

循环经济三重奏： 助力中国落实气候行动 研究报告

目录

关于本报告	3
项目团队	4
执行摘要	5
1 解析循环经济：加速气候行动的系统性方案	11
2 循环经济助力降碳：生活消费领域的实践与前景	20
3 循环经济支持能源转型：保障关键原材料供应，减少废弃物产生	34
4 循环经济增强社会经济系统应对气候变化的韧性和适应能力	48
5 行动呼吁——加速循环经济发展，助力中国气候行动	51
致谢	63
免责声明	63
尾注	64



关于本报告

本报告提出了循环经济在推动中国气候行动中的“三重奏”机制。报告首先对民用建筑、交通出行以及塑料制品与包装等重点消费领域的降碳实践和前景进行了深入分析；其次，报告阐述了循环经济在保障中国能源转型过程中关键原材料供应和退役风电和光伏设备管理中的重要作用；最后，报告指出了循环经济在提升社会经济系统应对气候变化韧性方面的巨大潜力。报告还提出了一系列具体行动方向，旨在加速低碳循环转型的推进。

本研究由艾伦·麦克阿瑟基金会与清华大学环境学院循环经济产业研究中心联合开展，基于文献研究和专家访谈，详细阐述了循环经济在助力中国气候行动中所发挥的基础性作用。研究同时指出，要全面评估循环经济应对气候变化的潜力，仍需开展更为系统的定量分析。该研究是基金会中国气候项目的成果之一，并参考了基金会以往的相关研究报告，包括《构筑繁荣：释放自然正向循环经济在欧洲的潜力》（2024年）、《通用的循环经济政策目标》（2021年）和《循环经济：应对气候变化的另一半蓝图》（2019年）等。

如需引用本报告，请使用以下格式：

艾伦·麦克阿瑟基金会, 清华大学. (2024). 循环经济三重奏：助力中国落实气候行动.



艾伦·麦克阿瑟基金会（Ellen MacArthur Foundation）是一家总部位于英国的慈善机构，由艾伦·麦克阿瑟女爵士于2010年建立。自成立以来，基金会致力于推进全球向循环经济转型，以应对气候变化、生物多样性丧失等严峻挑战。基金会与全球公私领域的决策者以及学术机构合作，以实现能力建设，探索合作机会，设计和开发循环经济倡议和解决方案。循环经济以设计为驱动力，遵循三条原则：消除废弃物和污染，循环产品和材料，促进自然再生。作为系统性解决方案，循环经济将经济机遇与社会、环境效益高度结合，旨在创造自然、社会、经济的积极效益，重新定义经济增长。

欲了解更多信息，请访问：

ellenmacarthurfoundation.org.cn



清华大学环境学院
School of Environment, Tsinghua University

清华大学环境学院循环经济产业研究中心成立于2009年，由环境学院优势团队联合组建。研究中心致力于固废资源化与循环经济、碳减排系统工程领域的科学研究，推动关键技术联合攻关、推广应用和产业化，支撑国家循环经济、无废城市等相关政策制定，开展循环经济系统性解决方案的国际合作。研究中心承担和完成了国家重点研发计划、863计划、973计划、国家自然科学基金等国家和省部级课题100余项，开展地方政府、工业园区、企业集团等科技咨询项目200多项，成果获国家科技进步二等奖、省部级科技进步一等奖等近10项荣誉，为国家、地方和企业发展循环经济和推动碳减排提供了科技支撑。

项目团队

艾伦·麦克阿瑟基金会 - 核心团队

陈磊 项目经理

Lenaïc Gravis 内容编辑经理

Ian Banks 独立编辑专家

陈晓婷博士 项目主任

艾伦·麦克阿瑟基金会 - 协作团队

关一松 中国代表处首席代表

Sarah O'Carroll 机构项目负责人

Jocelyn Blériot 董事执行官，政策与机构事务负责人

Sander Defruyt 塑料倡议战略与创新负责人

Alasdair Hedger 循环经济评估高级专家

João Murilo Silva Merico 循环经济评估高级分析师

Miranda Schnitger 气候倡议负责人

杨子薇 传播经理

贾榕楠博士 项目经理

Isobel Pinckston 编辑

James Wrightson 创意负责人

Matt Barber 平面设计师

Emily Pearce 传播经理

清华大学环境学院 - 核心团队

温宗国 清华大学环境学院院长聘教授、循环经济产业研究中心主任

唐岩岩 中国地质大学（北京）经济管理学院讲师

李会芳 清华大学环境学院工程师

陈姝媛 清华大学环境学院博士研究生

许 毛 清华大学环境学院博士研究生

汪锡媛 清华大学环境学院硕士研究生

穆延非 清华大学环境学院博士后

秦泽敏 清华大学环境学院博士后

韩乃鹏 清华大学环境学院博士后

执行摘要

以全球变暖为显著特征的气候变化对人类当代发展及未来生存造成了严重威胁，减缓与适应气候变化已成为各国共识。作为全球气候治理的重要参与者、贡献者、引领者，中国坚定不移实施积极应对气候变化国家战略，稳步推进“双碳”目标，力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。一方面，在以扩大内需为战略基点的新发展格局下，中国将从生产型向消费型社会转型，衣食住行用等消费端碳排放成为新的增长极，改变此前由制造业等生产端碳排放主导的格局，亟需统筹处理好降碳和满足人民美好生活需要的关系。另一方面，在“双碳”目标驱动下，中国大力发展风电、光伏发电，成为全球可再生能源领导者。相比传统化石能源，清洁能源技术对关键矿产的依赖度更高，受地缘政治风险和国际格局重塑影响，供应链易遭受突发性紧急事件冲击而断裂。另外，风电、光伏设备即将迎来大规模集中退役，也带来了新型固体废弃物的管理处置问题，制约能源低碳化转型先立后破的进程。再一方面，中国位于全球气候敏感区、生态环境整体脆弱，其经济社会发展和人民生产生活安全所受到的威胁日益严重，亟需采取调整措施，强化自然生态系统和经济社会系统气候韧性，助力生态文明建设、美丽中国建设和经济高质量发展。

作为一种全新的发展模式，循环经济改变了传统的“开采—生产—废弃”的线性经济模式，旨在实现经济发展与资源消耗的脱钩，以更少的资源投入创造更多的社会经济价值。本报告提出，循环经济的“三重奏”路径有助于加速实现中国气候目标：**一是助力降低难减排领域的温室气体排放；二是保障能源转型中关键原材料供应并减少废弃物产生；三是增强社会经济系统应对气候变化的韧性和适应能力。**为加速这一转型，报告聚焦五个方向提出相关行动，协同推进循环经济转型与应对气候变化挑战。

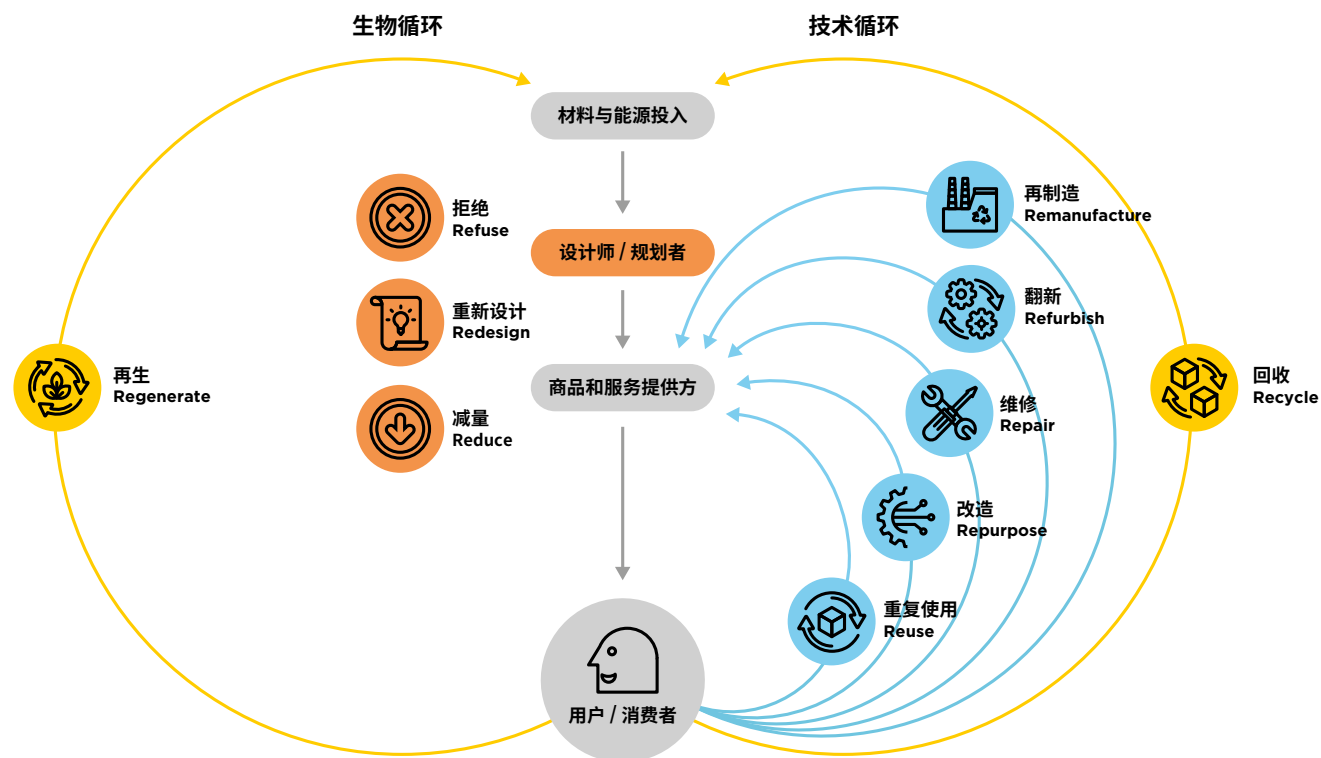
巩固先行优势： 全面推进循环经济，实现更广泛的经济 与环境效益

二十年来，中国在循环经济实践中积累了丰富经验，围绕3R框架，实施了多项卓有成效的措施，包括推动重点行业清洁生产、工业园区循环化改造、构建废旧物资循环利用体系等。随着资源环境问题日趋复杂，加之技术创新和商业模式的不断演进，3R框架已难以完全适应当前的新形势和新需求。为此，报告对循环经济的概念进行再辨析，将其由传统的3R拓展至10R，并深入阐释了10R作为循环经济实施路径的核心内涵及其在推动气候行动中的深层关联。

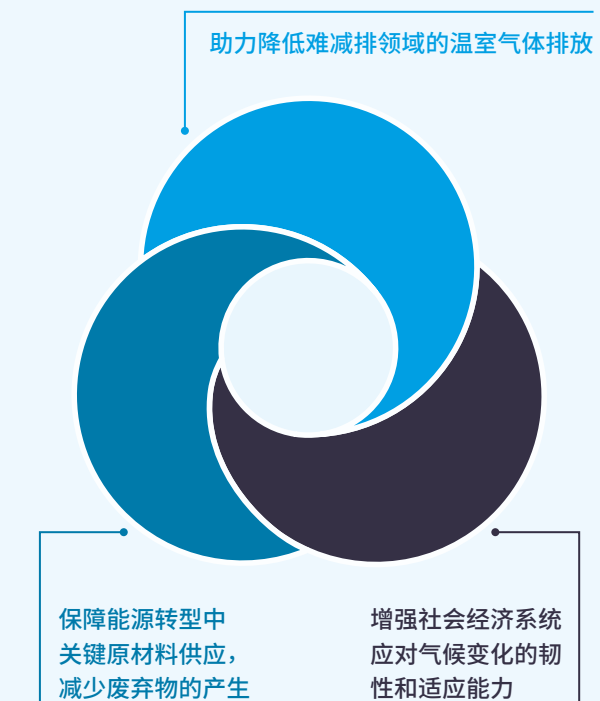
通过实施10R策略， 循环经济可为中国的气候行动带来 三重效益

中国高度重视气候变化的减缓与适应工作，并认识到关键原材料供应在可再生能源转型中的重要作用。发展循环经济，推进资源节约集约和循环利用，对保障国家资源安全，推动实现“双碳”目标，促进生态文明建设具有重大意义。

循环经济的10R路径



循环经济应对气候变化的“三重奏”机制



1. 降低难减排领域的温室气体排放

研究显示，循环经济在生活消费领域具有显著的碳减排潜力。报告选取民用建筑、交通出行、塑料制品和包装作为代表领域。当前上述三个领域的碳排放总量达到48亿吨。在生产、消费、废弃等生命周期各阶段实施一揽子循环经济措施，年均减排潜力可达18亿吨，约占这三大领域总排放的三分之一。

循环经济助力中国难减排领域降碳的机遇

民用建筑

随着中国经济的快速发展和城市化进程的推进，中国城乡建筑面积大幅增加建筑业快速发展，随之也带来了显著的碳排放增长。2020年中国民用建筑全过程排放量约为37亿吨CO₂e。随着建筑运营阶段脱碳进程的加速推进，建造和废弃阶段的隐含碳排放成为实现建筑领域深度脱碳的下一个主战场。当前，一些循环经济实践已逐步应用，实现了良好的减排效益，比如：

- 充分利用现有建筑存量，避免大拆大建，减少不必要的碳排放；
- 推广遵循自然法则的规划设计方案，例如：通过被动式设计最大化利用自然采光和通风，打造低能耗、高效能的人居环境；
- 发展模块化、装配式建筑，并逐步推广低碳建筑材料的应用，减少建造过程中的资源消耗与碳排放。

交通出行

相较于发达国家的汽车保有量水平，中国乘用车市场未来仍有巨大的增长潜力，这也将导致车辆全生命周期碳排放的进一步上升。据估计，2020年中国乘用车全生命周期排放（包括燃料周期和材料周期）约为7亿吨CO₂e。推广纯电动汽车被视为乘用车领域实现深度脱碳的有效解决方案，这有助于显著降低车辆燃料周期的碳排放。然而，材料周期的碳排放仍然居高不下。循环经济为提高出行系统效率和优化材料全生命周期管理提供了明确的减排路径。例如：

- 提供数字化、多模式的按需出行服务，构建零排放、智能化的交通运营管理体系；
- 引导共享出行，提高座位利用率，减少道路车辆数量，缓解交通拥堵；
- 推广汽车零部件再制造，降低车辆隐含碳排放，尤其通过对发动机、转向系统等关键部件的再制造，能够显著减少碳排放。

塑料制品与包装

电商、快递和外卖等新业态新模式推动中国塑料行业消费持续增长。塑料生命周期几乎每个阶段都会产生温室气体排放，尤以制造阶段的排放为最。2020年中国塑料全生命周期排放量约4.36亿吨CO₂e。塑料行业污染问题已得到广泛重视，长期以来依赖的“开采-制造-废弃”的线性模式开始转向循环经济模式发展，相关措施包括：

- 禁止生产和使用不必要的一次性塑料制品，推动源头减量；
- 提高塑料设计的可重复使用性和可回收性，增加再生塑料的使用，减少对高碳原生塑料的需求；
- 推广重复使用模式在消费场景中的广泛应用，如再填充包装、可重复使用的外卖餐盒等，减少一次性塑料使用。

2. 保障能源转型中关键原材料供应并减少废弃物产生

中国风电和光伏行业的快速发展面临关键原材料供应风险和废弃物管理双重挑战。过去十三年间，中国可再生能源装机容量增长超过1000吉瓦，预计到2050年将在现有基础上再增加3000吉瓦。然而，锌、铜和银等关键原材料的对外依存度高，地缘政治风险、国际格局重塑等进一步增加了供应风险。

中国即将迎来风电和光伏设备大规模退役潮，预计到2050年将累计产生高达2300万吨废弃风机叶片和8800万吨废弃太阳能光伏板。目前，废弃物管理措施集中在末端环节，多采用焚烧或填埋方式处理。随着未来可再生能源装机保持高速增长，融入“前向”循环经济策略变得愈发重要。

3. 增强社会经济系统应对气候变化的韧性和适应能力

循环经济可以显著增强供应链的韧性。与传统依赖矿山等集中点资源的资源获取方式不同，循环经济通过逆向物流等手段回收产品，将广泛分布的用户端材料纳入供应体系，材料来源更加分散灵活，从而降低因气候变化和极端天气对供应链稳定性的冲击。以中国可再生能源行业为例，退役风机和太阳能光伏板中的材料经过回收利用，可减少对银、铜等关键矿产资源进口的依赖。

此外，循环经济的一个核心原则是促进自然再生，而健康的生态系统则是经济发展的基石，并在面对极端灾害时表现出更强的恢复力。循环经济作为提升社会经济系统抵御气候风险能力的关键解决方案，在城乡地区已经有广泛的实践经验。例如，在城市规划中引入绿化带、生物墙、可持续排水系统等，在农业中优先采用免耕和综合虫害管理等以增加土壤肥力和保墒抗旱能力。

政策制定者可将循环经济融入各部门的气候议程，全面支持减污降碳、能源转型与气候适应

在生产和消费模式转型方面，中国具备引领全球的潜力。基于艾伦·麦克阿瑟基金会的循环经济通用政策框架，报告提出了一个初步的行动框架，以期助力新时期中国循环经济再上新台阶，并为其他国家提供以资借鉴的中国经验，推动全球在减污降碳、能源转型和气候适应方面取得更大进展，实现循环经济与气候议程的深度融合。

中国风电和光伏价值链的循环经济机遇

- 在风光发电场站项目开发中融入循环经济理念，从项目选址、设备选型到施工建设各环节优化资源利用；
- 推广模块化设计和低碳材料，减少生产阶段的排放，并通过局部更换组件降低材料消耗；
- 通过定期维护、翻新和再制造，延长设备和部件的使用寿命，最大限度保留价值；
- 打通退役风光设备的回收链路，完善从拆解、分离、回收资源再利用的各环节，推动关键原材料的循环利用。

政策建议：五大方向、十五项行动

多层次推动循环设计改造

- **制定循环产品政策和设计标准：**通过立法推动循环理念在产品设计和生产中的应用，鼓励高效、低碳、再生材料的使用。
- **推动循环型城市规划：**将循环经济原则融入新建项目和城市更新规划中，协同推进“无废城市”、“低碳城市”、“15分钟社区生活圈”等试点示范。
- **重新设计可再生能源供应链：**参与或发起“负责任采矿”倡议，实施多元化采购保障关键原材料供应，建立科学的土地规划体系，优化风电和光伏项目选址，探索“风光+”模式，提升供应链透明度和治理水平。

建立高效高值的资源利用体系

- **推动消费模式和生活方式的转变：**倡导“勤俭节约、简约消费”等传统价值回归；推动产品循环性信息披露，赋予消费者“绿色知情权”；推动循环消费模式的普及。
- **制定实施强制性的生产者责任延伸（EPR）制度：**结合中国国情和市场环境，循序渐进推广EPR，分步骤、分品类、分阶段推动EPR落地。
- **协调废弃物管理立法：**适时修订《循环经济促进法》，明确废弃物管理的优先层级，并针对包装、电子电器、废旧汽车等设立专门法规，实现各法律之间的协调和衔接。

完善低碳循环发展的激励机制

- **构建支持低碳循环发展的税收体系：**将征税重点从可再生资源转向不可再生资源消费，探索垃圾填埋税，减免循环经济活动增值税等措施，将循环经济的碳减排效果纳入统一碳市场交易。
- **发挥公共采购的杠杆效应：**建立系统化的循环采购机制，定期更新采购指南，优先采购符合循环标准的产品。
- **支持中小微企业和非正规部门向循环经济转型：**推动产业集群发展，支持中小微企业构建生态工业网络，实现废料和副产品的企业间循环；提供多元融资渠道解决其资金瓶颈。



加强对科技创新、基础设施和技能提升的投资

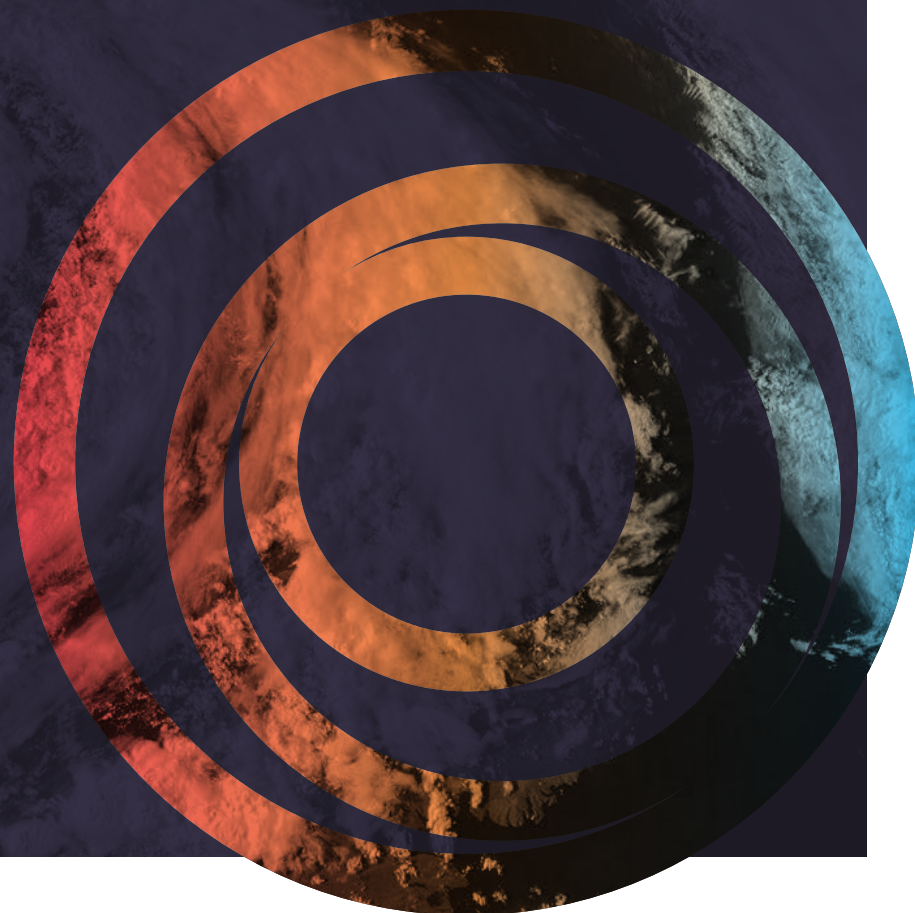
- **加大对循环经济关键技术研发投入：**利用数字工具优化资源管理，促进低碳转型与材料科学的颠覆性技术创新；建立基于全生命周期分析的评估机制，提升固废精细化利用水平。
- **投资建设循环经济基础设施：**通过公私合作的融资模式，优先在核心城市群布局数字共享平台、维修翻新中心和逆向物流等设施，提升规模经济效益。
- **建立循环经济碳减排核算评价体系：**明确核算边界、设定SMART指标，加强跨区域、行业、企业的数据披露体系和物质流数据库建设，推动国内外循环经济碳核算标准的互认和衔接。



合作推动系统性变革

- **以工业园区生态化改造带动价值链联动升级：**依托国家生态工业示范园区、园区循环化改造、国家低碳工业园区等试点示范项目，加强园区物质流精细化、数字化管理，推动工业园减污降碳的制度创新和模式推广。
- **协同推进循环经济减缓和适应气候变化工作：**加强科学研究，明确循环经济在减缓和适应气候变化中的双重作用，识别协同效应和潜在冲突，推动试点项目并建立监测框架，验证并跟踪循环经济对气候变化的减缓与适应效益。
- **深化循环经济和气候治理的全球合作：**通过中欧、中美等双边合作框架分享中国经验，并在“一带一路”、G20和UNFCCC等多边平台推动全球循环经济和气候行动，在新一轮国家自主贡献（NDCs）目标更新中纳入全面的循环经济框架和措施，助力全球气候目标的实现。

1 解析循环经济： 加速气候行动的系统性方案



1 解析循环经济: 加速气候行动的系统性方案

气候变化是当今人类面临的重大挑战,在迈向碳中和的进程中,循环经济作为应对气候变化的重要策略受到了广泛关注。

本章对循环经济的概念、内涵、范围与实施路径进行重新审视和思考,提出循环经济作用气候变化的“三重奏”机制,以期形成统一的理解和认识,引导更加明确与协同的气候行动。

1.1 循环经济的早期实践与发展壮大

循环经济的实践由来已久且形式多样。在中国,这一概念最早可追溯到先秦时期,其中最具代表性的例子包括“野禁”和“四时之禁”,即通过在特定时间内禁止伐木和狩猎,保护动植物的繁衍生息。中国南方至今仍沿用的“桑基鱼塘”模式,是世界上最早的循环农业生产体系之一。进入近现代,特别是20世纪80年代,随着发达国家陆续进入后工业化阶段,循环经济依托国家立法取得突破性发展。德国和日本在这一领域表现尤为突出,两国将循环经济纳入其可持续发展总体战略,以应对日益严峻的废弃物管理挑战。

循环经济概念引入中国已二十余载,其发展演进中呈现出两个显著特征。一是以减量化(Reduce)、再利用(Reuse)和资源化(Recycle)的3R原则为核心构建了循环经济的概念框架,为政策制定和企业实践奠定了理论基础;二是形成了由点及面的推广与实践模式,涵盖三个层次:即以清洁生产为核心的企业层面、以产业共生和生态园区建设为重点的区域层面、以推动绿色消费和废旧物品循环利用网络建设为目标的社会层面。

在此基础上,中国的循环经济实践在微观(企业)和中观层面(生态工业园)已取得显著成效。通过立法、规划、政策、试点示范等多措并举,涌现出一大批成功的循环经济实践典范。近年来,中国以推动绿色低碳循环发展为导向,大力推广绿色消费模式,例如在电商和快递行业推行绿色循环包装,实施《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》等。政策的有力推动正在加速循环经济理念和实践在中国的普及与深入发展。

1.2 循环经济概念再辨析：从3R到10R

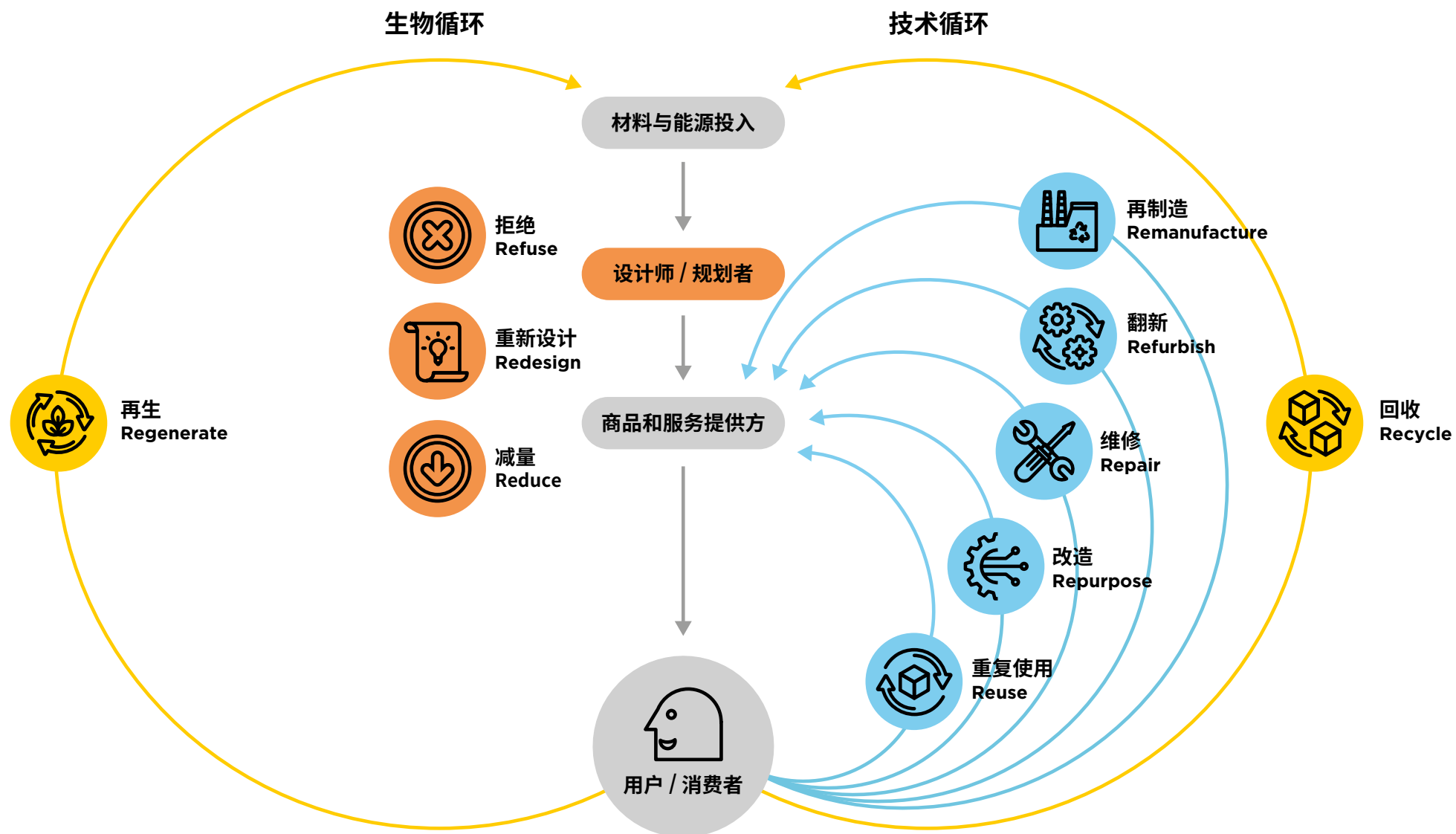
3R原则为中国循环经济的发展奠定了基础，但随着实践深入，其局限性日益显现。3R原则侧重于减缓负面影响（“减少危害”），而非实现正向效益（“创造价值”）¹。其核心问题在于过度依赖废弃物管理的末端处置，忽视了上游的循环经济实践，如产品设计改进、流程优化、商业和消费模式的转变等。这种失衡导致了“降级回收”现象的广泛存在，即材料在回收过程出现质量和价值的降低，无法实现资源的高效再利用和价值最大化。由于缺乏产品设计上的闭环考虑，许多材料在回收过程中丧失了其初始价值。例如，电子废弃物中的稀有金属和高性能塑料等，回收后多作为低价值的填充材料或用于低端制造，从而削弱了循环经济的社、经济和环境效益。

得益于技术水平的提升和新兴商业模式的涌现，循环经济的广度和深度不断延伸，3R可扩展为10R^{2, 3}。本章阐述的10R策略（见图1-1）覆盖产品生命周期的各个阶段：在设计阶段，包括拒绝（Refuse）、重新设计（Redesign）、减量（Reduce）；在使用阶段，涵盖重复使用（Reuse）、改造（Repurpose）、维修（Repair）、翻新（Refurbish）和再制造（Remanufacture）；在废弃阶段，涉及回收（Recycle）和再生（Regenerate）。

在应用10R策略时，需重视各项路径的优先顺序。循环经济不是“垃圾经济”或“回收经济”，它强调前端设计的重要性，涉及产品、商业模式和系统三个层面的设计，分别从微观、中观和宏观角度系统考虑各项措施对环境的影响。换言之，不仅要重视循环的“数量”，更要重视循环的“质量”和“效率”，从源头系统性地避免或减少资源的消耗和废弃物的产生，从而实现真正意义上的可持续经济。

在新时期资源供应链不确定性增加、生态压力加剧的背景下，本报告基于上述基本原则和优先层级，重新阐释了循环经济10R体系的内涵和作用路径。这一体系强调通过技术循环实现物质在经济社会系统内的高效利用，同时通过生物循环促进物质在生态系统内的循环，以适应资源环境和社会经济发展的新形势新要求，助力经济高质量发展与生态高水平保护。

图1-1: 循环经济的10R路径



数智化赋能产品设计与制造

设计位于产品价值链的最上游和系统的最前端，对价值链中下游的参与方和系统的行为模式具有决定性影响。因此，生产阶段的循环路径应从设计入手，重新思考产品、价值链和商业模式。主要的循环路径包括拒绝、重新设计与减量。



拒绝 (Refuse): 在商品生产和服务提供过程中，尽量避免使用有害或难以回收的材料，并减少对短寿商品的依赖。例如，数字化仿真和虚拟产品开发技术可降低实体样品的需求，减少对一次性样品的依赖。



重新设计 (Redesign): 产品和服务的重新设计是实现循环经济各项策略的基础。比如，设计耐用、易拆解、可回收的智能手机时，可利用数字孪生技术，对手机的关键组件进行虚拟测试，从而优化材料选择和装配方式，使产品更易维修、翻新和回收。



减量 (Reduce): 在产品生产过程中，最大限度地减少资源消耗。这包括通过数字工具、精益制造来优化生产流程，通过生物基材料替代减少对不可再生材料的使用等。比如，模块化和预制的建筑构件能够有效减少材料和能源消耗以及建筑建造过程中的废弃物。

延长产品及其部件的使用寿命

使用阶段的循环路径主要通过尽可能多次或多种方式的循环使用，从而延长产品及其零部件的使用寿命，避免其过早地进入末端处置环节。使用阶段的循环路径包括重复使用、改造、维修、翻新和再制造。这些路径需根据不同产品的属性和供应链特征来选择合适的应用场景。



重复使用 (Reuse): 在保持产品原有功能和形态的前提下，由原用户或新用户进行再次使用，如通过数字租赁平台共享自行车和充电宝，转售衣物或饮料瓶的重复灌装。



改造 (Repurpose): 将产品或零部件整合到具有不同用途的其他产品中，以实现特殊收益或替代的作用。例如，无法满足性能要求的废旧电动汽车电池，可用于家庭或其他行业的储能，继续为其他场景服务。



维修 (Repair): 通过更换故障部件，使产品恢复正常功能，如更换智能手机的碎屏，而非丢弃整部手机。



翻新 (Refurbish): 通过替换部分零件来提升产品功能，但不涉及拆解整个产品的过程，可被视为“轻型”再制造。例如，为现有智能手机配备更大容量的电池组和新的屏幕。



再制造 (Remanufacture): 对废旧产品的零部件进行全面修复、加工和重新组装，恢复其原有性能。例如，通过更换和修复零部件，使汽车发动机整体性能与全新发动机无异。

充分和最大化利用废弃材料

若上述循环策略仍未能实现零废弃的目标，在废弃阶段则主要依赖回收和再生两种方式来处理生产和消费过程产生的废弃物。回收和再生处于10R框架的最后环节，属于底端策略，即最后的解决方案。



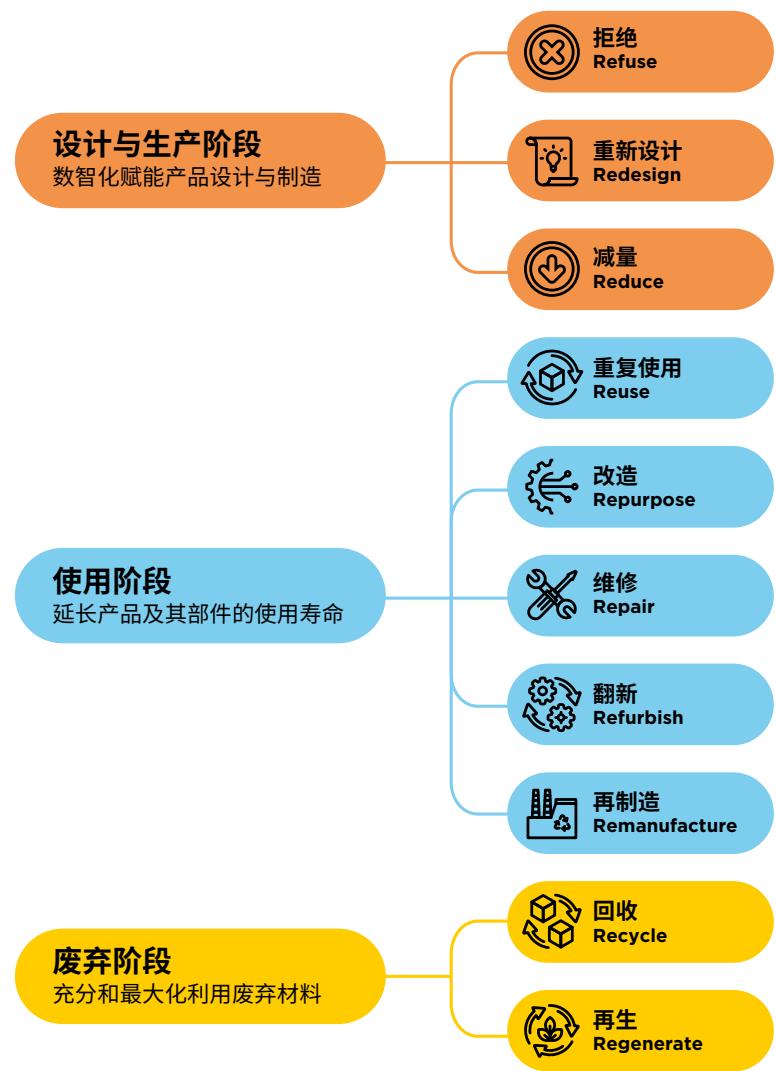
回收 (Recycle): 将废弃材料或产品进行回收加工，以获得相同或更高（升级循环，upcycling）或更低等级（降级循环，downcycling）的再生产品和资源。例如，将饮料瓶中的PET塑料回收并加工为再生PET（rPET），用于制造新的饮料瓶，实现“瓶到瓶”的循环（闭环回收）或作为原料用于其他行业（开环回收）¹。



再生 (Regenerate): 将有机废弃物转化为可用资源。例如，利用厌氧发酵技术将秸秆、食物残渣和污泥转化为有机肥，并生产沼气。（注：焚烧材料回收能量不属于本报告中再生的范畴）

¹ 闭环回收是将材料再生为相同用途的新产品，例如将使用过的塑料瓶回收再造为新的塑料瓶。开环回收则将材料转化为适用于其他产品的原材料，可能应用于其他行业，例如将废旧的铝制发动机部件回收制成铝箔或铝罐。

图1-2: 循环经济10R路径在产品生命周期各阶段的应用



专栏一：再生设计之于循环经济

循环经济的一个重要理念是以再生为导向，建立生态友好的自然修复体系。通过合理规划物质流、食物系统和土地利用方式，促进生态系统的自我修复。这带来诸多益处，包括改善土壤健康、提升生物多样性，以及提高空气质量和水质。

在农食系统，再生设计得到了较为广泛的应用。有机农业、农林复合经营和保护性耕作等生产实践，有助于实现生物质资源的循环利用，促进生态系统的恢复。不仅如此，生物基材料在其他领域的应用中也日益普及，例如建筑用木材和生物基塑料。

虽然再生设计在农食系统中成效最为显著，但这一原则在不同程度上适用于各个领域。比如，家庭和纺织企业将有机废弃物堆肥处理后回归土壤。又如，通过将自然元素融入建筑设计和城市规划，能够调节局地气候，增强防洪能力，修复本地景观。这些措施不仅改善生态环境，也对社区产生积极影响，有助于提升人们的健康水平与生活质量。

1.3 循环经济应对气候变化的“三重奏”机制

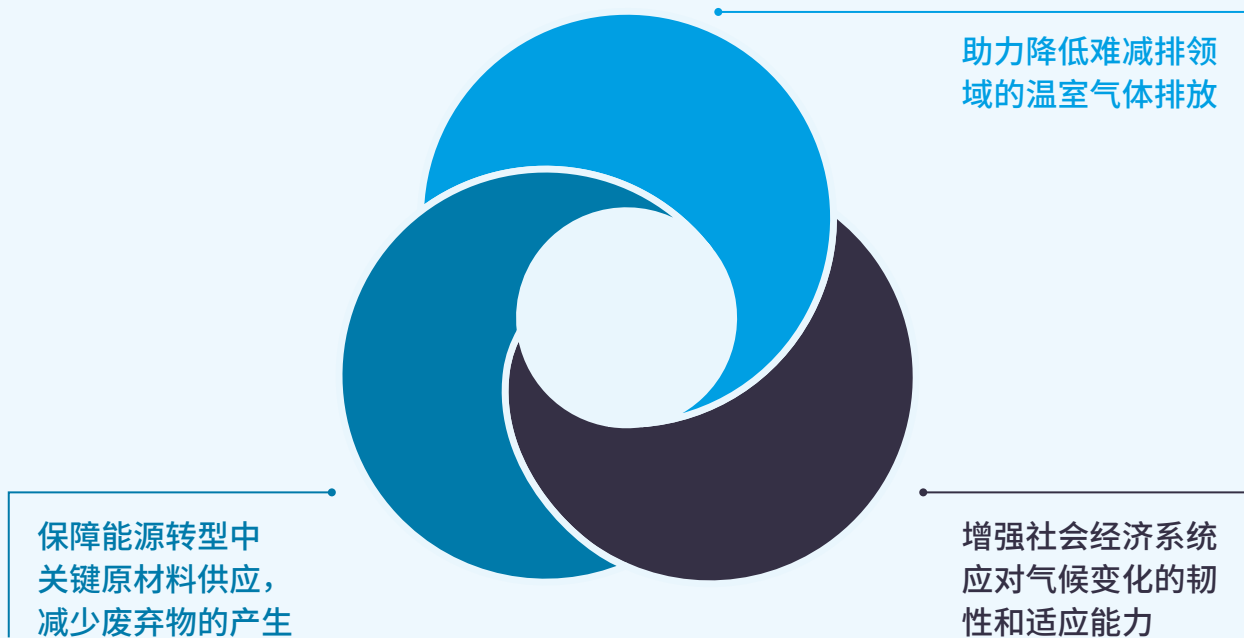
循环经济为应对气候变化提供了一个全面的解决方案，不仅着眼于减缓气候变化，还能帮助更好地应对其带来的负面影响。通过消除废弃物和污染、循环使用产品和材料、促进自然再生，循环经济为实现气候目标提供了“三重奏”式的解决路径：

助力降低难减排领域的温室气体排放。在建筑、交通等高碳材料（如钢铁、水泥和塑料）密集型的行业领域，通过材料高效循环使用，降低开采、加工、使用和废弃全过程的温室气体排放。

保障能源转型中关键原材料供应，减少废弃物的产生。随着中国从化石燃料密集型能源系统向材料密集型的可再生能源系统过渡，循环经济在确保关键原材料供应和减少废弃物方面发挥着重要作用，支持中国加速实现能源转型的目标。

增强社会经济系统应对气候变化的韧性和适应能力。通过构建多元、韧性的产业链供应链，推广再生生产实践，循环经济可助力各行业适应由气候变化引发的资源供应风险以及极端天气事件所带来的影响。

图1-3: 循环经济应对气候变化的“三重奏”机制



1. 降低难减排领域的温室气体排放

正如能效提升和能源结构低碳化是实现能源转型的核心,循环经济和产业结构升级对于实现商品和服务供需体系的低碳转型同样不可或缺。循环经济本质是推动经济发展与物质消耗的脱钩。通过减少对原材料和新产品的需求,循环经济实践能够显著降低物质消耗总量,进而有效减少温室气体排放。例如,改进产品设计不仅可减少制造环节原材料的投入,还可以降低运营过程中能源使用带来的碳排放;延长产品使用寿命则能够降低消费者对新产品的需求,减少废弃物的产生,从而减少制造和处置过程中的温室气体排放;此外,废弃物的再生利用可降低对高碳原材料的需求,避免填埋和焚烧以及废弃物处置中的温室气体排放。

艾伦·麦克阿瑟基金会的研究表明,循环经济可减少全球水泥、钢铁、塑料和铝等材料生产过程中40%的温室气体排放,其中减少产废量、延长产品使用寿命和促进材料回收分别具有10%、12%和18%的减排潜力⁴。2021年,中国循环经济协会对中国碳减排贡献的评估显示,“十三五”期间,循环经济对中国碳减排的贡献率或达到25%,预计到2025年和2030年将分别达到30%和35%⁵。

2. 保障能源转型中关键原材料供应并减少废弃物产生

全球45%的温室气体排放来自商品生产与消费,55%来自能源消耗ⁱⁱ。能源转型对于实现《巴黎协定》的目标和中国2060年碳中和的承诺至关重要。尽管可再生能源在使用过程中几乎不产生碳排放,其生产和废弃过程的材料足迹却不容忽视。预计到2040年,相关矿产需求将增加四倍,随之而来的是矿石开采、加工和设备制造、废弃的碳足迹和材料足迹不断上升。

在中国,以风电、光伏为代表的可再生能源预计将继续保持强劲增长,巩固其在该领域的全球领先地位。作为全球最大的风电和光伏设备生产制造国,中国将在《阿联酋共识》提出的“全球可再生能源装机容量增加三倍”的目标下,进一步推动可再生能源企业“走出去”,打造开放、协作的清洁能源产业链,支持全球尤其是“一带一路”沿线国家的能源转型。

然而,这一增长也面临挑战。中国《全国矿产资源规划(2016-2020年)》厘定了包括铜、锂和稀土等24种关键矿产⁶,其中超过一半严重依赖进口。例如,广泛用于风光设备制造的铜矿石超

过70%来自海外。虽然中国通过海外投资获得了一些关键矿产资源的开采权,但地缘政治局势日趋紧张、市场波动加剧、不断上升的资源民族主义,以及日益严格的环境、社会和公司治理(ESG)监管要求,都给关键原材料的供应链安全带来隐患。此外,风光设备即将迎来第一批大规模退役潮,如果处置不当,将引发资源浪费、土壤退化、水污染等新的环境和社会问题。

循环经济的推广成为应对这些挑战的重要手段。通过提升资源的高效利用和再生能力,循环经济不仅有助于降低对进口矿产资源的依赖,还能够有效缓解风光设备退役带来的环境压力,推动可再生能源的低碳、零废转型。

ii 国际资源专家组(IRP)和联合国环境规划署(UNEP)也进行了类似的分析。尽管两者在范围和方法上有所不同,但结果相似。在2019年发布的《全球资源展望》报告中,这两个机构发现,资源的开采和加工过程产生的温室气体排放约占全球总排放量的一半,而在2024年版的报告中,这一比例已上升至55%。

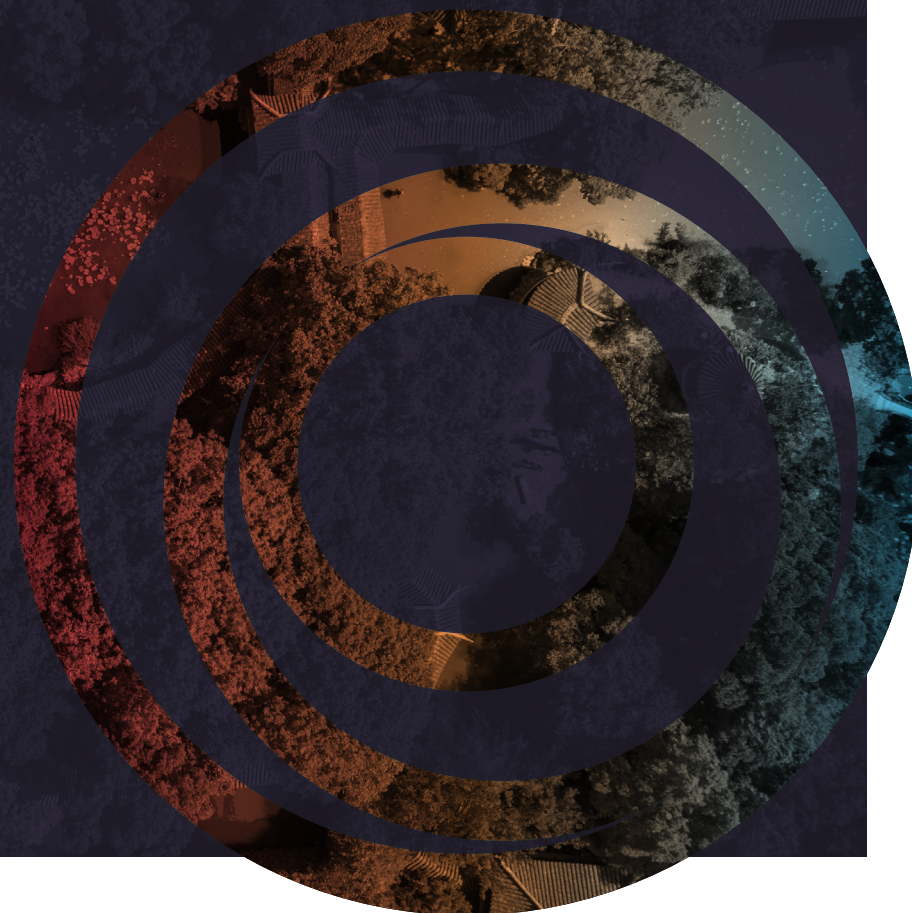
3. 增强社会经济系统应对气候变化的韧性和适应能力

研究表明,循环经济通过构建分散、互联的供应链体系,可显著提升供应链韧性,以应对气候变化带来的不确定性^{7,8}。推动经济活动与不可再生资源的开采和消耗脱钩,能够提升物资供应的稳定性,降低原材料价格波动对企业运营的影响。例如,推广维修、重复使用和共享的商业模式,有助于在极端天气引发的供应中断情况下,保障必需商品和服务的持续供应。

此外,循环经济活动通过修复自然生态,增强社会经济系统应对气候变化带来的冲击。在城市规划中融入自然元素,如增加树冠覆盖率、恢复本地植被和水域生态,不仅可以增加遮阴和减少热岛效应来减缓气温上升,还能舒缓水流、提高土壤渗透性来减轻洪涝灾害。在食物系统,再生农业实践能够改善土壤健康,提升土壤吸水 and 保水能力,从而增强农业生产在暴雨和干旱等极端气候条件下的适应能力。



2 循环经济助力降碳： 生活消费领域的实践与前景



2 循环经济助力降碳： 生活消费领域的实践与前景

以扩大内需为战略基点的经济转型将推动中国消费端碳排放持续上升，循环经济在降低消费端碳排放方面潜力巨大。

考虑到中长期消费需求的增长，本章围绕“住”、“行”、“用”三个重点生活领域，选取建筑、交通出行与塑料作为代表，基于文献系统梳理各领域的碳排放现状和趋势。通过综合对比重点循环经济措施的碳减排效果，结合行业特点，深入分析中国的循环经济行动方案，为消费型社会导向下的中国循环经济“再升级”提供指引。

以扩大内需为战略基点的经济转型将推动中国消费端碳排放ⁱⁱⁱ持续上升。作为全球最大的经济体之一和最大的商品出口国，中国过去四十年的经济发展高度依赖制造业。然而，制造业也是中国环境问题的主要成因。在“双碳”目标的推动下，制造业的未来发展路径正逐步被重新定义。当前，中国正在从生产型社会向消费型社会转型，展现出强大的消费韧性与活力，已成为全球第二大商品消费市场和最大网络零售市场。随着“扩内需，促消费”战略的推进，衣食住行用等消费行为引发的消费端碳排放将持续上升，可能逆转此前由生产端碳排放主导的格局，带来新的减排挑战。

循环经济在降低消费端碳排放^{iv}方面潜力巨大。循环经济作为一种全新的发展模式，在满足人们对美好生活需求的同时，还能从单位原材料中获取更高的经济价值。具体而言，循环经济在降低消费端碳排放方面的路径包括以下两个方面：在供给侧，通过提升生产效率和调整生产方式等措施，减少制造和运营过程中的碳排放；在需求侧，通过延长产品的使用寿命、促进产品的重复使用与回收，尽可能将产品和材料保留在经济循环中，减少对新生产的需求。供需两侧的协同发力对于实现深度减排至关重要。

iii 碳排放核算体系可分为生产端碳排放和消费端碳排放。生产端碳排放核算体系以生产活动属地为边界，忽视了商品因贸易流动造成的碳转移，以IPCC国家温室气体清单指南为代表。基于消费端的碳核算着眼于消费行为所引发的碳排放，包括隐含碳排放和运营碳排放。基于消费端的核算能更清晰地刻画经济活动中的碳足迹，评估不同消费主体所引发的碳排放动态，从而更有利于明晰生产者与消费者碳排放责任归属，因地制宜选择减排路径。

iv 消费端碳排放包括隐含排放和运行排放。运行排放是指日常能源使用中产生的排放，而隐含排放则包括消费品制造和服务提供过程中隐含的碳排放。

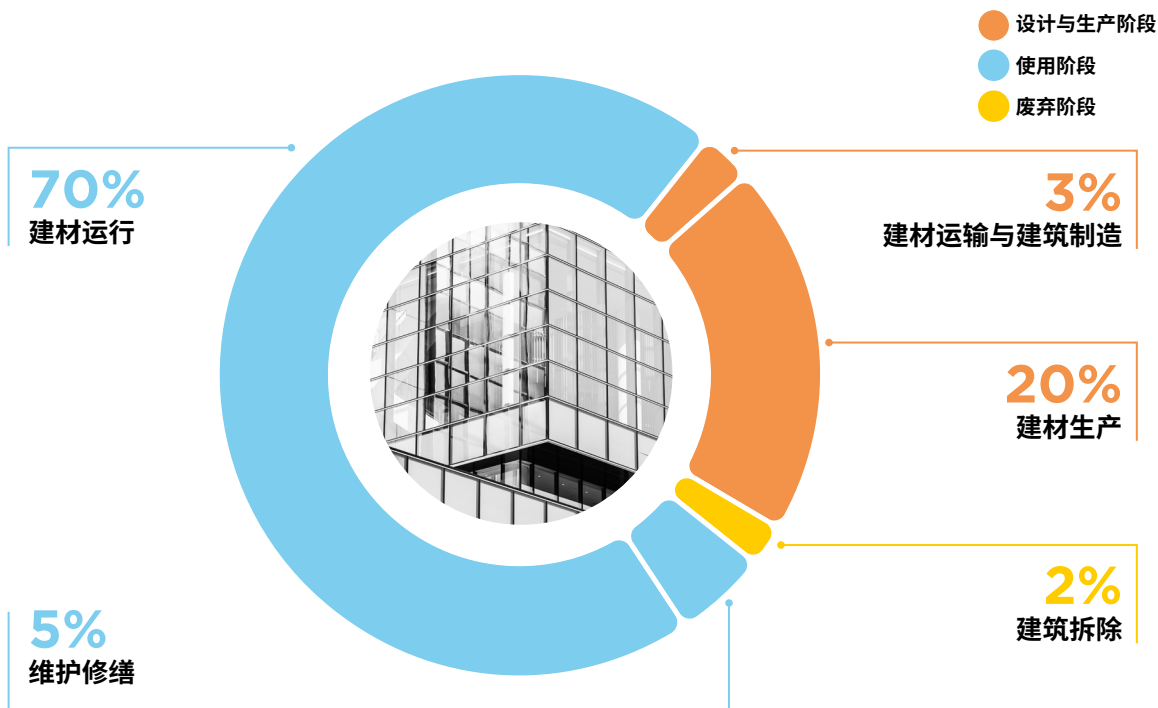
2.1 三个生活消费领域的碳足迹持续攀升

民用建筑

中国城市化进程带动了建筑业的蓬勃发展，推动建筑相关的碳排放大幅增长。建筑不仅满足居民对居住、工作和娱乐等多元空间需求，更反映了人们对生活品质的追求。近几十年来，随着中国经济的快速发展和城市化进程的推进，中国建筑建造速度迅速增长，城乡建筑面积大幅增加。这改善了人们的生活和工作条件，推动了城乡面貌的现代化和功能性升级。然而，建筑的快速扩张也带来了资源消耗和温室气体排放方面的挑战。清华大学建筑节能中心研究表明⁹，根据清单法测算结果¹⁰，2020年中国民用建筑全过程排放量约为37亿吨二氧化碳当量（CO₂e），约占中国总排放量的30%。这一数据包含运营碳（供暖和制冷等运营阶段产生的碳排放）和建造废弃相关的隐含碳（建筑整个生命周期中材料和施工阶段产生的碳排放）。其中，建造（包括材料开采）和运营是主要排放来源，排放规模量分别为15亿吨和22亿吨CO₂e。

隐含碳是中国建筑领域深度脱碳的下一个主战场。目前，运营碳在总排放中仍占较大比重，但这一状况正逐步改变。随着建筑能效水平的提升和能源供给侧的低碳化替代，运营碳占比预计将逐步下降。隐含碳的影响日益凸显，成为建筑领域实现深度脱碳的主要挑战。

图2-1：中国建筑生命周期各阶段碳排放占比



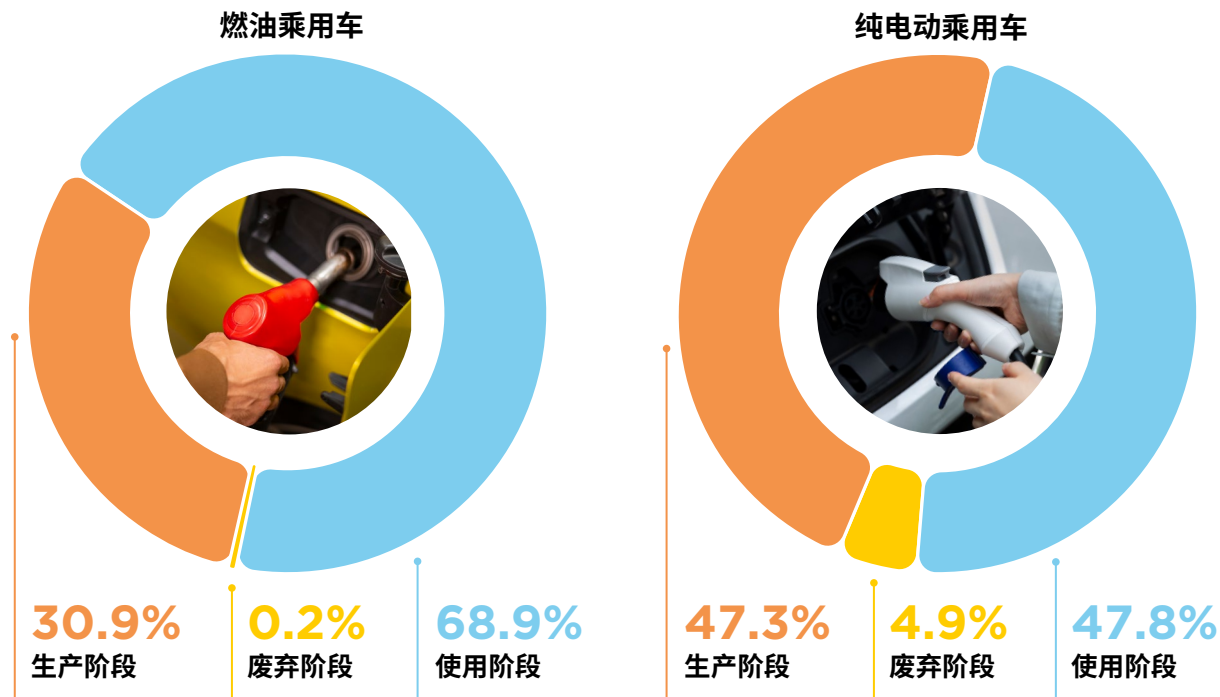
¹⁰ 核算建筑碳排放一般有两种方法：全生命周期法和排放清单法。前者关注单个建筑从原材料挖掘到拆除的全过程碳排放，计算的是单个建筑在整个生命周期内的累计碳排放量。排放清单法则关注全社会当年的碳排放，统计建筑材料生产、运输、建造、拆除及运行过程中产生的碳排放，核算结果是全社会当年建筑相关的碳排放。

交通出行

交通运输是中国第三大碳排放行业，其中乘用车是主要来源。2020年，乘用车作为满足客运需求的主要载体，包括材料周期和燃料周期在内的全过程碳排放量约为7亿吨¹⁰。推广纯电动汽车被认为是乘用车领域深度脱碳的有效解决方案。具体来看，燃油乘用车生产阶段和使用阶段的碳排放分别占生命周期碳排放的31%和69%；纯电动乘用车的上述两阶段占比分别为47%和48%（见图2-2）。2019年，一辆纯电动乘用车从“摇篮到坟墓”的排放量仍与一辆燃油乘用车相当，主要是由于电动车生产阶段对金属的需求更高以及使用阶段仍依赖以燃煤为主的电力供应，尤其是在中国北方地区表现尤为明显¹¹。

中国的乘用车市场仍有巨大的增长潜力，车辆全过程碳排放预计进一步上升。随着居民对交通出行的个性化、时效性和舒适度需求日益增加，乘用车的普及率预计将大幅增长，直接带动碳排放增加¹²。目前，中国的千人汽车保有量约226辆，仅为日本的一半和美国的四分之一¹³。《ITF交通运输展望2019》估计，未来全球客流量增长的六分之一将来自中国¹⁴。这不仅反映了交通需求的稳步上升，也预示着该行业碳减排的压力进一步加剧，亟需采用系统化的减排策略应对这一挑战。

图2-2：2019年燃油乘用车及纯电动乘用车各环节在“摇篮到坟墓”碳排放占比



运行阶段燃料周期的减排已提上日程，材料周期深度减排的需求愈发突出。在减少车辆运行碳排放方面，中国正在以前所未有的速度推广新能源汽车。2023年，中国的乘用车销量达到2100余万辆，新能源汽车的渗透率达到35%¹⁵。截至11月中旬，中国2024年新能源车产量突破1000万辆，新能源汽车渗透率已连续四个月超过50%。随着电力清洁化及电动汽车能效水平的不断提升，中国电动汽车在运行阶段因电力使用所产生的碳排放

已经取得并将持续实现大幅削减。研究显示，中国纯电动汽车相比燃油汽车在燃料周期的碳排放削减比例从2015年的34%提升至2020年的57%，预计到2030年将达到69%¹⁶。然而，生产阶段和废弃阶段对应的材料周期碳减排仍面临诸多挑战，进展相对缓慢。这凸显了加强政策干预、推进产业行动以及转变消费模式的紧迫性。

塑料制品与包装

中国的塑料行业长期以来依赖于“开采-制造-废弃”的线性模式。塑料具有广泛的应用，在日常生活中几乎无处不在。电商、快递和外卖等新业态新模式推动中国塑料行业消费持续增长。2022年，中国的塑料制品产量达到7800万吨，位居全球首位¹⁷。其中，塑料包装是最主要的应用领域，占中国塑料消费总量的近一半¹⁸。塑料行业长期以来依赖的“开采-制造-废弃”的线性模式开始转向循环经济模式发展。据估算，2022年中国产生的6300万吨废弃塑料中，约30%¹⁹被回收，这显著高于9%²⁰的世界平均水平。但是，仍有相当部分的废弃塑料被填埋或焚烧。

塑料行业的污染问题已得到广泛重视，对气候变化影响认识的全面性还有待提升。塑料生命周期几乎每个阶段都会产生温室气体排放，尤以制造阶段的排放为最。评估显示，2020年中国塑料行业全生命周期的碳排放量约为4.36亿吨CO₂e（不含塑料回收带来的碳抵消）²¹，约占中国温室气体总排放量的3.6%。上游石油开采和生产和制造阶段占总排放量的85%，下游末端处置阶段则占15%（见图2-3）。根据当前的发展趋势，若塑料生产以年均1.5%^{vi}的速度增长，到2060年，中国塑料全生命周期的碳排放预计将达到7.2亿吨CO₂e，相当于2020年排放水平的两倍。

图2-3：2020年中国塑料行业温室气体排放及各阶段排放占比



vi 1.5%的年均增长率仅代表一种温和增长情景，并非确切预测。从现在到2030年，塑料的年均增长率可能在2%到3%之间。到2030年后，随着更严格的塑料污染控制和材料替代措施的实施，增速预计将下降至1.5%以下。

2.2 循环经济助力三大领域实现深度减排的一揽子措施

民用建筑、交通出行及塑料制品与包装领域，因其产业链长、关联度高、辐射面广，对社会经济低碳转型具有深远影响。为推动上述各领域的高质量发展、助力“双碳”目标达成，可在全周期全链条全体系深度融合循环经济，以提高资源利用效率。通过优化设计和生产、延长产品寿命和最大化利用废弃材料，循环经济能够在满足“美好生活”需求的同时，显著减少材料消耗和碳足迹。

民用建筑



拒绝
Refuse



维修
Repair



翻新
Refurbish

在中国民用建筑领域，减少碳排放的首要策略是充分利用现有建筑存量，避免大拆大建。中国的建筑行业正在从增加供应满足刚需，逐步转向通过拆旧建新提升建筑性能和功能的新阶段。在这种模式下，建筑平均寿命被压缩为三十余年，远未达到其结构年限。频繁的拆除与重建导致了对钢铁和建材的高需求，同时也加剧了资源消耗和增加了建筑垃圾的产生，最终导致碳排放居高不下。与之相比，实施“以修代拆、精细修缮”的策略，减少非必要新开工，延长现有建筑的使用寿命，满足人们对空间的需求。这一策略将循环经济原则应用于城市更新，以打造富有生机、惠及市民的零废城市。紧凑型城市建设提倡充分利用棕地和闲置建筑，提高建筑空间利用率，是减少因新建而产生的碳排放的另一重要手段。通过搭建城市一级的数字信息平台，实现公寓、写字楼和酒店等空间的共享，在提高空间利用率的同时，还能降低市民生活成本，充分挖掘每栋建筑的潜在价值。



重新设计
Redesign

推广遵循自然法则的规划设计方案有助于减少材料和能源消耗。目前，基于自然的绿色设计理念正在兴起，包括建筑结构设计一体化、被动式设计以及公园城市等规划设计理念。一体化设计关注不同技术和系统的有机整合，涉及建筑围护结构的优化、自然通风与采光等多个方面。被动式设计更关注不同建筑材料的热工性能，通过合理布局和结构优化，使建筑物在不依赖额外机械设备的情况下，充分利用自然环境条件（如太阳能、自然风）来调节温度，减少能源消耗。

2020年，住房和城乡建设部等7个部委联合发布《绿色建筑创建行动方案》，提出推动新建建筑全面实施绿色设计。深圳建科大楼作为国内采用一体化设计理念的典型案列，其办公区每年的用电量为60.2kWh/平方米，相较深圳市同类建筑的平均电耗降低40%，每年减排超过1600吨。预计到2050年，一体化和被动式设计的广泛推广，可以使得中国每年减少近10亿吨碳排放²²。而采用公园城市的规划理念，增加城市树冠覆盖率以及水体和植被面积，不仅能够增强碳汇功能，改善空气质量；同时，还可以提高对极端天气的抵御能力，有效降低极端高温的影响。



重新设计 Redesign

模块化设计和装配式建筑的发展为中国建筑行业的减碳提供了**新方案**。装配式建筑通过在工厂预制构件，在施工现场组装，可显著减少垃圾和碳排放，并提高施工效率和安全性。工厂预制的构件在标准化生产中可以更精确地控制材料用量和减少浪费，同时在施工现场组装时避免了传统施工方式中常见的材料切割、堆积等带来的资源浪费和环境污染。据估计，装配式建筑每平方米可节水20%，减碳8%，减少垃圾排放78%²³。在政策大力支持下，装配式建筑在中国的普及率不断提升。《城乡建设领域碳达峰实施方案》计划到2030年，装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例达到40%。尽管面临成本控制和技能提升等挑战，但通过加强产业链融合和制定统一标准，装配式建筑有望进一步推动建筑行业的循环转型。



减量 Reduce

建材低碳化是新建建筑脱碳的重要手段，包含多种低碳替代材料的**创新应用**。中国国务院发布的《2030年前碳达峰行动方案》提出了两种材料替代方式，以实现建材行业低碳转型目标。第一种方式是使用低碳钢铁和水泥。钢铁生产工艺可以通过使用替代原料，减少对铁矿石的依赖。目前，全球约有5%的钢铁通过“直接还原铁（DRI）”工艺生产，这一工艺无需使用焦炭²⁴。在水泥生产中，可使用粉煤灰、工业废渣、尾矿渣部分替代传统熟料。作为中国最大的机场，北京大兴国际机场在建设过程中采用了低碳混凝土技术，不仅有效降低了碳排放，还提高了结构的强度和耐久性。第二种方式是使用可再生材料，如木材和竹子。这些材料在中国分布广泛，且易于采集和运输。然而，在使用可再生材料时，必须确保采用可持续和负责任的采伐和生产方式，以避免对自然碳汇和生物多样性造成破坏。此外，可再生材料的消耗速率应与其自然再生速率保持平衡，以维持生态系统的健康和资源的可持续供应。据估计，到2050年，推广低碳建材每年可减少1.3亿吨碳排放²⁵。



回收 Recycle

推进建筑垃圾资源化利用，不仅能降低环境负担，还具有显著的**碳减排效益**。建筑拆除过程中，因不同建筑结构产生的废料种类繁多，包含了混凝土、砖块、金属、塑料等多种成分。据估算，中国每年产生的建筑垃圾超过20亿吨，是生活垃圾的8倍，约占城市固体废弃物总量的40%²⁶。大量未处理的建筑废料，如果不加以资源化利用，将对环境和城市发展构成持续威胁。为了应对这一挑战，2020年发布的《城乡建设领域碳达峰实施方案》提出了推动建筑垃圾集中处理与分级利用的目标，力求到2030年将资源化利用率提高至55%。通过这种措施，建筑垃圾的循环利用不仅能够减少对原生资源的需求，减轻自然资源的消耗，还可以有效减少温室气体排放。若以一吨建筑垃圾循环利用可减少100千克碳排放计算，建筑垃圾循环利用的碳减排效果约为1.2亿吨/年²⁷。

交通出行



重新设计 Redesign

以满足个性化、高品质和多模式的出行需求为导向，重塑数字化交通运营管理体系。为应对不断增长的城市人口，一个理想的城市交通体系应整合公共交通、共享交通和私人交通等多种模式，通过数字平台支持，实现无缝衔接的行程规划、一体化换乘和智能支付，为用户带来更加便捷舒适的出行体验，同时减少交通出行的碳足迹。尽管当前共享交通形式的快速推广已展示出新型绿色出行方式的吸引力，但要真正满足乘客日益多样化的出行需求，还需建立协调一致的出行管理体系。这套体系的设计应涵盖以下关键要素：通过紧凑型城市规划建设提高出行效率，提供面向逆向物流与资源循环的智能货运策略，建设适应低碳交通工具的基础设施，以及利用大数据技术优化整个出行系统的运行。



重新设计 Redesign



减量 Reduce

车辆轻量化设计在提升燃油效率和续航能力的同时，显著降低了能源和材料消耗。一种方式是优化结构设计，除去零部件冗余部分。例如，特斯拉上海超级工厂将一体化压铸技术用于Model Y后车身底板的生产，使得铸造零件由70个降低为2个，下车体总成重量较之前降低30%。另一种方式是采用轻量化材料以减轻零部件重量，例如用铝、镁或碳纤维等代替钢材。研究发现，2019-2050年期间，材料轻量化将为中国乘用车领域累计贡献41亿吨碳减排量²⁸，平均每年约1.3亿吨。尽管中国相较于欧洲和美国起步较晚，但在汽车轻量化方面进步显著，特别是在新能源汽车方面已是公认的世界领导者。



重复使用 Reuse

在数字技术的有力支持下，共享出行作为一种新的绿色低碳出行方式正在快速崛起。顺风车作为一种典型的C2C（消费者对消费者）共享出行方式，通过合并顺路的出行需求，推动空闲座位利用、减少道路上车辆数量、缓解道路拥堵。这种需求侧缓解策略，如少开车、使用共享汽车和减少私人汽车拥有量等，短期内相比于相关技术提升策略更能有效减排。据预测，2025年需求侧和技术导向型转型将分别贡献22%和16%的减排量²⁹。以哈啰出行为例，截至2023年底，哈啰顺风车累计出行里程近500亿公里，累计减少碳排放量约1000万吨，累计节约社会出行成本超过500亿元³⁰。另外，研究表明，共享自动驾驶可为2020-2060年间中国交通行业带来累计38亿吨的碳减排量³¹，平均每年为9000余万吨。



重复使用 Reuse

促进二手车交易市场发展有助于延长汽车的使用寿命，提高资源利用率。基于1993年至2014年日本乘用车市场的研究发现，二手汽车的市场份额每增加10%，碳排放将相应减少1690万吨³²。据中国汽车流通协会统计，2021年中国二手车交易量接近1800万辆，是新车销售规模的67%³³。为了充分释放二手车市场潜力，中国全面取消了二手车限迁政策，二手车交易登记流程得到简化。此外，《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》提出，到2027年二手车交易量较2023年增长45%。随着油耗大、排放高的传统燃油汽车将逐渐被淘汰，发展二手车市场与禁售燃油车、鼓励电动汽车的政策相结合，有助于最大限度地实现减排效益。



改造 Repurpose

将退役电池用于储能可以使其中蕴含的高值矿产保留在经济系统中，减少因材料开采而产生的碳排放。符合要求的退役动力电池经过检测、维护、重组等环节，仍可以应用于其他储能场景，进行梯次利用。例如，截至2022年底，中国铁塔已在全国31省约25万个通信基站上累计使用51万组梯次电池，拓展了低温、高海拔等特殊场景的应用。整包梯次利用1千瓦时的磷酸铁锂和三元锂811动力电池，可实现的最大碳减排量平均为194千克³⁴。预测结果显示，2020-2050年期间中国累计将有16太瓦时的动力电池从新能源汽车上退役。若对其全部梯次利用，年均减排量约为1亿吨³⁵。



再制造 Remanufacture

大力发展汽车零部件再制造是减少车辆材料周期隐含碳排放的关键举措。2018年，中国的汽车保有量已达2.4亿辆，其中大多数车辆的使用寿命超过10年。按照5%的标准报废率，中国在2020年后迎来车辆报废高峰，报废车辆市场规模或达到万亿级。优先对报废车辆进行再制造，特别是对发动机、方向机、变速器、前后桥、车架等“五大总成”进行再制造，可以有效减少资源的浪费和环境污染，从而在整体上降低碳排放。在欧洲，每年乘用车部件和商用车部件通过再制造可分别减少碳排放约490万吨和317万吨³⁶。相较之下，中国目前的汽车零部件再制造率不到10%，远低于发达国家45%的水平³⁷。为了提高这一比例，中国通过试点项目和行业推广，在汽车再制造领域取得了显著进展。2021年发布的《汽车零部件再制造管理暂行办法》引入了严格的质量标准、信息可追溯性、产品标识以及旧件管理制度，为再制造行业的规范化、大规模发展奠定了基础。



提升报废车辆再生资源利用水平，并将回收材料用于新车制造。2021年中国的报废汽车回收拆解数量已近250万辆³⁸，其中约60%的可回收材料为钢铁。废钢铁可出售给钢铁公司，作为冶炼过程中的原材料。研究表明，对一辆新能源汽车而言，报废材料的再生利用可带来减排量约为5吨CO₂e，主要贡献源自钢铁、铝和动力电池正极材料³⁹。为进一步推动报废汽车资源循环利用水平，《汽车产品生产者责任延伸试点实施方案》要求，到2023年报废汽车资源综合利用率达到75%。该目标为行业提供了明确的方向，推动企业加大技术投入与创新实践。一些领先企业已经开始通过创新回收模式实现资源的高效利用。例如，宝马与华友循环合作建立动力电池材料闭环回收模式，高比例提炼电池中镍、钴、锂等核心原材料，再次用于生产制造动力电池，能减少矿产资源开采中70%的碳排放量⁴⁰。展望未来，2022至2050年间，中国累计的退役新能源乘用车预计将达到2.3亿辆左右⁴¹，如果对废弃材料实现全面的回收利用，年均减排量有望达到4000万吨。

塑料制品与包装



拒绝
Refuse



减量
Reduce

禁止生产和使用不必要的和有问题的一次性塑料是推动塑料循环经济的首要措施。根据艾伦·麦克阿瑟基金会的研究估算，有5%-10%的塑料软包装可以在不产生任何不良后果的情况下被直接淘汰⁴²。从2008年“限塑令”到2020年“新版限塑令”，中国已实施了一系列政策和措施来限制一次性塑料的使用。数据显示，自“限塑令”实施以来，中国塑料袋使用量年均增速由2008年的超20%下降为2021年的3%以内。其中，2008至2016年间，超市、商场的塑料购物袋使用量普遍减少2/3以上，累计减少塑料购物袋140万吨左右，相当于减排近3000万吨，折合年均减排量约375万吨⁴³。



重新设计
Redesign

生物基塑料替代化石基为原材料端的原生塑料减量提供了有益补充。当前还无法实现塑料生产与化石基原料的完全脱钩。因此，以生物基塑料替代化石基塑料是塑料循环经济在原材料端的又一补充策略。生物基塑料源自可再生资源，如玉米淀粉、纤维素、蔗糖、植物油等，这些植物基材料在生长过程中吸收了二氧化碳，因此具有较低的碳足迹。此外，生物基塑料在生产 and 废弃阶段的环境影响通常低于化石基塑料，且在回收利用方面展现出更大的潜力。基于当前的能源结构和生命周期预测，到2050年，如果玉米基塑料完全取代化石燃料基塑料，可减排1亿吨；若用甘蔗基塑料替代，则可以减排1.7亿吨⁴⁴。

为推动生物基塑料的发展，中国国家发展和改革委员会于2023年发布《加速非粮生物基材料创新发展三年行动计划》，提出加强生物基塑料的研发和应用。需要注意的是，生物基塑料并非一劳永逸的万能解决方案，推动塑料行业减污降碳，仍需优先从设计端入手，减少不必要和有问题塑料的使用。其次，推广生物基材料需确保其原材料的生产不与粮食生产争夺有限的耕地资源。最后，无论是生物基或是化石基塑料，都需要在后端建立有效的收集和处理体系，确保废弃塑料得到妥善回收。



重新设计 Redesign

可重复使用和可回收设计是推动塑料循环经济减污降碳的核心驱动力。当塑料制品和包装的使用不可避免时，应重点关注其可重复使用性和可回收性。通过提高产品重复使用率和回收率，减少对新塑料生产的需求，能降低生产制造过程中的温室气体排放。要实现这一目标，需要在商业模式、产品和材料、包装以及回收技术等方面进行创新和重新设计。对于可回收性设计，基于“新塑料经济全球承诺”倡议⁴⁵，消费品论坛制定了“黄金设计原则”，为推进包装的可回收性设计提供了统一框架。同时，该原则已被中国的部分头部消费品公司采用，推动塑料价值链向循环经济的方向转型。



重复使用 Reuse

多行业多场景推广塑料制品和包装的重复使用，是重要的源头减碳措施。可重复使用的塑料制品和包装可以经过清洗消毒等工序后重新投放市场，确保能够便捷、安全地被再次使用。以塑料包装为例，多种B2C（企业对消费者）重复使用商业模式的探索推动了这一进程，如消费者自带包装并在商店得到补给，或消费者将产品包装返还给企业进行专业清洁、重新填充后进行再次售卖。据太平洋环境资源中心研究，综合源头减量、重复使用和回收的解决方案逐步淘汰一次性塑料包装，到2040年，中国包装行业的新塑料产量将从基准场景的7900万吨减少到900万吨，预计塑料的碳排放将减少2.19亿吨。其中，重复使用的贡献达40%，年均减排潜力约为8760万吨⁴⁶。



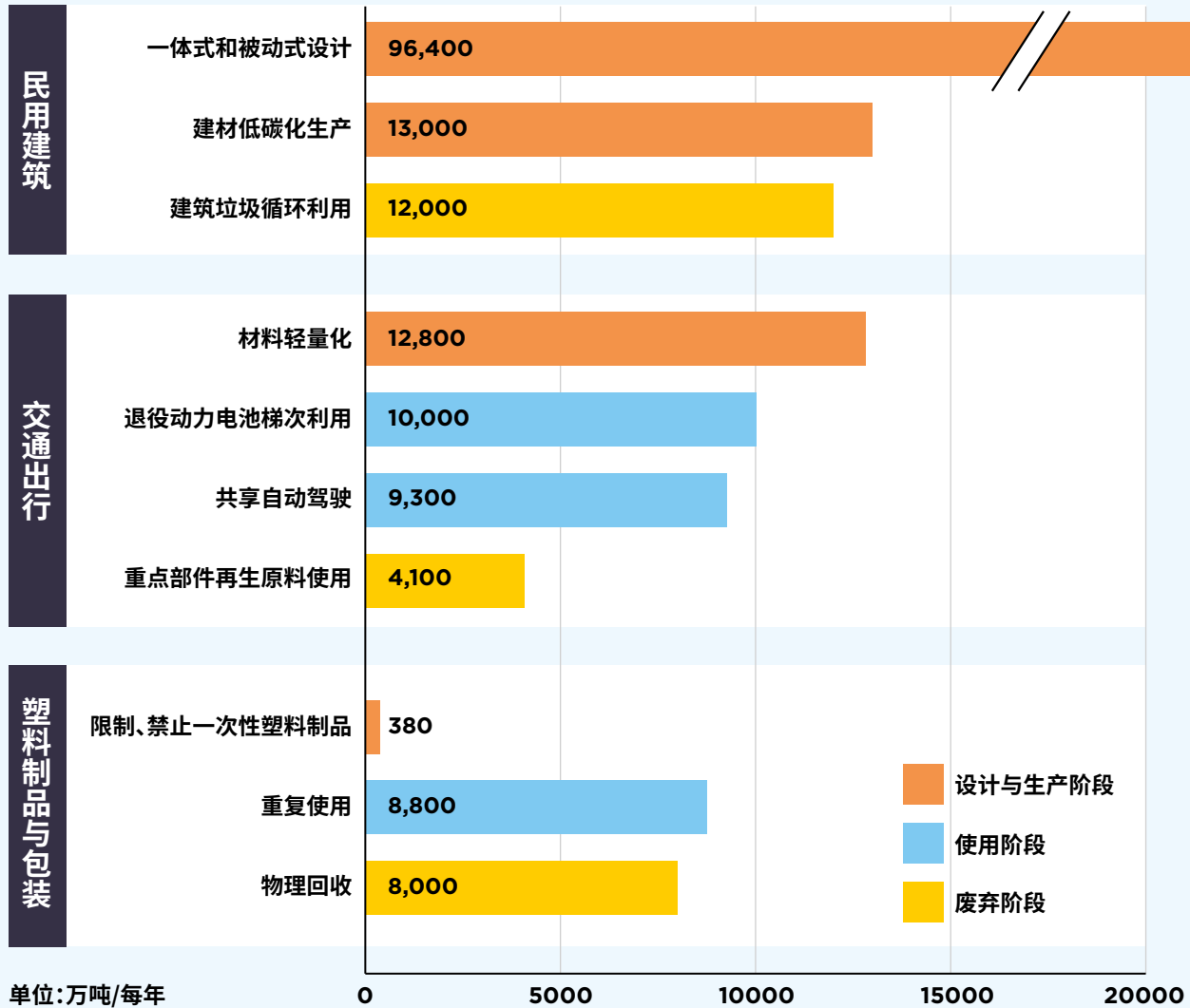
回收 Recycle

建立物理回收体系，并在新产品中尽可能多地使用再生塑料，是当前较为成熟的塑料低碳循环转型路径。物理回收通过对废弃的塑料制品和包装进行分类、清洗和破碎，来加工生产新的产品。这一技术路径在不少塑料品类中已相对成熟，其经济可行性和操作流程得到广泛认可和应用。2020年，中国塑料行业通过物理回收替代原生塑料的生产，实现8000万吨的净减排⁴⁷（物理回收总减排效益为1.1亿吨，扣除回收再生过程产生3000万吨的碳排放）。作为目前塑料回收最主要的技术路径，物理回收减少了依赖化石燃料高温、高能耗的制造过程，转向以收集、分拣、清洗和低温加热为中心的再生处理过程。由于这一工艺与电气化系统高度契合，通过低温加热和机械处理，物理回收更易于结合可再生能源使用来实现去碳化。

表2-1: 三个高碳排生活消费领域的循环经济措施示例

行业	循环经济策略	循环经济措施示例	10R路径
民用建筑	循环型城市规划和建筑设计建造	紧凑型城市建设	 拒绝 Refuse
		推广遵循自然法则的规划设计方案	 重新设计 Redesign
		模块化设计和装配式建筑	 重新设计 Redesign
		建材低碳化	 减量 Reduce
	延长建筑寿命与提升空间利用率	延长建筑使用寿命	 维修 Repair  翻新 Refurbish
		提高建筑空间利用率	 重复使用 Reuse
	建筑废弃物资源化利用	建筑垃圾资源化利用	 回收 Recycle
交通出行	循环型交通体系以及智能化车辆设计与制造	重塑交通体系	 重新设计 Redesign
		车辆轻量化	 重新设计 Redesign  减量 Reduce
	延长车辆和部件的使用寿命	共享出行	 重复使用 Reuse
		二手车交易	 重复使用 Reuse
		退役动力电池梯次利用	 改造 Repurpose
		零部件再制造	 再制造 Remanufacture
	最大化利用废弃材料	报废汽车材料回收	 回收 Recycle
塑料制品与包装	塑料价值链的设计和改造	禁止可避免和有问题的一次性塑料	 减量 Reduce
		设计可重复使用且易于回收的塑料	 重新设计 Redesign
		再生塑料替代原生塑料	 减量 Reduce
		生物基塑料替代化石基原生塑料	 减量 Reduce
	延长塑料的使用寿命	多场景推广塑料的重复使用	 重复使用 Reuse
	将材料保留在经济循环中	物理回收	 回收 Recycle

图2-4：生活消费领域部分循环经济措施的量化减排效果



通过梳理文献发现，在民用建筑、交通出行和塑料制品领域，循环经济措施具有显著的减排潜力。当前这三个领域的碳排放总量约为48亿吨，通过实施一揽子的循环经济措施，年均可实现约18亿吨的减排量，占总排放量的三分之一以上。相比于末端治理（如垃圾回收），设计与生产阶段的循环经济实践可获得更显著的减排效益。

2.3 重点生活消费领域发展循环经济助力降碳面临三大障碍

缺乏科学的循环经济碳减排量化评估方法和机制，使其难以与**减排目标和成效有机结合**。艾伦·麦克阿瑟基金会的最近一项研究指出，通过改进排放核算框架，可以更公平、准确地将减排效益归因于循环经济活动。然而，目前主流的碳核算工具如温室气体核算体系（GHG Protocol），是基于线性经济模式设定的，即资源开采、产品制造、用后丢弃，涵盖从“摇篮到坟墓”的单一产品生命周期。随着越来越多的企业基于循环经济模式开展业务，提供“摇篮到摇篮”的产品和服务。这类方案在现有碳核算体系中常常被忽略，导致无法科学量化循环经济活动的减碳效益。

这种评估体系的缺失，为循环经济融入减缓气候变化议程带来了切实挑战。一方面，缺乏统一标准影响考核评价和政策制定；另一方面，循环经济活动产生的减排难以获得应有的经济效益，阻碍市场机制的完善。例如，企业无法将循环经济碳减排效益纳入全国碳市场交易体系，特别是在国际碳边境调节机制下，可能削弱产品的国际竞争力。

高碳排领域的循环经济产业体系尚不成熟，制约了脱碳进程的**大规模推广**。翻新、再制造和回收企业等市场主体，在推动循环实践普及中起着关键作用。然而，这些行业本身的清洁化、低碳化、规模化以及规范化程度仍需进一步提升。以再生资源循环利用行业为例，中小企业占比高达70%，行业类型多样且发展水平参差不齐，不少企业仍依赖于高能耗、高碳排、高污染的传统制造工艺。

此外，由于缺乏对循环利用技术全生命周期的经济成本效益、资源环境效益、能源碳排放效益等综合评估，企业在技术选择上缺乏指导，导致产业中仍存在一些落后技术和产能，阻碍了高质量发展。

当前的政策框架及主流商业模式仍以线性经济模式为基础，导致**循环型产品及服务的供给能力和需求水平偏弱**。由于循环型产品的价格往往偏高，受收入水平影响，许多消费者虽然有环保意识，但购买力有限，难以真正参与循环消费。当前的政策框架主要支持“购买和所有权”为导向的传统消费模式，而非“共享和使用权”导向的循环消费模式。比如，电动车购买补贴和购置税减免政策主要面向个人购车者，而共享汽车平台无法获得同等的补贴支持。这削弱了循环型商业模式的经济优势，造成传统产品对循环型产品市场空间的挤压。

推动向循环型产品和服务模式的转变，将为需求侧结构性改革提供重要机遇。这一转变在减少传统高碳足迹产品消费的同时，也会培育壮大新型消费，激发消费市场新活力，帮助我们以更加多元的方式重新思考“美好生活”的定义。

3 循环经济支持能源转型： 保障关键原材料供应，减少废弃物产生



3 循环经济支持能源转型: 保障关键原材料供应,减少废弃物产生

“双碳”目标的推动下,中国风电和光伏装机量不断扩大,发电量占比逐年提升。根据芬兰智库能源与清洁空气研究中心的数据,2023年清洁能源产业对中国GDP增长的贡献率达到40%⁴⁸。尽管风电和光伏在运行时温室气体排放量显著低于火力发电,但其制造过程高度依赖能源和材料。随着未来装机规模的持续扩大,风电和光伏产业对矿产资源的需求将进一步增加。同时,大规模的风电和光伏设备将陆续进入退役期,可能带来土地利用压力和退役组件管理等一系列挑战。因此,落实循环经济策略显得尤其迫切,通过延长风电和光伏的使用寿命,回收利用退役设备中的材料,以减少对关键原材料的依赖,增强关键原材料的供应,最终推动可再生能源价值链向低碳和零废弃转型。

3.1 中国风电和光伏行业面临关键原材料进口依赖与废弃物处理的双重挑战

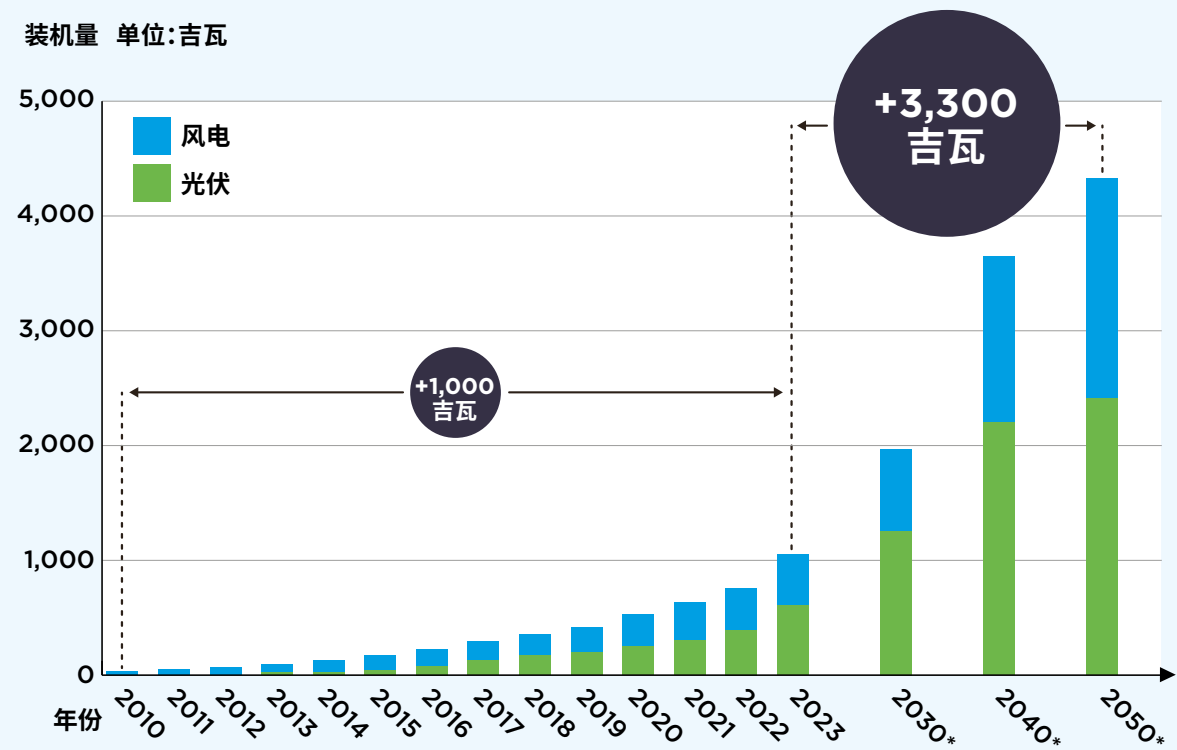
风电和光伏装机总量快速增长

2010到2023年,中国风电和光伏装机总量增长超过1000吉瓦。自2006年实施《中华人民共和国可再生能源法》以来,中国的风电和光伏的装机量开始了大规模扩张。风电的装机量从2010年的29吉瓦增加到2023年的442吉瓦⁴⁹。2023年,中国风电新增76吉瓦装机,占全球新增装机的三分之二。这一增长主要得益于政府上网电价补贴等激励政策的推动。同时,本土企业(如远景能源)在技术创新上的突破以及度电成本的大幅下降,进一步促进了装机容量的快速扩张。据统计,2010到2020年间,陆上风电度电成本累计下降了近40%⁵⁰。

中国的光伏装机量同样经历了快速攀升,从2010年不足1吉瓦增长至2023年的600吉瓦以上⁵¹。在“光伏领跑者计划”以及上网电价补贴等政策的推动下,大型集中式光伏电站和分布式光伏系统发展迅速。仅在2023年,中国光伏新增装机量就超过了美国历史上的累计光伏装机量。另外,2010到2020年间,光伏成本累计下降了82%,进一步加快了部署速度⁵²。

到2050年，中国风电和光伏的装机量预计将再增加3000吉瓦以上。未来几十年，中国的风电装机预计将继续保持强劲增长态势。中国通过创建大型“清洁能源基地”，在风能资源丰富的地区扩大装机规模，从而提升发电能力。江苏和福建等沿海地区的海上风电也将迎来重要的投资和发展机遇期。到2030年，中国的风电装机容量预计将超过700吉瓦，到2040年将达到1400吉瓦，到2050年将达到1900吉瓦。这些目标的实现将进一步巩固中国在全球风力发电领域的领先地位。在太阳能电池效率的不断提升、钙钛矿等新材料实现突破，以及补贴和税收优惠等政策的推动下，中国的光伏发电将迎来新一轮快速增长期。户用和工商业分布式光伏正成为市场增长的主要驱动力。预计到2030年，光伏装机容量将超过1200吉瓦，在2040年预计超过2200吉瓦，到2050年有望达到2400吉瓦。

图3-1：2010-2050年中国风电和光伏装机及预测^{53, 54}

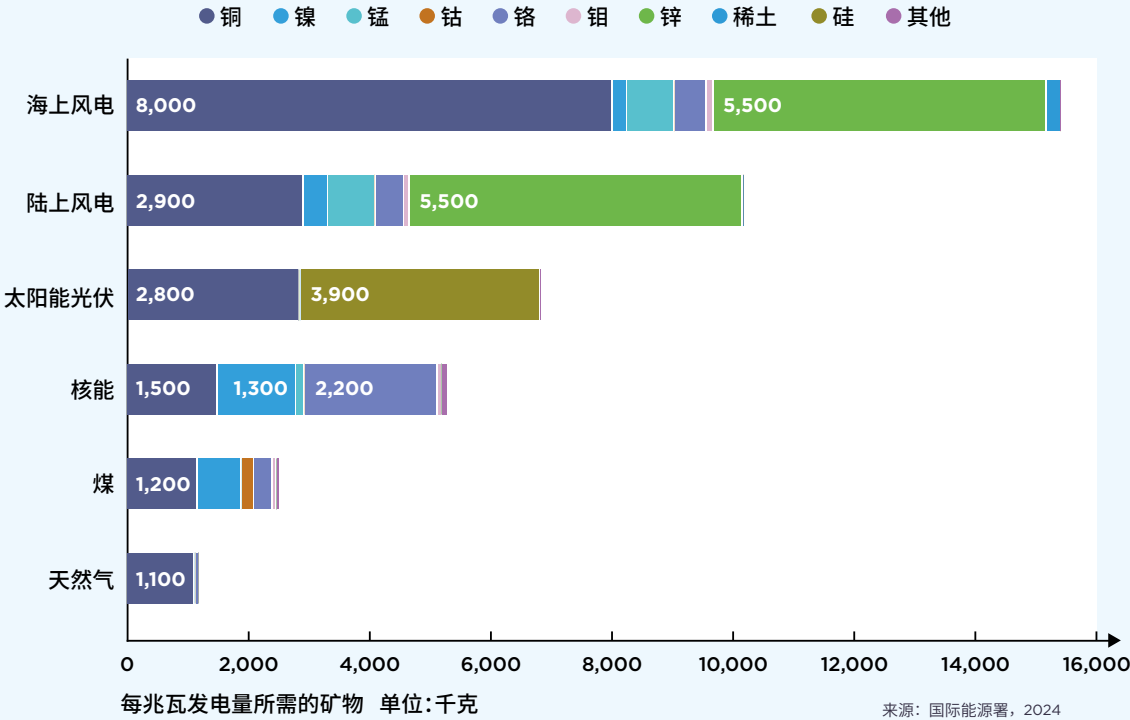


可再生能源系统面临关键原材料供应风险

相比于火力发电，风电和光伏是材料密集型技术。如图3-2所示，风电主要消耗金属铜和锌，光伏主要消耗金属铜和硅。据国际能源署预测，到2040年，全球对关键矿产的需求可能会比2020年增加一倍以上。中国将在推动这一增长中发挥重要作用⁵⁵。尽管风电和光伏在其生命周期中的二氧化碳排放量比火力发电显著降低，但其供应链环节的碳排放占生命周期排放总量的90%以上。因此，如何在满足材料需求的同时控制供应链排放，成为实现绿色转型的重要课题。

中国面临关键进口材料供应安全风险。中国具备开采、冶炼并加工大部分风电和光伏供应链所需材料的能力。然而对镍、铂族金属、钨、铬、钴和锆石这六种材料，中国的对外依存度超过了90%。另外，这些材料的进口来源高度集中。例如，75%的钴来自刚果，68%的铜来自智利，60%的镍来自菲律宾⁵⁶。当前，其面临的主要挑战并非关键材料的稀缺性，而是供应的稳定性和可靠性⁵⁷。尽管中国加大了海外投资以确保关键矿产的供应，但这一策略仍面临多重挑战，包括矿山开发周期长（平均需16年）、地缘政治紧张、市场波动性高以及资源民族主义抬头等。这些因素都对可再生能源供应链的稳定性构成了威胁⁵⁸。

图3-2：传统能源发电系统及清洁能源发电系统所需矿产资源对比

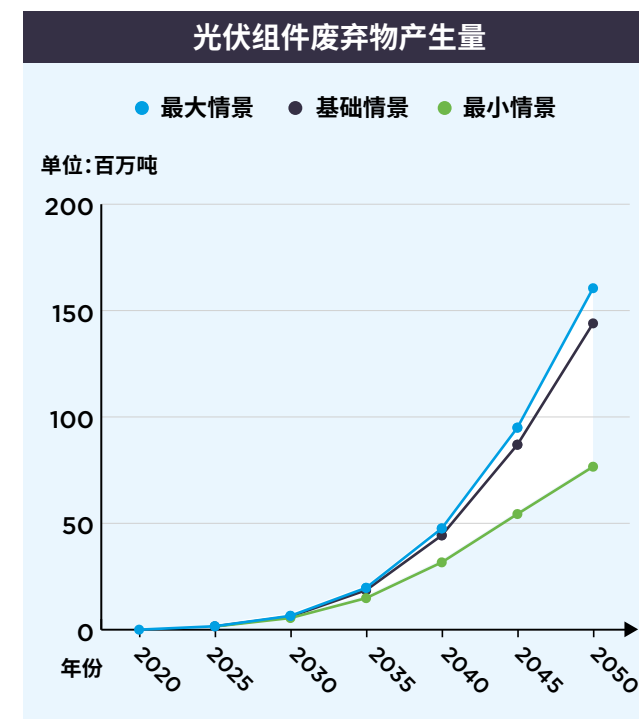
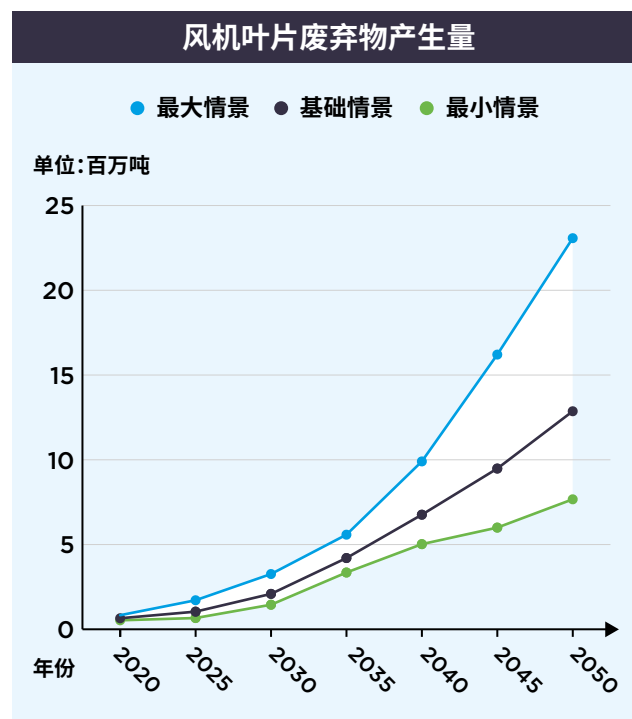


中国即将迎来风光设备的大规模退役潮

到2050年，中国预计将累计高达产生2300万吨的风机叶片废弃物⁵⁹。风电设备的使用寿命通常为20年，自2006年大规模部署以来，许多风电设备即将接近其设计使用年限。风机叶片废弃物早期主要来自制造过程，但随着时间推移，废弃物的产生将逐渐覆盖整个生命周期，包括制造、运营、维护和退役等各个阶段。预计到2025年之后，叶片废弃物将进入快速增长期。为应对风电设备老化问题，国家能源局在2023年提出，鼓励并网运行超过15年或单机容量小于1.5兆瓦的风电场进行改造升级。对于达到设计年限的风电场，要求其进行整体退役，即风电机组需一次性解列后拆除全部设施，这一过程将产生大量废旧部件。尽管风电设备中90%的部件回收难度较低，但其核心组件叶片由复合材料制造，目前仍面临材料分解难、回收成本高的问题。

2020到2050年，中国预计将累计产生多达8800万吨的废旧光伏组件，其中80%集中在2040年到2050年⁶⁰。光伏的设计使用寿命一般为25年。近年来，随着技术进步，老旧光伏组件的发电效率已明显落后。同等面积下，2023年组件的发电量约为2008年组件的两倍。这推动了许多光伏电站进行升级改造，即采用更高效率的新型组件替换效率较低的老旧组件，使得退役光伏规模提前出现爆发式增长。尽管光伏中含有大量可回收的有价值材料，但目前回收技术的实际应用有限，高值化利用水平较低，资源流失风险较高。此外，光伏组件中含有铅等有害物质，如未经妥善处理直接填埋，可能会造成环境污染。

图3-3：中国退役风机和光伏组件产生量预测^{61, 62}



中国风电和光伏的价值链

中国在全球风电和光伏领域的矿产加工环节中占据主导地位，但仍高度依赖进口资源。中国的风电和光伏供应链覆盖矿产开采、矿物精炼、部件生产、设备组装、运维和废弃物处理等环节（见图3-4）。所需矿物来自世界各地，但其精炼和加工主要在中国进行。比如，中国精炼了全球90%的稀土元素。由于有利的产业政策、低廉的能源、原材料成本和充足的劳动力，中国在全球风电和光伏制造占据主导地位。

风电制造正朝着大型化、轻量化、智能化、定制化和模块化的方向发展。如图3-5所示，风电系统的关键部件包括叶片、齿轮箱、转子和发电机等。叶片主要由不可降解的热固性树脂基复合材料制成。随着人工智能和大数据技术的进步，叶片设计趋向更长，以提升发电容量和效率。海上风电被视为未来重要的发展方向，与陆上风电相比，海上风电塔架更高、重量更轻、效率更高，且配备更大叶片以提升容量因子。然而，海上风电对铜和稀土金属的需求量较大，因为其依赖于直接驱动的永磁发电机，这加剧了对稀土金属的需求。

中国光伏产业主要采用晶硅光伏技术，光伏设备生产规模化推动了成本的大幅下降。晶硅光伏组件一般由铝边框、光伏玻璃、乙烯-醋酸乙烯酯薄膜、含氟背板和太阳能电池等组成⁶³（见图3-5）。如今，光伏制造已实现标准化生产，突破了技术壁垒。电池效率的提升与非硅材料成本的下降共同推动了光伏板成本的显著降低。垂直一体化成为光伏制造商普遍采用的策略，以进一步降低生产成本，减轻行业周期波动的影响。

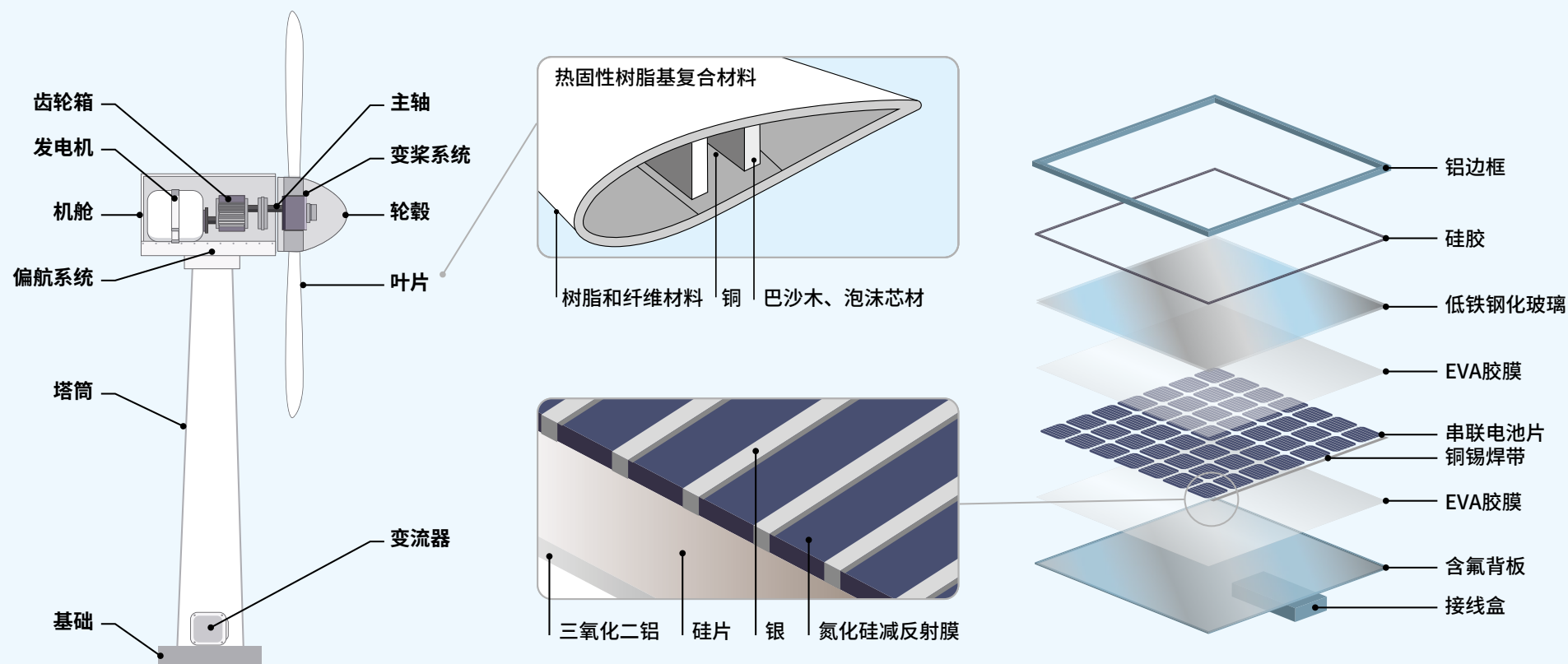
中国的风光电站开发以大型国有能源集团为主。这一格局的形成主要是由于国家政策的有力支持和引导，特别是2020年“双碳”目标提出后，“沙戈荒”大基地建设成为重点发展方向。风光发电项目因其巨额前期投资和较长的回收周期，对低成本贷款、土地获取等政策激励的依赖显著增强，这些措施成为项目可行性的保障。大型国有能源集团凭借雄厚的资金实力、先进的技术能力以及在项目审批和资源获取方面的独特优势，在大型风光电站开发中占据主导地位。

图3-4：风电和光伏供应链材料流动



注：标黄表示2023年该原料对外依存度高于50%。

图3-5: 风机和光伏板的主要部件构成



3.2 循环经济助力能源转型材料供应和零废未来的一揽子措施

目前，风电和光伏行业的循环经济措施多集中在产业链末端。尽管退役设备的回收利用对处理废弃设备至关重要，然而随着未来大规模装机的推进，行业亟需从前端积极践行循环经济策略。部分国内领先企业已基于循环经济理念设计产品，强调产品的可拆卸性、便于运输、耐用性和可回收性。这种前端优化不仅有助于解决废弃物管理，还能缓解材料需求压力，确保关键原材料供应，为实现中国的气候目标提供保障。

风电循环经济



重新设计 Redesign

风电项目的设计需综合考虑项目选址、设备选型和施工建设，以推动循环经济和系统效率提升。首先，优先选择退化或生产力低下的土地作为风电场址，既符合生态利用原则，又可减少环境影响。其次，采用模块化和预制组件的应用能够简化施工流程，减少资源浪费，提升安装效率。此外，选用耐用且高性能的材料有助于延长设备寿命、降低更换频率。技术方面，整合储能和智能电网技术能显著提升系统稳定性和能源利用效率，促进循环经济发展。“风能+”模式更将风能与其他产业结合，如海上风电与海洋牧场融合，为风电的多场景应用开辟了新方向。这些创新技术尽管尚处于探索阶段且需高额投入，但具有深远潜力，值得政府支持与战略投资。

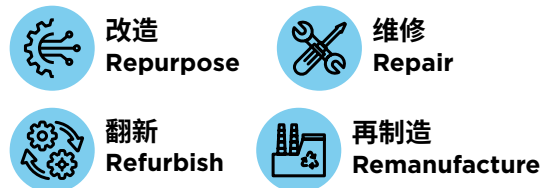
案例: 山东昌邑风电+海洋牧场融合实验示范项目

该项目位于山东昌邑莱州湾海域，总投资约36亿元，由三峡新能源山东分公司建设，并于2022年12月并网发电。项目规划了50台6兆瓦风电机组和一座220千伏升压站，总装机容量300兆瓦。预计年发电量可达9.4亿千瓦时，每年可替代29万吨标准煤，减少二氧化碳排放79万吨。

项目创新性地将海上风电和海洋牧场结合，在风机基础周围设立了养殖区，通过投放产卵礁、集鱼礁和海珍品礁等措施，促进鱼类、贝类和藻类等海洋生物的繁殖和栖息，推动“水上水下立体开发”，打造“绿色能源+蓝色粮仓”的新模式。



将循环设计应用于风电设备的制造，能够在其全生命周期内带来显著的经济效益和环境收益。传统的风电设计以电力输出最大化和制造成本最小化为核心，但这种设计方式往往未能充分考虑材料的生命周期利用和可拆解性，从而可能导致材料利用不足和运输安装过程的复杂性。要实现可持续发展，需重新审视设计参数，将循环设计融入其中，使风电设备具备模块化、可回收性和耐用性。例如，金风科技推出的新型风电模型采用模块化设计，简化了运输和组装过程，降低了物流成本和碳排放。此外，西门子歌美飒研发了一种100%由热塑性材料制成的叶片，使用寿命结束后可回收制造新叶片。Sinovo公司则使用高强度材料增强设备的耐用性，提升了转子和塔等关键部件的使用寿命。



风电在使用阶段的循环经济措施包括升级改造、维修、整机翻新和零部件再制造。提前退役风电机组和叶片若具备良好的机械性能，可以再利用于农场、小型风电场、物流园区或城市公共空间等多种应用场景，延长其生命周期。“以大换小”是另一种风电在使用阶段升级改造的循环经济措施。以新疆乌鲁木齐达坂城风电二场为例，2023年该风电场拆除了155台老旧风电机组，并换装了金风科技6.7兆瓦的大型机组，实施等容和增容项目建设，这一项目预计减少碳排放63万吨。由于中国早期风电市场的部分制造商已退出市场，导致风电场中出现了“孤儿机”现象，即设备运行情况差或停运，造成资产闲置和经济损失。通过对老旧和故障风电机组进行维修、翻新和再制造，不仅可以延长其使用寿命，还能带来显著的经济和环境效益。以轴承为例，再制造比全新生产可减少80%的原材料消耗和70%的能源消耗，从而减少59%的碳排放⁶⁴。一些研究团队已经在探索气动修复技术，并成功应用于宁夏海源风电场的损伤叶片修复，提高了20%的发电效率⁶⁵。



当前，风机叶片的回收技术仍处于起步阶段，技术成熟度、商业可行性和环境影响差别较大。风机叶片的回收技术主要包括机械回收、热解回收和化学回收三种方法。机械回收是当前最为成熟且应用广泛的方法，通过物理破碎将叶片材料加工成低价值的填料，主要用于水泥制造等领域。虽然机械回收工艺简单、成本较低，但其“降级回收”特性限制了资源的高值利用。相比之下，热解回收通过高温分解提取玻璃纤维并产生可燃气体用于能源回收，虽然能部分实现材料高值利用，但其高能耗和温室气体排放对环境不利，加之成本较高，限制了商业可行性。化学回收则通过溶剂或催化剂分解复合材料，提取高纯度的玻璃纤维，可再次用于叶片制造，且相对热解法环境影响较小。然而，化学回收工艺复杂、催化剂成本昂贵，目前还难以实现大规模商业应用。

光伏循环经济



重新设计
Redesign

高效光伏电站的设计，从项目选址、设备选型到施工建设各环节，都可融入循环经济理念。项目选址不仅要考量太阳辐射强度和气象条件，还需兼顾土壤质量、植被状况以及水文地质条件，以确保资源利用最大化并降低生态影响。在施工过程中，采用低扰动施工技术、生态材料及高效废弃物管理措施，可最大限度地减少环境影响和污染风险。在水资源匮乏地区，光伏系统可与农业及生态保护相结合，形成“农光互补”或“渔光互补”模式，不仅有利于优化土地利用，还可助力乡村产业振兴。对于土地成本和电价较高的区域，水上漂浮式光伏系统是陆基安装的可行替代方案。这种系统利用水体冷却来降低光伏板温度，从而提升发电效率，同时减少灰尘积累和维护成本。

案例: 广东省台山市“渔光一体化”项目

“渔光互补”指在鱼塘上方安装太阳能电池板。它利用光伏板的遮阴和降温效果抑制藻类生长，从而提高水产养殖产量并促进生物多样性。与陆地相比，水体上方的环境温度较低，加上光伏板之间间距较大，形成了光照、通风和降温良好的环境，有助于延长光伏组件的使用寿命。

2021年，台山市建设了大湾区最大的单体渔光一体化项目，装机容量达到500兆瓦，每年提供5.43亿千瓦时的清洁电力，相比燃煤电厂，每年减少约53.4万吨的碳排放。之前，由于阳光强烈和水温较高，该地区仅适合养殖牡蛎。而在项目完成后，藻类生长减少、水质改善，为更高价值的鱼类和虾类提供了良好的生长环境。该项目预计在其25年的运营期内，将为当地带来12亿元的税收收入。



重新设计
Redesign



减量
Reduce

光伏制造阶段的循环经济措施侧重于材料的高效设计和低环境影响材料的替代。光伏电池正朝着更大、更薄的方向发展，多种电池技术共存已成趋势。模块化设计使光伏组件可实现局部替换，从而减少材料消耗并降低成本。此外，一体化封装技术显著增强了组件的耐候性，使其更好地抵御风雨和酸性物质的腐蚀，从而延长了产品寿命。在政策层面，中国出台了《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》和《光伏制造行业规范条件（2021年版）》等文件，并对多晶硅生产的电耗、水耗等提出了更严格的要求。以硅片切割为例，采用金刚线切割工艺较砂浆切割工艺，在生产每千瓦光伏组件的过程中，可以减少大约290千克的碳排放量⁶⁶。另外，低碳材料的使用也是重要的循环经济策略，如采用聚氨酯、钢或再生铝替代铝框架，既可减少碳排放，又提升了产品耐腐蚀性和绝缘性能。每吨聚氨酯框架仅排放不到3.5吨二氧化碳，明显低于传统铝框架的排放量⁶⁷。不过，聚氨酯框架的使用仍需充分考虑其退役后的处理路径。



重复使用
Reuse



改造
Repurpose



维修
Repair

在光伏使用阶段，重复使用、定期维护、局部修复等循环经济措施对于维持系统效率和延长组件寿命至关重要。定期清洁和维护不仅能确保系统高效运行，还能减少光伏板表面灰尘和污染物的积累，从而保持最佳的光能吸收效果⁶⁸。若缺乏定期清洁和遮阳管理，组件输出功率将显著下降，退化率上升，并增加故障风险。对于封装层受损的组件，通过封装修复和电气性能的优化可延长其寿命并恢复发电效率。捷克生命科学大学研发的一项现场修复技术专门针对封装材料问题，通过恢复电绝缘性，将组件使用寿命至少延长了5年。这项技术的碳足迹仅为替换新组件的1%，成本为10%，有效降低了整体更换的环境和经济成本⁶⁹。退役光伏组件经过检测、分类及必要的加工或修复后，可在功能全部或部分保留的情况下，重新应用于较低要求或不同场景，如广告牌、装饰建材、自发电标识、充电站和公交站等。



回收
Recycle

光伏组件的回收利用是打通光伏价值链循环经济“最后一公里”的关键。目前，回收技术主要集中在硅片和玻璃等部件，这些材料占到光伏模块质量的90%左右。预计到2030年，全球光伏废弃物可满足全球15%的硅需求，为制造新型硅光伏和锂电池碳化硅材料提供资源，减碳量约达400万吨⁷⁰。银、铜和铅等稀有金属在光伏组件中的含量较低，尽管其经济价值显著，但是面临着一定的回收挑战。“三明治”结构^{vii}是目前晶硅光伏的标准设计。这种结构能够有效地保护电池片、延长组件寿命，并确保其在各种气候条件下稳定发电。然而，在拆解“三明治”结构的光伏组件时，热解法虽然较为有效，但组件背板材料中含有氟元素，可能会释放出含氟的有害物质；而机械法和溶剂法尽管能够有效分解材料，但能耗较高或存在一定的安全风险。此外，随着银用量减少和硅片逐渐薄化，未来回收环节的盈利性或将受到影响。

vii 晶硅光伏组件的“三明治”结构指的是一种多层叠加的封装结构，这种结构将光伏电池片夹在多层材料之间，类似于“三明治”层叠式的排列。

表3-1: 风电和光伏行业的主要循环经济措施

行业	循环经济策略	循环经济措施示例	10R路径
风电	智能化的产品设计和生产制造	优化风电场开发设计	 重新设计 Redesign
		可降解、易回收, 可重复使用, 易拆卸的设备设计	 重新设计 Redesign
	延长产品及其部件的使用寿命	多场景梯次利用	 改造 Repurpose
		定期维护	 维修 Repair
		整机翻新	 翻新 Refurbish
		零部件再制造	 再制造 Remanufacture
	充分和最大化利用废弃的材料	退役设备和废旧叶片回收	 回收 Recycle
光伏	智能化的产品设计和生产制造	优化光伏电站规划设计	 重新设计 Redesign
		材料高效设计	 重新设计 Redesign
		材料替代	 减量 Reduce
	延长产品及其部件的使用寿命	多场景梯次利用	 改造 Repurpose
		定期维护	 维修 Repair
		再制造	 再制造 Remanufacture
	充分和最大化利用废弃的材料	材料回收利用	 回收 Recycle

3.3 风光价值链实现低碳零废弃转型的五大障碍

风电和光伏的制造过程中，注重材料创新和成本竞争，但循环设计的意识和能力仍然不足。风光产品设计和制造阶段尚未融入轻量化、易拆解、易运输和易回收的循环设计理念，这使得源头减废变得较为困难，并为退役设备的管理和回收埋下了隐患。以风机叶片为例，尽管高性能材料和可回收碳纤维的研究正在推进，设计重点仍集中在提高发电效率和系统稳定性上。同样，光伏制造商在追求高转换效率和低成本控制的同时，往往忽视了组件的可修复性和可拆解性。

退役风光设备管理缺乏清晰的责任机制。中国退役风电及光伏设备的回收利用尚处于起步阶段。不同于欧洲的生产者责任制，中国大型国有企业作为集中式风电和光伏电站的主要所有者和运营方，承担着退役设备的管理责任，但其处置流程仍不明确。国有资产处置的复杂性进一步阻碍了有效的回收利用。目前，许多运营商采取观望态度，导致大量退役设备被存放在仓库甚至露天堆放，未能进入回收市场，限制了回收设施的原料供应和全面运作。对于分布式光伏设备，特别是户用光伏，由于装机主体多为居民，缺乏规范的回收意识和责任分配，部分设备流向不明。

风光退役设备的地理分布不均，加大了回收利用的复杂性。中国的风能和太阳能资源呈现区域性分布，风光装机的地理分布也较分散。大规模的风电和光伏装机多位于山区、沙漠和深海等偏远地区，而这些区域交通和基础设施不完善，使得集中回收和处理难以高效进行。预计到2040年，河北、江苏、内蒙古、山东和新疆将产生全国约40%的退役风机叶片，到2050年，内蒙古和宁夏的光伏废弃量将占总量的24.2%⁷¹。此外，由于分布式光伏装机量快速增长，从2030年至2050年，分布式光伏系统产生的废弃物量预计将是集中式系统的两倍⁷²。分布式光伏的广泛分布增加了回收的复杂性和成本，集中处理的难度也相应提升。

退役风光设备的溯源管理面临一定难度。目前，行业内尚缺乏可靠的信息平台，难以实现对设备在空间和时间上的精准追踪。同时，由于部分旧设备提前退役以及新设备使用寿命延长等因素的交织，风电和光伏设备退役的时空分布变得更加复杂，难以准确预测。这增加了设备丢失或未得到妥善处置的风险。供应链各环节（如部件供应商、整机制造商、发电运营主体和回收公司等）之间的协调仍需加强，这影响了风光设备的有效追溯，也制约了闭环供应链的建设。此外，数据披露的不充分，也限制了碳

排放核算体系的完善，导致难以全面评估循环经济措施在经济、环境和社会效益方面的潜力。

废弃风电和光伏的回收利用技术和商业模式仍处于起步阶段。

虽然退役风光设备的循环利用技术已被纳入国家重点研发计划，但现有研发资源和资金投入仍显不足。光伏组件的高纯分离、稀有金属回收、复合材料回收和再生资源高值化利用等关键技术，仍面临多重创新和工艺难题。同时，核心装备的缺乏制约了全材料整线回收工艺的研发，阻碍了高值回收商业模式的形成和发展。再者，退役设备大多与回收处理设施的距离较远，导致存储和运输成本居高不下。最后，回收产业实现规模化需要较大的前期投资和持续的运营投入，但目前退役设备数量有限且波动较大，尚不足以支撑企业的连续稳定运营。

4

循环经济增强社会经济系统 应对气候变化的韧性和适应能力



4 循环经济增强社会经济系统 应对气候变化的韧性和适应能力

气候变化导致的极端天气气候事件和各类不利影响不断加剧，主动适应气候变化、不断提高气候风险防范和抵御能力已经成为全球共识和必然选择。

中国位于全球气候敏感区、生态环境整体脆弱，经济社会发展和人民生活安全所受到的威胁将日益严重。2022年5月，生态环境部、发展改革委等部门联合印发了《国家适应气候变化战略2035》，明确提出坚持减缓和适应并重，强化自然生态系统和经济社会系统的气候韧性，以有效应对气候变化带来的不利影响和风险，助力生态文明建设、美丽中国建设和经济高质量发展。虽然迄今为止，循环经济与气候适应之间的关联尚未得到充分诠释⁷³。现有研究证实，循环经济具有在气候适应方面产生积极效益的潜力⁷⁴。

循环经济通过拓展原材料的供应来源，能有效提升供应链的韧性

循环经济模式通过多渠道获取和循环利用，扩大了原材料供应的地理分布和来源多样性，从而增强了供应链的韧性。与传统依赖矿山等集中点资源的资源获取方式不同，循环经济将广泛分布的用户端材料纳入供应体系，通过逆向物流等手段回收产品，使材料来源更加分散和灵活。实现这一目标需要在本地零部件的重复使用、逆向物流网络建设和远距离原材料采购之间找到平衡，这不仅能够降低资源获取的成本，还能进一步增强供应链对气候变化的抵御能力⁷⁵。

在全球可再生能源领域，循环经济措施展现出显著的供应链韧性提升潜力。研究指出，到2040年，回收退役电池可满足全球钴需求的60%、锂需求的53%、锰需求的57%和镍需求的53%⁷⁶。到2050年，美国风电行业预计需1.55万吨钕，其中20%可通过回收退役风机满足，减少对稀土进口的依赖⁷⁷。中国风电行业在2021至2060年间稀土需求量估计在22.2万至43万吨之间，约三分之一可通过回收退役风电机组得到满足⁷⁸。通过优先采取重复使用与回收的循环模式，供应链的韧性能得到进一步增强。

循环经济通过促进自然资源的再生与修复,可增强社会经济系统适应气候变化的能力

自然系统对经济增长的基础性作用显而易见:全球超过一半的GDP依赖自然资源⁷⁹。在欧元区,72%的企业高度依赖至少一种生态系统服务,尤其是农业⁸⁰。健康的生态系统在面对风暴、洪水和火灾等灾害时具有更强的恢复力,有助于提升气候变化应对能力⁸¹。因此,自然再生不仅是经济发展的基石,也是提升经济系统抵御气候风险能力的关键。

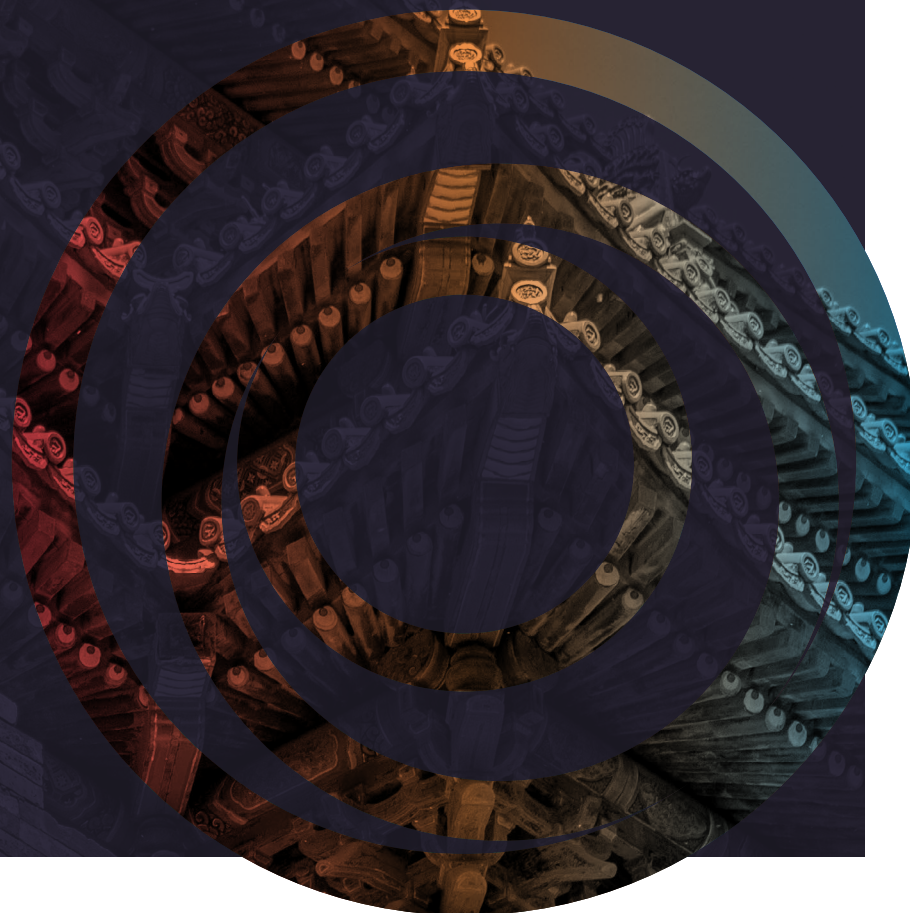
在城市中,充分利用自然资源有助于提升居民和企业的气候适应能力。根据艾伦·麦克阿瑟基金会的《构筑繁荣》报告,扩大欧洲城市绿色空间可使夏季峰值温度降低1至3摄氏度,增加透水地表可降低洪水强度10%至20%,缓解水流速度,提升渗透率,从而有助于补充地下水并增强抗旱能力。研究还表明,基于自然的解决方案(如绿色屋顶、可持续排水系统和生物墙)在应对气候变化方面比传统硬质基础设施更具成本效益和长期适应性⁸²。

在农业领域,再生农业实践对提高食物供应的韧性具有积极作用。再生农业遵循人、生物与环境之间的能量转换定律和生物之间的互利共生规律,通过优先采用免耕、覆盖作物和综合虫害管理等方法,提高农业系统物质能量的多级循环利用水平,在减少机械作业和化学品投入的基础上,实现作物产出提高的同时,改善土壤质量、提高土壤蓄水能力,从而减轻干旱和洪水等极端自然灾害的发生风险。再生农业通过改善土壤健康和提高生态系统质量,提升了农业应对干旱和洪水等气候风险的能力⁸³。

中国于2015年制定了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》;于2020年印发了《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020-2025年)》等,旨在通过免耕技术减轻土壤风蚀水蚀、增加土壤肥力和保墒抗旱能力、提高农业生态和经济效益。相关研究显示,保护性耕作在改善土壤状况方面已经取得了成功,其所含有机物质随着时间推移显著增加⁸⁴。

5 行动呼吁

——加速循环经济发展，助力中国气候行动



5 行动呼吁

——加速循环经济发展,助力中国气候行动

在迈向净零未来的征程中,中国展现出对气候治理的坚定承诺,而循环经济在这一进程中发挥着关键作用。对中国而言,循环经济不仅是应对气候变化的必要之举,更是推进经济高质量发展和生态环境高水平保护的必然选择。本章基于艾伦·麦克阿瑟基金会的“通用政策目标”框架⁸⁵,提出了一个初步行动框架,旨在通过相互关联的五个方向——设计优化、资源管理、经济激励、创新投资及协同合作——推动循环经济全面融入中国的气候行动进程,并为其他国家提供以资借鉴的中国经验,推动全球在减污降碳、能源转型和气候适应方面取得更大进展。



目标1 多层次推动循环设计改造

制定循环产品政策和设计标准
推进循环型城市规划
重新设计可再生能源供应链



目标4 加强对科技创新、基础设施和技能提升的投资

加大对循环经济关键技术研发投入
投资建设循环经济基础设施
建立循环经济碳减排核算评价体系



目标2 建立高效高值的资源利用体系

推动消费模式和生活方式的转变
制定并实施强制性的生产者责任延伸制度
协调废弃物管理立法



目标5 合作推动系统性变革

以工业园区生态化发展带动价值链联动升级
协同推进循环经济减缓和适应气候变化工作
深化循环经济和气候治理的全球合作



目标3 完善低碳循环发展的激励机制

构建支持低碳循环发展的税收体系
发挥公共采购的杠杆效应
支持中小微企业和非正规部门向循环经济转型



5.1 多层次推动循环设计改造

推动循环经济导向的设计改造，是在气候行动中融入循环经济的关键。设计阶段决定了产品和服务系统的运行方式，直接影响着资源消耗和碳排放。设计时的决策，例如提高材料利用率、采用替代材料或增强可回收性，很大程度上决定了产品的碳足迹。而一旦设计方案确定，往往难以逆转。因此，在设计之初融入循环经济原则，能够显著降低产品生命周期的能源需求和材料消耗。

当前，中国的生产和消费模式处于结构性调整期，循环设计显得尤为重要。作为全球制造大国和超大规模的消费市场，中国在产品、流程和供应链中推行循环设计，将产生全球性影响。中国在数字技术和智能制造方面的领先地位为循环设计的应用提供得天独厚的优势。例如，数字工具可以助力模块化设计、材料选择和产品再设计。

行动1:

制定循环产品政策和设计标准

通过立法将循环理念融入产品设计，重点推进材料的高效利用和环境影响材料的使用。同时，完善产品标准和相关政策，鼓励材料替代，尤其是促进再生材料的广泛应用。可借鉴欧盟《可持续产品生态设计条例》的经验，通过改进生态设计和加强生命周期管理，大幅提升产品的循环利用水平。建议优先从建筑、乘用车及可再生能源设备等高碳排、高材料消耗的产品着手实施。

建立循环和低碳产品的标签体系是这一策略的重要举措。该体系可参考现有的能效标签模式，一方面通过标示材料成分和碳足迹等信息，引导消费者的选择；另一方面则倒逼企业技术创新，加速构建低碳循环的生产实践。

行动2: 推动循环型城市规划

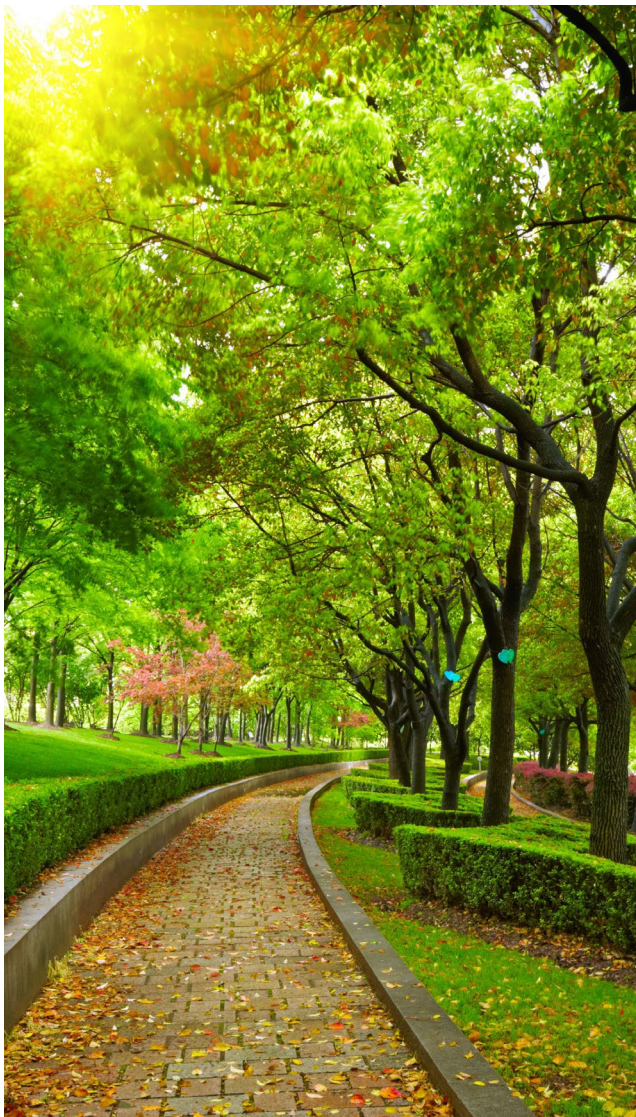
城市作为中国“双碳”的主战场，其低碳发展具有举足轻重的地位。城市化依然是中国经济增长的重要推动力。中国的城镇化进程仍在继续，城镇化率预计将从2020年的64%提升至2050年的75%以上。2022年，相关部门发布了《国家新型城镇化规划（2021-2035年）》，旨在建立社会、经济与自然协调发展的新型社会关系，建成生产、生活和生态空间相宜的城市形态，实现资源节约、环境保护和气候友好的可持续发展。低碳发展是新型城镇化战略实施的重要抓手，循环经济则为城市发展与碳中和目标的协同推进提供理念指引和实施路径。

城市规划不仅是基础设施的设计，还直接影响居民的生活方式。为推动循环型城市转型，一些基于城市规划的政策已初见成效。例如，“无废城市”倡导减少废弃物，“低碳城市”聚焦减少城市温室气体排放，以及“15分钟社区生活圈”鼓励步行或骑行以方便居民获取基本服务。这些试点项目为城市循环转型提供重要着力点。要实现这些城市发展目标，需要制定统一的标准和导则，覆盖空间布局、土地利用、建筑设计、施工建设和交通系统等各个方面。通过物联网、云计算和人工智能等技术结合共享经济模式，城市规划者、开发商和资产管理者可以构建一个实时监控的资源利用网络，推动城市迈向循环经济。

行动3: 重新设计可再生能源供应链

当前，构建循环型可再生能源价值链的政策焦点和行业实践主要侧重于退役风光设备的回收利用。回收对于解决即将退役的存量设备，避免被填埋或焚烧至关重要。然而，考虑到未来几十年中国风光发电装机容量预计继续保持高速增长，实现绿色增量发展需要更加全面地融入循环经济理念。

中国可积极参与或发起“负责任采矿”倡议，确保关键原材料的稳定供应，实施多样化采购策略，减少对少数国家和地区的依赖。同时，还需要分析和识别适合风能和光伏项目开发的土地资源，建立科学的土地规划和供应体系，确保风电和光伏项目在选址、设计和建设中充分考虑当地生态环境。此外，通过集约化布局和多功能土地共享，探索“风光+”模式。最后，推动跨行业合作，提升供应链透明度，加强可追溯性和治理水平。



5.2 建立高效高值的资源利用体系

在推动循环设计、生产模式和商业模式转型（见5.1小节）的基础上，5.2部分重点强调通过高效的资源管理，实现延长产品使用寿命，并确保材料在经济系统中以最高价值循环利用。自1990年以来，为应对城市空气污染、水污染及废弃物处理等紧迫的资源环境问题，中国陆续出台了一系列政策，主要资源产出率翻了一番⁸⁶。这些成就很大程度上归功于生产效率的不断提高。

2024年8月发布的《加快经济社会发展全面绿色转型的意见》提出，到2030年，主要资源产出率将在2020年的基础上再提升45%。为达成这一目标，中国不仅要继续提高生产效率，还应在消费端提倡适度消费、推动循环消费模式发展，同时进一步完善废弃物管理体系。通过供需两方面的协同作用，中国不仅能降低碳排放，减少资源消耗特别是对进口资源的依赖，增强供应链韧性，还能保障国家战略安全和制造业的持续增长。

行动4： 推动消费模式和生活方式的转变

消费模式和生活方式的转型不仅必要而且可行。我们需要重新思考“美好生活”的含义及其实现途径，并在生活领域积极履行全面节约战略。这对当前推进“美丽中国建设”愿景具有重要意义。可以采用A-S-I策略⁸⁷推动循环型消费模式的主流化：减少不必要的需求，避免过度生产和消费（Avoid）；通过共享和维修等方式，替代对新物品的购买（Shift）；依靠技术创新和材料替代，提升资源利用效率（Improve）。

政策制定者在推广循环型消费模式中发挥着关键作用。政府可通过立法向消费者提供产品循环性的信息，同时大力倡导简约适度、绿色低碳、文明健康的生活理念和消费方式，将绿色理念和节约要求融入市民公约、学生守则、团体章程等社会规范，推动办公空间共享、服装租赁平台以及禁用一次性塑料制品等项目实施，加速循环消费模式的推广。同时，还可以通过税收等经济手段，将外部成本纳入产品定价中，营造一个公平的市场竞争环境，推动市场需求的转变以及企业治理的变革⁸⁸。作为经济活动的主体，企业在引导消费模式的转型中发挥着不可替代的作用。企业可以运用行为科学中的“助推”策略，鼓励消费者采纳循环消费的行为方式。例如，中国的领先外卖平台美团推出了一项功能，提示用户在下单时选择“无需一次性餐具”，以此引导消费者减少浪费。

行动5: 制定并实施强制性的生产者责任延伸制度

生产者责任延伸（EPR）制度是确保生产者在产品生命周期末端履行责任的一项关键制度设计，有助于推动循环设计和循环商业模式的普及。通过实施EPR制度，可减少垃圾填埋，促进废弃物的回收利用和再生材料的使用，从而实现温室气体减排，助力应对气候变化。强制性EPR要求生产者、运营商和品牌方投资废弃物的收集、分类和回收，推动他们在产品设计阶段就优先考虑可持续材料的使用⁸⁹。

在中国推行EPR制度时，需要充分考虑复杂的国情与市场环境，进行本地化设计。尽管EPR被广泛视为有效的循环经济工具，但其实施效果可能因设计不当而受限，因而分步骤、分品类的实施方法将更符合中国当前的政策与市场发展情况。首先，建议在《循环经济促进法》等基本法层面对EPR制度的定义和内涵做出原则性规定，以便统一对EPR制度的理解与认识，为制度的执行提供较高层级的法律依据。其次，可结合废弃物规模、环境影响和资源价值等因素，确定产品品种的优先次序并纳入实施目录，初始目录可包括塑料包装、汽车和可再生能源设备等。

专栏二: 可再生能源设备的生产者责任延伸

以可再生能源设备的责任延伸为例。在中国，发电设备所有者（即电力开发企业）需对退役风电和光伏设备的退役后管理，这与欧洲通过设备制造商实施的责任延伸模式有所不同。这一差异主要是由于中国的集中式风电和光伏场站主要由少数大型国有企业运营。履行社会环境责任是央企与生俱来的天然使命，他们同时也具备履责所需资金和能力。

为了落实可再生能源设备退役管理的责任机制、推动回收行业规范发展、倒逼制造行业创新改革，需要国务院国有资产监督管理委员会（SASAC）与其他相关部门协同合作，制定产品残值评估指南和退役标准，以规范退役设备的管理。同时，相关部门可设置组件回收率和回收材料再利用率的约束性目标，并确保各方责任落实到位。

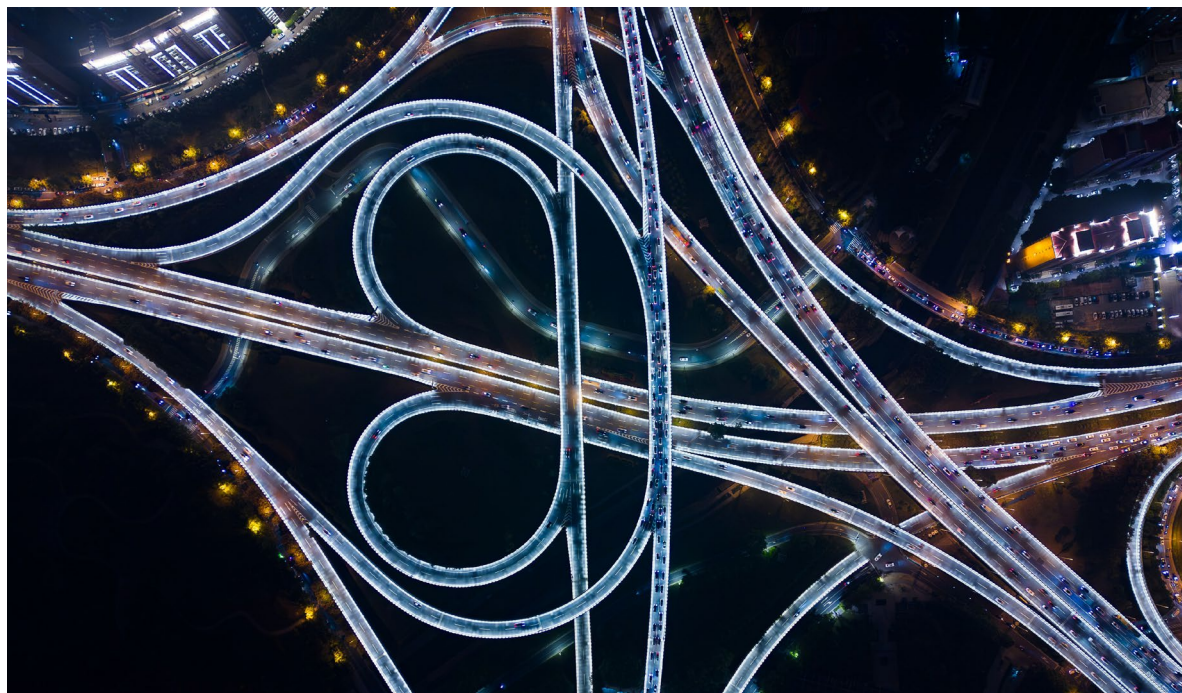
行动6: 协调废弃物管理立法

随着循环经济理论和实践的不断发展，中国的废弃物管理体系逐步完善，目标更加明确，结构日益健全。相关立法和配套政策在总体设计上有清晰的原则性指引，在未来的政策文件中建议强调各类循环经济路径的优先次序和层级划分，并提供具体的操作性清单和实施方案。例如，通过提升废弃物管理中资源化利用的优先级，减少对垃圾焚烧的政府补贴，避免资源再生企业需与焚烧发电企业“争抢”可回收物原料。

现行废弃物管理出台的法律包括了《循环经济促进法》、《清洁生产促进法》、《固体废物污染环境防治法》和《反食品浪费法》等。立法部门应加强各部法律之间的衔接和协调，建议适时修订《循环经济促进法》，确立其循环经济发展的基本法地位，明确废弃物管理的层级：遵循源头减量、重复使用、分类回收和资源化利用、末端处置的优先次序。在此基础上，针对包装、电子电器、废旧汽车等领域进一步完善相关的废弃物管理行政法规和部门规章。

5.3 完善低碳循环发展的激励机制

5.1和5.2小节阐述了推动循环设计和推动资源高效循环利用的行动路径，5.3着眼于建立扩大循环效益所需的市场机制和激励机制。经济激励政策在引导组织行为方面起着至关重要的作用。在资源日益稀缺和气候危机加剧的挑战下，政策制定者需要重新审视当前的激励机制，包括但不限于调整税收、发挥公共采购的杠杆效应以及支持中小微企业和非正规部门向循环经济转型。



行动7: 构建支持低碳循环发展的税收体系

改革税收体系对推动循环经济应对气候变化的市场机制具有重要意义，税收政策应逐步从对可再生资源的使用征税，转向对不可再生资源的消耗进行调控。例如，实施垃圾填埋税可以提高废弃物处置方式的成本，倒逼企业减少废弃物的产生并提升资源回收利用率。瑞典自2000年推出垃圾填埋税以来，显著减少了垃圾填埋量。若能结合特定类型废弃物填埋禁令，垃圾填埋税措施将进一步提升回收率，并有效降低废弃物处置过程中产生的温室气体排放。同时，针对原材料的使用，还可以通过征收材料税来鼓励企业更多地使用回收材料，减少对原生资源的依赖。比如，英国对回收物含量低于30%的塑料包装征税，推动了更多企业采用再生材料。增值税也可以用来支持循环经济的发展。通过对那些消耗大量资源且削减资源价值的活动（如采矿和资源密集型制造业）征税，同时减免对能够保持资源价值的活动（如重复使用、维修、再制造和回收）的增值税，政府可以进一步激励企业和消费者选择更具可持续性的行为。

中国碳排放权交易体系（ETS）于2021年年中正式投入运行。碳信用不仅应包含企业实际减排举措，还应包含避免碳排。例如，采用“产品即服务”（PaaS）模式的企业，通过保留产品所有权并提供订阅服务，可以延长产品寿命，减少对新产品的需求，从而在整个产品生命周期内避免不必要的碳排放。

行动8: 发挥公共采购的杠杆效应

定期更新绿色公共采购清单,根据产品节能环保性能、技术水平和市场成熟程度等因素,进一步扩大采购范围,使公共采购成为促进使用循环产品和服务的有力杠杆。例如,《关于扩大政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升政策实施范围的通知》在部分城市启动试点项目,推动公共建筑项目中使用可回收、可重复使用、高强度、耐用且环保的材料。引导企业执行绿色采购指南,鼓励有条件的企业建立绿色供应链,带动上下游企业协同转型,有效推动相关产业发展,对社会绿色消费起到积极引领作用。

行动9: 支持中小微企业和非正规部门向循环经济转型

中小微企业(MSMEs)占中国企业总数的98.5%,贡献了全国60%的GDP和75%的就业机会⁹⁰。而在循环经济领域,非正式部门提供了重要的就业岗位,特别是对女性而言。例如,越来越多的女性在中国担任垃圾分类的宣传员或分拣工,帮助增强公众的环保意识。然而,许多中小微企业,尤其是较小或分散的企业,因资源和能力有限,面临挑战。政策干预可以推动产业集群的发展,帮助中小微企业建立生态工业网络,实现企业间废料和副产品的循环利用,增强行业间的循环性并提升规模效益。

与此同时,融资难是中国中小微企业面临的普遍障碍。为支持这一转型,可建立多样化的灵活融资机制,包括公共投资、混合金融模式、需求导向的融资方式以及定向贷款计划。此外,提供职业培训可以有效提升企业的能力建设,而生产者责任延伸(EPR)制度则应设计得当,确保为废弃物回收和处理注入新资金,使非正规从业人员也能从循环经济转型中获益。



5.4 加强对科技创新、基础设施和技能提升的投资

推动循环经济发展，亟需有效整合公共和私人资本，支持创新、基础设施建设及技能提升。目前，虽然已有一些循环经济相关的产品和服务投入市场并取得积极反馈，但在材料使用、生产流程和供应链模式方面，仍有较大的创新空间。比如，多层材料包装和混合纺织物等产品，由于设计上未充分考虑可回收性和可重复使用性，现阶段难以实现经济可行的重复使用、回收再生或生物降解。要解决这些问题，不仅需要大规模的前期投资，还需持续的运营和维护投入，而这些领域的私人资本投入意愿尚未明确。此外，农业、建筑和耐用消费品等行业，特别是中小企业员工的技能和知识也需要进一步提升，以适配循环转型。政府在加快科技创新、推动基础设施升级和促进技能培训方面，应发挥积极引领作用。

为进一步推动循环经济，中国可借力当前的“新质生产力”发展战略，结合大规模设备升级和消费品以旧换新计划等政策，协同推进相关工作。国家主导的科研和技术创新，曾为互联网、可再生能源等技术领域的突破奠定了坚实基础。同样，对循环经济基础设施、产品创新、技能提升的投资也将为中国引领全球新一轮绿色科技革命提供坚实的技术支撑。这类投入不仅有助于循环产品和系统的设计推广（见5.1节），还将进一步完善高效的资源管理体系建设（见5.2节）。

行动10：

加大对循环经济关键技术研发投入

加大对循环技术研发的资源投入，推动构建更加智能的循环经济。利用物联网、大数据等先进数字工具，例如AI驱动的预测性维护和基于区块链技术的产品溯源优化管理。加强低碳转型技术，尤其是无损检测、增材制造和柔性加工等关键共性设备的研发，实现创新链与产业链精准对接。

重点关注材料科学领域的关键减碳技术，例如建筑领域的生物基复合材料和再生骨料、可堆肥塑料应用以及光伏电池板和风机叶片的关键金属精准分离。最后，建立基于全生命周期分析的循环利用技术综合评估筛选机制，探索特定种类固废在特定应用场景下的精细化利用技术研发，推进回收产业的规范发展。

行动11: 投资建设循环经济基础设施

对资源管理基础设施的战略投资是构建高效循环经济的物质基础。项目选址和建设应合理平衡集中式规模化发展与分散式便利化需求,确保系统高效运行。建议重点布局数字共享平台、维修与翻新中心、物流与回收设施,为可再生能源、交通出行、水资源管理、废弃物处理和农业等重点领域的低碳发展提供有力支撑。同时,整合厌氧发酵设施、电动车充电站和微电网等配套设施。

政府可以通过联合融资和直接投资等方式,鼓励公私合作,推动共享平台、逆向物流、废弃物收集系统及回收再生设施的建设。例如,厦门市政府与陆海环保公司合作建立低值可回收物分拣中心,为探索公私合作模式提供了有益实践。为实现效益最大化,建议将投资重点放在长三角和粤港澳大湾区等核心城市群,带动区域循环经济基础设施的建设与发展。

行动12: 构建循环经济碳减排核算评价体系

解决循环经济碳减排效益难以量化的挑战,需要建立一套科学的核算评价体系。首先,不宜过度泛化循环经济概念,明确核算边界和范围。其次,基于SMART原则设定具体目标,构建一套国际通用、科学合理、操作性强、系统全面的循环经济评价指标体系。另外,针对资源消耗数据尚未纳入日常统计、区域层面资源产出率核算难、资源产出率提升路径不清等问题,建立涵盖区域、行业、企业并贯穿供应链上下游的物质材料基础数据库,保障数据的可用性、可靠性和可比性,可加强平台公司和上市公司自愿性数据披露,鼓励披露循环经济减排的年度进展;具备条件的地区可以物质流分析为基础,建立主要资源的物质流账户,摸清资源生产和消耗底数。

各方应加强对话与合作,统筹推动循环经济活动减排标准的制修订,建立规范的碳减排评估标准,形成统一的核算框架、方法工具和核准机制。最后,发挥行业协会等非政府组织的作用,推动完善循环经济行业 and 产品的资源效率标识、标杆体系,推进国内标准与国际标准的接轨。

专栏三: 优化循环经济活动的碳排放核算方法

目前的温室气体 (GHG) 排放核算方式在一定程度上抑制了企业向循环商业模式转型的积极性。全球广泛使用的温室气体核算体系 (GHG Protocol) 正在进行更新。为确保循环经济活动的碳排放核算更加准确、公正,艾伦·麦克阿瑟基金会联合多家循环经济领域的领先企业,深入分析在核算循环经济活动碳减排效益时遇到的实际挑战。研究发现,现有核算方法可能导致排放计算不够准确、全面,对循环活动的减排效益评估不足。

基金会计划于2025年发布研究报告,并将其主要成果应用于GHG Protocol的更新工作。根据计划,GHG Protocol将在2025年推出标准和指南草案,公开征求意见,并于2026年下半年发布最终版本。

这次更新为完善核算体系提供了重要契机,有望更加有效地支持企业评估循环活动的碳减排成效。由于GHG Protocol的广泛应用,此更新预计将进一步促进循环经济模式的推广与普及。



5.5 合作推动系统性变革

要实现全面的绿色低碳循环转型，必然伴随着生产和生活方式的深刻变革，这需要多主体和跨部门之间的紧密合作，并在政策设计、实施和执行中融入系统性思维，形成以政府主导、企业为主体、社会组织和公众共同参与的多元治理格局。

鉴于中国的工业化和城市化进程仍在持续推进，循环经济的转型既面临独特机遇，也存在一些挑战。实践证明，政府主导与市场驱动相结合是推动中国循环经济发展的有效路径。实现循环经济与气候行动的有机结合，需要多部门协同努力，国家发展改革委和生态环境部可发挥关键的统筹协调作用。与此同时，工信、科技、商务、财政、交通、农业、教育等相关部门也需积极参与，共同推动这一转型进程。通过完善法律法规、加强政策支持和推动技术创新，多部门协同可以为循环经济的发展创造更加有利的环境。此外，广泛吸纳地方政府、企业和社区的参与，不仅能够增强集体应对挑战的能力，还能提升资源共享的效率。民众的广泛参与则有助于推动基层创新项目的实施和落地。

行动13:

以工业园区生态化发展带动价值链联动升级

中国在工业园区建设促进价值链上下游各主体合作共生方面积累了丰富的经验。中国工业园区的工业产值占全国的50%以上，碳排放占全国30%以上⁹¹。工业园区不仅是区域资源环境问题的产生地，同时也是解决这些问题的重要切入点。中国工业园区的一个显著特征是构建产业共生体系，将园区内一个生产过程中的废弃物或副产品转化为另一个生产过程的原料，使整个工业体系演化为一个资源循环流动的闭环系统，实现经济、环境和社会效益的统一。

建议依托国家生态工业示范园区、园区循环化改造、国家低碳工业园区等试点示范项目，加强园区物质流精细化数字化管理⁹²。首先，运用数字化技术，自下而上梳理园区内多产品、多元素、多层级的物质与能量代谢结构、路径和过程。其次，对园区生产活动的全生命周期环境影响进行定量分析。再次，提出协同降碳减污的措施，调控园区经济活动中的物质与能量流动，并持续进行优化和迭代。最后，创新制度机制，形成可复制、可推广的模式，并向国际社会，尤其是发展中国家，输出中国方案和中国经验，推动全球绿色发展合作。

行动14: 协同推进循环经济减缓和适应气候变化工作

与减缓相比,目前中国适应气候变化的政策和行动相对较少,这为在适应工作中融入循环经济提供契机。为了最大化循环经济与气候目标之间的协同效应,应着重解决科学证据不足这一问题。具体而言,需要加强关于模块化设计、再重复使用和回收等循环实践如何在减少排放的同时增强气候适应力的科学研究。政策制定者可推动在重点行业开展试点项目,并建立监测框架,跟踪减排和适应性效果。

同时,合理应对减排与适应之间的潜在冲突也同样重要。例如,建筑中使用的再生材料可能有助于减少碳排放,但如果管理不当,可能会削弱建筑的气候适应能力。因此,政策应结合情景规划,提前识别并平衡这些潜在的矛盾,以确保两者相辅相成。

行动15: 深化循环经济和气候治理的全球合作

在逆全球化趋势和日益紧张的地缘政治局势下,落实气候行动面临更大的不确定性。中国可将循环经济和气候治理放在国际交流与合作更加突出的位置,展现其向绿色低碳循环转型的决心和担当,并在全球循环经济和气候行动中发挥引领作用。中国可基于《中欧循环经济合作谅解备忘录》和《中美关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》等双边合作框架,分享在发展循环经济助力气候行动方面的中国经验、中国方案,同时借鉴全球最佳实践,进一步优化自身策略。具体行动包括组织专门的研讨会,探讨如何将循环经济融入应对气候危机的策略中,邀请政府官员、商业领袖和政策专家共同参与讨论等。

在多边合作层面,中国可通过“一带一路”绿色发展伙伴关系倡议、G20和《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)等国际平台,引领全球循环经济的进展。比如,在“一带一路”倡议下优先推广循环经济的解决方案,特别是在南南合作机制中发挥作用。在《联合国气候变化框架公约》框架下,中国可在新一轮国家自主贡献(NDCs)目标更新中,纳入全面的循环经济框架和措施,为全球落实气候行动作出更大贡献。

专栏四: 将循环经济纳入更新的国家自主贡献(NDCs)中

在《巴黎协定》的签署方中,有89个国家(占46%)将循环经济相关内容纳入其NDCs中,包括从废弃物管理到综合方法的一系列举措^{viii}。例如,中国的NDCs包括了以农业、工业实践和废弃物管理为重点的循环经济战略。

为了充分发挥循环经济在温室气体减排方面的潜力,中国可采取更加全面深入的循环经济策略。根据COP28全球盘点的结果,鼓励各国在2025年COP30之前提交更新的NDCs,包括修订2030年目标并设定2035年新目标。德国国际合作机构(GIZ)、联合国开发计划署(UNDP)和联合国气候变化框架公约(UNFCCC)等国际机构已经开发了多个工具和指南,支持循环经济战略在气候行动中的系统性纳入。中国可以通过组织跨领域研讨会,集合循环经济和气候变化领域的专家,促进共识的形成、观点的交流和行动的落实。

^{viii} 艾伦·麦克阿瑟基金会基于《联合国气候变化框架公约》和国家自主贡献(NDCs)的分析

致谢

艾伦·麦克阿瑟基金会对所有为本报告的撰写提供支持的各方深表感谢。我们谨向来自政策、产业、学术界以及非政府组织和智库专家致谢，感谢他们为本研究提供的专业见解和建设性反馈。需说明的是，研究中涉及的专家观点或对第三方机构的引用，并不意味着这些机构或个人与基金会之间存在正式合作关系，或代表这些机构或专家认可本研究的结论与建议。

张晓华 气候工作基金会中国项目资深主任

诸大建 同济大学经济与管理学院教授

郭占强 中国循环经济协会秘书长

么新 清华苏州环境创新研究院副院长

罗恩华 中国国际工程咨询公司环资部副主任

陈迎 中国社会科学院可持续发展研究中心副主任

童昕 北京大学城市与环境学院副教授

何平 能源基金会高级顾问

李威 落基山研究所中国建筑基建与供应链部门主任

李抒苒 落基山研究所中国重工业与循环经济部门主任

朱燕嵩 北京计鹏信息咨询有限公司技术总监

张荣琪 中国物资再生协会纤维复合材料再生分会秘书长

免责声明

本报告由艾伦·麦克阿瑟基金会和清华大学团队共同编写。报告和分析基于被视为可靠的数据和信息，并已尽最大努力确保内容准确。然而，基金会不对报告的任何内容（包括其准确性、完整性或适用性）作出任何声明或保证。报告中提到的产品和服务仅供参考，不代表基金会的背书。报告涉及的第三方内容及外部网站链接由读者自行访问，风险自负，基金会对此不承担任何责任。基金会、清华大学及其相关人员、实体、员工或指定人员不对因本报告或其中信息而导致的任何损失或索赔承担责任，包括但不限于利润损失、惩罚性赔偿或间接损害等。

© 艾伦·麦克阿瑟基金会，2024 年

尾注

- 1 McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.
- 2 Piero, M. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation & Recycling*, 153, 104553.
- 3 Potting, J., Hekkert, M. P., & Worrell, E. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL-Netherlands Environmental Assessment Agency.
- 4 Ellen MacArthur Foundation, Material Economics. (2021). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*.
- 5 中国循环经济协会. (2021). 循环经济助力碳达峰研究报告.
- 6 中华人民共和国自然资源部. (2017). 全国矿产资源规划 (2016—2020年) .
- 7 Bhawna, Kang, P.S., and Sharma, S.K. (2024). *Bridging the gap: a systematic analysis of circular economy, supply chain management, and digitization for sustainability and resilience Operations Management Research*.
- 8 Ellen MacArthur Foundation, (2022). *Building a circular supply chain*.
- 9 清华大学建筑节能中心. (2024). 中国建筑节能年度发展研究报告 (2024农村住宅专题) . 中国建筑工业出版社.
- 10 中国汽车技术研究中心. (2021). 中国汽车低碳行动计划研究报告2021.
- 11 杨来, 余碧莹, 冯辉. (2023). 电动汽车生命周期碳排放评估——以中国乘用车为例. *中国人口·资源与环境*, 33(05), 113-124.
- 12 国务院办公厅. (2022). “十四五”现代综合交通运输体系发展规划. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm
- 13 王海林, 何建坤. (2018). 交通部门CO₂排放、能源消费和交通服务量达峰规律研究. *中国人口·资源与环境*, 28(02), 59-65.
- 14 International Transport Forum. (2019). *ITF Transport Outlook 2019*.
- 15 中国汽车流通协会乘用车市场信息联席分会. (2023). 乘用车销量与预测. <http://data.cada.cn/main/newCar.do>
- 16 Wang F., Zhang S., Zhao Y., et al. (2023). Multisectoral drivers of decarbonizing battery electric vehicles in China. *PNAS Nexus*, 2(5): pgad 123.
- 17 国家统计局. (2023). 中国统计年鉴——2023. 中国统计出版社.
- 18 艾伦·麦克阿瑟基金会, 清华大学. (2022). 中国塑料包装产业循环经济发展战略研究报告.
- 19 OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*.
- 20 中国物资再生协会再生塑料分会. (2023). 中国再生塑料行业发展报告2023年度.
- 21 温宗国, 许毛, 李会芳, 胡宇鹏, 谭旖绮, 殷歌, 吴佳琪. (2022). 循环经济助力中国碳中和目标实现的潜力——以塑料、纺织及农业·食品领域为例. 清华大学.
- 22 国家发展和改革委员会能源研究所. (2016). 重塑能源: 面向2050年能源生产和消费革命路线图研究.
- 23 新华网. (2022). 装配式建筑渐流行: “工厂造零件, 现场拼房子”.
- 24 Fennell P., Driver J., Bataille C., & Davis S.J. (2022). Cement and steel - nine steps to net zero. *Nature*, 603, 574-577.
- 25 国家发展和改革委员会能源研究所. (2016). 重塑能源: 面向2050年能源生产和消费革命路线图研究.
- 26 中国政府网. (2021). 我国推进建筑垃圾治理和资源化利用. https://www.gov.cn/xinwen/2021-12/09/content_5659650.htm
- 27 Wang T, Li K, Liu D, et al. (2022). Estimating the carbon emission of construction waste recycling using grey model and life cycle assessment: a case study of Shanghai. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14): 8507.
- 28 Chen W, Sun X, Liu L, et al. (2022). Carbon neutrality of China’ s passenger car sector requires coordinated short-term behavioral changes and long-term technological solutions. *One Earth*, 5(8):875-891.
- 29 Chen W, Sun X, Liu L, et al. (2022). Carbon neutrality of China’ s passenger car sector requires coordinated short-term behavioral changes and long-term technological solutions. *One Earth*, 5(8):875-891.
- 30 哈啰. (2024). 2023年度可持续发展暨ESG报告.
- 31 Dong, J., Li, Y., Li, W., et al. (2022). CO₂ emission reduction potential of road transport to achieve carbon neutrality in China. *Sustainability*, 14, 5454.
- 32 Nakamoto, Y. (2017). CO₂ reduction potentials through the market expansion and lifetime extension of used cars. *Journal of Economic Structures*, 6(1), 17.
- 33 中国汽车流通协会. (2024). 二手车数据. https://www.cada.cn/Data/list_86_1.html
- 34 Cui J, Tan Q, Liu L, et al. (2023). Environmental benefit assessment of second-life use of electric vehicle lithium-ion batteries in multiple scenarios considering performance degradation and economic value. *Environmental Science & Technology*, 57(23), 8559-8567.
- 35 Geng J, Gao S , Sun X , et al. (2022). Potential of electric vehicle batteries second use in energy storage systems: The case of China. *Energy*, 253, 124159.
- 36 CLEPA. (2022). *European remanufacturing market study 2021*.
- 37 司法部官网. (2019). 报废车行业迎新政 市场劲吹改革东风. https://www.moj.gov.cn/pub/sfbgw/zcjd/201905/t20190508_390226.html
- 38 上海市再生资源回收利用行业协会. (2022). 我国报废机动车拆解产业发展展望. <http://www.sh-recycle.org/articledetail.asp?id=5179>
- 39 Hao H, Qiao Q, Liu Z, et al. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling*, 122,114-125.
- 40 华晨宝马. (2022). 开发“车轮上的移动矿山”循环利用电池原材料. <http://www.bmw-brilliance.cn/cn/zh/news/news/2022-5-25.html>
- 41 唐岩岩, 温宗国. (2023). 乘用车电动化转型下退役动力电池关键金属资源回收潜力评估——基于中国地级及以上城市数据. 海峡循环经济学术论坛.
- 42 Ellen MacArthur Foundation. (2022). *Strategies for dealing with flexible packaging in a circular economy*.
- 43 中华人民共和国国家发展和改革委员会. (2021). 持之以恒推动升级版“限塑令”落实. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztlz/slwrlzxd/202103/t20210331_1318984.html

- 44 Zheng J., Suh S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9, 374–378.
- 45 Ellen MacArthur Foundation. (2022). *Global Commitment Resources*.
- 46 太平洋环境资源中心. (2023). 从全球经验到行动路径: 让重复使用成为塑料危机的关键解决方案.
- 47 温宗国, 许毛, 李会芳, 胡宇鹏, 谭旖绮, 殷歌, 吴佳瑛. (2022). 循环经济助力中国碳中和目标实现的潜力——以塑料、纺织及农业·食品领域为例. 清华大学.
- 48 Centre for Research on Energy and Clean Air. (2024). Analysis: Clean energy was top driver of China's economic growth in 2023. <https://energyandcleanair.org/analysis-clean-energy-was-top-driver-of-chinas-economic-growth-in-2023/>.
- 49 Energy Institute. (2024). *Statistical review of world energy 2024*.
- 50 人民网. (2023). 中国风电产业走向世界市场.
- 51 Energy Institute. (2024). *Statistical review of world energy 2024*.
- 52 清华大学碳中和研究院. (2024). 中国碳中和目标下的风光技术展望.
- 53 International Renewable Energy Agency. (2024). *Country rankings: Renewable energy capacity and generation*. <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>
- 54 Det Norske Veritas. (2023). *Energy Transition Outlook 2023*.
- 55 Gielen, D. (2021). *Critical minerals for the energy transition*. International Renewable Energy Agency.
- 56 US Geological Survey. (2021). *Mineral Commodity Summaries 2021*.
- 57 International Energy Agency. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*.
- 58 World Bank. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*.
- 59 Yang, J., Meng, F., Zhang, L. et al. (2023). Solutions for recycling emerging wind turbine blade waste in China are not yet effective. *Commun Earth Environ*, 4, 466.
- 60 Wang C, Feng K, Liu X, et al. (2022). Looming challenge of photovoltaic waste under China's solar ambition: a spatial-temporal assessment. *Applied Energy*, 307, 118186.
- 61 国家发展和改革委员会能源研究所. (2016). 重塑能源: 面向2050年能源生产和消费革命路线图研究.
- 62 Yang, J., Meng, F., Zhang, L. et al. (2023). Solutions for recycling emerging wind turbine blade waste in China are not yet effective. *Commun Earth Environ*, 4, 466.
- 63 Heath G, Silverman T, Kempe M. et al. (2020). Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 5, 502–510.
- 64 中国物资再生协会风光设备循环利用专业委员会. (2022). 2022中国风电光伏设备循环利用产业发展报告.
- 65 Fang H, Feng Y, Wei X, et al. (2023). Wind turbine blade damage aerodynamic profile analysis and its repair techniques. *Energy Reports*, 9, 6,1-10.
- 66 李兴盛, 胡向然, 郑澍生等. (2022). 关于多晶硅金刚线切割工艺的光伏生命周期分析. *太阳能学报*, 43(03):147-151.
- 67 德毅隆. (2024). 聚氨酯光伏边框: 挑战传统, 引领绿色创新. 德毅隆光伏复合材料领导者. <https://mp.weixin.qq.com/s/2iyTVMupZQkXFWKhPKxLgQ>
- 68 Aboagye B, Gyamfi S, Ofosu E, et al. (2022). Investigation into the impacts of design, installation, operation and maintenance issues on performance and degradation of installed solar photovoltaic (PV) systems. *Energy for Sustainable Development*, 66,165-176.
- 69 Poulek V, Tyukhov I, Beranek V. (2023). On site renovation of degraded PV panels – cost and environmental effective technology. *Solar Energy*, 263, 111956.
- 70 Golroudbary S, Lundström M, Wilson B. (2024). Synergy of green energy technologies through critical materials circularity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114180.
- 71 Yang, J, Meng, F., Zhang, L. et al. (2023). Solutions for recycling emerging wind turbine blade waste in China are not yet effective. *Commun Earth Environ*.4.466
- 72 Liu B, Wang H, Liang X, et al. (2024). Recycling to alleviate the gap between supply and demand of raw materials in China's photovoltaic industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 201, 107324.
- 73 Platform for Accelerating the Circular Economy. (2022). Circular economy as a climate strategy: current knowledge and calls-to-action. <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/circular-economy-climate-strategy-current-knowledge-and-calls-action>
- 74 艾伦·麦克阿瑟基金会. (2023). 解锁适应潜力: 气候变化挑战下, 循环经济能做什么? . <https://ellenmacarthurfoundation.org.cn/articles/bridging-the-adaptation-gap-can-the-circular-economy-help>
- 75 Carissimi, M. C., Creazza, A., Pisa, M. F., & Urbinati, A. (2023). Circular economy practices enabling circular supply chains: An empirical analysis of 100 SMEs in Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 198.
- 76 Dunn J, Slattery M, Kendall A, et al. (2021). Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles. *Environment Science Technology*, 55(8):5189-5198.
- 77 Fishman T, Graedel T. (2019). Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows. *Nature Sustainability*, 2, 332–338.
- 78 Hu Z, Yu B, Liu L, et al. (2024). Evaluating rare-earth constraints on wind power development under China's carbon-neutral target. *Science of The Total Environment*, 912, 168634.
- 79 World Economic Forum. (2022). *Scaling Investments in Nature: The Next Critical Frontier for Private Sector Leadership*.
- 80 European Central Bank. (2023). The economy and banks need nature to survive. <https://www.ecb.europa.eu/press/blog/date/2023/html/ecb.blog230608-5cffb7c349.en.html>
- 81 Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2021). IPBES-IPCC Co-Sponsored Workshop on Biodiversity and Climate Change.
- 82 Ellen MacArthur Foundation. (2024). *Building Prosperity: unlocking the potential of a nature-positive, circular economy for Europe*.
- 83 Ellen MacArthur Foundation, Material Economics. (2021). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change (chapter 5)*.
- 84 FAO. (2024). *Sustainable Black Soil Management: A Case Study from China*.
- 85 Ellen MacArthur Foundation. (2021). *Universal Circular Economy Policy Goals*.
- 86 中华人民共和国国家发展和改革委员会. (2021). 循环经济发展空间大. http://www.ndrc.gov.cn/xwdt/gdzt/sswxhjzgh/202107/t20210716_1290604.html
- 87 GIZ. (2019). *Sustainable Urban Transport: Avoid-Shift-Improve (A-S-I)*.
- 88 Ellen MacArthur Foundation. (2024). *The marketing playbook for a circular economy*.
- 89 Ellen MacArthur Foundation. (2021). *Extended Producer Responsibility: a necessary part of the solution to packaging waste and pollution*.
- 90 OECD. (2022). *Financing SMEs and Entrepreneurs 2022*.
- 91 中华人民共和国商务部. (2018). 2017年国家级经开区综合发展水平考核评价结果发布. <http://www.mofcom.gov.cn/article/shangwubangzhu/201805/20180502742487.shtml>
- 92 清华大学. (2023). 中国工业园区绿色低碳发展报告(2023).



© 版权所有 2024 年
艾伦·麦克阿瑟基金会

www.ellenmacarthurfoundation.org

慈善机构注册编号: 1130306
OSCR 登记编号: SC043120
公司编号: 6897785