高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

研究论文 / Research Article DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26271

棉非织造布基太阳能蒸发器的制备及光热蒸发性能

马文龙[1] 杨凯璐[1] 陈 强[1] 陈明星[1,2*]

([1]新疆科技学院纺织与材料工程学院 智能制造与先进纺织材料协同创新中心 库尔勒 084100)
([2]河北科技大学纺织服装学院 石家庄 050018)

摘 要 为解决太阳能蒸发器在处理高盐印染废水时易发生孔道堵塞、耐久性差等问题，以棉非织造布(CNWF)为基材，通过单宁酸(TA)改性构建超亲水网络，并引入碳纳米管(CNT)作为光热转换材料，同时借助聚乙烯醇(PVA)与TA之间的氢键交联作用，成功制备了CNT/PVA/TA/CNWF蒸发器。研究了不同CNT质量浓度对蒸发器微观形貌、润湿性、力学性能及光热蒸发性能的影响。结果表明：TA涂层改性及TA与PVA的结合未改变蒸发器的超亲水性能，且蒸发器的力学性能显著提升；当CNT质量浓度为0.6 g/L时，CNT在纤维表面均匀负载，复合材料保持良好多孔结构，CTC-4在1个标准太阳光强下纯水的蒸发速率达到1.60 $kg·m^{-2}·h^{-1}$，经10次循环使用蒸发速率仍能达到1.32 $kg·m^{-2}·h^{-1}$。在模拟含盐印染废水(10 wt% NaCl，20 mg/L染料)实验中，4 h内水收集速率稳定在0.5 $kg·m^{-2}·h^{-1}$；户外实际测试中(光强1206.5 $W·m^{-2}$)，水收集速率达0.78 $kg·m^{-2}·h^{-1}$，净化后水质符合国家饮用水标准。该蒸发器展现出优异的光热蒸发性能和水回收利用性，为开发超亲水、耐盐和可循环使用的太阳能蒸发器提供参考。

关键词 碳纳米管；棉非织造布；蒸发器；光热蒸发

Preparation and Photothermal Evaporation Performance of a Cotton Nonwoven-based Solar Evaporator

Wen-long Ma[1], Kai-lu Yang[1], Qiang Chen[1], Ming-xing Chen[1,2*]

([1] *School of Textile and Materials Engineering, Collaborative Innovation Center of Intelligent Manufacturing and Advanced Textile Materials, Xinjiang College of Science & Technology, Korla 084100*)
([2] *College of Textile and Garments, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018*)

Abstract To address issues such as channel blockage and poor durability in solar evaporators when treating high-salinity textile dyeing wastewater, this study used cotton nonwoven fabric (CNWF) as the substrate. By modifying it with tannic acid (TA) to form a superhydrophilic network and introducing carbon nanotubes (CNTs) as a photothermal conversion material, while utilizing hydrogen-bond cross-linking between polyvinyl alcohol (PVA) and TA, a CNT/PVA/TA/CNWF composite evaporator was successfully fabricated. The effects of different CNT mass concentrations on the evaporator's microstructure, wettability, mechanical properties, and photothermal evaporation performance were investigated. The results indicate that the TA coating modification and the combination of TA with PVA did not alter the evaporator's superhydrophilic properties, while the mechanical properties of the evaporator were significantly enhanced; when the CNT mass concentration was 0.6 g/L, CNTs were uniformly loaded onto the fiber surface, and the composite maintained a good porous structure; the evaporation rate of pure water for CTC-4 under 1 standard solar irradiance reached 1.60 $kg·m^{-2}·h^{-1}$, and after 10 cycles of use, the evaporation rate remained at

2026-05-30 收稿, 2026-07-13 录用
基金项目: 新疆科技学院校级重点科研基金(基金号 2025-KYZD02); 新疆科技学院校级科研基金(基金号 2025-KYPT42)
* 通信联系人: 陈明星, E-mail: mxchen1990@163.com

1.32 kg·m^{-2}·h^{-1}. In experiments simulating saline textile dyeing wastewater (10% NaCl, 20 mg/L dye), the water collection rate remained stable at 0.5 kg·m^{-2}·h^{-1} over a 4-hour period; in actual outdoor testing (irradiance of 1206.5 W·m^{-2}), the water collection rate reached 0.78 kg·m^{-2}·h^{-1}, and the purified water met national drinking water standards. This evaporator demonstrates excellent photothermal evaporation performance and water recovery capabilities, providing a reference for the development of superhydrophilic, salt-tolerant, and reusable solar evaporators.

Keywords Carbon nanotubes; Cotton nonwoven fabric; Evaporator; Photothermal evaporation

引用: 马文龙, 杨凯璐, 陈强, 陈明星. 棉非织造布基太阳能蒸发器的制备及光热蒸发性能. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26271

Citation: Ma, W. L.; Yang, K. L.; Chen, Q.; Chen, M. X. Preparation and photothermal evaporation performance of a cotton nonwoven-based solar evaporator. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26271

地球上约75%的面积为水体所覆盖，但能够直接利用的清洁淡水十分稀缺，且空间分布严重不均。利用太阳能蒸发技术从废水或海水中获取蒸汽和清洁水，是缓解水资源短缺、推动经济绿色可持续发展的有效途径之一[1,2]。传统海水或废水淡化工艺普遍存在能耗偏高、设备易损耗、综合成本较高等不足[3]。太阳能海水淡化技术因兼具绿色环保、运行成本低、效率较高等优势而得到广泛关注。尤其是太阳能驱动的界面光热蒸发技术，因低碳、可持续等突出特点，与国家“双碳”目标高度契合，在纺织废水处理领域具有广阔发展前景[4,5]。

水凝胶是通过化学或物理交联制备的亲水性聚合物，在水中可迅速溶胀而不溶解，具有稳定的网络结构和性能可调控性[6]。因其可调控的亲水网络结构和低导热系数[7]，水凝胶基太阳能蒸发器在海水淡化领域具有巨大前景。然而，水凝胶基蒸发器的机械性能较差，制备过程复杂，一定程度上限制其应用。因此，有研究将水凝胶与织物结合制备高性能太阳能蒸发器。张昕锐等[8]首先在碳布上喷涂碳纳米管(CNT)，然后利用聚乙烯醇(PVA)的黏附作用将CNT固定在碳布表面，1个太阳光强照射下，在3.5 wt% NaCl的溶液中系统的净蒸发速率达到了1.5 kg·m^{-2}·h^{-1}，而在与2 A电流的联合作用下，净蒸发速率升至5.08 kg·m^{-2}·h^{-1}。Wu等[9]在棉织物上涂覆GO/PVA分散液并进行冰催化硼酸盐交联，制备出了一种光热非对称水凝胶织物。该织物呈现出三维互联孔隙结构，且内部还有许多相互连接的尖锐蜂窝状横向通道。在1个太阳光强照射下的水分蒸发率为1.74 kg·m^{-2}·h^{-1}。然而，PVA与织物纤维的结合主要依靠分子链上大量羟基与纤维素羟基之间形成的氢键[10]，与织物的表面结合力相对较弱，且PVA本身具有极高的亲水性，在遇水环境下，水分子会强烈竞争这些氢键位点，导致PVA涂层迅速溶胀、软化甚至脱落，严重影响蒸发器的应用。

单宁酸是一种天然多酚，其分子结构中富含邻苯三酚/邻苯二酚基团，能与PVA发生强烈的分子间氢键交联和π-π堆积作用的物理交联，两者结合稳定[11~13]。因此，本研究通过分步改性法将单宁酸(TA)和PVA逐层沉积到棉织物表面，以TA为中间层既可通过氢键将PVA交联锚定在纤维上，又可覆盖纤维素的异相成核位点，抑制盐结晶的形成。以棉针刺非织造布为基材，通过TA和PVA分步改性构建超亲水网络，棉非织造布的多孔结构与超亲水结构有利于盐分扩散，避免局部盐浓度饱和而析出；以CNT为光热组分实现宽谱光吸收，通过PVA与TA之间通过氢键相互结合，从而实现CNT/PVA涂层在纤维表面的牢固负载[14,15]，成功制备CNT/PVA/TA/棉非织造布(CNWF)蒸发器。通过对CNT/PVA/TA/CNWF蒸发器的微观形貌、接触角、力学性能和光热蒸发性能进行测试和表征，探究了CNT质量浓度对CNT/PVA/TA/CNWF蒸发器结构和性能的影响，为制备可处理实际废水的高效太阳能蒸发器提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

单宁酸(TA)，分析纯，天津市永大化学试剂有限公司；三(羟甲基)氨基甲烷(Tris)，分析纯，山东科源生化有限公司；多壁碳纳米管(MWCNTs)，碳纳米管直径D=8~20 nm，碳纳米管长度L=10~30 μm，南京纳熵新材料科技有限公司；聚乙烯醇(PVA)，88%，上海爱纯生物科技有限公司；盐酸标准溶液，1.014 mol/L，坛墨质检–标准物质中心；氯化钠(≥99.5%)、亚甲基蓝(分析纯)，天津市永大化学试剂有限公司；刚果红，98%，西亚试剂；棉非织造布(CNWF)。

1.2 材料制备

CNT/TA/CNWF蒸发器的制备流程如图1所示。将6 g/L的单宁酸溶于pH=8.5的Tris-HCl缓冲溶液得到单宁酸改性溶液，将棉非织布浸入并静置15 h，取出并用纯水清洗3次，以去除纤维表面结合不牢聚合物，得到TA改性织物。将一定量CNT分散于20 mL乙醇中，与20 wt%的PVA水溶液混合均匀。将上述TA改性织物浸入上述混合溶液浸泡0.5 h，取出并用纯水清洗3次，60 °C干燥1 h，得到CNT/TA/CNWF蒸发器。不同含量CNT改性蒸发器命名如表1所示。

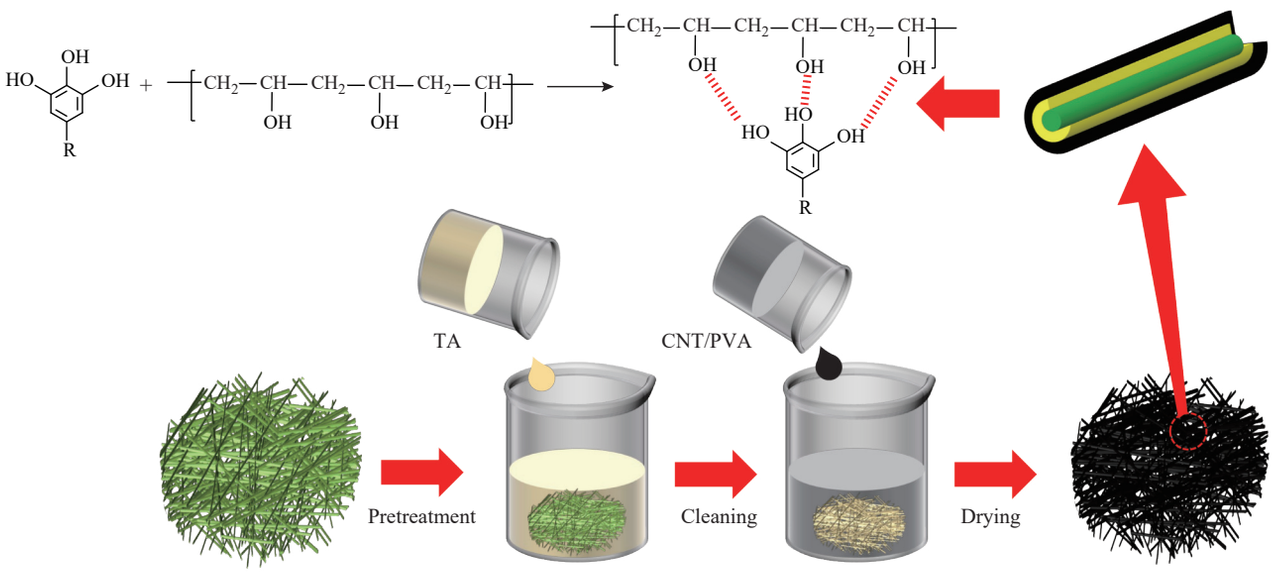

图 1 CNT/TA/CNWF蒸发器制备工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the CNT/TA/CNWF evaporator preparation process

表 1 不同含量CNT改性蒸发器命名

Table 1 Nomenclature for CNT-modified evaporators with different CNT contents

Sample	TA mass concentration (g/L)	CNT mass concentration (g/L)	PVA solution soaking time (h)
CTC-1	0	0	0
CTC-2	6	0	0
CTC-3	6	0	0.5
CTC-4	6	0.3	0.5
CTC-5	6	0.6	0.5
CTC-6	6	0.9	0.5

1.3 材料表征

使用飞纳G6型台式电子显微镜(复纳科学仪器(上海)有限公司)观察蒸发器微观形貌。测试前，样品需充分干燥和喷金处理。

使用JCY-4型接触角仪器(西安研硕仪器设备有限公司)测量样品的水接触角。将待测样品裁剪成10 mm × 10 mm，利用双面胶将其黏贴在载玻片上，将去离子水滴在样品上，水滴接触表面后开始记录。每个样品至少测试3个不同位置，取平均值。

1.4 力学性能测试

使用温州大荣YG(B)026SJ-500型电子织物强力机测试蒸发器的拉伸性能，试样尺寸长×宽为50 mm × 200 mm，预加张力2 N，试样夹持距离为100 mm。拉伸过程中的应力应计算见式(1)和(2)：

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100\% \tag{2}$$

式中，σ为断裂应力，MPa；F为断裂强力，N；S为试样横截面积，mm^2；ε为断裂应变；%；ΔL为断裂伸长量，mm；L为初始夹持距离，100 mm。

1.5 光热性能测试

在恒温恒湿实验室内开展太阳能水蒸发实验。将蒸发器件置于装有水的烧杯中，使用PLS-SXE300+型氙灯模拟太阳光。使用SM206E-SOLAR型光功率计(深圳市欣宝瑞仪器有限公司)校准辐照度(光强误差≤3%)。通过JA4003N型电子天平(上海菁海仪器有限公司)监测蒸发过程，每20 min记录1次水的质量变化，测量精度为0.01 g。蒸发速率E的计算式如下：

$$E = \frac{m}{S\Delta t} \quad (3)$$

式中，E为蒸发速率，kg·m^{-2}·h^{-1}；m为质量，kg；Δt为变化时间，h；S为光照面积，m^2。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

图2为经TA和CNT改性后所得蒸发器的表面SEM图。由图2(a)~图2(b)可知，CNWF具有多孔网络结构，这种多孔结构有利于水分子快速运输，为蒸发器蒸发效率的提升提供保障。经TA改性后纤维表面出现明显的TA沉积层并包覆纤维，其多孔结构未被破坏。从图2(c)可见，PVA包覆纤维并将相邻的纤维粘连一起。图2(d)~图2(f)可知，随着改性溶液中CNT浓度的增大，CNT在纤维表面的CNT负载明显增多，大量的CNT将纤维相互粘连，对提高蒸发器力学稳定性具有积极作用。然而，大量CNT聚集为颗粒状并堵塞蒸发器的孔隙，破坏了其多孔结构，不利于水蒸气的逸出。图2(g)为不同制备条件下的样品实物图，经TA、TA/PVA、TA/PVA/CNT改性样品颜色明显不同，且随着CNT浓度的提升，样品颜色逐渐加深。

2.2 RTIR分析

FTIR光谱图如图3所示。所有织物均在3330 cm^{-1}附近表现出宽的O－H伸缩谱带，在2896 cm处有C－H伸缩振动[16]。纤维素骨架振动包括1420 cm^{-1}处的C－H弯曲和1314 cm^{-1}处的C－O伸缩[17,18]。CTC-2在1710 cm^{-1}处出现新的羰基吸收峰，在1609 cm^{-1}处出现明显的芳香族C＝C伸缩谱带[19]，证明TA成功引入到纤维表面。在3435 cm^{-1}处的峰是由分子间和分子内氢键相互作用引起的－OH的伸缩振动峰，在2923~2850 cm^{-1}处出现的峰为PVA中－CH_2团的伸缩振动峰[20]。在3100~3600 cm^{-1}之间为－OH基团的拉伸振动峰，－OH基团的拉伸振动峰位随着PVA的引入峰值增强，证明了TA和PVA之间存在氢键的相互作用。从FTIR图中可以看出，随着PVA的引入，－OH基团的拉伸振动峰未出现明显红移，这是因为PVA与TA的接触面积小导致的。在3432.4 cm^{-1}处由于羧基中－OH伸缩振动产生的吸收峰，在1725 cm^{-1}处由于羧基C＝O伸缩振动产生的吸收峰，1638 cm^{-1}处是由于多壁碳纳米管中C＝C伸缩振动产生的吸收峰[21,22]。以上结果表明，CNT、PVA、TA成功复合到棉织物表面。

2.3 润湿性能

如图4为不同样品的水接触角。由图4可知，纯棉无纺布的接触角接近于0°，具有超亲水性，TA改性织

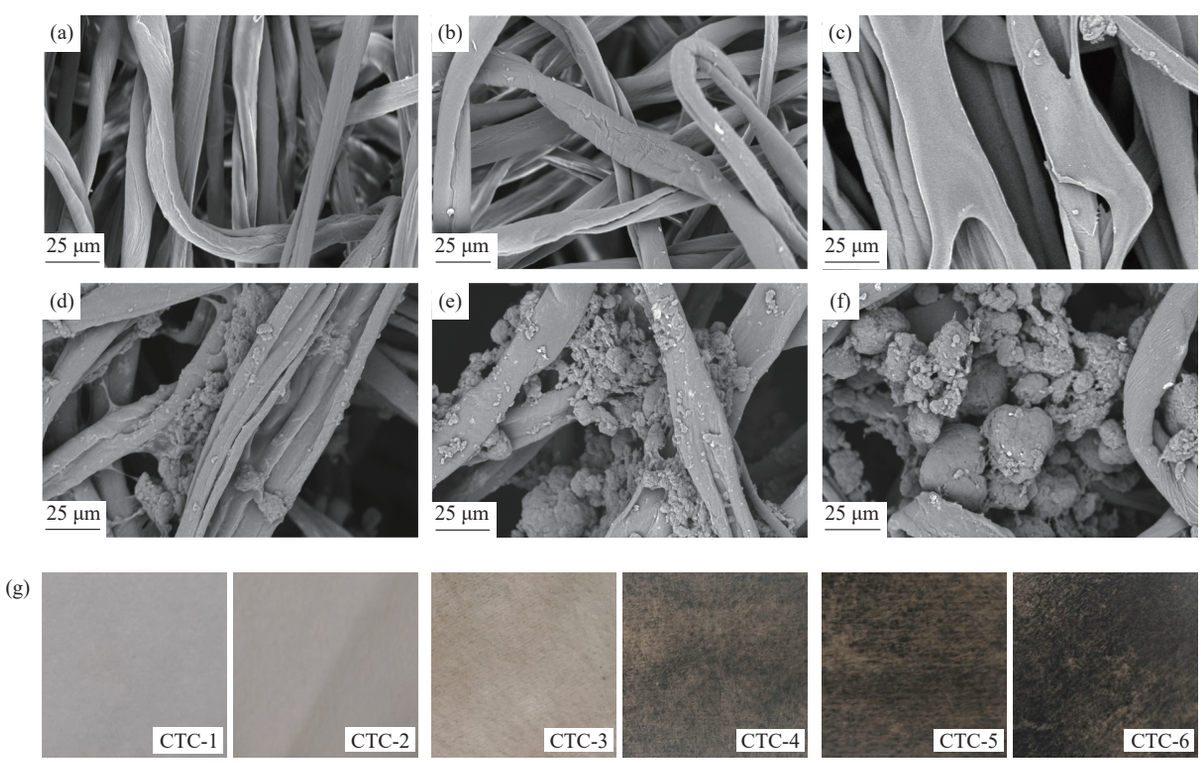

图 2 为不同制备条件下CNT/TA/CNWF蒸发器的微观形貌(a~f)和实物图(g)

Fig. 2 Microscopic morphologies (a–f) and a photograph (g) of the CNT/TA/CNWF evaporator under different preparation conditions

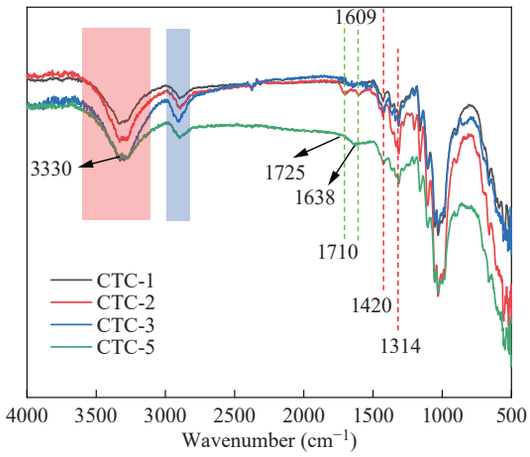

图 3 CNT/TA/CNWF 蒸发器的FTIR分析

Fig. 3 FTIR spectra of CNT/TA/CNWF evaporator

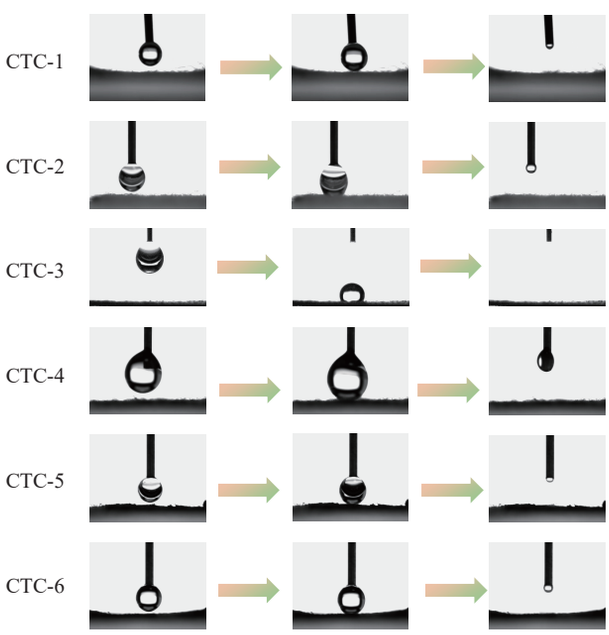

图 4 CNT/TA/CNWF蒸发器水接触角

Fig. 4 Water contact angle on the CNT/TA/CNWF evaporator

物和PVA/TA改性织物的亲水性无明显变化，这是因为单宁酸的酚羟基和PVA的羟基均具有优异的亲水性；随着CNT含量的增加，蒸发器的亲水性无明显变化，主要是由于亲水性PVA将CNT进行包覆，且CNT的粗糙多孔结构有助于毛细管效应物理锁住和吸走水分，增强材料亲水效果，对于蒸发过程中水分的传输和散发具有重要作用。

2.4 力学性能

由图5可知，经TA改性后蒸发器的断裂应力提升13.2%，断裂应变下降36.5%，主要是因为TA在纤维表面的沉积限制了纤维的滑移和伸长。随着PVA的沉积，PVA与TA之间通过氢键结合使PVA与TA涂层

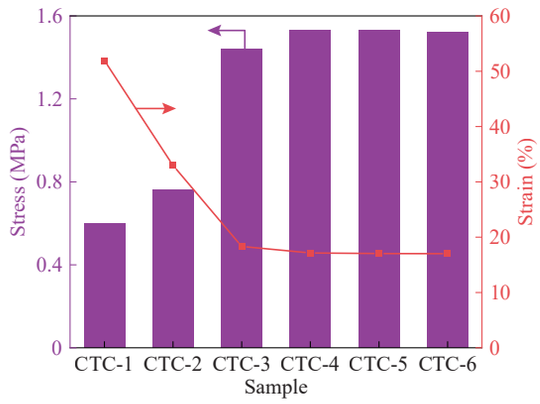

图 5 CNT/TA/CNWF蒸发器的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of CNT/TA/CNWF evaporator

及其自身发生交联，从而大幅提升蒸发器的力学性能；而蒸发器的断裂伸长率大幅降低，主要是因为PVA与TA涂层交联以及PVA涂层干燥后形成致密的保护层，限制了纤维的滑移和蠕动。与CTC-1相比，CTC-5的断裂应力提升1.55倍，断裂伸长率下降67.2%，且随着CNT的含量变化，蒸发器的断裂应力和断裂应变保持稳定，表明蒸发器力学性能的变化主要是由TA涂层和PVA涂层负载导致的。

2.5 光热蒸发

通过搭建测试装置，见图6(a)，实时监测蒸发过程中水质量的变化，评估蒸发器的光热蒸发性能。图6(b)和图6(c)为1个标准太阳光强下蒸发器的温度变化，数据显示，CNT的负载显著提升了蒸发器的表面温度，随着CNT浓度与蒸发器的表面温度成正比。图6(d)为蒸发器在1个标准太阳光强下蒸发器的质量变化，所有蒸发器中水的质量损失均与时间呈线性关系，表明蒸发过程稳定且可控。图6(e)为由公式(3)计算得出的蒸发器蒸发速率，CTC-4的蒸发速率达到1.60 $kg·m^{-2}·h^{-1}$，主要是因为CNT和PVA的引入未改变蒸发器的超亲水性，且蒸发器的表面温度大幅提升，合适的负载量对于蒸发器的多孔结构影响较小，使得蒸发器的蒸发速率得到提升。CTC-5的蒸发速率为1.16 $kg·m^{-2}·h^{-1}$，明显低于CTC-4，这可能是因为过多聚集的CNT堵塞了蒸发器的孔隙通道，阻碍了水蒸气的散逸，微观形貌实验结果也证实了这一结果。

为研究棉非织造布基蒸发器用于海水淡化时的蒸发性能，用质量分数为5%、10%、15%的氯化钠溶液模拟真实海水，测试其在1000 $W·m^2$光强下的蒸发性能，实验结果如图6(f)~6(g)所示。实验数据显示，随着NaCl质量分数的增加，蒸发器CTC-4的蒸发速率有所下降，在15%的NaCl溶液中的蒸发速率依然

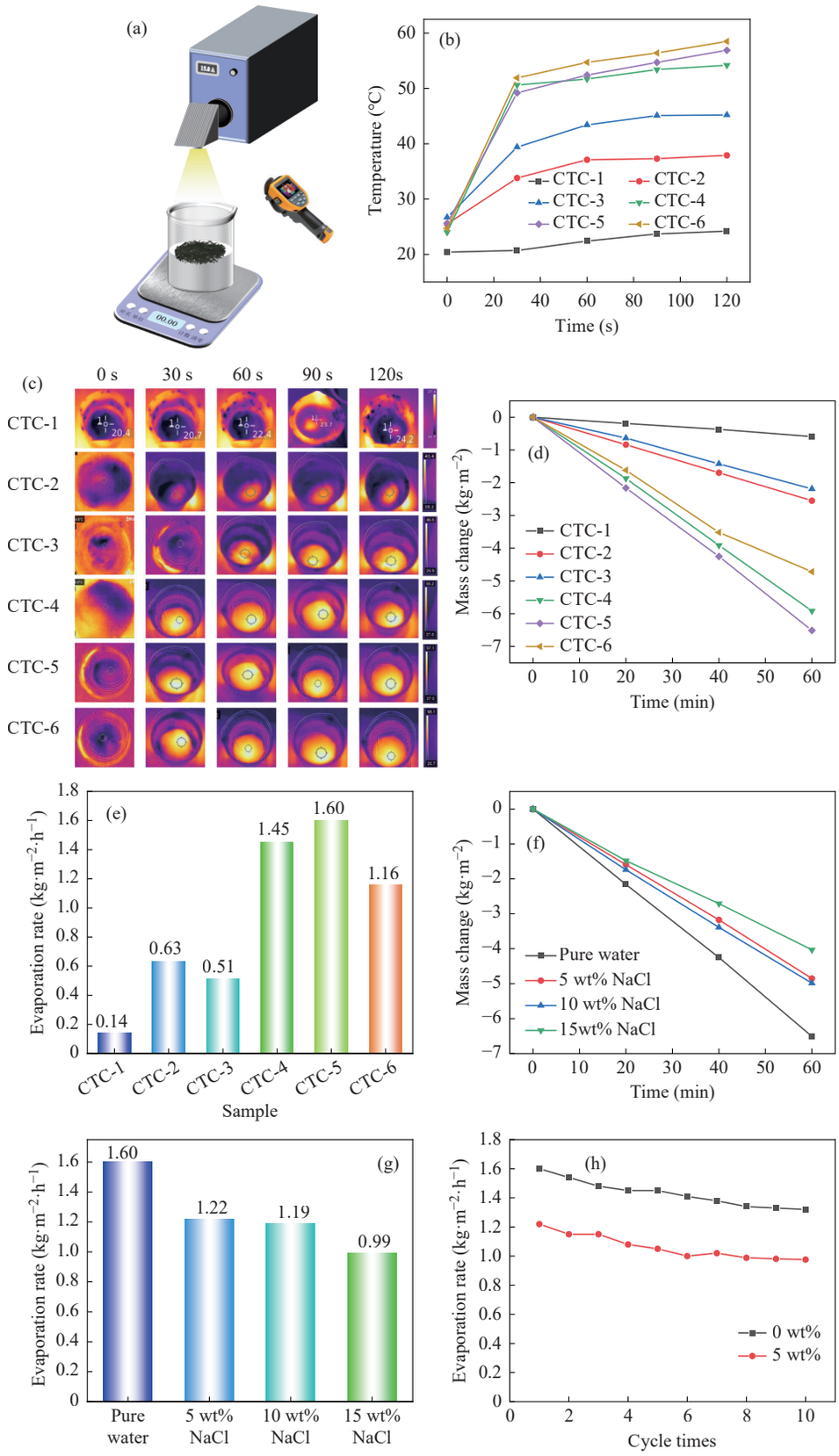

图 6 CNT/TA/CNWF蒸发器的光热蒸发性能: (a)测试原理图; (b)温度变化曲线图; (c)温度变化热成像图; (d)纯水质量变化; (e)纯水蒸发速率; (f)不同含盐量质量变化; (g)不同含盐量蒸发速率; (h)循环使用

Fig. 6 Photothermal evaporation performance of the CNT/TA/CNWF evaporator: (a) Test schematic; (b) Temperature change curve; (c) Thermal imaging of temperature changes; (d) Mass change of pure water; (e) Evaporation rate of pure water; (f) Mass change at different salt concentrations; (g) Evaporation rates at different salt concentrations; (h) Reuse Cycling performance

达到0.99 kg·m^{-2}·h^{-1}。随着蒸发过程的进行，棉非织造布基蒸发器表面盐浓度逐渐增大，并无明显盐结晶产生，主要是因为PVA/TA交联网络在蒸发器表面形成一层高度水合的类水凝胶层，干扰了盐晶核的产生并促进盐离子反向扩散，从而实现了即使表面盐浓度升高，盐分也只以离子态存在而无晶体析出的优异抗盐性能[23]。图6(h)为棉非织造布基蒸发器在纯水和5 wt%的NaCl溶液中循环使用情况。结果表明，在纯水和5 wt% NaCl溶液中循环使用10次后棉非织造布基蒸发器的蒸发速率分别下降17.5%和20.0%。随着循环使用次数的增加使得织物表面出现少量盐结晶，这可能是因为循环使用过程中棉纤维在反复溶胀—收缩下会产生微裂缝，这些微裂缝的毛细管力会滞留高浓度盐水，且水交换极慢，极易形成结晶。

2.6 模拟含盐印染废水净化

为研究棉非织造布基蒸发器对含盐印染废水的光热蒸发性能，以10 wt% NaCl、20 mg/L染料(MB、CR)的混合溶液模拟含盐印染废水，测试其在1000 W·m^{2}光强下的蒸发性能，实验结果如图7所示。如图7(a)所示，对含有不同染料的含盐印染废水棉非织造布基蒸发器的水收集速率在4 h内稳定在0.5 kg·m^{-2}·h^{-1}，故染料种类对于蒸发器的水收集速率影响较小。图7(b)~7(d)所示为含盐印染废水净化前后的紫外吸收光谱和电导率。结果表明，收集到的净化水符合国家饮用水标准，在海水淡化、印染废水淡化及生活饮用水制备等领域具有一定前景。

图8为在新疆库尔勒2026年4月15日对棉非织造布基蒸发器净化含盐印染废水的性能测试结果以后，自制户外蒸发装置。如图8(a)所示，随着光强的增加，收集装置的水收集速率增大，水收集速率与光强成正比，在光强为1206.5 W·m^{-2}时水收集速率为0.78 kg·m^{-2}·h^{-1}。图8(b)~图8(c)为含盐印染废水净化前后的紫外吸收光谱和电导率。结果表明，收集到的净化水符合国家饮用水标准。

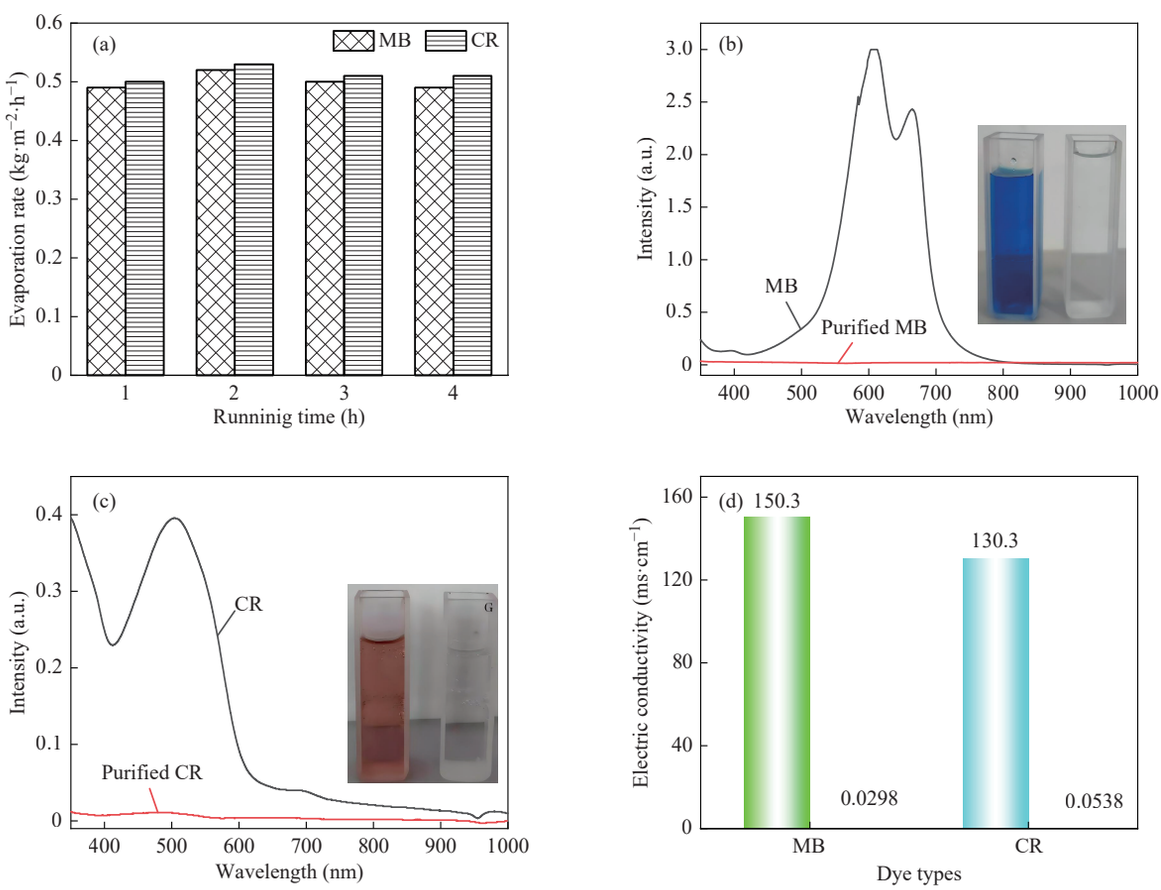

图 7 模拟含盐印染废水的光热蒸发性能: (a)蒸发速率; (b) MB染料含盐废水紫外吸收光谱; (c) CR染料含盐废水紫外吸收光谱; (d)电导率

Fig. 7 Simulation of the photothermal evaporation performance of saline dyeing wastewater: (a) Evaporation rate; (b) UV absorption spectrum of saline wastewater containing MB dye; (c) UV absorption spectrum of saline wastewater containing CR dye; (d) conductivity

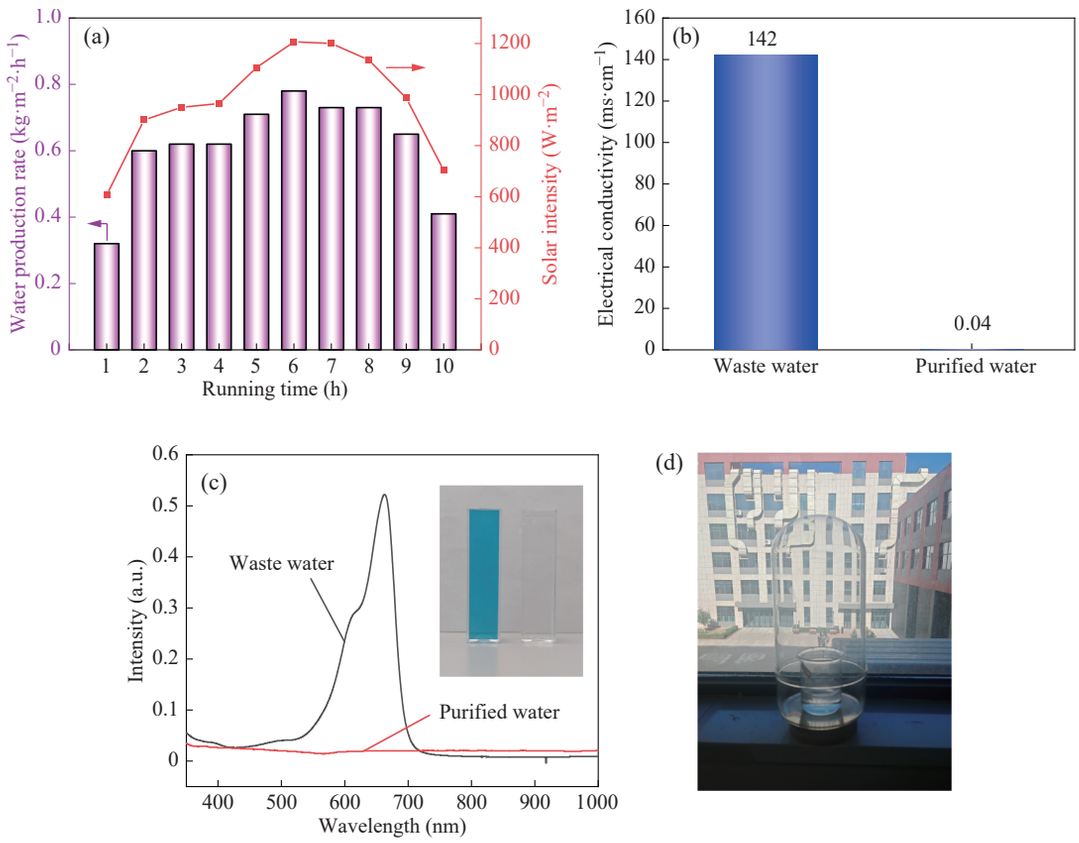

图 8 户外CTC-4蒸发器的蒸发性能: (a)水收集速率; (b)废液净化前后电导率; (c) 废液净化前后紫外吸收光谱。(d)光热蒸发测试装置实物

Fig. 8 Evaporation performance of the outdoor CTC-4 evaporator: (a) Water collection rate; (b) Conductivity of the waste liquid before and after purification; (c) UV absorption spectra of the waste liquid before and after purification. (d) photograph of the solar-thermal evaporation test setup

3 结论

以棉非织造布为基材，单宁酸和聚乙烯醇为黏附剂，碳纳米管为光吸收材料，利用仿生改性法和共负载法成功制得超亲水CNT/PVA/TA/CNWF蒸发器。PVA与TA通过氢键交联使得CNT在织物表面均匀负载和稳定结合。实验结果表明: 当CNT质量浓度为0.6 g/L时，CNT在织物表面均匀负载，在1太阳光强照射下蒸发速率达到1.60 kg·m^{-2}·h^{-1}，4 h内水收集速率稳定在0.5 kg·m^{-2}·h^{-1}。在户外实际测试中，蒸发器对含盐印染废水的水收集速率最高达到0.78 kg·m^{-2}·h^{-1}，且收集水符合国家饮用水标准，所制备蒸发器在实际废水处理中表现出显著净化潜力，为高效、耐久型太阳能蒸发器的开发提供参考。

参 考 文 献

1 焦欢, 陈楚楚, 金永灿, 梁志强, 姜波. 基于太阳能驱动界面蒸发器复合材料的研究进展. 复合材料学报, **2025**, 42(3), 1207−1224.

2 孙梦茜, 陈志莉, 陈黎, 唐珊, 李光学. 太阳能驱动界面蒸发海水淡化技术研究进展. 太阳能学报, **2024**, 45(8), 423−431.

3 胡奇森, 张婉晴, 刘会娥, 陈爽, 段莹莹, 王静宜. 石墨烯/三聚氰胺海绵结构的优化及光热蒸发性能评价. 复合材料学报, **2025**, 42(8), 4459−4469.

4 顾子龙, 王贝诺, 顾佳阳, 安志杭, 张涛, 马学所, 黄凌琪, 盛仲夷, 刘赫扬. 木质素基聚合物微球的制备及其光热转化性能研究. 高分子通报, **2024**, 37(9), 1291−1299.

5 于清波, 王猛, 杨硕, 徐子涉, 冯秀娟, 李宪华. 一举两得: 废旧PET转化为碳基材料用于界面太阳能蒸发生产淡水. 复合材料学报, **2025**, 42(10), 5970−5979.

6 Zhao, X. H. ; Chen, X. Y. ; Yuk, H. ; Lin, S. T. ; Liu, X. Y. ; Parada, G. Soft materials by design: unconventional polymer networks give extreme properties. *Chem. Rev*, **2021**, 121(8), 4309−4372.

7 Liu, H. ; Chen, L. ; Dong, C. S. ; Zhang, L. Z. Solar-driven hydrogel-based interfacial evaporators: From principles to material manipulations. *Appl*. *Therm*. *Eng*, **2025**, 258, 124639.

8 张昕锐, 陈雪梅. CNT/PVA@碳布膜的光电联合驱动界面蒸发性能研究. 化工学报, **2024**, 75(3), 1028−1039.

9 Wu, X. H. ; Lin, D. ; Zhou, H. F. ; Han, L. ; Li, J. Y. ; Ma, H. J. ; Zhang, B. W. Salt crystallization on porous asymmetrical graphene oxide-based photothermal hydrogel-fabric unexpectedly enables continuous solar-powered hypersaline water distillation. *Carbon*, **2025**, 233, 119833.

10 Han, L. ; Yang, M. ; Zhou, H. F. ; Hong, C. X. ; Li, J. Y. ; Ma, H. J. ; Zhang, B. W. A photothermal hydrogel-fabric architected with polyvinyl alcohol decorated polypyrrole nanoparticles for efficient brine distillation. *Appl*. *Surf*. *Sci*, **2024**, 662, 160110.

11 Zou, H. Q. ; Qi, J. ; Ma, Y. J. ; Li, J. C. ; Jiang, Z. H. ; Zhang, M. G. ; Qiu, J. S. Harnessing multiple donnan effects for simultaneous salt-resistant solar desalination and dual-mode power generation. *Adv*. *Mater*, **2026**, 38(30), e73163.

12 Lin, Z. L. ; Gao, Y. ; Chen, L. ; Wang, W. Q. ; Chen, T. Design and fabrication of PVA/SA/MXene@TA-Fe hydrogel as an efficient solar evaporator for desalination. *J*. *Environ*. *Chem*. *Eng*, **2025**, 13(5), 117584.

13 Liu, D. ; Hao, J. S. ; Lin, Z. W. ; Lyu, Y. ; Ji, Z. Y. ; Hong, Z. H. ; Xu, B. G. ; Shi, X. Y. ; Wang, X. L. Freeze-casting anisotropic hydrogels with multi-dynamic bonding for enhancing fatigue resistance and environmental stability. *Small*, **2026**, 22(10), e10980.

14 Lin, F. C. ; Wang, Z. ; Chen, J. S. ; Lu, B. L. ; Tang, L. R. ; Chen, X. R. ; Lin, C. S. ; Huang, B. ; Zeng, H. B. ; Chen, Y. D. A bioinspired hydrogen bond crosslink strategy toward toughening ultrastrong and multifunctional nanocomposite hydrogels. *J*. *Mater*. *Chem*. *B*., **2020**, 8(18), 4002−4015.

15 Guan, Y. ; Shao, L. S. ; Dong, D. Y. ; Wang, F. ; Zhang, Y. L. ; Wang, Y. H. Bio-inspired natural polyphenol cross-linking poly(vinyl alcohol) films with strong integrated strength and toughness. *RSC Adv*, **2016**, 6(74), 69966−69972.

16 Yuan, H. B. ; Zhao, M. M. ; Zhu, X. W. ; Sha, D. S. ; Chen, G. Q. ; Xing, T. L. Facile fabrication of durable and breathable superhydrophobic cotton fabric for self-cleaning, UV-blocking, anti-icing, and photothermal de-icing. *Cellulose*, **2024**, 31(7), 4627−4644.

17 Tan, Y. X. ; Fang, K. J. ; Chen, W. C. ; Shi, Q. ; Zhang, C. M. Fabrication of a superhydrophobic cotton fabric with efficient antibacterial properties and asymmetric wettability *via* synergistic effect of quaternized chitosan/TiO_2/Ag. *Ind*. *Crops Prod*, **2024**, 209, 118034.

18 Tang, P. C. ; Jiang, Q. W. ; Chen, W. C. ; Wu, R. D. ; Han, J. T. ; Zhang, C. M. Innovative design of superhydrophobic and antimicrobial cotton fabrics: A multistage roughness structure approach with dual ZIF particles for sustainable salt-free dyeing. *Ind*. *Crops Prod*, **2024**, 221, 119342.

19 Han, J. T. ; Wu, R. D. ; Chen, W. C. ; Yu, X. ; Gao, R. X. ; Zhang, C. M. Hierarchical core–shell–encapsulation *via* pH-mediated assembly of TA-Fe^{2+}/ODA/PDMS: a multifunctional coating for superhydrophobicity, antibacterial action, photocatalysis and adjustable structural color on cotton. *Chem*. *Eng*. *J*., **2025**, 524, 169423.

20 李平平, 黄金田. PVA/TA增强复合膜的制备及性能. 塑料, **2023**, 52(6), 39−43, 87.

21 吕大娟, 于城浩, 胡锐, 罗贤. 碳纳米管改性颗粒光热防冰涂层的制备与性能表征. 表面技术, **2025**, 54(24), 241−249.

22 Curti, L. ; Moore, O. W. ; Babakhani, P. ; Xiao, K. Q. ; Woulds, C. ; Bray, A. W. ; Fisher, B. J. ; Kazemian, M. ; Kaulich, B. ; Peacock, C. L. Carboxyl-richness controls organic carbon preservation during coprecipitation with iron (oxyhydr)oxides in the natural environment. *Commun*. *Earth Environ*, **2021**, 2(1), 229.

23 Zhao, F. ; Zhou, X. Y. ; Shi, Y. ; Qian, X. ; Alexander, M. ; Zhao, X. P. ; Mendez, S. ; Yang, R. G. ; Qu, L. T. ; Yu, G. H. Highly efficient solar vapour generation *via* hierarchically nanostructured gels. *Nat*. *Nanotechnol*, **2018**, 13(6), 489−495.