

## 关键矿产、绿色能源和地缘政治的复杂组合

**【译者按】**2022年6月28日，莱顿大学环境科学研究所雷内·克莱恩和伊斯特·范德沃特首次撰写了一份关于《关键矿产、绿色能源和地缘政治的复杂组合》的白皮书。该报告邀请了来自不同学科的7名研究人员，分享关于能源转型、原材料地缘政治、材料短缺和产业政策、减少欧盟对进口原材料的依赖、城市开采、太阳能电池板回收和融资等7个领域的观点，试图为能源危机和地缘政治紧张局势提供解决方案。报告指出，可通过提高城市矿山开采水平、回收太阳能电池板等方式来减少欧洲对材料的依赖。赛迪智库材料工业研究所对该报告进行了编译，期望对我国相关部门有所帮助。

**【关键词】**关键材料 绿色能源 地缘政治 复杂组合

为应对几成现实的气候危机，欧盟制定了雄心勃勃的绿色新政，确保到 2050 年实现温室气体净排放，实现与资源使用脱钩的经济增长，同时不让一个人掉队，不让一个地方掉队。原材料是欧盟绿色新政的核心：铁、铜和锂等金属及稀土金属将取代煤炭、石油和天然气。与此同时，能源转型作为一项牵动全球供应链的浩大工程，尤其是在欧盟试图摆脱对俄罗斯天然气依赖的大背景下，这一工程显得愈加紧迫。反过来，全球供应链中断也会严重影响能源转型。在本白皮书中，来自莱顿-代尔夫特-伊拉斯姆斯大学联盟的研究人员分享了自己对全球依赖性和地缘政治方面的观点，这两者在实现能源转型所亟需的原材料获取方面发挥着作用，报告重点阐述了欧盟是如何获得迄今为止所取得的成绩，以及今后该如何减少依赖。

## **一、勒内·克莱因（Rene Kleijn）：能源转型<sup>1</sup>带来资源和政策的巨大转变**

欧盟需要建立自身关键矿产资源城市开采和精炼业务，以减少对原材料的依赖，并培育未来数十年中能源基础设施所需的材料储备。克莱因认为，从本质上讲，这是一次从化石燃料向金属的转变。需要大规模转变开采方向，实现从煤炭、石油和天然气

---

<sup>1</sup> 能源转型是指从化石燃料向金属的转变。

向金属开采的转变，以便在未来 30 年内建立起这方面的储备。

### **（一）原材料**

克莱因的大部分研究都是关于资源稀缺性和全球供应链，包括绘制煤炭、镍和稀土金属的全球资源供应链，分析矿藏地点及其产权情况，由哪些国家或企业进行精炼，并研究大型行业参与者的所有权结构等。他认为，未来将需要大量钢材来制造风力涡轮机、大量钕磁铁来取代维护成本极高的齿轮箱，还需要大量用于制造电缆的铜、用于制造电池的镍和锂，以及生产大量生产太阳能电池板所需的硅、银、铟和碲等材料。

根据克莱因的研究，需要开采的矿石并不短缺。问题在于供应要满足需求的快速增长。他认为，到 2050 年某些金属的全球开采量将不得不增加 20 到 50 倍，而开一座新矿可能需要长达 20 年的时间。这意味着所有主要的工业国都将争抢这些金属，进而导致地缘政治紧张态势加剧。因为金属矿与煤炭、石油和天然气开采所在国家不同，我们将会见证地缘政治力量的转变。

目前，中国是上述许多原材料主要生产国，也包括在刚果开采、随即运往中国加工的钴。他认为，欧洲对材料精炼产能的投资非常少，这令人难以置信。从很大程度上说，欧盟已完全依赖其他国家的石油、煤炭和天然气，以及实现能源转型所需的资源。

### **（二）政策制定者**

在新自由主义范式下，政策制定者的关注点是通过全球化来看待经济。在这种情况下，确保生产效率、专业化、竞争和国际贸易的明确分工，已成为自我调节型全球市场的主要驱动力。但若要摆脱对俄罗斯天然气的需求，或减少欧洲对煤炭或石油等高污染能源的依赖，确实需要政府的参与。克莱因认为，明智的产业政策肯定有助于实现氢能等清洁能源取代污染最严重的工业流程。以塔塔钢铁公司为例，如果荷兰政府的政策能鼓励这家企业用海上生产的绿色氢能来生产绿色钢材，则这些钢材也可以直接用来制造更多的风力涡轮机。”

### **（三）绿色新政**

2019年12月，欧盟委员会提出了具有里程碑意义的《绿色新政》，这可能是一个分水岭，旨在制定和实施实现能源独立与碳中和所需的产业政策。与其说由政府自上而下地制定这些政策，克莱因更倾向于让当地社区参与这一转型，没有人希望自己的后院有一座锂矿。我们还必须确保开采企业支付体面的工资，并对受影响的人给予充分补偿。

同样重要的是，要清晰地传达从开采系统转向供给系统的优势。只要能够架设足够多的风力涡轮机、安装足够多的太阳能电池板、制造足够多的电池，并能够大规模制氢，欧盟对资源输入的依赖就将大大降低。而且，风能和太阳能都是免费的资源。

#### **（四）紧迫性**

克莱因认为，实现这一愿景需要营造一种紧迫感，乌克兰战争已表明全球供应链的脆弱性。依赖单一国家可能导致巨大的价格波动。因此，我们必须保证重要供应链的多样化。以锂为例，锂在全球范围内的供应充足，但因为需求仍高于产能，价格却在迅速攀升。减少欧洲对资源进口的依赖，意味着欧洲将不得不建立自身的开采和冶炼业务。当然，减少消耗也是重要的优先事项。而现实是，我们当前的社会需要能源、流动性和技术。我们必须扪心自问，要从哪里获取我们未来数十年所需的原材料。

## **二、本杰明·斯普雷彻（Benjamin Sprecher）：原材料的地缘政治**

自由市场在扩大关键原材料生产规模方面存在不足。为改善原材料供给，以及应对环境和伦理方面的问题，欧盟需要制定产业政策。斯普雷彻在一篇研究文章中描述了假如南非爆发内战，金属铂市场将会发生什么。俄罗斯也是重要的金属铂供应国，但俄乌战争使得我们很难预测五年后的全球金属铂市场会如何。他认为这就是研究人员不断在模型中添加新情景的原因。这些模型形成了各种选择空间，即可作为政策制定与推行的基础情景。这些情景通常涵盖较长时间跨度，因为扩大金属提取规模需要大量

的工作和时间。以锂为例，锂是制造（汽车）电池所需一种金属。在全球范围内，锂资源丰富，甚至可以从水中提取，但新矿投产需要数年时间。除获得监管部门的批准，开采者还需要让当地人加入进来。因为锂的成分取决于其提取方式和产地，所以电池工厂需要长达 18 个月的时间来适应新的锂源。

### **（一）产业政策**

斯普雷彻认为，全球锂资源丰富，却出现供应短缺，证明了自由市场存在不足。因此，似乎必须要采取某种形式的产业政策，才能应对市场短缺甚至混乱。他还认为，中国已成为许多关键材料的主导力量，因为中国政府积极主动地推动某些行业，并提供财政支持。欧洲也需要这样的产业政策。事实证明，把一切都推向自由市场是个坏主意。

### **（二）循环思维**

除通过产业政策来确保关键材料供应外，循环思维还有助于缓解关键金属的短缺。循环可以通过提高产品使用寿命和可回收性来实现。法国在立法方面树立了榜样，其规定到 2024 年，产品必须符合某些可修复性标准才能出售。产品使用寿命越长，满足使用功能所需的原材料就越少。而假如太阳能电池板不再粘在一起，回收起来会容易得多。斯普雷彻希望乌克兰战争能够为欧洲敲响警钟。

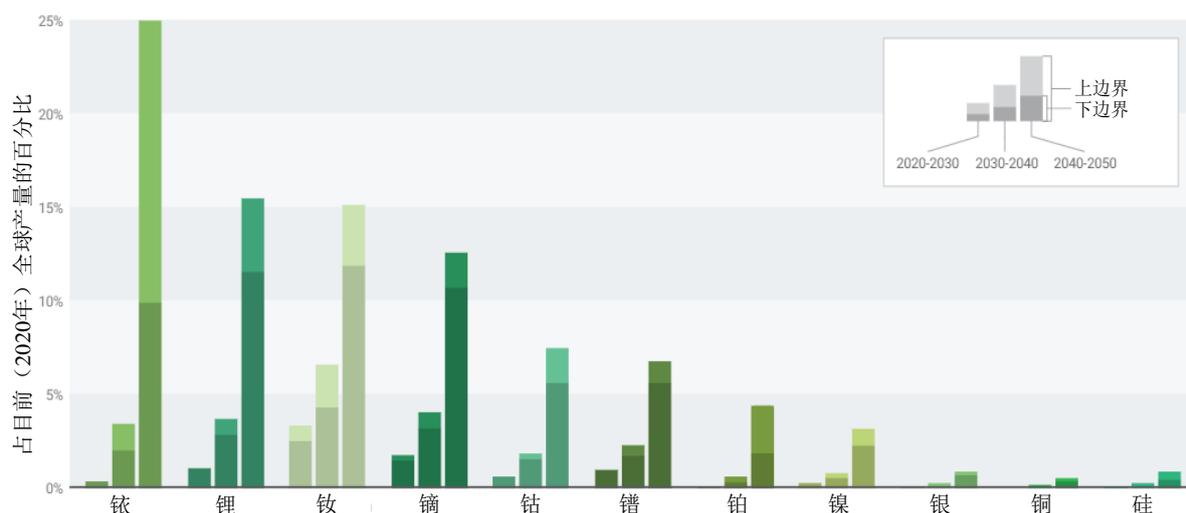


图 1：2020—2030 年、2030—2040 年和 2040—2050 年间，若干种关键金属的预期年需求量占目前全球产量的百分比

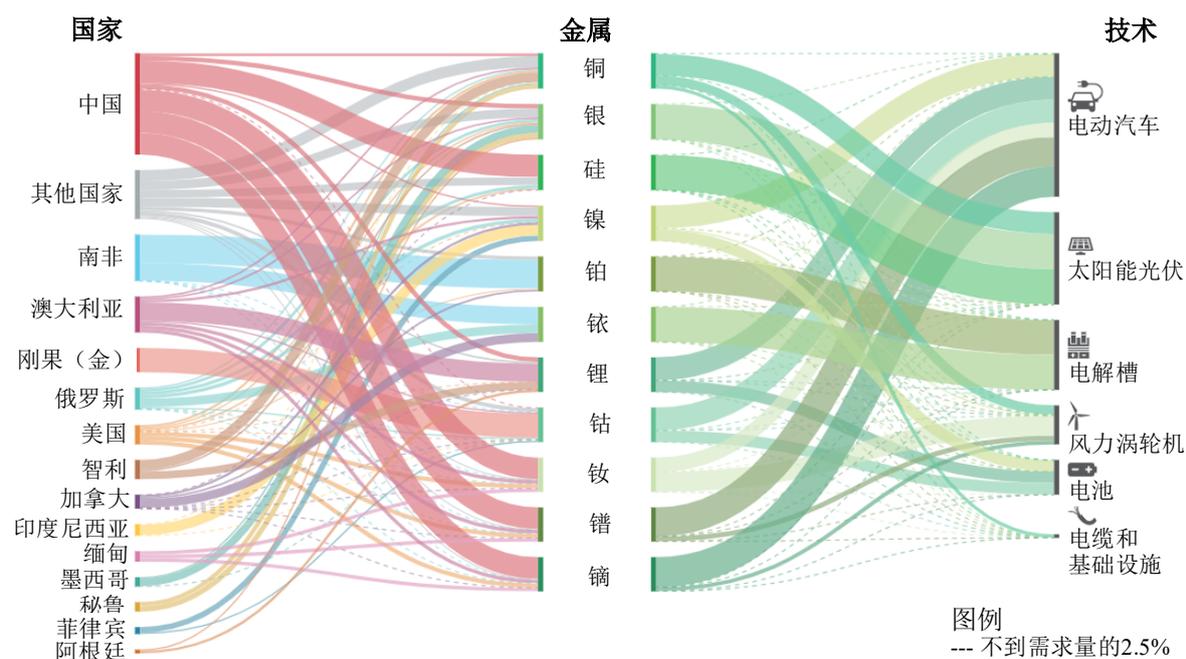


图 2：可持续能源系统所需关键金属的提取情况

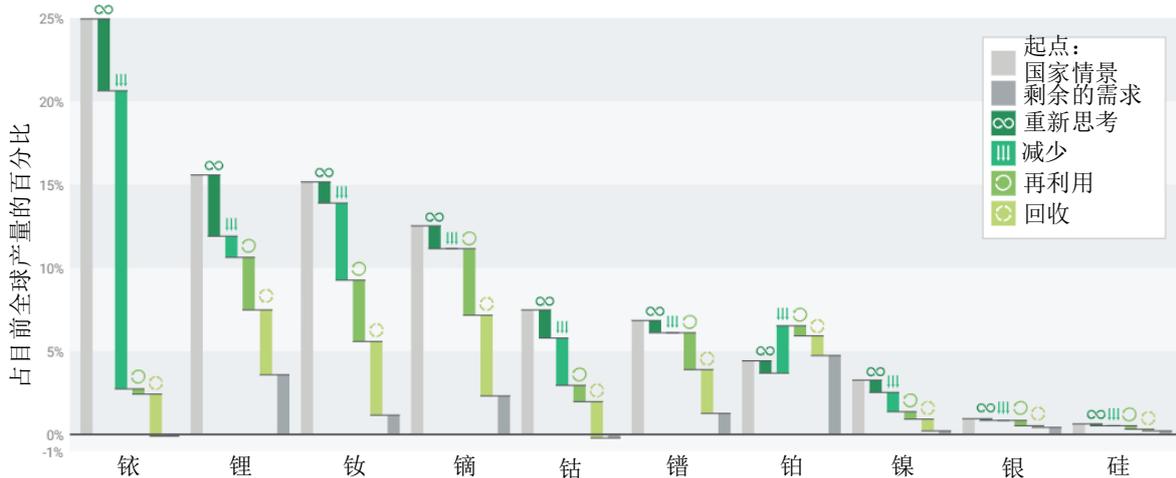


图 3：2040—2050 年，四种循环策略组合对相对需求量最大的十种金属的年需求量潜在影响

### 三、大卫·佩克（David Peck）：材料短缺和产业政策的过去和现在

佩克认为，虽然不是很恰当，但特定的材料可以在字面上定义一个时代，想想石器时代和青铜时代。而如今，是锂和钴的时代。欧洲希望在七年内将其原材料使用量和碳排放量减少 50%。当初，英国仅用两年时间就实现了该目标，因此有许多经验值得借鉴。二战期间，循环经济的许多环保标准都符合要求。需要采取政策来加快能源转型速度。

#### （一）经营许可

在攻读博士期间，佩克并没有研究武器的生产。他宁愿研究

普通的产品，比如服装、陶器和家具。即使是战争期间，劳工们仍然需要睡觉的床，吃饭用的桌子和盘子。因此，这些都是在战时生产的必需品。他的主要兴趣点之一是英国政府制定的政策，他们借助这些政策对一切生产进行干预。经营许可证成为强制性要求，私人企业根据政府的合同开工。为确保经济的持续运转，由政府来决定设计和生产什么。英国政府完全控制并彻底改变了供需结构。他们任命了6位高级决策者，以及另外6名负责具体行业的产业专家。

## **（二）无意中的循环**

在正常的市场中，生产会迎合畅销品。然而，在二战期间的英国，是由一个设计师小组来决定最有效的产品设计，比如极简主义家具。也就是价格便宜，用料少，最好采用本地材料，且必须易于制造。因为没有人知道战争何时结束，所以产品必须经久耐用。有些椅子至今仍在藏家手中，因为其做工非常好。政府还发布了“将就凑合”的小册子，向家庭主妇传授有用的小窍门，告诉她们如何在严格的配给制下做到既节俭又时尚。这在无意中，实现了全社会对环保的意识。在二战时循环经济的许多环保标准都达到了要求。

## **（三）另外一种存储**

在佩克看来，乌克兰战争与过去有相似之处，因为这场冲突

也迫使人们重新思考欧洲的全球供应链。乌克兰战争和之前战争的主要区别在于，当前的转型是在各国政府的鼓励下，由私营部门所主导的，而二战期间，则是在私营部门的参与下，由国家所主导的。政府不愿出手干预，因为可能会招致私营部门和民众的反对。但目前，欧盟必须快速、果断地采取行动，政策措施或许可以不那么严苛，但需要某种形式的集中控制。政策层面对关键矿产的兴趣比以往任何时候都高，关键材料的供应链极为动态和复杂。有成千上万的问题需要回答，但是我们缺少足够的研究能力，因为所有专门研究该课题的学者都挤在一间会议室里。

#### **四、内姆·辛格（Jewellord Nem Singh）：减少欧洲对进口原材料的依赖，降低成本**

欧盟不能再全靠市场机制来应对其所有的原材料问题了。稀土金属的战略性获取也与对内投资的意愿有关。内姆·辛格认为，为了实现梦寐以求的战略自主权，欧盟必须面对一个现实，多年来，我们的生产和消耗一直都仰赖于中国。战略自主权还意味着更加不依赖美国、俄罗斯和南非。欧盟已经习惯了廉价的商品、电子产品和消费品。如果欧洲打算发展区域供应链，就得开始思考自身在绿色转型提取工艺上的作用。

##### **（一）牺牲**

“牺牲的政治”是内姆·辛格从人文地理学家的著作中借用的一个恰当概念，用以表达政策背后的伦理问题。开采稀有金属可能要付出高昂的环境、社会和健康代价，总得有人在某些方面做出牺牲，但目前，欧盟对此没有进行公开讨论。欧洲拒绝为绿色转型开采亟需的新矿，而只是把各种有害的副作用推给了发展中国家。尽管距矿区最近的社区往往遭受了最大的损害，但由于开采带来的经济收入，这些地区通常也能从矿产开发中受益。欧盟不应继续指望用市场机制来应对市场失灵和环境利弊的问题，而是必须针对环境和劳工问题进行更严格的立法。欧盟还必须认识到，当欧洲拒绝上马新的采矿项目，像钴、稀土和锂等重要金属就只能被外包到社会、法律和环境框架明显薄弱的地方。

## **（二）根本障碍**

内姆·辛格指出了公众对于采矿业的认知和现实之间的几处脱节：期望消费品的生产成本低，同时又要求生产流程的伦理标准高，欧盟对资源依赖的迟缓反应，《绿色新政》中提出的雄心勃勃的政治目标，以及各成员国如何就欧洲大陆采矿项目做决策的政治现实。欧盟决策过程的复杂性一直是绿色转型的根本障碍。以贸易政策为例，欧盟委员会在这方面拥有直接的政策权限，可以制定所有成员国共同适用的政策，但采矿政策属于国家权限，因此要服从各国国内的政治讨论。

内姆·辛格及其同事进行的实地调查发现，欧盟的目标经常跟各成员国国内的环境和社会政策产生冲突。为了实现欧盟为自身所需资源建立国内或区域供应链的战略，各成员国现在就应该共同携手发展采矿业。否则，仅凭一国政府之力开新矿真的非常艰难。

### **（三）优势地位**

随着气候危机成为现实，欧盟的工业竞争力取决于从受中国支配的市场中获得的各種稀有金属。欧盟仍然认为自身处在优势地位，可以从一个持续有效且公平定价的世界市场上采购所有初级材料。但是，随着政治和经济越来越多地交织在一起，情况已经变了。中国、巴西和南非等国深谙西方国家对于稀土金属的迫切需求。中国利用自身的垄断地位来控制价格，帮助本国企业击败国外同行。当然，中国政府知道如何开发本国的加工技术，从而获得中期竞争优势。

### **（四）一个新的视角**

《绿色新政》中提出的宏大目标可以使事情往好的方向发展，因为它激发了辩论当下所需的政治意愿。稀土金属战略性的获取不只是全球贸易的问题。尤其对欧盟而言，关键问题在于投资区域供应链的意愿。这将需要政治态度的转变，因为采矿业本质上属于一项高资本、高成本的事业，由于商品市场非常不稳定，加

上价格崩盘的不确定性，可能连亏十年。这就是欧盟决策者需要向公民解释的问题。获取资源具有如此重要的战略意义，不能再只从市场的角度看待。

## **五、范德沃特（Van der Voet）：城市开采是后院和口袋里的原材料**

能源转型所需的很多材料资源都可以“城市矿山”中找到。欧洲必须对城市矿产进行规模化加工，并立即着手规划。

### **（一）官方盘点清单**

范德沃特及其研究团队计算出了可从大规模能源网络（比如电缆或天然气管网）中回收的资源。他们正在为荷兰环境评估局准备关于荷兰城市矿山规模的官方盘点清单，可从日常所使用的汽车、电子产品和家具等消费品中回收材料。对于每一类产品，都可计算出其包含的有用和可回收材料数量，可以重复利用这些资源，而不是再另开一座钨钼铁矿。每当更换电缆或管道之后，都可以回收国家能源系统中含有的大量可重复利用钢、铜或铝，如此一来，就不必不停地开采新材料。重复利用还能节省大量能源，因为采矿需使用大型机器来开采矿石，相比之下，回收金属则省事得多。材料加工也是能源高度密集型。为了将铝土矿变成铝，必须打破铝和氧之间的强大化学键。可如果能重复利用已有

的铝，那为什么还要多此一举呢？

## **（二）时间问题**

城市采矿的一个困境是，大多数可以转化为有用资源的材料现在仍在使用中，这使得这一概念难以推广。范德沃特认为，城市采矿涉及将资金投入几十年后才能收取的资源中，然而，基础产品都有一定的使用寿命，需为此做好规划。针对这一情况，范德沃特假设了几种情景，以评估到 2050 年可用的材料数量。

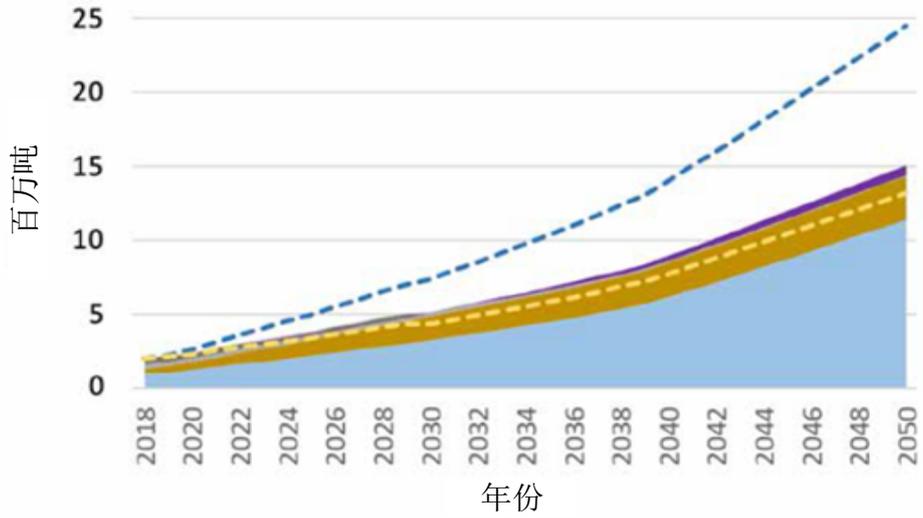
## **（三）提高可回收性**

城市矿山是一项巨大的资源，但需要更多的研究，才能使之成为现实。范德沃特认为，我们将不得不仔细考虑以何种方式、何种规模来组织对城市矿山的提取，以及如何加工材料。在每个城镇建立一座铜冶炼厂既不可行、也不可取。因此，依靠本地自给自足是非常幼稚的。作为一个社会，我们必须以工业规模来组织这些加工，而且必须立即着手进行规划。改进产品设计，使之更容易被拆卸和回收，同样是明智之举。“这是关于材料如何形成的问题，具体到化学层面。例如，为了使其更耐高温，钢材通常是由合金元素制成的。如果想研发具有相同耐热属性的钢材，同时考虑到所需金属的不同熔化温度，应当算上在回收过程中再次分离它们所需的能量，从而可提高回收钢材的质量和适用性。

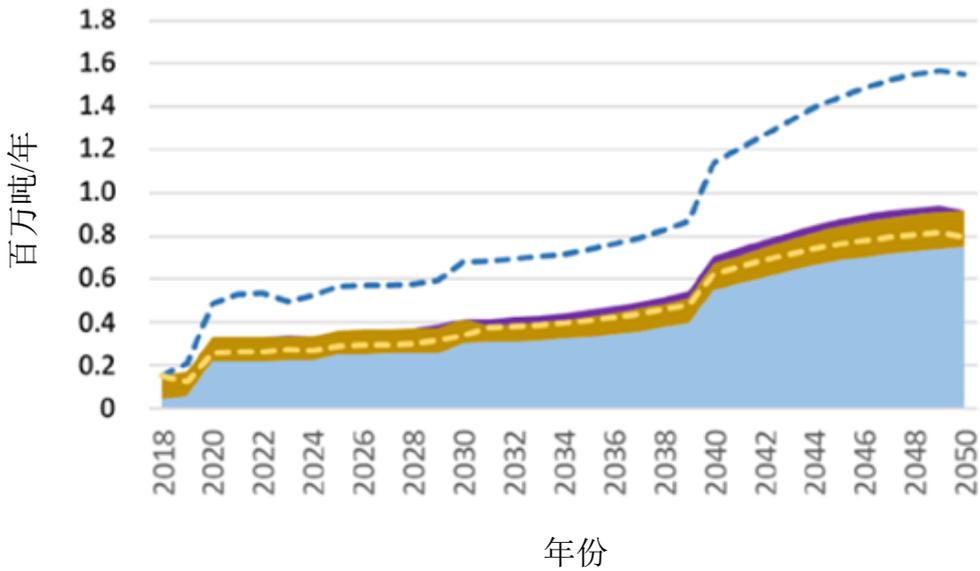
（见图 4）



### 储存钢材



### 钢材流入



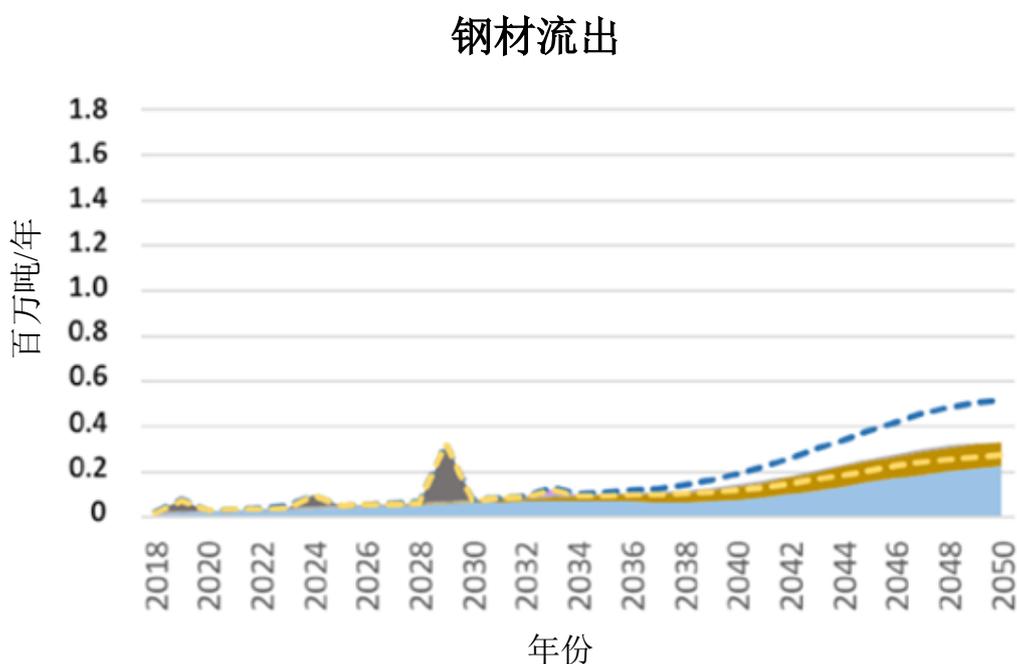


图 4: 到 2050 年荷兰电力系统中钢材储存量、需求（流入）和废弃钢材（流出）的中等情景

## 六、伊莎贝拉 (Isabella)：回收太阳能电池板是大势所趋的解决方案

绝大多数已安装的太阳能电池板至少在未来 20 年内不会回收。因此，在生产太阳能面板时，就应考虑到循环经济，尽量减少回收材料时的消耗。

### (一) 关键和非关键的材料

从能够回收光伏发电用材料来看，将太阳能电池（将太阳光转化为电能的光电设备）和模块（铺在屋顶上的东西）分开是有意义的。模块是密封在保护层压件中的太阳能电池组。铝制框架

围绕边缘夹紧，前后的玻璃板具备机械刚度，并保护太阳能电池免受各种天气条件的影响。伊莎贝拉认为，目前这一代太阳能电池主要由涂有铝基触点的硅组成，正面和背面用来收集光电流的软焊网格图案中使用了银。未来两到三年内太阳能电池主要架构的方案有两种，其中一种（称为异质结）使用的是由掺有钨或锡的氧化铟组成的透明层。伊莎贝拉认为，在所有这些材料中，银和铟是光伏产业的关键原材料。如果目前光伏产业发展增速加快，进入太瓦级生产规模，到 2050 年，光伏产业用银量将占全球银矿产能的 50%以上。而对于铟来说，光伏用铟与平板显示技术用铟会形成竞争，后者主要用于电视机、笔记本电脑、手机等。

## （二）回收光伏

太阳能电池板是由玻璃、塑料、太阳能电池、又一层塑料、防潮用密封材料或玻璃组成的夹层结构。所有这些材料层都被放入层压机中，熔化塑料，从而实现密封。因此，很难把这些塑料从中间移除。目前的回收技术是先将面板粉碎成毫米大小的碎片。再将碎片放入高温炉，烧掉塑料。但在这个温度下，金属，特别是银和铝，可能会与硅形成合金，几乎不可能再将其分离。而在异质结太阳能电池中，氧化铟的存在使不同材料的回收变得更加困难。

因此，虽然模块的铝框可以很轻易地回收，玻璃也可以回收，

但太阳能电池的关键原材料银和铟却不能。而且还需要借助多个化学和热力步骤将硅提纯至可重复利用的纯度。考虑到回收过程的复杂性和成本，以及原材料的价格波动，全球只有少数企业将太阳能电池板回收为可重复利用的原材料，这是可以理解的。回收光伏仍处于起步阶段，目前，应对潜在材料短缺的最好办法可能是在光伏中减少铟和银等的使用。为实现该目标，全球范围内都在开展大量研究。

### **（三）减少对关键材料的依赖**

降低这种依赖性的第一个研究方向是，从单面的太阳能电池转向让太阳能电池板的背面也能收集光线。这可将总产量提高30%，具体取决于安装性质。但这也意味着太阳能电池背面的全包铝层被网格图案所取代，从而大大减少材料的使用。第二个研究方向是，使用铜基触点取代铝和银。铜资源非常丰富，几乎随处可见，且这降低了发生地缘政治摩擦的概率。就现有使用铟的太阳能电池板而言，这是最有前景的产品，目前正在进行的研究是减少含铟层的厚度，将铟含量降低至目前用量的零头，甚至转向不含铟的合金。这些发展需要一段时间才能从研究阶段进入商业太阳能电池板领域。但减少含铟层厚度是可以立即用在工业层面的。在代尔夫特理工大学光伏技术中心的无尘室里，正在研究上述两种减少材料使用的方法。

另外方法还有助于通过使太阳能电池板智能化来延长其使用寿命。我们称之为光电一体化。通过添加一块小型印刷电路板，可以平衡太阳能电池板阴影和非阴影部分的功率输出。特别是对安装在城市环境中的光伏发电而言，既能提高发电量，又能延长电池板的使用寿命。

#### **（四）不含塑料的光伏**

即便使用再少的关键原材料，太阳能电池板也终将会报废。因此，无论如何，循环性都是一个值得关注的重点。目前业界正研究和评估通过完全去除太阳能电池板中的塑料来提高其可回收性，这只是一小步。未来在生产这些面板时，就应考虑到循环经济，尽量减少回收材料时的消耗。要实现这一点还需要几年时间，因为这些想法需要在实验室和户外进行可靠性测试。但这也意味着业界制造太阳能电池板的方式将发生彻底改变。



图 5：未来电力能源系统中可再生能源的使用

## 七、海斯曼（Huisman）：融资是能源转型的原材料

从经济角度来看，能源转型的真正革命在于消除了燃料和排放成本。为实现能源转型，人们需要更新商业模式，就像需要原材料和技术创新一样。

### （一）不只是盈利能力

海斯曼在自己的研究中分析了定价机制和预期投资回报。通过重组融资方式，可持续能源系统将会更快地形成竞争力。因此，如贝莱德等众多大型投资基金都在陆续转向影响力投资，它们不仅关注财务回报，也关注产生积极、可衡量的社会和环境影响。但必须确保机构投资者有一定的回报，毕竟他们要对数百万人的养老金负责。

## **（二）重新评估能源市场**

海斯曼认为，从长远来看，可持续能源的生产将比继续消耗石油、煤炭和天然气更具优势。在某种程度上，各国政府有责任加快这一转变，不仅要补贴可再生产业，还应认真重新评估能源市场的运作机制。目前，预测得出的能源消耗数字是评估能源市场盈利能力的主要依据，从而保证投资者获得可观的投资回报。可持续能源生产商没有这种条件，因为太阳或风带来的能源免费的。但他们也能这么干，例如，制定统一收费协议，然后拿着这些协议去说服银行，他们可以盈利。

## **（三）剩余能源**

海斯曼对于怎样合理分配能源投资的兴趣颇深。还应该认真审视这些投资是如何在实现能源转型所需的各项技术之间进行分配的。目前，重点是发展太阳能和风能，鼓励人们购买太阳能电池板，并按其生产的单位能量给予回报。但我们似乎忘了，还

需要投资于短期和长期存储能力，比如电池和氢。如果继续向前推进，终有一天，当需求下降，就会导致产能过剩，而且无法储存剩余的能源。

#### **（四）小额融资**

海斯曼称，这种投资的重新分配需要金融部门做出重大变革。目前，初创企业在获得贷款方面面临较大困难。以一款新电池为例，其开发所需的投资金额通常太小，大银行不会真正感兴趣。因此，希望金融部门能够为较小的能源计划提供小额融资工具，把资本调动起来，用于增加太阳能生产，以及增加电解槽，从而利用可再生能源生产绿色氢。

译自：*Critical materials, green energy and geopolitics: a complex mix, June 2022 by Leiden-Delft-Erasmus Universities*

译文作者：工业和信息化部赛迪研究院 李丹 周艳晶

联系方式：13911410362

电子邮件：[lidan@ccidthinktank.com](mailto:lidan@ccidthinktank.com)

# 赛迪智库

面向政府 服务决策

## 咨询翘楚在这里汇聚

规划研究所

工业经济研究所

电子信息研究所

集成电路研究所

产业政策研究所

科技与标准研究所

知识产权研究所

世界工业研究所

无线电管理研究所

信息化与软件产业研究所

军民融合研究所

政策法规研究所

安全产业研究所

网络安全研究所

中小企业研究所

节能与环保研究所

材料工业研究所

消费品工业研究所

编辑部：工业和信息化部赛迪研究院

通讯地址：北京市海淀区万寿路27号院8号楼12层

邮政编码：100846

联系人：王乐

联系电话：010-68200552 13701083941

传真：010-68209616

网址：[www.ccidwise.com](http://www.ccidwise.com)

电子邮件：[wangle@ccidgroup.com](mailto:wangle@ccidgroup.com)

---

**报：部领导**

**送：部机关各司局，各地方工业和信息化主管部门，  
相关部门及研究单位，相关行业协会**

---

编辑部：赛迪工业和信息化部研究院

通讯地址：北京市海淀区紫竹院路 66 号赛迪大厦 8 层国际合作处

邮政编码：100048

联系人：黎非凡

联系电话：（010）88559658 15117933026

传 真：（010）88558833

网 址：[www.ccidgroup.com](http://www.ccidgroup.com)

电子邮件：[lfeifan@ccidthinktank.com](mailto:lfeifan@ccidthinktank.com)

