

国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）2021 年化学领域十大新兴技术

为可循环、气候中和的未来所取得的突破性进展

作者：Fernando Gomollón-Bel



国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）致力于提升化学在全世界的影响力。最近，它发起了一个新的项目——化学领域十大新兴技术，通过强调即将成为改变游戏规则的商业突破的发展来展示化学科学的巨大重要性[1]。其中一些技术对我们的社会具有真正的变革意义，如 RNA 疫苗和快速检测，这两项技术都是在新冠病毒 COVID-19 大流行之后使我们顺利过渡到新常态的关键技术。今年，“十大技术”的努力仍在继续——包括一个全新的标志和进一步的行动，以便在本文之外传播和推广该项目。新选择的新兴技术既包括针对化学工业的成熟的、高技术就绪水平（Technology Readiness Level, TRL）的应用，也包括开创性的可能性。当然，其中许多技术仍然涉及正在进行的冠状病毒危机，重点是防止 SARS-CoV-2 等病原体传播的新药物解决方案。此外，许多技术是被用来处理气候危机，为实现联合国的可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）提供新的路线图[2]。全球变暖的后果就在眼前——热浪、洪水和山火持续不断破坏着我们的星球。化学将为实现可持续发展的未来提供关键的工具[3]，其中很多都包含在“十大技术”这一独特的选择中。IUPAC 的专家们已经选出

了 2021 年化学领域十大新兴技术——这十个想法将促进工业创新和改变我们的世界。

区块链技术

数字化的进步使化学创新更具可重复性和可追踪性

Solvay、Evonik 和 BASF 是一些正在探索区块链技术在化学领域应用中处于世界领先的公司。此外，许多人认为，由于区块链的主要内置功能之一——可追溯性，它是实现科学研究变得具有更多重复性的关键。早在 2008 年，中本聪就构思和设计了区块链——尽管许多其他计算机科学家在 20 世纪 80 年代和 90 年代也提出过类似的想法。中本聪设计了深受人们喜爱的加密货币比特币，其本质是一份数字金融记录和货币交易的清单，用加密算法连接，并由分布式点对点的用户网络来管理。此后，专家们将这种技术用于开发其他应用，如智能合约、数字股票和艺术品中重要的真实性证明。根据设计，区块链提供了一个不可改变的储存库来记录任何种类的交易，这在整个科学研究过程中提供了巨大的可能性。由于交易的原始记录在严格的加密保护下被安全地保存在整个计算机网络中，欺诈性的改动很快就会被发现。美国国家标准和技术研究所以及其他著名机构认为，区块链可以使所有领域的科学家受益，并解决诸如可重复性等重要问题[4]。例如，英国的化学家已经探索了利用区块链来追踪一系列简单的计算结果。他们的初步结果表明，这种类型的加密环境可以同时提高透明度和可获得性，因为该过程的每一步都被记录下来并在数字账本中共享[5]。

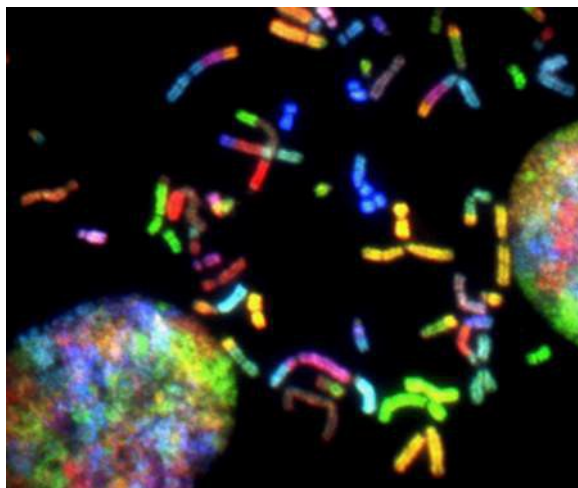
德国研究员 **Sönke Bartling** 相信，区块链对研究的好处不仅仅在于安全的实验室记录本和数据收集，还能增进研究工作的出版、资助、评估和认可。事实上，世界知识产权组织正在探索区块链改造知识产权 (IP) 行业的潜力——从发明者的证明材料到版权费的管理[6]。化学公司在这一方面希望保持领先地位；许多公司已经创建了基于区块链的系统，以实现其供应链的现代化。这项技术保证了所有各方的安全交易，将可追溯性提高到前所未有的详细程度。“智能合同”是完全自动化的，能够持续跟踪化学品从原材料到市场货架的情况。欧洲化学品制造商也在探索区块链推进循环经济的可能性——通过更容易、更可靠的生命周期评估，区块链将可能提高可回收性，改善资源的利用，并最终降低整体成本[7]。区块链在化学领域的可能性的另一个证明是，欧盟委员会通过不同的资助项目支持的初创公司的大量出现，包括 **ChemChain** 等。这家公司通过其去中心化的加密账本，来确保化学品的数据和信息得到充分保护，这吸引了陶氏-杜邦等领先企业的关注。预计到 2030 年，区块链将产生超过 3 万亿美元的商业价值[8]，而其在化学领域的应用肯定会占其中的很大份额。

半合成生命体

拓展生物化学和治疗学的新字母

炼金术士们梦想将铅转化为金。如今，化学家们幻想着扩展生命的密码——一个隐藏生物信息的通用系统。在过去的几年里，这个领域已经成为现实，并且已经取得了一些了不起的里程碑。经过几十年

的失败尝试，Scripps 研究所的一个研究小组终于在 2014 年成功地将两个人造字母添加到基因字母表中——其绰号分别为 X 和 Y[9]。从那时起，科学家们进一步扩大了基因字母表，增加了 B、P、S 和 Z 等新碱基[10]。所有这些合成的核苷酸可以在我们的基因组中填充新的“词汇”、新的想法——例如创造用于诊断、治疗以及其他方面的拯救生命的蛋白质所需的信息。最终，化学家们还设计了新的生物系统来解释和利用这些非自然的字母。大肠杆菌的基因工程菌株在其 DNA 中携带这些人工核苷酸碱基，并将其编码的信息转录为不寻常的蛋白质，这些蛋白质还具有非传统的氨基酸，如吡咯赖氨酸和偶氮苯丙氨酸[11]。如今，化学家们正在研究如何完善这些人工生化机器，开发新的系统以尽量减少转录和翻译过程中出现错误的数量，这得益于赢得诺贝尔奖的 CRISPR/Cas9 等技术的迅速发展。这些发现的意义超越了化学本身——生命的基本构筑单元超出了我们本身所拥有的范围，这引发了对地外生命可能是什么样子的新思考。除了哲学问题，非天然核苷酸和氨基酸为设计靶向治疗药物提供了新的化学工具，包括 THOR-707，一种目前正在进行临床试验的针对转移性实体肿瘤的药物。引领这项技术的公司之一是 Synthorx 公司，由合成生物学先驱 Floyd Romesberg 建立。它在 2019 年底被法国制药巨头 Sanofi（赛诺菲）公司以 25 亿美元的价格收购——这显示了对这项新兴技术的商业兴趣。在未来，化学家可能会发现其他人工 DNA 字母，以及合成新的非天然氨基酸，拓展我们已知生命的局限性，并实现一系列全新的、更好的疗法和医疗解决方案。



超浸润性

一个世纪之久的发现正在提供新的机会

英国科学家 Thomas Young（托马斯-杨）主要因双缝实验而闻名，该实验支持了光是一种波的观点。然而，他也开创了其他重要的科学领域，包括对浸润性的研究——液体与固体表面保持接触的能力。1805 年，杨基于液滴在界面上形成的接触角第一次提出了这个概念的定义。真正浸润的液体会采用相当平坦的形状和小的接触角，而不浸润的液体则形成几乎是球形的结构和大的接触角[12]。经过两个世纪对这一现象的研究，科学家们获得了更好的理解，甚至掌握了如何随意调整浸润性，设计出具有特殊性能的新材料。其中，超浸润性在能源、健康、农业等领域具有巨大的应用前景。其中一些进展在很大程度上受到自然界微纳米结构的启发，如壁虎和青蛙的脚、蚊子的眼睛、仙人掌和玫瑰的表面。在这些例子的基础上，科学家们已经在金属、聚合物、织物等材料构建出具有纳米结构的表面。当然，化学是

这些设计的基础，这些设计都需要精巧的制造技术。超浸润性结构已经导致了惊人的反应性能。这种表面表现出独特的流体动力学性质，从而提高了一类界面相互作用扮演关键因素的化学反应的效率，特别是光催化和电催化反应。比如，高活性的水分解、环氧化、酯化和缩合反应等。此外，这类纳米结构催化剂通常表现出更高的耐久性、可回收性和选择性，为符合联合国可持续发展目标中更绿色、更高效的化学工艺过程铺平了道路[13]。超浸润性表面在传感器、绿色打印、能量存储、废液处理、淡水收集等领域均具有重要用途。来自中国和韩国公司正在探索其在自清洁纺织品、油水分离和相变液体冷却等领域的应用。虽然在制造技术方面仍然存在许多挑战，但研究人员相信，这项技术将彻底改变材料科学，新的机会正在不断涌现[14]。

人工腐殖质

为可持续和高效的农业设计负碳解决方案

农业、畜牧业和土地使用几乎占有所有温室气体排放的三分之一。除了造成令人担忧的气候危机外，这些都直接影响到作物产量——政府间气候变化专门委员会（IPCC）的报告预测，我们将在 2030 年达到一个关键的状态。再一次，化学可以给出一个有希望的答案，一个人工替代腐殖质的方法，以便更好地管理我们土壤中稀缺的资源。虽然隐藏在我们脚下，但有机物分解成腐殖质是碳循环的第二大过程，仅次于光合作用。因此，设计策略以使其更有效是目前的一个优先事项。此外，人工腐化过程保证了能完全控制整个反应过程，这可以得到更清洁、更安全和

更绿色的施肥解决方案。目前，有几种方法可以加速有机物的分解——其中热液腐化正在成为其中最吸引人的方案之一。根据 Fan Yang 和 Markus Antonietti 的设想，该技术是在有灰烬存在的热水中 "煮" 有机物。这些过程中的特定条件模拟了自然界的地球化学过程，并产生了与自然腐殖质残留物相当的混合物产物[15]。最近的实验室实验表明，这些人工腐殖质可以改善土壤质量和健康，以及农业生产力——这是抵消气候变化负面影响的一个有吸引力的选择。这种提高来自于人工腐殖质的诸多好处。研究表明，它能改善水和肥料的结合，从而提高资源的利用率，减少富营养化等副作用，并能刺激土壤微生物，有利于矿物质的吸收和消化。此外，与自然界生物化学分解过程中不可避免地排放出二氧化碳和甲烷等温室气体不同，人工腐殖质基本上是负碳的[16]。专家们认为，这些碳固定解决方案将有助于循环经济，与可持续发展目标 SDG 13 保持一致，并形成碳中和社会。目前，欧洲的一些机构正在努力开发第一批试验工厂，用以大规模制备人工腐殖质。人工腐殖质与 IUPAC 十大新兴技术如纳米农药、纳米传感器和人工智能一起，将为更可持续和高效的农业过程铺平道路。



RNA 和 DNA 的化学合成

COVID 疫苗后核酸在药物化学中的应用前景

去年，IUPAC 强调了 RNA 疫苗在结束 COVID-19 方面的潜力，并很可能在未来用于许多其他疾病，包括癌症、艾滋病和流感[17]。这些疫苗适应性强、用途广泛，而且制造速度相对较快。据《Our World in Data》的数据，到 2021 年 7 月底美国已经使用了超过 3.25 亿剂量的 mRNA 疫苗。然而，如果没有化学合成核酸方面的突破，这一切都不可能发生。现在，经过 50 多年的技术发展，RNA 和 DNA 的制造已经完全自动化和大众化，以至于一些“台式”合成设备已在市场上出售。在本次十大技术的选择中，这可能是市场化最成熟的一个。它已经成功地从以亚磷酰胺化学为核心的基础实验室反应过渡到上个世纪的创新里程碑。如今，核酸的合成已经进步到足以产生接近科幻小说的结果。2019 年，中国研究人员报道了一个概念验证性的合成器，它使用了与传统喷墨打印机相同的原理。利用这项技术，科学家们将不同的 DNA 链直接并精确地打印到硅基微反应器中——这些设备在化学、生物技术和医学方面有无数的应用[18]。大型 IT 公司，如微软和 Western Digital，目前正在探索将化学合成的 DNA 用于数据存储的可能性，结果非常有希望。最新的结果表明，核酸比传统的基于磁性材料的解决方案能更持久、更密集地储存信息，根据最近的研究，每克核酸的信息容量可达到 17 个艾字节 (10^{18}) [19]。除了这些技术进步之外，自动化学合成可以带来具有巨大潜力的新疗法。截至 2020 年，美国食品和药物管理局已经批准了 11 种基于寡核苷酸的药物，目前还有几

种药物正在进行医学试验。领先的化学和制药公司——Biogen、Merck、Bausch & Lomb 等——正在研究这项技术，在基于 mRNA 的 COVID 疫苗取得胜利后，这项技术正变得越来越流行。目标包括癌症、传染病、糖尿病等，所有这些都包含在可持续发展目标 SDG 3 中[20]。最后，这些有几十年历史的化学发展产生了令人振奋的结果，再次证明重视基础科学研究是至关重要的[21]。



声化学涂层

更安全、更耐用且具有增值特性的材料

之前评出的一些 IUPAC 十大新兴技术，如机械化学、液体门控和高压无机化学都是受物理刺激所控制。在特定条件下，化学品的表现往往令人惊讶——产生以前无法想象的特性和性能。声化学——使用（超）声波来触发化学反应——在这些现象中脱颖而出，特别是它在制造具有增值特性的创新功能材料中的巨大潜力[22]。今年 IUPAC 强调了声化学在表面涂层方面的潜力，这是一项直接有助于实现若干可持续发展目标的技术。这种类型的处理方法可以赋予特定的表面各种不同的特性——磁性、荧光和抗菌等等。后者在 COVID-19 疫情期间被证明特别重要，因为医

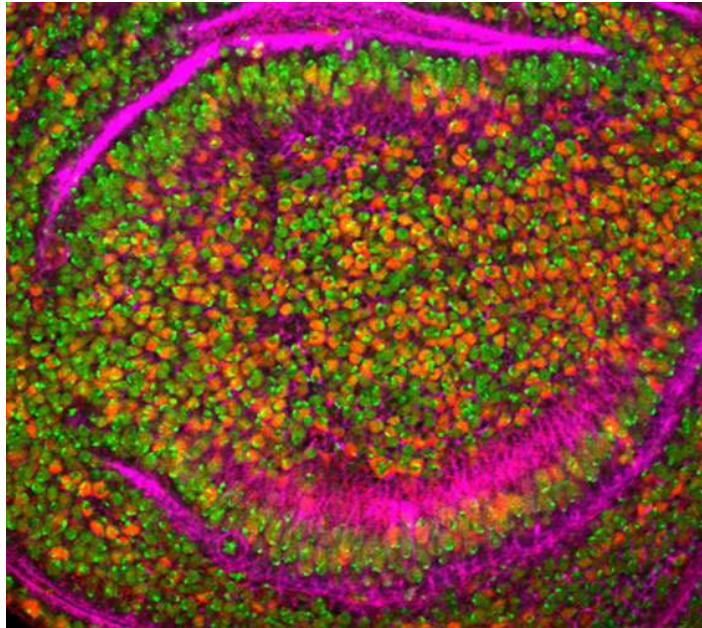
院、公共场所以及我们日常生活中与之打交道的不同表面需要有效的抗病毒特性来消除 SARS-CoV-2 的残留物。声化学涂层采用银、铜和锌等金属的抗菌纳米颗粒覆盖纺织品——所有这些都减少医院感染的发生[23]。此外，一些研究表明，抗菌声化学涂层可以经受多次洗涤而不降低性能——这在现实生活应用中是很关键的，因为服装经常要在高温下进行专业清洗。Sonovia 是一家以色列初创公司，根据他们的网站，在可重复使用的口罩上使用锌纳米颗粒声化学涂层，可以杀死 99% 以上的细菌、病毒和真菌。此外，某些涂层可以产生了“智能”材料。例如，西班牙研究人员用普鲁士蓝纳米颗粒覆盖纺织品，通过简单的颜色变化就可以检测致病菌的菌株；他们预计这一发展可以预防医院以外的拥挤环境中的细菌感染[24]。声化学涂层在食品安全和能源领域也有优势，用抗菌化合物覆盖草莓可以延长其保质期，锂离子电池的涂层可以提供高性能和稳定性。由于这些原因，一些公司正在探索新的可能性，以将这项技术扩大到工业环境中，并开发能够连续生产涂层材料的滚筒制备法（roll-to-roll methods）。欧盟委员会还用超过 800 万欧元资助了 SONO 项目来实现这一目标[25]。作为一项新兴技术，声化学涂层现在应该要度过“死亡之谷”，成功克服与工业界的“代沟”。

生物用化学发光

水溶性二氧杂环丁烷提高了生物检测的速度和灵敏度

发光一直让人类着迷，欣赏萤火虫的绿光和海藻的蓝光简直是一种魔法。科学家们已经学会了利用这些化学反应的力量——比如荧光剂，来帮

助犯罪现场调查人员检测血液，以及获得 2008 年诺贝尔奖的绿色荧光蛋白（GFP）来点亮生物样本，简化了显微镜检查。然而，科学家们还在不断地改进发光分子，以应用于高效二极管、安全信号、生物研究等方面。最近，研究人员发现了高效的化学发光探针，在生物学、生物技术和医学方面具有巨大的应用潜力。基于二氧杂环丁烷——四元的饱和氧杂环——这些分子在生理条件下闪耀着惊人的光芒，有时比以前的解决方案要亮数千倍。最重要的是，二氧杂环丁烷在水中也能完美地履行其职责，而不像其他竞争对手那样需要有机溶剂。这可加速分析过程，因为化学发光过程是在体内进行的，就像基于酶的方案一样，且具有相当的量子产率[26]。这项新兴技术目前仍处于早期阶段，然而许多有趣的应用已经出现。其中二氧杂环丁烷探针在检测某些类型的肿瘤方面显示出了巨大的前景，甚至有助于区分癌症亚型。它们还能超灵敏地检测致病菌，如沙门氏菌和李斯特菌，这些细菌与严重的食源性疾病有关，即使在今天也会造成严重的健康问题。此外，二氧杂环丁烷为活细胞成像领域带来了有趣的机会，可以加速对基本生物化学过程的理解，并提供新的灵敏诊断工具。一些分子甚至表现出近红外区域的发光，这一波长比可见光具有更大的穿透力，为非侵入性诊断和局部治疗打开了大门[27]。值得注意的是，Biosynth——一家最近与 Carbosynth 合并的公司——对这些新型二氧杂环丁烷化学发光化合物表示出兴趣，并将很快开始其商业化。在一份官方新闻稿中，Biosynth 的总裁表示，这项技术的潜力是巨大的，可能会显著提高生物检测的速度[28]。日常生活中的荧光棒也是由于二氧杂环丁烷而发光[29]，也许水溶性的二氧杂环丁烷探针将变得同样流行。



氮的可持续生产

Harber-Bosch 工艺的绿色替代

用于合成氨的 Harber-Bosch 工艺是有史以来最成功的化学反应之一。它使大气中的氮气（由于具有双原子分子中第二强的化学键其通常为惰性）能够转化为氨，然后是硝酸盐和亚硝酸盐，这些物质被用于制造化肥、塑料、纤维、制冷剂等。这个单一的反应推动了 20 世纪的人口增长，目前每年的氨产量超过 2 亿吨。然而，所有这一切都要付出高昂的代价——在不考虑所有后续转化为不同化学品的情况下[30]，合成氨所排放的二氧化碳比任何其他工业过程都多。当然，我们需要改变这种状况——化学家们需要一种可持续的替代途径来生产氨，并消除合成氨与化石燃料和温室气体排放的强烈关联。为了实现这一目标，他们设想了两种互补的战略。一方面，他们从大自然中寻找灵感——特别是细菌和蓝藻中的固氮酶，由于有了铁和钼的辅酶，它们可以减少氮气。最近的研究只是展示了进化

的智慧——很少有金属能超越这两种自然存在于酶中的金属的性能。尽管如此，这些催化剂也有利于产生氢气，但这是一个不想要的竞争反应，只有合理地设计催化剂才能提高合成氨反应的选择性。一些解决方案包括将催化剂负载在层状材料上或将其封装在沸石笼中。另一方面，化学家也利用电的力量来打破三重氮-氮键，同时从水中获取氢原子。如果使用的能源来自可再生资源——风能、水电、太阳能——这个过程就会变得加倍的可持续，因为它避免了对从化石燃料中获得氢气的依赖。这里的主要挑战是减少所需的电动势，同时使活性和选择性最大化。到目前为止，现有的解决方案远没有解决对 **Harber-Bosch** 反应的依赖，因此一些公司和资助机构正在支持研究，以使氢气生产更加绿色[31]。此外，从技术上说，氨能“储存”氢，氢是一种绿色燃料，燃烧时只产生水，它甚至可以单独成为化石燃料的替代品。与氢气不同，氨气在温和条件下容易液化，这将简化储存和运输。澳大利亚的研究人员很乐观，他们设想到 2040 年将会有一个成功的氨经济。在此之前，我们将开发碳捕获技术，以减少 **Harber-Bosch** 生产的影响，然后将这一过程转移到可再生氢气资源。在其路线图的最后阶段，氨将完全来自氮气的电化学反应，这消除了整个过程中的碳排放[32]。尽管许多基础研究仍在进行中，但生产绿色氨的某些解决方案已达到较高的技术就绪水平，包括 **Yara**（澳大利亚）、**Hiringa Energy**（新西兰）、**Topsoe**（丹麦）和 **Iberdrola**（西班牙）这些公司自己的努力。绿色肥料、塑料和燃料将与可持续氨一起，为从清洁能源和高效农业，到可持续城市和负责任的生产等全面的可持续发展目标做出贡献[33]。



靶向蛋白降解

利用我们的细胞机制来革新制药业

如前所述，化学家和生物化学家经常在大自然中找到灵感。靶向蛋白降解（targeted protein degradation, TPD）的情况也是如此，这是一种具有巨大治疗潜力的创新化学工具。其原理相当简单：利用我们自己细胞的降解途径，以根除有问题的蛋白质。这项技术已经吸引了数十亿的投资，刺激了许多初创企业的诞生，甚至开始了多样化的临床试验。TPD 的关键是触发蛋白质水解的小分子，通常被称为 PROTACs。它们的结构被巧妙地设计来劫持蛋白质分解酶，并将其与特定的目标连接起来，随后这个目标将代替原来的蛋白被消除掉[34]。这对于药物化学领域的潜力是巨大的。在 TPD 之前，我们阻断蛋白质的策略大多限于抑制剂，这需要一个特定的结合口袋。然而，只有四分之一的蛋白质展示了上述功能——在这里 TPD 提供了一个治疗优势，它能引发有害结构的消除。此外，它能直接追踪蛋白质，从而避免了使用基因工程或在体内往往不稳定的小核酸敲除它们的复杂替代方法[35]。合理设计的 PROTACs（以及其他具有类似

效果的分子)在治疗癌症领域显示出巨大的前景。耶鲁大学的先锋衍生公司 Arvinas 已经使用基于 TPD 分子的抗乳腺癌和前列腺癌候选药物进入临床试验,为这一技术提供了有史以来第一个人体数据[36]。其他公司很快跟进,包括 Cullgen、Kymera、Zexin 和 Nurix。大型制药公司,如 Pfizer (辉瑞)、Bayer (拜耳)、Novartis (诺华)和 Amgen (安进)等也看到了 TPD 的潜力,并投入大量资金进一步开发这类新药。除了癌症,研究人员还探索 TPD 用于治疗与蛋白质堆积有关的疾病的可能性,包括神经退行性疾病,如帕金森症和阿尔茨海默症。初步研究显示,PROTAC 介导的 TPD 是一个很好的策略,可以触发消除某些蛋白质的聚集——其中包括与阿尔茨海默症有关的致病性 tau 蛋白[37]。TPD 专家、Arvinas 公司的联合创始人 Craig Crews 预测,这些结果只是制药业新革命的开始。的确,这是一项充满希望的新兴技术。

单细胞代谢组学

分析生物分子,一次一个细胞

去年,IUPAC 的十大新兴技术认识到纳米传感器在检测单分子方面的潜力,通常被称为“终极灵敏度”。的确,化学领域的最新进展使分析的精确度达到了前所未有的水平。在这个方向上,今年的十大新兴技术认识到了单细胞代谢组学方面的进展。在成像手段和技术方面,例如质谱等技术的进步为认识单个细胞提供了新的视角。由于目前质谱仪的分辨率和灵敏度的增强,化学家们可以同时分析几种代谢物,获得关于细胞学通路、生物学机制,以及细胞和样品的独特指纹图谱。为了优化更少量样本的结

果，质谱仪需要一次性提取单个细胞的所有组成。电喷雾器和激光（辅助的电离方法）都是很好的离子化方法。更具体的，使用微萃取技术、毛细管采样以及更先进的色谱-电泳联用分离方法，能够分析特定的细胞部分。最精细的联用技术不仅提供了关于代谢物性质的信息，还提供了关于其浓度和特殊排列的细节。这些技术对于揭开未知的生化机制的潜力是非同寻常的。如今，研究人员正在寻求降低检出限的方法，以及开发数字化工具。这些将服务于许多目的：从扩充数据库帮助加速代谢物的鉴定，再到强化算法用以将噪音和人为因素从实际生物差异中区分出来[38]。在冠状病毒泛滥或在未来可能会爆发的未知情况的背景下，单细胞代谢组学将展示其巨大的可能性。一些研究利用它们的力量来更好地了解感染过程以及入侵的病毒与我们的细胞之间的相互作用[39]。对于一些专家来说，这个领域仍然年轻，未来充满了复杂的挑战。然而，科学家们正在逐步解决这些挑战，并进一步验证这一新兴技术，它可以为基本的生物化学秘密带来合理的答案[40]。



未来的光明前景

用化学来解决突出的社会挑战

IUPAC 的 "化学十大新兴技术" 项目意义非常。年复一年，它突出展示了各领域中最令人激动的发展，从新兴的发现到已经被充满冒险精神的初创企业和大胆的工业所采用的成熟技术。世界各地的科学家们建议并遴选了一个合集——到目前已经收集了 30 个具有改变我们社会的巨大潜力的新兴创新技术。有几项创新解决了环境挑战，为实现可持续发展的世界铺平了道路。另一些创新设想了新的系统，以更好地减少使用、再利用和回收资源，来走向零废弃物、循环经济。最后，前十名中的一些创新促进了我们从可怕的冠状病毒疫情过渡到新常态。其中，许多创新让我们为即将爆发的疾病和未来的病原体做好准备——化学是避免未来健康危机的关键，是从材料到制药科学领域的关键。在我们宣布 2021 年十大化学新兴技术的同时，我们也开始寻找 2022 年的候选。我们诚挚地邀请——事实上是鼓励——每一位化学家提交提名，因为 IUPAC 期待着进一步扩大和建立这项倡议。请加入我们激动人心的旅程。

致谢

这一倡议之所以能够实现，要感谢确定和策划技术清单的杰出专家小组；他们是 Michael Droescher（主席）、Jorge Alegre-Cebollada、Sophie Carenco、Javier García Martínez、Ehud Keinan、Rai Kookana、Greg Rusell、Ken Sakai、Natalia P. Tarasova 和 Bernard West。非常感谢 Bonnie Lawlor，

感谢她所有有价值的修正和贡献，提高了本文的质量。

参考文献

1. IUPAC (2019). “Top Ten Emerging Technologies in Chemistry”.
<https://iupac.org/what-we-do/top-ten/> Accessed on 19/07/2021.
2. United Nations (2015). “Sustainable Development Goals”.
<https://sdgs.un.org/goals>
3. Matlin, S.A., et al. Nature Chem. 2015, 7, 941.
4. NIST (2018). “Blockchain Technology Overview”. NISTIR 8202,
<https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8202> Accessed on 19/07/2021.
5. Hanson-Heine, M.W.D. and Ashmore, A.P. Chem. Sci.
2020, 11, 4464.
6. Clark, B. “Blockchain and IP Law: A Match made in Crypto Heaven?”
WIPO Magazine, February 2018.
7. CEFIC (2019). “Molecule managers”. https://cefic.org/app/uploads/2019/06/Cefic_Mid-Century-Vision-Molecule-Managers-Brochure.pdf. Accessed 19/07/2021.
8. Gartner.com, 3 June 2019 “Gartner Predicts 90% of Current Enterprise Blockchain Platform Implementations Will Require Replacement by 2021”.
9. Sefah, K., et al. PNAS 2014, 111, 1449.
10. Hoshika, S., et al. Science 2019, 363, 884.

11. Zhang, Y., et al. *Nature* 2017, 551, 644.
12. Young, T. *Philos. Trans. R. Soc. London.* 1805, 95, 65. 13.
13. Wu, Y., et al. *Adv. Mater.* 2018, 31, 1800718.
14. Liu, M., et al. *Nat. Rev. Mater.* 2017, 2, 17036.
15. Yang, F., et al. *Sci. Total Environ.* 2019, 686, 1140.
16. (a) Yang, F. and Antonietti, M. *Adv. Sci.* 2020, 7, 1902992. (b) Yang, F., et al. *Chem. Soc. Rev.* 2021, 50, 6221.
17. Sousa-Rosa, S. et al. *Vaccine* 2021, 39, 2190. 18.
18. Li, H. et al. *Sci. Rep.* 2019, 9, 5058.
19. Vitak, S. “Technology alliance boosts efforts to store data in DNA”.
Nature, 3 March 2021.
20. Roberts, T.C., et al. *Nat. Rev. Drug Discov.* 2020, 19, 673.
21. Berry, D.J. *Hist. Technol.* 2019, 35, 374.
22. Foroughi, F., et al. *Catalysts* 2021, 11, 284.
23. Perelstein, I., et al. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 25, 82.
24. Ferrer-Vilanova, A., et al. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105317.
25. CORDIS (2013). “A pilot line of antibacterial and antifungal medical textiles based on a sonochemical process”. Grant agreement ID: 228730, [https:// cordis.europa.eu/project/id/228730/en](https://cordis.europa.eu/project/id/228730/en). Accessed on 02/08/2021.
26. Hananya, N. and Shabat, D. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2017, 56, 16454.
27. Green, O., et al. *J. Am. Chem. Soc.* 2017, 139, 13243.
28. RAMOT Tel Aviv University, News 15 August 2017 “Tel Aviv University

announces collaboration with Biosynth on pioneering chemiluminescent molecules”.

29. Compound Interest (2016). “The Chemistry of Glow Sticks”.

<https://www.compoundchem.com/2014/10/14/glowsticks/> Accessed 19/07/2021.

30. Kriestch-Boerner, L. Chem. Eng. News 2019, 97, 18.

31. Yang, B., et al. Energy Environ. Sci. 2021, 14, 672.

32. MacFarlane, D.R., et al. Joule 2020, 4, 1186.

33. Bella, F. ChemSusChem 2020, 13, 3053.

34. Alabi, S.B. and Crews, C.M. J. Biol. Chem. 2021, 296, 100647.

35. Luh, L.M., et al. Angew. Chem. Int. Ed. 2020, 59, 15448.

36. Halford, B. Chem. Eng. News 2021, 99, 5.

37. Kargbo, R.B. ACS Med. Chem. Lett. 2019, 10, 699.

38. Duncan, K.D., et al. Analyst 2019, 144, 782.

39. Kumar, R., et al. Front. Microbiol. 2020, 11, 1152.

40. Fessenden, M. Nature 2016, 540, 153.

Fernando Gomollón-Bel <fer@gomobel.com> 是石墨烯旗舰项目的新闻协调员，也是一名自由科学传播者，居住在英国剑桥。他也是欧洲青年化学家网络（EuChemS）的合作者。