

铁基吸湿凝胶对干旱地区空气水的捕获与农业自动化

熊玉立¹, 刘红², 黎川渝³, 杜宇杰², 郑永亮², 杨林^{2*}

1. 重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331;

2. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044;

3. 重庆大学能源与动力工程学院, 重庆 400044

* 联系人, E-mail: yanglin@cqu.edu.cn

2024-09-20 收稿, 2024-11-29 修回, 2024-12-02 接受, 2024-12-03 网络版发表

国家自然科学基金(52203351, 12204077)资助

摘要 针对沙漠、高原等降水稀少的极端天气, 农业发展深受环境制约. 然而, 科学利用空气水与太阳能, 能够有效缓解农作物产量不足的问题. 本文通过Fe 3d电子空轨道与N、O孤电子对配位, 形成吸水活性位点, 从而构建吸湿凝胶, 快速捕获空气水分子. 实验发现, 在15℃和60%相对湿度下, 凝胶可以捕获自身重量1.16倍的水分子, 且在40℃实现全脱水, 能够稳定工作>60次吸附/解吸循环. 高湿度环境下, 凝胶的空气水捕获容量达3.5 g/g, 证明了通过配位反应制备的凝胶能够快速捕获空气中的水分子, 吸水效率远大于商业干燥剂, 如硅胶与氯化钙. 利用凝胶收集空气水, 其液态水中各离子浓度达WHO饮用水标准, 证明利用凝胶捕获的空气水可用于农业灌溉. 利用吸湿凝胶设计农业自动补水装置, 结合温度传感器、湿度传感器和光敏传感器对棚内环境进行实时监测, 从而自动化控制棚内植物生长的环境. 实验结果表明, 利用凝胶能够将棚内的相对湿度从55%提升至88%, 从而达到豌豆种子正常生长的环境, 在干旱地区通过空气水自动灌溉后, 豌豆苗持续生长>30 cm.

关键词 吸湿凝胶, 空气水, 大气集水, 干旱地区, 智慧农场, 太阳能

大气中的水分子主要以气态形式存在, 可以通过水循环从湖泊、海洋等源头进行再生. 因此, 可以认为大气中的水分子是取之不尽、用之不竭的能源载体^[1]. 水不仅是地球上最丰富、最清洁的自然能源之一, 也是自然界运转的驱动力^[2]. 它不仅关系着人类的生命安全, 还维持着生态系统的完整性, 也是工业生产和生活中必不可少的组成部分^[3]. 高温、干旱等极端事件的频繁发生^[4], 进一步加剧了淡水资源的紧张程度^[5]. 在干旱地区进行农业种植需要大量水资源, 而直接利用大气水为此提供了一种有效的解决方案. 因此, 在极端环境下的大气集水技术受到了研究者的广泛关注. 该技术通过捕获大气中的水分子, 将其转化为可利用的液态淡水资源, 为缓解淡水危机提供了新的思路和技

术途径^[6,7]. 利用空气捕水技术, 并结合智慧农业大棚, 通过大棚内部的传感器和不同系统间的连接结构实现水、电、热一体化控制循环, 能使大棚在无需人为干预的情况下稳定运行, 极大地推动了干旱地区农业种植与发展.

基于吸附的大气水捕获技术是一种新型可利用大气中淡水资源的新手段. 目前吸湿材料可以分为三类^[8,9]: (1) 吸湿性盐; (2) 金属有机框架(metal organic frameworks, MOFs)聚合物; (3) 超吸湿凝胶^[10]. 吸湿材料能够自发地从空气中捕获水分子, 具有广泛的应用前景^[11,12]. 但这些吸湿材料在实际应用中受到一些限制, 主要原因有^[13]: (1) 吸水后容易使颗粒团聚固化, 导致较差的循环稳定性; (2) 水分子脱附所需要的能量

引用格式: 熊玉立, 刘红, 黎川渝, 等. 铁基吸湿凝胶对干旱地区空气水的捕获与农业自动化. 科学通报, 2024, 69: 5301–5310

Xiong Y L, Liu H, Li C Y, et al. Capturing of atmospheric water in arid areas by iron hygroscopic hydrogel for agricultural automation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 5301–5310, doi: 10.1360/TB-2024-0984

较多; (3) 缓慢的吸附动力学. 将吸湿性盐与含亲水官能团的有机物进行结合, 可以有效解决上述问题. 由 CaCl_2 组成的凝胶在相对湿度为 80% 的条件下可吸附自身重量 1.6 倍的大气水, 这归功于 Ca^{2+} 离子与水分子形成配位键^[14]. 利用 MOFs 的多孔结构, 能够直接捕捉气态水分子, 但通常需要较高的脱水温度. 例如, $\text{CaCl}_2@ \text{MOF-808}$ 即使在 80℃ 下也只能释放 < 90% 的水. 含金属凝胶的吸水速率较快^[15], 在 3 h 内达到饱和, 而基于 LiCl 的聚合物在 10 个吸收/解吸循环中表现出良好的稳定性, 每日产水率达 1.09 L/g. 不过, 这些吸湿凝胶的吸水率相对较低 (< 3 g/g), 脱水温度较高 (> 60℃), 限制了它们的捕水效率. 因此, 设计具有高吸水性和低脱水温度的超吸湿凝胶迫在眉睫, 在干旱地区空气制水装备领域具有明显的优势^[16,17].

本文利用 FeCl_3 与 $\text{OH}(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$ 配位反应合成了一种超吸湿凝胶. 该凝胶表现出较高的吸水性能, 相对湿度 (relative humidity, RH) 为 60% 条件下吸水量达 1.16 g/g, 且在 40~50℃ 下能够实现完全脱附, 多次循环吸/脱附后, 凝胶展现出良好的稳定性. 此外, 将吸湿凝胶应用于空气捕水与智慧农业, 发现所收集到的液态水达到国际饮用水标准. 利用水光热一体化智慧大棚, 成功地在低湿度地区培育豌豆, 能够提高棚内相对湿度 (> 85% RH). 该大棚不仅可以收集淡水资源, 还能加强水肥、土壤、光热资源优化配置, 从而促进干旱地区农业自动化发展.

1 材料与方法

1.1 主要实验试剂

实验试剂包括氯化铁 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, AR, 98%, 阿拉丁)、乙醇胺 ($\text{HO}(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$, AR, 99%, 阿拉丁)、无水乙醇 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, AR, 99.5%, 麦克林) 等. 实验所用的水为去离子水 (电阻率为 $18.25 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$).

1.2 实验仪器设备

实验所使用的主要仪器包括: 超纯水系统 (AWL-1002-B)、恒温/湿控制箱 (AP-HX-80A)、傅里叶变换红外光谱仪 (Nicolet iS50)、X 射线衍射仪 (Shimadzu ZD-3AX)、X 射线光电子能谱 (ECALAB 250Xi)、场发射扫描电子显微镜 (Nova 400 Nano-SEM)、透射电子显微镜 (Talos F200S)、接触角测量仪 (LSA100)、模拟太阳能氙灯 (PLS-SXE300) 等.

1.3 凝胶的制备方法

利用过渡金属 3d 空轨道与乙醇胺中的 N 和 O 原子孤电子对配位, 形成超吸湿凝胶, 制备工艺流程如图 1 所示. 首先, 将 0.014 mol 六水合氯化铁加入到 20 mL 乙醇溶液中, 并进行充分超声振荡 (30 min), 形成黄褐色溶液. 随后, 向黄褐色溶液中加入 840 μL 乙醇胺, 再次超声振荡 (30 min). 取等量溶液与去离子水进行混合形成褐色黏稠的前聚体. 将该前聚体均匀涂抹在培养皿表面, 置于烘干箱中进行干燥处理 (60℃, 2 h), 即可得到 Fe 基超吸湿凝胶薄膜. 将薄膜暴露在空气中, 其超高的吸湿性能够使凝胶快速捕获空气中的水分子, 并在凝胶表面形成小液滴. 通过观察其表面水滴的聚集程度, 可判断吸湿凝胶的含水状态.

1.4 自供水光热大棚的设计

针对干旱地区农业需求, 我们设计了一种水光热一体化智慧大棚, 结合 Fe 基超吸湿凝胶捕获大气中的水, 用于灌溉植物. 该系统的核心组件包括: (1) 太阳能电池板; (2) 盛有吸湿凝胶的开关玻璃盒; (3) 双层膜; (4) 喷雾管; (5) 滴灌管; (6) 控制面板; (7) 温度、湿度传感器; (8) 加热芯片. 系统分为以下 4 个功能模块: (1) 移动式光伏利用装置: 负责收集和转换太阳能; (2) 凝胶吸储灌溉装置: 利用吸湿凝胶捕获大气水, 并进行灌溉; (3) 双层膜喷雾温控装置: 通过双层膜实现喷雾和温度控制; (4) 智慧农业管理装置: 包括控制面板、加热芯片等, 协调各装置工作. 该系统的机械工作和加热工作全部由移动式太阳能光伏装置提供, 无需额外的电力供应.

在水光热一体化智慧大棚的灌溉过程中, 系统在夜间 (相对湿度较高, 温度较低) 开始工作. 首先, 打开玻璃外盖, 让凝胶暴露在空气中吸收水分. 随后, 自动关闭外盖以限制水蒸气外泄. 热水管流经凝胶底部进

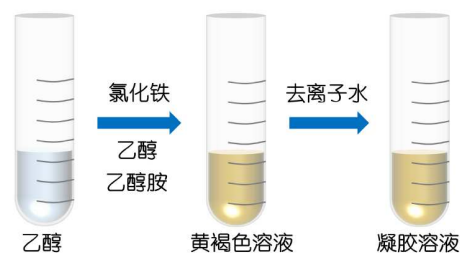


图 1 (网络版彩色) 吸湿凝胶的制备流程
Figure 1 (Color online) Preparation process of the hydrogel

行加热,促使水分蒸发至外盖表面,水滴逐渐形成并积累,液态水在顶盖凝结. 30 min后,系统释放凝胶内储存的水分子. 凝结的水滴经过滤装置净化后流至水箱进行储存. 当土壤湿度低于农作物所需湿度条件时,系统通过滴灌管向作物根部供水,实现高效、可持续的自动农业灌溉. 该大棚的双层膜温控系统根据环境温度变化喷出雾化的冷水或热水,以保护植物免受极端温度影响. 雾化的水由凝胶提供,光伏板为整个大棚提供动力. 根据光照强度的变化,系统通过调节光伏板的位置和方向来满足发电和植物生长的需求. 例如:光照较弱时,系统收拢部分光伏板确保一定发电量,并同时给予植物充足光照强度.

2 凝胶的结构与吸/脱附测试

将脱水状态下的凝胶暴露于空气中,由于其较高的亲水性,凝胶能够捕获空气中的水分子. 随着时间的推移,越来越多的水分子将在凝胶表面积累. 气态水分子液化后形成小液滴,附着在吸湿凝胶表面,然后逐渐扩散至凝胶体相,再形成可流动的液态水. 通过光学显微镜可以发现(图2(a)和(b)),凝胶表面较为粗糙,并存在一些孔洞结构(1~100 μm). 这种结构增加了凝胶与周围空气的接触面积,同时为水分子的体相传输提供了必要的通道,增强了超吸湿凝胶的吸附动力学. 凝胶的吸附过程主要是先快速地表面积附,将气态水分子转换为液态水,随后通过体相传输将水分子存储在凝胶内部.

扫描电子显微镜结果表明(图2(c)),脱水状态下的吸湿凝胶表面粗糙,与光学显微镜下的观察结果具有相似的特征. 实验结果还表明,凝胶表面存在宽度约0.1 μm 的微小凸起,增加了凝胶与空气之间的接触面积,有助于捕获空气水分子并将其传输至凝胶体相. 这种具有凸起的吸湿凝胶具有较高的脱附容量、较快的吸附速率、较强的吸附动力. 高分辨透射电子显微镜结果表明,凝胶由~5 nm的结晶颗粒组成(图2(d)). 该小尺寸凝胶纳米颗粒能够暴露更多的吸水活性位点,流动性较强,能够促进水分子在凝胶的表面吸附和体相传输.

Fe基凝胶的X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱如图3(a)所示,该吸湿凝胶具有较弱的结晶性,无明显的高强度衍射峰. 凝胶在吸水后由软物质态转变为液态,导致微观结构发生了变化. 凝胶在吸湿前有2个微弱的衍射峰,分别在 14° 和 27° ,吸湿后 14° 的峰消失.

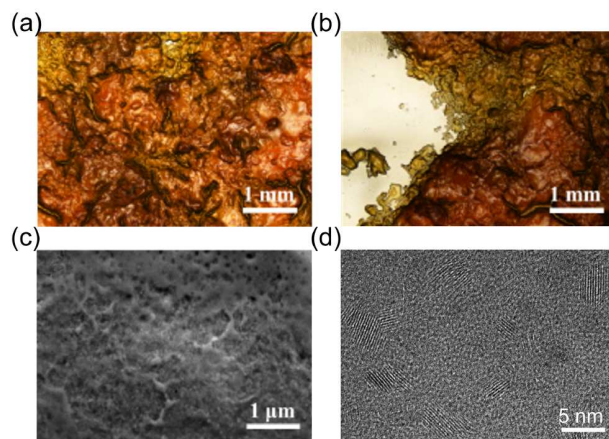


图2 (网络版彩色)凝胶的结构表征. 凝胶在中部(a)和边缘(b)的光学显微镜图片. 凝胶的扫描电子显微镜(c)和高分辨透射电子显微镜(d)图片

Figure 2 (Color online) The structures of the as-prepared hydrogel. The optical microscope images of the hydrogel at the center (a) and the edge (b). The scanning electron microscope (c) and the high-resolution transmission electron microscope (d) images of the hydrogel

该实验结果证明了水分子主要吸附在衍射峰 14° 的晶面. 通过肉眼可观测,凝胶吸湿前为红色薄膜状,吸湿后为淡黄色液体,为可流动的液态水. 这种结构变化促进了水分子在凝胶晶粒界面的扩散运动,有利于液态水在晶粒的边界流动.

Fe基超吸湿凝胶的X射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)表明,在287.2和284.8 eV处观察到两个C 1s峰(图3(b)),分别表示C-C键和C-O键,这些可以归结为乙醇胺中所存在的官能团和空气中少量 CO_2 杂质^[18]. N 1s图谱中出现了402.3和400.3 eV两个峰(图3(c)),分别表示-NH和-NH₂官能团,是乙醇胺中的氨基. 由于其N元素具有孤对电子,能有效地与过渡金属3d空轨道形成配位键,作为与水分子的结合位点. O 1s具有3个不同的特征峰(图3(d)),其中位于533.8和532.1 eV处的峰对应羟基和C-O键,大量的羟基由乙醇和乙醇胺提供. 实验结果表明在吸湿凝胶内部含有大量的羟基,这是凝胶具有较高亲水性的原因,进一步说明了凝胶表面和内部结构对水分子具有较强的吸附动力. 而529.9 eV处的峰则证明凝胶中形成了Fe-O键(图3(e)),这说明O元素可以与Fe金属中的空轨道形成配位键,作为吸水活性位点,提高吸湿凝胶的捕水能力. 在795 eV处的峰为Fe 2p_{1/2}, 779 eV处的峰为Fe 2p_{3/2},证明了Fe的化学状态为+3价. 以上结果表明凝胶中Fe元素可以与亲水基团中的元素配位形成吸水活性位点.

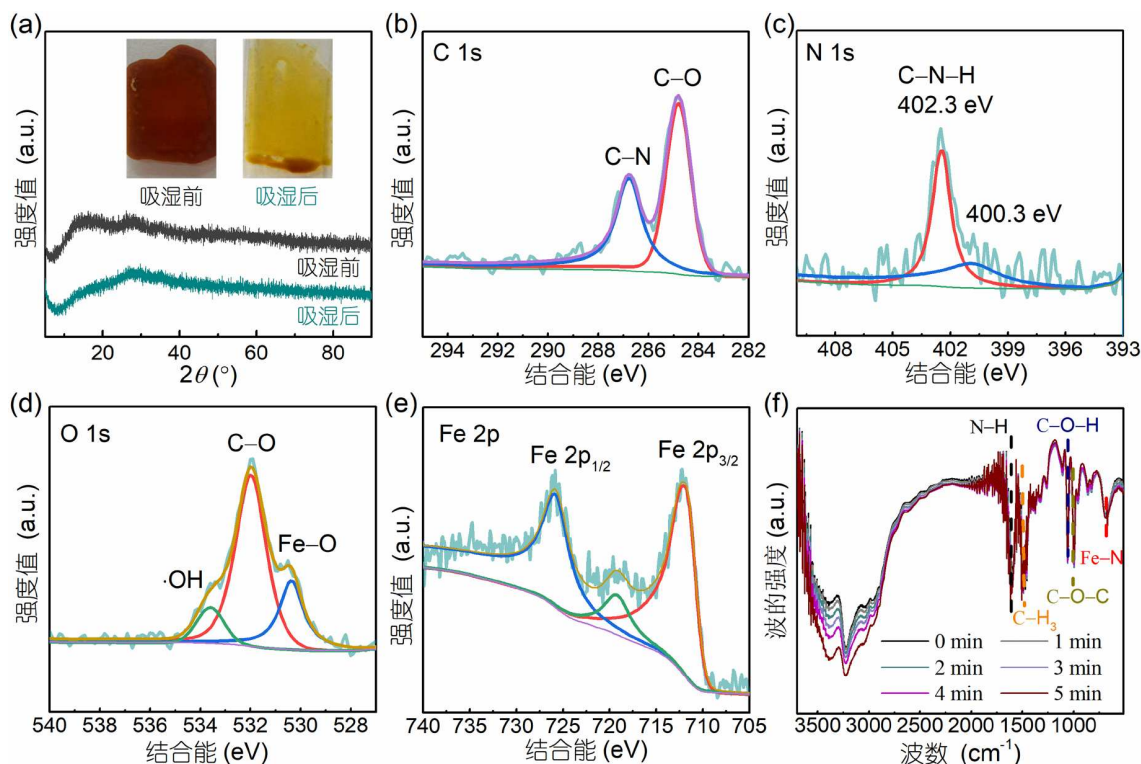


图3 (网络版彩色)凝胶的XRD、XPS和红外图谱。(a) 凝胶吸水前后的XRD图, 插图为对应的光学照片, 约4 cm²。凝胶的(b) C 1s谱、(c) N 1s谱、(d) O 1s谱和(e) Fe 2p谱。(f) 凝胶吸水过程中的原位FTIR图谱

Figure 3 (Color online) The XRD, XPS, and FTIR spectra of the hydrogel. (a) The XRD plots of the hydrogel before and after moisture harvesting. The inset is the photographs of the hydrogel with 4 cm². XPS data of the hydrogel with (b) C 1s, (c) N 1s, (d) O 1s, and (e) Fe 2p spectra. (f) *In-situ* FTIR spectra of the hydrogel with water harvesting versus time

为了探究水分子在吸湿凝胶表面的吸附路径和表面官能团的变化, 在60% RH和15℃下进行原位红外光谱(*in situ* Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测试, 在测试环境中放入少量烘干后的吸湿凝胶, 随后收集暴露不同时间后的红外光谱数据。如图3(f)所示, 在1078 cm⁻¹处的峰值可归因于凝胶中C-O-H的伸缩振动; 960 cm⁻¹处的峰值可归因于凝胶中C-O-C键的伸缩振动; 1460 cm⁻¹处的峰值可归因于凝胶中C-H键的弯曲振动; 1608 cm⁻¹处的峰对应于N-H键的弯曲振动。此外, 在3200~3700 cm⁻¹之间有一个宽阔而明显的峰, 这是由吸湿凝胶中乙醇胺的羟基造成的。随着吸湿过程的进行, 波峰明显变宽, 这是由于吸水后的凝胶含有大量-OH。498 cm⁻¹处Fe-N峰的存在表明Fe离子成功与乙醇胺中N原子的孤电子对配位形成吸水活性位点。随着凝胶暴露在空气中的时间增加, 吸湿凝胶在3000~3500 cm⁻¹处的吸收峰更加显著, 这是因为大量的水分子在凝胶表面累积, 从而含有更多的羟基, 同时也

说明凝胶捕获水分子时具有快速的表面吸附过程。

接触角是衡量吸湿凝胶亲水性和疏水性的一个重要指标^[19]。一般来说, 接触角越小, 表明凝胶对水的亲和力越强, 即亲水性越好; 接触角越大, 表明凝胶对水的亲和力越弱, 即疏水性越强。亲和力可以用本征接触角表示, 其公式为

$$\cos(\theta_i) = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}}, \quad (1)$$

其中, γ_{sv} 表示固-气界面能; γ_{sl} 表示固-液界面能; γ_{lv} 表示液-气界面能。当接触角小于90°时, 可以视为亲水表面, 表明材料对水分子具有较强的亲和力。当接触角接近0°时, 可以被称为超亲水表面, 此时流体与固体间有很强的相互作用, 并将完全扩散到材料表面。通过结构性(增加表面粗糙度)能够强化液滴与凝胶的相互作用, 从而强化凝胶表面的亲水性。实验发现Fe基吸湿凝胶的接触角为10.2°(图4), 证明其具有较好的亲水性, 能够快速捕获空气中的水分子。

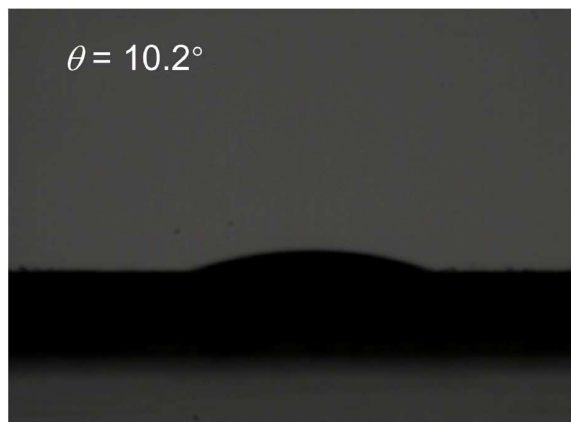


图4 吸湿凝胶的接触角测量
Figure 4 Contact angle of the hydrogel

超吸湿凝胶的水分子吸附量是评估其适用于实际应用的关键指标。将吸湿凝胶(0.5 g)均匀涂抹在培养皿中(10 cm²), 将其放置在15℃和不同相对湿度的环境中进行测试(图5(a))。实验结果表明, Fe基吸湿凝胶能够捕获其自身重量约3.5倍的水分子; 即使当相对湿度<50%

时, 吸附饱和值仍> 1 g/g, 多次测试的误差均<5%。根据Langmuir等温线, 吸附动力 $K = ap/(1+ap)$, 因此, 相对湿度越大, 空气中含有的水分子浓度越高, 凝胶的吸附容量越大。为了探究超吸湿凝胶的吸水性能, 将其与商用干燥剂硅胶和氯化钙进行对比。如图5(b)所示, 凝胶可以吸附自身重量1.17倍的水分子, 而氯化钙和硅胶仅能分别吸收0.6和0.4倍水分子。该实验进一步证明了吸湿凝胶具有较高的空气水捕获能力, 在干旱地区的农业种植方面展现出巨大的应用潜力。

在吸湿凝胶的实际应用中, 解吸温度是凝胶应用过程中的另一个重要指标, 直接关系到能耗问题。当吸湿凝胶暴露在高温环境下, 热量通过热传导作用从周围环境传递到凝胶中。水分子吸收这些热量, 热运动加剧, 从而开始蒸发。水解吸过程的速率受到多种因素的影响, 包括吸湿凝胶的化学组成、交联密度、孔隙结构、环境温度和湿度等。

为了探究吸湿凝胶的脱水温度, 我们首先将凝胶置于15℃和60% RH环境下, 直至其达到饱和状态(吸

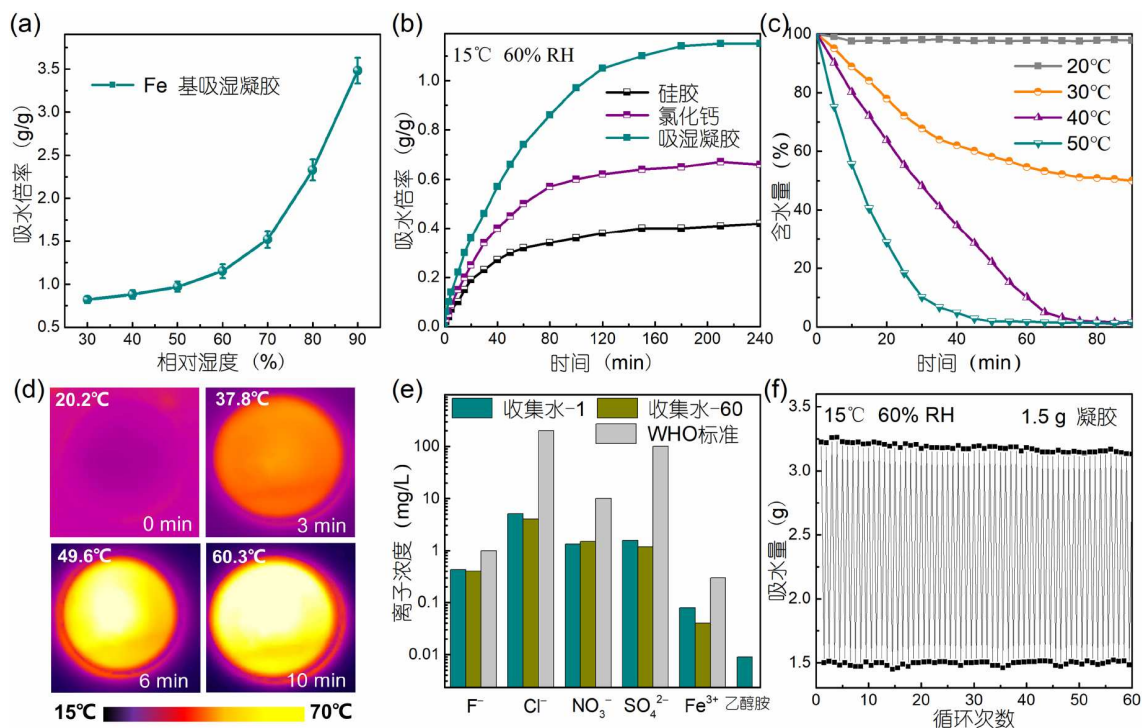


图5 (网络版彩色)凝胶的吸脱附、收集水离子浓度与稳定性测试。(a) 凝胶在15℃下的吸附平衡曲线。(b) 凝胶和商业干燥剂的吸水性能对比。(c) 吸湿凝胶的在不同温度下的脱水特性。(d) 凝胶在太阳光下的红外测温图。(e) 液态水中各离子浓度与乙醇胺含量结果。(f) 吸/脱附稳定性测试

Figure 5 (Color online) The performances of water harvesting/desorption, concentration of ions, and stability. (a) Water absorption properties of the hydrogel under 15°C. (b) Water harvesting ability comparison with commercial desiccants. (c) Dehydration properties of the hydrogel under different temperatures. (d) Infrared thermograms under sunlight (100 mW/cm²). (e) The results of ion concentration and ethanolamine in the collected water. (f) Moisture adsorption/desorption stability tests

附量为1.17 g/g), 随后在温度为20~50℃的环境下对其进行脱水实验, 吸湿凝胶的重量变化即为水分子的释放量. 如图5(c)所示, 在20℃的环境下, 水分子的释放量较少, 说明20℃的环境不足以提供克服解吸焓的能量. 当温度上升至30℃时, 吸湿凝胶可以解吸自身重量50%的水分子. 当温度达到40~50℃时, 水分子的释放速率较快. 这一结果表明, 当温度达到40℃时, 凝胶可以完全解吸所捕获的水分子, 并且随着温度的进一步升高, 其释放水分子的速率更快, 证实了凝胶具有快速释放水分子的能力和较低的脱水温度.

为了测试吸湿凝胶对太阳能的光热转化能力, 在一个太阳光强度下(100 mW/cm²)照射凝胶, 并使用红外测温仪观察凝胶表面的温度变化^[20]. 根据图5(d)所示的测试结果, 在初始阶段, 吸湿凝胶的表面温度为20.2℃, 3 min后, 其表面温度升至37.8℃, 达到其脱水所需温度. 在第6分钟和第10分钟时, 表面温度分别达到了49.6和60.3℃. 因此, 该实验结果表明, 凝胶可以在10 min内被迅速加热(>60℃), 高于水分子完全脱附所需要的温度(40℃). 以上结果证明吸湿凝胶具有良好的光热转换性能, 能够在一个太阳光照强度下进行脱水, 在脱附过程中不需要额外的二次能源消耗. 脱水状态的凝胶能够在空气中快速捕获气态水分子, 并使其转化为液态水, 储存在凝胶内部. 含水状态下的凝胶在太阳光照射下吸收太阳能, 表面温度升高, 液态水可以吸收这部分热能, 随后以水蒸气形式从凝胶内部释放, 通过蒸发-冷凝集水装置可以收集凝胶所蒸发的水, 从而获取清洁水资源.

通过离子色谱和电感耦合等离子体发射谱对集水装置中收集到的液态水进行离子浓度分析, 结果如图5(e)所示. 水样中的阴离子F⁻、Cl⁻、NO₃⁻和SO₄²⁻浓度分别为0.43、5.03、1.33和1.57 mg/L. 凝胶多次吸脱附循环后, 其收集到的液态水离子浓度与第一次收集水的离子浓度相当. 液态水中乙醇胺的浓度为0.01 mg/L, 所有离子浓度均低于世界卫生组织(WHO)的饮用水标准, 且Fe金属含量为0.08 mg/L, 符合安全饮用水标准. 此外, 我们对凝胶进行循环吸/脱附测试, 结果表明, 经过60次循环后, 吸湿凝胶仍具有良好的吸附能力, 保持较高的吸水量(图5(f)). 凝胶的吸湿过程伴随着放热反应, 由薄膜状变为流动的液体, 而解析过程伴随吸热反应, 由液态转变为薄膜状. 多次吸/脱附循环使凝胶的结构发生变化, 但并不影响其吸湿特性, 说明凝胶具有一定的自修复能力. 以上结果表明凝胶可以

在没有能源输入的情况下从大气中收集淡水, 且稳定性较好, 能够长期使用.

3 自供水光热大棚实验探究

水光热一体化智慧大棚如图6(a)所示, 是一种集成了太阳能利用、凝胶吸水技术和双层膜控温功能的农业设施. 该系统通过内部传感器和系统互联实现自供能、全被动式的自动化运行模式. 这种设计不仅节约人力成本, 还能在资源有限的地区, 如干旱地区, 进行农业种植, 推动我国干旱、高原、高盐地区的农业发展.

系统的核心是凝胶吸储灌溉装置, 该装置利用Fe基超吸湿凝胶捕获空气水, 实现夜间周期性吸收和释放气态水. 根据传感器收集的温度、湿度等数据, 控制面板(图6(b))精准控制装置部件的运行. 整个操作按照一个周期2 h进行循环, 其中1.5 h吸水 and 0.5 h释水. 操作面板负责控制设备各项功能, 如顶盖的开合. 在吸水阶段, 控制面板发出信号使外盖打开进行吸水; 1.5 h后, 根据关闭信号, 外盖自动闭合, 开始加热蒸发. 将凝胶吸收的水蒸发至顶盖, 经管道流进储水箱中; 农田的需水量和土壤湿度数据通过传感器集成至STM32主控板, 并实时监测. 智能控制系统精确调节灌溉量, 以满足植物需求; 存储的水被智能分配, 一部分通过滴管管道运输至植物根部, 确保植物获得充足的水分; 另一部分则进入双层膜喷雾温控装置, 根据大棚内温度传感器数据, 调节棚内温/湿度. 该装置能够维持恒温环境, 从而满足植物对温度的需求, 使大棚内条件始终处于农作物适宜生长的范围, 提高农作物的产量和质量.

太阳能板发电装置存储电能, 用于供给灌溉和喷雾, 确保植物获得理想的生长环境. 此外, 该装置还能收集热能, 在夜间对吸湿凝胶进行保温, 确保凝胶在夜间保持较高的吸水率, 并调节喷雾温度. 通过各子系统之间的相互调控, 实现大棚水光热一体化控制循环高效运行. 植物生长的时序图如图6(c)所示, 证明了该装置可以促进植物生长. 实验的第一天, 在水光热一体化大棚中播种了豌豆种子, 此时大棚内外空气湿度均<60% RH. 种子在土壤中根须向下生长, 而嫩芽则朝向地表方向生长. 第5天, 大棚内的豌豆种子发芽, 证明了在一体化智慧大棚的自动化灌溉过程中, 植物可以持续生长并形成幼苗. 植物的生长曲线如图6(d)所示, 豌豆在第4天开始发芽生长, 随后快速生长. 在20天内, 平均高度达32 cm. 在大棚的自动化控制过程中, 棚内外

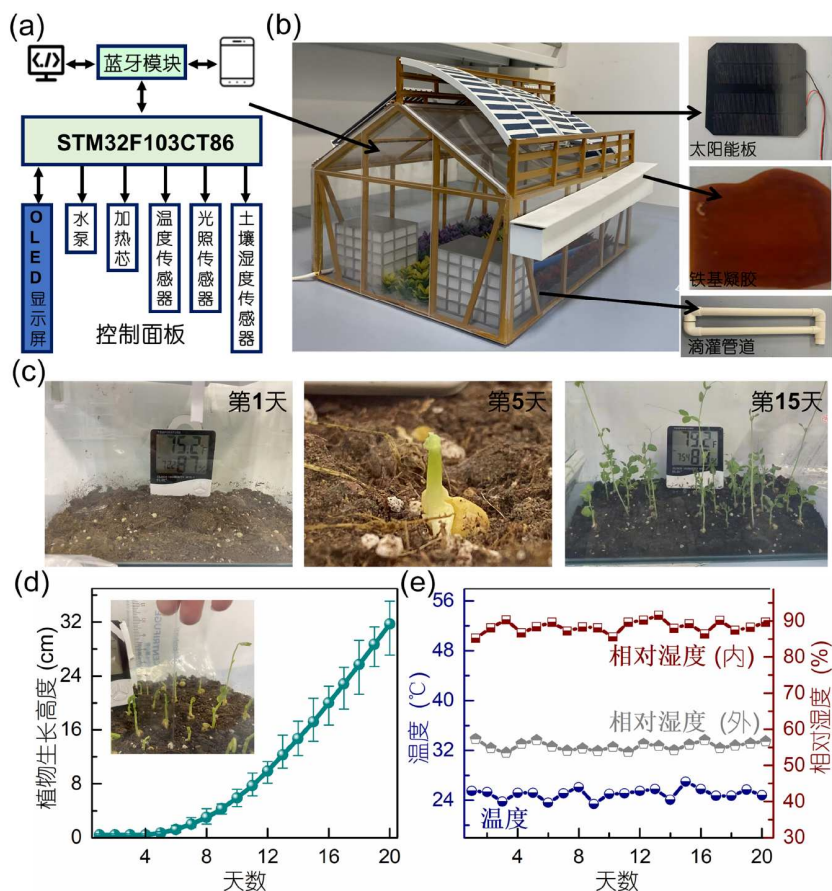


图6 (网络版彩色)农业自动化装置与植物培育. 农业自动化装置框架图(a)和装置实物图(b). (c) 不同时间豌豆的生长状态图; (d) 植物的生长曲线图; (e) 大棚内/外湿度和温度曲线

Figure 6 (Color online) The agricultural automation assembly and the plant cultivation. The layout of the autonomous agriculture (a) and the corresponding physical setup (b). (c) Plant growth status by photograph; (d) the plant growth for height vs time; (e) the temperature and relative humidity changes in the greenhouse

空气湿度变化对比曲线如图6(e)所示. 由于大气集水装置的灌溉作用, 棚内空气湿度高于外部湿度, 这得益于凝胶的高效吸水性能. 实验发现大棚内外空气湿度分别为88% RH和55% RH左右, 证实了该装置能够提高干旱地区的棚内相对湿度.

豌豆苗的正常生长表明水光热一体化大棚在干旱地区对农作物的培育具有显著优势. 首先, 大棚通过控制系统精确调控植物生长的环境条件, 对豌豆种子的发芽和生长起到了关键作用. 其次, 自动化灌溉确保了植物在整个生长周期中获得充足的水分供应, 保障了豌豆苗的持续生长. 此外, 随着豆芽的生长, 大棚内部空气湿度保持较高水平(>85% RH), 有利于农作物的培育, 降低了外部极端环境对植物的影响.

在一体化农业智慧大棚中成功栽培植物, 为该装置进一步扩大规模提供了科学依据^[21]. 在干旱地区, 大

棚内部的气候条件, 例如温度、湿度和二氧化碳浓度, 均可实现精准控制, 有效提高作物的生长速率和品质, 为干旱地区农业发展带来新的希望. 借助智能传感器和自动化系统, 可以实时监测和调整大棚内的环境参数, 确保作物处于最佳生长状态. 如图7所示, 水光热一体化智慧大棚提供了解决干旱地区生态环境恶劣问题的有效途径^[22,23]. 以中国新疆南部为例, 目前已建在用温室与拱棚(农业大棚与庭院小拱棚)设施农业面积超过30万亩^[24], 若能广泛应用该智能大棚, 预计每年的节约电量可达30亿度, 同时节水量可达35万立方米. 这些数据体现了该技术在推动农业现代化和可持续发展方面的重要潜力.

因此, 干旱地区的智慧农业可以有效减少从遥远的农村农场进行食物供应的碳足迹, 从而降低对环境的危害. 水光热一体化智慧大棚作为一个自供能全被

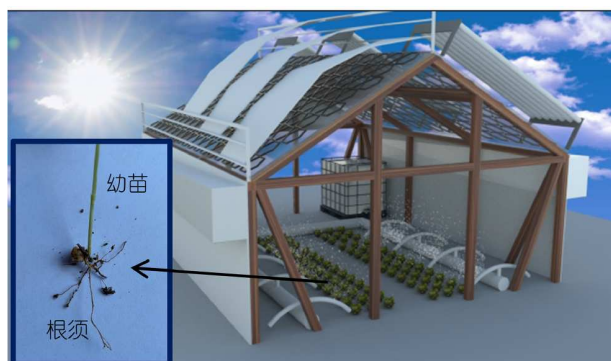


图 7 (网络版彩色)干旱地区农业自动化示意图

Figure 7 (Color online) Schematic of autonomous agriculture in arid regions

动式的系统,完全依赖于清洁太阳能和大气水,既节能又高效.该自动农业装置通过从大气中收集淡水资源灌溉农作物,减少了农业对淡水资源的依赖,有助于缓解干旱地区水资源短缺的问题^[25,26].

4 结论

针对干旱地区的农业自动化设计,本文设计超吸

湿凝胶,高效率利用太阳能和空气水资源,提出基于凝胶的干旱地区空气水捕获与农业自动化思路.通过材料表征和应用测试,可以得出以下结论:

(1) 利用过渡金属Fe中的电子空轨道与乙醇胺中氮/氧原子的孤对电子配位,合成了Fe基超吸湿凝胶.对凝胶进行吸附/解吸性能测试发现,Fe能够与N、O配位形成吸水活性位点,进而耦合空气水分子.该超吸湿凝胶可以捕获约自身重量3.5倍的气态水分子.

(2) 在40℃环境下,该凝胶能够实现完全脱水,仅需一个太阳光照强度即可实现.经过60次吸附/解吸循环后,该凝胶仍能保持较好的吸水性能,证明其具有良好的循环稳定性.利用凝胶收集空气水资源,其水质达国际饮用水标准,能够应用于农作物的灌溉.

(3) 通过自供水光热大棚进行豌豆培育实验,发现种子成功发芽.在一体化智慧大棚的自动化灌溉过程中,棚内湿度(>85% RH)高于棚外湿度,植物持续生长成幼苗.结合温度传感、湿度传感和光照传感,一体化农业智慧大棚能够在干旱地区成功培育农作物,精准控制农作物的生长速率和品质,有效减少因极端气候变化而引起的农作物损失.

参考文献

- Wang X, Ma G, Cui S, et al. Title high solar-thermal conversion aerogel for efficient atmospheric water harvesting. *Small*, 2024, 20: 2307416
- Li Z, Tang L, Wang H, et al. Nature-inspired surface engineering for efficient atmospheric water harvesting. *ACS Sustain Chem Eng*, 2023, 11: 11019–11031
- Moses A, Ramírez-Andreotta M D, McLain J E T, et al. Assessing the impact of rainwater harvesting infrastructure and gardening trends on microbial indicator organism presence in harvested rainwater and garden soils. *J Appl Microbiol*, 2023, 134: 1xad110
- Zhang S, Huang J, Chen Z, et al. Bioinspired special wettability surfaces: From fundamental research to water harvesting applications. *Small*, 2017, 13: 1602992
- An H, Chen Y, Wang Y, et al. High-performance solar-driven water harvesting from air with a cheap and scalable hygroscopic salt modified metal-organic framework. *Chem Eng J*, 2023, 461: 141955
- Luo Z, Huang Q, Jiang N, et al. Li-Ca bimetallic hydrogel for efficient water harvesting in arid areas. *J Water Process Eng*, 2024, 66: 105981
- Sun C, Sheng D, Wang B, et al. Covalent organic frameworks for extracting water from air. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62: e202303378
- Josyula T, Kumar Malla L, Thomas T M, et al. Fundamentals and applications of surface wetting. *Langmuir*, 2024, 40: 8293–8326
- Tan J, Wang X, Chu W, et al. Harvesting energy from atmospheric water: Grand challenges in continuous electricity generation. *Adv Mater*, 2024, 36: 2211165
- Feng A, Akther N, Duan X, et al. Recent development of atmospheric water harvesting materials: A review. *ACS Mater Au*, 2022, 2: 576–595
- Yang X, Chen Z, Xiang C, et al. Enhanced continuous atmospheric water harvesting with scalable hygroscopic gel driven by natural sunlight and wind. *Nat Commun*, 2024, 15: 7678
- Zhao J, Xiong Y, Wu H, et al. A hydroscopic indium hydrogel capturing atmospheric humidity for autonomous agriculture. *Sol RRL*, 2023, 7: 2300414
- Kalmutzki M J, Diercks C S, Yaghi O M. Metal-organic frameworks for water harvesting from air. *Adv Mater*, 2018, 30: 1704304
- Li R, Shi Y, Shi L, et al. Harvesting water from air: Using anhydrous salt with sunlight. *Environ Sci Technol*, 2018, 52: 5398–5406
- Shan H, Li C, Chen Z, et al. Exceptional water production yield enabled by batch-processed portable water harvester in semi-arid climate. *Nat Commun*, 2022, 13: 5406

- 16 Wu H, Xiong Y, Yu D, et al. Fe-Co controlled super-hygroscopic hydrogels toward efficient atmospheric water harvesting. [Nanoscale](#), 2022, 14: 18022–18032
- 17 Li R, Wang P. Sorbents, processes and applications beyond water production in sorption-based atmospheric water harvesting. [Nat Water](#), 2023, 1: 573–586
- 18 Yang L, Nandakumar D K, Miao L, et al. Energy harvesting from atmospheric humidity by a hydrogel-integrated ferroelectric-semiconductor system. [Joule](#), 2020, 4: 176–188
- 19 Wang Y, Zhao W, Han M, et al. Biomimetic surface engineering for sustainable water harvesting systems. [Nat Water](#), 2023, 1: 587–601
- 20 Xi M, Zhang X, Liu H, et al. Cobalt-ion superhygroscopic hydrogels serve as chip heat sinks achieving a 5°C temperature reduction via evaporative cooling. [Small Methods](#), 2024, 8: 2301753
- 21 Li D Q, Tong Y T. Application of smart agriculture technology in facility vegetable planting (in Chinese). *Agric Eng Technol*, 2024, 44: 65–66 [李冬芹, 全义涛. 智慧农业技术在设施蔬菜种植中的应用. *农业工程技术*, 2024, 44: 65–66]
- 22 El-diehy M A, Farghal I I, Amin M A, et al. Radiation synthesis of sodium alginate/gelatin based ultra-absorbent hydrogel for efficient water and nitrogen management in wheat under drought stress. [Sci Rep](#), 2024, 14: 19463
- 23 Liu D H, Li Y J, Zhang B, et al. Study on the development status, advantages and sustainable development countermeasures of facility agriculture in southern Xinjiang—Taking Hotan prefecture as an example (in Chinese). *Vegetables*, 2021, 9: 36–40 [刘多红, 李艳军, 张斌, 等. 南疆设施农业发展现状、优势及可持续发展对策研究——以和田地区为例. *蔬菜*, 2021, 9: 36–40]
- 24 Zhang S, Fu J, Xing G, et al. Porous materials for atmospheric water harvesting. [ChemistryOpen](#), 2023, 12: e202300046
- 25 Shan H, Poredoš P, Chen Z, et al. Hygroscopic salt-embedded composite materials for sorption-based atmospheric water harvesting. [Nat Rev Mater](#), 2024, 9: 699–721

Summary for “铁基吸湿凝胶对干旱地区空气水的捕获与农业自动化”

Capturing of atmospheric water in arid areas by iron hygroscopic hydrogel for agricultural automation

Yuli Xiong¹, Hong Liu², Chuanyu Li³, Yujie Du², Yongliang Zheng² & Lin Yang^{2*}

¹ College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

² College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

³ School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

* Corresponding author, E-mail: yanglin@cqu.edu.cn

In response to extreme weather conditions, such as deserts and plateaus with scarce precipitation, agricultural development is deeply constrained by the environment. However, the scientific use of moisture and solar energy can effectively alleviate the problem of insufficient crop yields. Here, through the coordination of Fe 3d electron empty orbits with N/O lone electron pairs, active sites for water adsorption are formed, and then these sites construct a hygroscopic hydrogel to capture atmospheric water. The hydrogel is composed of nanoparticles (around 5 nm) with a porous structure; the diameter of the pores is 1–100 μm . The hydrophilicity test result shows that the contact angle is 10.2° , suggesting a super hydrophilic surface of the Fe hydrogel. The X-ray diffraction data indicates that the hydrogel has a weak crystallinity; only two peaks are observed for the dehydrated hydrogel. When the hydrogel absorbs moisture, the peak located at 14° disappears.

Place the anhydrous hydrogel in an ambient environment, which can absorb moisture at a rapid rate. The adsorption equilibrium curve shows that the hydrogel can capture 1.16 times its own weight of moisture at 15°C and 60% relative humidity (RH), and the water uptake values are 0.82 and 3.50 g/g at 30% RH and 90% RH, respectively. Besides, the hydrogel achieves full dehydration only at 40°C , which is lower than most adsorbents, such as silica gel and calcium chloride, implying minimal energy consumption for reuse. Before moisture harvesting, the hydrogel is in a film structure, while in the hydrous state, it will transform into a liquid. Through adsorption and desorption cycle tests, the hydrogel remains stable for more than 60 cycles. During the process of adsorption and desorption, the structural changes do not affect the water uptake, proving its well-developed self-healing ability. By integrating the hydrogel into a water production assembly, atmospheric water can be collected. The results show that the concentration of all ions in the liquid water reaches the WHO drinking water standard. The content of Fe and ethanalamine is around 0.08 and 0.01 mg/L, respectively, proving that the collected water can be used for agricultural irrigation.

Designing the agricultural automatic water supplement system with hydrogel, it couples with the temperature sensor, humidity sensor, and photosensitive sensor to monitor the shed environment in real time, so as to automatically control the plant growth environment. The hydrogel harvests moisture from the air and transfers the gaseous water to liquid. With the aid of solar energy, the liquid water can be desorbed and stored in a tank. The water can accurately flow to the roots of plants through the flowing pipeline and spray device. The experimental results display that the hydrogel-embedded greenhouse can increase the RH from 55% to 88%, reaching the standard for plant growth. When sowing pea seeds, which can grow in low humidity environments, the peas continued to grow over 30 cm after automatic irrigation with atmospheric water in an arid area. In all, our designed automatic agricultural system is capable of collecting freshwater from the atmosphere to irrigate crops, reducing agriculture's dependence on freshwater and helping to alleviate water scarcity in arid areas.

hygroscopic hydrogel, atmospheric water, atmospheric water harvesting, arid regions, smart farm, solar energy

doi: [10.1360/TB-2024-0984](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0984)