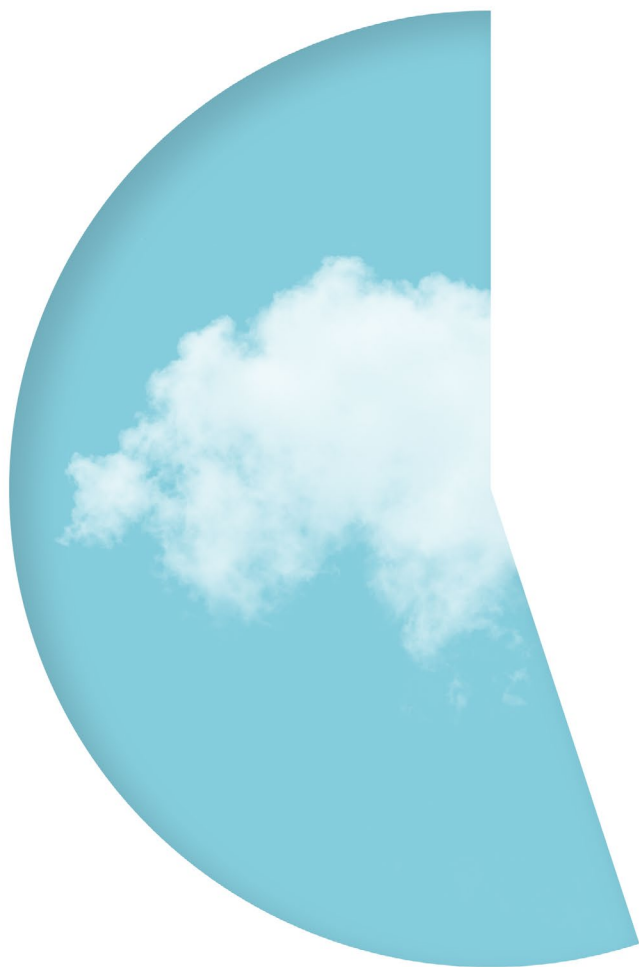
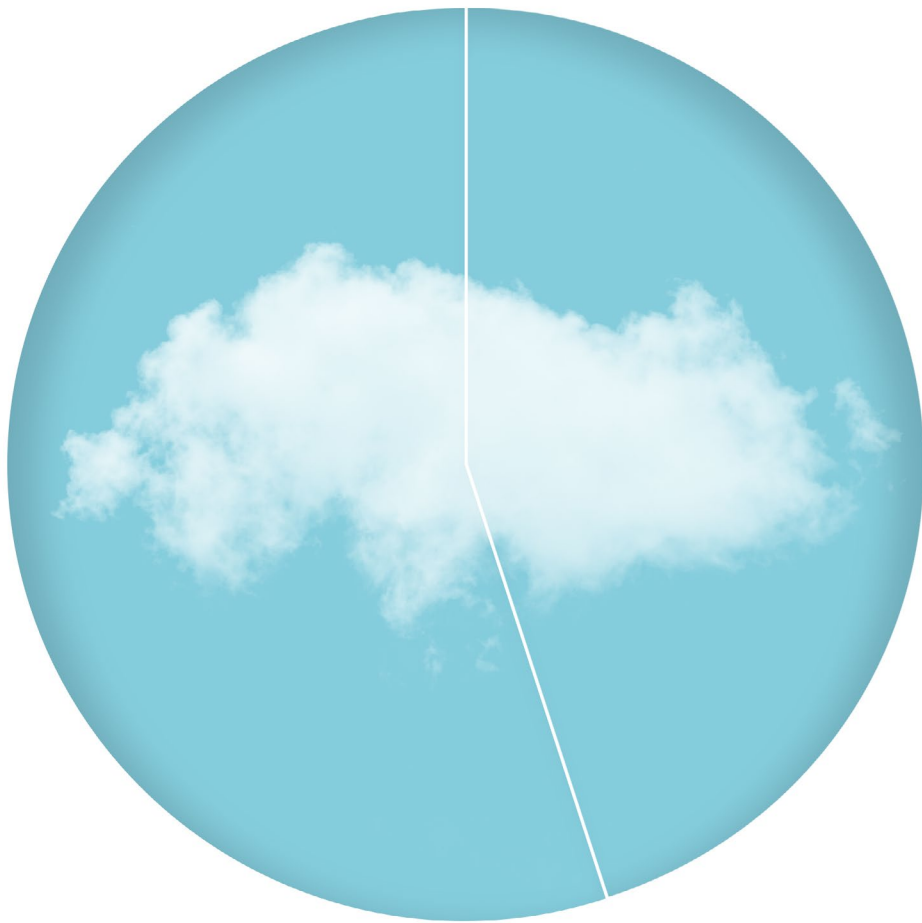


循环经济： 应对气候变化的另一半蓝图



MATERIAL
ECONOMICS



关于本文

《循环经济：应对气候变化的另一半蓝图》揭示了循环经济在应对气候危机中不可或缺的角色，并重点讨论了循环经济原则和策略的落实将可以明显减少温室气体排放。本文还对整个工业与食物系统进行了分析，以阐明循环经济原则在转变产品的生产和使用方式时所扮演的角色，以及这种转变拥有的减排潜力。文内相关观点借鉴了材料经济学公司（Material Economics）的两份报告：《工业转型 2050》（Industrial transformation 2050）（2019 年）和《循环经济——减缓气候变化的有力机制》（The circular economy: a powerful force for climate mitigation）（2018 年）。除此之外，本文也参考了艾伦·麦克阿瑟基金会（Ellen MacArthur Foundation）的《城市与食物循环经济》（Cities and circular economy for food）（2019 年）报告。初步研究成果显示，循环经济能够有效增加全球抵御气候变化的能力。本文探讨了这一研究成果，旨在启发对该领域的更深入的研究。最后，本文还制定了一系列明确的优先发展事项，呼吁各国政府、企业、投资者和学界在应对气候变化的同时，兼顾向循环经济的快速转型。

免责声明

本报告由艾伦·麦克阿瑟基金会团队编制，由材料经济学公司提供分析支持。艾伦·麦克阿瑟基金会就此报告不做任何代表陈述，也不提供任何保证。虽然报告中列举的数据和信息已在撰写过程中进行反复分析确认，并被视作可靠，但基金会或其任何雇员或任命人员均不对由于本报告包含的信息或是完整报告带来的任何性质的索赔或损失（包括但不限于利润损失、惩罚性损害或间接损失）负责。艾伦·麦克阿瑟基金会感谢各大组织机构极富价值的贡献。对本报告或其内容的贡献不代表贡献者与艾伦·麦克阿瑟基金会之间存在任何形式的伙伴关系或代理关系，也不等同于对其结论或建议的背书。

如需引用报告，请注明来源：

艾伦·麦克阿瑟基金会，《循环经济：应对气候变化的另一半蓝图》（2019 年）
www.ellenmacarthurfoundation.org/publications

致谢

核心项目团队

艾伦·麦克阿瑟基金会

Andrew Morlet, 首席执行官

Jocelyn Blériot, 国际机构与政府事务部执行主管

Clémentine Schouteden, 洞见与分析部执行主管

Soukeyna Gueye, 项目经理, 主笔作者

Nick Jeffries, “食物”章节作者

Ian Banks, 主编

Lena Gravis, 编辑

材料经济学公司

Per Klevnäs, 合伙人

Katarina Kahlmann, 副合伙人

Johan Haeger, 咨询师

制作

Sarah Churchill-Slough, 艾伦·麦克阿瑟基金会设计和品牌经理

Matthew Barber, 艾伦·麦克阿瑟基金会设计助理

Joanna de Vries, 康克出版社 (Conker House Publishing) 编辑

Caroline Harris, 校对

关于材料经济学公司 (MATERIAL ECONOMICS)

材料经济学公司 (Material Economics) 是一家总部位于斯德哥尔摩的管理咨询公司，致力于从企业策略、技术和政策角度研究可持续发展。该公司已与艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、欧洲气候基金会 (European Climate Foundation)、剑桥大学 (Cambridge University)、伍珀塔尔研究所 (Wuppertal Institute)、欧盟气候变化知识与创新团体 (Climate-KIC)、芬兰国家创新基金会 (SITRA) 等多家机构合作发表了数篇有关气候变化和循环经济的前沿报告。材料经济学公司拥有丰富的行业经验，在建筑、交通、包装、制造、化工和食品等各行各业推出了 100 多个与可持续发展相关的策略项目。在减少碳足迹、实现循环发展方面，为全球各大领先企业提供咨询服务。

更多信息详见: materialeconomics.com

MATERIAL
ECONOMICS

关于艾伦·麦克阿瑟基金会 (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION)

艾伦·麦克阿瑟基金会成立于 2010 年，致力于加速向循环经济的转型。自创立以来，基金会已成为全球思想领袖，并把循环经济推上了商界、政界和学术界的重要议程。基金会主要围绕以下七个维度开展工作：系统性倡议；洞见与分析；商业；政府、机构与城市；循环设计；教育；传播。

更多信息: ellenmacarthurfoundation.org • @circulareconomy



核心慈善基金会



全球合作伙伴



报告评赞

节制碳排放蕴含无限机遇，无论是对企业，对城市，还是对国家而言都是如此。减少碳排放是大势所趋。本报告为这一论调提供了数据支撑，并指明，只要携手共进，我们一定能优化脱碳进程，促进经济发展。

克里斯蒂安娜·菲格雷斯 (Christiana Figueres)，《联合国气候变化框架公约》(UN Framework Convention on Climate Change) 前执行秘书、Global Optimism 联合创始人

《循环经济：应对气候变化的另一半蓝图》与联合国国际资源委员会 (UN International Resource Panel) 所提出的“将经济增长与资源使用和环境影响脱钩”理念完全一致，并且相辅相成。本文发表后，成效显著的气候变化政策蓝图就完整了。

亚内兹·波托奇尼克 (Janez Potočnik)，联合国国际资源委员会联合主席、欧盟前环境专员

本文传递的信息可能出乎很多人意料。绝大多数人都认为，要想减缓气候变化进程，改变我们的能源体系是唯一解决之道。但其实，材料的选择与土地的使用也至关重要。钢铁、水泥、铝和塑料等材料贡献了碳排放总量的 20%，但人们对这些材料的需求仍在与日俱增。此外，我们每次犁地耕种时，土地中封存的碳也会被释放到大气中。幸运的是，这些问题并非无法解决。落实循环经济理念后，碳排放将得到控制，空气污染和水污染情况将得以缓解，成本也能得到节约！

安德斯·维克曼 (Anders Wijkman)，欧盟气候变化知识与创新团体 (Climate-KIC) 主席、罗马俱乐部 (Club of Rome) 荣誉主席

在各国携手探寻气候变化解决方案之际，本文的出现为公众对话提供了一个宝贵契机。为子孙后代打造一个稳定的气候环境固然艰难，但并非无法实现。世界各地的政府和企业在采取行动时可以参考本报告，以找到正确的出发点。

洪·詹姆斯·肖 (Hon. James Shaw)，新西兰气候变化部部长、统计部部长、财政部副部长、绿党联合领导人

该报告不仅证实了循环经济对实现气候目标的重要性，还列举了相关案例以阐明循环经济在节能减排中的独特作用。

卡罗琳娜·施密特·萨尔迪瓦 (Carolina Schmidt Zaldivar)，智利环境部部长

对政策制定者而言，总是问题太多，解决方案太少。循环经济能够帮助实现气候目标，并克服气候和资源方面的挑战，然而，其重要性并未得到所有人的认可。在这份重要的报告中，政府和企业将找到既能实现净零排放，又能促进经济繁荣和提升韧性的策略和途径。时不我待——这一转型应被纳入优先发展事项。

伊达·奥肯 (Ida Auken)，丹麦社会自由党议员、前环境大臣

气候变化与食物系统的韧性相互依存。前进的方向只有一个：推行基于健康且有韧性土壤的再生农业体系；增加碳储存；保护生物多样性和淡水资源；支持既能减少公共健康成本，又尊重生态环境的食物生产方式。上述模式可为自然环境带来正面影响而不会带来损害，因为一切始于土壤，又终于土壤。为了支持饮食习惯向着可持续的方向转变，我们已在法国和美国等地建立起多个合作伙伴项目，并发起多个倡议。我们迫切需要与所有利益相关方加强合作，以创新、经济、高效的方式寻找融资，打造面向未来的社会和气候解决方案。

范易谋 (Emmanuel Faber)，达能集团董事长兼首席执行官

我们（索尔维）正在调整资源使用方式，并努力地将增长率与碳排放脱钩，以实现 2025 年的绝对减排目标。我们呼吁业界同行加入这一行动，但即便如此，推行这一举措的企业仍寥寥无几。正如报告所示，循环经济是实现《巴黎协定》目标、为子孙后代打造美好家园的重要工具。

伊利哈姆·卡德里 (Ilham Kadri)，索尔维首席执行官

意大利联合圣保罗银行坚信，金融实力意味着更多的社会和环境责任。在这些责任中，加速推动循环经济转型，造福人类和地球是不可或缺的一环。不仅如此，此举也有利于实现《巴黎协定》中设定的气候目标。此外，它还能增强企业的韧性，释放新的商业机会。我们期待为欧盟委员会所提出的新《欧洲绿色新政》（European Green Deal）中做出积极贡献。

卡洛·梅西纳 (Carlo Messina)，意大利联合圣保罗银行 (Intesa Sanpaolo Bank) 首席执行官

作为艾伦·麦克阿瑟基金会的全球合作伙伴，DS Smith 公司支持文内所有循环经济建议，这些建议涵盖了方方面面，并合乎时宜。在减缓气候变化影响、遏制全球变暖进程方面，我们面临巨大的挑战。通过提高资源利用的循环性，实现能源的脱碳，企业和社会可以携手实现减排目标。本文强调，有 45% 的目标都可以通过广泛落实循环经济理念来实现。DS Smith 公司拥有一套稳健的循环商业模式，致力于不断重新定义包装，以适应瞬息万变的市场。我们使用有助于碳捕集的可再生资源；我们的纸和纸板产品在广泛应用后，还能实现高达 25 次的回收。

米尔斯·罗伯茨 (Miles Roberts)，DS Smith 集团首席执行官

本文提供了诸多与政策相关的论据，以探讨循环经济在应对气候变化方面的潜力。文内列举的案例既能阐明循环经济在减少全球温室气体排放方面的作用，又能说明其在增强应对气候变化韧性上的重要性。本文对政策制定者而言具有重大意义，能够引领我们迈向一个碳中和且可循环的未来。

萨丽安·蒂卡宁 (Sarianna Tikkanen)，芬兰环境部循环经济高级专家

在英国，无论是政府、企业还是社区，在应对气候变化方面的专长、承诺和投资都明确有力。在这方面，循环经济理念的落实是关键。因此，我们正在与志同道合的伙伴合作，加速推动“零废弃物”的实现，新加坡环境和废弃物资源部就是其中之一。正是由于这些国家和国际层面的努力，英国被提名共同主办《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方大会 (UNFCCC COP26)。本次大会也为英国带来了独一无二的机会，让其能在共同应对气候危机的行动中发挥关键作用。

卡拉·欧文 (Kara Owen)，英国驻新加坡高级专员

本文明确指出：循环经济是解决之道。要想实现 1.5°C 的目标，增强韧性，并且提升生活质量，实现循环发展是必经之路。转型迫在眉睫，我们要分秒必争。

玛丽·潘察 (Mari Panssar)，芬兰国家创新基金 (SITRA) 主任

推进循环经济发展和实现碳的净零排放双管齐下，将能更好地应对气候变化。在这方面，我们拥有无限机遇。在当前的经济体系中，很多资源都处于“取之即用，用之即弃”的状态。如果仅仅关注能源效率的提高和脱碳，并不足以应对挑战。材料经济学和艾伦·麦克阿瑟基金会合作撰写的这份报告表明，上述两种方法的结合有助于实现《巴黎协定》目标，并且增强经济系统的韧性。

马克·恩格尔 (Marc Engel)，联合利华供应链业务负责人

面对人类有史以来面临的巨大威胁，我们必须严谨深刻地审视我们的全部行为方式。好消息是，解决方案已然可见。本文传递的信息很明确：设计一套循环经济模式将能带来双赢局面，自然系统将更可再生，人类生活也会因此更加美好。

查德·弗里施曼 (Chad Frischmann)，递减减排项目 (Project Drawdown) 副总裁兼研究总监

人类对材料的无限攫取不仅导致了自然资源的枯竭，还给森林和生物多样性带来了诸多压力。众所周知，人类活动也是全球变暖和众多环境问题的一大始作俑者。有鉴于此，人们对交通领域报以重望也不无道理。雷诺集团知道现状的严重性，也一直致力于各种循环经济商业模式的发展。本文所述的循环再制造、为纺织品和战略性材料建立短链闭环，以及延长电动汽车电池使用寿命等，都是雷诺的关注点。雷诺的目标是在 2010 年至 2025 年间将每辆车的碳足迹减少 25%，这一目标也涵盖了所用材料的全生命周期。

让 - 菲利普·埃尔米纳 (Jean-Philippe Hermine)，雷诺汽车集团策略环境规划副总裁

谷歌于 2015 年正式成为艾伦·麦克阿瑟基金会的全球合作伙伴，共同致力于加速推进循环经济转型。事实上，早在 2019 年 7 月 29 日，世界就已经耗尽了 2019 年全年的自然资源预算，此后的每一天我们还一直在消耗本地资源储量，并源源不断地向大气排放远超于其吸收水平的碳元素。考虑到这种情况，我们应该愈发重视循环经济原则，认清其在解决气候变化问题上不可撼动的位置。我们认为，谷歌这样的全球领先企业应该承担起领导作用，努力改善人们生活，致力于减少甚至摆脱社会对原材料和化石燃料的依赖。我们坚信，这一愿景一定能被纳入商业模式中，带来经济回报、社会效益，以及积极的环境影响。本文在这方面作出了重要贡献。

麦克·沃纳 (Mike Werner)，谷歌可持续性和循环经济主管

如果我们不改变当前的服装生产和使用方式，那么未来将无服装产业可言。我们必须采取措施来推动整个行业的转型，这样才能有效应对气候危机。本文明确展示了向循环经济转型，以及“变废为宝”在大幅减少碳足迹上的作用。此外，本文也凸显了这些措施对减缓气候变化的重要性。

安娜·盖达 (Anna Gedda)，H&M 集团可持续事务主管

众多证据都显示，原材料的使用与气候变化紧密相连。然而，公众对这一点的认知似乎并不明确，对气候变化的应对措施也较为零散。要想解决这一问题，一个兼顾各方的解决方案不可或缺。循环经济必须被明确作为一种必经之路，系统性地嵌入应对气候变化的方案之中。

卡罗尔·莱蒙斯 (Carol Lemmens)，奥雅纳工程顾问公司 (ARUP) 总监及全球咨询服务主管

使全球经济与碳脱钩的同时提高全球应对气候变化的能力极少被兼顾。若想将气候危机带来的破坏程度降至最低，我们在部署应对措施时，除了系统性防治，还应增强适应能力。本文有力概述了循环经济方法在减缓气候变化、提升城市韧性的进程中扮演的角色。它还提出了一个潜在总体框架以支持这些举措的实施。

威尔·伯格勒 (Will Bugler)，Acclimatise 公司传播事务高级顾问

本文强调了两大观点：一是系统性方法至关重要；二是减排目标的实现离不开减轻气候影响和增强韧性的行动。

菲利普·塞尔伍德 (Philip Selwood)，节能信托基金 (Energy Saving Trust) 首席执行官、艾伦·麦克阿瑟基金会理事

目录

摘要	12
主要研究成果	13
1. 实现气候目标需要我们转变产品的生产和使用方式	14
1.1 应对气候危机刻不容缓：全球温室气体排放趋势仍在继续	15
1.2 若想实现气候目标，除了实施必要的能源转型外，还要从根本上改变产品的生产和使用方式	15
2. 循环经济对气候目标的实现至关重要	18
2.1 何为循环经济？	19
2.2 循环经济如何减少温室气体排放？	21
3. 工业体系循环经济机遇	25
3.1 降低工业排放的循环经济策略	26
3.2 要想进一步减少工业排放，还需更多干预措施	28
3.3 循环经济方法具有成本效益	28
3.4 循环经济方法能带来系统层面的效益	30
深度研究：建成环境机遇	31
深度研究：交通领域的机会	34
4. 食物系统循环经济机遇	37
4.1 降低食物系统排放的循环经济策略	39
4.2 要想进一步减少食物系统的排放，多项干预措施不可或缺	42
4.3 循环经济方法具有成本效益	43
4.4 循环经济方法具有全系统效益	43
5. 循环经济能够提升应对气候变化的韧性	45
5.1 气候变化会带来重大商业风险	46
5.2 循环经济能够提高各行业的韧性，从而应对气候风险	47
6. 乘胜追击：携手前行	49
附录	54
尾注	56

摘要

当前应对气候危机的蓝图并不完整。本文论证践行循环经济是实现气候目标的关键。现有的众多应对措施减排同时仍在延续攫取性的线性生产模式，但循环经济模式的建立能够突破这种局限。它不仅能够助力实现减排目标，还能兼顾增强韧性，以一种系统性的方式应对危机。这一做法有诸多益处，比如建设更加宜居的城市，在经济系统中进行更广泛的价值分配，以及激励创新等。综上所述，循环经济是推动实现净零排放和经济繁荣的有力推手。

全世界都已意识到气候危机的严重性，其影响也波及世界各个角落。全球变暖的罪魁祸首——温室气体排放源于“开采—生产—废弃”的线性经济模式。这种模式依赖化石燃料，在资源管理方面也较为粗放。若想让世界朝着《巴黎协定》中所规定的“到 2050 年前实现净零排放，以将全球升温控制在 1.5°C 内”的目标迈进，我们就必须做出根本性改变。即便实现了这一目标，到 2100 年，经济活动导致的气候变化相关成本预计也将升至 54 万亿美元。随着气温的进一步升高，这一数字还将急剧上升。毋庸置疑，这一挑战亟待克服。

目前，人们在应对危机时的关注点基本只集中在向可再生能源转型和能效提升方面。这些符合循环经济原则的措施固然重要，但它们只能解决 55% 的排放问题，剩下 45% 的温室气体都来源于我们的日常生活物品（比如汽车、服装、食物和其他产品）的生产过程。这不可忽视。循环经济可以通过改变我们生产和使用产品的方式，补全减碳蓝图。

为了阐明循环经济的巨大潜力，本文重点论述了循环经济策略在水泥、铝、钢、塑料及食物这五大关键领域的运用。成功落实将能消除前文所述的剩余 45% 温室气体排放中的一半。这一数字将在 2050 年达到 93 亿吨，相当于当前整个交通体系的温室气体排放量。

在工业领域，循环经济原则的运用可以表现为大幅提升建筑和车辆等资产的利用率，并回收用于制造这些资产的原材料。此举既能减少对钢、铝、水泥和塑料的需求，又能减少与生产相关的排放。在食物系统中，推广再生农业实践及在价值链的各环节避免废弃将有助于土壤对碳的捕集和储存，并消除食物浪费和副产品所产生的排放。

本文的另一大发现是循环经济还能增强我们应对气候变化的韧性。以材料为例，企业通过循环使用材料，可以让经济活动与易受气候风险影响的原材料消耗脱钩，从而更灵活。食物系统中，再生农业实践可以改善土壤的健康状况，使它能因此吸收和保存更多的水分，也能更加有效地抵御强降雨和干旱。更多相关研究将会更充分的展现其潜力。

除去从源头和结果两方面应对气候变化外，循环经济还能推进联合国其他可持续发展目标的实现，其中以 SDG12（负责任的消费和生产）最为明显。实践证明，循环经济可以帮助改善空气质量，减少水污染，并且保护生物多样性。其原则能为企业提供大量创新机会，帮助它们降低材料开支，提高资产利用率，并从容应对日新月异的客户需求。从上述讨论中我们不难看出，循环经济不仅是实现气候目标的路径之一，更是打造繁荣未来的有效手段。

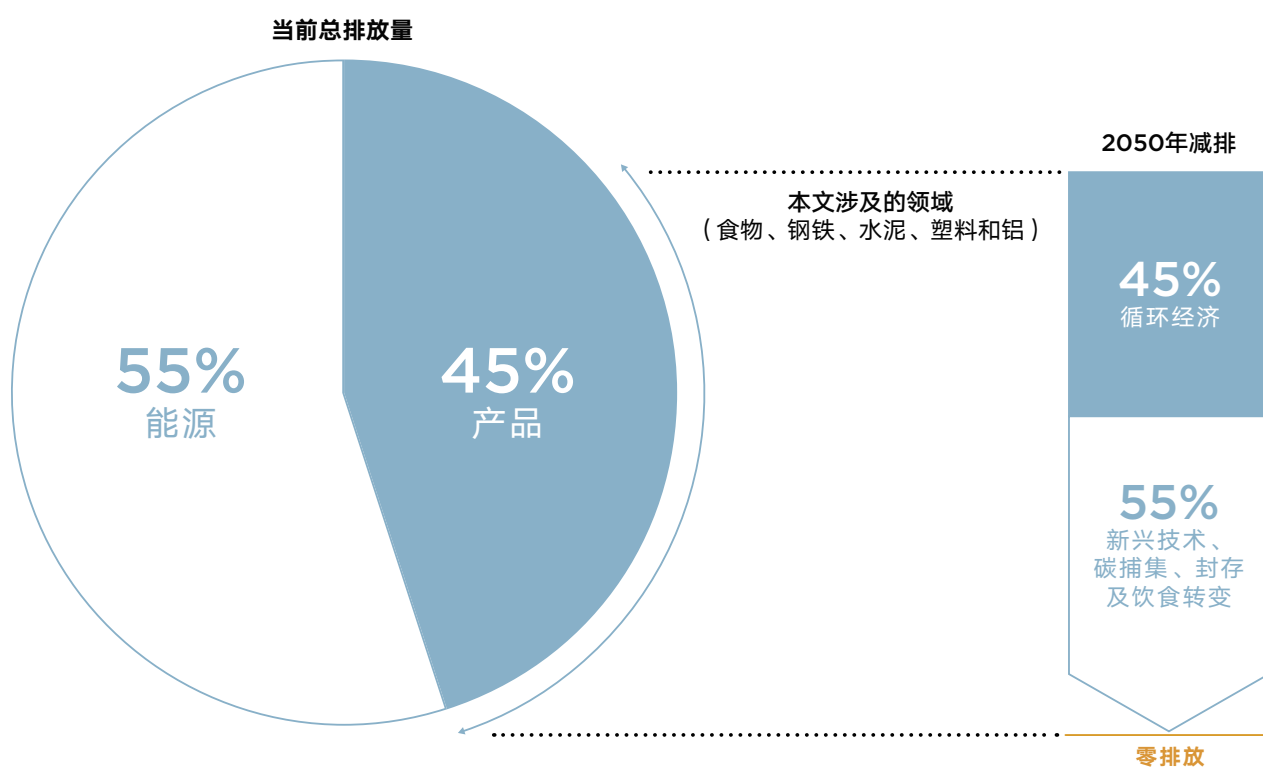
转型的成功需要各方齐心协力，单打独斗绝不是解决之道。国际机构可将循环经济纳入气候议程，并将其置于与提高能效和退耕还林等其他重要减排活动同等重要的位置。政府和城市相关部门可将循环经济原则纳入其气候策略；企业可以识别那些既能创造新价值，又能应对气候变化的机遇，并将这些机遇规模化；至于投资者，则可以将资本投向那些积极降低气候风险的企业。

一个繁荣的、零排放经济的完整图景正逐步清晰。当前的任务，就是让它成为现实。

主要研究成果

当前应对气候危机的行动集中在向可再生能源转型和能效提升。但是，要想实现气候目标，剩下 45% 来源于日常用品生产过程的排放也不容忽视。针对这一挑战，循环经济提供了一种极具成本效益的系统性方法。本文指出，若在水泥、钢铁、塑料和铝等四种关键工业材料上运用循环经济策略，则能在 2050 年前减少其 40% 的温室气体排放。若将循环经济策略运用到食物系统，这一比例则是 49%。总的来说，这些排放量的减少可将上述领域的向着其净零排放的目标推进 45%。

补全蓝图：关注被忽视的排放





1

实现气候目标 需要我们转变产品的 生产和使用方式

使用可再生能源可以减少全球 55% 的温室气体排放，但剩下的 45% 该何去何从？这些排放除了源自土地管理，还源自日常生活中建筑、车辆、电子产品、服装、食物、包装，以及其他产品和资产的生产过程，减排难度较大。

本文认为，循环经济能够改变产品的设计、生产和使用方式，由此实现减排目标。鉴于循环经济的基础是向可再生能源的转型，因此它所提出的气候危机应对方案也更加完整。

1.1 应对气候危机刻不容缓：全球温室气体排放趋势仍在继续

我们的“开采—生产—废弃”式线性经济高度依赖采掘，它会消耗大量资源，排放温室气体，引发气候危机。纵观产品的生命周期：企业从土地中开采原材料后，会消耗能源和劳动力生产产品，当终端用户不再需要该产品时，就会将其丢弃。这种线性方法高度依赖化石燃料，在使用土地、水和矿物材料等资源时，也没有遵循长期管理原则，过程中排放的温室气体还直接导致了全球气候危机。世界经济论坛称，气候变化是全球经济所面临的最重要的长期风险，无论是从发生的可能性还是经济后果的严重性来看均是如此¹。据估计如果2100年的气温真的升至工业革命前水平之上1.5°C，那么全球经济损失将高达54万亿美元。如果全球采取的应对措施力度不够，气温最终上升了2°C，那损失数额也会相应升至69万亿美元²。

在2100年前，将全球气温上升控制在1.5°C以内的愿景似乎仍然遥不可及。尽管有195个缔约方都签署了联合国于2015年通过的《巴黎协定》，也在陆续推出各种行动，但联合国2018年的一份报告显示，各国若是继续当前国家自主贡献（NDC）中所设的目标，到2030年，全球排放量将会比1.5°C目标对应的排放量水平高出290~320亿吨，远超历史水平³。目前，排放量仍未显示出任何到达巅峰的迹象。如果我们不对当前能源体系做任何调整，很可能到了2100年，全球气温会升高3°C，甚至可能是4°C⁴。

强有力的经济趋势仍在推动着全球温室气体排放的稳步上升。新兴经济体中快速推进的工业化ⁱ进程，以及发达经济体中的大规模消费是这一趋势背后的主要推手。这一趋势在未来还会继续。预计到2050年，全球人口将增长至100亿。据预测，新兴市场中日益崛起的中产阶级在全球消费中所占份额将翻一番，从原来的三分之一增加至三分之二，而世界经济总量则预计将翻两番⁵。除了造成远超碳预算ⁱⁱ的温室气体排放，这些经济活动的后果可能会远超环境承载力，危及人类福祉，并加剧生物多样性的丧失。事实

上，最近的研究表明，大约有100万种动植物已经濒临灭绝，而气候变化是主要诱因之一。特别值得一提的是，90%以上跟土地和水相关的负面影响（如水资源短缺和生物多样性丧失）都是由资源开采和加工带来的，其中农业是主要驱动力⁶。

要想在2050年前实现净零排放的目标，我们就必须在能源、工业、土地、建筑和基础设施等方面快速出击，采取协调一致的行动来推进系统性变革。这样才能将全球升温控制在1.5°C以内，或只超过规定水平一点点⁷。据估计，与继续当前模式相比，各国制定的国家自主贡献政策只能在2030年前将全球二氧化碳排放水平减少30~60亿吨。因此，为了实现1.5°C所对应的减排目标，各国必须将其现有国家自主贡献水平提高5倍⁸。

1.2 若想实现气候目标，除了实施必要的能源转型外，还要从根本上改变产品的生产和使用方式

能源的脱碳至关重要，并亟待加速。在使用可再生能源的同时提高能源效率对此至关重要，且能在2050年前减少90%以上与能源相关的二氧化碳排放⁹。在全球三分之二的地区，风能、太阳能和电池技术的成本都比化石能源低，这就为风能和太阳能在2050年前成功占据全球电力市场半壁江山（>60%）提供了机会¹⁰。以“power-to-x”解决方案为代表的新兴技术层出不穷，这就表明碳中和的能源体系具备改变行业游戏规则潜力。该体系能将过剩的可再生能源转化为天然气或液体电子燃料储存起来，供日后使用¹¹。然而，投资向这类项目的速度还有待提升¹²。要想实现1.5°C的气候目标，就需要让年脱碳率达到11.3%，也就是当前脱碳率水平的7倍。能源体系中的累计投资必须增加30%左右，可再生能源的规模化必须以6倍的速度增长，电力在能源总量中的比重需要翻一番，化石燃料方面的投资必须大幅缩减¹³。

i 约80%的二氧化碳排放量是由工业化带来的，剩余排放则由土地使用（如森林砍伐）造成。Stephenson, J., Newman, K., 和 Mayhew, S., 《公共卫生杂志》（Journal of Public Health）, Population dynamics and climate change: what are the links? 《人口动态和气候变化之间有何联系?》（2010年）

ii 碳预算是指基于国际商定的全球气温升高水平计算得出的世界范围内能够排放的二氧化碳总量。

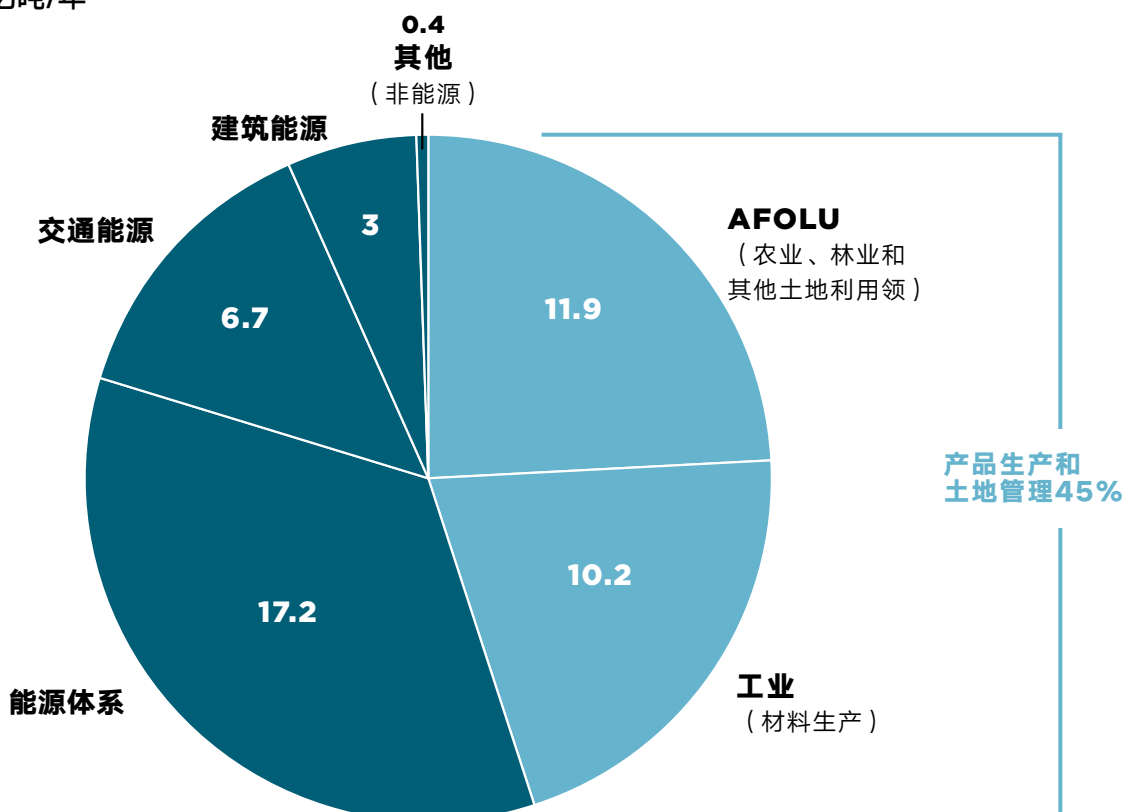
产品的生产和使用方式也迫切需要调整。能源体系ⁱⁱⁱ，以及建筑、交通中的能耗合计要占全球温室气体排放的 55%，剩余的 45% 则与产品生产和土地管理直接相关^{iv, 14}。国际资源委员会（IRP）最近发表的一份报告也得出了类似

结论^{v, 15}。工业以及农业、林业和其他土地利用（AFOLU）是两大主要排放领域，各排放了全球约四分之一的温室气体¹⁶。

图 1：全球有 45% 的温室气体排放都来源于材料、产品、食物生产和土地管理

全球温室气体排放（2010年）

单位：10亿吨/年



注：图中“工业”和“AFOLU”模块包括其自身的能源相关排放，但不包括电力生产和供暖导致的间接排放。资料来源：IPCC，“IPCC 第五次评估报告（IPCC’s Fifth Assessment Report (AR5)）（AR5）”和材料经济学公司分析。

iii “能源体系”是指电力和热能的生产，以及燃料的提取、提炼、加工和运输。

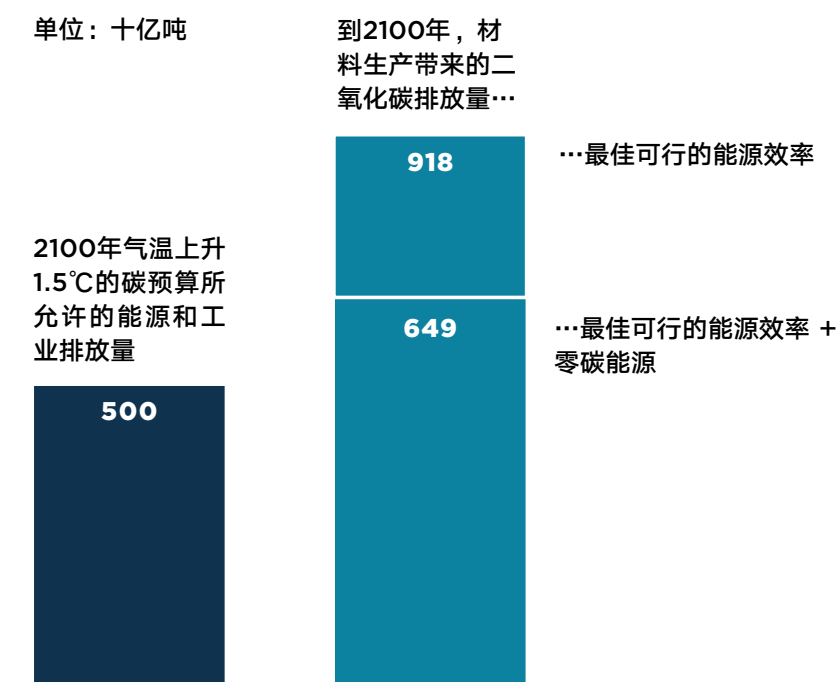
iv 45% 这一数字包括在能源设施中燃烧的化石燃料。

v 国际资源委员会（IRP）的计算结果显示，资源开采和加工约占温室气体总排放量的一半。其研究结果之所以与本文所列数据存在差异，主要是由于两者研究范围不同。IRP 报告着眼于材料、燃料和食物等资源（不包括与土地使用相关的气候影响）。而本文所称的 45% 排放量包括产品生产和土地管理，但不包括燃料的提取、精炼、加工和运输。国际资源委员会（IRP）和联合国环境署（UNEP），Global resources outlook 2019: natural resources for the future we want（《全球资源展望 2019：自然资源与我们想要的未来》）（2019 年）

工业和食物系统若得不到调整，气候目标将难以达成。到 2050 年，全球对钢铁、水泥、铝和塑料等工业材料的需求还将上升二到四倍，而全球粮食需求则预计将增长 42%^{vi}。这些需求的增加将对温室气体排放产生重大影响。虽然已有提高能效和零碳能源等极具雄心的策略相继出台，但数据显示，到 2100 年，仅是钢铁、水泥、铝和塑料生产带来

的累计释放二氧化碳都会达到 6490 亿吨。因此，工业和能源排放必定会超过 4200 ~ 5800 亿吨这一达到 1.5°C 的碳预算水平（该值域的中间点见图 2）。与此同时，食物生产所带来的温室气体排放预计会在 2050 年前上升 35%。除非采取干预性措施，否则实现气候目标的可能性将更加微乎其微^{vii}。

图 2：即便使用可再生能源，并且提高能源效率，到 2100 年前，材料生产仍会带来 6490 亿吨的二氧化碳排放



资料来源：Tong, D. 等, *Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target* (《现有能源基础设施的排放将危及 1.5°C 的气候目标》), 《自然》(Nature) 杂志 572, 373-377 (2019 年); 材料经济学公司, *The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation* (《循环经济——减缓气候变化的有力推手》) (2018 年)

工业和食物系统中的排放问题尤为复杂。工业领域对材料的需求在不断增长，但全球在可再生能源的使用上仍旧进展缓慢，工艺改进也效果甚微，这就使得在 2050 年前将排放量降至净零变得难上加难¹⁷。在食物系统中，减排问题也令人一筹莫展。毕竟，这需要数十亿食物消费者和数亿食物生产者改变他们的消费和生产习惯，并使复杂的食物供

应链实现脱碳。综上所述，在实现总体净零排放的路上，工业和食物系统是主要挑战¹⁸。因此，寻找途径来解决这两大领域的减排难题，对于实现气候目标至关重要。

vi 全球粮食需求增加数据源自联合国粮食及农业组织 (FAO) 食物篮发展估算 (按基准年调整)，估算中假定饮食结构不发生变化。

vii 该估算基于粮食产量的预期增长 (42%，2013—2050 年)，其中已将农业生产率的预期提高纳入考量。艾伦·麦克阿瑟基金会, *Cities and circular economy for food: technical appendix* (《城市与食物循环经济：技术附录》) (2019 年)



2

循环经济对气候目标的实现 至关重要

有了循环经济后，应对气候危机的蓝图终于完整。它既能推动可再生能源的发展，又能改变产品的设计和使用方法。循环经济的主要策略有：减少各价值链上的温室气体排放，实现材料和产品的循环利用以保存其所蕴含能源，提升土壤和产品的碳封存能力。

要想实现气候目标，整个经济的运行方式及价值创造方式都要进行根本性转变。这就要求我们从当前的“取之即用，用之即弃”的线性经济模式转向以再生和恢复为基础的经济

模式。它代表着一种系统性的转变：在这个新的经济体系中，生态得到修复，能源皆可再生，材料安全并越来越多地来自可再生资源，废弃物也因优化的材料、产品和商业模式而避免。循环经济重点关注广泛整体效益，它重新定义了价值创造，为社会提供了一个积极的发展方向。这样一来，它不仅解决了当前体系的缺陷，还为企业和社会创造了新机遇。但最重要的是，循环经济原则能以一种独特的方式来从供给端应对气候危机：充分使用产品和材料，以封存其所蕴含的

能源；促进自然系统再生，增加碳封存。艾伦·麦克阿瑟基金会此前关于欧洲、中国和印度的研究显示，若各国成功在建成环境、交通、食物、电子电器和纺织品等领域落实循环经济原则，那么到 2050 年，温室气体排放水平与延续现行发展途径相比，将会减少 22% ~ 44%^{viii}。

除了减少温室气体排放外，循环经济还能带来多种系统层面的效益。从物质层面来看，它代表着数万亿美元的经济机遇；从社会和环境层面来看，它能让人们更易获取产品，享受更好的出行方式，与他人更好地建立联系，并且降低空气污染。在实现这些效益的同时，循环经济还能帮助我们应对本世纪的其他重大挑战，包括生物多样性的丧失、资源稀缺、废弃物管理等。因此，从某种意义上来说，循环经济也是我们实现联合国可持续发展目标（SDG）的一种手段。事实上，循环经济通过促进负责任的消费和生产（SDG12），以及建立资源智慧型食物系统，将至少推动实现联合国《2030 年可持续发展议程》（2030 Agenda for Sustainable Development）中的 12 项可持续发展目标（共计 17 项）¹⁹。

2.1 何为循环经济？

循环经济是一种旨在造福企业、社会 and 环境的系统性经济发展模式。相较于“取之即用，用之即弃”的线性经济模式，循环经济的目标是让经济增长不再依赖于有限的资源，转而打造更加坚韧的经济、自然和社会资本。循环经济的基础是向可再生能源的转型，并增加可再生材料的应用。循环经济理念认识到了使不同规模经济体皆能有效运作的要义。这就意味着，企业无论规模大小，政府机构无论层级高低，居民无论生活在哪里，都应积极地参与到经济活动中，并且密切合作。这种分布式、多样化和包容的经济体将更容易建立起一个循环经济模式，并共享其效益。

循环经济基于以下三大原则：



从设计之初避免废弃和污染



延长产品和材料的使用周期

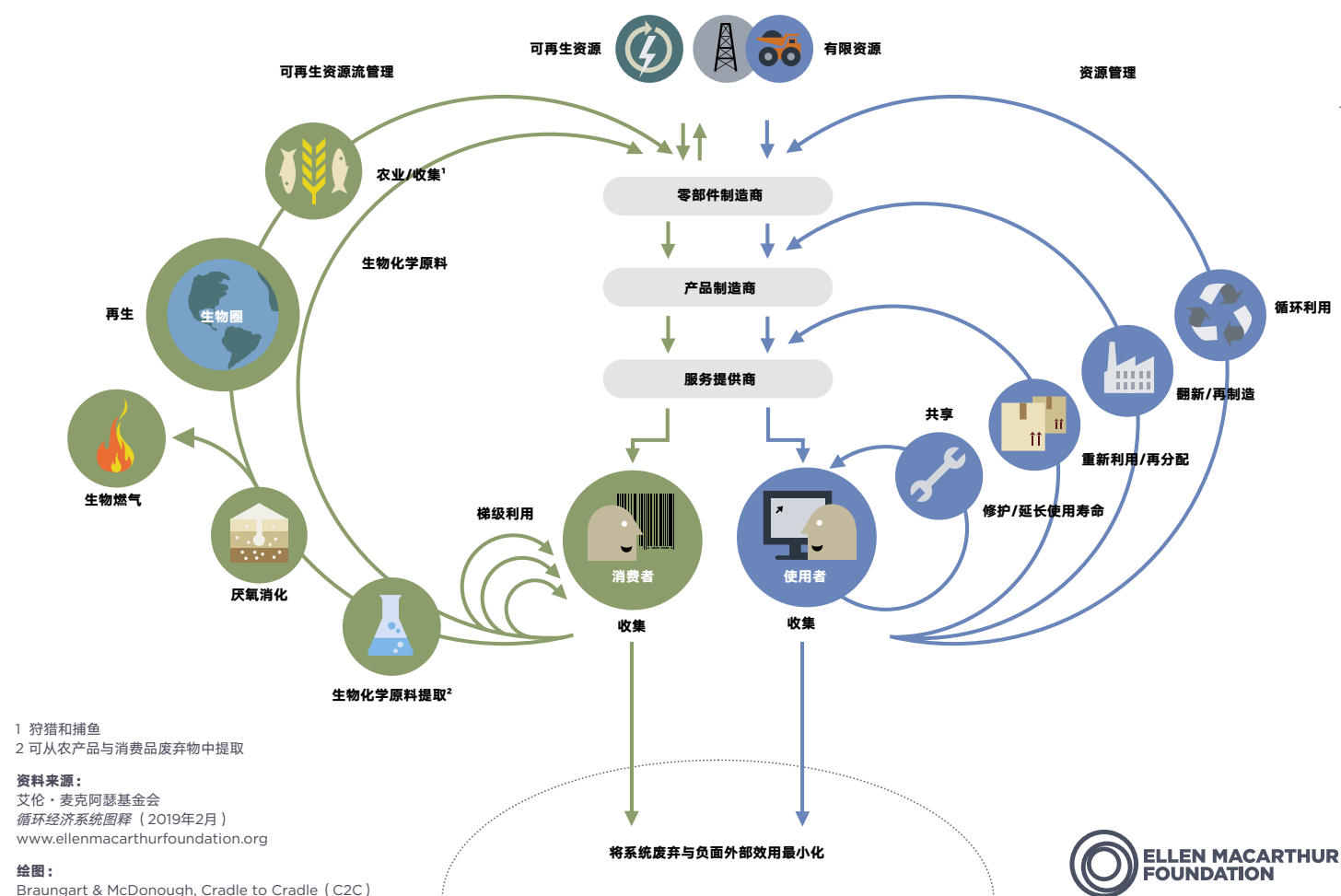


促进自然系统再生

该系统对技术循环与生物循环进行了分开讨论（见图 3）。生物循环中，食物和生物基原料（如棉花和木头）制成的产品会通过堆肥处理和厌氧消化等过程被重新注入系统。这些循环会重新滋养土壤等生命系统，为经济提供可再生资源。技术循环则能通过重新使用、修复、再制造和（最终）回收等手段修复及重建产品、组件和材料。数字技术带来的虚拟在线平台，提升的透明度和反馈机制能从根本上支持向循环经济的转型。

viii 艾伦·麦克阿瑟基金会利用这些发现对欧洲、印度和中国进行了情景式分析。这些报告在探讨循环经济机遇时，不仅着眼于物质需求的减少，还考虑了能够直接减少能源需求，刺激可再生能源使用的机会。艾伦·麦克阿瑟基金会、SUN 和麦肯锡商业与环境中心（McKinsey Center for Business and Environment），Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe（《内部增长：循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》）（2015 年）；艾伦·麦克阿瑟基金会，Circular economy in India: rethinking growth for long-term prosperity（《印度的循环经济：反思长期繁荣增长》）（2016 年）；艾伦·麦克阿瑟基金会和奥雅纳工程顾问公司，The circular economy opportunity for urban and industrial innovation in China（《循环经济——中国城市与工业的创新机遇》）（2018）

图 3: 循环经济系统图释



2.2 循环经济如何减少温室气体排放？

利用循环经济原则改变产品和材料的生产和使用方式将极大地减少温室气体排放。三大原则归纳如下：



从设计之初避免废弃和污染
来减少温室气体排放

延长产品和材料的使用周期
来保留其蕴含能量

促进自然系统再生
来通过土壤和产品储存碳

这三大循环经济原则之中是一套重要的减碳策略。下文将更加详细地介绍这一系列策略如何实现循环，以及它们将如何减少温室气体排放。

1/ 从设计之初避免废弃和污染

循环经济在设计之初，就避免了经济活动会对人类健康和自然系统带来的负面影响。这些负面影响包括：排放温室气体和有害物质，污染空气、土地和水，建筑物和汽车的不充分利用带来的结构性浪费等。在这一原则内，有三大主要策略可以用于减少温室气体的排放。



循环设计

在所有极具雄心的循环经济计划中，设计都扮演着关键角色。它对消除负面影响，确保产品和材料在生产之初就以长期使用和 / 或促进自然系统再生为目的而言尤为重要。以食物为例，在设计餐食和产品时，以过剩食物或食物副产品为原料可以避免浪费，并且保存食物原料中所蕴含能量。但是，很多产品可能包含有害成分，导致这些产品或其副产品无法成为下一轮循环中的原料。因此，在产品的设计环节，还应考虑杜绝某些有害物质的使用。例如，大多数塑料包装都只供一次性使用，最终的下场是填埋、焚烧或流入自然环境。而混合和降级影响又会阻碍塑料的回收利用，使得大量使用后塑料毫无价值。除非从根本上对塑料进行创新再设计，否则 30% 左右的塑料包装将永远无法重复使用或回收²⁰。如果美妆、个人护理和家庭清洁领域都能使用“重新填充”的瓶身设计，与传统一次性产品相比，节省下的包装和运输成本将意味着减少了 80% ~ 85% 的温室气体排放²¹。为了增加产品、部件、材料 / 营养物质的循环利用，早在产品设计阶段就应纳入循环经济原则，开发新的循环经济商业模式，实现高价值回收。这种模式下的产品具备易拆卸、模块化、维修方便、灵活可调且可生物降解的特性，并能够进行重复使用、再制造、翻新及再生。



杜绝浪费

设计可在杜绝浪费中起到关键作用：通过设计提高材料使用效率，可以减少原材料的投入；而通过设计优化供应链，则可以减少废弃物的产生；两者都能有效降低每一美元 GDP 所消耗的能源和材料量。论及产品和资产的节约，方法之一便是减少规格超标^{ix}。很多现有施工项目所使用的钢材都比实际需要多出 35% ~ 45%²²。另一个减少浪费的良方就是对产品按所需进行定制化设计。例如，平均来看，欧洲汽车有 92% 的时间都处于未使用状态，即便是在使用中，一辆 5 座汽车也只利用了 1.5 个座位²³。想要提高利用率，应该按照使用目的来设计商业模式和产品。例如，许多用于共享的汽车可能并不需要 4 个座位，能够满足 1 ~ 2 人市内出行需求的小型汽车可能更加适用。除了产品本身，整个系统也能通过设计杜绝浪费。以供应链为例，如果生产过程中的材料损耗能被降至最低，就能最小化废弃物的产生。比如，每年有一半的铝材都因得不到有效利用而成为废品，而建筑施工中材料的损失率几乎高达 15%。在食物生产中，有 24% 本应被人类所利用的热量都会在价值链的某个环节损失或浪费掉²⁴。流程优化和 3D 打印等新兴技术与措施也能减少生产过程中的废弃物，温室气体排放量也会相应减少。

ix 合乎经济原则的思考是规格超标的主要原因之一，即为了减少劳动力成本而提供超过规格的材料。由于人们十分关注成本，并且致力于提高流程效率，因此，某些特定的设计可能会得到重复利用，从而带来材料的节约。Moynihan, M. J. 和 Allwood, M., Utilization of structural steel in buildings (《结构钢在建筑中的应用》)，见西文过刊全文库《论文集：数学、物理学与工程学》(Proceedings: mathematical, physical, and engineering sciences) (2015 年)



替换材料

材料的替换是指在生产中不再使用全新的原材料，而是使用可再生的低碳材料或是二次原料。这样一来，既能满足产品的功能需求，又能降低排放。与难以实现零排放的很多原材料相比，可再生材料的使用意义非凡，因为它可以使碳与产品本身相结合，并且充当碳汇。某些生物基塑料的碳排放为负值。例如，每生产 1 千克生物基聚乙烯（PE），相当于减少 2.2 千克二氧化碳当量，而每生产 1 千克化石基聚乙烯，相当于排放 1.8 千克的二氧化碳当量²⁵。使用可再生材料时，保证其来源管理的可持续性也很重要。以木材为例，如果它们来源于非法伐木，那大量的天然碳汇便会遭到破坏，生物多样性会丧失，并且难以轻易恢复²⁶。因此，在使用木材前，最好事先确认它们来源于可持续管理的人工林。如果在建筑工程中使用的木材资源来源于非法伐木，其危害程度甚至远超低碳材料可以带来的好处²⁷。竹子是一种生长周期较短的可再生材料。无论是竹子本身，还是竹制产品，每年每公顷都能封存 2.6 吨的碳，而且竹子还具备混凝土的抗压强度和钢的抗拉强度²⁸。新型木材技术是另一大有力例证。除了具备碳封存能力外，它们还有望省下建筑材料中 62% 的矿产资源使用量²⁹。

除了可再生材料外，其他低碳材料也可作为备选的替换材料，如二次原料（如再生材料）、高性能材料（可以降低原始材料投入要求）或具备重复使用属性的材料（如可回收性和耐用性）。水泥虽然只占混凝土总成分的 7% ~ 20%，但从排放的角度来看，它的贡献最多，碳足迹占比高达 95% 或更高³⁰。理论上来说，可以用性能相同且二氧化碳排放量较少的高级填料来替换 50% 的水泥生产所需的熟料（黏结剂）³¹。在食物方面，选择和使用生产过程中碳排放水平较低的原料（如在植物原料和动物原料中倾向于前者），或是具备碳封存能力的原料（如多年生作物比一年生作物的碳封存能力强），则有望为人们带来更多低碳、零碳或碳益的产品和膳食选择。

2/ 延长产品和材料的使用周期

循环经济青睐能够保存能源、劳动力和材料价值的经济活动。这意味着物品在设计之初，就应注重耐用性、重复使用性、再制造性和可回收性，这样才能保证产品、零部件和原料能在经济体内循环。为了确保生物基原料的有效利用，循环系统会确保营养元素在回归自然系统之前能够得到最大化利用，充分实现其经济价值。该框架提供了两个关键策略，其主要成果就是在产品和材料中保存其所蕴含能量：



重复使用产品和部件

重复使用的目的之一就是充分保存产品、部件和材料生产过程中所消耗的能源及其他宝贵资源。产品的利用程度越高，资源的使用效率就越高，节省的材料、劳动力、能源和资本等其他资源也就越多。此外，重复使用产品和材料还能避免新材料生产与报废处理带来的温室气体排放。综上所述，重复使用商业模式能在投入更少原材料、排放更少温室气体的情况下实现相同的社会效益。例如，可以重复使用 20 次以上的 Splosh 洗发水瓶能够减少 95% 以上的材料消耗，这就大量减少了包装生产过程所需的能源³²。在服装领域，如果将每件衣服的穿着时间延长一倍即可避免废旧衣物价值的流失，就有望避免 44% 的温室气体排放³³。雷诺汽车集团用于零件再制造的 Choisy-le-Roi 设施就成功实现了 80% 的能源节约，这些都是避免重复生产和避免报废处理（如焚烧）带来的结果³⁴。



再循环材料

材料再循环是指在技术和生物两个层面实现材料的回收利用。实现了这一点后，新材料的生产就可以相应减少，废弃物也不需要利用焚烧和填埋等手段进行处理，并由此减少温室气体排放。当然，增加产品利用率、延长产品使用寿命也能保存其所蕴含的能源，但与原始材料的生产相比，回收活动在能源消耗上还是要略胜一筹。例如，钢铁回收所需能源仅为原生钢生产所需能源的 10% ~ 15%³⁵；回收 1 吨塑料与使用化石原料生产 1 吨塑料相比，则少排放 1.1 ~ 3.0 吨的二氧化碳当量³⁶。不难看出，回收不仅能够减少能源使用带来的排放，还能减少生产过程中的排放，而后者解决起来尤为棘手。此外，与生产新材料相比，使用电力和其他低碳能源更有利于驱动回收利用，也更符合零碳经济目标。在食物系统中，循环使用材料意味着对废弃的有机资源资源化利用（如食物副产品和不可避免的食物浪费），并将它们作为循环生物经济的原料。收集体系是否有效，废弃物流是否足够精细，会极大地决定能够生产出哪些新产品。如果废弃物流的类别较为精细，则可作为结构性材料、纺织品甚至食物的原料。余下的混合废弃物则可被制成堆肥，或进行厌氧消化处理，变成能源或增加土壤肥力。这些资源化的过程能够避免垃圾填埋直接产生的温室气体排放，也能免去可再生材料在生产过程中带来的能源消耗。无论是被制成堆肥，还是以其他形式返回土壤，这些资源化产品的循环利用都有助于自然体系的再生。

3/ 促进自然系统再生

循环经济会尽可能使用可再生资源，并以此保护和加强自然系统。例如使有价值的营养物最终回归土壤，以支持自然系统再生。这种再生方法同时为碳封存创造了契机。



再生农业

再生农业旨在以一种能够恢复生态系统健康的模式生产农作物和饲养牲畜。可再生耕作法不仅能够减少温室气体排放，还能在土壤和植物中封存碳。释放再生农业潜力的关键是减少土壤干扰和增加土壤含碳量。再生农业带来了一连串系统效益：改善土壤结构以便更好地储水；在不需合成肥料投入的情况下，增强土壤生物活性，使其自身产生肥力等。可再生实践的示例包括：使用有机肥料，种植覆盖作物，采用轮作法，减少耕种，培育更多的作物品种，促进农业生物多样性。农业生态学、循环放牧、农林复合经营、林草复合经营和永续农业等农业类型均属于再生农业范畴。

综上所述，这些循环经济机遇一旦被广泛应用，就能在应对气候变化方面产生显著效果。为了更好地阐明这种策略在减排方面的作用，下文将着重讨论两个减排推行最棘手的行业：工业和食物系统。



3

工业循环经济机遇

循环经济有望在 2050 年减少全球水泥、钢铁、塑料和铝生产过程中 40% 的二氧化碳排放量，约等于 37 亿吨，这相当于实现了一半的零排放目标。上述减排目标的实现离不开建成环境和交通等关键领域对材料和产品的优化利用。这些解决方案具有成本效益，能带来系统层面的好处。

在全球二氧化碳总排放中，工业领域排放约占 21%。³⁷ 水泥、钢铁、塑料和铝这四种材料生产过程中产生的排放，约占工业总排放量的 60%。而乘用车和建筑物对上述材料的使用，则占其总排放量的 73%。高温工艺、生产排放和报废处理是上述材料生产过程中二氧化碳排放的主要

来源³⁸。上述问题在很长一段时间内都被认为难以解决。钢熔炼成型、蒸汽裂化和熟料生产等核心工艺对高温的要求，至今都仍无法以可持续方式进行。虽然包括钢铁回收在内的某些工艺流程已经开始使用电力，但在大多数情况下，技术端和经济端都无法使用电力。碳不仅是能量的来源之一，还是生产塑料等材料的基础原料，以及生产水泥、钢、铝等材料的化学过程所需材料，因此工艺排放问题的解决颇为棘手。事实上，除金属外的绝大多数材料，在生命周期结束时都会以焚烧的形式进行处理，从而导致大量其内部蕴含的碳的排放。

循环经济有望解决棘手的排放问题，并且加速向净零碳经济转型。采用了循环方法后，原先成本高昂且棘手的工业流程将逐渐被易于脱碳的生产活动取而代之。很明显，再循环过程避免了新产品生产和产品报废的焚烧环节，这就使我们不需要应对那些棘手的排放。在产品设计环节使用低碳或可再生原料作为替换材料，能从流程开始之初就避免排放的产生。除此之外，支撑循环经济发展的许多流程（如再制造和翻新等）都能用可再生资源驱动，这一点是目前原生材料的生产过程所难以做到的。

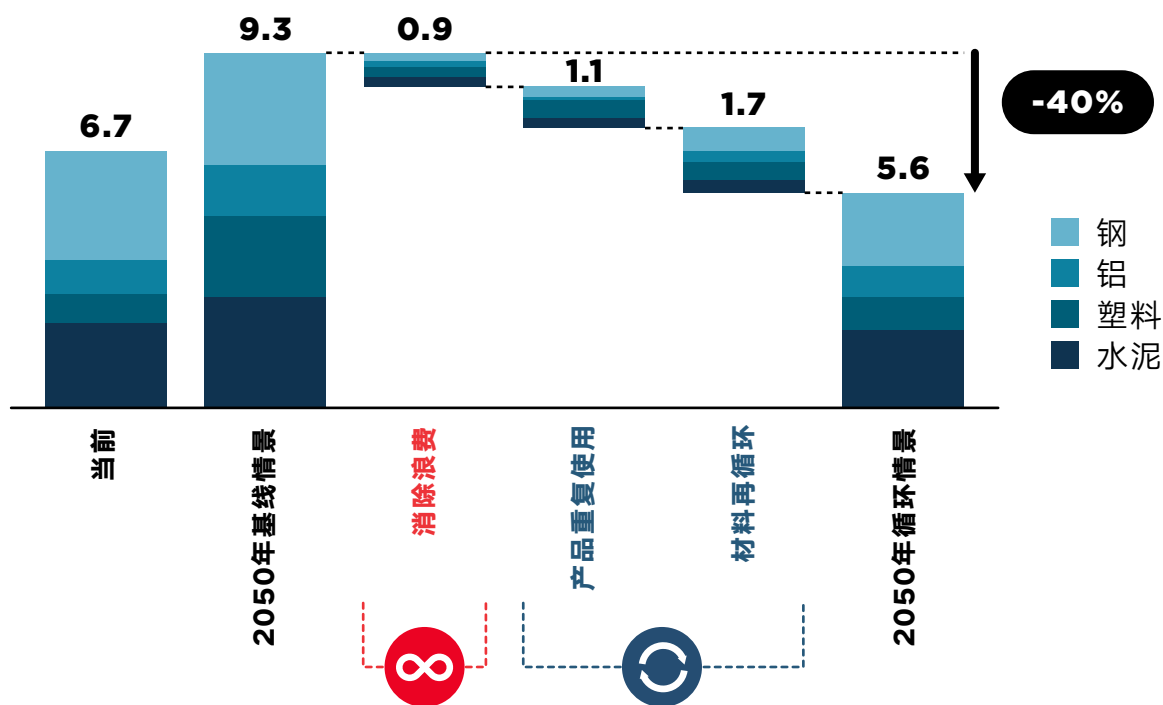
3.1 降低工业排放的循环经济策略

到 **2050 年**，循环经济方法可将来自主要工业材料的全球二氧化碳排放量减少 **40%**，相当于 **37 亿吨**。要想抓住这一机遇，就必须开发新的商业模式，兼顾资产、产品和组件的持续使用，以及资源的高效利用。上述两种商业模式都离不开两项核心循环经济原则：

图 4：循环经济有望在 2050 年减少全球水泥、钢铁、塑料和铝生产过程中 40% 的二氧化碳排放量，约等于 37 亿吨

四种关键材料生产所产生的全球二氧化碳排放量

单位：10亿吨/年



资料来源：节选自材料经济学公司为能源转型委员会 (Energy Transition Commission) 所做的分析：《可完成的使命：到本世纪中叶实现难减排行业净零碳排放》(Mission Possible - Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century) (2018 年)。

详细信息请参见英文完整版：<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/activities/climate-change>

从设计源头避免废弃

- **消除浪费（每年 9 亿吨二氧化碳）：**在价值链上下游和产品设计源头解决浪费问题将能减少温室气体排放。该情景模型考虑了多种措施，如建筑材料的高效利用、施工过程的工业化，以及车辆的轻量化设计等。这些循环经济策略共同减少了产品和资产中的材料投入，并降低了施工过程中产生的浪费。这有望在 2050 年前减少 9 亿吨全球二氧化碳排放。若想深入了解循环经济机遇将如何减少建成环境和交通体系（乘用车）中的温室气体排放，请阅读本章末尾的“深入研究”。

延长产品和材料的使用周期

- **产品和部件的重复使用（每年 11 亿吨二氧化碳）：**基于服务的商业模式（如租赁、共享和按次付费等）可以增加产品和资产的利用率（使用强度），并通过重复使用、翻新和再制造等活动延长产品的使用寿命。产品和部件在参与经济活动时，若能发挥最大的价值和效用，其所蕴含能源便能拥有更长的存留时间，对新生产和报废处理的需求也会减少。这就避免了新产品生产带来的温室气体排放。这一机遇的建模结果表明，减少了对水泥、钢铁、塑料和铝的需求后，到 2050 年，全球二氧化碳排放可以减少 11 亿吨。若想深入了解循环经济机遇将如何减少建成环境和交通体系（乘用车）中的温室气体排放，请阅读本章末尾的“深入研究”。
- **实现材料的再循环（每年 17 亿吨二氧化碳）：**^x 循环经济方案还探索了能够促进收集、分类和回收利用活动的新商业模式。在该情境下，回收利用率和投入 / 产出质量都将得到提升。该方案还预测，对再生材料需求的增加将提升其利用率，并促进规模经济的发展。对旧有材料的循环利用将降低对新材料的生产需求，减少能耗，从而避免生产和报废焚化过程中产生的排放。这样一来，即便是最棘手的排放难题也可迎刃而解。要想捉住上述机遇，就要改变对钢铁、水泥、塑料和铝采取的措施。钢铁的回收利用工艺已经相当成熟，大部分流程也已实现电气化。但是，当前的产品设计、

报废拆解、以及废料处理工艺污染率较高，钢铁质量也不尽如人意。因此，在提高回收利用率的同时，也不应忽略这方面的提升。塑料回收利用率的提升则能通过改进质量和增加应用场景来实现。这些关键举措包括：提升可回收性、建立收集和分拣流程、减少回收流污染，以及探索化学回收利用在升级回收和实现初始质量方面的潜力。对水泥而言，用回收的混凝土细粉（直径较小的颗粒）代替新水泥可以减少工艺流程中的排放；另一种方式是从已有的混凝土中回收一些未反应的水泥，作为新水泥的替代物；此外，粉煤灰，炉渣和煅烧黏土等都可作为替代材料使用³⁹。在铝的回收利用方面，减少其流入自然以及混合使用不同合金至关重要。对此类循环经济机遇进行的建模表明，到 2050 年，全球二氧化碳排放量将会减少 17 亿吨。这就要求在总生产中将钢铁、铝和水泥的二级生产率分别增加到 48%、48% 和 18%^{xi}，报废塑料的物理和化学回收利用率也要分别提升至 28% 和 21%。

x 每年 17 亿吨的二氧化碳排放还包括用二氧化碳排放量较低的材料取代一部分塑料所带来的影响，例如，在包装中用生物材料代替塑料。

xi 尽管部分未反应的水泥能被重复使用，但水泥的回收利用并不容易。

3.2 要想进一步减少工业排放，还需更多干预措施

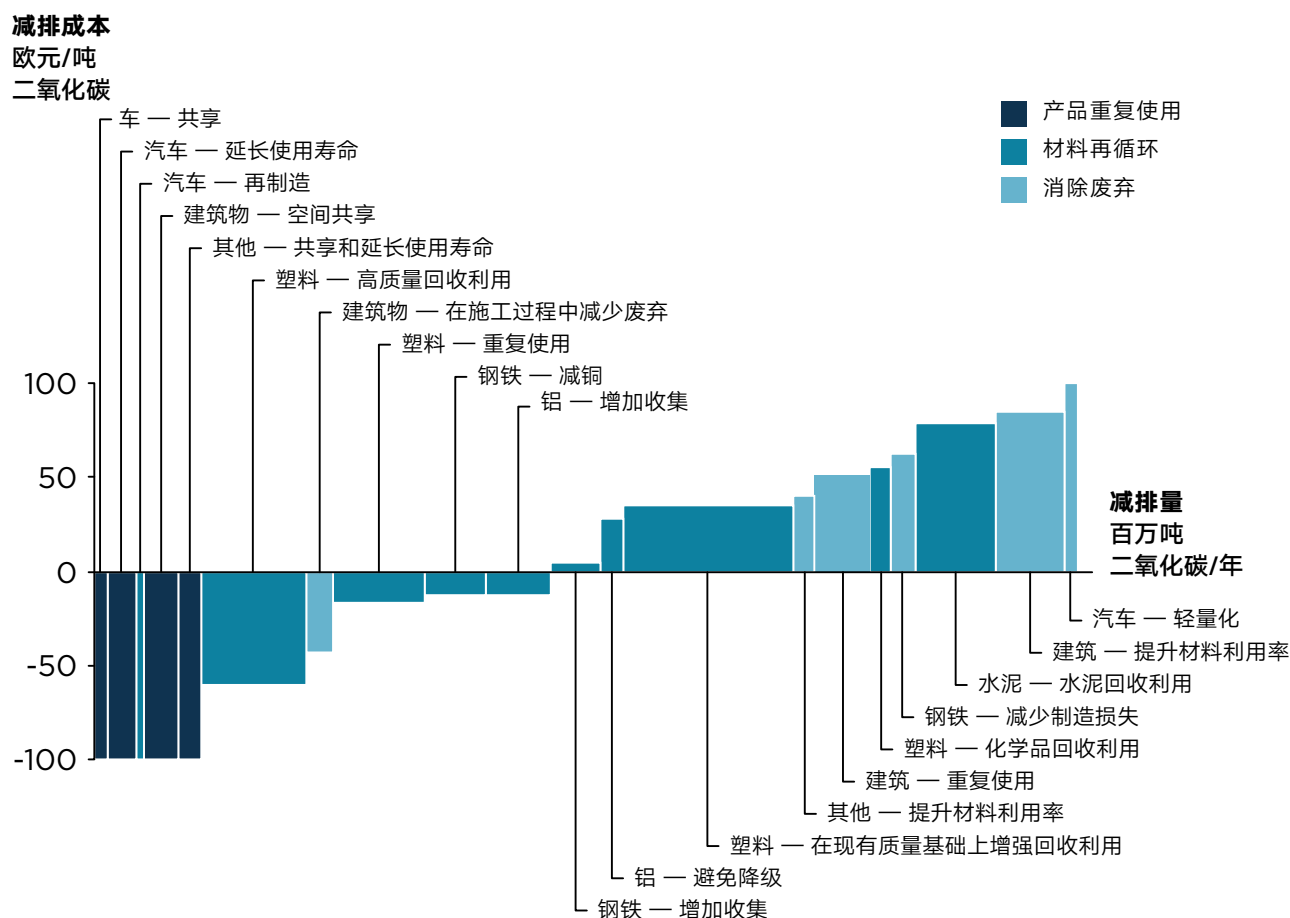
尽管关键工业材料的循环经济转型能在 2050 年减少全球 40% 的排放，但是剩余排放问题的解决也离不开其他减排措施。这些措施包括创新工业过程、碳捕集、碳封存 / 利用（CCS/U）等⁴⁰。比如，新型低排放工业过程可以从根本上改变基础生产过程和原料类别，从而促进节能减排。这些举措的目的是从设计之初就杜绝使用化石燃料，转而使用脱碳电力、氢和生物质等可再生能源。至于那些无法通过提高材料生产率或是使用可再生能源技术减少的排放，则可利用碳捕集和碳封存等非循环经济举措，捕集产品和原料生产或报废过程中排放的剩余二氧化碳。这些方法有望捕集化石燃料燃烧过程中高达 90% 的二氧化碳排放。人们还研究了将捕集的碳作为原料重新引入生产方面的机遇（如用于生产新材料所需的化学制品）。在净零排放经济中，那些无法通过提高材料生产率或使用可再生能源技术降低的排放，也要依靠碳封存和碳利用技术。然而，碳封存和碳利用面临的主要挑战包括：社会认可度低、成本高昂，以及需要大规模示范等。此外，这些技术还需要合适且分布较广的运输及存储设施，其应用范围必须大到足以应对气候挑战。

为了实现完全净零排放经济，在抓住循环经济机遇的同时，还需要向清洁生产过程转型。不过，在零碳钢铁、铝、塑料和其他材料问世前，大量的创新和投资也不可或缺。减少新材料的需求量后，经济的循环程度也能提高，由此进一步解决这一挑战。由此可见，循环经济在工业转型中的作用堪比提升能效在推动能源转型中的作用。减少了需求侧的排放后，供给侧转型的挑战就会小得多。这有助于加速转型，所需的投资水平也会更低。

3.3 循环经济方法具有成本效益

循环经济为实现下文模型中的减排量提供了具有成本效益的解决方案。这些成本效益之所以能够实现，是因为整个价值链都杜绝了产品和材料的浪费，并且价值损失也实现了最小化。例如当今社会有 95% 的塑料包装都是用之即弃，每年带来的经济损失高达 800 亿~1200 亿美元⁴¹。然而，能够实现大部分材料重复使用的循环系统则能减少很多经济损失，为生产者和使用者带来双赢局面。此外，正如能效的提升过程一样，与其使用价格高昂且效果未知的新兴技术减少温室气体排放，不如采取成本效益更高的循环经济解决方案（有关二氧化碳减排成本曲线见图 5，该曲线展示了若干循环经济机遇的潜力）。共享商业模式、耐用设计和高质量回收利用等循环经济举措甚至有望实现净零排放成本。在某些情况下，回收利用等措施不仅能够减少排放，还能将减排成本降至每吨二氧化碳 50 美元以下。相比之下，零碳材料生产所需许多措施的实施成本都要超过 100 美元 / 每吨二氧化碳。

图 5：循环经济商业模式的减排潜力^{xii}



资料来源：材料经济学公司，《循环经济——减缓气候变化的有力措施》（The Circular Economy - A Powerful Force for Climate Mitigation）（2018 年）

循环经济策略中，最有成本效益的方法都将重点放在了增加产品利用率和使用寿命上。正是由于大规模的系统性改进提升了价值链中的生产率，这些方法的成本才得以如此低廉。比如，共享循环交通体系可以降低高达 70% 的出行成本⁴²。由于共享汽车的使用频率较高，使用寿命较长，因此可能前期需要更多的投资。但将这些成本分摊到里程数上之后就不难发现，长期来看成本其实反而更低。并且，由于资源总体上得到了更加有效的利用，材料本身也能得到节约。

就材料效率而言，材料用量减少可能会导致对替代原料需求的上升，而这可能会导致投资成本上涨，如劳动力投入、库存，以及物流成本的增加等。例如，优化混凝土构件或钢

梁可以减少材料总用量，但这往往会以增加复杂性和协调性为代价，并且对预制的需求也会增加。但总的来说，其成本还是要低于许多低碳生产方案⁴³。在消除生产和施工环节中产生废弃物方面，技术进步可以大幅降低其成本。3D 打印等“增材”制造方法就是最好的例证，因为这种方法几乎可以实现零废弃。

对材料的再循环而言，回收利用是否具备成本效益将在很大程度上取决于其规模化的潜力，以及保持材料初始价值的能。降低收集成本、开拓新市场、创造规模经济，并保持二次原料的价值等都是必备手段。若能实现上述几项措施，那么回收利用过程（比如塑料）便有望实现盈利，并拓展其应用规模。

xii 该成本曲线只起到指示作用，它仍存在许多不确定性，还需更深入的分析才能改进估算结果。

3.4 循环经济方法能带来系统层面的效益

循环经济原则的落实能够创造许多社会效益。除了显著减少温室气体排放外，循环经济策略还能为社会和环境带来诸多经济机遇和益处。对人们而言，循环经济可以降低获取商品和服务的成本。这些措施包括提供注重“使用权”而非“所有权”的新型商业模式、用高质量的二次原料投入代替原始材料，以及利用数字技术解决供应链中的结构性浪费等。通过提高车辆的利用率、提供更多便利的公共交通选择、打造共享平台，以及引入更多电动和节省材料的车辆等措施可以降低车辆的运营成本。除了成本的节约外，这些方法还能带来一系列其他好处。比如，共享的多式联运系统可以减少出行时间并缓解交通拥堵。而数字化赋能的共享经济则能让居民生活的方方面面紧密相连。在共享经济下，人们获取食物、商品和服务的难度会大大降低。总之，循环经济能够帮助实现经济活动与资源消耗之间的脱钩，还能在自然能够承载的范围内带来更繁荣的经济和更高的生活质量。

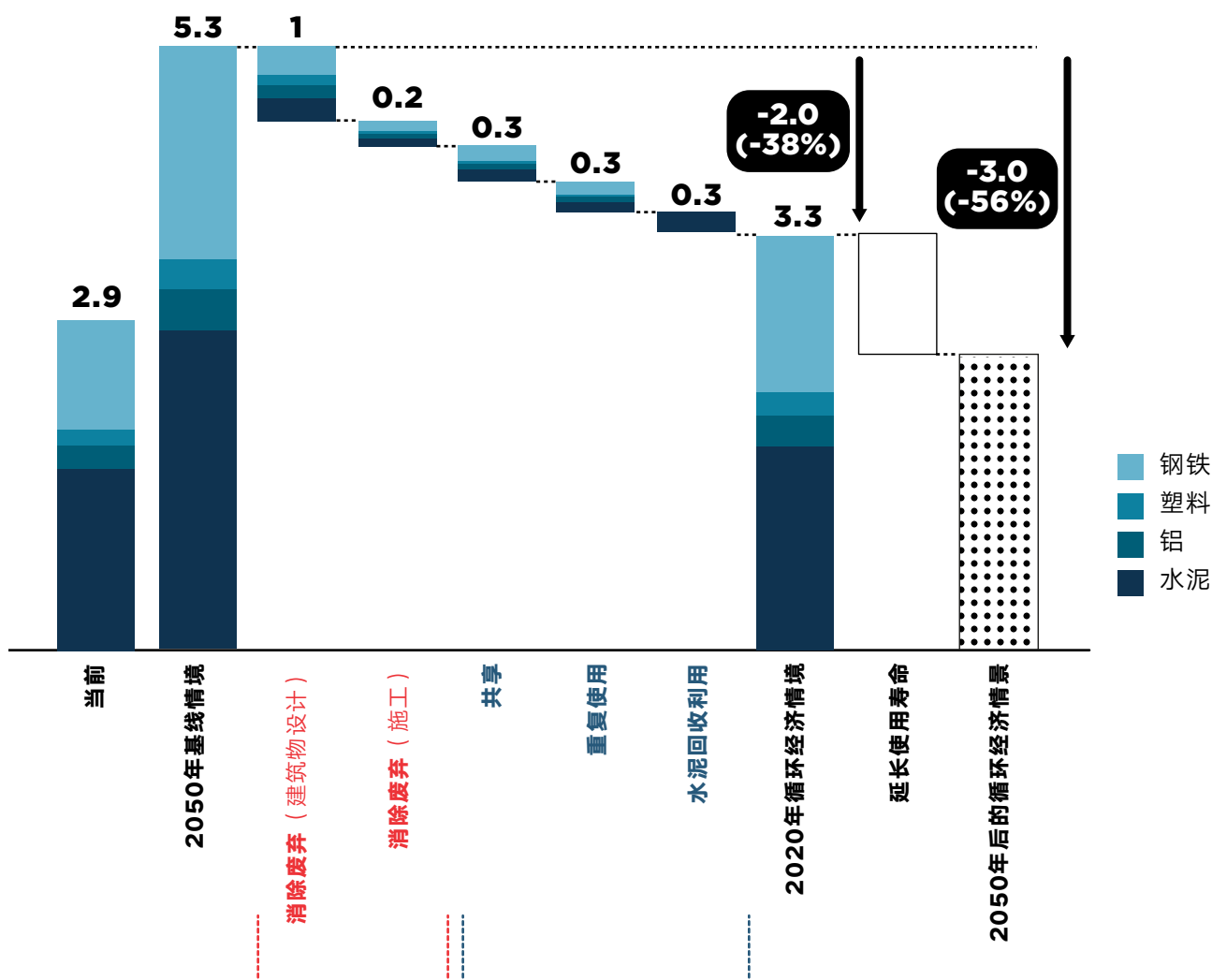
鉴于循环经济能够带来系统层面的益处，它将能极大地推动可持续目标的实现。十七项可持续发展目标既包罗万象，又相互依存。有不少机构都提出，循环经济是实现第 12 项可持续发展目标（负责任的消费和生产）的关键，而第 12 项目标的实现又能进一步推动其他目标的达成。这一领域的成功将为所有可持续发展目标都带来益处，并缓解许多两难冲突⁴⁴。我们有充分的理由相信，循环经济不仅是实现气候目标过程中的一种选择，还是实现繁荣和可持续发展的必经之路。

下列章节将从建成环境和交通两部分着手，深入探讨循环经济将如何实现减排。

深度研究： 建成环境机遇

图 6：建成环境循环方案可在 2050 年减少 38% 的二氧化碳排放（或在 2050 年以后减少 56% 的二氧化碳排放）

建筑物中使用的四种关键材料造成的二氧化碳排放
单位：10亿吨二氧化碳/年



资料来源：改编节选自材料经济学公司《循环经济——减缓气候变化的有力措施》（The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation）（2018 年）

每年，全世界开采出的材料有一半都会流向建成环境。当前的预测显示，到 2060 年，全世界每周建造出的建筑物可以拼凑成一个巴黎。⁴⁵ 当前的城市化进程如果不断发展，那么全球城市的材料消耗量预计将从 2010 年的 400 亿吨增长到 2050 年的 900 亿吨，而这早已超出地球现有资源的承受能力⁴⁶。此外，每年 2% 的去密集化趋势可能会在 2050 年增加全球城市土地的使用量，为农业用地和食物供应带来风险⁴⁷。照这一态势发展下去，到 2050 年，施工产生的二氧化碳排放将占到新建筑总排放的一半左右，而当前这一比例仅为 28%⁴⁸。因此，要想实现未来的气候目标，除了向可再生能源转型和提高能源效率外，建筑的设计、建造和使用方式也至关重要。

在循环经济情境下，建成环境对钢铁、铝、水泥和塑料的需求将会减少，因此，到 2050 年，全球建筑材料中的二氧化碳排放将会减少 38%，相当于 20 亿吨二氧化碳。在这一情境下，建成环境能让居民更容易获取商品、服务和住房，人们在工作生活中接触到的室外空气质量也会得到改善。循环经济体系下，建筑将以模块化方式进行设计，具有持久性和多用途功能，建筑材料可重复使用且安全无毒。上述这些条件的结合将带来灵活的共享办公空间和灵活、智能和模块化住宅，进而实现建筑物的高效利用。

下文介绍了图 6 列举的循环经济机遇将如何显著减少温室气体排放^{xiii}：

从设计之初避免废弃

- **消除建筑设计中的浪费（每年 10 亿吨二氧化碳）：**在工程建设项目中，使用的材料量通常会远高于实际需要的数量。比方说，要想达到相同的结构强度，只需当前水泥使用量的 50% ~ 60% 即可⁴⁹。这可以通过减少混凝土中的水泥含量和结构中的混凝土含量实现。减少规格超标情况、改进设计、使用高强度材料等措施可以减少设计环节对材料的使用。比如，高强度钢以及后张拉等技术可以减少 30% 的材料需求⁵⁰。
- **消除施工环节的浪费（每年 2 亿吨二氧化碳）：**城市固体废物中多达 40% 都是拆建废料（CDW），而欧

洲有 54% 的拆建废料都会通过填埋进行处理⁵¹。预制建筑构件、异地施工和 3D 打印等工业化施工过程有望减少材料需求和废弃物产生，同时节约高达 60% 的材料成本⁵²。例如，制造商在可控环境中展开异地模块化施工活动后，可以实现高质量、高生产率的施工，并尽可能减少废弃物产生。与传统建筑活动相比，这种方式能够减少高达 90% 的现场废弃物⁵³。

延长产品和材料的使用周期

- **共享商业模式（每年 3 亿吨二氧化碳）：**建筑物的利用率通常较低。以欧洲为例，即使是办公时间，也有 60% 的办公空间处于闲置状态，而在英国，49% 的住宅都有至少两间卧室无人使用⁵⁴。在循环经济中，基于服务的商业模式（如共享模式）可以提高建筑、空间和构件的利用率。例如，到 2036 年，伦敦的 P2P 租赁、更好的城市规划、办公空间共享、改造建筑和多用途建筑可以增加新建筑的价值，并使该市 20% 的建筑物实现利用率翻倍，每年节约 6 亿多镑⁵⁵。
- **延长使用寿命（2050 年以后，每年 10 亿吨二氧化碳）：**传统方式建造的建筑物通常拥有 50 ~ 100 年的预期技术寿命，但它们的经济价值过了 20 ~ 30 年基本就不复存在了⁵⁶。在这种情况下，拆除通常是首选解决方案。在循环经济中，建筑物的经济价值可以通过延长其“功能性”寿命来维持。灵活耐用的模块化设计可以增加建筑物的使用寿命。这种设计方法还能确保建筑物能够适应日新月异的用户需求，并更加易于维护和翻新。模块化设计通常会重复使用建筑物外部 80% 的组件，结合了模块化和耐用性两个特征后，建筑物的使用寿命通常能够达到 100 年甚至更长时间⁵⁷。
- **重复使用建筑材料（每年 3 亿吨二氧化碳）：**只有 20% ~ 30% 的拆建废料能够得到回收或重复使用。其背后有两大因素，一是设计不佳，二是缺乏关于建筑物的材料构成方面的信息⁵⁸。设计可重复使用的材料能够确保它们的价值得到最大程度的发挥，减少新

xiii 该清单提供了一些减少材料需求的循环经济解决方案。考虑到本文的研究范围，这里并未提出那些能够直接减少能源需求的解决方案，如改善建筑物的能源效率等。

材料的使用。例如，阿姆斯特丹有一个在 2040 年前新建 7 万套公寓的计划，若是改善材料的重复使用情况，那么整个施工过程将节省 50 万吨的材料⁵⁹。

- **回收利用材料（水泥的回收利用将会带来每年 3 亿吨二氧化碳的节约）：**为了扩大材料的回收利用规模，我们必须设计一些可拆卸的高价值回收利用材料，确保材料可以在使用寿命结束时作为原料投入新产品的生产。在建成环境中，报废建筑材料也可被回收利用。使用再生材料后，对原始材料的需求就会减少，而相比生产原始材料，加工再生材料可以减少 40% ~ 70% 的二氧化碳排放⁶⁰。在此类情境中，设计可回收材料、扩大回收量并提高二次原料的质量至关重要。尽管钢铁的回收利用技术已经发展成熟，但水泥和塑料的回收利用技术仍亟待改进。对塑料而言，能在一个可以对材料进行有效收集、分拣和高价值回收的系统内设计可回收材料，是实现上述目标的关键。

城市的机遇与益处：城市规划

城市在影响建筑结构的设计和使用方式方面发挥着重要作用。在城市这一面积较小的地域内，人、资源、资本、数据和人才高度集中，因此城市能够以其独有的方式刺激循环经济机遇。在本文提到的上述机遇之外，城市还提供了额外的循环经济机遇：在建成环境领域降低温室气体排放。例如，在城市发展中落实循环经济原则，能使整个城市和基础设施的设计更加高效，从而实现水、有机物、工业副产品、建筑构件和家庭可回收物品等资源的重复使用、收集和重新分配⁶¹。这可以通过设计具有多种用途的紧凑型城市来实现^{xiv}，从而遏制城市的不断扩张。在欧洲，遏制城市扩张能够提升资产的利用率，与当前发展方案相比，到 2050 年可以节省多达 3 万平方千米的土地⁶²。考虑到碳排放与城市密度和结构之间的紧密联系，紧凑型城市的设计可以通过最大程度地减少道路、下水道、输水管道和其他基础设施建设，大幅减少温室气体排放。研究证明，紧凑型城市可使温室气体排放减少两倍之多⁶³。巴塞罗那和亚特兰大的

收入水平与人口数量都十分相近，但由于城市密度不同，排放水平也各有千秋。巴塞罗那的城市密度较高，这就意味着其交通面积要比亚特兰大 26 倍，二氧化碳排放量则比后者低 10 倍⁶⁴。紧凑型城市规划可以提供更多的社会效益。据估计，紧凑型城市规划可使城市的生产率提高四到十倍，从而在城市化不断推进的过程中创造财富、消除贫困，并减轻对地球施加的压力⁶⁵。此外，提升建成环境中绿化水平的循环经济举措可以降低污染水平，并使城市更健康 and 更宜居。最后，提升城市空间、资产和材料利用率方案（如上述模型所述）也能为社会带来福祉。与当前发展路径相比^{xv}，这种城市循环策略有望在 2050 年将有害颗粒物（PM2.5 和 PM10）排放的社会成本降低 61%⁶⁶，并将家庭成本降低 15% ~ 50%⁶⁷。由于城市中人口、资源、资金、数据和人才高度集中，因此，城市在激发上述循环经济机会方面扮演着独特的作用。对城市而言，采取提高现有建筑的利用率、减少新增基础设施建设等循环经济举措将能减少“基于消耗的温室气体排放”，这有望节约 110 亿美元（例如在伦敦等城市）⁶⁸。

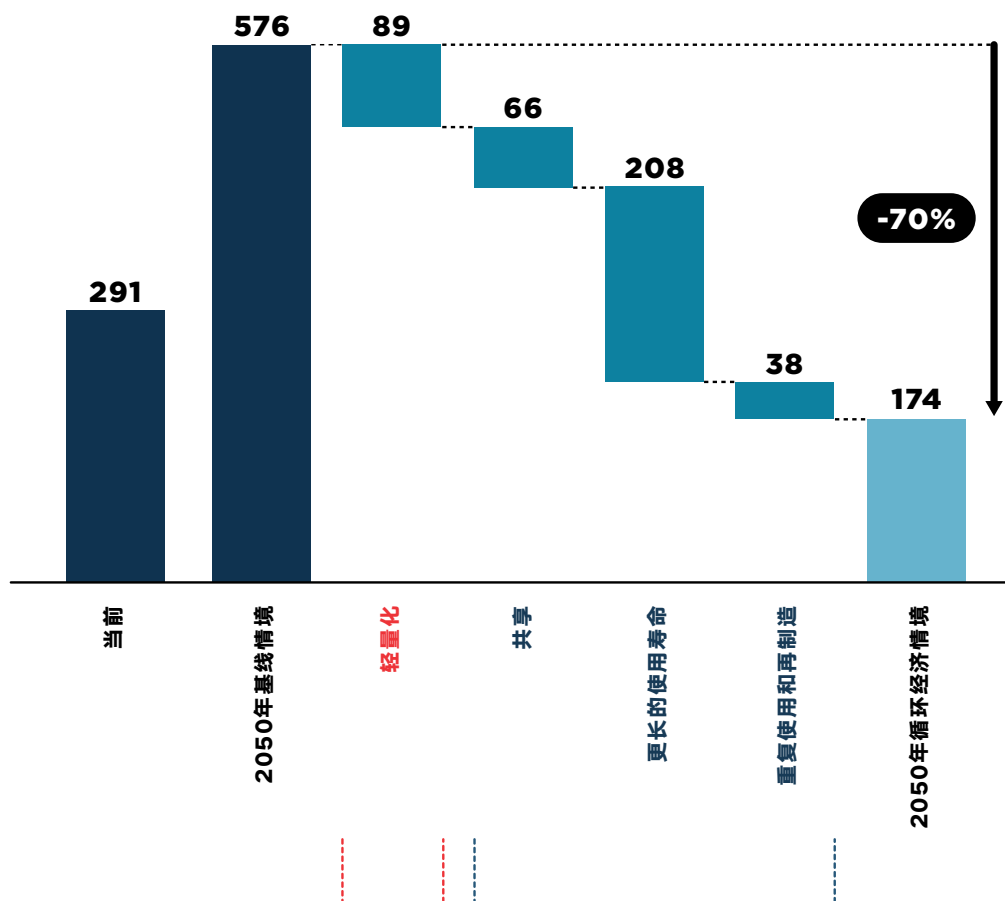
xiv 混合用途开发是指将商业用房、住宅和娱乐空间共置一处。

xv 基于这些研究发现，艾伦·麦克阿瑟基金会为欧洲、印度和中国分别构建了模型。这些报告不仅着眼于减少材料需求的循环经济方法，还考虑了能够在使用阶段直接降低能源需求的方法，例如提高建筑物的能源效率。

深度研究： 交通领域的机会

图 7：乘用车循环方案可在 2050 年减少 70% 的二氧化碳排放

乘用车使用材料的排放情况
单位：百万吨二氧化碳/年



资料来源：材料经济学公司,《循环经济——减缓气候变化的有力措施》(The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation) (2018 年)。国际能源署,《能源技术视角——运输》(2017 年)。

若将能源消耗考虑在内，仅道路出行就占了交通领域全球排放的 75%，到 2050 年，全球汽车数量将增长两倍以上⁶⁹。当前排放主要来自汽车使用阶段。但是，随着混合动力汽车、插电式混合动力汽车和电动汽车的普及，汽车使用导致的排放量将减少，而汽车生产导致的排放量可能会增加⁷⁰。后者将在短短 5 ~ 10 年内成为新车生命周期排放的主要来源⁷¹。随着新能源汽车的不断普及，若想实现气候目标，我们必须调整设计、生产和使用汽车的方式。

乘用车循环方案有望在 2050 年将全球二氧化碳排放量减少 70%，约等于 4 亿吨。图示模型描绘了一个共享的多式联运系统，包括共享、电动、自主和互连等多种运输方式。在该类情境中，乘用车将越来越多地作为一种服务进行共享，并在设计之初就注重耐久性和重复使用性。综合来看，这些变化将带来汽车数量的下降和利用率的上升，随之而来的是拥堵的缓解、维护成本的下降、用于停车场和道路的用地和投资减少，以及空气污染的改善。在循环经济情境下，到 2050 年，每乘客公里平均成本可以下降 77% 之多⁷²。

下文介绍了图 7 所示的循环经济方法将如何显著减少温室气体排放^{xvi}：

从设计之初避免废弃

- **设计轻型汽车（每年 8900 吨二氧化碳）：**当前的趋势表明，尽管汽车行业多年以来一直在努力减轻各个部件的重量，以降低燃料消耗，但车辆的总重量却一直在增加⁷³。在该领域推动材料创新有助于发现性能优异但重量较轻的材料。比如 Riversimple 的 Rasa 就是一款氢燃料电池动力汽车，其底盘由轻质纤维复合材料制成，重量连 40 千克都不到^{74,xvii}。降低了对材料的需求后，不仅能够减少生产过程中的温室气体排放，还能增加材料的使用寿命，并提升空气动力学特性。

延长产品和材料的使用周期

- **共享商业模式（每年 6600 万吨二氧化碳）：**当前交通体系的使用效率低下，结构性浪费严重。以欧洲为例，汽车平均有 92% 的时间都处于停用状态⁷⁵。公私领域可以出台各种共享服务，提高车辆的利用率，在提供多种便捷交通方式的同时，寻找这一问题的解决方法。在每人 / 每公里产生的二氧化碳排放方面，重型轨道交通（例如地铁）要比普通单人车辆少大约 76%⁷⁶。乘坐火车、公共汽车或汽车的乘客越多，道路上的车辆数量就越少，每人 / 每公里的排放量也就越低。
- **设计耐用性（每年 2 亿 800 万吨二氧化碳）：**虽说车企可以通过销售汽车盈利，但在设计耐久性更高的汽车方面，他们却缺乏兴趣。不过，对基于服务的商业模式而言，耐久性设计尤为有益，因为该模式下的维护成本会由企业而非客户承担。这样一来，设计模块化且易于维护和维修的车辆便有助于保持车辆价值。一旦有组件损坏或年久失修，便可直接进行更换，从而使车队的使用寿命延长 10 倍⁷⁷。通过延长企业资产的使用寿命，提供租赁或车辆服务的企业将能斩获最大的回报。
- **以重复使用和再制造为目的进行设计（每年 3800 万吨二氧化碳）：**当前的车辆设计与管理方式均未将重复使用情况考虑在内。这就意味着大量宝贵的组件和材料会在车辆报废时被浪费掉，从而导致价值的流失。在循环经济中，以模块化、重复使用和再制造为目的进行设计，将显著延长寿命。这些措施不仅增加了组件本身的价值，还能避免新组件的生产，从而实现原材料的节约，并降低温室气体排放。其他好处包括避免车辆折旧和年久失修、促进车辆的维护、支持生产本地化、缩短供应链等。采取了此类措施后，雷诺公司重复使用了其 43% 的车体⁷⁸。米其林公司的研究表明，85% 的已磨损轮胎都可以翻新后重复使用，每翻新一只轮胎，就可以避免大约 60 千克的二氧化碳排放⁷⁹。

xvi 该清单提供了一些可以减少材料需求的循环经济解决方案。鉴于本文的研究范围有限，这里并没有提出可以减少能源需求的解决方案，包括提升能源效率和扩大零排放推进形式，如氢动力汽车和电动汽车等。

xvii 不同于其他复合材料，纤维增强复合材料可以回收利用多达 20 次，从而实现 FRC 废钢的多次重复使用。Suvarnaraju, B. 和 Subrahmanyam, A., 《手工铺层法和纤维增强塑料法制作的复合纤维材料的机械性能比较》(Comparison of mechanical properties on composite ber material prepared by hand lay up method and ber reinforced plastic method) (2016 年)

与新发动机的传统制造工艺相比，再制造汽车发动机的二氧化碳排放量平均要降低 73% 至 87%⁸⁰。

- **循环使用材料：**^{xviii} 大多数车辆在生命周期结束时，都会不可避免地走向报废。以欧洲为例，每年高达 800 万 -900 万吨⁸¹。不过，回收利用的比重正在逐年上升。“欧洲报废车辆指令”（European End-of-Life Vehicles Directive）出台了一项目标，要求每车每年必须回收 95% 的材料⁸²。问题在于，当前的回收利用过程会导致材料和价值的严重降级。针对这一挑战，雷诺公司已经找到了解决方案，即调整设计环节，实现车型或车辆 85% 的可回收性。话虽如此，其实最终真正被回收用于生产新零件的部分只占 48%，其余部分要么被重复使用（43%），要么资源化利用（9%）⁸³。多种措施一旦结合使用，将能减少 80% 的能源需求。

城市的机遇与效益：多式联运交通体系

城市能够极大地影响居民的出行方式，以及这种出行方式所带来的对身体健康和生活水平的影响。城市密度与土地利用模式会在很大程度上决定交通习惯。紧凑型、注重转乘设计的、混合用途社区密度高的城市能够为共享交通（如公共汽车、有轨电车、共享汽车）和主动型交通选择（如步行、骑车）创造有利条件。对于欧洲这样的经济体而言，由于共享多式联运方案能够实现电气化和可再生能源供电的双管齐下，因此，交通行业有望在最大限度上实现脱碳。虽然生产阶段的少量排放无可避免，但延长车辆的平均寿命、重复使用零部件和材料等措施将能成功实现减排。这些举措可将原始材料的取用减少 95%，实现系统几乎百分之百的可循环⁸⁴。该情境将能极大改善居民的福祉和生活质量。道路车辆的减少和交通拥堵状况的改善将能减少事故数量，鼓励更多居民参与社区活动，从而增强社会凝聚力并发展地方经济。共享多式联运系统还有助于人们获取服务和就业，并减少出行时间。数字平台和人工智能技术的大力发展则更是让其如虎添翼。上述系统可以在促进获取、互联互通、节约资源、减少拥堵和污染等方面发挥重要作用。例如，经

济合作与发展组织（OECD）的一项研究估计，公共交通若是实现自动驾驶，那么理论上而言，欧洲城市中将有 90% 的汽车会被淘汰，大量的停车位将被释放⁸⁵。例如，C40（城市气候领导联盟）城市中汽车所有量的减少可以释放出 1.7 亿平方米的路边停车位，这些释放的空间可以种植 250 万棵树木，并修建长达 25000 公里的自行车道⁸⁶。与当前发展道路相比，这种循环交通体系还有望带来其他社会效益，如降低 50% ~ 60% 的交通拥堵成本，减少 20% ~ 30% 有害排放物（PM2.5 和氮氧化物等污染物）带来的社会成本等^{xix, 87}。

xviii 由于此次深入研究的重点是“产品”级别（汽车），因此尚未对回收利用进行建模。不过，图 4 对材料回收利用进行了探讨。

xix 基于这些发现，艾伦·麦克阿瑟基金会为欧洲、印度和中国分别构建了模型。这些报告不仅研究了能够减少材料需求的循环经济机遇，还研究了能够直接减少能源需求的方法，如规模化拓展氢动力和电动汽车等零排放的推进形式。



4

食物系统循环经济机遇

用循环经济原则去减少源于食物系统的排放对于应对气候变化至关重要，还能收获更多系统层面的效益。在我们生产和管理食物资源的过程中落实循环经济原则，将能减少 49% 的排放，相当于 56 亿吨二氧化碳当量。到 2050 年，基本可以将食物领域的排放减半。上述机遇的实现需要从设计之初就避免废弃，延长材料使用周期并结合推广再生农业相关实践。

农业、林业和其他土地利用贡献了温室气体总排放量的 24%。农业、林业和其他土地利用（AFOLU）会带来大量的排放。这主要来源于森林砍伐和与牲畜、土壤和营养物

管理相关的农业活动，包括我们生产食物、纤维、燃料以及管理土地的方式。食物生产是 AFOLU 的重要组成部分，但与整个食物系统相比，它只是其中的一个环节。食物生产连接了种植、收获、加工、包装、运输、销售、消费，以及食物处理等方方面面，它们集体构成了庞大的食物系统⁸⁸。事实上，人们很难对整个食物系统的排放量做一个估算，因为生物体和土壤均在地球碳循环（碳排放和碳封存）中发挥重要作用。为了能在文中提供一个估算基线，我们在计算食物系统的排放时，囊括了食物生产、物流（运输、存储和加工），以及废弃食物带来的直接排放^{xx}。

xx 其他未被纳入本文估算的食物系统排放源包括：土地使用变化、农业设备和化肥生产中的能源使用、废水处理厂的排放，以及因森林砍伐和土地使用产生的排放。

到 2050 年,食物系统的总排放量预计将增加三分之一以上,从 84 亿吨增至 114 亿吨。其中,有 60% 以上都与多种的食物生产有关。例如,肠道发酵(牛打嗝)和粪肥储备管理不善会导致牛肉生产过程中产生大量甲烷;永久性淹水的稻田会形成厌氧条件,带来大量的甲烷释放。事实上,全球食物生产相关排放中,有 10% 都来自水稻种植⁸⁹。过量耕作会导致土壤有机质暴露在空气中,使土壤丧失碳封存能力。过度施肥会导致一氧化二氮的释放,这种强大的温室气体加剧全球变暖。在生产氮肥等农业肥料时,也会有大量的二氧化碳被排放至大气中^{xxi}。

物流在食物系统的排放中也扮演着重要角色。食物加工、运输和冷藏的过程会消耗大量资源,产生排放。在处理废弃物时,无论是食物的自然分解,还是废弃物的加工、运输、储存和过度生产,都会直接或间接带来排放。在整个供应链中,丢弃的食物约占总产量的 30%,这就使得废弃食物成为食物系统排放的主要来源⁹⁰。

循环经济能够通过土壤碳封存和在供应链中尽可能降低碳排放来减少排放——通过从设计之初避免废弃、延长材料使用周期和促进自然系统再生。减少食物浪费,资源化利用来自城镇的有机废弃物,可以增加土壤肥力,推动低碳生物经济的发展。采取再生措施后,农民可以进一步推动循环经济的发展,从减碳向固碳转型。这样,用于养活不断增长的人口土壤和作物就能够转变为应对气候危机的重要工具。科技公司 Indigo Ag 最近评估了改进农业方法在碳封存方面的巨大潜力。其研究结果显示,如果全世界所有农田的有机物质含量都能从现有水平(世界平均值为 1%)恢复到工业革命前水平(约为 3%),将能多吸收 1 万亿吨碳。这一数值等同于工业革命以来的全部碳排放⁹¹。没有任何一个其他的经济领域有如此决定性的潜力,能吸收这么多大气中的碳。

xxi IRP 显示(2016 年),全球氮和磷的平均营养效率仅为 20% 左右。

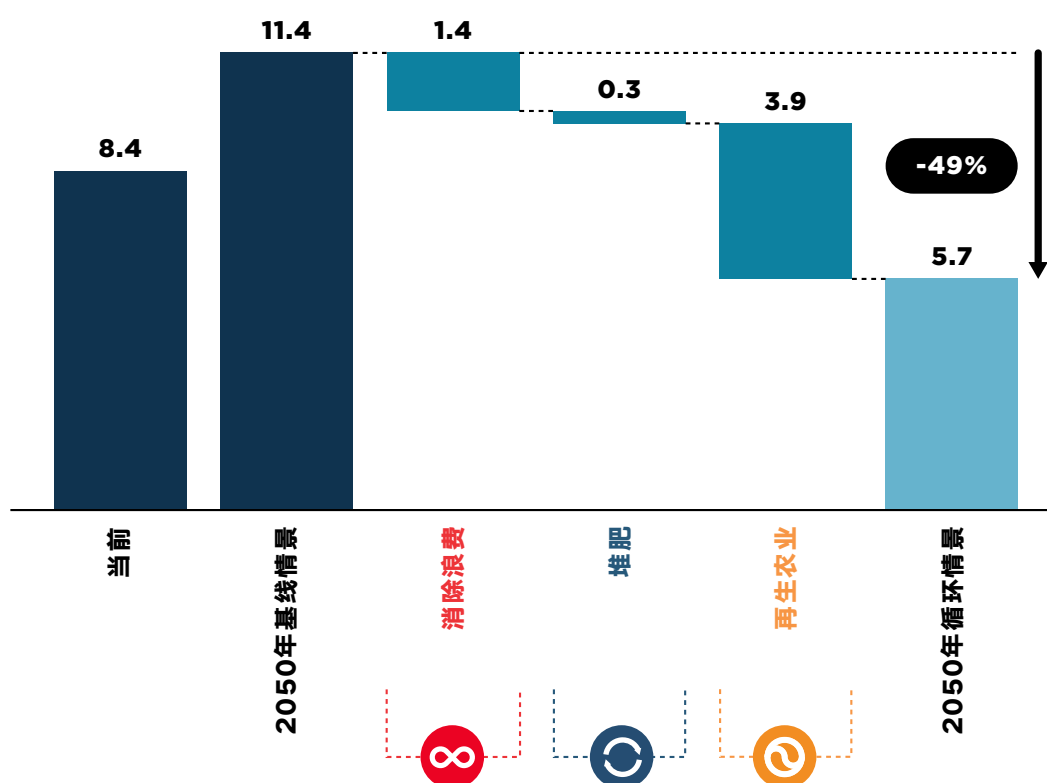
4.1 降低食物系统排放的循环经济策略

在食物系统中落实循环经济策略，可以在 2050 年减少 56 亿吨的二氧化碳当量排放，相当于减少食物系统总排放的 49%。

若想实现这一目标，则意味着我们必须向对自然更加有益的农业系统转型，并且更有效地利用已生产的食物。这些策略主要基于三大循环经济原则：

图 8：2050 年，循环食物系统可以减少 49% 的年度二氧化碳当量排放

全球食物体系产生的排放
单位：10亿吨/年



资料来源：节选自艾伦·麦克阿瑟基金会，《城市与食物循环经济》（Cities and Circular Economy for Food）（2019 年）
详细信息请参见英文完整版：<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/activities/climate-change>

在设计之初避免废弃

每秒钟，全世界都有大约六辆垃圾车的可食用的食物被丢弃，其中大部分都流向了垃圾场或垃圾填埋场，在分解时释放出甲烷。预防食物浪费已被列入全球议程，联合国可持续发展目标第 12 项第三条正式确立目标，要在 2030 年前实现全球人均食物浪费和损失减半。研究人员已经找到了一系列机制可实现该目标，详情如下：

厨师、产品开发人员和其他食品设计者也可以通过其他方式（如选择和使用在生产中产生较少碳排放的原料）在设计之初避免排放。例如，使用更多的植物源性成分，因为植物源性成分会带来较低的生产排放⁹²。

本文仅对减少食物浪费的减排效益进行了建模：

- **减少食物浪费（每年 14 亿吨二氧化碳）：**食物价值链的参与者，尤其是城市中的价值链参与者，可以采取一系列预防食物浪费的干预措施。例如，零售商可以在食物供应与消费者的波动性需求之间寻求更好的平衡，通过临期产品打折促销、在店内餐厅使用超过上架日期但并未变质的产品等措施减少食物浪费。相关企业可以开发创新型商业模式：如，捷克的 MIWA 公司就为客户提供一种特殊的在线服务，客户可以定制食物的购买数量，并且所有产品均由可重复使用的材质进行包装，避免食物浪费。食物供应商可以在确认食品没有过期的前提下，善加利用“卖相不佳”的水果和蔬菜，作为食物产品的原料，如婴儿食品和涂抹酱等。在分配过剩的可食用食物时，数字技术与支持性政策可以发挥重要作用，避免食物流入垃圾填埋场的厄运，并为食物及营养短缺的社区提供高质量的营养。以丹麦的 Too Good to Go 为首的数字平台正在大展身手，助力推广重新分配倡议。这些推广也已经得到了 Feedback(英国)和 FoodShift(美国)等组织的支持。在推广这些干预措施的同时，在消费者和商家间鼓励行为改变，将有助于在 2030 年前实现可食用食物浪费的减半，这样一来，整个食品价值链的年度潜在减排量预计将达 14 亿吨二氧化碳当量。

延长产品和材料的使用周期

无论食物资源的管理体系有多么健全，农业副产品、食物制备残留物（果皮、骨头、废谷物等）、城市景观管理（“绿色废弃物”）和城市污水流总是会产生多余的有机物质。城市是世界上最大的食物消费中心，也是这些有机物质的主要生产者。每年，城市都会产生超过 6 亿吨的有机废弃物⁹³，其中只有 2% 会返回到生产过程中进行二次利用⁹⁴。在循环经济中，这些有机物料不会被视作废弃物，而是会被视作其他物品的原料，纳入经济活动中，实现从成本高昂的待处理废弃物向具有潜在价值的新形式的转换。如果废物流相对纯净，这些材料便可被用于服装面料（如 Orange Fiber、DueDiLatte）、包装和家具的结构性材料（如 Eovative、RiceHouse）或创新食物产品（如 Canvas Drinks、Planetarians）等高价值产品的生产。

对于混合废物流，则可以采用养分循环的方式生产能够支持再生性食物生产的土壤改良产品，这一点在城市边缘地区尤为重要。如果原料数量足够，并且基础设施建设到位，那么厌氧消化或其他方式也不失为能量回收的好选择。在碳排放废水处理厂（WWTP）的设计和运行中应用养分循环进程，将带来尤为明显的影响。在欧洲一些国家，上述进程将消耗全国 1% 的发电量。在发展中国家，废水处理厂的能源需求将在未来 15 年内增加 20%⁹⁵。很多前瞻性公用事业机构的实践证明，污水处理厂完全可以作为能源的净生产商进行运营。例如，借助厌氧消化污泥回收沼气的方式，丹麦的 Aarhus 和 Odense 两家污水处理厂均能实现 200% 的正向能量生产⁹⁶。厌氧消化过程中留下的生物固体可被均匀散播在当地农民的田地中，这些富含营养的残余物可以帮助实现更多的碳效益。

本文对食物副产品 and 绿色废弃物的营养循环（不含能量回收）带来的减排进行了建模：

- **食物副产品 and 绿色废弃物堆肥（3 亿吨二氧化碳当量）：**堆肥是一种产生二氧化碳的耗氧过程，它对全球变暖的负面影响要比甲烷小得多。除了碳之外，堆肥还包含其他可以滋养和强化土壤的养分，因此在食物种植中使用堆肥，意味着对化学肥料和灌溉的需求相应减少。由此又能减少采矿（矿产开采）、工业（氨生产）和能源（抽水灌溉）等部门的排放。基于旧金山等城市展现

出的较高的有机物料回收潜力(>70%)，我们在本文的模型中将 2050 年的减排潜力设定为每年 3 亿吨二氧化碳当量。

促进自然系统再生

再生农业实践有望将食物系统从气候变化的始作俑者转变为解决方案的主要行动领域。从广义上来看，再生耕作是指以改善土壤健康、提高农业生物多样性和改进当地生态系统的方式种植粮食。这在实践中如何操作要取决于当地背景、种植规模和其他因素。不过，所有的实践都有一个共同的想法，那就是要着眼于大局，关注整个生态系统的发展。其中，土壤有机物扮演着至关重要的角色。土壤有机物可以改善土壤的物理结构，培育有益微生物，从而实现一连串的系统效益：不仅能够增加碳封存储量，还能提升土壤保水性，并减少对合成肥料的依赖。在进行研究分析时，我们参考了递减减排项目（Project Drawdown，这是一项正在进行的计划，已经确定了应对全球变暖的 80 种最有效的干预措施）中的大量数据。全球农业用地主要分为两大类：牧场（33 亿公顷）和农田（15 亿公顷）⁹⁷。这两种类型的土地都可以固碳，但具体措施的选择还是要取决于气候、土壤类型、土地坡度和其他因素。

在牧场上，提升有机物质含量的主要做法是饲养牲畜和种植植物。实现这一目标的关键方法是管理型放牧（如下文模型所示）或林草复合经营/管理（即在放牧区内整合乔木作物）。对农田而言，则可以通过最大程度地减少土壤扰动，以及减少甚至消除合成物投入实现碳效益。农田中多年生作物的根群是固碳的理想场所，不过，在土壤中施用有机肥料、生物固体和其他绿色废弃物等方式也能实现固碳。再生农业涵盖的方法形形色色，如保护性农业、农业生态学、永续农业、零预算自然农业，多层次农林业等。本文使用了涵盖多种方法的广义类别术语对碳效益进行建模。

- **管理放牧（每年 14 亿吨二氧化碳当量）**：这种方法以牲畜饲养为工具，通过仔细控制牧场的放牧和休息时间增强土壤肥力。如果管理得当，这种做法将能改善土壤健康水平、增加土壤固碳能力、提升土壤保水性，并能提高草料产量。这种方法需要多种不同的放牧技术，如优化牲畜密度、增加草种，以及利用牧场和围场定期

轮换动物等。理论上，世界上 33 亿公顷的牧场中，大约有 40% 都可以使用这些技术⁹⁸。目前，管理型放牧土地面积约为 8000 万公顷。保守估计，若是只有一半的剩余牧场能够成功实现转化，那么到 2050 年，将产生 14 亿吨二氧化碳当量的年度碳收益。该估值既计算了碳净固存量，又考虑了肠内发酵和牧场粪便降解带来的相关碳排放。

- **再生农业技术（每年 25 亿吨二氧化碳）** 再生农业技术指的是可应用于耕地的一组技术，这些技术能够减少多种作物类型带来的温室气体排放，并增加土壤的碳捕集量。再生农业方案包含一系列使用措施，包括最大程度地减少土壤扰动（免耕）、使用覆盖作物、间作和使用有机肥料等。这些措施会以不同的方式减轻气候变化的影响，比如：在作物根部和微生物中固碳，通过低耕或免耕方式防止土壤碳流失，减少对农业机械、水泵和合成投入等碳密集生产要素的需求等。全世界共有 8 亿公顷的农田适用于再生农业⁹⁹，其中大约有 4000 万公顷的土地已经采用了这种耕作方式。假设剩余的土地中，有 80% 都能采用再生农业，那么每年产生的碳效益将达到 25 亿吨二氧化碳当量。

4.2 要想进一步减少食物系统的排放， 多项干预措施不可或缺

上述循环经济策略的采纳可将整个食物系统的碳排放减少 49%。为了实现百分之百的减排，其他多项干预措施不可或缺。除去本文模型中所列的措施外，还需要进一步改进耕作方法，继续发展和扩大新兴技术，采取措施鼓励人们改变行为。

新兴技术包含一系列前景广阔的干预措施，如精准农业和扩大牛饲料中甲烷抑制剂的使用等。精准农业技术有助于减少每单位作物产量所需的农业生产要素（种子、水或化学制品）。不过，在抑制气候变化上，该技术最重要的应用是解决化肥的过度使用问题。2010 年，化肥的过度使用造成了 19% 的农业生产排放¹⁰⁰，这其中以氮肥的使用最为有害，因为它与土壤接触会释放一氧化二氮（一种强大的温室气体），而且每增加一千克肥料，排放就会呈指数型增长¹⁰¹。减少化肥的使用还能减少与其生产相关的工业排放。

甲烷抑制剂是源自海藻、单宁、油类等自然资源，以及合成化学制品的补充剂。研究证明，将其混入饲料中后，可以减少反刍动物多达 30% 的肠道发酵¹⁰²。肠道发酵是农业温室气体排放的首要来源，因此，研究人员需要找到使奶牛排放更少气体的方法，或是找到进食后天生就不怎么排放气体的牛品种。

在数字技术领域，人工智能（AI）、物联网（IoT）、算法基因编辑、以及其他第四次工业革命技术¹⁰³也可以在解决食物系统的排放方面发挥作用。以简单的数据收集系统为例，人工智能技术赋能的食物废弃物厨房秤可以自动收集食物废弃物的数据，帮助餐厅或酒店做出更好的食品采购决策。人工智能技术的使用可以扩展到更高级的应用上，例如，为可再生生物原料寻找到更多的用途，帮助设计出内生能量较低的新型食品。总部位于智利的初创公司 NotCo 证明了这种方法的潜力：该公司的人工智能平台会从分子水平上分析食物，然后设计出碳强度较低，但质地和味道相似的食物产品。

改良的农业技术也能提供一系列减排解决方案。水稻田的季中排水可以使水稻的生长条件从无氧转变为有氧，大大降低全球水稻种植带来的甲烷排放。对粪便管理体系进行

改良后，就能显著减少动物尿液与粪便分解所带来的大量一氧化二氮和甲烷排放。当然，最终究竟采用哪项技术要因环境而异，但大多数技术都旨在通过厌氧消化收集沼气，并利用生物固体提高土壤肥力。PrairieFood 公司开发了一项十分有前景的技术，能将粪便和食物垃圾转化为生物炭（由植物物质产生的木炭）。混入表土层后，生物炭可以实现固碳，增强养分循环，并改善土壤结构。

改变行为主要是指改变饮食习惯和减少过度消费。无论是针对个人、机构、企业还是家庭，改变行为都是减少食物废弃物的关键因素。改变行为被大众视作减少排放的关键¹⁰⁴，但它也极具挑战性，因为这些行为通常与社会和文化问题密切相关，需要开展长期的教育计划和公共卫生宣传，并且成效并不会立竿见影。话虽如此，循环“食品设计师”可以在影响人们行为变化方面扮演重要角色，他们可以在食物和产品方面为人们提供更多低碳健康的选择。

4.3 循环经济方法具有成本效益

落实上述循环策略后，到 2050 年预计实现每年 7000 亿美元的经济效益。¹⁰⁵ 直接的经济机会包括有机物的资源化利用以及价值 260 亿美元的氮磷回收，如果没有回收流程，这些氮和磷的流失将意味着极大的经济损失。这一机遇的重点在于，通过设计消除食物浪费后，过剩的可食用食物及其蕴含的重要市场价值就不会白白流失。重新分配可食用食物后，城市中有价值的食物可以免于流向垃圾填埋场的命运，维护城市食品安全计划的成本也会相应降低。

在食物系统中应用循环经济思维可以带来许多其他的经济效益。通过对餐厨废弃物进行定期分析，Winnow 的智能秤可以使餐饮企业的食物成本降低 2% ~ 8%¹⁰⁶。通过减少农业生产要素的投入，再生农业可以降低生产成本。在印第安纳州，农民 Rodney Rulon 购买了约 10 万美元的覆盖作物，在 6200 英亩的耕地上种植了这些覆盖作物后，共计节省了价值 57000 美元的化肥，利润也增加了 10.7 万美元¹⁰⁷。在印度北部，有超过 16 万名农民都在实行零预算自然农业，这种方法能将农业副产品转化为可活化土壤、保护种子的接种剂。这样一来，农民就无须借钱购买昂贵的合成肥料，在减少债务负担的同时，还能提升食品安全性和利润¹⁰⁸。在意大利，高效收集有机废弃物的好处正在不断涌现。在帕尔马，由路边收集转为上门收集可使每年有机废弃物的处理成本下降 45 万欧元（51 万美元）¹⁰⁹。

4.4 循环经济方法具有全系统效益

循环食物系统能够帮助我们突破地球运行的安全界限，并实现联合国可持续发展目标。在全球范围内打造一个更具循环力的食物系统，将更有助于稳定“地球界限（planetary boundaries）”的多个方面。这一概念由斯德哥尔摩韧性研究中心（Stockholm Resilience Centre）提出，特指近年受到人类工业活动“大加速”^{xxii}威胁的九大关键地球系统过程。再生农业和更好的养分循环可以减少磷和氮的流失，并保护基因多样性——受到最严重破坏的两项安全运行界限。当然，循环食物系统还将带来许多其他环境效益，如保护生物多样性、避免土壤退化、增加淡水储存等。除环

境效益之外，社会效益也不胜枚举。国际资源委员会（IRP）2016 年发布的一份报告显示，建立一个“资源智慧型”食物系统“对 17 项联合国可持续发展目标中至少 12 项的实施都至关重要”¹¹⁰。

更加循环的食物系统还能显著改善健康状况。在上述效益中，以减少农药使用的成效最为显著。预计到 2050 年，若避免与农药相关的疾病，每年可节约 5500 亿美元的医疗费用。另一项重要的潜在健康效益是抗生素耐药性的降低，而耐药性对公共健康的威胁早已令诸多科学家忧心忡忡。若在牲畜和鱼类养殖中应用再生实践，并对废水处理体系加以改进，那么到 2050 年，将减少耐药性对数百万人生命所构成的潜在威胁。水污染、食源性疾病和空气污染的减轻，对其他健康问题都会带来积极影响。就空气污染而言，鉴于更再生的农业实践将会减轻空气污染，到 2050 年，每年有望挽救 29 万条生命。

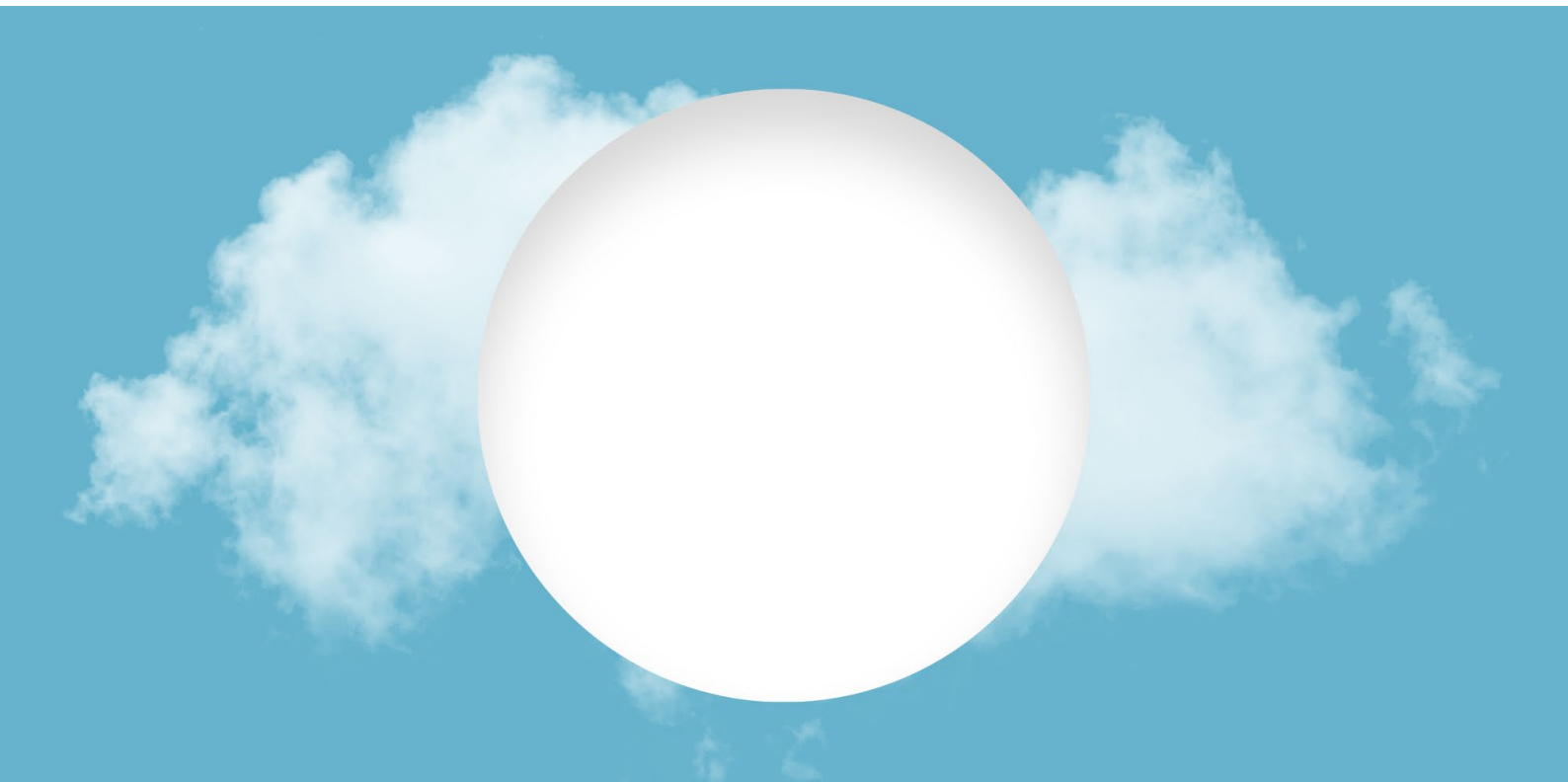
气候危机是当今世界的一大挑战，但加强食品安全、解决 8 亿多人营养不良的问题，以及改善全世界贫困人口的生计和生活质量也迫在眉睫。好消息是，再生农业和其他循环方法有望同时解决许多关键问题，正如政府间气候变化专门委员会（IPCC）近期在土地使用报告中所说的那样：“许多与土地相关的应对措施不仅有助于适应并缓解气候变化，还能够防治荒漠化和土地退化，提升粮食安全”¹¹¹。

xxii 指人类世的最新时代，在此时代人类活动对地球自然系统的影响速率显著增加。

图 9: 食物系统转型的十大关键变革



循环经济策略是这一转型的核心部分, 到 2050 年, 相关经济效益每年可能高达 10.5 万亿美元, 改善地球生活的方方面面。¹¹²



5

循环经济能够提升 应对气候变化的韧性

循环经济不仅能够有效减少温室气体排放，还能提升应对气候危机的能力。有迹象表明，循环经济商业模式能够有效分散风险，提升整个供应端应对极端天气等气候风险的灵活性和韧性。

农业领域在这方面所展现的证据较为充足，研究结果表明，再生农业实践和气候韧性之间有正向关系。不过，由于不同地区、不同行业、以及不同社会经济环境间存在较大差别，循环经济所能改善的气候韧性程度会随情境的不同而改变。本章概述了再生农业实践所能带来的机遇。至于机遇前景规模及具体示例，还需后续研究。

5.1 气候变化会带来重大商业风险

气候变化会引发各种自然灾害，为企业和投资者带来严重影响。自然气候灾害可分为急性自然气候灾害和慢性自然气候灾害两大类。急性自然气候灾害由事件驱动，主要包括较为严重的干旱、洪水等极端天气；慢性自然气候灾害则以持续高温和海平面上升等长期气候变化为代表。

气候变化会带来一系列商业风险。如今，越来越多的跨国企业都将气候变化视作一个系统性风险¹¹³。在一项针对标准普尔 100 指数（一种衡量全球性企业业绩的指数）展开的研究中，研究人员列出了企业对气候变化的五大担忧¹¹⁴：

1. 产能减少或中断，例如，断电或关键原料短缺。
2. 运营成本增加，例如，主要原材料或备用品成本上升。
3. 业务中断，例如，设施或物流体系受损。
4. 资本成本增加，例如，工厂设施或设备升级费用、保险费用。
5. 对产品和服务的需求下降，例如，市场偏好转移。

在上述第一点担忧中，人们偶尔会忽视的一点就是气候变化会如何影响原材料的获取和供应。原材料的储备和生产在世界范围内并非均匀分布，各地在面对气候变化风险时的承受力和受打击程度也有所不同¹¹⁵。例如，铝土储量最多的六个国家的储量之和占到了全球总储量的 70%，其中，约有 75% 的储量都面临着严重的气候灾害风险¹¹⁶。此外，部分“关键”材料^{xxiii}的供应稳定性也引发了极大的担忧，其中最引人关注的就是稀土。欧盟之所以十分关注这些材料，是因为整个地区都面临相关产能不足的问题。并且，资源的日益稀缺以及未来主要供应地可能受到气候变化、垄断、政治动荡等冲击都使得供应端面临随时断供的风险¹¹⁷。

结构性因素会削弱企业应对气候风险的能力。全球经济的供应链相互联系、相互依存，结构也日趋复杂。企业在采购

材料和部件时，来源地更加多样，但经济活动也日渐集中于特定地理区域；效率的提升日益重要（如准时化生产），但与此同时，企业生产活动也易受老旧基础设施的限制；除此之外，信息不对称及透明度缺失也为企业运营带来了诸多挑战¹¹⁸。企业不仅会因此易受突发事件影响，还会因所涉网络过于复杂而难以预测突发性事件。全球企业都应对此报以警惕，毕竟“某偏远地区的一场风暴或干旱可能会使整个供应链体系停止运转”。¹¹⁹ 这些“跨国气候影响”不受国界限制，并且可波及全球经济¹²⁰。一个众所周知的例子就是 2011 年发生于泰国的洪涝灾害。当时，电子和汽车领域的众多供应商因洪水袭击而中断供应，导致全球严重依赖泰国供应商的 14500 家企业中中断运营¹²¹。西部数据公司（Western Digital）占全球硬盘市场的三分之一，因无法供应 45% 的出货量直接导致惠普亏损 20 亿美元，丰田、本田和日产分别少交付 24 万辆、150 万辆和 3.3 万辆汽车的局面¹²²。当时，保险损失共计 150 至 200 亿美元¹²³。

人们正日益了解气候韧性的价值及其实现方法。越来越多的证据表明，与无所作为相比，投资气候韧性将带来可观的收益和成本效益¹²⁴。最近的一份报告显示，未来十年，若在五项关键气候适应策略中投资 1.8 万亿美元，将带来 7.1 亿美元的总净收益^{xxiv}。另一项研究发现，无论哪个行业，提高气候韧性在各行业都能带来近七倍的投资回报率（成本约为 3120 亿美元，对比约为 2.1 万亿美元的潜在收益）¹²⁵。增强气候韧性的所需要素均已确立，包括多样性、灵活性、包容性、协作和整合。这些特性共同构成气候韧性的框架，如斯德哥尔摩韧性研究中心（Stockholm Resilience Centre）的“七项原则¹²⁶”，以及奥雅纳和洛克菲勒的城市韧性框架（Arup/ Rockefeller City Resilience Framework）所展现的。不过，将这些原则付诸实践并非易事。一项调查发现，虽然高达 72% 的供应商都认为气候风险会严重影响其业务运营、收入或支出，但只有一半的企业在进行气候风险管理¹²⁷。

xxiii 欧盟将关键材料定义为“具有重要的经济效益，且供应端存在高风险的原材料”。欧洲委员会（European Commission），Study on the review of the list of critical materials: criticality assessment（《关键材料清单审查研究：关键性评估》）（2017 年）

xxiv 我们考量的五大领域分别为预警体系、具有气候韧性的基础设施、改良版的旱地农业、红树林保护区，以及能够提高水资源韧性的投资。全球适应委员会（Global Commission and Adaptation），Adapt now: a global call for leadership on climate resilience（《乘胜追击：加强气候韧性的全球领导力呼吁》）（2019）

锂供应和电动汽车（EV）电池。对电动汽车而言，原材料供应的风险在锂离子电池的生产中尤为明显。虽然锂资源储量十分丰富且遍布全球，但它一直跻身“关键金属”之列^{xxv}。从富锂卤水中提取锂的方式成本较低，但只有智利和澳大利亚等零星几个国家采用此工艺。并且，他们的锂元素产量可以占到全球总产量的 70%¹²⁸。从提取环节一直到车辆的生产和分销，锂元素的整个供应链特别容易遭受洪水和极端天气事件的影响，因此，也常常出现采矿等作业的延迟或中断情况。此外，虽说锂元素的生产主要集中在南半球，但锂离子电池的制造却集中在北半球，因此，在港口停泊和运输过程中也存在很多不确定性。除了依赖少数易受干扰的供应商，供应网络本身的复杂性也增加了锂离子电池产业链的脆弱性，因为单个电池组件的生产就需要多种原始资源的投入¹²⁹。

5.2 循环经济能够提高各行业的韧性，从而应对气候风险

循环经济商业模式在工业领域的应用有望提高气候韧性。在循环经济体系下，商业模式的设计会基于重复使用、部件再制造和材料回收等特征。鉴于原材料易受气候相关风险的影响，材料和部件的供应正日益与原材料的消耗脱钩。由于材料和部件更多来源于消费者，其多样性和灵活性都得到了提升。这有望将气候风险更广泛地分散到整个供应链中，增强其气候韧性¹³⁰。

这些商业模式在降低风险方面的潜力已经逐渐得到认可。再制造最重要的驱动力之一，就是“自然灾害和地缘政治冲突等因素正日益影响着全球脆弱的供应体系，导致供应端风险增多，以及相关原材料成本上升¹³¹”。欧盟委员会认为，回收利用是一种“降低风险的举措¹³²”。总体而言，IRP 的观点是“向材料再制造和回收利用的转变可以增加材料的多元性，并为基于材料攫取模式的经济体带来高附加值的经济活动¹³³”。回收利用已让部分企业获益。例如，雷诺已在法国建立了专门负责汽车零部件再制造和翻新的工厂。这样一来，雷诺就不需要再依赖海外资源，也减少和分散了重新配置其供应链的风险。英国的 Energy Storage 公司开发了一种技术，主攻锂离子电池的维修、升级和重复使用，

这样一来，锂离子电池在离开车身，还能再拥有 25 年的使用寿命，而电动汽车也可以减少对供应端较为脆弱的锂原料的依赖（参见专栏）¹³⁴。

当然，不同地区情况的不同将会导致实施这些举措成效的不同。局部和跨国气候影响所带来的破坏程度因地区而异，因为每个国家的气候危害类别、经济发展水平、对材料 and 产品进出口的依赖程度，以及政治背景等方面各不相同。因此，各大机构在应对气候风险时，应当采取“跨规模的多维视角¹³⁵”。这就意味着在本地产品和材料的重复使用（以及相关逆向物流）与偏远地区的原材料采购之间达成平衡，以减少气候危机带来的负面影响。当然，需要被纳入考量的因素远不止于此。在建立分布范围更广的供应链时，运营效率必须被纳入考量，因为供应链网络越复杂，其成本就越高，管理起来也更加麻烦。

食物领域尤其易受气候风险的影响。上述自然风险可以对农业造成毁灭性打击，这样的案例屡见不鲜：2019 年 6 月，美国中西部爆发洪灾，导致当时数百万英亩的土地无法播种¹³⁶；美国加利福尼亚州 2011 年爆发的旱灾持续了五年，仅 2014 年一年的农业直接损失就为 15 亿美元左右，约占该州农业总产值的 3%¹³⁷。此外，食物系统还面临其他行业没有的风险，如病虫害和物候变化（后者会影响动植物的生命周期，改变生长季节的开始和结束时间）¹³⁸。这些影响不仅难以预测，还具备“范围广、复杂程度高的特点，并会随地理环境、时间节点、社会和经济状况的变化而变化¹³⁹”。短期来看，气候变化影响或许有利有弊，因为在温带地区，平均温度的略微升高可以提高作物产量，而在水资源短缺的热带地区，缺水等因素可能会导致作物产量下滑。从长远来看，有两点是确定的：一是全球将面临越来越多的不确定因素；二是虽然气候变化会带来一定的益处，但“负面影响将占主导地位¹⁴⁰”。

再生农业实践作为食物循环经济的核要素，可以提高土壤韧性。实践证明，合理放牧和再生耕地等再生农业实践能够改善土壤健康水平。土壤的健康水平提高后，将能更好地

xxv Defra 进行的一项研究，用八种标准对 69 种元素和矿物质的关键程度进行了排序。这八种标准被分为重大风险标准和供应风险标准两类。重大风险标准包括全球消费水平、替代潜力、全球增温可能和物质需求总量；供应风险标准包括稀缺性、垄断供应、主要供应区域的政治动荡，以及主要供应地区受气候变化影响的程度。英国环境、食物和农村事务部（DEFRA），A review of national resource strategies and research（《国家资源策略与研究综述》）（2012 年）

抵御强风和洪水的侵蚀，水分的吸收和储存能力也会提升，从而更好地对抗洪水和干旱。再生农业实践在这方面拥有巨大的潜力：若将土壤表层 12 英寸中的有机物含量增加 1%，每公顷土壤就能额外储存 14.4 万升水¹⁴¹。美国北达科他州有一家占地 5000 英亩的耕种畜牧混合农场，该农场采用了再生农业实践后，其土壤渗透率提高了 30%，每英亩的固碳率至少增加了两倍，产量提高了 20%¹⁴²。采用气候韧性的农业方法时也需要具体情况具体分析。例如，易受气候变化影响地区的小农可以采用保护性农业体系或自然农业体系提高韧性。零预算自然农业（ZBNF）就是一个很好的例子。这种低投入技术在印度安得拉邦得到了广泛利用，为 13 万多名农民带去了福祉。ZBNF 使用经过发酵的农场副产品来提升土壤活性，再加上绿色化肥的使用，成功提升了土壤的保水能力，同时还提高了产量，并改善了作物情况¹⁴³。

总之，循环经济有望提升对气候危机的韧性，但仍需更深入的研究。众所周知，循环经济能够增强对气候危机的韧性。但是，其扮演的角色究竟有多重要，成果有多显著，还需后续研究作进一步探讨。毕竟，这方面的研究屈指可数，针对农业以外领域的研究则更是凤毛麟角。另一点值得注意的是，并非所有循环经济机遇都能提升韧性：紧凑型城市发展能够使资产和资源得以高效利用，但与此同时也使风险过于集中，使城市遭受气候变化的影响更大。不过，上述振奋人心的潜力值得我们对此进行更多探索。有一点是肯定的：应对气候危机，我们迫切需要提高韧性的策略，如果这些策略还能减少排放并创造经济价值，那何不一石三鸟呢？

6

乘胜追击：携手前行

本文列举了多项具体的循环经济策略，均能在应对气候危机的过程中扮演重要角色。循环经济与可再生能源的转型均是节能减排的关键，在解决全球剩余 45% 与材料和产品生产相关的排放问题方面，循环经济不可或缺。有了循环经济，应对气候变化的策略蓝图才算完整。当然，这种转型离不开从决策者到学术界等多个利益相关方的共同行动。唯有采用系统性的方法，我们才有望增强应对气候危机的韧性，实现 2050 年全球平均温升不超过 1.5°C 的目标。

国际机构的角色

制定标准，协调各方，鼓励向净零排放的循环经济转型。

• 将循环经济纳入国际议程

循环经济举措在助力实现环境目标和增强气候韧性等方面潜力巨大，但现有气候对话对其认知并不充分。在设定国际议程时，循环经济应被提至与退耕还林、能效提升、可再生能源发展等其他公认的关键气候行动同等的位置。这样一来，《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）等组织才会将循环模式视作一个有效的国家自主贡献（NDC）框架，帮助各国加速净零碳的转型，以实现 2050 年气候目标。2019 年 3 月，第四届联合国环境大会（UNEA-4）正式通过了关于“实现可持续消费和生产的创新途径”的决议：“提请各成员国在制订相关国家计划和政策时，将如何实现可持续消费和生产纳入考量，其中包括但不限于提高资源效率和发展循环经济^{xxvi}”。

• 促进循环产品和材料贸易

为了支持循环经济的发展，国际贸易需要“尽一己之力，实现与环境韧性相关的目标¹⁴⁵”。在这方面，制定有关可回收性、可修复性、生态设计、标签、材料和化学使用的国际标准可以发挥关键的促进作用。此举可以消除针对二次原料、再制造和再翻新产品的贸易壁垒。可促进循环经济的科技也可因此受益，在全球得到应用¹⁴⁶。

• 鼓励资本转向循环经济投资

在为加速向零排放循环经济提供资金支持上，影响力投资者发挥着关键作用。过去五年，欧洲投资银行（EIB）为中小企业运营的循环项目提供了 21 亿欧元的联合融资。这些项目减少了材料和能源消耗，增加了环境和气候效益，并极大推动了创新^{xxvi, 147}。至于贷款工具和服务，则能以风险承担工具、项目贷款、财政资助和技术咨询服务等形式存在。世界银行（World Bank）、国际金融公司（International Financial Corporation）、亚洲基础设施投资银行（Asian Infrastructure Investment Bank）和非洲投资银行（African Investment Bank）等其他多边开发银行也能采用类似的方法。为了进一步加快向低碳经济转型，欧盟正在研究如何将可持续发展（包括循环经济策略等）纳入其金融政策框架中¹⁴⁸。欧盟的目标是鼓励资本推动可持续增长，并为世界各地，尤其是新兴经济体提供对标项目。

• 协调气候政策

循环经济可为最亟待克服的一些全球性挑战提供解决方案，满足多个国家和地区的政策目标。它能在应对气候危机、实现多个可持续发展目标的基础上，实现经济繁荣，提升气候韧性。有鉴于此，各国应发挥协同

xxvi “欧洲投资银行（European Investment Bank）表示，会坚持其未来 5 年在气候行动方面投入约 1000 亿美元的目标。这是多边机构对气候融资所能做出的最大贡献，而且早已远超其本身的气候融资目标。”欧洲投资银行（European Investment Bank），Together on climate（《共同应对气候问题》）。

作用，确保政策能够相辅相成¹⁴⁹。

• 鼓励和支持协作

循环经济转型离不开政府、投资界、行业、企业、学术界和民间组织之间的协作。国际机构应发挥自身的号召力。比如，世界经济论坛的加速循环经济平台（PACE）推出了多个与塑料、电子、食物和生物经济、商业模式和市场转型等相关的公私合作项目，旨在加强中国、东盟、欧洲和非洲之间在循环经济的领导力、协作、投资、政策和行动方面的改革¹⁵⁰。

政策制定者的角色

激励、动员并加速向净零排放的循环经济转型^{xxvii}。

• 将循环经济纳入气候变化策略

极具雄心的循环经济目标可被纳入区域、国家、城市的气候策略、路线图、长期目标和计划中，以加速推动向极具韧性的净零碳经济转型。例如，《巴黎协定》就要求各国定期提交报告，阐明其国家自主贡献（NDC），以及在减排和应对气候危机方面所做的努力。国家自主贡献必须每五年更新一次。这就带来了使各国更加重视循环经济举措的机会，并将其视作一项能够加速实现，甚至提高国家气候目标的行动计划。例如，部分欧盟成员国正将循环经济举措纳入国家能源和

气候计划，因为“众所周知，循环经济有助于实现脱碳目标¹⁵¹”。一些国家也在着手制定相关策略计划，荷兰就推出了“全国性循环经济项目（Government-wide Programme for a Circular Economy）”。预测显示，政策实施后，到 2050 年，碳排放约可减少 1300 万吨（保守估计）¹⁵²。城市政府也在作出承诺，制定目标，推动净零碳的转型^{xxviii}。

• 鼓励和加快推广新型循环解决方案

政策制定者可以利用公共资金支持并加速循环经济举措的推广。2015 年，经济合作与发展组织（OECD）成员国的公共支出相当于 25% ~ 57% 的 GDP¹⁵³。在进行公共采购招标时，政策制定者可以纳入循环经济和二氧化碳强度标准，鼓励市场推出创新的循环经济举措，支持研究、能力建设、示范项目和早期项目的打造。加拿大多伦多市就建立了一个循环经济采购实施计划和框架，在 2021 年正式提出建议前，事先进行了为期三年的试点¹⁵⁴。值得注意的是，欧洲绿色公共采购（European Green Public Procurement）政策标准中也纳入了循环经济元素。

• 鼓励循环经济投资并降低相关风险

对于潜力大、风险高的循环项目，公私合营和风险投资等手段能够分担和降低投资风险。例如，欧盟 JESSICA 城市发展基金（EU JESSICA Urban Development Funds）会从欧盟成员国、城市和其他公共和 / 或私人渠道募资，而这些资金会再以股权、贷款和担保的形式投资于支持城市可持续发展和再生实践的项目^{xxix}。

• 建设基础设施并翻新资产

xxvii 要想更深入地了解国家和地方政府为实现循环经济转型所出台的各种政策工具，请参见报告：艾伦·麦克阿瑟基金会，City governments and their role in enabling a circular economy transition: an overview of policy levers（《城市政府及其在促进循环经济转型中的作用：政策工具概览》）（2019 年）；艾伦·麦克阿瑟基金会，Delivering the Circular Economy: a Toolkit for Policymakers（《实现循环经济——决策者工具包》）（2015 年）

xxviii CDP 最新研究表明，在 596 个城市的减排行动和气候策略排名中，7% 的城市得分最高（如巴黎、开普敦和旧金山），其中 5 个城市已经出台了 100% 使用可再生能源的目标（如巴黎、旧金山和堪培拉）。在 CDP 新一轮的城市气候变化排名中，有 43 个城市评为 A 级（2019）

xxix 欧洲城市可持续投资联合支持（JESSICA）是欧洲委员会（European Commission）与欧洲投资银行（European Investment Bank）和欧洲开发银行理事会（Council of Europe Development Bank）合作提出的一项倡议；欧洲投资银行 European Investment Bank），The EIB in the circular economy（《循环经济中的欧洲投资银行》）（2018）；欧洲委员会（European Commission），JESSICA: joint European support for sustainable investment in city areas（《JESSICA：欧洲城市可持续投资联合支持》）；伦敦大学学院（University College London），JESSICA urban development funds – impact funds: a concept for urban policy delivery（《JESSICA 城市发展基金——影响基金：城市政策执行的概念》）（2011 年 6 月 14 日）

要想确保城市地区的材料、产品和营养物质能够实现有效的再循环，城市政府扮演着重要角色。它们可以打造一系列基础设施，如资产共享基础设施、废弃物收集系统、废弃物处理设施、材料库，以及拆卸和回收中心等。城市政府在翻新和重建基础设施时，可以考虑采用低碳、节能、模块化、易于修复、适应性强、耐用或坚固的设计，并且使用由二次原料制成的产品。加拿大温尼伯市¹⁵⁵ 在这一点已作出实践，在内部建立起一个综合的资产数据库，帮助自身更清楚地了解究竟有多少（哪些）城市资产因维护不妥、设计不当或寿命到期而未能充分利用、表现欠佳和年久失修。结合源自“材料护照”和循环经济绩效指标的信息后，城市政府就能更好地利用和维护资产。

• 利用财政杠杆创造有利条件并提供行动激励

借助财政政策，城市政府可以打造循环经济产品、服务和实践的先导市场。应对碳排放定价，并针对来自没有此机制地区的进口产品考虑采取相应的定价措施^{xxx} 与平衡机制。从地方政府的角度来看，财政措施可以包括：对符合循环经济原则的产品或业务提供税收优惠、为使用二次材料的企业提供税收减免、对产生无法提取价值的废弃物的企业征税，以及为共享、维修和回收等业务提供税收减免¹⁵⁶。例如，瑞典就为服装、自行车和白色家电维修企业减免了 50% 的增值税¹⁵⁷。

• 建立赋能性法规

法律法规能够促进资源的重复使用，并且杜绝浪费。政府可对现行标准进行修订，推出低排放解决方案，如设定混凝土中水泥的最高含量等。政府对产品和材料的二氧化碳强度、可重复使用性、可回收性和可修复性设定指标和标准可加快二次材料和产品的发展规模，并且增加产品的耐用性¹⁵⁸。例如，法国正计划将可修复性指数和禁止销毁未售出的货物纳入其新版循环经济法¹⁵⁹。

企业的角色

创新、启发并展示净零排放循环经济机遇。

• 将循环经济纳入战略规划

企业可在策略制定和治理框架中凸显循环经济产生价值的潜力。例如，企业在阐述其使命、承诺、目标和计划时，可对循环经济有所提及。有了气候变化和循环经济策略后，企业便可出台一系列工具和指标评估进展，可以衡量循环性在减少温室气体排放、降低成本、增强客户关系、有别于竞争对手和激励创新等方面的成效。比如，户外运动用品公司 Houdini 就设定了“到 2030 年，产品和供应链实现 100% 循环发展”的目标。该公司的一大设想就是发布一份年度《地球安全运行极限评估报告》（Planetary Boundaries assessment report），指明公司运营的影响，并且追踪目标实现情况¹⁶⁰。

• 试点、创新和投资

企业可以推出一系列试点、孵化器和示范项目，先行测试循环业务解决方案，以便更好地了解企业、社会和环境能够从中获得哪些福祉。例如，阿迪达斯（Adidas）花了多年时间进行测试，最终才实现了 Futurecraft 系列产品的突破性创新，带来全新设计与工艺。Loop 是全球第一款 100% 可回收的高性能跑鞋，整鞋只使用一种材料，在使用周期结束后，可以通过回收升级制成一双新鞋¹⁶¹。企业还能善加利用投资基金或是内部专用资金来支持中小创新企业的发展，从而进一步推动循环创新¹⁶²。

xxx 到 2030 年，政策举措将使碳排放成本累计增加 8 万亿美元。未来的碳排放成本越高，政策的延迟时间越长，政策行动的预期和协调程度就越低。美世咨询公司（Mercer），Climate change scenarios – implications for strategic asset allocation（《气候变化情景对策略资产配置的影响》）（2011）。

• 企业传播和提高公众意识

企业可以主动与大众进行沟通，提高公众意识，并获得其支持。这种活动旨在建立公众对二次原料和产品的信任，并让他们逐渐接受共享模式，而非一味追求拥有产品。除此之外，此类活动还旨在提高公众对温室气体排放的关注，并了解循环经济在节能减排中扮演的角色。旨在促进产品重复使用、回收和资源高效设计的活动屡见不鲜，如联合利华 (Unilever) 的“明智使用塑料” (Get Plastic Wise) 倡议¹⁶³、可口可乐 (Coca-cola) 的“天下无废” (World Without Waste) 倡议¹⁶⁴，以及巴塔哥尼亚 (Patagonia) 的“不要买这件夹克” (Don't Buy This Jacket) 倡议¹⁶⁵。

• 鼓励协作

气候变化是一个复杂的问题，唯有团结一心才能找到解决方案。当涉及塑料、纺织品或食物等复杂的材料流时，整个价值链都需要参与进来，围绕一个共同的愿景展开合作。对材料使用和循环有影响的企业应当尽早作出承诺，出台激励措施，并采取非竞争性行动。例如，艾伦·麦克阿瑟基金会“循环时尚” (Make Fashion Circular) 倡议发起的牛仔裤再造项目便汇集了来自学术界、品牌商、零售商、生产商、回收商、分拣商和非政府组织的 40 多位牛仔裤专家，共同擘画牛仔裤的未来。《牛仔裤再造指南》 (The Jeans Redesign Guidelines) 对服装的耐久性、材料的安全性、可回收性和可追溯性均提出了最低要求。该指南希望引导时装产业按照循环经济原则设计和生产牛仔裤。未来，牛仔裤将更加经久耐用，易于回收，其生产方式也会更有利于工人和环境的健康¹⁶⁶。

投资方的角色

支持净零排放循环经济的发展，提供资金，推动规模化。

• 调动资本参与循环经济

资方可引导更多资产和资金参与循环经济产业供应链，促使相关企业获取更多价值 (例如，通过产品创新、产品优化、开拓二手材料和翻新商品市场)，从而减少温室气体排放，提升应对气候变化的韧性。循环商业模式融资能力提升策略包括：在金融商业模式中考虑产品寿命终期价值；确定已用产品在二手市场的剩余价值；提供银行融资、风险投资、资本市场融资、影响力投资等多种融资模式；优化现金流，缩短回收期，以便降低循环商业模式合约中的风险 (例如，在按使用收费模式的前几年收取较高费用)；在服务型商业模式中，提供“承包”延期资产的机会等¹⁶⁷。例如，意大利联合圣保罗银行 (Intesa Sanpaolo Bank) 和欧洲投资银行 (European Investment Bank) 联合提供 10 亿欧元的信贷基金，支持中型企业和意大利中小企业开展循环经济项目¹⁶⁸。

• 认识和评估循环经济降低投资风险的效益

通过风险和定价模型，投资方可评估循环商业模式的各个维度，包括材料的价格波动、信用风险、资产估值，以及产品和资产管理等¹⁶⁹。若投资方根据循环经济因素调整这些风险和定价模型，会发现循环经济可有效降低投资组合中的气候风险及其他系统风险 (包括由气候变化所导致的波动性)，形成实施循环经济策略的业务组合。此外，循环商业模式可提升 ESG (环境、社会和治理) 方面的成果¹⁷⁰。

• 提供金融建议

一些资方 (如银行) 拥有很强的二手和翻新商品价值评估能力，他们可为企业提供专业投资建议，助其更好地降低风险或提高项目的融资能力¹⁷¹。要完成此

举，资方需与中小企业合作，弥补自身在循环商业模式和风险方面的认知差距。有了相关知识后，投资方便可进行项目审查，取长补短，为循环商业模式提供激励措施¹⁷²。投资人还可在企业和业务方案中加入可持续发展与循环经济相关的要求。对尚不具备盈利能力的企业，资方可提供其他融资方案，并支持企业应对商业模式和技术风险的挑战¹⁷³。例如，循环资本（Circularity Capital）为支持中小企业在循环经济领域的创新，提供股权融资、策略支持、专业运营支持、能力建设和市场开发等服务¹⁷⁴，帮助企业实现循环经济策略，识别市场趋势，获取创新和实现价值的机会。

学术界的角色

针对净零排放循环经济机遇，进行教学、研究与证实。

• 循环经济教学

在各层次的教学增加循环经济原则课题，促使未来领袖和年轻专业人士转变思维方式，获取循环经济相关的观点、技能与能力，并在职业生涯中将其“发扬光大”，为社会向低碳经济迈进提供技能和知识基础。例如，荷兰代尔夫特理工大学（TU Delft）开发了大型线上公开课《可持续建成环境中的循环经济》（Circular Economy for a Sustainable Built Environment），学生和专业人士均可注册学习课程；埃克塞特大学（University of Exeter）在其循环经济中心（Centre for Circular Economy）提供了大量学习机会，包括“大挑战”学习项目（Grand Challenge），其中便有气候变化专题。

• 推动循环经济研究

应用研究是创新的引擎。它可提供行业和政策转型所需的关键观点和知识。在循环经济领域，许多关键问题仍是学术空白，或处于研究早期，我们需要推动相

关学术研究，以增长知识，促进产业改变固有行为，最终应对气候变化。罗切斯特理工大学（Rochester Institute of Technology）已经与行业开展合作，共同创立了 REMADE 学院，推动早期应用研究和技术发展的落地，从而大大减少工业化材料生产和加工过程中的能源消耗和碳排放。伦敦大学学院（University College London）则通过其跨专业、跨学科的 CircEL 项目，利用专业知识，改进建筑和产品设计，实现材料回收和循环利用。

• 学生引领创新

学生是推动循环经济转型的一大重要动力。学生可投入大量精力对相关议题进行探索与应用，推动循环经济解决方案的发展。佐治亚理工大学（Georgia Tech University）发起了“碳减排挑战”（Carbon Reduction Challenge）项目，鼓励学生利用暑假时间与企业合作，开发新创意与新技术，减少企业合作伙伴的碳足迹。

• 不动产管理

作为大型不动产，大学具有强大的购买力和复杂的供应链。大学校园可在相关产业业务中充当循环经济实践的“灯塔”和区域先锋。许多大学都制定了长远的校园可持续发展计划及减排目标。例如，布拉德福德大学（Bradford University）的目标是到 2020 年减少 50% 的碳排放，截至 2018 年，碳排放已减少了 30%，在世界绿能大学排行榜中（UI Green Metric World University Rankings）位列第 14 名。

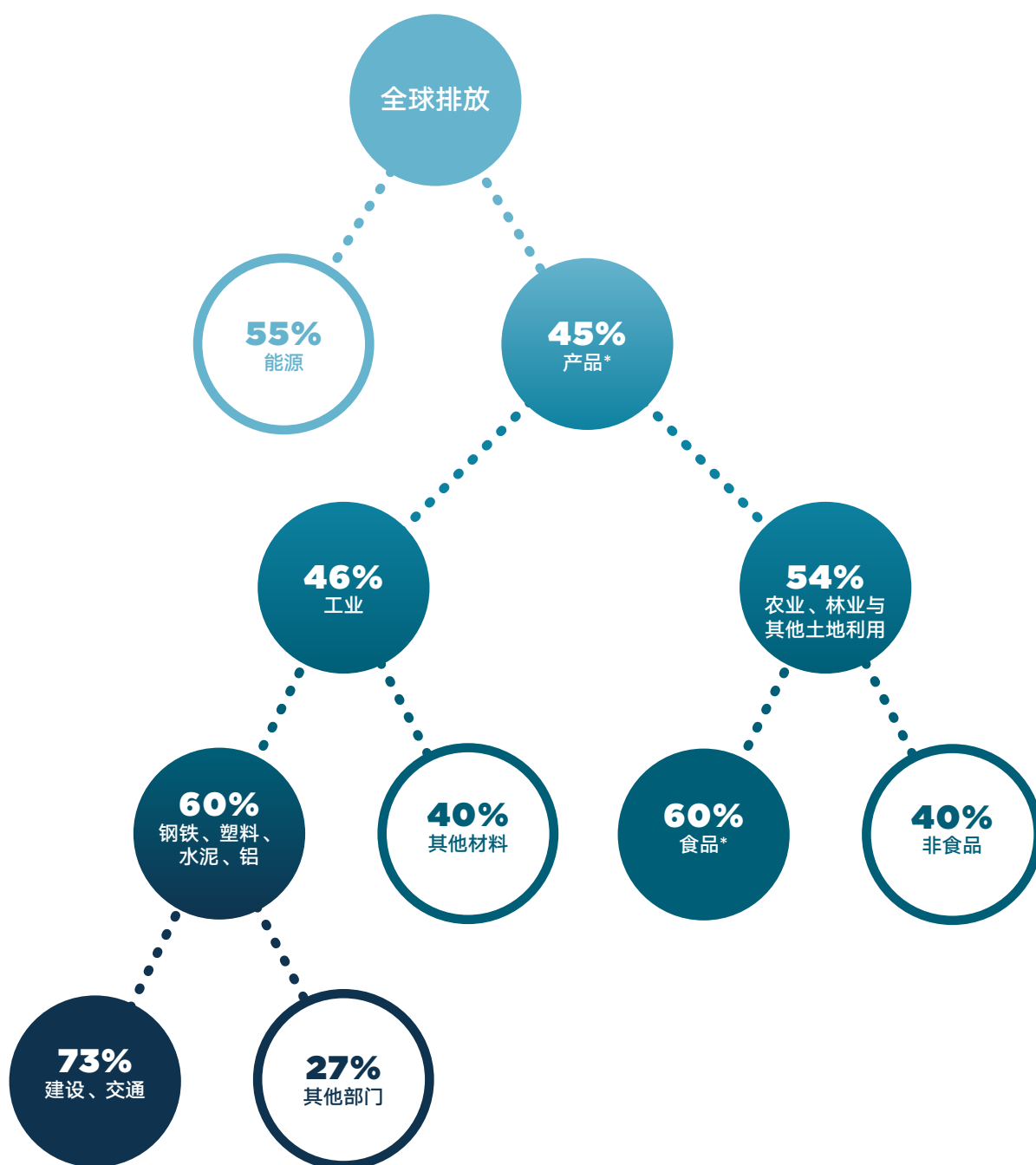
• 领导并影响地方变化

大学的地方影响力强大，扮演领导和推动变革的重要角色。大学可与当地政府（或区域 / 国家资助人）合作，为大规模循环经济转型提供动力，帮助应对现有的一系列气候挑战。例如，亚利桑那州立大学（Arizona State University）便与大凤凰城地区（Greater Phoenix）的当地合作伙伴和凤凰城（City of Phoenix）合作，研究、开发并实施了有益社区发展和改善环境的循环经济解决方案¹⁷⁵。

附录

图 10：本文范围说明

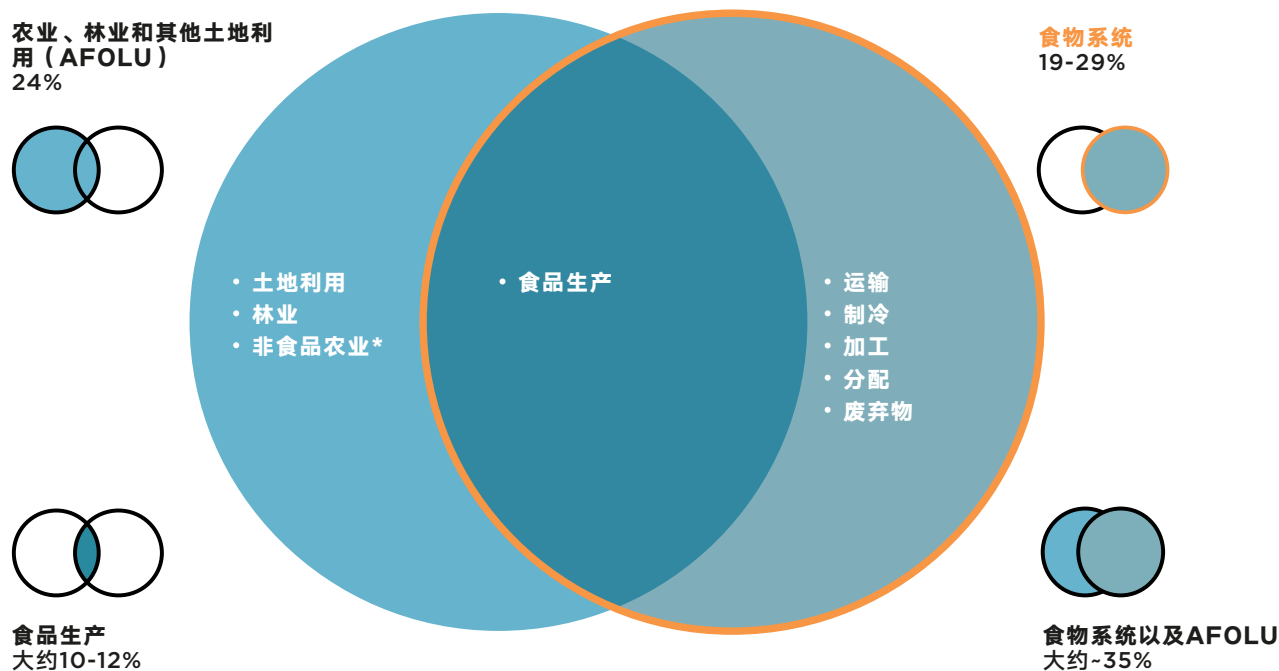
白色圆圈显示了本文未涵盖的区域



* 本文的重点是“食物系统”，包括食品生产、食品物流（加工、分配、存储）和直接食物垃圾排放。然而，如图 10 所示，政府间气候变化专门委员会将“食品”项下所有农业（包括非食品生产）和大部分林业与其他土地利用排放都纳入了其中。造成这种情况的主要原因是很难对食品排放与非食品排放作区分，因此大多数研究会将所有农业排放都归在食品项下。本本文中所使用“食物系统”范围如图 11 所示。

图 11: 本文食物系统范围

2010年, 占全球人类活动排放百分比



全球食物系统排放与 AFOLU 部门产生的排放互有联系, 重叠部分被定义为食品生产排放。本文对“食物系统”的定义包括食品生产、食品物流 (加工、分配、存储) 和直接食品废弃物排放。

* 非食品农业包括生物燃料、生物基塑料、生物基化学品和棉花等。

尾注

- 1 世界经济论坛 (World Economic Forum), Global Risks 2016 (《2016 年全球风险报告》) (第十一版) (2016 年)
- 2 C40, Protecting our capital (《保护我们的资本》); 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), 'Chapter 3: Impacts of 1.5°C of global warming on natural and human systems' in Global Warming of 1.5°C (《全球升温 1.5°C 特别报告第三章: 全球变暖升温 1.5°C 对自然和人类系统的影响》); 这是 IPCC 有关在前工业化水平的基础上全球温度上升 1.5°C 的影响, 以及相关全球温室气体排放路径的特别报告, 报告的背景是在全球范围内齐心协力, 共同应对气候变化威胁, 加强可持续发展, 并致力于消除贫困 (2018 年)。
- 3 联合国环境规划署 (United Nations Environment Programme), Emissions gap report 2018 (《2018 年排放差距报告》) (2018 年)
- 4 联合国环境规划署 (United Nations Environment Programme), Emissions gap report 2018 (《2018 年排放差距报告》) (2018 年); 能源转型委员会 (Energy Transitions Commission), Better energy, greater prosperity: achievable pathways to low-carbon energy systems (《更好的能源, 更伟大的繁荣——实现低碳能源系统的途径》) (2017 年)
- 5 The Futures Centre, The growing middle class (《不断壮大的中产阶级》)
- 6 国际资源委员会 (IRP), Global resources outlook 2018: natural resources for the future we want (《全球资源展望 2018: 自然资源与我们想要的未来》); 生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台 (IPBES), Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services (《全球生物多样性和生态系统服务评估报告》决策者摘要) (2019 年)
- 7 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), Global warming of 1.5°C: summary for policymakers (《全球升温 1.5°C 特别报告: 决策者摘要》) (2018 年)
- 8 联合国环境规划署 (UNEP), Emissions gap report 2018 (《2018 年排放差距报告》) (2018 年)
- 9 国际可再生能源署 (IRENA), Global energy transformation: a roadmap to 2050 (《全球能源转型路线图 2050》) (2018 年)
- 10 彭博新能源财经 (Bloomberg NEF), New energy outlook 2019 (《2019 年新能源展望》) (2019 年)
- 11 国际可再生能源署 (IRENA), Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables (《可再生能源未来的创新前景: 整合可变可再生能源的解决方案》) (2019 年)
- 12 普华永道 (PwC), The Low Carbon Economy Index 2019: emissions relapse (《2019 年低碳经济指数: 排放回升》) (2019 年)
- 13 国际能源署 (International Energy Agency), World energy investment 2019: executive summary (《2019 年世界能源投资: 执行摘要》) (2019 年); 国际可再生能源署 (IRENA), Global energy transformation: a roadmap to 2050 (《全球能源转型路线图 2050》) (2018 年)
- 14 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), Climate change 2014: mitigation of climate change (《2014 年气候变化: 缓解气候变化》); 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第三工作组 (Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014 年); 美国环境保护署 (United States Environmental Protection Agency), Global greenhouse gas emissions data (《全球温室气体排放数据》)
- 15 国际资源委员会 (IRP) 和联合国环境规划署 (UNEP), Global resources outlook 2019: natural resources for the future we want (《全球资源展望 2019: 自然资源与我们想要的未来》) (2019 年)
- 16 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), Climate change 2014: mitigation of climate change (《2014 年气候变化: 缓解气候变化》); 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第三工作组 (Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014 年); 美国环境保护署 (United States Environmental Protection Agency), Global greenhouse gas emissions data (《全球温室气体排放数据》)
- 17 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry (《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》) (2019 年)
- 18 同上。
- 19 世界基准联盟 (World Benchmark Alliance), Measuring what matters most: seven systems transformations for benchmarking companies on the SDGs (《衡量什么是最重要的: 可持续发展目标基准公司的七大系统转型》) (2019 年); 联合国 (United Nations), The Sustainable Development Goals agenda (《可持续发展目标议程》); 国际资源委员会 (International Resource Panel), Food systems and natural resources (《食物系统和自然资源》) (2016 年)
- 20 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The new plastics economy: catalysing action (《新塑料经济: 催化行动》) (2017 年)。
- 21 同上。
- 22 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry (《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》) (2019 年)
- 23 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》) (2015 年)
- 24 世界资源研究所 (WRI), Creating a sustainable food future: reducing food loss and waste (《创造可持续的食品未来: 减少食品损失和浪费》) (2013 年 6 月)
- 25 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The new plastic economy: rethinking the future of plastics (《新塑料经济: 反思塑料的未来》) (2014 年)
- 26 ClimateTechWiki, Carbon sink and low-carbon building materials (《碳汇和低碳建筑材料》)
- 27 同上。
- 28 Drawdown, Land use: bamboo (《土地利用: 竹》)
- 29 国际资源委员会 (IRP) 和联合国环境规划署 (UNEP), The weight of cities: resource requirements of future urbanization (《城市权重: 未来城镇化的资源需求》) (2018 年)
- 30 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry (《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》) (2019 年)
- 31 Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K. L. 和 Habert, G., A sustainable future for the European cement and concrete industry (《欧洲水泥和混凝土行业的可持续未来》) (2018 年)
- 32 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Splosh: how re-thinking the business model for cleaning products can influence design (《Splosh: 对清洁产品的商业模式如何影响设计进行反思》)
- 33 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), A new textiles economy: redesigning fashion's future (《新纺织经济: 重塑时装的未来》) (2017 年)
- 34 欧洲商业联合会 (Business Europe), Renault's remanufacturing of spare parts (《雷诺零部件再制造》) (2017 年)

- 35 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》(2019 年)
- 36 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The new plastic economy: rethinking the future of plastics (《新塑料经济: 反思塑料的未来》)(2016 年)
- 37 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), Climate change 2014: mitigation of climate change (《2014 年气候变化: 缓解气候变化》), 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第三工作组 (Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014 年)
- 38 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》(2019 年)
- 39 查塔姆研究所 (Chatham House), Making concrete change: innovation in low- carbon cement and concrete (《改变混凝土: 低碳水泥和混凝土创新》)(2018 年)
- 40 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》(2019 年)
- 41 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The new plastic economy: rethinking the future of plastics (《新塑料经济: 反思塑料的未来》)(2017 年)
- 42 材料经济学公司 (Material Economics), The circular economy: A powerful force for climate mitigation (《循环经济: 减缓气候变化的有力措施》)(2018 年)
- 43 Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K. L. 和 Habert, G., A sustainable future for the European cement and concrete industry (《欧洲水泥和混凝土行业的可持续未来》)(2018 年)
- 44 世界基准联盟 (World Benchmark Alliance), Measuring what matters most: seven systems transformations for benchmarking companies on the SDGs (《衡量什么是最重要的: 可持续发展目标基准公司的七大系统转型》)(2019 年); 2018 年联合国可持续发展高级别政治论坛 (HLPF), Review of SDGs implementation: SDG12 – ensure sustainable consumption and production patterns (《可持续发展目标执行情况审查: 目标 12—— 确保可持续消费和生产模式》)(2018 年)
- 45 联合国环境规划署 (UNEP) 和国际能源署 (IEA), Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector, Global Status Report(2017 年全球现状报告: 建设零排放、高效、有韧性的建筑施工行业)(2017 年)
- 46 国际资源委员会 (IRP) 和联合国环境规划署 (UNEP), The weight of cities: resource requirements of future urbanization (《城市权重: 未来城镇化的资源需求》)(2018 年)
- 47 同上。
- 48 建筑 2030 (Architecture 2030), New buildings: embodied carbon (《新建筑: 隐含碳》)
- 49 材料经济学公司 (Material Economics), Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry《工业转型 2050: 欧盟重工业实现净零排放的途径》(2019 年)
- 50 同上。
- 51 世界银行,《垃圾何其多: 全球固体废弃物管理评审》(2012 年); 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》)(2015 年)
- 52 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), A circular economy in Brazil: case study appendix (《巴西循环经济: 案例研究附录》)(2017 年); Whirlwind Steel, Impacts of 3D printing on the construction industry (《3D 打印对建筑业的影响》)(2016 年 3 月 30 日)
- 53 国际社会责任认证组织 (Waste and Resources Action Programme), Waste reduction potential of on site volumetric construction (《异地模块化建筑在减少废弃物方面的潜力》)
- 54 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》)(2015 年)
- 55 伦敦废弃物循环利用理事会 (LWARB), Towards a circular economy – context and opportunities(《迈向循环经济——背景与机遇》)(2015 年)
- 56 Gijsbers, Ir.R., 寻求结构适应性, 延长未来空间使用中灵活性相关建筑物的功能寿命, 埃因霍芬理工大学: 国际适应性建筑结构会议 (2006 年)
- 57 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》)(2015 年)
- 58 Honicet, M. 等, Data- and stakeholder-management framework for the implementation of BIM-based material passports, (《实施基于 BIM 的材料认证的数据与利益相关者管理框架》), Journal of Building Engineering (《建筑工程杂志》)(2019 年); 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》)(2015 年)
- 59 循环经济公司 (Circle Economy)、Fabric、荷兰应用科学研究机构 (TNO)、荷兰阿姆斯特丹市政府, Circular Amsterdam: a vision and action agenda for the city and metropolitan area (《循环阿姆斯特丹: 城市和大都市区的愿景与行动议程》)(2016 年)
- 60 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Circular economy in India: rethinking growth for long-term prosperity(《印度循环经济: 重新思考增长, 实现长期繁荣》)(2016 年)
- 61 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Circular economy in cities (《城市循环经济》)(2019 年)
- 62 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》)(2015 年)
- 63 国际资源委员会 (IRP) 和联合国环境规划署 (UNEP), The weight of cities: resource requirements of future urbanization (《城市权重: 未来城镇化的资源需求》)(2018 年); Salat, S., Bourdic, L. 和 Kamiya, M., Economic foundations for sustainable urbanization: a study on three-pronged approach: planned city extensions, legal framework, and municipal finance(《可持续城市化的经济基础: 三管齐下研究: 城市扩展、法律框架和市政财政规划》)(2017 年)
- 64 新气候经济 (New Climate Economy), Better growth, better climate: the new climate economy report(《更好的增长, 更好的气候: 新气候经济报告》)(2014 年)
- 65 国际资源委员会 (IRP) 和联合国环境规划署 (UNEP), The weight of cities: resource requirements of future urbanization (《城市权重: 未来城镇化的资源需求》)(2018 年)
- 66 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation) 和奥雅纳工程顾问公司 (Arup), The circular economy opportunity for urban and industrial innovation in China (《中国城市和产业创新的循环经济机遇》)(2018 年)
- 67 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》)(2015 年); 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Circular economy in India: rethinking growth for long-term prosperity (《印度的循环经济: 反思长期繁荣增长》)(2016 年); 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation) 和奥雅纳工程顾问公司 (Arup), The circular economy opportunity for urban and industrial innovation in China (《循环经济——中国城市与工业的创新机遇》)(2018 年)
- 68 C40 城市, The future of urban consumption a 1.5°C world (《全球升温 1.5°C 的未来城市消费》)(2019 年)

- 69 国际能源署 (IEA), CO₂ emissions statistics《二氧化碳排放量统计》(2019 年); 世界经济论坛 (World Economic Forum), The number of cars worldwide is set to double by 2040 (《2040 年全球汽车数量翻番》) (2016 年)
- 70 碳信托 (Carbon Trust), Automotive: international carbon flows《汽车: 国际碳素流》(2010 年)
- 71 同上。
- 72 材料经济学公司 (Material Economics), The circular economy: A powerful force for climate mitigation (《循环经济: 减缓气候变化的有力措施》) (2018 年)
- 73 国际清洁交通委员会 (The International Council on Clean Transportation), European Vehicle Market Statistics 2017/2018 (《2017、2018 年欧洲汽车市场统计》) (2018 年)
- 74 Riversimple, The technology behind the hydrogen car (《氢动力汽车支撑技术》)
- 75 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》) (2015 年)
- 76 美国交通运输部联邦公共管理局 (US Department of Transportation Federal Transit Administration), Public transportation's role in responding to climate change (《公共交通在应对气候变化中发挥的作用》) (2010 年)
- 77 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), CE100 Member Open Motors (《Open Motors, CE100 成员》); OpenMotors
- 78 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The Circular Economy Applied to the Automotive Industry (《循环经济在汽车工业中的应用》) (2012 年)
- 79 汽车制造商和贸易商会 (SMMT), 2018 UK automotive sustainability report (《2018 年英国汽车可持续性报告》) (2018 年)
- 80 S.S. Yang 等, The impact of automotive product remanufacturing on environmental performance《汽车产品再制造对环境绩效的影响》, Elsevier B.V (2015 年)
- 81 欧盟委员会 (European Commission), Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the council on end-of-life vehicles《欧洲议会理事会关于报废车辆第 2000/53/EC 号决议》(2000 年)
- 82 欧洲汽车制造商协会 (European Automobile Manufacturers Association), Circular Economy (《循环经济》) (2019 年)
- 83 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The Circular Economy Applied to the Automotive Industry (《循环经济在汽车工业中的应用》) (2012 年)
- 84 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》) (2015 年)
- 85 经济合作与发展组织 (Organisation for Economic Cooperation and Development), Urban mobility system upgrade: how shared self-driving cars could change city traffic (《城市交通体系升级: 共享自动驾驶汽车如何改变城市交通》), (2015 年) Ellen MacArthur Foundation, SUN, and McKinsey Center for Business and Environment, Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (2015)
- 86 C40 城市, The future of urban consumption a 1.5°C world (《全球升温 1.5°C 的未来城市消费》) (2019 年)
- 87 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation)、SUN 和麦肯锡商业与环境中心 (McKinsey Center for Business and Environment), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe (《内部增长: 循环经济在竞争激烈的欧洲的前景》) (2015 年); 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Circular economy in India: rethinking growth for long-term prosperity (《印度的循环经济: 反思长期繁荣增长》) (2016 年); 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation) 和奥雅纳工程顾问公司 (Arup); The circular economy opportunity for urban and industrial innovation in China (《循环经济——中国城市与工业的创新机遇》) (2018 年)
- 88 国际资源委员会 (IRP), Food systems and natural resources (《食物系统和自然资源》) (2016 年)
- 89 世界资源研究所 (WRI), 5 questions about agricultural emissions, answered (《农业排放五问》) (2019 年 7 月 29 日)
- 90 粮农组织 (FAO), Key facts on food loss and waste you should know! (《你必须了解的有关食品损失和浪费的重要事实!》)
- 91 Indigo, Terraton initiative
- 92 Scarborough, P. 等, Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK《英国食肉者、食鱼者、素食者和纯素食者的饮食温室气体排放量》,《气候变化》(Climatic Change) (2014 年)
- 93 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Urban biocycles (《城市生物环》) (2017 年)
- 94 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Cities and the circular economy for food (《城市与食物循环经济》) (2019 年)
- 95 Maktabifard, M., Zaborowska, E. 和 Makinia, J., Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production (《通过节约能源和提高可再生能源产量实现废水处理厂能源中和》), 《环境科学与生物/技术综述》(Reviews in Environmental Science and Bio/Technology) (2018 年)
- 96 作者个人参观污水处理企业并与技术人员交谈。
- 97 Metabolic, The global food system: an analysis《全球食物系统分析》(2017 年 3 月)
- 98 递减减排项目, Food - managed grazing《食品——管理放牧》(2019 年)
- 99 递减减排项目, Food - regenerative agriculture《食品——再生农业》(2019 年)
- 100 Zhang, W.-F. 等, New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China (《减少中国氮肥温室气体排放的新技术》), 《美国国家科学院院刊》(Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America) (2013 年)
- 101 《科学新闻》(Science News), Fertilizer produces far more greenhouse gas than expected《化肥产生的温室气体远超预期》(2014 年 6 月 9 日)
- 102 Hristov 等, An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production (《抑制剂能持续减少奶牛的肠道甲烷排放, 对产奶量没有负面影响》) (2015 年 8 月)
- 103 世界经济论坛 (World Economic Forum), Innovation with a purpose: the role of technology innovation in accelerating food systems transformation (《有目的的创新: 技术创新在加速食物系统转型中的作用》) (2018 年 1 月)
- 104 Springmann, M. 等, Options for keeping the food system within environmental limits《将食物系统维持在环境影响限度内的可选方案》, 《自然》(Nature) (2018 年)
- 105 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Food initiative - igniting a food system transformation (《食物倡议——引发食物系统转型》)
- 106 Winnow
- 107 《纽约时报》(The New York Times), Cover crops: a farming revolution with deep roots in the past (《覆盖作物: 一场深深扎根于过去的农业革命》), 作者 Stephanie Strom, (2016 年 2 月 6 日)
- 108 全球国际地圈——生物圈计划 (Global International Geosphere-Biosphere Programme Change), Great acceleration (《变革: 大提速》) (2015 年)
- 109 欧洲零废弃运动 (Zero Waste Europe), The story of Sardinia, cas

- 110 国际资源委员会 (IRP), Food systems and natural resources (《食物系统和自然资源》) (2016 年)
- 111 政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate change and land (《气候变化和土地》) (2019 年)
- 112 粮食和土地利用联盟 (Food and Land Use Coalition), Growing better: ten critical transitions to transform food and land use(《更好地发展：推动食品和土地利用转型的十大关键变革》) (2019 年 9 月)
- 113 商务社会责任国际协会 (Business Social Responsibility), Nexis Report: Climate + supply chain – the business case for action (《Nexis 报告：气候 + 供应链 —— 商业行动案例》) (2018 年)
- 114 气候和能源解决方案中心 (Centre for Climate and Energy Solutions), Weathering the storm: building resilience to climate change (《渡过难关：增强抵御气候变化的能力》) (2013 年)
- 115 Auberger, A. 等, Climate change impacts on mining and raw material supply chains (《气候变化对采矿和原材料供应链的影响》), 德国环境署 (German Environment Agency) (2019 年)
- 116 同上。
- 117 英国环境、食品和农村事务部 (Department for Environment, Food and Rural Affairs), A review of national resource strategies and research (《国家资源策略与研究综述》) (2012 年)
- 118 世界企业永续发展委员会 (World Business Council for Business Development), Building resilience in global supply chains (《建设全球供应链适应力》) (2015 年); 商务社会责任国际协会 (Business Social Responsibility), Why climate resilience and supply chains go hand in hand: how to integrate climate change risks and opportunities into supply chain management (《为何气候适应力和供应链息息相关：如何将气候变化风险和机遇纳入供应链管理》) (2018 年)
- 119 世界企业永续发展委员会 (World Business Council for Business Development), Building resilience in global supply chains (《建设全球供应链适应力》) (2015 年)
- 120 斯德哥尔摩国际环境研究院 (Stockholm Environment Institute), Introducing the Transnational Climate Impacts Index: indicators of country-level exposure – methodology report (《引入跨国气候影响指数：国家一级暴露指标 —— 方法学报告》) (2016 年)
- 121 商务社会责任国际协会 (Business for Social Responsibility), Climate and supply chain management(《气候和供应链管理》) (2018 年)
- 122 同上。
- 123 同上。
- 124 麦肯锡 (McKinsey), Why and how utilities should start to manage climate-change risk (《公用事业为何应该、应该如何开始管理气候变化风险》) (2019 年)
- 125 碳披露项目 (Carbon Disclosure Project), Major risk of rosy opportunity (《良机背后的主要风险》) (2018 年)
- 126 奥雅纳与洛克菲勒基金会 (Arup and Rockefeller Foundation), City Resilience Index (《城市适应力指标》) (2014 年); 斯德哥尔摩复原力中心 (Stockholm Resilience Centre), Applying resilience thinking: seven principles for building resilience in social-ecological systems (《运用适应力思维：在社会生态系统中建立适应力的七项原则》) (2012 年)
- 127 企业社会责任与推动可持续发展 (Business for Social Responsibility and Driving Sustainable Economies), From agreement to action: mobilising suppliers toward a climate resilient world (《从协议到行动：推动供应商迈向适应气候变化的世界》) (2015 年)
- 128 世界企业永续发展委员会 (World Business Council for Business Development), Building resilience in global supply chains (《建设全球供应链适应力》) (2015 年)
- 129 同上。
- 130 Foresight 项目与政府科学办公室 (Foresight and Government Office for Science), Future of manufacturing project: evidence paper 35 – sustainability and manufacturing (《制造业项目的未来：证据文件 35 —— 可持续性制造业》) (2013 年)
- 131 全英议会可持续资源小组与全英议会制造业小组 (All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group and All-Party Parliamentary Manufacturing Group), Triple win: the social, environmental, and economic case for remanufacturing (《三赢：推动再制造的社会、环境和经济理由》) (2014 年)
- 132 欧盟委员会 (European Commission), Critical raw materials (《关键原材料》)
- 133 国际资源委员会 (IRP) 和联合国环境规划署 (UNEP), Global outlook 2019: natural resources for the future we want (《全球资源展望 2019：自然资源与我们想要的未来》) (2019 年)
- 134 Energy Storage 公司, Cycle of life: a circular economy approach to lithium batteries (《使用周期：锂电池循环经济方法》) (2019 年 8 月 27 日)
- 135 同上。
- 136 《经济学人》(The Economist) 杂志, Floods and storms are altering American attitudes to climate change (《洪水和风暴正在改变美国对气候变化的态度》) (2019 年 5 月)
- 137 加利福尼亚州立大学戴维斯分校流域科学中心 (UC Davis Center for Watershed Sciences), Drought's economic impact on agriculture (《干旱对农业的经济影响》) (2016 年)
- 138 欧盟委员会 (European Commission), Science for environment policy (《环境政策科学》) (2016 年 6 月 10 日)
- 139 Vermeulen, S., Campbell, B. 和 Ingram, J., Climate change and food systems(《气候变化与食物系统》), 见《环境与资源年度回顾》(Annual Review of Environment and Resources) (2012 年)
- 140 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), Climate change and land (《气候变化和土地》) (2019 年)
- 141 Massy, C., Call of the Reed Warbler: a new agriculture, a new earth(《芦苇鸣鸟的召唤：新的农业，新的地球》), 切尔西绿色出版社 Chelsea Green Publishing, 白河汇口, White River Junction (2018 年)
- 142 自然资源保护委员会 (Natural Resources Defence Council), How did Farmer Brown bring his dying land back from the brink? (《农夫布朗如何拯救他垂死的土地?》) (2018 年 9 月 28 日)
- 143 联合国环境规划署 (UNEP), Andhra Pradesh to become India's 1st Zero Budget Natural Farming State (《安得拉邦成为印度第一个零预算自然农业邦》) (2018 年 6 月)
- 144 联合国环境规划署联合国环境大会 (UN Environment Assembly of UNEP), Innovative pathways to achieve sustainable consumption and production (《实现可持续消费和生产的创新途径》) (2019 年)
- 145 世界贸易组织 (World Trade Organization) 与联合国环境规划署 (UNEP), Making trade work for the environment, prosperity and resilience (《让贸易为环境、繁荣和适应力服务》) (2018 年)
- 146 经济合作与发展组织 (Organisation for Economic Cooperation and Development) 资源效率与循环经济项目 (Resource Efficiency & Circular Economy Project), International trade and the transition to a circular economy – policy highlights (《国际贸易与向循环经济转型 —— 政策亮点》) (2018 年)
- 147 欧洲投资银行 (European Investment Bank), The EIB in the circular economy (《循环经济中的欧洲投资银行》)
- 148 欧盟委员会 (European Commission), Sustainable finance (《可持续金融》)
- 149 经济合作与发展组织 (Organisation for Economic Cooperation and Development) 资源效率与循环经济项目 (Resource Efficiency & Circular Economy Project), International trade and the transition to a circular economy – policy highlights (《国际贸易与向循环经济转型 —— 政策亮点》) (2018 年)
- 150 世界经济论坛 (World Economic Forum), Platform for accelerating the circular economy (《循环经济加速平台》)

- 151 欧盟委员会 (European Commission), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee of the regions: united in delivering the Energy Union and Climate Action – setting the foundations for a successful clean energy transition“委员会致欧洲议会、欧洲理事会、各地区欧洲经济和社会委员会的信函：联合开展能源联盟和气候行动——为成功实现清洁能源转型奠定基础”(2019 年)
- 152 荷兰应用科学研究组织, Effecten van het Rijksbrede Programma Circulaire Economie en de Transitieagenda's op de emissie van broeikasgassen, (2018 年); 基础设施和环境部、经济事务部 (The Ministry of Infrastructure and the Environment and the Ministry of Economic Affairs), A circular economy in the Netherlands by 2050 (《2050 年荷兰的循环经济》)(2016 年)
- 153 经济合作与发展组织 (Organisation for Economic Cooperation and Development), General government spending (《一般政府支出》)(2018 年),
- 154 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), Toronto: circular economy procurement implementation plan and framework (《多伦多：循环经济采购执行计划和框架》)(2019 年)
- 155 温尼伯市政府, 2018 City asset management plan (《2018 年城市资产管理计划》)(2018 年)
- 156 De Groene Zaak, Governments going circular(《政府循环转型》)(2015 年)
- 157 世界经济论坛 (World Economic Forum), Sweden is paying people to fix their belongings instead of throwing them away (《为鼓励增加物品利用率，瑞典为物品修理费买单》)(2016 年 10 月 27 日)
- 158 苏格兰政府, Climate change plan: third report on proposals and policies 2018–2032 (《气候变化应对计划：关于 2018—2032 年提案和政策的第三份报告》)(RPP3)(2018 年)
- 159 《电讯报》(The Telegraph), France to ban unsold clothes and electronics from being destroyed in 'world first' (《法国新规禁止销毁未出售服装和电子产品》)(2019 年 6 月 4 日)
- 160 Houdini, Planetary Boundaries Assessment (《环境安全界限评估》)(2019 年)
- 161 Quartz, Adidas's zero-waste sneaker is a simple idea that took years to execute(《阿迪达斯零浪费运动鞋仅为初步想法，离真正实行尚远》)(2019 年)
- 162 奥纬咨询公司 (Oliver Wyman), Supporting the circular economy transition: the role of the financial sector in the Netherlands (《支持循环经济转型：荷兰金融部门的作用》)(2017 年)
- 163 联合利华 (Unilever), Our five point plastics plan in the UK and Ireland (《我们在英国和爱尔兰的五点塑料计划》)(2019 年)
- 164 可口可乐, A world without waste: Coca-Cola announces ambitious sustainable packaging goal (《一个没有浪费的世界：可口可乐宣布了雄心勃勃的可持续包装目标》)(2018 年)
- 165 Patagonia, (Don't buy this jacket), (《别买这件夹克》), 《纽约时报》(New York Times), 黑色星期五 (2011 年)
- 166 艾伦·麦克阿瑟基金会 (Ellen MacArthur Foundation), The jeans redesign: guideline (《牛仔裤再设计：指南》)(2019 年)
- 167 ING 集团公司, Financing the circular economy (《循环经济融资》)(2015 年)
- 168 意大利联合圣保罗银行 (Intesa SanPaolo), From Intesa Sanpaolo and the EIB 1 billion euro for Midcaps and the Circular Economy (《联合圣保罗银行、欧洲投资银行出资 10 亿欧元推动中型股和循环经济发展》)(2019 年)
- 169 ING 集团公司, Financing the circular economy(《循环经济融资》)(2015 年)
- 170 CDC 集团投资项目——环境、社会与管理工具包, Resource efficiency and the circular economy (《资源效率和循环经济》)(2018 年)
- 171 奥纬咨询公司 (Oliver Wyman), Supporting the circular economy transition: the role of the financial sector in the Netherlands (《支持循环经济转型：荷兰金融部门的作用》)(2017 年)
- 172 ING 集团公司, Financing the circular economy(《循环经济融资》)(2015 年)
- 173 奥纬咨询公司 (Oliver Wyman), Supporting the circular economy transition: the role of the financial sector in the Netherlands (《支持循环经济转型：荷兰金融部门的作用》)(2017 年)
- 174 Circular Capital, Our approach (《我们的途径》)
- 175 亚利桑那州立大学 (Arizona State University), Economic Impact Opportunity of Circular Economy in Phoenix (《凤凰城循环经济的经济影响机遇》)

艾伦·麦克阿瑟基金会 © 版权所有, 2019 年

www.ellenmacarthurfoundation.org

Charity Registration No.: 1130306

OSCR Registration No.: SC043120

Company No.: 6897785