

中、德、美、英、日
五国化学会白皮书

化学，为了可持续发展的全球社会

第二届化学科学与社会高峰论坛（CS3）

英国 伦敦

中国化学会译
2010

目录

中文版序言

前言

序言

执行总结

第一章 能源转化与储存

第二章 CO₂ 的固定、活化和利用

第三章 化石燃料与原料的替代材料

第四章 稀缺天然资源的保护

第五章 绿色材料与过程

附录：化学科学与社会高峰论坛(CS3)与会者名单

参考文献

中文版序言

“化学科学与社会高峰论坛(Cheical Sciences and Society Summit, CS3)”由中国化学会、德国化学会、美国化学会、英国皇家化学会、日本化学会、中国国家自然科学基金委员会、德国研究基金会、美国国家基金会、大不列颠工程与物质科学研究委员会、日本学术振兴会共同发起，其宗旨是组织5个国家的顶尖的科学家，面向国际社会共同面对的挑战性问题（能源、污染、气候变化、水资源、食品与营养、健康等），以小型研讨会的形式，凝练出重要的基础科学前沿问题，并提出迎接挑战的研究思路。

CS3 每年举办一届，由5个国家轮流举办。会议邀请专业的科学作家与会，并于会后对会议内容进行总结，撰写战略报告（白皮书），由5国化学会负责宣传，以期引起各国政府的科技政策制定部门、科学家和大众的广泛重视，希望能对科技政策制定产生影响，对科学家今后的研究方向产生导向，并吸引优秀年轻人进入这些有重要意义的研究领域。

自2008年五国化学会和基金委共同决定举办该系列峰会后，已于2009、2010年分别在德国和英国成功举办两届。本白皮书“化学，为了可持续发展的全球社会”总结了第二届CS3高峰论坛（2010）上来自5个参与国的30名顶级材料化学家的研讨成果，总结了世界上杰出的材料化学家针对能源、环境、资源等领域的挑战所提出的真知灼见，不仅仅为广大化学家指出了进一步发展的方向，也为公众提供了可持续发展的路线。今年是国际化学年，发布这本白皮书是很及时、很有必要的，将极大地提升化学科学的影响。我积极地向全国的化学工作者推荐这本白皮书。



中国化学会理事长

2011年3月

前言

关于化学科学与社会高峰论坛(CS3)

化学科学与社会高峰论坛(Cheical Sciences and Society Summit, CS3)把全世界化学研究中的最好想法集中起来,以探求国际社会面临的最紧迫的健康、食品、能源、环境等问题的创新性解决方案。这一独特的活动拥有一个创新的形式,旨在为全球科学研究指明方向,并每年由参与国轮流主办。

《化学,为了可持续发展的全球社会》概述了第二届CS3高峰论坛的成果,此次年会的主题是“材料的可持续发展”。来自5个参与国的30名顶级材料化学家汇集在伦敦以确定解决关键全球性挑战所要做的科学研究以及为决策者们提供建议。这份报告提出了一个关于材料化学如何为创造一个可持续发展的世界积极贡献的国际观点。

CS3开创了化学会(CCS)、德国化学会(GDCh)、日本化学会(CSJ)、英国皇家化学会和美国化学会之间的紧密合作。本论坛由中国国家自然科学基金委员会(NSFC)、德意志研究联合会(DFG)、日本学术振兴会(JSPS)、英国工程和自然科学研究委员会(EPSC)和美国国家科学基金会(NSF)提供支持。

序言

自从远古时代起，人类就开始依赖太阳的恩赐和自然界丰富的矿产和生物资源。但是，这些资源一直分布不均，并随时代的不同有着不同的重要性。出于这个原因，人们和国家一再为了争夺它们的所有权而发生冲突。

几个世纪以来，科学和技术，这一人类智慧以及我们了解自然的追求的结晶，使我们能够有效利用自然资源创造丰富的人类文明。高科技可以保护脆弱的人类免受自然威胁，提供安全和保障，并使方便和舒适的生活方式得以成为可能。在 20 世纪，科学技术有效地使发达国家人口的平均寿命从 45 岁提高到 80 岁，并提供了多种多样外部条件，使人类自身的智能和体能都有显著的提高。

另一方面，我们在有效利用有限的资源方面，只取得了部分成功。具有讽刺意味的是，人类在对日益提高的先进文明水平不断追求的同时，导致了重要资源濒临枯竭的严酷现实。并且，似乎为获取这些资源而引发的全球冲突远未结束。

理想的 21 世纪应该是一个尊重文化多样性的文明全球社会。当多元族群能够在其所居的地区使用自然资源，他们才有可能继续传承从祖先那里继承下来的独特文化，并建立一个不会侵犯他人权利的富裕、文明的社会。世界需要牢牢扎根在此前提下的科学和技术。

自从工业革命以来，人类对能源的永不满足的需求已经导致我们向地球大气中排放了大量有害的二氧化碳，这对整个世界造成了极为不利的影 响。我们需要一个主要模式上的转变，从依赖于消费有限的矿物储备转变为使用可替代资源，并以类似于自然界的光合作用但更加有效的方式利用资源。如果我们可以很容易地把阳光转换成电能并可自由地从丰产元素创造有用的材料，这将是多么美妙啊。实现真正可持续发展的社会需要致力于获取能持续供应和可替代资源的创新性科技。

为实现这一目标，国际合作显然是很必要的，但由于牵涉到政治和经济因素，资源和环境问题往往是很复杂的。因此，当得知来自中国、德国、日本、英国和美国从事材料科学的化学家的代表一起聚集在伦敦进行研讨并提供有关材料的可持续发展方面的决策建议时，颇感振奋。

化学是研究材料和物质以及它们的转换过程的科学。因此，化学是一门广泛涵盖许多学科的中心科学。化学提供给我们实现可持续发展所需的知识，换句话说，化学赋予我们解决威胁人类的继续生存问题所需的知识。化学家的使命是为社会提出可以通过化学来实现的可能解决方案。期望以材料的可持续发展为主题的 2010 年 CS3 峰会的建议能广泛散发给世界各国政府和机构，让我们共同努力，以实现理想的、可持续发展的国际社会。

野依良治 (Ryoji Noyori)

日本理化研究所所长，名古屋大学教授，2001 年诺贝尔化学奖获得者。

执行总结

在材料化学的帮助下，我们可以建立一个能源使用不受限制的世界，在这里我们可以减少二氧化碳的排放，减少对化石燃料的依赖，并减少我们已经并正在继续对环境造成的影响。我们可以防止稀缺自然资源进一步枯竭，创造新的消费产品，实现新的低碳和资源节约型产业的蓬勃发展，进而推动经济增长。

全球人口不断增加，到 2030 年全球人口预期将增加 17 亿，总人口超过 80 亿，而这其中的大多数人都居住在城市里。城市给能源和资源供应带来巨大压力，并以一种不可持续的速度产生排放。^[1]

世界上很多地区人们的生活水平还在不断改善^[2]。如果所有的人都以当今北美的流行方式来生活的话，将需要 2~3 倍量的地球自然资源。^[3]

人口增长和不断提高的生活水平给我们的星球以及我们仍可获得的资源带来了巨大的负担。我们将很快就要逼近我们所能从地下开采石油的最快速度。我们对能源的旺盛需求正在产生着越来越多的、导致全球变暖的污染物——二氧化碳（CO₂），而目前还没有任何一种有效的方法可以将其除去或储存。其他天然资源的供应也令人担忧。目前的评估表明，我们很快就将需要为一些战略矿产寻找替代资源。

我们正在以一种难以估量的方式对我们的星球造成无法弥补的损害。很显然，我们目前对天然资源的使用是不可持续的。尽管有时人们有意无意地指责化学在破坏着环境，然而，化学提供了许多物质，如药物、塑料和燃料等，造福于人类，没有这些我们就无法生存下去。

《化学，为了可持续发展的全球社会》概述了 5 个关键领域，在这些领域，材料化学家通过与其他科学家、工业界和政策制定者们的合作，可以抓住难得的机遇以应对全球性挑战。材料化学将为当今社会许多最重要的能源和环境问题的解决方案提供支持：

- 持续的人口增长和生活水平的提高增加了全世界对能源的需求。这种需求可能将很快超过利用当前可行的途径所能获得的可用能源的量。材料化学家将帮助开发能够满足未来能源需求的新的可持续能源转换和存储技术，而同时并不增加有害的二氧化碳排放。
- 据预测，在接下来的 100 年里，地球气温将上升 2~4.5 °C，这主要由于人为 CO₂ 排放的缘故。材料化学家可以通过改进碳捕获和储存（CCS）系统帮助减少 CO₂ 排放，并开发活化和利用 CO₂ 的新技术，将其作为可生产燃料和化工原料的有价值的产品，而不是废弃物。

- 由地下开采的石油中的 90% 被用于生产燃料；其余的用于制造从普通的塑料制品到拯救生命的药物等每一样东西。通过开发能够有效地从低质量来源获取石油的方法和有效、可持续地利用化石燃料替代品的工艺，材料化学家可以帮助降低我们对化石燃料和原料的依赖。
- 稀缺自然资源的供应正以惊人的速度减少，资源匮乏将很快成为现实。材料化学可以在许多应用领域中帮助减少、替代和回收利用稀缺自然资源，以及开发基于地球丰产元素的可替代新材料。
- 不断增长的世界人口所带来的压力正对环境造成破坏。材料化学家可以利用绿色化学的原理，以无害、可持续的方式满足我们对能源、材料和水的需求。可开发新技术，以便更好地监测空气、土壤和水中的污染物并将其从环境中清除。

科学的基础研究进展为很多这样的建议提供支撑——对“好奇心驱动的（蓝色天空）研究”的支持必须到位，以维持未来源源不断的科学突破。^[4] “化学为了明天的世界：化学科学的路线图”提供了创建和维持一个支撑框架以应对全球性挑战。^[5] 科学投入的一个可持续、长期战略对延续现代社会的安康、舒适和富足必不可少。^[6,7]

在材料化学的帮助下，我们可以建立一个能持续满足我们能源需求的世界，在那里，可用能源可以在任何需要的地方生产、储存然后供应。通过创造新的仅对自然资源增加极少负担的消费产品，我们可以最大限度地减少和消除环境中的污染物。尽管每个地理和政治版图所面临的挑战有所不同，但重要的是，某一国应对挑战的策略不应只局限于对自身问题的思考。

这些目标中的许多都应能在较短时间内实现，而且应可以帮助我们这一代和下一代人改善我们生活的世界。尽管这需要资金投入，但从中长期来看，这种投资是能够带来经济效益的，^[8] 它将创造新的更绿色的工业，提供可持续的就业机会，并确保全球安全。要获得材料化学所带来的好处，我们必须现在就采取行动。

第一章

能源转化与储存

持续的人口增长和生活水平的提高增加了全世界对能源的需求。这种需求可能将很快超过利用当前可行的途径所能获得的可用能源的量。材料化学家将帮助开发能够满足未来能源需求的新的可持续能源转换和存储技术，同时并不增加有害的 CO_2 排放。将开发出可以在地球上任何地方都能高效的从阳光中捕获能源的可持续太阳能技术。创新的新燃料电池能够有效地利用可再生能源。新一代电池和化学储能技术将使我们能够灵活地储存和运输能源，并能充分利用间歇形式的能源。

1 面临的挑战

到 2030 年，持续的人口增长和生活水平的提高将使我们需要的能源比现在至少增加 50%，^[9] 而这种需求可能会超过现有的常规供应能力。

应对不断增加的能源需求的措施，必须不会引起二氧化碳 (CO_2) 这种导致气候变化的温室气体排放量的相应增加。当前，全世界的电力都是由使用化石燃料为动力的发电厂生产的。这些发电厂是可靠的，但是它们产生大量的二氧化碳。仅在发达国家，电力生产就产生约 30% 的 CO_2 排放。减少使用化石燃料发电厂的二氧化碳排放量（见第二章： CO_2 的固定、活化和利用）应该是可能的。不过，据估计，即使如此，到 2030 年我们仍然可能面临从化石资源获得的能源不敷需求的情况。

新技术必须做到不给我们的后代留下不必要的额外难题。

我们需要改进方法，从可持续、无污染的来源产生可用能源，然后以一种可以很容易地运送或使用的形式储存起来。例如，使用太阳能面板可以将来自阳光的能量转化为电能，然后储存于诸如电池一类的能量载体中。

材料化学家正与其他科学家和工程师一起努力开发新的能源转化和储存技术（见表）。这些解决方案应能灵活满足普通消费者或工业用户的需求^[12]，同时要比现在的能源体系产生更少的排放。

2 能量转化

能量从一种形式转换为另一种形式经常要涉及化学反应。详细了解这些化学反应的机理，对开发出以能负担得起和可持续的方式驱动化学反应的新材料和过程是至关重要的。^[5]

2.1 太阳能

地球上到处都有充足的阳光，它是未来的能源选择。人们可以利用光伏技术、光电化学、光催化、热电等技术捕获太阳能并将其转化为可用的形式。这些技术必须要能够大规模利用太阳能才能产生显著的影响。^[13]

材料化学家可以开发新的、更持久有效，由廉价、丰富和易于处理的材料制成的光伏（PV）电池。光伏技术是通过将太阳辐射转换成电流来产生电能的。光伏技术已经被广泛采用，普遍认为，它们将在未来能源解决方案中的太阳能利用方面发挥重要作用。^[14] 然而，目前可用的光伏技术仍有缺陷。很多当前的光伏技术都是硅基的，这是一种丰产元素，但必须达到非常高的纯度才能用于太阳能发电，这使得目前以硅为基础的技术非常昂贵。

需要更高效率、廉价的光伏电池^[13]——当前一代碳基（“塑料”）电池多使用廉价的制造过程，能够把照到其上的太阳能的约 8% 转化；而典型的硅基太阳能电池的转化率约为 20%。随着研究的深入和投资的增加，新技术可以使光伏技术成为未来全球能源战略的核心。^[7]

光电化学电池能将太阳能转换成化学燃料，即利用太阳光的能量来驱动将随时可用的化学物质，例如水和二氧化碳，转换为有用的化学品或燃料。光催化是通过催化剂使这样的反应速率加快。这些过程往往被统称为“人工光合作用”，因为它们模拟了植物接受阳光而产生化学能的方式。

目前，人们尚不能负担得起人造光合作用技术的广泛使用。我们需要新的、能负担得起的、基于丰富材料并在商业上切实可行的光伏技术。^[13] 在探索和优化具有理想物理特性、能将太阳能转换为电能和燃料的新材料的进程中，将需要新的体系来有效地合成、筛选和优化大量新的化合物。

热电材料是能直接从热产生电的材料，它也可以应用于能源转化。世界上大约有 90% 的电力是由热能产生的，一般在以 30~40% 的效率运作。^[15] 热电装置可以将这些过程的一些废热转换成有用的电力。要求新型热电发电机能以一种经济、有效的方式利用来自太阳的热能和其他能源转换过程的废热。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将开发出具有更低成本和更高效率的新型太阳能电池。这将需要材料化学家合成出各种经济有效、能吸收全波段太阳光的新材料，并生产出高密度、可移动、长寿命的电荷载流子（可载电流的粒子）。
- 材料化学家将设计和制备可替代的、廉价的材料，能够以远高于植物（~2%）的效率有效地模拟光合作用。

- 材料化学家将开发和优化由丰产元素制备的能将太阳能、废热转化为电能的新型热电材料。

2.2 燃料电池和生物能源转化体系

燃料电池是一种将空气中的氧气以及诸如氢、甲醇或碳氢化合物(例如来自生物质)之类的燃料转化为电能电化学电池。燃料电池不同于普通的电化学电池，因为后者消耗的是需要不断补充的源于外部的燃料。

要在商业上切实可行，需要更加有效、低成本和含有从可持续材料制成的组件的燃料电池。质子交换膜燃料电池，也被称为聚合物电解质膜（PEM）燃料电池正在被开发用于移动式、固定式以及便携式燃料电池的应用。需要开发比（目前质子交换膜燃料电池使用的）标准碳负载铂粒子催化剂具有更高催化活性的新材料。

固体氧化物燃料电池（SOFC）使用的是固体氧化物或陶瓷电解质。虽然目前可用的 SOFC 只能在高温下运行，但这类燃料电池的优点包括高效率、长期稳定性、燃料的灵活性、低排放和相对较低的成本。新的低成本催化剂和电解质材料（基于地球上的丰产元素）能使固体氧化物燃料电池有较高的功率密度并能在较低温度运行，这将可以改善目前可用的技术。

生物能源转换系统是对常规能源供应的潜在可持续的替代方案。微生物燃料电池（MFCs）使用细菌从一个合适的基质将化学能转换成电能，因此可以成为未来传统燃料电池技术的有益补充。随着发展，MFC 系统将可用于从废水和低品位废弃物中的有机质来产生能量。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将为燃料电池设计新的含有可移动氢离子作为电荷载体的聚合物电解质和高温质子导体
- 材料化学家将通过发现和优化新的由地球上丰产元素制成的有更高稳定性和活性的催化剂，来为固体氧化物燃料电池构建新的混合型离子-电子导体
- 材料科学家、生物工程学家和工程师们需要通过跨学科的基础研究开发出微生物燃料电池技术。

3 能量储存

对可靠的、可规模化的能量存储技术有着迫切的需求。许多可再生能源如太阳能、风能是间歇性的并产自偏远地区，因此很难直接进入电网。但是，如果能

源可以有效地、安全地储存，就不再需要持续不断的能源供应。超大规模存储系统将可以使从间歇性能源生产的能量储存起来以备后用。

3.1 电池和热能的储存

目前电池技术的能量密度必须在短期内得到改善。[†] 先进锂离子电池将是能量存储的一个过渡性解决方案。对锂的需求可能会很快超过现有可获取的全球供应量，因此，将需要新一代基于更丰富易得元素的电池（见第四章：稀缺天然资源的保护）。

需要有基于丰富和可持续材料的新电池和热能存储设备。使用固体材料而不是液体来传导电流的固态电池已经出现，并可能将和一系列其它技术一样变得可行。热能存储设备将热能储存在储存体（如熔融盐、相变材料、甚至是化学反应）中以供日后使用，它可以被开发用于储存间歇性来源的能量。液流电池是一种可充电电池形式，其中的电解质流过电化学电池。额外的电解质一般存储在外部容器中，通常被泵入后通过电池的反应器。液流电池可通过更换电解液而迅速“充电”并具有大规模应用的巨大潜力。开发具有更高能量密度的改进型液流电池需要新材料。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将为高能量密度的组件开发新材料以改善电池性能
- 材料化学家将帮助开发一系列包括新一代固态和液流电池以及储热设备的新储能技术以作为传统电池持久和安全的替代方案。

3.2 化学储能和氢气

因为与氧气反应时可以释放能量，燃料分子的化学键可以作为储存能量的有效方式。燃烧可以使所储存的能量释放出来。化学储能设备可以和适当的能量转化手段（见上文）相结合来生产需要时可以燃烧的如氢气、烃类化合物等燃料。

氢气是一种高度可持续的化学能形式，因为水是它燃烧的唯一产物。它可以直接燃烧或与 CO₂（或来源于生物质的分子）反应以生产液态烃燃料（见第二章：CO₂ 的固定、活化和利用）。

氢气通常来自化石来源（如天然气中的甲烷）。不过，这些来源是不可持续的，目前生产氢气消耗的能量要比将它燃烧获得的能量多。使用可再生能源生产氢气的新方法将使氢利用技术发展成为更高效和经济的化学储能形式。

[†] 在能源存储的应用中，能量密度指单位体积存储设备所储存能量的量。能量密度越高，同样的体积可以储存或运输的能量就越多。

电解水是一种将水分解成氢气和氧气的手段，这是一个很有前途的生产氢气的方法。使用诸如阳光之类的能量来源来提供电力驱动反应，电解水可以作为一个不需要化石源燃料作为原料的可持续供应氢的途径。随着光伏、电解和气体分离技术效率的提高，电解水生产氢可能成为储存能量、制造肥料和生产碳氢化合物燃料的有效手段。

人工光合作用的应用也大有前景，可用来从太阳光、二氧化碳和水中生产作为燃料的天然气（甲烷）或乙醇。把二氧化碳用于化学储能体系将在第二章： CO_2 的固定、活化和利用中讨论。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将为电解水制氢设计出新的催化体系以及与之相结合的改进了的收集所产生氢气的气体分离技术。
- 材料化学家将设计和开发新的、可不用电解器而直接从水中制取氢的光催化材料。
- 材料化学家将帮助开发创新的化学储能形式，包括从阳光、二氧化碳和水生产燃料的手段（见第二章： CO_2 的固定、活化和利用）。

4 大规模和小规模能源系统

能源系统应该包括适当的能量转化手段如太阳能电池面板和可靠、可持续的能源储存方式（见上文）以及高效的从产地到使用地传输的手段。无论大、小规模能源系统都有很大的改进余地。^[16] 短期内，把当前的太阳能电池材料与现有电池技术相结合用于能源系统是可以接受的。

将需要低能耗传输系统来调节能源生产地和使用地的不匹配。目前的高电压电网是低效的——大量的能量损耗在使用交流电和铜之类常规导电材料的远距离输电中。比如，高压直流（HVDC）电网技术可以为欧洲提供来自撒哈拉沙漠的太阳能发电站的能量。^[17] 在这些系统实现商业和能效上可行前，将需要开发由新超导材料制成的可在室温下以极低电阻传导电流的低损耗能量传输线路（目前得到的超导体只能在非常低的温度下工作）。

目前的电网几乎没有能量存储能力。如果要增加可再生能源和间歇形式能源（如风能、潮汐和太阳能）在我们混合能源体系中的比例，就需要有大型能源存储系统。“智能电网”与储能装置相结合（见方框）可以使现有电网的性能得到显著改善。例如，苏格兰已经建立了“氢能规划”项目，以支持可再生、氢能、燃料电池和储能产业的加速发展。^[18] 对开发新的和改进的能源储存技术的投资将能广泛引进下一代大规模能源系统。

较小的能源系统应是便携式的，可以在电网很难覆盖的偏远地区使用。这些系统可使个人或小企业摆脱对电网的依赖，并在使用区域、机动性、安全性等方面有着巨大优势。在这一领域，很多已有的知识和技术可以提供短期的解决办法。从长远来看，新技术应该包括，例如，廉价的聚合物太阳能电池（转换效率超过 10%）以及与之相结合的高性能蓄电池，这样，来自太阳的能量就可以被太阳能电池转换成电流，然后储存到蓄电池中。如果这种能源系统被装配到比如车辆上，则这些车载能源系统不仅可为交通运输提供能源，而且能当作一个移动电网为当地提供能源。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将设计和开发更高效、可靠和耐久的新材料来实现包括下一代太阳能电池和能量存储系统在内的新能源体系。
- 材料化学家将为新能源系统设计和开发环境友好、不依赖日渐短缺元素的新材料（见第四章：稀缺天然资源的保护）。

第二章

CO₂ 的固定、活化和利用

据估计，在接下来的 100 年里，地球气温将上升 2~4.5 °C，这主要是由于人为 CO₂ 排放的缘故。尽管碳捕获和储存 (CCS) 系统可以帮助减少 CO₂ 排放，但目前商业上 CO₂ 还无法被有效的固定。材料化学家将帮助改进 CCS 系统并开发新技术把 CO₂ 变为有价值的产品，而不是废弃物。可以开发将 CO₂ 转化成可作燃料的化学产品、氢气载体和化工原料的可持续方法。从 CO₂ 合成新聚合物的技术将在几年内成为可行，这将减少我们对石化原料的依赖。作为一种可持续的、替代源自化石燃料的溶剂，超临界 CO₂ 可以用于许多工业过程。

1 面临的挑战

二氧化碳 (CO₂) 是被植物用来合成糖的原料并对它们的生命功能至关重要。然而，二氧化碳也是地球大气中不断增长的组分，作为一种“温室气体”，它在大气中的存在会导致气候变化。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 预计^[19]，在接下来的 100 年里，地球气温将上升 2~4.5 °C，这主要由于人为 CO₂ 排放的缘故。

估计表明，使用碳捕获和储存 (CCS) 技术来固定 CO₂，可将来自燃煤发电厂的排放量减少 80%~90%^[20]。材料化学家将帮助开发可靠的用于捕获、分离和储存 CO₂ 的技术。然而，仅使用固定技术仍不足以满足全球减排的目标。

材料化学还可以提供地质储碳的替代方案。我们可以通过发展可替代的碳中和方法来产生能源以减少 CO₂ 排放 (见第一章：能源转化与储存)，并可利用 CO₂ 制成燃料或作为化工产品供应链中有价值的产品，而不是废弃物。这将减少我们对化石燃料的依赖 (见第三章：化石燃料和原料的替代材料)，并可避免伴随碳固定技术的潜在诸如泄漏之类的长期问题。^[21]

超临界 CO₂ 是一种流体形式的二氧化碳，已经被工业化地用作溶剂并用于纯化过程。将超临界 CO₂ 广泛地用作工艺过程流体可以减少化学过程中对传统化石燃料源溶剂的需求，从而避免其的废弃对环境造成的负面影响 (见第五章：绿色材料与过程)。

单纯把 CO₂ 用作原料、工艺流体和用其制成燃料仍不足以减缓不可逆转的气候变化趋势，因为通过这种办法能够实现的对 CO₂ 固定的量还太少。不过，下面所述的材料化学方案仍然可以成为减少全球 CO₂ 排放的更广泛战略的一部分。依

靠所述技术的工业化开发，可以创造难以计数的工作机会而无需依赖当地的自然资源。

2 CO₂的捕获、分离和储存

各国政府正致力于建立把碳捕获和储存(CCS)^[22]技术应用于燃气和燃煤发电厂的工业规模示范项目^[19,20,23]。将需要多学科材料与工程的研究来开发可靠的CCS系统。

CCS系统将需要有节能和高性价比的用于捕获和分离CO₂的材料、工艺过程和技术。目前的碳捕获技术需要消耗大量的能源和原材料，并且，要从捕获的CO₂中除去杂质可能使该技术变得难以承受的昂贵。从CO₂中除去杂质的新技术要由可用丰产元素生产的强韧、耐杂质的材料和膜组成。下一代CCS系统必须对高浓度、固定的或低浓度、移动的碳源都适用。

通常认为，现在储存在地下的CO₂也许将来可作为有价值产品而被开采出来。^[22] 这可以作为暂时性或者过渡性解决问题的策略——一旦将来获得合适的转化技术并且传统的碳源变得更加稀少，就可以利用这些储存的CO₂。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将研究和开发一系列 CO₂固定和纯化的新技术。
- 材料化学家将帮助开发商业上切实可行的储存 CO₂ 以备将来使用的技术，例如把矿石人工化石化和碳化。

3 CO₂作为燃料和化工原料

尽管 CO₂ 通常是不起化学反应的，但在催化剂存在条件下，与其它化合物反应形成化学储能体系或有用的新材料还是可能的^[25]。

我们日常所用的很多都是碳基产品或是源自石油的含碳产品。目前所生产的石油的 5%~10% 都被用来制成化学品，比如塑料、药物和其它的消费品。随着人口的增长和技术的进步，对石化原料的需求还在增加。通过运用从材料化学和催化的基础研究获得的知识（见第五章：绿色材料与过程），有可能把 CO₂ 当作原料纳入到化学品供应链中。^[24]

把 CO₂ 作为燃料和原料的商业化应用将需要许多类似的进展。所述的许多技术和产业仍处于起步阶段，没有进一步的基础研究支持，预测它们何时实现的时间表是很困难的。

3.1 生产甲醇

CO₂ 可以和氢气结合形成甲醇这种便于运输的液体，然后甲醇可用已知的沸石催化剂转变为汽油。使用基于丰产元素的催化剂（见第四章：稀缺天然资源的保护）和非化石源、可持续供应的氢（见第一章，能源转化与储存），可以实现甲醇生产技术的商业化。

可能开发出这样一种系统，在此系统中，低碳能源(比如太阳能)既从大气中提取 CO₂，又可为驱动随后与氢（或其它氢源）反应生成甲醇的过程提供所需的能量^[26]。

通过与氢（或其它氢源）反应把 CO₂ 转化为甲酸、甲醛、甲醇和高级醇，可以为生产很多当前大规模使用的商品提供大量的原料。通过对现有工业设备进行改造，这样的工艺过程几年内就可以推行。

3.2 生产甲烷

把 CO₂ 和水有效地转化为甲烷气是一种潜在的储能方案。甲烷是比甲醇更高能的燃料，因此也更适合燃烧。现有的以甲烷(甲烷是天然气的最大成分)为燃料的技术早已存在且已得到广泛应用。将 CO₂ 转化为甲烷可降低对天然气资源的依赖并有助于中期内向使用低排放、清洁燃料过渡。

3.3 生产合成气

合成气是一种 CO(一氧化碳)和氢气的混合物，它可被直接用作燃料，也可用在化学过程（如 Fischer-Tropsch 过程）中来生产（用作燃料或化工中间体的）碳氢化合物。合成气是化工行业非常重要的原料，并且这样的工艺过程正被以工业化规模广泛应用。

通常，合成气是由包括天然气、煤、生物质和生物废物等各种不同的来源的原料来生产的。这种灵活性的优势，使得我们只需对现有各种各样工厂稍加设计改造就可用来生产合成气。当前的合成气生产厂普遍很大且价格昂贵，因此，较小的、分散灵活的生产厂将会更加有利。

目前已经有了采用供氢将 CO₂ 转化为合成气的催化工艺。通过设计合适的工厂，使用氢气或其他含氢材料大规模地把 CO₂ 转化成合成气将在短期内成为可能。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将帮助开发从非化石源有效获得氢气的催化过程（见第一章，能源转化与储存）。

- 材料化学家将探索能有效地将 CO_2 和氢（或其它氢源）转化成甲醇以及将 CO_2 和水转化成甲烷和氧气的新催化剂。
- 材料化学家将帮助改造工厂以制取可用作燃料和原料的合成气。

4 CO_2 作为合成塑料和复杂化学结构的原料

现在，已经有了小规模地将 CO_2 转化成聚合物的技术，并且几年内将可以增加该技术使用的范围和规模。需要对现有的采用气态构筑块合成聚合物材料的设备进行改造，以使其实现对 CO_2 的利用。

，从 CO_2 和其它一碳构筑块来形成复杂化学结构的方法的商业化将在一个较长时间后实现。发展出这样的技术也许需要十年或更长的时间，但作为一种化学品的可持续生产的战略，用 CO_2 作为构筑块仍将是我们的终极目标。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将帮助我们为 CO_2 的化学反应开发和优化高活性、高选择性、可持续和强有力的催化剂。
- 材料化学家将设计和优化电催化和/或光催化方法来将 CO_2 纳入到供应链中（见第一章，能源转化与储存）

5 CO_2 作为工艺过程的流体和溶剂

超临界 CO_2 是一种流体形式的二氧化碳，已经在许多工艺过程中得到工业应用，比如，咖啡豆的脱咖啡因以及作为制冷剂。^[27] 超临界 CO_2 具有低毒性、低反应活性和可在近室温条件使用的特点。短期内，它将可能被广泛地用在人工合成或天然存在的化学品的提纯中，以替代更高毒性、复杂和昂贵的溶剂。新的工艺过程的设计需要材料化学家与工程师们的合作。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将开发和优化把超临界 CO_2 用作已知或新化学反应的溶剂、制冷剂以及用于材料加工的方法。

第三章

化石燃料和原料的替代材料

由地下开采的原油的 90% 被用于生产石油。从普通的塑料制品到救命的药品中的每一样东西的生产都需要用石油来作为重要组分，并且对石油的需求在不断增加。材料化学家可以通过许多途径帮助我们减少对化石燃料和原料的依赖。将开发出有效的从低质量来源开采石油的新方法。将设计和优化改进的催化和分离工艺过程，使我们能够有效和可持续地利用合成气、甲烷、生物原料，甚至能把二氧化碳当作化石燃料的替代品。由新的独特生物质原料制成的聚合物也许最终会凭借优越的性能和功能赶超由石化产品生产的塑料。

1 面临的挑战

现代社会依赖于碳基燃料来产生电力、热能、动力，以及作为化工原料来生产材料和商品。燃烧化石燃料获取能量的过程会导致造成气候变化的 CO_2 的排放，并且，我们将很快就要逼近我们所能够从地下开采石油的最快速度。我们需要寻求在能源生产中减少对化石燃料的依赖性(见第一章，能源转化与存储)并使用来生产材料和商品（如药物、农用化学品和聚合物）的原料多元化的途径。

需要有摆脱化石燃料的新的过渡性策略，从而确保日益增长的人口的福祉、安全和生活水平不受影响^[7]。

新的碳源应该是可再生的，而且不会增加 CO_2 的排放。然而，短期内应优先发展从低质量原料提取石化产品的可持续的方法。短到中期内，合成气和甲烷是很有潜力的石油和煤炭的替代品。较长期的目标是使用生物质为原料，这给我们提供了利用自然界的分子多样性来探索新的和改进的材料与聚合物的机会

完全不再使用石油来作为聚合物和其它化学品的原料是我们的终极目标。使用 CO_2 作为原料需要最长的发展周期，但却是高度可持续的方案（见第二章， CO_2 的固定、活化和利用）。

2 低质量碳氢化合物原料的加工

需要有能利用低品质原油中低硫和高硫原料的技术。材料化学可帮助实现从低质量化石资源生产出清洁、高效、安全的燃料和化学品。10 年内，通过化学家、工程师和物理学家的密切协作，应该可以在这方面取得根本性的进展。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将规划并开发出新的催化工艺来降低使用低质量碳氢化合物对环境造成的影响。
- 材料化学家将与工程师合作设计出并优化改进了的工程材料和反应器材料。
- 材料化学家将设计和开发出新的化学分离技术来提纯低质量化石燃料原料。

3 合成气作为原料

随着合适的技术进展，合成气就可能是未来的可持续化工原料。合成气是一氧化碳(CO)和氢气(H₂)的混合物，我们对与之相关的化学已经有深入的了解，它早已被当作燃料和原料用在化学工业中。用合成气来产生复杂的化学结构往往需要复合的、有时是高耗能的生产过程，因此，把合成气作为生产原料使用，还没有得到充分开发。设计新的催化剂和工艺过程将有助于在这一领域取得显著的进展。（见第二章：CO₂的固定、活化和利用中，由CO₂生产合成气）

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将设计和优化具有选择性和耐用的催化剂(见第五章，绿色材料与过程)，以能由较小的能源投入来从合成气高效、选择性地生产新的高值、功能化的产品。

4 甲烷作为原料

甲烷是天然气的主要成分，可以用作燃料和化工原料，它也可以由合成气制备，并且还可以从垃圾填埋场收集得到。甲烷通常存在于油井(往往位处边远地区)的油层与外界的结合面处；所以通常逸散掉或又被回注到了油层中而没有被收集利用。需要有把甲烷制成高值产品的可持续利用途径(见第二章，CO₂的固定、活化和利用中，由CO₂生产甲烷)。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将设计和优化新的高效、选择性催化剂来把甲烷转化成可被用作燃料的甲醇之类液体、汽油或用作化学工业的构筑块。
- 材料化学家将开发和优化高效、高选择性的把甲烷直接催化转化为高级烃的方法。

5 生物原料

长期来看，生物原料（来自活生物体或不久前活着的生物体）通过提供生物质作为燃料和化工原料，将可能使我们减少对化石燃料的依赖。但是，生物质的来源必须不与其为日渐增加的世界人口提供食物的谷物需求产生竞争^[5]。重要的是在商业开发之前，任何由生物质生产化学品或燃料的过程都要进行全生命周期分析^[28]。对非粮食作物[‡]、农业废料或如藻类之类海洋生物质的可持续处理，可以提供燃料和化学品。

使用生物质做原料提供了利用自然界存在的分子多样性的机会，这种多样性可大大提高从生物质所获取的实用化工产品的实用性。随着高效的新催化工艺过程的开发，这些产品的生产要比由石油合成来得更可持续。

可以改进对菌类的利用工艺来提供有用的化学原料。已经有了工业化的利用转基因细菌把玉米汁转化为高值聚合物的工艺过程。然而，当前面临的挑战主要是如何高效地把所生产的化学品从多盐的发酵混合物中分离出来。因此，高能耗的纯化步骤以及巨大的需水量都有可能抵消这一技术路线所节省的能源。技术进步可以使这一过程的能耗和用水量比通常的从石化产品来生产的过程更少。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家、生物技术专家和工艺工程师将开发和优化能把极难处理的木质纤维素和其它原料选择性地分离和转化为市售化学品、聚合物和燃料的新方法。
- 材料化学家将设计和实施能从生物质来得到保留其内在的纳米结构并赋予更高功能化的化合物的方案。
- 材料化学家设计更高活性和选择性的催化或化学方法来分离并完全和有效地利用整个生物基材料。^[29]

5.1 性能增强的生物基聚合物

生物基聚合物的性能往往略逊于石化基聚合物的，将需要大量的研究和开发来改进当前已有的材料。通过材料化学家、生物技术专家和工程师的合作，将实现从现有的生物原料设计新的高价值产品，并开发新的改良作物。^[6,7]

新的生物基聚合物应该设计为可生物降解并具有堪比通常的石化基塑料的热稳定性和力学性能。^[30]

[‡] 对非粮食作物如柳枝稷、细业芒和生命力旺盛、高出油率的大戟科植物稍加培育就可用作生物原料的来源。

在最初的发展阶段，生物基聚合物应该是作为石油基塑料的补充，而不是直接和它们竞争。然而，无论如何，从稍长时间来看，生物基塑料可用于生产更高价值的产品，其价格的上涨可以由增加的功能性能来得到回报。现有技术的科学进展是实现大规模替代石化产品所必须的。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将设计用生物原料生产聚合物的新的高效、高选择性催化剂。
- 材料化学家、生物技术专家和工程师将合作开发新的共聚物、改性生物高分子、(纳米)组合物和共混物等以获取新材料，并通过改良作物得到新的生物基聚合物。
- 材料化学家需要增进我们对构效关系的理解以能根据不同目的来对塑料进行剪裁。

6 CO₂作为原料

实现由 CO₂ 来可持续生产高值化学品、塑料和燃料等产品在科学上和技术上是一个可行的目标(见第二章, CO₂ 的固定、活化和利用)。把 CO₂ 纳入供给链的新方法必须是可持续和经济有效的。

第四章 稀缺天然资源的保护

稀缺天然资源的供应正以惊人的速度减少，并且很多重要、稀缺的矿物资源通常产自政治动荡的国家，资源匮乏将很快成为现实。材料化学可以在许多应用中帮助减少、替代和回收利用稀缺天然资源：可以开发从土壤、河流和海洋中提取磷的新方法；可以设计出不依赖于锂供应的替代性储能技术。材料化学家将设计出新的不需要铂的催化工艺过程，以及为其它设备和太阳能电池设计出不需要铟的新材料。还将考虑在一系列应用范围中使用稀土金属的替代品。在过渡时期，迫切需要有协调一致的全球策略以优化稀缺天然资源的供给，直到替代性技术的实现。

1 面临的挑战

金属和其它矿藏几乎在现代生活的每个方面都是必不可少的。磷(P)是化肥(以磷酸盐形式存在)中的一种主要成分，并且它通过加入到DNA和骨骼中成为生命的必须元素。磷是一种基本元素，没有它就无法生存。金属，如锂(Li)、铂(Pt)、钯(Pd)、铟(In)和稀土金属(17种化学元素的总称)以各种形式广泛用于电池、促进复杂化学转变的催化剂(包括大气污染物的去除)、计算机元件、太阳能电池、移动电话以及如风力涡轮机等马达中的磁体。将稀有化学元素用于催化剂可使工业生产过程在更低的温度下低能耗地有效进行。

元素资源在地壳中的总蕴藏量虽然很大，但毕竟是有限的。“储量”是指贮藏位置和吨位已知，并可以使用现有技术经济地开采的金属的存量。因此，通常一个元素的储量只代表了其在地壳中总量的一小部分。不像化石燃料在燃烧时转换为二氧化碳和水，元素资源不会被破坏，并且常常可以被回收和重复使用。然而，有效的循环利用严重依赖于产品的设计，以使元素资源能在一个产品生命周期结束时回收。

全球的元素资源供应量日趋减少是一个不争的事实，这是潜在的比原油供应减少更为紧迫的问题。^[31]例如，已知的磷酸盐矿很可能将在接下来的30~100年内被使用枯竭^[32]。仅存的珍贵、不可或缺的资源被少数国家所掌控，这对许多国家来说都是关系到国家安全的问题。对某些矿藏限制出口的国家政策早已付诸实施。稀缺自然资源的高价格和有限可用率将很快影响到工业中的许多不同部门。

材料化学可以给出减少、替代或循环利用稀缺自然资源的方案。可以开发出新的途径来用更丰富的材料替代稀有元素在技术和工艺过程中的使用，这些解决

方案必须是可持续的——决不能又引发出对其它在将来会短缺供应的资源的新的依赖^[33]。

短期内，需要借助立法来调节稀缺自然资源的供给与使用。然而，在中长期内，至关重要的是，通过对可持续技术的研究和开发的支持来弥补这些措施的不足。我们必须现在就采取行动，这样，一旦发生短缺，我们就能应对。

石化产品之类的碳原料供应的安全性也同样需要关注。这已在第三章：化石燃料和原料的替代材料中进行了讨论。

2 磷

我们需要技术上的突破来为后代生存保证磷的供应。除了稳定的磷酸盐矿供应之外，目前还没有其它切实可行的办法能保证磷的供应。作为肥料流失的结果，磷往往会出现在土壤、河流和海洋中。从这些来源提取磷是很有潜力的，但是一些物理的和能耗的障碍限制了这样的工艺过程的发展，迫切需要基础研究来开发可持续的解决办法。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将设计和开发出能够利用主-客体或金属配位化学从水和土壤中选择性结合和除去含磷物(比如磷酸盐)的新材料，。
- 化学家、工程师和生物技术专家将开发和优化能从水中选择性地富集磷酸盐的膜技术。

3 锂

锂(Li)是在电池中最常用的金属，并且在短期到中期内将继续成为未来能源储存技术的一部分(见第一章，能源转换与储存)，它还具有重要的医用价值。需要有可减少和替代使用锂的新技术。

目前还不清楚已知的锂资源储量还能持续供应多久。通过估测利用现有开采技术能够获得的锂资源的贮藏量，结合它们被使用消耗的速度和供应量降低的威胁，由此给出的结果是供应将维持约 45 年。如果锂离子电池变得越来越普遍，时间可能会比这更短^[34,35]。尽管随着使用量的增加可能会有改进技术以从电池中回收利用锂，但仍需要开发从可替代来源获取锂的方法。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将研究用硫化钠(Na_2S)、镁、氮掺杂石墨烯[§]或其它材料替代电池中锂的潜力。

[§]石墨烯是单层石墨组成的碳基电活性材料。石墨烯因其有趣的物理性质成为目前研究较多的材料，2010年诺贝尔物理奖颁发给它的发现者。

- 材料化学家将提高电池的效率和使用寿命——将现在的使用寿命提高5~10倍应该是可以达到的。
- 化学家将研究利用主族金属配位化学从海洋中提取锂的新技术。

4 铂

铂当前被用作低温燃料电池的关键组分(见第一章, 能源转换与存储)。金属浸出是燃料电池应用中普遍的问题, 结果是导致效率低下和金属散失在周围环境中。需要有从稳定供应的、地球上丰富的原料制得的更便宜、耐久的燃料电池

铂还被当作催化剂大量地用在各种重要的化学转化中。需要有新的基于更丰产化学元素的可持续催化工艺过程(见第五章, 绿色材料与过程)。

材料化学怎样发挥作用?

- 化学家将为燃料电池中的铂探索和开发出基于更丰产元素的替代物。
- 化学家将为燃料电池中的铂探索和开发出基于包括氮掺杂石墨烯在内的纳米材料的替代物
- 材料化学家要致力于合理设计和实现有良好催化性能的诸如合金之类的纳米多金属体系。

5 铟

目前很多太阳能电池技术严重依赖于铟的使用(也见第一章, 能源转换与存储), 许多电子元器件的组件如平板电视, 也是同样的情况。

在今后的5~10年中, 基础材料研究能提供可行的替代铟的材料。

材料化学怎样发挥作用?

- 材料化学家将为太阳能电池、有机发光二极管和更好更便宜的显示技术研究 and 开发更便宜、稳定供应的材料。
- 材料化学家将设计和完善对光和热稳定、透明、导电和具有优良性能的新材料, 以满足多种应用。
-

6 稀土金属

稀土金属, 例如钕(Nd), 被用在包括通讯业在内的许多工业和技术领域所使用的磁体中。

需要稳定供应适合各种应用的磁体。利用有针对性的研究，在不到 5 年的时间内也许就可实现对磁体中稀土金属的替代。过渡期内，将需要有从各种不同来源有效地获取稀土金属的新技术。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将提高我们对稀土金属磁性了解，改善磁体的性能，并减少其中的稀土成分含量。
- 材料化学家将提高我们对稀土金属配位化学的理解，促进设计改进的收集方法。

7 供应与控制

迫切需要制定获取和控制使用稀缺天然资源的战略。现在许多国家正在立法，以减轻供应减少的影响。

2007 年，为日本政府呈递的一项报告^[36]列出了对稀有金属和控制元素利用的四项原则：缩减、替代、循环和调配。在此基础上，日本已经把元素战略列为最重要的优先发展的科技研究项目之一。

2009 年欧盟也启动了类似的计划^[37]，一致认为关于很多元素已探明储量的数据仍是缺乏的，应该进一步获取数据并编目。

2010 年 11 月，英国下议院科学技术专门委员会发起了一项关于具有重要战略意义金属的调查，并将在 2011 年初向英国政府提交报告。^[38] 同样，2010 年 12 月，美国能源部公布的报告详细说明了其关键材料的战略。

在其他国家，也必须对保证稀有自然资源的适量全球供应和调节其应用作出应答。

第五章

绿色材料和过程

不断增长的世界人口所带来的压力正对环境造成破坏。我们必须以绿色化学的原则，用无害、可持续的方式满足我们对能源、材料和水的需求。材料化学能帮助开发不依赖稀有或有毒化学元素的新催化剂，并在以高产率得到产品的同时产生最少的废物。可以设计出高效地使用能源和水并避免污染环境的新的工业过程。可以为发展中国家和发达国家设计新技术，以便更好地监测并将空气、土壤和水中的污染物从环境中清除。可以设计安全、易回收或可完全生物降解并对环境影响极小的新一代塑料。

1 面临的挑战

随着世界人口不断增长，将要求可持续发展和环境友好的工艺过程能满足人类对能源、材料和水的需求。要遵循绿色化学的十二项原则（见方框）来设计这些过程，以实现大量能源和财政开支的节省。这些节省将激励着工业界以及学术研究人员去投入时间和资源开发新的绿色材料和过程。

绿色化学的十二项原则^[40]

- 防止浪费；
- 设计更安全的化学品和产品；
- 设计危险性小的化学合成；
- 使用可再生原料；
- 使用催化剂，非化学计量比的试剂；
- 避免形成化学衍生物；
- 实现原子经济最大化；
- 使用更安全的溶剂和反应条件；
- 提高能效；
- 设计使用后可降解的化学品和产品；
- 实时分析以防止污染；
- 尽量减少事故隐患。

需要新的和改进的、可在较低温度、压力和友好溶剂中进行的催化工艺过程。如前所述，催化剂能够直接选择性地催化化学过程，并显著减少所需的能量和增加产出。日常生活中使用的化学产品中的约 90% 是在催化剂的帮助下生产

的，但是，催化对现代社会的影响不能高估。^[41] 需要有对催化过程设计的新探索和创新的新方法来确定改善工业规模工艺过程的途径。

空气、土壤和水污染物的排放仍然是一个全球性问题，特别是在包括人口密集的特大城市在内的城市地区，并且塑料仍在继续污染着我们的环境。我们必须采取行动以消除那些已经存在的污染物，并必须尽一切努力来避免将来产生新的废物。大气、水体和土壤中污染物的检测、控制和治理措施是我们建立一个更清洁更美好地球家园的先决条件。

当今消费者对由“天然”材料制成的产品的需求，增加了设计用可替代资源生产的、对环境有很少或非长期影响的合成材料的压力。材料化学家可以提供能够满足这些要求的可用于多种应用的新型功能材料。

2 新型催化剂

催化剂为我们的日常生活做出了重要贡献，其应用范围包括从聚合物和大宗化学品（如氨、聚乙烯和醋酸）的制造到医药中间体的合成及控制排放的催化转换器等方面。目前使用的催化剂很多是基于铂之类的稀有元素（见第四章：稀缺天然资源的保护）。要求新的催化剂能在高产率地得到产品的同时不形成有害的副产物，并且是由地球丰产元素组成的。

催化剂结垢和环境污染在是如今许多工业化过程存在的问题。新工艺过程必须能使催化剂进行再生和未使用的原料回收利用。

将需要可以有效地利用生物基化学品的催化剂，以作为使用石油原料的传统工艺的替代品（见第三章：化石燃料和原料的替代材料）。材料化学家将为新的生物基原料设计可在水中工作的高效、高活性和选择性的催化剂新家族

固定化（或锚定）催化剂有可能给许多工业流程带来革命性的变革。这些催化剂绑定到一个不溶性固体上，因此使用后很容易被去除和回收利用。这样，可以高纯度地合成药物和材料，并可以避免大多会产生金属废料的传统催化工艺过程所伴随的金属污染问题。需要更系统的探索来设计新的固定化催化剂以促进这一领域的突破。

设计新的催化工艺过程方面的重大突破将有可能在五至十年内得以实现。

材料化学怎样发挥作用？

- 化学家将设计和开发可在水、离子液体、超临界 CO_2 (见第二章， CO_2 的固定，活化和利用)等友好溶剂中使用的新型催化剂。
- 我们必须设计和优化不需要稀有元素但是有良好活性和选择性的新型催化剂。

- 材料化学家将设计和优化不需要溶剂或者在既是溶剂又是催化剂的介质中进行的新型化学反应。
- 化学家需要设计和优化能够将生物质转化成新材料从而取代石化产品的新型催化剂(见第三章，化石燃料和原料的替代材料)。
- 材料化学家将开发出用更系统、合理的方法设计出诸如团簇催化剂和纳米粒子之类的固定化催化剂。

3 过程设计

从小规模试验到工业规模的化学工艺放大过程中经常伴随着一些问题。工艺过程效率降低是常见的问题，确定适当的解决办法也将是一个挑战。在大规模应用中，控制生产过程中材料的特性是困难的。需要在如大面积太阳能电池等的应用中更好地控制材料的物理性质。

需要工业领导人承诺支持新战略的实施。

材料化学怎样发挥作用？

- 过程化学家和工程师将开发新技术，将集约化的微观尺度单元（例如微反应器）用于大型工艺流程，以尽量减少会降低过程效率的物质和能量传递的限制
- 科学家和工程师将开发新的分子建模理论和模拟技术以设计更好的工业过程
- 材料和过程化学家将设计能够对材料的大小、形状、形貌、表面结构和孔隙度有更好操控的工艺过程

4 污染物的检测、控制和治理

4.1 空气污染物

无论在发展中国家还是发达国家，空气污染仍在持续地造成环境和健康问题。我们必须研发出针对固定排放、交通运输和工业污染源的空气污染传感器以用连续的方式更好地监测空气质量。虽然化学和化工业已开发创新技术以减少空气污染物的排放^[42]，但是亟需进一步突破。还需要开发从大气层捕获已经存在的空气污染物的手段。

常见的空气污染物

- 二氧化硫(SO₂) 是酸雨的一种成分，产生于各种工业过程。二氧化硫的总体排放量在提高，但是由于过去 30 年的调控，在发达国家正在逐渐降低。
- 氮氧化物(NO_x)是燃烧时，特别是在汽车马达中，空气中氮气和氧气反应的产物，它是形成烟雾和酸雨的原因之一，全球氮氧化物的排放量正在增加^[43]。
- 由许多材料的燃烧生成的炭黑的排放正以与 CO₂ 类似的程度影响着气候变化。
- 挥发性有机物(VOCs)可以从许多不同的来源进入到环境中并会造成室内和室外空气的污染。VOCs 会引起人类呼吸道感染、过敏和免疫降低等不良反应。
- 在上层大气中，臭氧通过吸收紫外线 (UV) 辐射保护地球。低层大气中，臭氧是由含有碳氢化合物和氮氧化物的空气在光照下发生反应生成的。低层大气中的臭氧是一种空气污染物，可能对人体呼吸系统和植物产生有害的影响。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将开发出用于检测二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)、臭氧(O₃)和其它化学物质的新方法，以及测量颗粒物尺度分布的方法。
- 材料化学家将帮助设计出不在大气中排放包括二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)、臭氧(O₃)和颗粒物等在内的污染物的新的工业和能源生产过程。
- 材料化学家将设计出更有效地从环境中去除空气污染物的新材料。

4.2 水污染物

我们需要改进工艺过程，以监测并减少进入我们供水中的污染物水平。据联合国估计^[44,45]，大约有 11 亿人（占世界人口的 18%）无法获得安全的饮用水。供水的污染可能既来自人类活动又来源于天然来源。

发展中国家的水质问题往往和发达国家非常不同。砷、农业废弃物、工业废弃物和药物污染是普遍性的问题。我们已经有了监测和治理许多已知污染物的技术，但这些技术应更加稳健、方便可行和廉价易得。^[46]

材料化学家可以帮助开发去除甚至是利用水中污染物的技术。通过多学科的研究以及适当的产业激励政策，解决方案可在一个相对短期内得以实现。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家和分析化学家将开发和优化能在复杂环境中连续监测复合、低浓度污染物的传感器。
- 科学家和工程师将设计和优化工艺过程，以从源头上减少人类活动造成的水污染，包括水基化学过程以及与之相结合的可以净化用过的水的有效方法。
- 材料化学家将帮助开发和优化可持续的吸附技术、膜技术和生物降解技术，以从环境和饮用水供应中去除水污染物。
- 材料化学家和过程工程师将设计和实施能把废水中有机污染物转化为燃料的新工艺过程(见第一章，能源转换和储存)。

4.3 塑料生产

随着社会需求的增长，将需要可持续的塑料来源。在一些国家，如印度，使用非降解塑料产生的废物引起全国关注。即使存在回收计划，回收进程往往资源效率低下、需要大量能源投入并导致材料流失。新的可生物降解材料将是由生物源（生物质）构筑块来生产的。还将需要有更加有效的回收系统。

当前所使用的生物基塑料会对回收系统造成混乱，因为很难将其与非降解塑料分开。对回收计划的更好的社会教育和自愿参与将有利于不同的可降解塑料的分离和再利用/循环利用。许多国家已经取得了良好的进展——德国现行回收再利用的份额已经达到 55(重量)%；玻璃、纸张和金属的回收率超过了 90%^[47]。应该优先发展可降解为有用或无害产品(功能性生物降解)的塑料。需要对产品进行全生命周期的深入考虑，以确保所用材料对环境确实只有很小的影响^[28]。生物质衍生产品并不一定是“安全”的——所有被广泛应用的材料必须是对环境和人类无害的。

将来，聚合物和塑料将是生产从包装材料、建筑材料直至消费品的许多物体和成分的最通用的生产原材料。它们将被用来制造使用更安全耐用而且当不再需要时可快速降解为无害副产物的廉价的产品。

材料化学怎样发挥作用？

- 材料化学家将设计和优化新的由生物基构筑块生产的可生物降解塑料。
- 化学家将和工程师一起帮助开发和实施新检测系统和分离技术，以确保生物塑料可回收而不会污染已有的废物流。
- 在材料化学家的帮助下，我们将可能设计出对环境影响极小的完全可回收或可生物降解的材料并使其实现商业化。

- 化学家和生物技术专家将帮助通过发酵或生化技术来设计和优化聚合物构筑块，这将有助于降低所得聚合物的价格。

附录一

CS3 2010 年会与会代表名单

赵东元	复旦大学, 上海
彭笑刚	浙江大学, 杭州
江 雷	中国科学院化学研究所, 北京
朱利中	浙江大学, 杭州
韩布兴	中国科学院化学研究所, 北京
庄 林	武汉大学, 武汉
Markus Antonietti	马普学会胶体与界面研究所
Walter Leitner	亚琛工业大学
Bernhard Rieger	慕尼黑工业大学
Michael Fr öba	汉堡大学
Andrea Kruse	卡尔斯鲁厄工学院
Regina Palkovits	马普学会煤炭研究所
Kazuhito Hashimoto	东京大学
Hideo Hosono	东京工业大学
Eiichi Nakamura	东京大学
Takuzo Aida	东京大学
Morinobu Endo	信州大学
Tadahisa Iwata	东京大学
Steve Howdle	诺丁汉大学
Karen Wilson	卡迪夫大学
Andrew Cooper	利物浦大学
Neil Champness	诺丁汉大学
Ton Peijs	伦敦大学玛丽皇后学院
Matt Davidson	巴斯大学
Tobin Marks	西北大学 (美国)
Mike Heinekey	西雅图华盛顿大学
Vicki Grassian	爱荷华大学
Emily Carter	普林斯顿大学
Luke Achenie	弗吉尼亚理工大学
Marc Hillmyer	明尼苏达大学
Richard Miller	英国技术战略委员会

组委会名单

帅志刚	中国化学会、清华大学, 北京
陈拥军	中国国家自然科学基金委员会, 北京
Hans-Georg Weinig	德国化学会
Markus Behnke	德意志研究联合会 (DFG)
Nobuyuki Kawashima	日本化学会
Yoshio Okahata	日本学术振兴会
Richard Pike	英国皇家化学会
James Hutchinson	英国皇家化学会
Katie Daniel	英国工程和自然科学研究委员会
Brad Miller	美国化学会
Katharine Covert	美国国家科学基金会
Carol Stanier	科学专栏作家

参考文献

- [1] *State of the world's cities 2008/2009: Harmonious Cities*, UN-HABITAT, 2008, <http://www.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=2562>
- [2] *Human Development Report 2010*, United Nations Development Programme, 2010, <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2010/>
- [3] *Growth isn't possible: why we need a new economic direction*, New Economics Foundation, January 2010, <http://www.neweconomics.org/publications/growth-isnt-possible>
- [4] *The Scientific Century: securing our future prosperity*, Royal Society, March 2010, <http://royalsociety.org/The-scientific-century/>
- [5] *Chemistry for Tomorrow's World: a roadmap for the chemical sciences*, Royal Society of Chemistry, July 2009, <http://www.rsc.org/ScienceAndTechnology/roadmap/index.asp>
- [6] *Workshop Report: Chemistry for a Sustainable Future*, National Science Foundation Workshop on Sustainability and Chemistry, June 2006, http://www.chem.uiowa.edu/research/sustainability/2009_reprint_chemistry_sustainable_future.pdf
- [7] *Innovation for a Better Future: Putting Sustainable Chemistry into Action*, SusChem Implementation Action Plan, 2006, [http://www.suschem.org/upl/3/default/doc/SusChem_IAP_final\(1\).pdf](http://www.suschem.org/upl/3/default/doc/SusChem_IAP_final(1).pdf)
- [8] *The economic benefits of chemistry research to the UK*, Oxford Economics, September 2010, <http://www.rsc.org/ScienceAndTechnology/Policy/Documents/ecobenchem.asp>
- [9] *World energy outlook*, International Energy Agency, 2010, www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/WEO2010_es_english.pdf
- [10] *Global Oil Depletion: an assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production*, UK Energy Research Centre, August 2009, www.ukerc.ac.uk/support/tiki-download_file.php?fileId=283
- [11] *BP Statistical Review of World Energy*, BP, June 2010, <http://www.bp.com/statisticalreview>
- [12] *Statistical Release: 2008 UK carbon dioxide emissions for Local Authority and Government Office region level*, UK Department of Energy and Climate Change, September 2010, http://www.decc.gov.uk/assets/decc/Statistics/climate_change/localAuthorityCO2/464-stat-release-2008-uk-co2-emissions.pdf
- [13] *Powering the World with Sunlight: a white paper describing the discussions and outcomes of the 1st annual Chemical Sciences and Society Summit (CS3)*, July 2009, <http://www.rsc.org/delivery/ArticleLinking/DisplayHTMLArticleforfree.cfm?JournalCode=EE&Year=2010&ManuscriptID=b924940k&Iss=2>
- [14] *Energieversorgung der Zukunft (Summary in English)*, December 2009, available from <http://www.dechema.de/studien-path-1.123212.html>
- [15] *Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires*, Hochbaum, A. I. et al., *Nature* 451, 163–167, 2008, <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7175/abs/nature06381.html>
- [16] *Scaling Up Alternative Energy*, Science Online Special Collection, August 2010, www.sciencemag.org/site/special/energy/
- [17] *Sun and sand breed Sahara solar power*, *New Scientist*, 30 November 2010, <http://www.newscientist.com/article/dn19785-sun-and-sand-breed-sahara-solar-power.html>
- [18] The Hydrogen Office, Fife, Scotland, <http://www.hydrogenoffice.com/>
- [19] *Climate Change 2007: Synthesis Report*, fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm
- [20] *Clean coal roadmaps to 2030*, IEA Clean Coal Centre, September 2009, http://www.iea-coal.org.uk/publishor/system/component_view.asp?LogDocId=82200&PhyDocID=7212
- [21] *CO₂ Capture, Transport and Storage*, POSTNOTE 335, Parliamentary Office for Science and Technology (POST), June 2009, <http://www.parliament.uk/documents/post/postpn335.pdf>

- [22] "Verwertung und Speicherung von CO₂" (English version), Dechema, 2009, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- [23] *The Energy Bill* (summary), UK Department of Energy and Climate Change (DECC), 2010, http://www.decc.gov.uk/assets/decc/legislation/energybill/1_20100226093333_e_@@_energybillfactsheetssummary.pdf
- [24] *Reversing Global Warming: chemical recycling and utilization of CO₂*, Report of the National Science Foundation-Sponsored Workshop, July 9–10, 2008, <http://www.usc.edu/dept/chemistry/loker/ReversingGlobalWarming.pdf>
- [25] *Transformation of Carbon Dioxide*, T. Sakakura, J.-C. Choi, H. Yasuda, *Chem. Rev.* 107, 2365–2387, 2007, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/chin.200736261/full>
- [26] *Methanol: The New Hydrogen*, Technology Review, MIT, 2006, http://www.technologyreview.com/BizTech/wtr_16629,296.p1.html
- [27] *CO₂ as a Refrigerant*, BOC Factsheet, http://www.boconline.co.uk/pdf_downloads/products/products_by_type/r744_co2_refrig_factsheet.pdf
- [28] *Lifecycle Analysis Review*, Chemistry Innovation Knowledge Transfer Network, 2009, <http://www.chemistryinnovation.co.uk/roadmap/sustainable/files/dox/Lifecycle%20Analysis%20Review.pdf>
- [29] *Roadmap der Deutschen Katalysforschung*, December 2010, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- [30] Nobuyuki Kawashima in "*Biopolymers*", edited by A. Steinbuchel and Y. Doi, Volume 3, Section 9 "Polylactic Acid" pp-251-274, Wiley, April, 2002.
- [31] *Scarcity of Minerals: a strategic security issue*, The Hague Centre for Strategic Studies, January 2010, <http://strategic-metal.typepad.com/strategic-metal-report/2010/10/scarcity-of-minerals-a-strategic-security-issue.html>
- [32] *The story of phosphorus: Global food security and food for thought*, D. Cordell, J.-O. Drangert, S. White, *Global Environmental Change*, 2009, 19, 292–305, http://www.agci.org/dB/PDFs/09S2_TCrews_StoryofP.pdf
- [33] *Rohstoffbasis im Wandel* (English version), December 2010, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- [34] NIMS-EMC Materials Data for the Environment No.8 Characterization Factor in the Category of the "Utilization of Material Resource", NIMS, 2007
- [35] *Element Outlook*, National Institute for Materials Science, http://www.nims.go.jp/publicity/publication/files/element_outlook.pdf
- [36] *Strategic Proposal Catalog 2004-2010*, CRDS, JST, 2010, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/contents2010.pdf>
- [37] *Critical Raw materials for the EU*, European Commission, 2010, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm
- [38] *Committee announce new inquiry into strategically important metals*, press release, United Kingdom Parliament, 11 November 2010, <http://www.parliament.uk/business/committees/committees-a-z/commons-select/science-and-technology-committee/news/101111-new-inquiry---strategically-important-metals/>
- [39] *Critical Materials Strategy*, US Department of Energy, December 2010, <http://www.energy.gov/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>
- [40] *Green Chemistry, Theory and Practice*, Anastas, P. T.; Warner, J. C., Oxford University Press: New York, 1998, p. 30, <http://www.epa.gov/gcc/pubs/principles.html>
- [41] *Roadmap der Deutschen Katalysforschung*, December 2010, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- [42] *Innovations for Greenhouse Gas Emission Reductions*, ICCA, 2009, <http://www.icca-chem.org/ICCADocs/LCA-executive-summary-english1.pdf>
- [43] *Nitrate aerosols today and in 2030: a global simulation including aerosols and tropospheric ozone*, S. E. Bauer, D. Koch, N. Unger, S. M. Metzger, D. T. Shindell, and D. G. Streets, *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, 7, 5043–5059, <http://www.atmos-chem-phys.net/7/5043/2007/acp-7-5043-2007.html>
- [44] *Water: A Shared Responsibility: The United Nations World Water Development Report 2*, World Water Assessment Programme: Paris and New York, 2006, <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001444/144409e.pdf>

- [45] *Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis*. Human Development Report 2006: United Nations Development Programme, <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2006/>
- [46] *Africa's Water Quality: a chemical science perspective*, Pan Africa Chemistry Network (PACN), 2010, http://www.rsc.org/images/RSC_PACN_Water_Report_tcm18-176914.pdf
- [47] Data in <http://www.agenda21-treffpunkt.de/daten/muell.htm>

(中文版由《化学通报》编辑部邬慧博士翻译，叶成研究员校改，最后由本次论坛组委会成员、CS3 中方联络员、中国化学会副秘书长帅志刚教授核定)