关于被动式调湿产品的调研和思考

□ 闫智培 国家图书馆古籍馆

文物保存环境中的湿度控制是预防性保护的核心环节。湿度过高易引发微生物滋生、金属腐蚀和有机质膨胀水解，湿度过低则会导致纤维质文物脆裂、木质文物开裂，而湿度反复波动更会加速材料劣化。在节能减排政策趋严与降本增效需求的双重驱动下，被动式调湿技术因其无需电力驱动、本质安全的突出优势而推动双向调湿材料迅猛发展。双向调湿材料可以在高湿度下自动吸收多余水分，在低湿度下又将水分缓缓释放回环境中，像一个无需电力的微型湿度“缓冲器”，主动将密闭空间的相对湿度维持在一个稳定的目标区间内。它不再是单向地“只吸不吐”，而是具备双向调节能力，从而可为文物等湿度敏感物品营造出一个真正平稳的微环境。

由于这种“无需电力、自动双向调节”的独特性能，调湿剂在文物保护领域得到了广泛应用。然而，长期以来，高性能调湿材料的核心技术被日本等少数国家垄断，国内文物保护机构往往依赖进口产品。调湿剂的单价或许并不起眼，但当湿度极端时，惊人的用量会让任何单价都失去讨论意义。上海博物馆文物保护专家吴来明曾回忆，2010 年上海世博会期间，敦煌唐代经卷和泥塑佛像等珍贵文物在沪展出，室外湿度高达 90%，而文物要求湿度不超过 37%。为了守住这条防线，上海博物馆的工作人员在 6 个月的展期内反复更换调湿剂，消耗量竟高达 2 吨——单价在此刻已不再是核心问题，巨大的用量本身就成了最沉重的负担。[①]在此背景下，上海博物馆等文物保护单位携手国内相关科研单位和企业长期致力于调湿剂的研发。

近年来，随着我国在纤维改性、无机矿物复合等调湿技术上取得突破，国产调湿材料的种类和产能都有了明显提升，为恒湿柜等设备的开发提供了更多选择。与此同时，市场上也陆续出现了多个品牌的被动式调湿产品，产品形态覆盖展柜、储藏柜等不同场景，供给端日益丰富。但是，当前市场上各类产品的具体调控机理未做明确说明、实际效能缺乏权威的第三方验证，且初始投入成本普遍偏高，经济可行性存疑，极易陷入“节能而不降费”的困境。供给端产品品类的激增，更使公共采购部门在选型时面临显著的两难：既受节能降耗政策导向牵引，又缺乏可靠的性能与效益依据支撑决策，究竟该不该选用、该如何选用，始终存有顾虑。

完全不用电的被动式恒湿展柜和储藏柜，本质都是一个高度密封的物理缓冲舱。它依靠柜体极佳的气密性将外界剧烈的温湿度波动隔绝在外，同时利用柜内预装的双向调湿材料作为控制核心，这些材料被精确设定在特定平衡湿度点（如 50%RH），当柜内微环境因开门或温差导致湿度偏高时自动吸收多余水分，偏低时则自动释放水分，全程依靠材料自身寻找热力学平衡的物理特性完成双向调节，无需任何电力或机械驱动。由此可见，调湿材料的性

[①] 人民网：《文物抢救更需“预防性保护”》，http://culture.people.com.cn/n/2015/0130/c172318-26477330.html（2026.7.9 检索）。

能，是所有被动式恒湿产品的灵魂所在。为此，本文系统调研了国外主流被动式调湿剂的产品详情、国内调湿剂的研发和生产情况，对比国内外主流调湿剂的实际效能研究结果，旨在从材料性能出发，客观评估当前被动式恒湿方案在文物保护等场景中的实际控湿能力。

一、主流被动式调湿剂

调湿材料在文物保存微环境调控中的应用已有四十多年的历史。[②]日本在这方面的研究较早，主要对硅胶进行改性，通过改变硅胶的颗粒直径、孔径大小，掺杂无机盐等方式提高硅胶的湿容量和响应速度，目前已生产出系列化的专门针对文物保存环境调控的调湿材料 Art-Sorb，该系列产品不但在日本的东京国立博物馆、九州博物馆等文物收藏单位中大量使用，而且在全世界范围内广泛使用，成为文物保护领域高端被动式精确控湿的技术标杆。此外，ProSorb 等品牌调湿剂也在这一领域得到较多应用。我国也进行了大量调湿剂的研发，并有相关产品问世。下面逐一介绍这些主流产品的具体情况。

（一）Art-Sorb 调湿剂

Art-Sorb 调湿剂产自日本富士硅化学有限公司，该公司自 1965 年起致力于研发多种工业用途的特殊二氧化硅材料。生产方宣称 Art-Sorb 调湿剂的调湿能力为普通硅胶的 5 倍以上；[③]精度方面，能够将湿度控制在目标湿度 5%以内。但是，需要注意，Art-Sorb 调湿剂的作用在于维持湿度水平，而不是增加或减少严重不正确的预先存在的湿度水平。该调湿剂有三种产品形态：1.调湿盒，750g Art-Sorb 调湿颗粒装在档案质量粘合剂粘合的聚乙烯/聚丙烯盒内，也可提供半盒式（400g Art-Sorb 调湿颗粒），每整盒约可控 1m^2，可选目标湿度为 40%RH、50%RH 和 60%RH，售价约为 570 元每整盒；2.调湿板，由浸渍 Art-Sorb 颗粒的无纺布聚乙烯/聚丙烯纤维制成，每片（50cm × 50cm）约可控 0.2m^2，可选目标湿度为 50%和 60%，售价约合 290 元/张；3.调湿颗粒，1.5 磅约可控 1m^2，可选目标湿度为 40%RH、50%RH、60%RH、65%RH 和 70%RH，售价约合 470 元/磅。可见，与不同形态的 Art-Sorb 调湿产品相比，应用领域方面，调湿盒现场安装和更换较为方便；调湿板体积较小，适用于画框等较小空间，且可切割成任何尺寸；调湿颗粒可用于所有其他场景，包括定制目标湿度的展柜和容器。湿容量方面，调湿板的湿容量较小（图 1）。可调湿度方面，调湿板的可调湿度范围最窄、调湿颗粒的可调湿度范围最广。经济性方面，调湿板价格较高，调湿颗粒最经济。

使用周期方面，生产方提出 Art-Sorb 调湿剂应至少每年更换一次，以保持其有效性。在极度干燥或潮湿的微环境中，Art-Sorb 调湿剂可能需要更频繁地更换。建议长期持续使用湿度计来监测相对湿度水平。没有明确提及回收利用相关事宜。

[②] 马越：《复合调湿材料在馆藏文物保护中的应用进展研究》，《中国文物保护技术协会第八次学术年会论文集》，2014 年，第 332-334 页。

[③] 日本硅化学有限公司:《Art-sorb 调湿产品介绍》, https://www.fuji-silysia.co.jp/en/products/p906/ (2026.7.9 检索）。

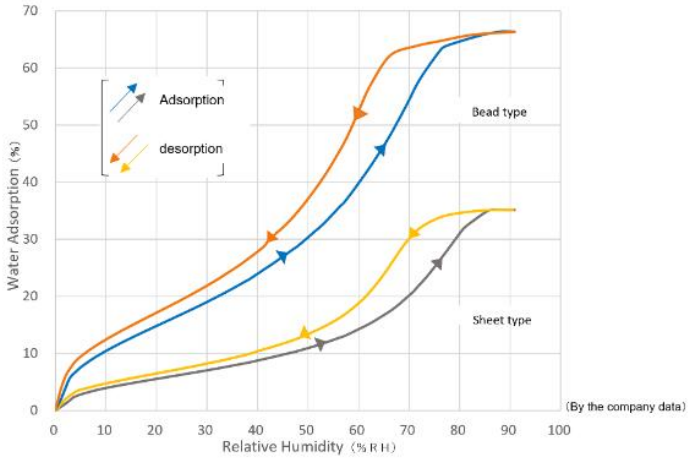


图 1 不同形态的 Art-Sorb 调湿剂的吸放湿曲线[④]

（二）ProSorb 调湿剂

ProSorb 是全球文物保护界被动式调湿的代表性品牌之一，尤其在北美市场被广泛接受，与 TALAS、Promuseum、Gaylord Archival 等头部经销商关系紧密，是众多博物馆的常规耗材。ProSorb 也是一种硅胶调湿剂。目前广泛销售的产品为调湿盒（图 2），具体为 950g（整盒）或 500g（半盒）ProSorb 调湿颗粒封装在带通风窗的聚乙烯/聚丙烯盒（长 33.5cm × 宽 11cm × 高 2.4cm）内。可选目标湿度为：35%RH、40%RH、45%RH、50%RH、55%RH 和 60%RH。销售方明确表示 ProSorb 调湿剂可以在 120°C~130°C 的温度下再生。价格方面，约合 620 元每整盒。每整盒约可控 1m^3 空间的湿度。与 Art-sorb 调湿盒相比，ProSorb 调湿盒的目标湿度可调节粒度更细、且性价比略高于 Art-Sorb 调湿盒。



图 2 ProSorb 盒装微珠调湿剂[⑤]

（三）国产调湿剂

我国在被动式调湿领域发展较晚，与 Art-Sorb 调湿剂在国际上长期处于近乎垄断的高端地位不同，国内该领域目前尚处于多主体并行发展阶段。

---

④ 同上。

⑤ TALAS 公司：《ProSorb 硅胶调湿盒产品详情》，https://www.talasonline.com/ProSorb-Silica-Gel（2026.7.9 检索）。

在研究领域，国内有多支核心力量。上海博物馆长期致力于调湿材料的研发。上海博物馆于 1991 年与华东化工学院（现华东理工大学）应用化学研究所联合研制罩硅交链蒙脱石调湿剂，能够在 40%RH-70%RH 范围内对密闭空间内的相对湿度进行调控。[⑥]后续，上海博物馆与华东理工大学共同研制了羧甲基壳聚糖—无机盐复合调湿剂（2008 年）[⑦]及硅胶-无机盐复合调湿剂（2011 年）[⑧]。2008 年，上海博物馆还与相关企业共同研制了纤维调湿板。[⑨]该产品是一种由经羧基化处理的纤维材料与分散其中的多孔无机颗粒构成的复合板，经调湿液浸润而成，其中无机颗粒的质量占纤维固含量的 5%~30%，可选用硅胶、粘土、凹凸棒、硅藻土、活性炭、木炭、竹炭中的一种或其组合。它有效整合了不同调湿材料的优势，可通过改变 4 种成分的配比对各段调控目标湿度达到优良的调控效果。2004 年，南京博物院与南京大学合作通过将高吸水性树脂、4A 分子筛和无水硫酸镁进行复配得到性能优异的调湿材料。[⑩]浙江理工大学研制出无机盐—矿物质—羧甲基纤维素钠复合的调湿板[⑪]和复合调湿纸[⑫]。

在生产制造方面，上海衡元高分子材料股份有限公司（下文简称为衡元）是行业内的龙头企业，其成立于 2002 年，依托复旦大学高分子系技术背景，专业生产湿度控制材料(干燥剂、调湿剂、调湿板材)。衡元的纤维干燥剂产品是以植物纤维为吸湿载体的功能性复合材料，其中纤维精准调湿片（图 3），可提供 49%RH、55%RH、58%RH、62%RH、65%RH、69%RH、72%RH、75%RH 和 80%RH 等多种不同目标湿度。纤维精准调湿片可精准控制湿度，湿度范围为 30%RH-80%RH。空间体积为 4L、6L、11L、15L、18L 时，分别推荐使用 1g、2g、4g、6g、8g 的纤维调湿片。



图 3　纤维精准调湿片[⑬]

[⑥] 徐方圆、解玉林、吴来明：《文物保存微环境用调湿材料调湿性能研究》，《文物保护与考古科学》 2009 年第 21 期，第 18-23 页。

[⑦] 张文清、罗曦芸、夏玮、曹嘉例、吴来明：《羧甲基壳聚糖的用途》，CN102407093A，2009.3.11。

[⑧] 张文清、夏玮、张楠、张玉龙、罗曦芸、吴来明：《复合硅胶调湿剂》，CN101381481A，2012.4.11。

[⑨] 沈跃华、吴来明、解玉林、徐方圆：《纤维调湿板》，CN101343850A，2009.1.14。

[⑩] 同⑥。

[⑪] 姚清清、彭志勤、王秉：《一种高效复合调湿纸板的制备方法》，CN102966005A，2013.3.13。

[⑫] 俞宁、彭志勤、王秉：《一种高性能复合调湿纸的制备方法》，CN102965997A，2013.3.13。

[⑬] 上海衡元高分子股份有限公司：《纤维精准调湿片产品介绍》，https://www.shhyco.com/products_detail/81.

其他厂家如上海梵律材料科技有限公司的文保专用调湿剂（片状），[⑭]由天然混纺纤维与多种无机物融合而成，可在 30%RH～80%RH 之间分段控湿，产品款式有 33%RH、40%RH、50%RH、55%RH、60%RH、65%RH、69%RH、72%RH 和 75%RH 等。其调湿产品已在北京乐器研究所、魔方乐器、湖北省博物馆、山西博物院、新疆昭苏天马博物馆、惠州博物馆、黄岩博物馆、荆州博物馆、重庆三峡博物馆、美大文博等单位使用。官方宣称性能及安全性经 6 年验证，已可完美替代日本、德国的调湿剂类产品。此外，福建华赢科技有限公司也提供具备双向调湿功能的纤维调湿片，该调湿片精选植物纤维为吸湿载体，配上高分子原料研制而成。[⑮]还有杭州合物鑫新材料技术有限公司生产改性复合硅藻为基材的控湿片材。[⑯]

在采购方面，专业级的文博调湿产品价格通常不公开，需要联系厂家询价或批量采购。

从已形成的产品体系来看，我国在探索改性硅胶调湿剂的研发后，选择了纤维调湿片作为重点研究和开发对象。这可能是因为：1.高端改性硅胶的核心技术长期被日本企业垄断，精确控制特定湿度的化学改性工艺是他们的核心机密，继续在硅胶老路上追赶很难摆脱专利和市场的限制，发展以天然或合成纤维为基础的材料，是切换技术赛道、实现弯道超车的战略选择；2.纤维调湿片就像厚卡纸或无纺布，可以任意裁切，表面光滑不掉屑，能直接接触甚至包裹展品，也能涂覆在蜂窝铝板上制成结构性的恒湿背板，便于将“控湿”功能直接整合到展柜墙体，促进薄层、空腔等有限空间设计和利用；3.随着国内博物馆和半导体行业升级，对“无尘、安全、精密”的要求越来越高，纤维调湿片恰好满足这些高端需求。

二、代表性调湿产品的效果对比

厂家标称的目标湿度、推荐用量等参数固然是选材的第一道门槛，但这些数据往往来自理想条件下的实验室测定，难以完全复现博物馆真实环境中的复杂变量。因此，来自应用者——尤其是文物保护机构——的实际使用实验与横向对比分析就显得尤为关键。只有当材料被置于相同工况下，经历长时间的温湿度波动的考验，从响应速度、控湿精度到长期衰减曲线都被一一记录和比较时，才能真正分辨出哪款调湿剂更贴近脆弱文物对微环境“稳、准”的苛刻需求。

上海博物馆的徐方圆等人（2009 年）对比了 Art-Sorb 调湿颗粒(45%RH 和 60%RH)、Art-sorb 调湿板(50%RH)、衡元纤维调湿板(40%RH 和 60%RH)的湿容量、吸放湿性能、响应速度、调控时效等调湿特性。[⑰]研究发现，5 种调湿材料在各段湿度范围的湿容量基本为 60%RH 衡元纤维调湿板>40%RH 衡元纤维调湿板>45%RH Art-Sorb 调湿颗粒>60%RH

---

html（2026.7.9 检索）。

⑭ 上海梵律材料科技有限公司:《文保专用调湿剂 (片状) 产品介绍》, http://www.chinafanlv.cn/?lm1/118.html（2026.7.9 检索）。

⑮ 福建华赢科技有限公司:《纤维调湿片产品介绍》，https://www.huawinltd.cn/productinfo.aspx?ProductsId=306&CateId=107&BaseInfoCateId=107（2026.7.9 检索）。

⑯ 杭州合物鑫新材料技术有限公司:《控湿片材产品展示》，https://www.hewuxin.cn/index.php?m=home&c=View&a=index&aid=13（2026.7.9 检索）。

⑰ 同⑥。

Art-Sorb 调湿颗粒>50%RH Art-Sorb 调湿板。除 40%RH 衡元纤维调湿板外，其余调湿材料均有一定的放湿滞后现象，即在放湿过程中，相同湿度下较其在吸湿过程中的平衡湿度高，同样湿度下有部分吸收的水分没有完全释放至环境中。在低湿环境下滞后不明显，吸湿量滞后现象主要在高湿部分。60%RH 衡元纤维调湿板在高湿部分的滞后较明显，但在相对湿度低于 60%RH 以后，基本无滞后现象。Art-Sorb 产品在各湿度段均有滞后，但较普通硅胶有很大改进。Art-Sorb 调湿产品与衡元纤维调湿板均有较好的调湿效能，但两者比较，衡元纤维调湿板具有湿容量大、用量少的优点；而 Art-Sorb 产品的平衡湿度受外界环境温度变化的影响较小。

山西博物院的苗春景 (2017 年) 对比了相同质量的 60%RH 衡元纤维调湿板 (A) 、ProSorb 调湿颗粒(B)和 Art-sorb 调湿颗粒(C)在 45%环境中的调湿效果。[⑱]研究发现，1.外界相对湿度在 43%RH-73%RH 区间内波动时，三种调湿剂调控下密闭展示盒内的相对湿度波动幅度差别较小，均在 2.2%RH ~ 2.5%RH 之间，可以认为三种调湿剂均具有较好的湿度稳定效果；2.调湿剂的平衡湿度并不一定就是标称湿度，三种调湿剂的平衡湿度与标称湿度之间的偏差分别为样品 A-4.5%RH、样品 B-6.0%RH、样品 C-0.5%RH，只有样品 C 的平衡湿度基本达到标称湿度；3.容器密封性对调湿剂的使用周期至关重要，高密封条件下三种调湿剂使用近 3 个月，湿度波动不大于 2.5%RH，而在低密封条件下，一个半月就有两种调湿剂湿度波动大于 5%RH；4.以标称湿度偏差 5%RH 为标准保持时间，则样品 A 可保持 17 天、样品 B 可保持 0 天、样品 C 可保持 47 天；以各样品湿度最高值偏差 5%RH 为标准保持时间，则样品 A 可保持 37 天、样品 B 可保持 40 天、样品 C 可保持 47 天；5.当调湿剂用量非常大时，分别在低于标称值 15%RH 和接近标称湿度的条件下放入调湿剂，除平衡时间不同外，其他差异并不明显，增加调湿剂用量有助于将偏离平衡湿度较大的环境湿度调节到平衡湿度，但能否达到标称湿度仍取决调湿剂的特性。

综上所述，Art-sorb 调湿剂的调湿性能较好，平衡湿度与标称湿度最接近；衡元纤维调湿板的湿容量可达到与 Art-sorb 调湿剂相当甚至更大的水平，但是当环境湿度较低需要调湿剂放湿来调节环境湿度时，可能出现平衡湿度低于标称湿度的现象；上述两种调湿剂的调湿效能均优于 ProSorb 调湿剂。

但是，需要注意，在实际应用调湿剂时，不但要考虑品牌间的差异，还要考虑批次之间的差异，有条件时要先进行小批次实验，然后再大规模使用。

三、总结和展望

综合来看，现有被动式调湿产品已能有效抑制微环境的剧烈湿度波动，呈现出较好的稳定效果，但在实际应用中，达到的平衡湿度与产品标称湿度之间可能存在一定偏差。与此同时，材料性能的衰减决定了调湿剂的使用寿命有限，需按需更换，由此带来的维护成本也不容忽视。未来，如何进一步提升控湿精度、延长服役周期并降低全生命周期成本，仍是该领域需要持续突破的方向。

[⑱] 苗春景：《几种调湿剂在文物展示中应用观察》，《文物世界》2017 年第 6 期，第 69-73 页。