

# 2023 年 IUPAC 化学领域十大新兴技术

作者：Fernando Gomollón-Bel

本文是 IUPAC 化学领域十大新兴技术项目的五周年纪念[1]，今年新入选的技术将使整个技术名单增长到五十个。这些技术具有很强的潜力，可以使我们的世界更加可持续，并为当前的多重危机提供适合的解决方案[2]。今年夏天，在荷兰海牙举行的 IUPAC 世界化学大会的主题是“连接化学世界”，这与化学领域十大新兴技术项目的目标几乎完美契合，跨学科研究是实现零排放并实现联合国 2030 年可持续发展目标的关键[3]。此外，今年化学领域十大新兴技术的选择特别促进了化学领域的跨学科合作，弥合了学术界与工业界之间的差距，同时继续保持化学制造商的竞争力。在众多可能的想法中，项目评审专家从以下领域进行了选择，涵盖了从合成和聚合物化学到健康和人工智能的各个领域。不同解决方案的技术成熟度各不相同，然而，这些技术都展示了重新构想我们世界和社会的引人注目的承诺。

## 可穿戴传感器技术

在过去的几年里，可穿戴设备经历了前所未有的崛起，彻底改变了我们与这一技术间的互动方式。全球新冠疫情加速了这一趋势，促使健康跟踪和监测技术蓬勃发展[4]。通常，可穿戴设备可以获取健身数据、睡眠模式，并实现无缝通信和导航。化学传感为可穿戴技术增加了更多有价值的信息，实时监测化学与生物信号和物理刺激，具有高灵敏度，且成

本低廉[5]。其中最流行的应用之一是糖尿病人的葡萄糖检测，可穿戴传感器已经得到广泛采用，并能够与智能手机和智能手表等日常设备快速连接，给予患者前所未有的力量和自由[6]。除了葡萄糖检测外，化学可穿戴传感器提供了探测各种生物标志物的机会，包括 pH、乳酸、尿酸、离子水平、细胞因子等等。这不仅为实时监测患者的进展提供了平台，还能够深入检测和诊断疾病，提高医学环境中传统实验室工作的速度和效率[7]。传感器通常将化学信号转换为电脉冲，与此同时，有几种其他方案探索了基于光谱读数的不同检测方法，如荧光、拉曼、阻抗和超声波等。除了寻找要测量的特征外，真正的挑战来自于开发具有高生物相容性、灵活性、耐久性和舒适性的设备[8]。一项令人激动的进展来自于微针技术的发展，除了检测生物标志物外，还可以即时给药[9]。另一个具有巨大潜力的进展是将可穿戴传感器与连接设备相结合。除了基本的读数外，这种连接性还可以在远程医疗中提供新的应用，使医生和医疗专业人员能够精确监测患者的健康状况，促进及时干预和个体化治疗。健康数据的持续收集也可能在药物发现方面带来新的机会，前提是必须保证匿名性，保护患者隐私。结合大数据和机器学习，由可穿戴化学传感器提供关键诊疗信息，已成为一种低成本、非侵入性的替代方案，用于传统的临床试验。传统的临床试验通常需要亲自访问、活检和采血。在多组学（基因组学、蛋白质组学、代谢组学）时代，化学可能会带来一场新的革命[10]。



图示：葡萄糖检测受到广泛欢迎——可穿戴传感器已被广泛采用，并可以与智能手机和智能手表等日常设备快速连接。

## 光催化制氢

在以往的化学领域十大新兴技术中，我们看到了令人兴奋的能源创新，如可持续氨和液态太阳能燃料。沿着这条路线，绿氢显然正在扮演一个关键角色——既可以作为替代化石燃料的选择，用于交通、工业和化学生产等领域，也可以作为一种可行的载体，安全地储存和储备间歇性可再生资源，如太阳能和风能。据估计，清洁氢每年可以减少超过 7 亿吨二氧化碳排放[11]。然而，目前 99% 的氢仍来自化石燃料，因此我们需要可持续的解决方案。光催化制氢只需要可再生资源（太阳光和水），是一个极具吸引力的替代方案。然而，这项技术仍处于早期阶段，其效率还不够高。相比之下，电

解水制氢技术已经展示了超过 30% 的效率，具有数不尽的具有成本效益的商业应用[12]。虽然效率还存在问题，但光催化制氢的最重要的优势是可扩展性，提供耐久性和实用性的安全系统。最近，研究人员展示了 100 平方米的光催化制氢装置[13]，与此同时，该领域发表论文和专利数量正在呈指数增长，彰显了其蓬勃发展的姿态。光催化制氢仍面临着一些挑战。例如，光催化制氢的表现与催化剂的能带结构和带隙，以及对更宽的波长范围的响应能力紧密相关。缩小带隙可以提高制氢效率，并减少对特定波长的依赖，从而最大限度地利用太阳能[14]。此外，可扩展的系统应当安全地分离氢气，以降低爆炸风险。像膜分离、金属有机框架以及最新的水凝胶等技术为构筑可浮动生产平台等应用提供了可能，为大规模（甚至直接从海水）生产可持续的氢气源展示了广阔的潜力[15]。此外，化学家可以与生物学家合作，通过一些最有竞争力的催化剂——酶，来提高光生物过程产氢的效率[16]。生物转化打开了从水、以及其他可再生资源（如沼气、生物质甚至废水）中产生清洁氢的大门[17]。微生物遗传和代谢工程以及酶的定向进化（这是第一届“化学领域十大新兴技术”之一）等工具可以推进通往可扩展、低成本、商业化的清洁氢的途径[18]。



图示：目前，99%的氢气仍然来自化石燃料，我们需要可持续的解决方案。一个有吸引力的替代方案是光催化制氢，它只需要可再生资源——阳光和水。

### 氯化物介导的海洋二氧化碳去除

联合国将海洋视为人类应对气候变化的最大盟友。它吸收了全球四分之一的碳排放，以及由温室气体产生的 90% 多余热量，这使得海洋成为阻止气候危机的一个巨大缓冲系统 [19]。然而，海洋的缓冲能力是有限的，不断积累的过量二氧化碳正在使海水酸化并影响海洋生物的生存。但从另一角度出发，多余的二氧化碳也可以转化为一种具有经济价值的碳资源，即非化石燃料的碳储备。从这个意义上来说，海水中二氧化碳的电化学捕集已成为二氧化碳净负排放的一种有吸引力的替代方案，其中的一些尝试（企业）可以利用捕集的二氧化碳合成每年十亿吨量级的合成燃料和化学原料 [20]。目前，大多数电化学二氧化碳去除系统都依赖于双极膜电渗析技术，但这项技术面临两个重要的挑战——1、成本投入高，2、可能发生导致海洋进一步污染的泄漏。最近，一种新的想

法完全绕过了膜，为海洋碳去除提供一种潜在的高效价廉机制[21]。这种替代方案只需要两个钛基电极、泵和气体分离系统即可实现，既经济实惠又易于工程放大。该方案被设计为一个循环过程：首先，泵将海水输送到第一个电极，进一步酸化以释放并滤出二氧化碳；接下来混合物将流向第二个电极，在反向电压和装置作用下提高 pH 值。两个电极的角色定期切换以实现连续流动，循环操作。根据初步的技术经济性研究，该方法捕集的二氧化碳成本仅为 56 美元/吨[22]。尽管这一新兴技术尚处于研发初期，但它的出现无疑将为减少和逆转海洋酸化提供富有希望的方案。



图示：海水中的二氧化碳电化学捕集已经成为一种有吸引力的二氧化碳净负排放的替代方案，一些尝试（企业）能够利用捕集的二氧化碳制造合成燃料。

### 化学中的 GPT 语言模型

2020 年，人工智能（AI）已经入选“化学领域十大新兴技术”[23]，此后，AI 模型和应用取得了显著进展，特别是得益于更好的大型语言模型（Large Language Models，简称

LLMs) 的发布, 例如旨在同时理解和生成对话的 OpenAI 的 ChatGPT。经过大量数据的细致训练之后, AI 模型学习了语言中的模式、语法和语义, 并理解输入和推理响应 (包括翻译、摘要等)。LLMs 的流行同样激发了科学界的兴趣和关注。例如, 一些人担心使用 AI 工具生成的虚假研究论文最终可能会被发表——欺骗审稿人相对容易, 欺骗专门的抄袭检测工具就更简单了[24]。据称, LLMs 还开始生成同行评审报告, 这给现有出版业的稳定性和可靠性带来了的许多问题[25]。尽管如此, 许多人仍然认为 LLMs 是“该领域的未来”。因为除了检索看起来像现实生活中人类讨论的回复之外, 语言模型已经成功地用于化学应用。ChatGPT 和其他算法分析显微镜图像、预测蛋白质结构, 甚至估计反应产率——可能性是无穷的[26]。一种名为“ChemCrow”的新颖工具充分利用了 LLMs, 可以完成包括规划合成路线、控制机器人反应平台、自动化分析等任务。此外, 最新的更新包括多项安全检查, 以避免意外制备潜在有害产品, 例如爆炸物、化学武器和受控物质[27]。一些研究表明, LLMs 比诸如深度学习等工具更好地“理解”复杂的化学问题, 扩展了聊天机器人之外的可能性[28]。此外, LLMs 可能会对化学教育产生优势, 简化文献综述、信息搜索等任务。虽然一些早期实验表明 LLMs 仍然在基础化学问题上面临困难, 但 ChatGPT 可以帮助学生和教授摆脱“会议和备忘录的泥潭”, 从而有更多的时间用于创造性和建设性的交流[29]。



## 合成电化学

电子交换驱动化学反应。由于电力是最便宜、最环保的电子来源，自从 19 世纪初电池被发现以来，它就被用作转化物质的强大工具。在亚历山大·伏尔塔（Alessandro Volta）的实验之后不久，第一次电解现象随之出现，几年后迈克尔·法拉第（Michael Faraday）对一个有机化合物进行了电化学反应——乙酸盐的脱羧反应。这些名人雅集之后，该领域就逐渐消失了，在 20 世纪中期，随着循环伏安法这项可以更好表征反应过程的技术发现，合成电化学短暂复苏，并在计算机计算方面的进步后得到进一步加强[30]。现在，这些进步，加上直观且廉价设备的开发和部署，使得曾经被认为是“黑匣子”的过程变得清晰明了。合成电化学由于具备诸如更高水平的化学和区域选择性的好处，正在经历复兴[31]。现在，电化学使得各种转化都成为可能——例如合成醚、Birch 还原反应、碳-氢键的氧化和氟化等[32]。最近，研究人员在该领域取得了另一项突破——通过交流电技术，即使在存在其他氧化还原活性基团的情况下，也可选择性地还原羰基。该团队与化学设备制造商 IKA 紧密合作，设计和开发硬件和软件，以使

新方法对尽可能多的实验室易于使用。ElectraSyn 是一种旨在推广合成电化学的设备[33]。电化合成与绿色化学密切相关，并具有几个关键方面的共同点，包括高水平的安全性、可靠性、原子经济性和低能耗。这些标准简化了工业化过程，例如 Baizer 工艺，即一种制造己二腈（用于生产尼龙的关键物质）的方法，每年可生产超过 300 千吨[34]。巴斯夫也利用电化学合成甲苯取代物，每年可生产 3 万多吨对甲基苯甲醛和 0.35 万吨对甲基苯甲醚。3M、拜耳、庄信万丰、罗氏、山德士等公司也最大程度地利用电化合成来生产关键产品和中间体[35]。目前，许多生产商正在采用电化合成技术来增强其生产过程，在化学工业中降低成本和温室气体排放。与可再生电力相结合，电化学作为有机合成的可持续和多功能工具脱颖而出。

### 人造肌肉

令人惊讶的是，人造肌肉的概念——用驱动器模拟肌肉动作——可以追溯到 17 世纪英国科学家罗伯特·胡克(Robert Hooke) 的实验。然而，最近 30 年化学和材料科学的发展才使其真正成为可能。一些前沿方案安全地通过了体内研究[36]，展示出该领域的巨大潜力。然而，专家预计，临床试验和用于人体还需要数年时间。人造肌肉的研究涉及多种材料，需要多学科努力，研究装置在不同外部刺激下（包括电流、温度、pH 值和光等）的收缩、膨胀或旋转[37]。挑战是双重的：首先要合成模拟肌肉的结构，然后是引入功能性和响应性。研究人员从昆虫身上找到灵感，发现微丝可以模拟肌球

蛋白和肌动蛋白的运动和微观结构，这是自然界中主要的肌肉蛋白。除了功能强大的聚合物外，电流响应的弹性体也有望助力于心脏手术、尿失禁和某些中风副作用患者的康复[38]。另一种有吸引力的方案是设计和开发模仿骨骼肌自然结构的复合材料。通过液晶弹性体和石墨烯填充物，这些人造肌肉材料模拟了天然纤维中的肌球蛋白和肌动蛋白，保持了较强的机械性能，并能传递电信号，这是驱动和运动等功能的关键。该技术现已获得专利，名为“大力神(Hercules)”纤维，正在通过一家韩国衍生公司进行商业化，并可能在国防、制造业和医学等领域发挥作用[39]。此外，人造肌肉已经彻底改变了机器人技术，为假肢、外骨骼和生物医学设备（如夹具、显微外科装置等）等应用建立起具有高度适应性且灵活的系统。借助人造肌肉，机器人可能提供更精准的控制，并通过逼真的运动提高响应能力。这使其比现有的替代品更加适用与安全，尤其是在执行各种精细任务时[40]。



图示：人造肌肉的研究涉及多种材料，需要多学科努力，研究装置在不同外部刺激下（包括电流、温度、pH值和光等）的收缩、膨胀或旋转。

## 噬菌体疗法

噬菌体疗法是一种很有前途的对抗细菌感染的方法，在抗生素耐药性上升到令人担忧的时代——2019 年细菌感染直接或间接导致了约五百万人死亡，其中大部分是低收入和中等收入群体。如果这个趋势继续下去，目前的估算认为到 2050 年，这个数字将翻倍，这将立即对全球经济产生影响，每年造成一万亿美元的损失[41]。噬菌体的发现发生在 20 世纪初，由 Frederick Twort 在 1915 年和 Félix d'Hérelle 在 1917 年同时独立发现。后者不仅广泛研究了这种专门针对细菌的病毒，并且已经认识到噬菌体作为治疗细菌感染的治疗工具具有巨大潜力。在过去的几年里，噬菌体领域经历了一次复兴，展示出治疗细菌感染以及其他疾病（如癌症）的巨大前景[42]。应用之间的差异在于噬菌体病毒的关键结构差异——“溶解性”噬菌体感染细菌并在其中复制，直到重复体数量毁坏宿主；另一方面，“非溶解性”或“溶原性”噬菌体[43]则将其基因组同化到宿主内，并在癌症、中风、骨缺陷等靶向治疗中得到了应用[44]。除了生物学以外，化学也可以补充噬菌体的特性和特征，并激发在药物发现、诊断和材料科学中的应用。例如，包封技术（如脂质体、纳米颗粒、水凝胶或金属有机框架）可以控制噬菌体的递送，提高稳定性、可用性、防止降解以及先进的活性靶向[45]。噬菌体还在新型纳米医学应用中发挥作用，包括研究蛋白质相互作用。最近的研究表明，噬菌体可以在其表面展示感兴趣的肽和蛋白质用于蛋白质组学分析，这是一种发现诊断、治疗和信号通路的有

趣靶点的策略[46]。最后，噬菌体已经成为超分子化学极其通用的平台，在化学、材料科学和医学尖端领域发挥作用。噬菌体形成了无机纳米结构、诱导干细胞分化的平台、检测了疾病生物标志物，并且被构建成为组织再生等应用的结构支架[47]。噬菌体的重新发现不仅可以创造对抗所谓“超级细菌”的创新方式，而且也可以刺激超分子化学和生物材料领域令人兴奋的发现。

### **PET 的生物回收**

塑料污染是一个持久的问题[48]。最近的报告显示，塑料和微塑料出现在了最不该出现的地方——南极磷虾、新鲜降雪，甚至人类的血液样本[49]。经济合作与发展组织(OECD)担心，尽管过去 20 年世界上产生的塑料废弃物增加了一倍，但只有 9%的塑料得到妥善回收，22%的垃圾没有被恰当处置[50]。化学再次可能提供解决方案，为可持续性发展提供更好的解决方案，提供基于资源再利用和减少废品和副产品的新模式[51]。发现和表征能够自然水解和降解聚合物和塑料的酶，为重新利用和回收塑料开辟了新的可能性[52]；而定向进化的发展（荣获 2018 年诺贝尔化学奖，并被选为 2019 年化学领域十大新兴技术之一），进一步拓展了这个领域的前景[53]。一个特别令人兴奋的进展是一种能够高效率水解聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）并将其转化为聚合单体的酶。传统的 PET 回收技术会导致机械性能逐渐降低。然而，通过进化的酶最终能生产出与石油基 PET 具有相同性质的 PET，有助于循环利用，并减少填埋场和环境中的废弃物[54]。好消息

是商业化即将到来。法国绿色化学公司 **Carbios** 正在建造一家工厂，将在 2025 年前实施这项创新技术，每年可回收 50 万吨 PET，相当于 20 亿个 PET 瓶[55]。



图示：塑料回收领域特别令人兴奋的进展是一种能够高效率水解 PET 并将其转化为聚合单体的酶。

## 解聚

我们已经回顾了塑料污染的问题。而且，早在 2019 年我们就探索了一些基于生物技术的解决方案，将高分子聚合物分解回基本构建单元——单体。现在，我们正在重新审视这种回收方法，为其增加了升级回收、循环利用和可持续性设计的新视角。不同的工具可以为将塑料废弃物转化为有价值的资源提供有趣的思路。化学剪切聚合物成为单体是一种特别适合缩聚聚合物（如 PET、聚酰胺和聚氨酯）的解决方案。类似地，高温过程如热解和气化可以将如聚乙烯和聚丙烯等聚合物转化为较小的分子片段——并非单体而是一些有趣的化学品，以实现回收利用。一些初创公司和企业已经成功地各种废弃产品（包括 PET 包装、瓶子、纺织品、聚氨酯和聚苯乙烯）实施了化学回收过程[55]。探索正确的化学回收

方法可以大大推动塑料的循环经济，帮助实现塑料价值链中的碳中和。为实现更有效的解聚要优先考虑两个方面，包括聚合物和大分子结构的合理设计，以及在塑料加工过程中减少使用（如有可能，不使用）添加剂。所有面向重塑聚合物和塑料生产的努力都可能减轻污染问题造成的困扰[56]。一些令人兴奋的例子包括聚二酮烯胺，这是一类让我们更接近闭环回收、产生零废弃塑料的神奇聚合物。聚二酮烯胺中的共价键易于通过简单的力化学方法进行回收和升级重构[57]。另一种有吸引力的替代方案是微波辅助的解聚，这种方法已经放大到 PET 的回收。近期，瑞士的 Gr3n 公司宣布，将在 2027 年开设一个新工厂，该工厂每年将使用这种方法回收 4 万吨 PET[58]。除了可生物降解性，化学家们还可以通过理性设计制造出安全和可持续的聚合物和塑料。例如，最新的分子建模进展可以帮助预测和预期可能的污染问题、降解副作用和回收反应的可行性。此外，全面的生命周期分析将帮助我们更好地理解废弃物以外的影响，包括经济、碳排放和产品寿命等因素。在这一点上，像 REACH[59]这样的政策和已经在欧盟实施的新型数字产品护照，可以催化向循环经济的转变[60]。



图示：不同的工具可以为将塑料废弃物转化为有价值的资源提供有趣的思路。化学剪切聚合物成为单体是一种特别适合 PET、聚酰胺和聚氨酯等聚合物的解决方案。

### “低糖”疫苗

糖类——即寡糖和多糖——覆盖了大多数的生物结构，包括核酸、脂质、蛋白质以及细胞。糖涂层对多种功能有贡献，包括免疫反应、受体识别以及细胞间的通信、信号传导和相互作用。理解糖类和“糖组学”对于开发疫苗、研究疾病和推进生物医学研究至关重要[61]。糖在研发用于治疗 SARS-CoV-2（引发 COVID-19 的病毒）的疫苗和治疗方法中起着关键作用。研究人员证明，糖类在刺突蛋白的识别过程中起到了关键作用，使得感染更为高效[62]。而最近，另一项与糖化学有关的进展为研制更好、更广泛的、对新突变体具有更强效力的 SARS-CoV-2 疫苗提供了令人感兴趣的基石。在这一研究中，去除刺突蛋白的糖皮似乎提供了一个强大的防感染保护。删除一些糖，使病毒最常见和保守的区域暴露，这就引发了更强烈和更广泛的免疫反应，包括中和抗体和 T 细胞。这种“无糖”疫苗在体外展示了许多优势，然而，还需要进一步的研究来证实体内的结果，然后由临床试验进一步评估[63]。一种类似的解决方案，“糖修剪”，也在开发更有效

的抗 HIV 感染疫苗中显示出了潜力。糖蛋白质的修饰改善了动物模型的免疫反应，帮助更好地识别 HIV 病毒，尽管它有一个使抗体和 T 细胞受骗的糖涂层[64]。尽管这项技术还处于非常早期的阶段，但一些生物技术和制药公司已经取得了进一步开发和商业化这个想法的协议。

2023 年化学领域十大新兴技术代表了一个多元化的选择，涵盖了从早期想法到工业化创新的各个领域，包括合成、材料科学、能源、生物医药和教育。也许我们不应该把化学视为“中心科学”，而是应该把它看作“连接科学”，它能够催化跨学科合作，并促进工业创新。同样，可持续性始终是化学领域新兴十大技术的普遍主题——该倡议的终极目的仍然是确保可持续的未来，推动我们的社会发展，改善我们的生活质量[65]。我们需要富有创意的化学解决方案来创造一个更美好的世界，因此让我们共同努力，找出最具想象力的想法和创新以确保增长，以及确保每个人都具有获取可再生资源、燃料、食品和药品的基本权利。



图示：理解糖类和“糖组学”对于开发疫苗、研究疾病和推动生物医学研究至关重要。糖在开发针对引起 COVID-19 的病毒的疫苗和治疗方法中发挥了关键

作用。

## 致谢

F.G.-B 感谢所有为 2023 年化学领域十大新兴技术提供了想法和提交内容的人，以及作出最终选择的专家评委，包括：Ehud Keinan、Javier García Martínez、Molly Shoichet、Juliane Sempionatto、Mamia El-Rhazi、Jorge Alegre Cebollada、Bernard West、Natalia Tarasova、Zhigang Shuai 和 Rai Kookana。特别感谢 Michael Dröscher 自 2019 年该倡议开始以来的协调工作，以及 Fabienne Meyers 在编辑过程中的所有支持。感谢 Lynn Soby、Greta Heydenrych、Wolfram Koch、James Liu、Arasu Ganesan 在会议期间的贡献。当然，还要特别感谢 Bonnie Lawlor，感谢她在组织电话会议、记录会议内容和修订这篇手稿以显著提高其可读性和质量方面的无尽耐心。

## 参考文献

1. Gomollón-Bel, F. *Chem. Int.*, 2019, 41, 2, 12, DOI: 10.1515/ci-2019-0203
2. Gomollón-Bel, F., García-Martínez, J. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62, 25, e202218975, DOI: 10.1002/anie.202218975.
3. United Nations (2015). “The Sustainable Development Agenda.” Accessed on 22/07/2023.
4. Channa, A. et al. *Sensors*, 2021, 21, 17, 5787, DOI: 10.3390/s21175787.s

5. Qian, R.-C., Long, Y.-T. *ChemistryOpen*, 2018, 7, 2, 118, DOI: 10.1002/open.201700159.
6. (a) Teymourian, H. et al. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, 49, 7671, DOI: 10.1039/D0CS00304B. (b) Saha, T. et al. *Chem. Rev.*, 2023, 123, 12, 7854, DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00078.
7. Zhao, H. et al. *Nanoscale*, 2022, 14, 1653, DOI: 10.1039/D1NR06244A.
8. DeMello, A., Bakker, E. *ACS Sensors*, 2023, 8, 4, 1368, DOI: 10.1021/acssensors.3c00437.
9. Waghule, T. et al. *Biomed. Pharmacother.*, 2019, 109, 1249, DOI: 10.1016/j.biopha.2018.10.078.
10. Sempionatto, J.R. et al. *Nat. Rev. Chem.*, 2022, 6, 899, DOI: 10.1038/s41570-022-00439-w.
11. Hydrogen Council (2021). "Hydrogen for net-zero". Accessed on 22/07/2023.
12. Jia, J. et al. *Nat. Commun.*, 2016, 7, 13237, DOI: 10.1038/ncomms13237.
13. Nishiyama, H. et al. *Nature*, 2021, 598, 304, DOI: 10.1038/s41586-021-03907-3.
14. "Sustainable Hydrogen Production." Dincer, I., Zamfirescu, C., Eds. Elsevier, 2016, ISBN: 9780128015636.
15. Lee, W.H. et al. *Nat. Nanotech.* 2023, 18, 754, DOI: 10.1038/s41565-023-01385-4.
16. Magnuson, A. et al. *Joule*, 2020, 4, 6, 1157, DOI:

10.1016/j.joule.2020.05.014.

17. (a) Azwar, M. et al. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, 31, 158, DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.022. (b) Kumar, G. et al. *Energy Convers. Manag.*, 2017, 141, 390, DOI: 10.1016/j.enconman.2016.09.087.

18. Song, H. et al. *ACS Energy Lett.*, 2022, 7, 3, 1043, DOI: 10.1021/acsenergylett.1c02591.

19. United Nations (n.d.). “The ocean—the world’s greatest ally against climate change”. Accessed on 22/07/2023.

20. Digdaya, I.A. et al. *Nat. Commun.* 2020, 11, 4412, DOI: 10.1038/s41467-020-18232-y.

21. Chandler, D.L. “How to pull carbon dioxide out of seawater”. *MIT News*, 16/02/2023. Accessed on 22/07/2023.

22. Kim, S. et al. *Energy Environ. Sci.*, 2023, 16, 2030, DOI: 10.1039/D2EE03804H.

23. Gomollón-Bel, F. *Chem. Int.*, 2020, 42, 4, 3, DOI: 10.1515/ci-2020-0402.

24. Paul, M. “When ChatGPT writes scientific abstracts, can it fool study reviewers?” *Northwestern University*, 10/01/2023. Accessed on 22/07/2023.

25. Trager, R. “The promise and pitfalls of generative AI for research”. *Chemistry World*, 17/03/2023. Accessed on 22/07/2023.

26. White, A.D. *Nat. Rev. Chem.* 2023, 7, 457, DOI:

10.1038/s41570-023-00502-0.

27. Bran, A.M. et al. arXiv, 2023, 2304.05376, DOI: 10.48550/arXiv.2304.05376.

28. Ball, P. “Interpreting the impact of AI large language models on chemistry”. Chemistry World, 05/04/2023. Accessed on 22/07/2023.

29. Francl, M. Nat. Chem., 2023, 15, 890, DOI: 10.1038/s41557-023-01253-7.

30. Leech, M.C. and Lam, K. Nat. Rev. Chem., 2022, 6, 275, DOI: 10.1038/s41570-022-00372-y.

31. Yan, M. et al. Chem. Rev., 2017, 117, 21, 13230, DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00397.

32. Kingston, C. et al. Acc. Chem. Res., 2020, 53, 1, 72, DOI: 10.1021/acs.accounts.9b00539.

33. Gomollón-Bel, F. “Reaction uses alternating current to selectively reduce carbonyl groups”. C&EN, 25/10/2021. Accessed on 22/07/2023.

34. Möhle, S. et al. Angew. Chem. Int. Ed., 2018, 57, 21, 6018, DOI: 10.1002/anie.201712732.

35. Leech, M.C. et al. React. Chem. Eng., 2020, 5, 977, DOI: 10.1039/d0re00064g.

36. Martínez, T. et al. Bioeng. Transl. Med., 2023, 8, e10396, DOI: 10.1002/btm2.10396.

37. Mirvakili, S.M. and Hunter, I.W. Adv. Mater., 2017, 30,

6, DOI: 10.1002/adma.201704407.

38. Sansom, C. “A test of strength for artificial muscles”. *Chemistry World*, 24/01/2022. Accessed on 22/07/2023.

39. Kim, I.H., et al. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17, 1198, DOI: 10.1038/s41565-022-01220-2.

40. Shi, M. and Yeatman, E.M. *Microsyst. Nanoeng.*, 2021, 7, 95, DOI: 10.1038/s41378-021-00323-5.

41. O’Neill, J. “Antimicrobial resistance: tackling a crisis for the health and wealth of nations.” *UK Review on Antimicrobial Resistance*, 01/12/2014. Accessed on 22/07/2023.

42. (a) Kortright, K.E. et al. *Cell Host Microbe*, 2019, 25, 2, 219, DOI: 10.1016/j.chom.2019.01.014. (b) Strathdee, S.A. et al. *Cell*, 2023, 186, 1, 17, DOI: 10.1016/j.cell.2022.11.017.

43. Steward, K. “Lytic vs Lysogenic—Understanding Bacteriophage Life Cycles”. *Technology Networks: Immunology & Microbiology*, 28/08/2018. Accessed on 22/07/2023.

44. Chang, C. et al. *Mater. Today Bio.*, 2023, 20, 100612, DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100612.

45. Durr, H.A. and Leipzig, N.D. *Mater. Adv.*, 2023, 4, 1249, DOI: 10.1039/D2MA00980C.

46. Xu, H. et al. *WIREs Nanomed. Nanobiotechnology*, 2020, 12, 4, e1623. DOI: 10.1002/wnan.1623.

47. Cao, B. et al. *Acc. Chem. Res.*, 2016, 49, 6, 1111, DOI: 10.1021/acs.accounts.5b00557.

48. Iroegbu, A.O.C. et al. ACS Omega, 2021, 6, 19343, DOI: 10.1021/acsomega.1c02760.

49. (a) “Microplastic found in Antarctic krill and salps.” British Antarctic Survey, 29/03/2023. Accessed on 22/07/2023.

(b) Osborne, M. “In a First, Microplastics Are Found in Fresh Antarctic Snow”. Smithsonian Magazine, 16/06/2022. Accessed on 22/07/2023. (c) Carrington, D. “Microplastics found in human blood for first time”. The Guardian, 24/03/2022. Accessed on 22/07/2023.

50. “Global Plastics Outlook”, OECD, 22/02/2022. Accessed on 22/07/2023.

51. García-Martínez, J. Angew. Chem. Int. Ed., 2021, 60, 4956, DOI: 10.1002/anie.202014779.

52. (a) Buchholz, P.C.F. et al. Proteins, 2022, 90, 7, 1365, DOI: 10.1002/prot.26325. (b) Yang, J. et al. Environ. Sci. Technol., 2014, 48, 23, 13776, DOI: 10.1021/es504038a.

53. Xu, A. et al. Trends Microbiol., 2023, 31, 7, 668, DOI: 10.1016/j.tim.2023.04.002.

54. Tournier, V. et al. Nature, 2020, 580, 216, DOI: 10.1038/s41586-020-2149-4.

55. “Carbios to build in France its first-of-a-kind manufacturing plant for fully bio-recycled PET in partnership with Indorama Ventures”. Carbios, 25/02/2022. Accessed on 22/07/2023.

56. Mangold, H. and Vacano, B. *Macromol. Chem. Phys.*, 2022, 223, 13, 2100488, DOI: 10.1002/macp.202100488.
57. Ragauskas, A.J. et al. *ChemSusChem*, 2021, 14, 19, 3982, DOI: 10.1002/macp.202100488.
58. Christensen, P.R. et al. *Nat. Chem.*, 2019, 11, 442, DOI: 10.1038/s41557-019-0249-2.
59. Tullo, A.H. “Polyester recycler to build Spanish plant”. *C&EN*, 30/07/2023. Accessed on 02/08/2023.
60. REACH stands for Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. It is a regulation that entered into force in the EU in 2007, to improve the protection of human health and the environment from the risks of chemicals.
61. Vacano, B. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62, 12, e202210823, DOI: 10.1002/anie.202210823.
62. Smith, B.A. and Bertozzi, C.R. *Nat. Rev. Drug. Discov.*, 2021, 20, 217, DOI: 10.1038/s41573-020-00093-1.
63. Casalino, L. et al. *ACS Cent. Sci.*, 2020, 6, 10, 1722, DOI: 10.1021/acscentsci.0c01056.
64. Huang, H.-Y. et al. *Sci. Transl. Med.*, 2022, 14, 639, eabm0899, DOI: 10.1126/scitranslmed.abm0899.
65. Zhang, Y.-N. et al. *Nat. Commun.*, 2023, 24, 1985, DOI: 10.1038/s41467-023-37742-z.
66. Gomollón-Bel, F. and García-Martínez, J. *Nat. Chem.*, 2022, 14, 113, DOI: 10.1038/s41557-021-00887-9.

Fernando Gomollón-Bel. ([fer@gomobel.com](mailto:fer@gomobel.com)) 是一位自由科学作家和传播者。他是 Agata Communications, Ltd. 的联合创始人，该公司位于英格兰剑桥（英国，邮编：CB4 1YF）。