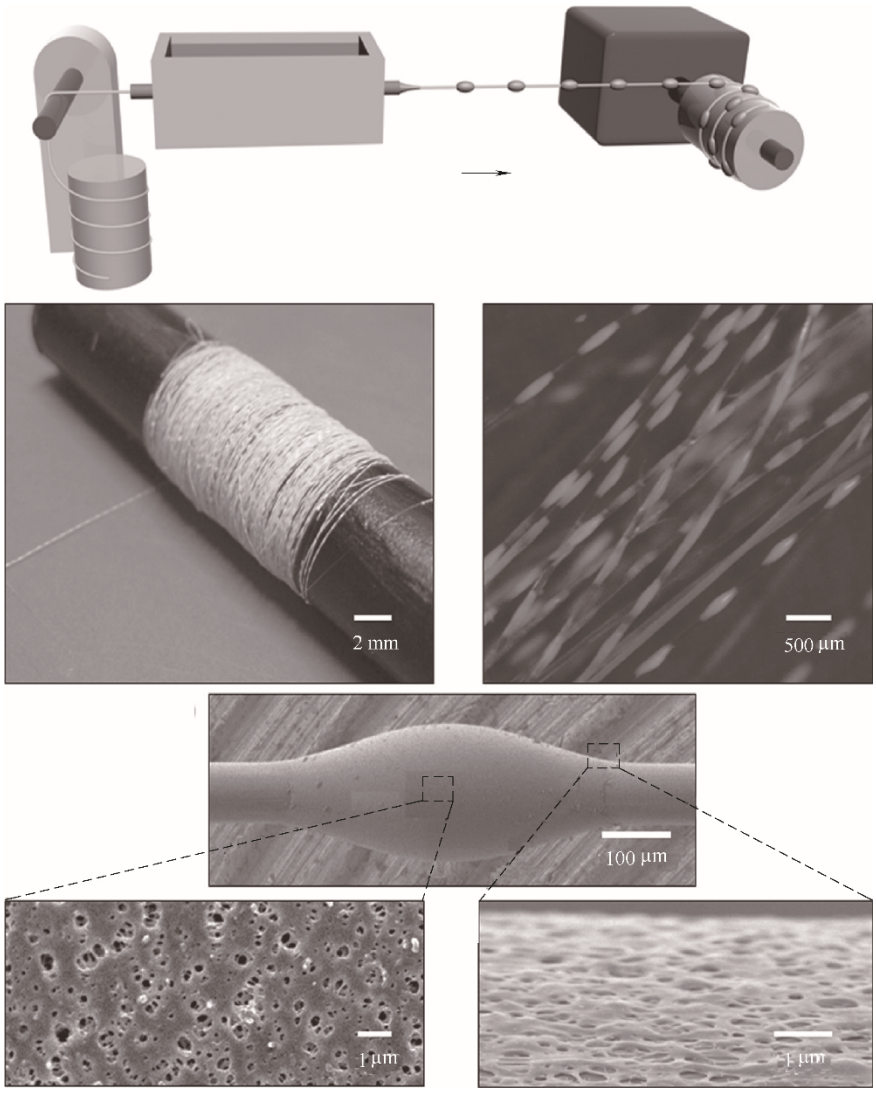


图8 流体涂覆法制备仿生纤维的示意图[54]

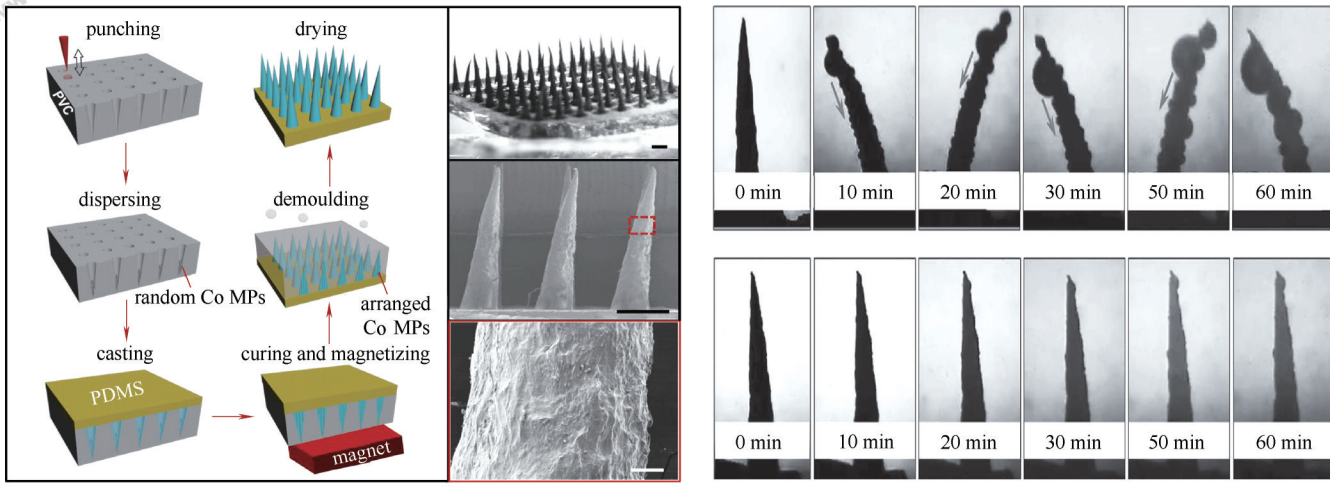
Fig.8 Schematic illustration of the fluid coating method used for the large-scale fabrication of bioinspired fibers[54]

力与表面能的驱动下实现定向移动并聚结。此外，Zhao等[59]利用纳米粒子通过静电纺丝在微纳米水平上合成了另外一种异质结构的串珠纤维(BHBF)，经过水蒸发诱导自组装的机理分析后，他们证明BHBF所特有的亲水型串珠具有良好的集水能力。Dong等[60]同样采用该方法，探究了内外两种溶液的流速和外层溶液的稀释浓度对纤维形貌的影响，结果显示，只有控制合适的流速以及恰当的外流体浓度时，才能制备出均匀凸起的纺锤状结构纤维。

2.3 仿仙人掌锥形刺状结构

2.3.1 *模板复制成型法* Ju等[61]利用模板复制成型法制备出具有不同排列方式的聚二甲基硅氧烷(PDMS)锥形阵列，随后他们测试了不同表面的雾气收集情况，发现六方排布的PDMS锥形阵列有助于更多的雾水在其表面聚结和快速地定向移动。由于雾水收集是一种被动集水过程，即在无风的条件下雾水很难转移到收集材料的表面上，为此Peng等[62]结合模板复制技术研制出一种磁响应的柔性锥形阵列，可在无风条件下利用磁诱导进行雾水收集。如图9(a)所示，首先将平均直径为2 mm的钴磁性微粒(CoMPs)分散到每个阵列的机械孔中，然后将固化剂PDMS浇铸在装有CoMPs的模板上，最后将样品放置在磁场强度约为0.9 T的永磁体上，在脱气和固化的过程中使CoMPs在孔中垂直排列。高速相机记录了响应磁场的锥形阵列运动情况以及雾水收集过程[图9(b)]，结果显示，当给定一个移动磁场时，锥形阵列可以在无风的环境下“随磁摆动”地进行雾水收集。

2.3.2 *化学刻蚀法* 化学刻蚀法可将细金属丝制



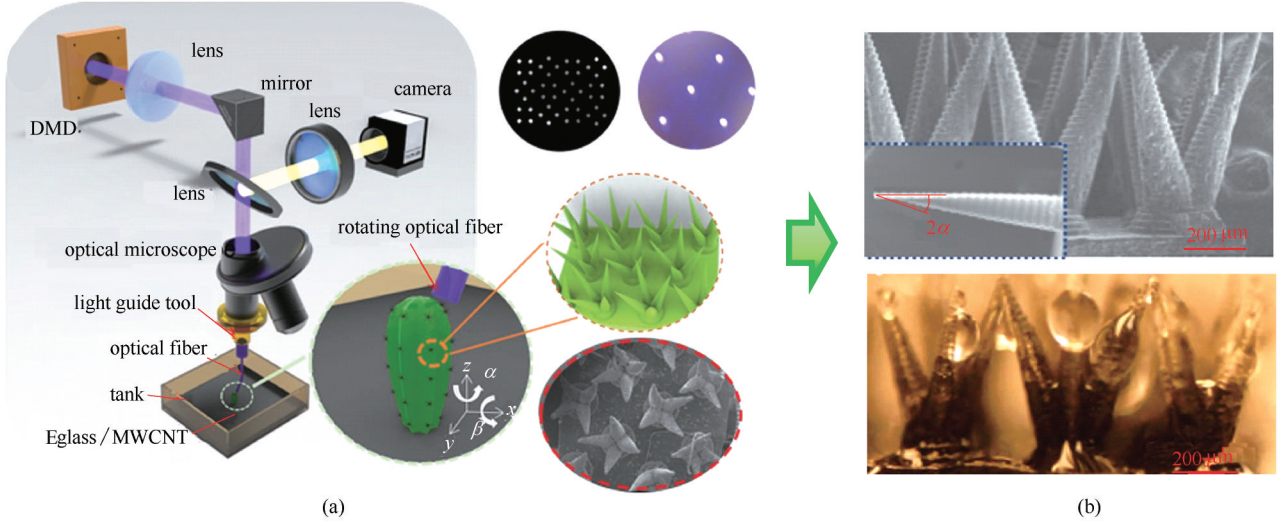
(a)　　(b)

图 9　有序磁锥形阵列的制作原理图及相应的光学和扫描电镜图像(a)，高速相机观察有无外加磁场作用下的磁锥形结构集水情况(b)[62]

Fig.9　Schematic diagram of the fabrication of ordered magnetically conical arrays and the corresponding optical and SEM images (a). *In situ* CCD camera observation of the water collection of a magnetic cone with and without the external magnetic field (b)[62]

备成类似仙人掌针刺的锥形结构。如 Ju 等[63]采用电化学刻蚀和化学改性法制备了锥形铜丝(CCW)，通过调节升降台速度以达到梯度电化学刻蚀的目的。与纯亲水或疏水表面相比，呈梯度的 CCW 表面由于亲水和疏水区域的综合优势，具有较大的液滴下降运动速度和液滴聚结速率。类似地，Heng 等[64]利用金属丝并结合气相法制备出类似的仙人掌锥形结构，经对比发现，该锥形刺的集水量是普通仙人掌的 1.4 倍至 5.0 倍。Xing 等[65]考察了表面形貌对锥形铜刺集水速率的影响，发现纳米针状形貌表面具有较好的雾滴捕捉能力，而纳米叶片状形貌表面更有利于驱动液滴运动。

2.3.3　3D 打印法　如图 10(a)所示，Li 等[66]采用沉浸表面累积三维打印工艺(immersed surface accumulation based 3D printing)成功地制造出了仿仙人掌叶片上簇状的针形微结构。在加工过程中，光固化树脂被选择性地曝光从而形成特定的仿仙人掌簇状的针形微结构。结果表明，3D 打印的仙人掌刺状微结构有助于水滴的凝结和运输，通过改变 3D 打印的仙人掌刺结构的表面疏水性可以进一步增



(a)　　(b)

图 10　沉浸表面累积三维打印工艺示意图(a)，三维打印仿仙人掌的簇状针形微结构的扫描电镜图以及雾水收集过程(b)[66]

Fig.10　Schematic diagram of the immersed surface accumulation-based 3D printing technology (a). SEM images of the cluster-like needle-shaped microstructure of the bionic cactus and the fog collection process (b)[66]

加水滴凝结速率[图10(b)]。

2.4 仿猪笼草口缘表面结构

2.4.1 *外部刺激响应法* 受猪笼草捕虫机制的启发，Wong等[67]首次开发了湿滑液注入多孔表面技术(slippery liquid-infused surfaces，SLIS)，该表面具有极端的液滴移动性和滑落特性，拥有较高的冷凝效率和良好的集水效果。此后，Wang等[68]将全氟聚醚(PFPE)注入氟化共聚物改性的热塑性聚氨酯(TPU)纳米纤维膜中制成了一种具有弹性变形能力的柔性SLIS，通过控制液滴的滑动行为，应力响应型的SLIS表现出高效的集水能力。如图11所示，Huang等[69]利用磁响应法将PDMS与铁粉混合以形成磁响应的柱形阵列，该阵列在外加不同方向磁场的作用下可以从完全垂直(超疏水状态)转变为几乎平坦的形态，此外，该SLIS还可以根据需求改变液体的排斥性，实现液体的可控收集。

2.4.2 *光刻法* 光刻法也被用于仿猪笼草口缘表面结构的制备。如Chen等[70]创新性地将斜坡曝光与二次曝光光刻技术相结合，成功制造出了液体单方向铺展搬运的仿猪笼草弧形外廓和楔形孔表面(图12)。首先通过斜坡曝光制作出倾斜微坑阵列，然后调节曝光角度来改变微坑倾斜角度然后在密排微坑阵列上匀胶，最后利用二次曝光制备出微沟槽，从而得到液体单向铺展运输的仿生表面[70]。随后，他们还采用高分辨率立体光刻技术制作出类似的仿生表面，结果表明该表面表现出自发的液体单向输送特征[71]。这种具有快速、长距离的单向液滴扩散特性的仿生表面不仅能应用于雾水的收集，它对药物的无动力输送以及机械工程中的自润滑特性等同样适用[72-73]。

3 集水效率的提升

由于雾水收集过程涉及一系列的物理变化，包括液滴成核、聚结、运输和脱落等[74]，因此，理想的雾水收集材料应该能够促进液滴快速成核和聚结、能够加速亚毫米级液滴的快速脱离以及降低液滴的再次蒸发。大量研究结果表明疏水的表面能够加速液滴聚结而亲水的表面能够加速液滴成核[75-76]，所以混合润湿性的表面可以增强雾水收集效率，此外，材料表面的特殊微观结构也有助于雾水收集效率的提升。例如，猪笼草的光滑楔形沟

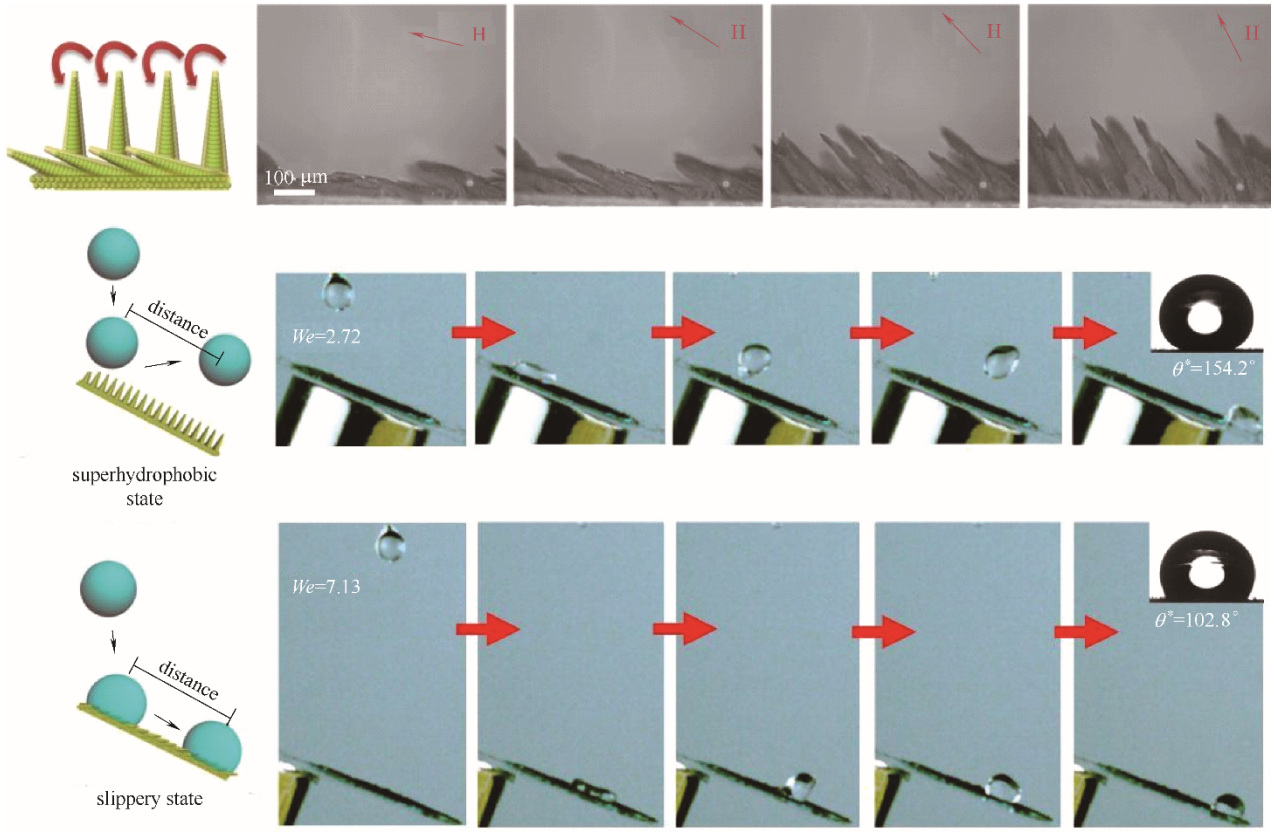


图11 磁场响应法制备湿滑注入液表面(SLIS)[69]

Fig.11 Magnetic field responsive method for slippery liquid-infused surfaces (SLIS)[69]

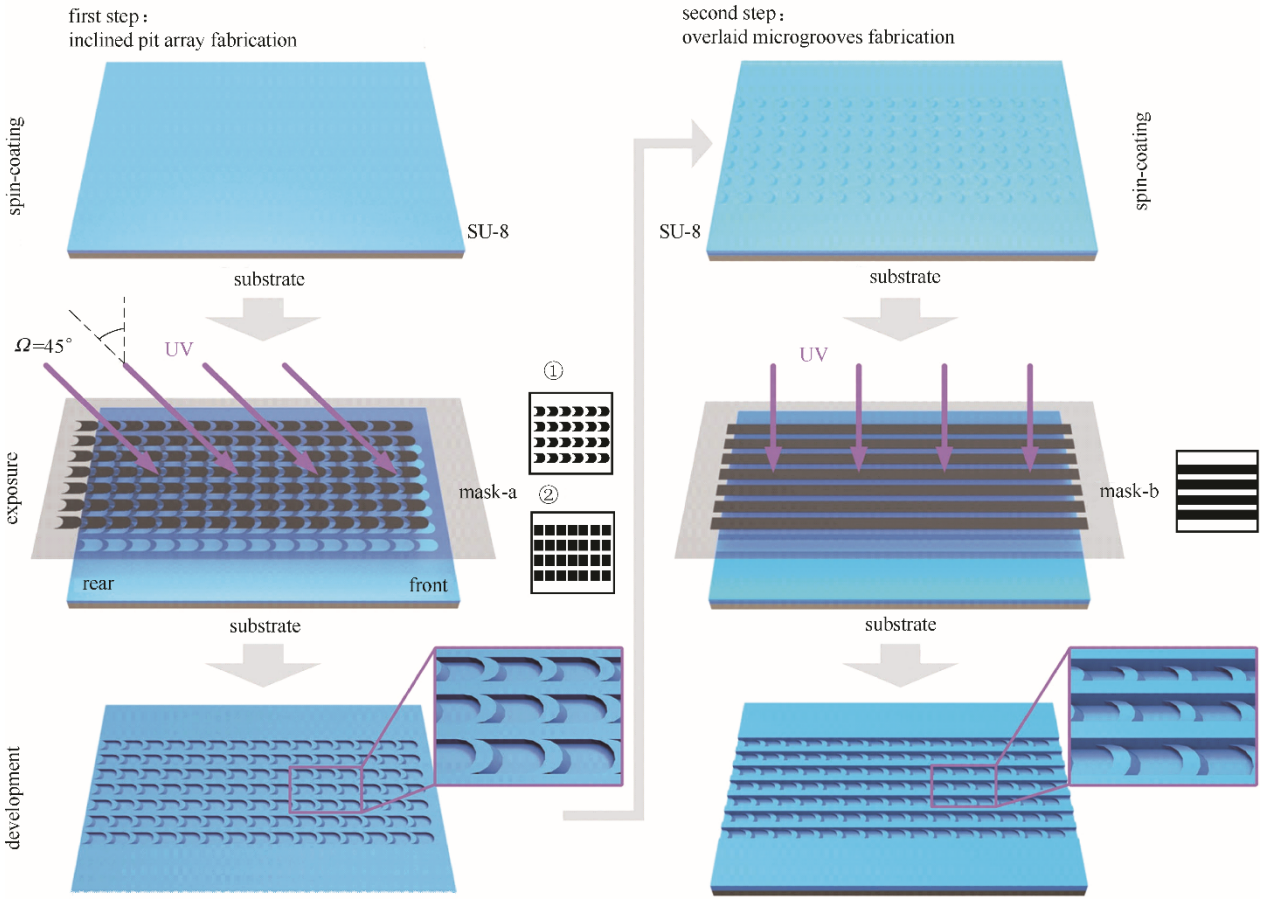


图 12　光刻法制备液体单方向铺展搬运的仿生表面[70]

Fig.12　Bionic surface for liquid spreading and handling in direction prepared by photolithography[70]

槽边缘能够加速液滴脱落、瓶子草的高低微米级通道结构以及稻草叶表面的规则通道均能显著提升水滴运输速度等。然而，之前大部分的研究在雾水收集效率的提升方面上只考虑到模仿一种生物的集水机制，因此，本节将从表面化学修饰以及表面形貌构建两方面出发，从多种生物的集水机制相结合的角度来讨论增强雾水收集效率的设计方案。

3.1　纳米布沙漠甲虫与仙人掌结构相结合策略

最近，有研究团队设想通过结合沙漠甲虫背部的疏水/亲水微图案与仙人掌刺的梯度微几何形状，开发出一种新颖的、更高效的集水材料。如 Hu 等[77]结合静电纺丝技术和阳极氧化法在铜网上制备出亲水的 $CuOH_2$ 纳米针(CNNs)和疏水的聚(偏氟乙烯-*co*-六氟丙烯)纳米纤维束(PNFs)的交替复合膜，当复合膜处于潮湿的雾气环境中时，微型雾滴在复合膜的表面能梯度作用下定向地从疏水侧输送到亲水侧，表现出优异的单向雾水收集能力。但该研究没有考虑到水滴在收集表面上再蒸发引起水流失的问题。为此，Ren 等[78]利用飞秒激光钻孔技术和选择性化学表面修饰法，研制出具有锥形微孔阵列的单层疏水/亲水性的 Janus 膜，在雾水收集过程中，Janus 膜的集水效率不仅提高了 209%，而且再蒸发率也降低了 75%。该 Janus 膜表面能够大幅度降低液滴再蒸发率的原因在于水滴很容易附着在亲水面并与随后的水滴聚结长大。一旦液滴由于 Laplace 力的作用而接触到微孔边缘时，它们就可进入圆锥形微孔内，然后在很短的时间内转移到相对的表面上，使上表面保持干燥，而下表面则处于湿润状态。但是，如何在同一表面上同时达到有效的雾滴捕获、水滴定向转移和降低水分蒸发的效果，Bai 等[79]制备了一个由立式不锈钢针、三聚氰胺树脂的亲水性泡沫带和疏水性硅胶条纹三部分组成的多层次亲水/疏水协同集水器[图 13(a)]，与传统的集水系统相比，由于分层针的嵌入以及亲水泡沫驱动的润湿性梯度的作用使其加快了液滴的捕捉和运输，从而提升了雾水收集效率。此外，该集水器还可改装成狼牙棒的形状，实现连续的雾水捕捉和收

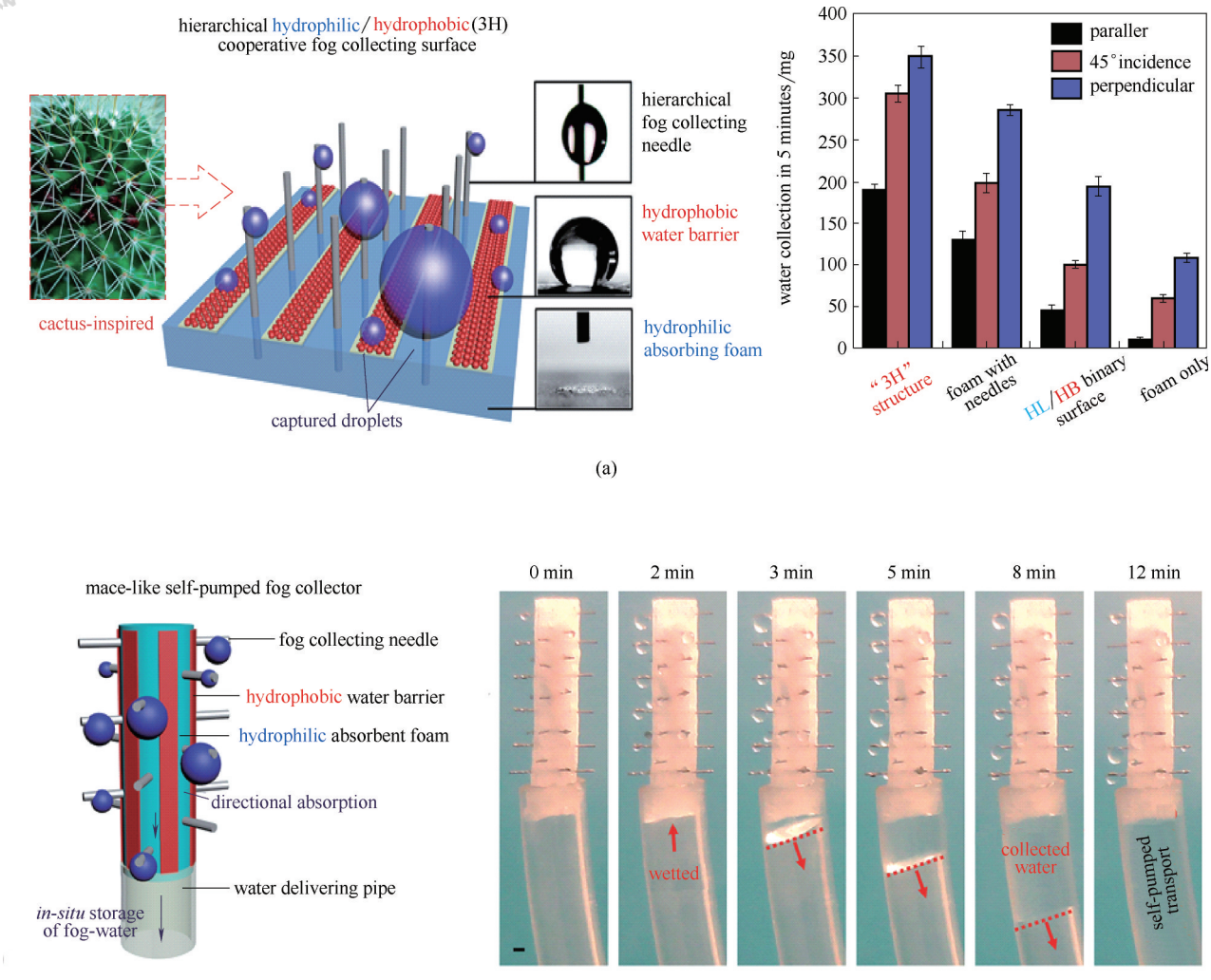


图13 多层次亲水/疏水协同雾水收集表面(a),优化后的狼牙棒状雾水收集器(b)[79]

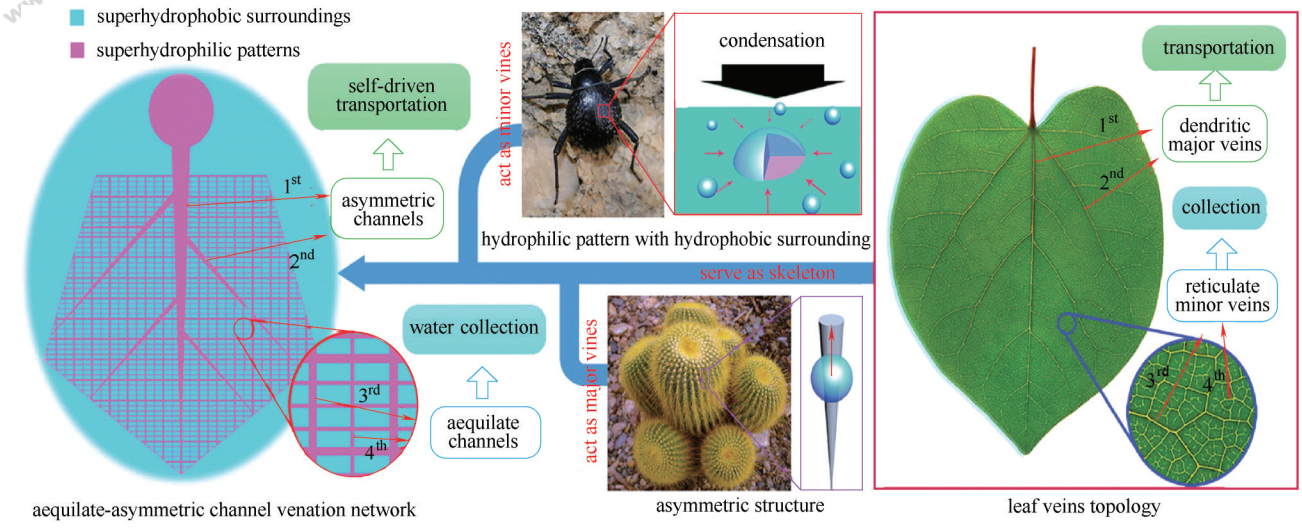
Fig.13 Illustration of hierarchical hydrophilic/hydrophobic cooperative fog collecting surface (a). Improved design of fog collector(b)

集[图13(b)]。

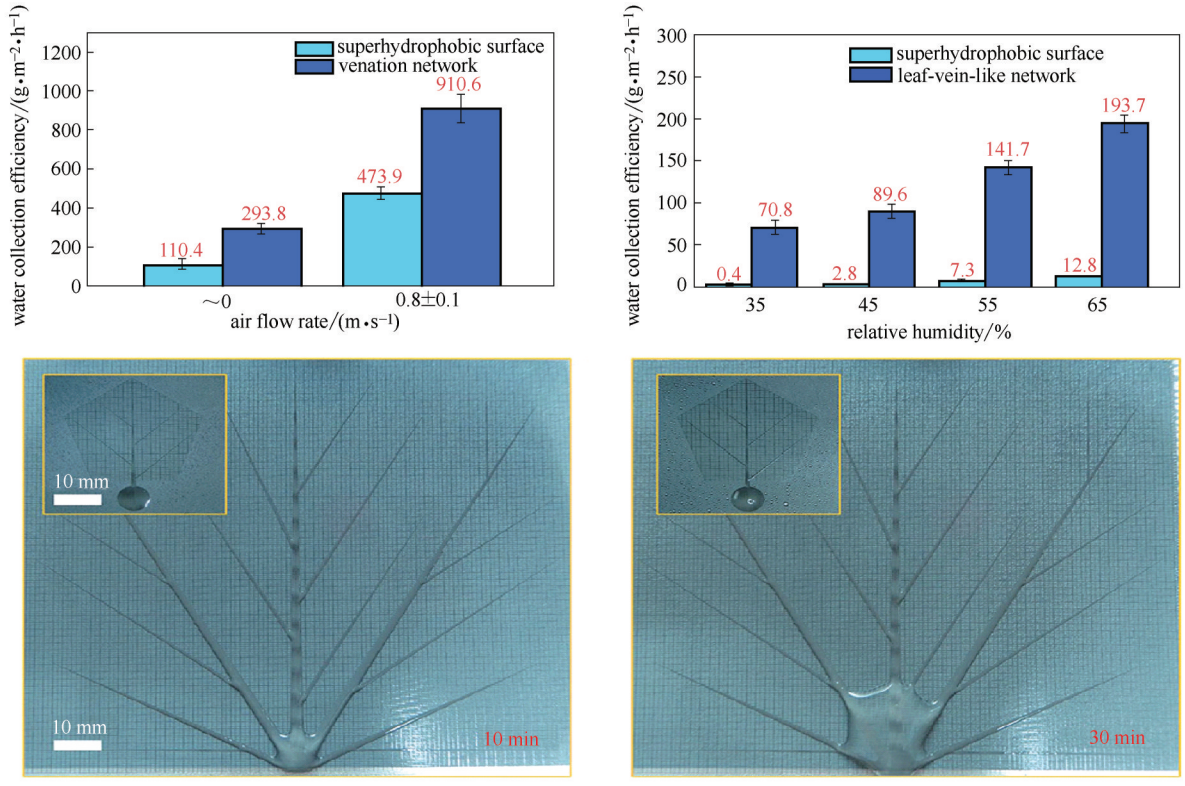
然而,基于仿生甲虫和仙人掌的耦合集水策略仍然存在一些问题,比如,水滴只能分散在亲水和疏水表面进行局部收集、水滴也只能在单个锥形结构下进行自驱动少量运输。为了解决水滴分散和量少等问题,Liu等[80]受到紫荆叶经脉网络的启发,在仿甲虫和仙人掌的基础上研制出一种超亲水-超疏水经脉网络[图14(a)]。这种结构的优势首先在于超亲水和超疏水的图案上,之前的集水图案表面仅具有中等对比润湿性,会导致大量的凝聚水黏在亲水/疏水区域的边界上使得水滴运输受阻,而超亲水/超疏水的极端对比润湿性则具有更优的导流特性;其次,类似树叶经脉网络的结构能够将表面分散的微型液滴聚结到经脉的轨迹中以减少分散水滴的蒸发;最后,将经脉结构优化成锥形形状,在Laplace力的驱动下能够使轨迹中的水滴实现自驱动运输[图14(b)]。

3.2 纳米布沙漠甲虫与蜘蛛丝结构相结合策略

蜘蛛丝的集水能力归因于其独特的微纳米纤维结构,但由于微小的水滴在纤维上会形成许多不规则的输水通道导致排水不畅,因此难以收集大量的水滴,而纳米布沙漠甲虫背部规则的亲水峰和疏水凹槽可以为解决排水不良问题提供巧妙的设计灵感。基于此,Wang等[81]在棉织物上喷涂正十八烷基三乙氧基硅烷后,将二氧化钛(TiO_2)纳米溶胶喷涂在超疏水纤维表面形成独特的光诱导超亲水凸起点,这些凸起物可诱导产生润湿性梯度和形状梯度,协同促进了水滴的融合和收集,而由交错纤维组成的棉织物提供了水滴凝聚通道。为了研究TiO_2的涂覆量与集水效率之间的关系,研究者以不同喷



(a)



(b)

图 14　受多种生物启发的雾水收集表面设计示意图(a),不同的图案模型、集水表面角度和环境湿度等条件对集水效率的影响(b)[80]

Fig.14　Schematic illustration of the integrative bioinspired venation network inspired by multi creatures(a). Comparison of the water collection efficiency between the different water collection models, tilt angles and relative humidities(b)[80]

涂距离来制备材料样品,实验发现,在 0.5~4 min 内的雾水收集过程中,该复合结构样品的集水效果比单一结构的参照样品更加明显。最近,Xing 等[82]结合沙漠甲虫背部的润湿性图案与蜘蛛丝的梯度结构特征来提高雾水收集效率,他们巧妙使用阳极氧化法来制作有序的亲水圆形图案,在氧化过程中,由于圆形图案被掩膜遮挡无法被氧化。另外,随着电流的逐渐增加以及电解质逐渐流失所引起的氧化差异可同时形成润湿梯度。利用此方法所得到的表面不仅提高了雾滴捕获性能,而且在雾滴收集

过程中还可以与疏水基质保持有效的排水，从而实现连续的集水循环。

3.3 多种仿生结构结合策略

最近，Park等[83]结合甲虫、仙人掌以及猪笼草三者的特性设计出一种高性能仿生集水材料，其效率是目前仿生材料的6倍。他们利用3D阵列聚合物模板将薄铝片制成类似甲壳虫背部的粗糙几何结构，以此提升雾气的凝结速度，并在其表面制造SLIPS纳米涂层，实现表面的零磨擦，有助于水滴的凝结和运输。当微型水滴定向移动时，依靠不对称的V形坡度所致的毛细力及表面能的相互作用，促使微水滴朝向底部更宽的区域移动，加速脱落。类似地，Zhang等[84]分别利用自下而上的胶体自组装、自上而下的光刻技术以及微结构模板复制法成功研制出可湿性空心凸点阵列的多仿生润滑材料[图15(a)]，并将其用于液滴定向输送、收集、多液滴混合等。该表面由中空的水凝胶凹凸阵列和经过注入润滑剂的反蛋白石膜为基底材料组成。其中，中空的亲水凸起可以根据毛细驱动力从各个方向快速吸引和捕获水滴，而光滑的基底部分则起到了水滴无损运输的作用，在两者的协同作用下从而显著提高了雾水收集效率。此外，通过调整凸起的中空直径、凸起的间距和凸起高度等参数进一步优化了该表面的雾水收集能力[图15(b)]。

然而，具有光滑体系的集水材料在静态环境中虽表现出优异的集水性能，但在强风环境下表现较差。因此，Wang等[85]从仙人掌、稻草叶、猪笼草、蝴蝶中汲取灵感，提出了一种动态的集水策略并研制出集水风车结构[图16(a)]，实现了在静态和强风环境中高效率的雾水收集。风车获得风能后，液滴在叶片旋转作用下逐渐向周围的蜗轮喷射并最终滴入容器中[图16(b)]。叶片分别是经过微加工技术处理的各向异性凹槽叶片(AGS)、PDMS修饰过的超疏水凹槽叶(SUB-AGS)以及注入亲水液的光滑凹槽叶片(HLIP-AGS)。如图16(c)所示，与其他表面相比，HLIS-AGS具有超高的水收集效率，这在于亲水的润滑剂既可作为缓冲层防止液滴弹跳，又可作为滑动层以利排水，而沟槽地形可防止水滴随机运动从而实现定向排水。

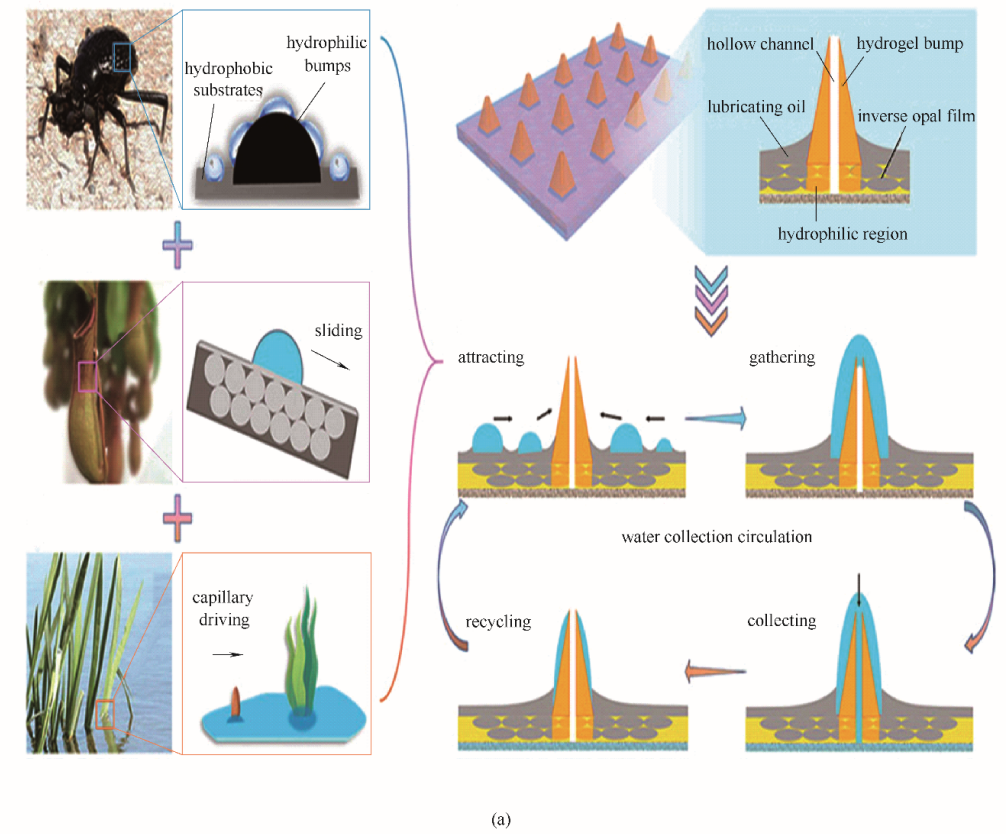
3.4 仿瓶子草的新型集水材料设计策略

瓶子草和猪笼草同属于水罐植物，但与猪笼草不同的是，瓶子草则依靠毛状体捕捉雾水并凝结周围的水分形成液滴，然后迅速输送到罐口边缘，以保持罐口湿润和光滑从而诱捕昆虫。2018年，Chen等[86]首次发现毛状体表面具有独特的高低棱条层次结构，即两个相邻的高级棱条组成一个大的通道，而其中所包含的3~5个低级棱条组成小通道[图17(a)]。当多级微纳米表面结构处于干燥状态时，液体传输主要依靠固-液接触产生的毛细力，此时液体传输模式与仙人掌刺相似，均为逐滴运输[图17(b)]；而当高低棱的沟槽结构润湿后，一层稳定的水膜会维持在表面上，显著降低后续液滴的传输阻力，表现为液体高速铺展滑移模式[图17(c)]，此时的液滴传输速度大约是第一种模式的20倍。此外，研究团队基于Lucas-Washburn原理、Onsager原理与边界滑移理论分别建立了两种液滴传输模式的理论模型，进一步揭示了高低棱条多级微纳米结构参数对超高速水滴传输的影响规律[86]。此后，Li等[87]采用激光加工技术，以两根高级棱条和三根低级棱条为一组制备了超疏水铝合金表面，不仅具有良好的液滴单向移动能力，也表现出超高的集水效率。Kim等[88]结合仙人掌刺状结构和瓶子草的毛状体的结构特征，将PDMS倒入模具制造出具有垂直对齐的微型圆锥阵列和分级微通道的材料表面，由于多级的微纳米结构的存在该表面可显着提高毛细力和雾水捕捉能力。目前，关于仿生瓶子草集水材料的报道比较少，但这类材料对于提升集水效率的重要性却不容忽视。

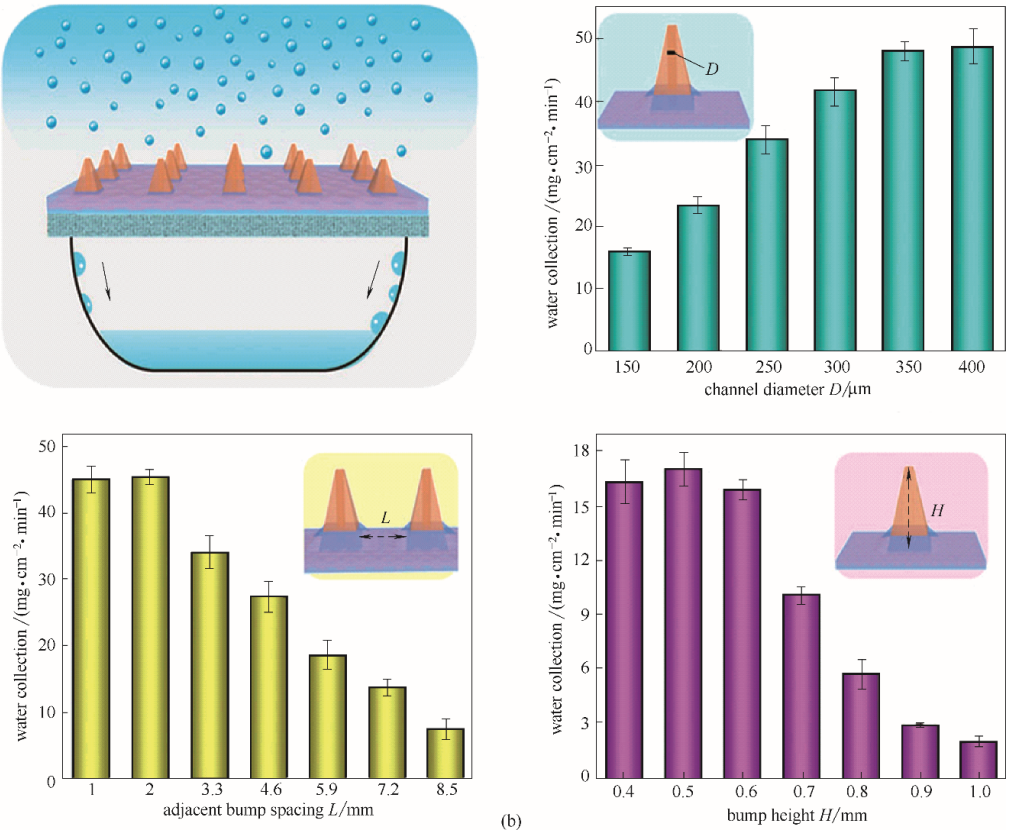
上述四种仿生策略是从构建材料表面微观结构的角度出发，结合多生物集水机制达到提升雾水收集效率的目的。然而，除了材料本身的物质和结构影响集水量外，一些外部因素也会影响集水过程，例如风速、磁强、温度、湿度、喷雾距离以及喷雾量等。表1对比了不同集水材料在外部条件改变时的集水效率变化。

4 结论与展望

拥有强大雾水收集能力的大自然生物为解决世界性的缺水问题提供了新的思路，通过模仿这些动植物的结构特征，采用现代化学处理方法制备出具有雾水收集能力的功能材料是目前从环境中快速获取淡水的潜在替代方案。本文分别从界面润湿和液滴运输理论、典型的仿生集水材料的合成方法以及提升雾水收集效率的策略三方面综述了仿生雾水收集材料的最新研究进展。如今，这些集水



(a)



(b)

图 15 多生物启发的可湿性空心凹凸阵列的制备方案(a),湿滑表面的集水性能优化(b)[84]

Fig.15 Schemes of the multi-bioinspired slippery surfaces with wettable hollow bump arrays (a). Water collecting performance optimization of slippery surface (b)[84]

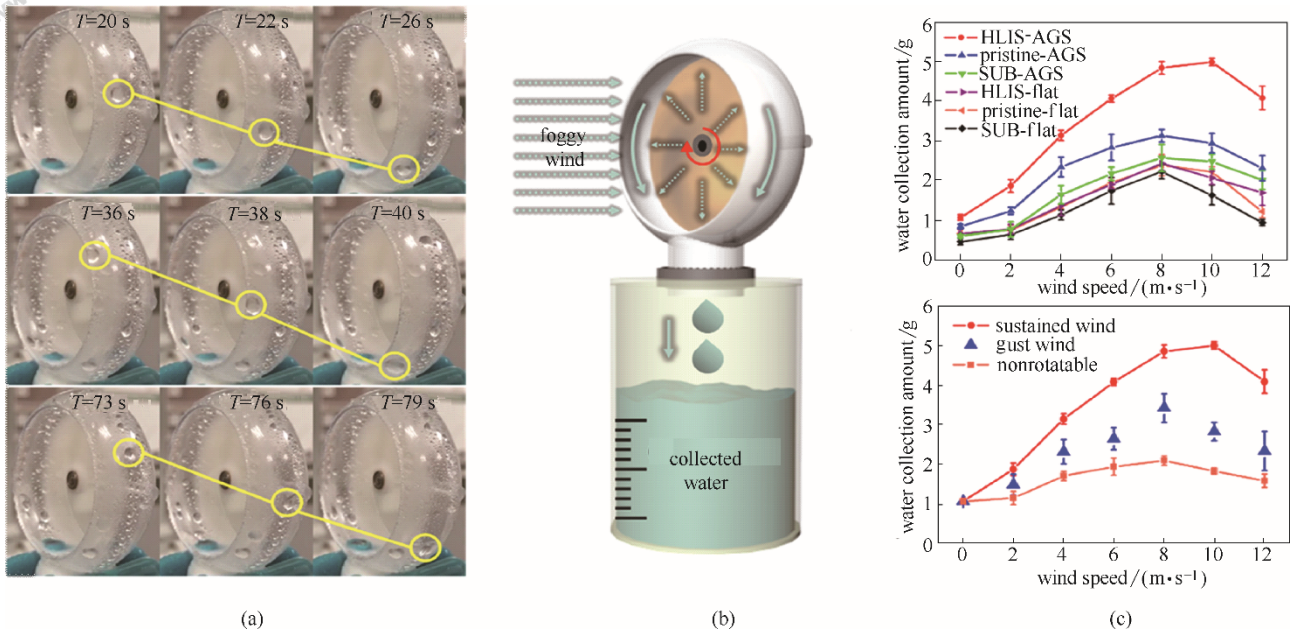


图16　液滴脱落过程的系列图片(a),风车集水过程演示(b),不同类型的风叶在强风下的集水性能对比(c)[85]

Fig.16　Series of pictures showing droplet shedding process(a). Demonstration of the water collection process in windmill (b). Comparison of water collecting performance of different types of blades under strong wind (c)[85]

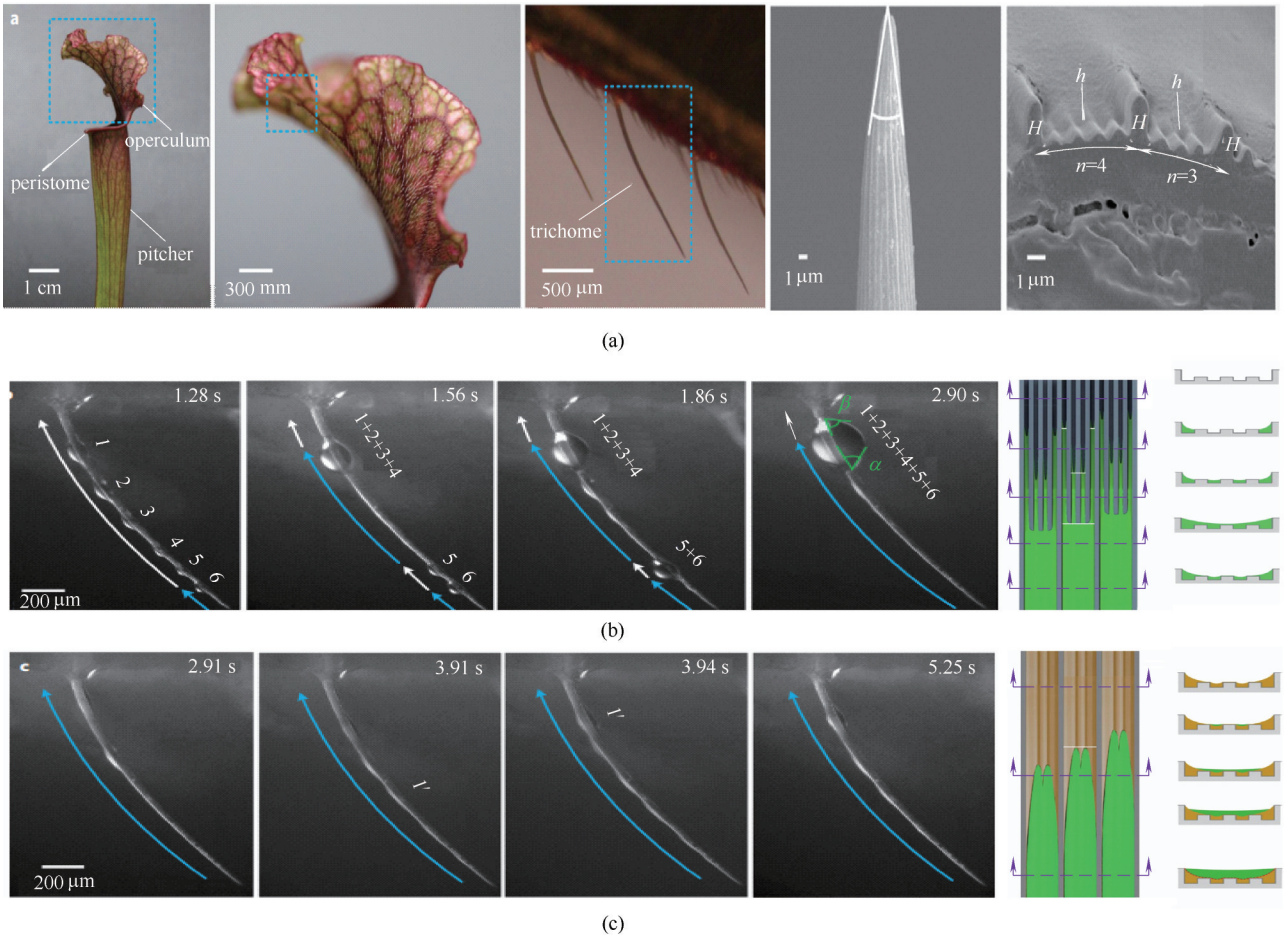


图17　瓶子草高低棱条结构的光学显微图(a),水滴在毛状体上的逐滴输送模式(b),水滴在毛状体上的铺展运输模式(c)[86]

Fig.17　Optical images of the *Sarracenia trichome's* high and low rib structure (a). Drip-by-drop transport pattern of water droplets on a trichome(b). The spreading transport pattern of water droplets on triceps (c)[86]

表1 仿生集水材料在不同外部条件下的雾水收集效率

Table 1 Fog collection efficiencies on the bioinspired surfaces with different external conditions

样品	距离	尺寸	喷雾量	雾水收集效率	文献
CuO-50-PFDT-PS-130表面	7 cm	6.25 cm^2	12 $cm\cdot s^{-1}$	159 $mg\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[36]
Ag/TiO_2复合表面	6 cm	1.32 cm^2	25 $cm\cdot s^{-1}$	1043 $mg\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[39]
润湿性星型图案表面	15 cm	4 cm^2	~75 $cm\cdot s^{-1}$	2780 $mg\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[42]
SHB图案表面	—	4 mm^2	10 $cm\cdot s^{-1}$	61.8 $mg\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[45]
S300表面	10 cm	1 m^2	40~45 $cm\cdot s^{-1}$	5300 $mg\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[47]
CNN/PNF复合膜	25 cm	14 cm^2	7.26 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$	0.12 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$	[77]
3H结合表面	5 cm	2.25 cm^2	1.2 $m\cdot s^{-1}$	0.3 $ml\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$	[79]
经脉网络表面	20 cm	144 cm^2	(0.8 ± 0.1) $m\cdot s^{-1}$	193.7 $g\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[80]
TiO_2/SiO_2/OTES表面	—	9 cm^2	200 $ml\cdot h^{-1}$	12.7 $g\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$	[81]
复合微通道结构表面	5 cm	25 cm^2	0.756 $g\cdot s^{-1}$	66 $mg\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$	[88]

生物受到越来越多的关注，相应的仿生集水材料也在水资源短缺领域表现出巨大潜力，这对一些偏远和欠发达地区的淡水供应问题具有重要意义。但目前制备的雾水收集材料仍然存在以下几方面问题。

(1)除了材料本身的物质和结构因素影响集水量外，一些外部因素也会影响集水过程，例如风速、磁强、温度、湿度、喷雾距离以及喷雾量等。因此，需要建立统一的标准来评判集水效率。

(2)人工微纳米结构表面集水的缺点在于集水过程并不是全天候、快速的，这将阻碍这些材料的实际应用。仿生的最终目的在于应用，研究成果的商业化要求必须考虑技术适用性和扩展性、易操作性、成本效益、稳定性和耐久性等。而目前仿生集水材料的制造技术大多耗时耗力。

(3)单一生物仿生学的优势可能有限，受多生物仿生学启发，设计合理的仿生策略可以应用于更为广泛的集水材料和技术。此外，现有的集水材料主要集中在一维和二维表面上，以后应更多地关注三维集水材料的研制。仿生雾水收集技术对解决干旱地区的淡水获取问题具有重要意义，但这项技术正处于萌芽阶段，人类还有更多的知识要向大自然学习。

符 号 说 明

f_{SL},f_{LV}——分别为液滴与固体接触的面积百分数和液滴与空气接触的面积百分数，%

L——从疏水区到亲水区长度的积分变量，m

R——液滴半径，m

r——局部半径(r_1和r_2是两个相对侧的脊柱局部半径)，m

Z——疏水区域直径的积分变量，m

β——纺锤节或锥形脊柱疏水区域的半顶角，(°)

γ_{SV},γ_{SL},γ_{LV}——分别是固-气、固-液和液-气相之间的界面张力，$mN\cdot m^{-1}$

θ——液滴在光滑固体表面上的本征接触角，(°)

θ^*,θ',θ_a,θ_r——分别为液滴在粗糙表面的表观接触角、液体在理想空气表面的接触角、前进接触角和后退接触角，(°)

参考文献

[1] Gorjian S, Ghobadian B. Solar desalination: a sustainable solution to water crisis in iran[J]. Renew. Sust. Energ. Rev., 2015, **48**: 571-584.

[2] El-Ghonemy A M K. Fresh water production from/by atmospheric air for arid regions, using solar energy: review[J]. Renew. Sust. Energ. Rev., 2012, **16**: 6384-6422.

[3] Grubert E A, Stillwell A S, Webber M E. Where does solar-aided seawater desalination make sense? A method for identifying sustainable sites[J]. Desalination, 2014, **339**: 10-17.

[4] Raluy R G, Serra L, Uche J. Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies[J]. Desalination, 2005, **183**: 81-93.

[5] 文刚, 郭志光, 刘维民. 仿生超润湿材料的研究进展[J]. 中国科学:化学, 2018, **48**: 1531-1547.
Wen G, Guo Z G, Liu W M. Research progress of biomimetic superwetting materials [J]. Scientia Sinica: Chemistry, 2018, **48**: 1531-1547.

[6] 江雷. 仿生智能纳米材料[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 7.
Jiang L. Biomimetic Intelligent Nanomaterials [M]. Beijing: Science Press, 2015: 7.

[7] Wu H, Zhang R, Sun Y, et al. Biomimetic nanofiber patterns with controlled wettability[J]. Soft Matter, 2008, **4**: 2429-2433.

[8] Avinash M B, Verheggen E, Schmuck C, et al. Self-cleaning functional molecular materials[J]. Angew. Chem., Int. Ed., 2012, **51**: 10324-10328.

[9] Abualhamayel H I, Gandhidasan P. A method of obtaining fresh water from the humid atmosphere[J]. Desalination, 1997, **113**:

51-63.

[10] Klemm O, Schemenauer R S, Lummerich A, et al. Fog as a fresh-water resource: overview and perspectives[J]. Ambio, 2012, **41**: 221-234.

[11] Bartholomew G A, Lighton J R B, Louw G N. Energetics of locomotion and patterns of respiration in tenebrionid beetles from the namib desert[J]. J. Comp. Physiol. B, 1985, **155**: 155-162.

[12] Ju J, Bai H, Zheng Y, et al. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus[J]. Nat. Commun., 2012, **3**: 1247.

[13] Yi S, Wang J, Chen Z, et al. Cactus-inspired conical spines with oriented microbarbs for efficient fog harvesting[J]. Adv. Mater. Technol., 2019, **4**: 1900727.

[14] Feng R, Xu C, Song F, et al. A bioinspired slippery surface with stable lubricant impregnation for efficient water harvesting[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, **12**: 12373-12381.

[15] 陈振, 张增志, 杜红梅, 等. 仿生材料在集水领域应用的研究现状[J]. 材料工程, 2020, **48**: 10-18.
Chen Z, Zhang Z Z, Du H M, et al. Research status of biomimetic materials in the field of water collection [J]. Materials Engineering, 2020, **48**:10-18.

[16] Yin K, Du H, Dong X, et al. A simple way to achieve bioinspired hybrid wettability surface with micro/nanopatterns for efficient fog collection[J]. Nanoscale, 2017, **9**: 14620-14626.

[17] Young T. An essay on the cohesion of fluids[J]. Phil. Trans. R. Soc. London, 1805, **95**: 65-87.

[18] Xia F, Jiang L. Bio-inspired, smart, multiscale interfacial materials [J]. Adv. Mater., 2008, **20**: 2842-2858.

[19] Su B, Tian Y, Jiang L. Bioinspired interfaces with superwettability: from materials to chemistry[J]. J. Am. Chem. Soc., 2016, **138**: 1727-1748.

[20] Berg J M, Eriksson L T, Claesson P M, et al. Three-component langmuir-blodgett films with a controllable degree of polarity[J]. Langmuir, 1994, **10**: 1225-1234.

[21] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Ind. Eng. Chem., 1936, **28**: 988-994.

[22] Cassie A, Baxter S. Wettability of porous surfaces[J]. Trans. Faraday Soc., 1944, **40**: 546-551.

[23] Furmidge C. Studies at phase interfaces(I): The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention[J]. J. Colloid Interface Sci., 1962, **17**: 309-324.

[24] Li C, Li J, Chen C, et al. Tailoring ordered taper-nanopore arrays by combined nanosphere self-assembling, imprinting, anodizing and etching[J]. Chem. Commun., 2012, **48**: 5100-5102.

[25] Gao X, Jiang L. Biophysics: water-repellent legs of water striders [J]. Nature, 2004, **432**: 36-38.

[26] Feng L, Zhang Y, Xi J, et al. Petal effect: a superhydrophobic state with high adhesive force[J]. Langmuir, 2008, **24**: 4114-4119.

[27] Parker A R, Lawrence C R. Water capture by a desert beetle[J]. Nature, 2001, **414**: 33-34.

[28] Ju J, Bai H, Zheng Y, et al. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus[J]. Nat. Commun., 2012, **3**: 1-6.

[29] Zheng Y, Bai H, Huang Z, et al. Directional water collection on wetted spider silk[J]. Nature, 2010, **463**: 640-643.

[30] Chen H, Zhang P, Zhang L, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of nepenthes alata[J]. Nature, 2016, **532**: 85-89.

[31] Daniel S. Fast drop movements resulting from the phase change on a gradient surface[J]. Science, **2001**, 291: 633-636.

[32] Chaudhury M K, Whitesides G M. Correlation between surface free energy and surface constitution[J]. Science, 1992, **255**: 1230-1232.

[33] Lorenceau L, Qur D. Drops on a conical wire[J]. J. Fluid Mech., 2004, **510**: 29-45.

[34] Lee J, Hwang S, Cho D H, et al. Rf plasma based selective modification of hydrophilic regions on super hydrophobic surface [J]. Appl. Surf. Sci., 2017, **394**: 543-553.

[35] Gao Y, Wang J, Xia W, et al. Reusable hydrophilic-superhydrophobic patterned weft backed woven fabric for high-efficiency water-harvesting application[J]. ACS Sustain. Chem. Eng., 2018, **6**: 7216-7220.

[36] Wang Y, Zhang L, Wu J, et al. A facile strategy for the fabrication of a bioinspired hydrophilic - superhydrophobic patterned surface for highly efficient fog-harvesting[J]. J. Mater. Chem. A, 2015, **3**: 18963-18969.

[37] Cao M, Xiao J, Yu C, et al. Hydrophobic/hydrophilic cooperative Janus system for enhancement of fog collection[J]. Small, 2015, **11**: 4379-4384.

[38] Wang B, Zhang Y, Liang W, et al. A simple route to transform normal hydrophilic cloth into a superhydrophobic - superhydrophilic hybrid surface[J]. J. Mater. Chem. A, 2014, **2**: 7845-7852.

[39] Xu C, Feng R, Song F, et al. Desert beetle-inspired superhydrophilic/superhydrophobic patterned cellulose film with efficient water collection and antibacterial performance[J]. ACS Sustain. Chem. Eng., 2018, **6**: 14679-14684.

[40] Ye Q, Zhou F, Liu W. Bioinspired catecholic chemistry for surface modification[J]. Chem. Soc. Rev., 2011, **40**: 4244-4258.

[41] Takei G, Nonogi M, Hibara A, et al. Tuning microchannel wettability and fabrication of multiple-step Laplace valves[J]. Lab Chip, 2007, **7**: 596-602.

[42] Bai H, Wang L, Ju J, et al. Efficient water collection on integrative bioinspired surfaces with star-shaped wettability patterns[J]. Adv. Mater., 2014, **26**: 5025-5030.

[43] Zahner D, Abagat J, Svec F, et al. A facile approach to superhydrophilic-superhydrophobic patterns in porous polymer films[J]. Adv. Mater., 2011, **23**: 3030-3034.

[44] Seo J, Lee S, Lee J, et al. Guided transport of water droplets on superhydrophobic-hydrophilic patterned Si nanowires[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2011, **3**: 4722-4729.

[45] Zhang L, Wu J, Hedhili M N, et al. Inkjet printing for direct micropatterning of a superhydrophobic surface: toward biomimetic fog harvesting surfaces[J]. J. Mater. Chem. A, 2015, **3**: 2844-2852.

[46] Nishimoto S, Kubo A, Nohara K, et al. TiO_2-based superhydrophobic-superhydrophilic patterns: fabrication *via* an ink-jet technique and application in offset printing[J]. Appl. Surf. Sci., 2009, **255**: 6221-6225.

[47] Yu Z, Yun F F, Wang Y, et al. Desert beetle-inspired superwettable patterned surfaces for water harvesting[J]. Small, 2017, **13**: 1701403.

[48] Moazzam P, Tavassoli H, Razmjou A, et al. Mist harvesting using bioinspired polydopamine coating and microfabrication technology [J]. Desalination, 2018, **429**: 111-118.

[49] Tian X, Chen Y, Zheng Y, et al. Controlling water capture of bioinspired fibers with hump structures[J]. Adv. Mater., 2011, **23**: 5486-5491.

[50] Day R W, Mankin M N, Gao R, et al. Plateau-rayleigh crystal growth of periodic shells on one-dimensional substrates[J]. Nat. Nanotechnol., 2015, **10**: 345-352

[51] Bai H, Tian X, Zheng Y, et al. Direction controlled driving of tiny water drops on bioinspired artificial spider silks[J]. Adv. Mater., 2010, **22**: 5521-5525.

[52] Bai H, Ju J, Sun R, et al. Controlled fabrication and water collection ability of bioinspired artificial spider silks[J]. Adv. Mater., 2011, **23**: 3708-3711.

[53] Chen Y, Wang L, Xue Y, et al. Bioinspired spindle-knotted fibers with a strong water-collecting ability from a humid environment [J]. Soft Matter, 2012, **8**: 11450-11454.

[54] Bai H, Sun R, Ju J, et al. Large-scale fabrication of bioinspired fibers for directional water collection[J]. Small, 2011, **7**: 3429-3433.

[55] He X H, Wang W, Liu Y M, et al. Microfluidic fabrication of bio-inspired microfibers with controllable magnetic spindle-knots for 3D assembly and water collection[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, **7**: 17471-17481.

[56] Choi C H, Yi H, Hwang S, et al. Microfluidic fabrication of complex-shaped microfibers by liquid template-aided multiphase microflow[J]. Lab Chip, 2011, **11**: 1477-1483.

[57] Cheng Y, Zheng F, Lu J, et al. Bioinspired multicompartmental microfibers from microfluidics[J]. Adv. Mater., 2014, **26**: 5184-5190.

[58] Tian X, Bai H, Zheng Y, et al. Bio-inspired heterostructured bead-on-string fibers that respond to environmental wetting[J]. Adv. Funct. Mater., 2011, **21**: 1398-1402.

[59] Zhao L, Song C, Zhang M, et al. Bioinspired heterostructured bead-on-string fibers *via* controlling the wet-assembly of nanoparticles[J]. Chem. Commun., 2014, **50**: 10651-10654.

[60] Dong H, Wang N, Wang L, et al. Bioinspired electrospun knotted microfibers for fog harvesting[J]. ChemPhysChem, 2012, **13**: 1153-1156.

[61] Ju J, Yao X, Yang S, et al. Cactus stem inspired cone-arrayed surfaces for efficient fog collection[J]. Adv. Funct. Mater., 2014, **24**: 6933-6938.

[62] Peng Y, He Y, Yang S, et al. Magnetically induced fog harvesting *via* flexible conical arrays[J]. Adv. Funct. Mater., 2015, **25**: 5967-5971.

[63] Ju J, Xiao K, Yao X, et al. Bioinspired conical copper wire with gradient wettability for continuous and efficient fog collection[J]. Adv. Mater., 2013, **25**: 5937-5942.

[64] Heng X, Xiang M, Lu Z, et al. Branched ZnO wire structures for water collection inspired by cacti[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, **6**: 8032-8041.

[65] Xing H, Cheng J, Zhou C, et al. Fog collection on a conical copper wire: effect of fog flow velocity and surface morphology[J]. Micro Nano Lett., 2018, **13**: 1068-1070.

[66] Li X, Yang Y, Liu L, et al. 3D - printed cactus - inspired spine structures for highly efficient water collection[J]. Adv. Mater. Interfaces, 2019, **7**: 1-10.

[67] Wong T S, Kang S H, Tang S K, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. Nature, 2011, **477**: 443-447.

[68] Wang Y, Qian B, Lai C, et al. Flexible slippery surface to manipulate droplet coalescence and sliding, and its practicability in wind-resistant water collection[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, **9**: 24428-24432.

[69] Huang Y, Stogin B B, Sun N, et al. A switchable cross-species liquid repellent surface[J]. Adv. Mater., 2017, **29**: 1604641.

[70] Chen H, Zhang L, Zhang P, et al. A novel bioinspired continuous unidirectional liquid spreading surface structure from the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. Small, 2017, **13**: 1601676.

[71] Li C, Li N, Zhang X, et al. Uni-directional transportation on peristome-mimetic surfaces for completely wetting liquids[J]. Angew. Chem., Int. Ed., 2016, **55**:14988-14992.

[72] Tandon V, Kang W S, Robbins T A, et al. Microfabricated reciprocating micropump for intracochlear drug delivery with integrated drug/fluid storage and electronically controlled dosing [J]. Lab Chip, 2016, **16**: 829-846.

[73] Moghadam A D, Omrani E, Menezes P L, et al. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review[J]. Compos. B. Eng., 2015, **77**: 402-420.

[74] Zhong L, Zhang R, Li J, et al. Efficient fog harvesting based on 1D copper wire inspired by the plant pitaya[J]. Langmuir, 2018, **34**: 15259-15267.

[75] Varanasi K K, Ming H, Bhate N, et al. Spatial control in the heterogeneous nucleation of water[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, **95**: 094101.

[76] He M, Zhang Q, Zeng X, et al. Hierarchical porous surface for efficiently controlling microdroplets self-removal[J]. Adv. Mater., 2013, **25**: 2291-2295.

[77] Hu R, Wang N, Hou L, et al. A bioinspired hybrid membrane with wettability and topology anisotropy for highly efficient fog collection[J]. J. Mater. Chem. A, 2019, **7**: 124-132.

[78] Ren F, Li G, Zhang Z, et al. A single-layer Janus membrane with dual gradient conical micropore arrays for self-driving fog collection[J]. J. Mater. Chem. A, 2017, **5**: 18403-18408.

[79] Bai H, Zhang C, Long Z, et al. A hierarchical hydrophilic/hydrophobic cooperative fog collector possessing self-pumped droplet delivering ability[J]. J. Mater. Chem. A, 2018, **6**: 20966-20972.

[80] Liu W, Fan P, Cai M, et al. An integrative bioinspired venation network with ultra-contrasting wettability for large-scale strongly self-driven and efficient water collection[J]. Nanoscale, 2019, **11**: 8940-8949.

[81] Wang Y, Wang X, Lai C, et al. Biomimetic water-collecting fabric

with light-induced superhydrophilic bumps[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016, **8**: 2950-2960.

[82] Xing Y, Shang W, Wang Q, et al. Integrative bioinspired surface with wettable patterns and gradient for enhancement of fog collection[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, **11**: 10951-10958.

[83] Park K C, Kim P, Grinthal A, et al. Condensation on slippery asymmetric bumps[J]. Nature, 2016, **531**(7592): 78-82.

[84] Zhang X, Sun L, Wang Y, et al. Multibioinspired slippery surfaces with wettable bump arrays for droplets pumping[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2019, **116**: 20863-20868.

[85] Wang Y, Liang X, Ma K, et al. Nature-inspired windmill for water collection in complex windy environments[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, **11**: 17952-17959.

[86] Chen H, Ran T, Gan Y, et al. Ultrafast water harvesting and transport in hierarchical microchannels[J]. Nat. Mater., 2018, **17**: 935-942.

[87] Li J, Zhou Y, Wang W, et al. A bio-inspired superhydrophobic surface for fog collection and directional water transport[J]. J. Alloys Compd., 2020, **819**: 152968.

[88] Kim S W, Kim J, Park S S, et al. Enhanced water collection of bio-inspired functional surfaces in high-speed flow for high performance demister[J]. Desalination, 2020, **479**: 114314.