促进中英两国就中国棕地和边缘土地再利用方面制定低碳和可持续方法的合作

2017 年 1 月

本报告的目的是提供关于如何利用现有创新方法来将可持续修复与城市规划和公共领域设计相结合的信息。

执行摘要

快速城市化以及工业变革带来的土地利用变化留下了大量受到污染的工业和商业地区（也称为棕地）和边缘土地地区。来自英国、欧盟和美国的最新证据表明，这些土地可能具有相当大的可再生能源生产潜力，例如太阳能、风能或生物质能。同时，有机会在复垦土壤中储存碳，也可生产可再生能源。英国也正在主导了解可从生态系统服务实现的更广泛并行效益以及通过改善绿色空间带来的公共健康效益。这些多重服务可以协同方式通过后工业场所的软再利用一起提供。这样，中国的后工业再生地区应被视为新企业、社会和更广阔环境的主要机会。可再生能源项目的银行可贴现性提高以及发展自愿碳补偿行业的可能性意味着收入流可能足以支付盈利性持续土地管理费用。在对英国公司和中国最快带来利益方面，可再生能源与“双重利用”相结合的可能性将在短期内为中国城市提供更容易的商业棕地再利用机会，同时也会创造更好的碳管理机会，以及各种更加广泛的可持续性效益。因此，这种类型的再利用将为中英企业之间的快速商业交流和发展创建一个平台。考虑到中国正在制定一项全国土壤污染和治理行动计划，预计将投入 7 万亿元人民币，相当于国家外汇储备的三分之一。本报告就中国棕地和边缘土地再利用方面制定低碳和可持续方法，及时提供了中国可持续修复机会的决策支持信息。

本报告旨在为希望参与可再生能源和碳管理应用的可持续修复实施的土地修复利益相关者提供工具和资源指南。它还为不熟悉可持续修复的修复利益相关者提供有关概念、实践和可用资源方面的信息。报告利用了英国在棕地可持续修复（SURF-UK）、棕地软再利用（例如，除建筑外的能源或便利设施）、对污染土地的有效最终用途指导风险管理以及可持续修复方面的领导地位。

致谢

本报告是中国繁荣战略项目基金（SPF）《促进中英两国就中国棕地和边缘土地再利用方面制定低碳和可持续方法的合作》（项目编号 16AG15）的成果之一。

报告编写人员：

作者	组织
Frédéric Coulon 教授 ✉ **Ying Jiang 博士** **Pablo Campo-Moreno 博士** **Phil Longhurst 教授**	克兰菲尔德大学
Paul Bardos 教授 ✉ **李笑诺**	r3 Environmental Ltd 布莱顿大学和中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室（中国北京）
Nicola Harries ✉	CL:AIRE
Kevin Jones 教授 **Hong Li 教授** ✉	兰卡斯特大学
李发生教授 ✉ **曹云者教授**	中国环境科学研究院（CRAES）
胡清教授 ✉ **Jingyang Gao**	南方科技大学
陈梦舫教授 ✉	中国科学院南京土壤研究所
朱永官教授 ✉ **蔡超博士**	中国科学院城市环境研究所

✉ 各组织领导和相应作者

报告作者感谢中国繁荣战略项目基金所有合作伙伴（包括中国和英国的广泛合作伙伴和顾问团队）在项目期间进行的有益讨论和贡献。Ming Liu 和 Chris He（英国驻广州总领事馆科学与创新处），Rongxia Liu 和 Xia Yang（中国 21 世纪议程管理中心），Kate Canning (Arup)和 David Middleton（英国环境和农村事务部）对本报告的讨论和修订提供了帮助。

我们还感谢外交及联邦事务部繁荣基金项目的资金支持。同时，我们还要感谢布莱顿大学和土地信托基金（支持 PSRP 案例研究开发项目并与本项目分享研究结果）的贡献。

目录

1 概述 1

1.1 中国棕地再生环境 1

1.2 项目概况 2

1.3 报告使用指导 3

2 可持续修复：最新水平 4

3 棕地开发机会矩阵 6

3.1 棕地开发机会矩阵描述和起源 7

3.2 适应中文环境 10

3.3 棕地开发机会矩阵的使用方法和时间 10

3.4 案例研究：棕地机会矩阵在中国的应用 15

4 可再生能源应用的技术指导和战略 19

4.1 轻度修复—植物修复 21

4.2 轻度修复—添加改良剂 24

4.3 生产可再生生物质、生物原料和二次资源 26

4.4 可再生能源发电 28

4.5 案例研究 31

5 可持续性评估和评价 46

5.1 可持续性评估框架指南 51

5.2 定性可持续性评估指南 53

5.3 通过价值评估方法进行定量评估的指南 57

5.4 与利益相关者进行定性和定量评价 58

5.5 PSRP 案例研究：Port Sunlight River 公园（英国威勒尔） 60

6 结束语及建议 77

7 参考文献 79

1 概述

1.1 中国棕地再生环境

2015 年，中国环境技术和服务市场规模估计为 400 亿元人民币。预计，2015 年到 2020 年期间，市场增长额为 6,659 亿元人民币。凭借全球 5.4 万亿美元的市场价值，中国正成为最大国家市场，并在未来四年将投入 4,730 亿美元用于环境保护。

工业化场地再利用和再生已成为中国的国家优先事项，并在当前五年规划中纳入土壤管理“10 点行动计划”。在完成该事项后，中国环境立法将在该领域积极发展，计划立法很快引入类似于英国体系且基于以风险的污染土地监管制度。

中国政府也承诺：在第十二个五年计划期间，投入 300 亿元人民币来解决土壤污染问题；同时，制定在第十三个五年计划期间（2016 年至 2020 年）生效的具体土壤污染防治行动计划。此外，中华人民共和国环境保护部起草制定了国家第一个防治土壤污染的具体国家法律，这显示了国家对长期土壤管理和工业化场地再生的承诺。

中国已经制定雄心勃勃的目标，即：到 2017 年，建立土壤质量标准体系，到 2020 年，使用污染场地达到很高比例；促进原位修复，并开放监控服务市场。该项目是展示案例和分享实际案例研究的最佳时机，快速城市化和工业变革带来的土地利用变化留下了大量受到污染的工业和商业地区（也称为棕地）和边缘土地地区，从中可以学到很多东西。来自英国、欧盟和美国的最新证据表明，这些土地可能具有相当大的可再生能源生产潜力，例如太阳能、风能或生物质能。同时，有机会在复垦土壤中储存碳，也可生产可再生能源。英国也正在主导了解可从生态系统服务实现的更广泛并行效益以及通过改善绿色空间带来的公共健康效益。这些多重服务可以协同方式通过后工业场所的软再利用一起提供。这样，中国的后工业再生地区应被视为新企业、社会和更广阔环境的主要机会。可再生能源项目的银行可贴现性提高以及发展自愿碳补偿行业的可能性意味着收入流可能足以支付盈利性持续土地管理费用。在对英国公司和中国最快带来利益方面，可再生能源与“双重利用”相结合的可能性将在短期内为中国城市提供更容易的商业棕地再利用机会，同时也会创造更好的碳管理机会，以及各种更加广泛的可持续性效益。因此，这种类型的再利用将为中英企业之间的快速商业交流和发展创建一个平台。考虑到中国正在制定一项全国土壤污染和治理行动计划，预计将投入 7 万亿元人民币，相当于国家外汇储备的三分之一。为中国可持续修复机会提供决策支持的信息非常重要并且及时。

概述

1.2 项目概况

英国繁荣基金项目“促进中英两国就中国棕地和边缘土地再利用方面制定低碳和可持续方法的合作”利用了英国在棕地可持续修复（SURF-UK，请见 www.claire.co.uk/surfuk）、棕地软再利用（例如，除建筑外的能源或便利设施，请见 www.thelandtrust.org.uk）、对污染土地的有效最终用途指导风险管理以及可持续修复方面的领导地位。

本项目对现有创新方法进行了评估和调整，以便将可持续修复与城市规划和公共领域设计相结合，支持制定棕地和边缘土地地区土地管理、可持续修复和社区企业的低投入战略，重点是中国的可再生能源和固碳潜力。输出信息分为以下详细确定章节，并已经成为支持国家政策顾问及地方项目设计者和决策者确定从棕地“软”（即非建设）再利用中开发最大总体价值的方案，以及使用可再生能源应用和更广泛的项目服务（如碳管理、生物质、生物炭应用和生物能源回收、更广泛的可再生能源）的方案。

该项目提供了以下详细信息：

- **可持续修复现状：**确定要角和现有工具、最佳管理实践、框架、指导文件以及其他可用于不同利益相关者实施和传播可持续修复相关信息的资源。
- **决策支持工具（DST）采用阶梯式方式，**确定需要考虑哪些参数/环境标准来实施侧重于可再生能源和碳管理的可持续修复战略：棕地开发机会矩阵（BOM）。中英合作污染土地管理网站（http://cnukcontaminatedland.com/uk/）上免费提供中英文版本工具。

可再生能源应用和更广泛的项目服务（如碳管理、生物质、生物炭应用和生物能源回收、棕地更广泛的可再生能源开发机会（如光伏（PV）、风力等））的指导和战略， 将英国、欧盟其他国家和北美的相关知识引入中国，并确定如何适应当地环境。

- 通过详细案例研究方案实施综合可持续修复方法来实现可持续修复的各种效益和担忧。
- **相关部委协助制定和通过第十三个五年城市棕地修复计划的政策简报。**该政策简报还将通报并指导中国在未来实践中的可持续修复政策，审查实施的挑战，激励其使用的战略，以及这些方法如何适应现有监管框架。

本项目输出内容在由从业人员和政府官员利益相关者参加的核心小组研讨会上进行了测试。本研讨会与 2016 国际棕地治理大会暨首届中国棕地污染与环境治理大会

（http://cleanup.er-china.com/）一起举办，旨在最大限度为希望在中国市场进行经营活动的英国公司提供合作机会。

1.3 报告使用指导

本报告的目的是提供关于如何利用现有创新方法来将可持续修复与城市规划和公共领域设计相结合的信息。这些信息将支持制定棕地和边缘土地地区土地管理、可持续修复和社区企业的低投入战略，重点是中国的可再生能源和固碳潜力。本报告可以全文阅读，每章也可单独阅读。本报告结构如下：

第 3 章 棕地开发机会矩阵（BOM）：本章包含关于棕地开发机会矩阵来源及其在中国利用情况的信息。同时，也详细提供了使用棕地开发机会矩阵的方法和时间，并在本章结尾提供了实际案例研究，以供参考。

第 4 章 详细技术指导部分：本章为读者提供了有关植物修复和改良补充等低碳修复措施的详细信息，以及在不同国家获得和制定这些修复措施的方法。本章还提供了关于生产可再生原料和可再生能源发电好处的详细信息。

第 5 章 可持续性评估与估价：本章详细介绍了最近几年来在国际上开发的定性工具，显示了这些工具可以为实际案例研究带来的价值和好处，有助于在考虑可持续性时展示决策的透明度。

此外，r3 UK 还是关于**“可再生能源和其他可持续再利用战略汞污染矿业用地修复战略”**哥伦比亚繁荣战略项目基金（SPF）项目的合作伙伴。哥伦比亚项目输出 2 与本报告第 3 章和第 4 章有很强协同性，因为这两个项目都以低投入修复、低碳和棕地再生为重点。因此，技术来源和内容与哥伦比亚项目最终报告的涵盖范围非常相似。广泛结构和文本信息尽可能一致，以确保避免公共领域的冲突指导。然而，这两份报告都是经与当地利益相关者磋商后独立编制，并经过改编以侧重国家要求。尽管如此，这些项目之间的很强协同性允许制定强有力的跨国方法，为以中国为重点的评估提供附加价值，并为未来更多的协调和协同开发创造机会。

2 可持续修复：最新水平

自从 20 世纪 70 年代以来，土地利用一直是再生概念的组成部分，旨在防止使用绿地。然而，直到 20 世纪 90 年代，人们才更加慎重地考虑如何修复“治理”土地和地下水，因为许多活动被认定为固有的不可持续。设计或实施不当的修复方法可能比力图解决的污染问题具有更大的影响（CL:AIRE，2010 年）。

在过去十年中，有大量国际活动决定哪些因素构成可持续修复。由于制定框架、定义及实施和衡量修复项目的方法，目前对这些因素已经达成共识。这些内容都已被纳入最近出版的 2016 年版可持续修复 ISO 标准（ISO, 2016 年）。

ISO 标准旨在环境治理活动期间促进使用更加可持续的做法，从而平衡经济、社会和环境影响，同时提高周围社区的整体生活质量。从广义上讲，可持续修复指在能够代表可持续性的环境、经济和社会问题方面实现总体净效益。这是土地再生的关键，但考虑到大片全球污染土地，需要大量资源使这片土地重新得到有益利用。

可持续修复涵盖了污染场地修复中更广泛的可持续性影响和效益。对于该领域的一些地类，可持续修复延伸到可持续再生（如：英国）、可持续土地利用和可持续土壤管理（如：荷兰）的概念。相关概念是美国国家环境保护局（US EPA）提出的“绿色修复”，其侧重点是减少或减轻修复活动对成熟场地清理项目和监管框架的环境影响。例如，在《综合环境响应、补偿与责任法》（CERCLA），社会和经济因素已经纳入考虑范围。可持续修复实践还对土地利用规划（例如在“棕地开发”环境）、城市设计和管理（“城市重建”）和交通运输（“交通导向型开发”）等领域的新兴跨学科可持续发展实践作出了重要贡献。

可持续修复是世界各地蓬勃发展的领域。开发的相关可持续修复网络包括：可持续修复论坛的各类国家/地区机构（英国、美国、荷兰、意大利、加拿大、中国、巴西、哥伦比亚、日本、台湾、澳大利亚和新西兰）；NICOLE 可持续修复工作组；RELASC（南美洲）；关于污染土地的公共论坛（欧洲监管机构网络）和国际污染土地委员会（ICCL）。此外，美国材料与试验协会正在制定相关标准，以便为可持续修复实践提供标准化协议和指导。Rizzo 等人（2016 年）对这些网络的一致性进行了深入阐述。

在灰色文献和特定行业关注技术出版物中，也进行了大量的可持续修复开发工作。最终，在《环境管理杂志》（2016 年）中出版了 2016 年可持续修复特刊。该特刊在学术文

可持续修复：最新水平

献中汇集了目前的可持续修复思路和进展，包括比较不同网络、如何对现有工具和框架进行测试、如何进一步开发现有工具和框架以及确定新的研究领域。

随着可持续修复概念的成熟和付诸实践，新的研究领域集中在更具挑战性的领域，例如：确保透明考虑社会方面以及社区的充分参与。相对于早期关注环境影响的决策支持工具，新的决策支持工具（DST）现在更加注重社会因素，因为这些社会因素通常更容易衡量（Cappuyns, 2016 年）。从业人员更清楚地意识到利益相关者尽早参与的重要性，这能确保工具不复杂、透明，并且适用于国家的地方性立法。

现有框架测试和案例研究出版有助于将可持续修复纳入日常实践工作中。

3 棕地开发机会矩阵

棕地开发机会矩阵（BOM）是一个简单的 Excel 筛选工具，用于帮助国家政策顾问以及地方项目设计者和决策者确定从棕地/污染土地（图 1）“软”（即非建设）再利用中开发最大总体价值的方案。该筛选工具能够帮助棕地项目开发者和决策者确定可从场地软再利用干预中获得哪些服务，这些干预如何相互作用，以及可能有哪些初始默认设计考虑因素。棕地开发机会矩阵始于框架 7 项目资助的主要欧洲委员会研究项目：棕地修复整体管理（欧盟 FP7 HOMBRE 项目—— www.zerobrownfields.eu）。

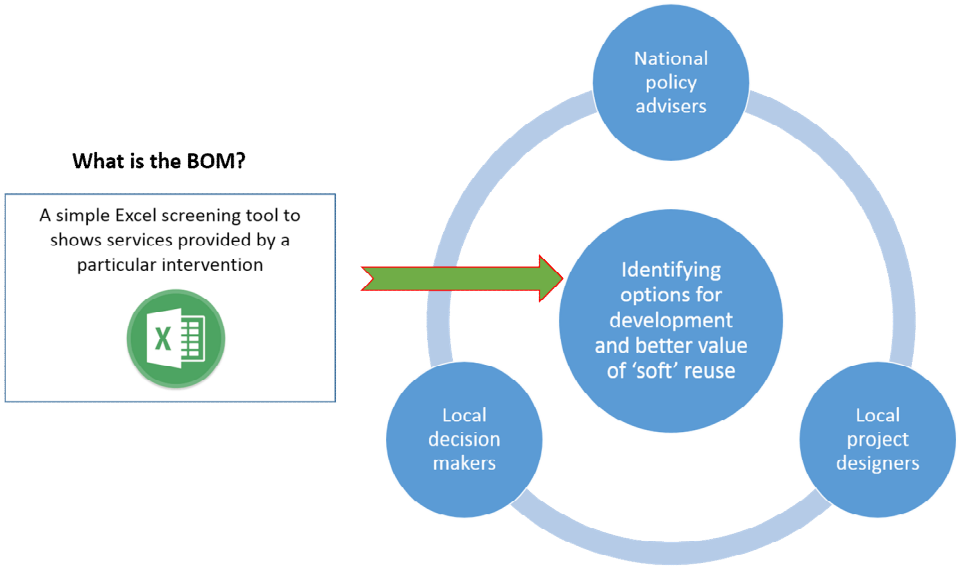


图 1 棕地开发机会矩阵应用（版权所有 © r3 Environmental Technology，2016 年）

棕地再生往往被认为主要在硬再利用（如住房或基础设施开发）背景下进行，而直到最近，软再利用（如绿色空间或生物质生产）往往被忽视（Bardos 等人，2015 年）。然而，专业人员之间存在广泛的共识，即：鼓励棕地软再利用，加强土地再生，并提高整体可持续性（Bardos 等人，2011 年和 2016 年上半年；Cundy 等人，2016 年；Moffat，2015 年）。例如，近年来，利用棕地进行可再生能源发电得到极大的关注，因为在棕地选址可再生能源项目可有许多更广泛的环境和经济效益（Jensen，2010 年；Hartmann 等人，2014 年；Adelaja 等人，2010 年；NALGEP，2012 年）。城市绿色空间是另一种软再利用方式，可以带来重大效益，如：改善环境，改善人类健康，并和刺激当地经济（Cundy 等人，2013 年；土地信托，2015 年上半年和 2015 年下半年）。

棕地开发机会矩阵

有些服务可能自己创造收入，有些服务可能是支持社会发展的重要资产，有些服务可能对当地土地或经济的价值有直接或间接好处（例如，提供当地能源供应或其他环境服务）。提供广泛服务的修复项目既提高了总体可持续性，又提高了经济价值。

项目服务是在修复项目成果中明确确认和设计的。为了提供服务，需要采取某种形式的干预，例如：修复或土壤改良。棕地开发机会矩阵是一项简单工具，显示服务如何与干预连接，反之亦然。此外，它还是确定提供的可能服务范围以及确定所需最小（或最佳）干预措施数量的清单。

软再利用效益实例

- 为当地社区提供公园等开放空间，为幸福、健康、休闲和地方感带来效益。
- 提供绿色基础设施和服务，例如与水保护和空气质量改善等相关的绿色基础设施和服务，提供绿荫并鼓励保护栖息地和野生动物。
- 支持城市园林、社区花园和城市农业的复兴和创新。
- 提供可再生能源和其他环境服务（如可持续城市排水）。

3.1 棕地开发机会矩阵描述和起源

棕地开发机会矩阵（BOM）首先在 FP7 HOMBRE 欧盟项目内开发。它是一个简单且基于 Excel 电子表格的筛选工具，本质是映射可能增加二次开发项目价值的服务和人为干预实现这些服务的联系。**框 1** 提供了修复棕地实现软再利用的一系列可能服务。

框 1：棕地软再利用的潜在服务

• 场地价值提升/周围土地价值提升/
• 可再生能源发电
  – 生物质能源
  – 地热
  – 风能/太阳能
• 可再生材料发电
• 温室气体减排（碳补偿收入？）
• 协同废物处理和再利用、渗滤液管理
• 屏蔽/声景
• 洪水管理—连接“可持续城市排水系统”
	• 便利设施与休闲
	• 城市气候管理（如减轻城市热岛效应）
	• 空气质量管理
	• 栖息地和保护
	• 改善土壤和水资源
	• 改善健康和幸福
	• 受教育机会
	• 社区参与
	• 生态系统服务

棕地开发机会矩阵

- 有关下载和使用原棕地开发机会矩阵的信息，请访问网站 http://bfn.deltares.nl/bfn/site/index.php/standard/bfn_home 中 HOMBRE 的“棕地导航（Brownfield Navigator）”页面。Brownfield Navigator 是一个在线环境，通过陆地循环的不同管理阶段伴随和支持决策者，还包括根据地理空间描述和记录各种干预及其机会的工具。
- 有关中文版本的棕地开发机会矩阵工具，可从中英污染土地管理合作伙伴（CNUK）网站（http://cnukcontaminatedland.com/）获得。

棕地开发机会矩阵规定了特定干预实现的服务，使用简单颜色编码表示可能干预与可能服务的交叉点，如下所示：

深绿色：干预一般直接实现本服务。

浅绿色：可能有直接或相关服务效益，取决于具体场地情况。

蓝色：尽管有潜在直接服务效益，但本干预可能与服务对立，取决于具体场地情况。因此，需要仔细考虑适合且基于场地的管理和设计。

琥珀色：本干预通常与讨论服务相对立，因此需要采取某种形式的缓解措施。

如**图 2** 所示，从特定干预中查看某一行，可能发现本干预如何在众多类别中实现（或者可能阻碍）服务。如果查看所有行，则可通过两项或更多干预最大程度扩大服务范围。在这两种情况下，决定只取决于颜色范围：最大程度放大绿色交叉点。如果有蓝色或琥珀色交叉点，则需更详细地考虑场地性质和干预性质。棕地开发机会矩阵的详细“信息”版本提供了支持信息，并且链接其他引用和示例，以便在 http://www.zerobrownfields.eu/Displaynews.aspx?ID=568 网站上进行查阅。然而，作为 FCO 支持项目的一部分，棕地开发机会矩阵的目标是开发简单版本作为中国设计讨论的起点。虽然编写中文详细信息版本是一项艰巨的任务，但根据对简单版本棕地开发机会矩阵工具（即概念验证）的兴趣，可在后续项目中证明这项任务的合理性。

棕地开发机会矩阵

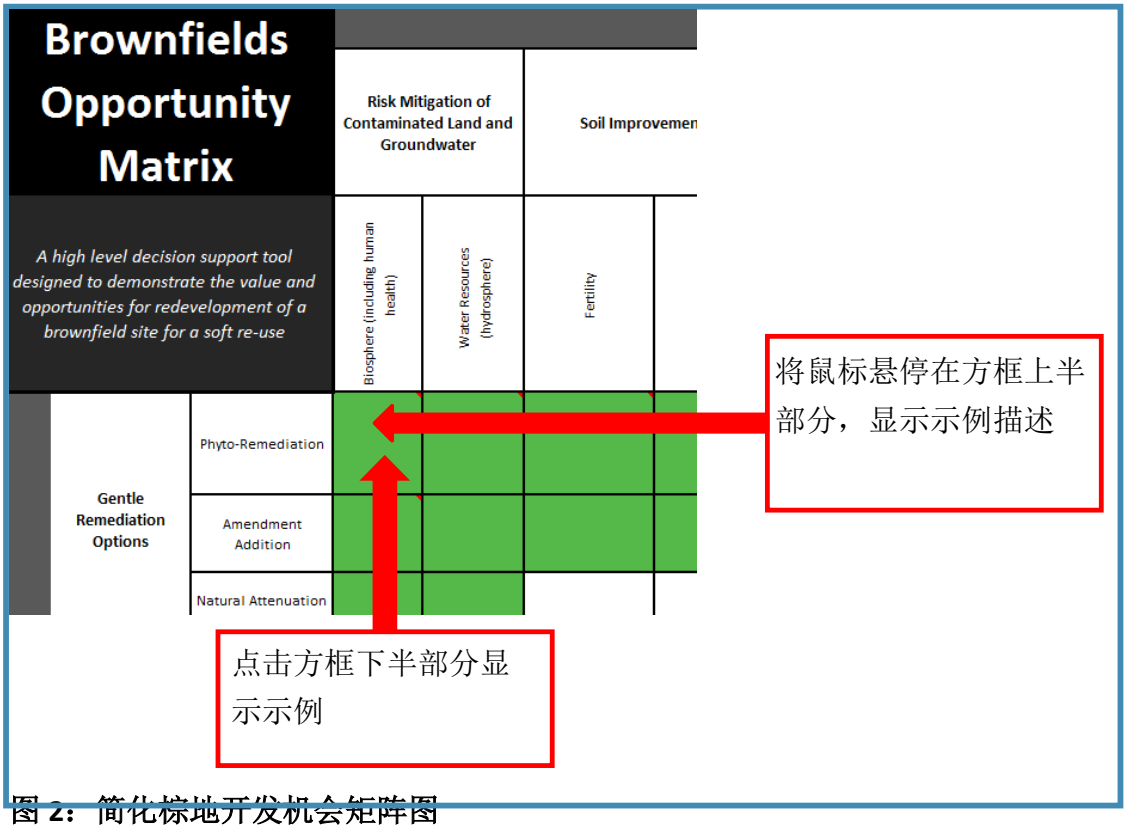


图 2：简化棕地开发机会矩阵图

棕地开发机会矩阵利用服务和干预的类别层次进行组织，如**表 1** 所列。简单棕地开发机会矩阵在干预和服务之间的每个绿色或蓝色交叉单元格中提供了一些其他指导信息。这包括案例研究，以便说明干预和服务之间的相互作用，以及更多案例研究信息的网页链接。这样，用户可以直接转移到感兴趣的特定干预和服务示例。在中文改编版本中，提供了其他案例研究信息，以便给出更多本地示例链接，即使这些示例仍处于“试点”阶段（见**第 3.4 节**）。

棕地开发机会矩阵

表 1：棕地开发机会矩阵中考虑的总体服务和干预

服务	干预
1. 土壤改良	1. 土壤管理
2. 水资源改善	2. 水管理
3. 提供绿色基础设施	3. 实现绿色基础设施
4. 污染土壤和地下水风险缓解	4. 温和修复方案
5. 缓解人为气候变化（全球变暖）	5. 其他修复方案
6. 社会经济效益	6. 可再生能源（能源、材料、生物质）
	7. 可持续土地规划和开发

3.2 适应中文环境

中国棕地开发机会矩阵有中英文版本（附有翻译说明），并附有一些具体本地信息，以补充原始内容。有关信息，请访问网站 http://cnukcontaminatedland.com/cn/downloads/。适应工作与在哥伦比亚进行的关于“实现可再生能源和其他可持续再利用战略的汞污染矿业用地修复战略”的 FCO 项目同时进行。为这两个项目专门开发了“**利益相关者参与包**”，以支持使用棕地开发机会矩阵，包括作为总体议程的会议设计、会议简报和清单等支持材料。这些内容在第 3.3 节进行了更为详细的说明。考虑到矩阵和**利益相关者参与包**是根据以欧洲为中心的专业知识编写，很多概念和术语需要解释，并在中文环境中确实需要改变才更有意义（Sam 等人，2016 年）。通过中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室李笑诺的协助，本项工作于 2015/2016 年在 Paul Bardos 教授监督下在布莱顿大学完成。非常感谢各方提供的帮助和支持。

3.3 棕地开发机会矩阵的使用方法和时间

一个成功项目取决于对修复和再利用土地期望服务的共同愿景，以及实现这些服务的最有效方式，即：所需干预。如果利益相关者参与项目，了解干预和服务之间的联系则非常重要。对于利益相关者来说，服务可被理解为抱负（政治层面）和欲望（地方层面）。棕地开发机会矩阵显示了这些软再利用干预如何与服务相联系。该矩阵用于在利益相关者参与过程中进行讨论，有助于设想利益相关者的项目价值、服务或干预之间的协同性、以及修复棕地机会的总体见解（Beumer 等人，2014 年）。框 **2** 列出了部署“温和”修复技术时利益相关者有效参与的一些主要原则。

棕地开发机会矩阵

框 2：利益相关者参与的基本原则（Cundy 等人，2013，SURF US）

- 在过程早期，确定核心和非核心利益相关者，并让其参与。
- 采取积极主动方式参与。
- 让利益相关者参与 GRO 过程的所有阶段。
- 计划利益相关者长期参与。
- 建立能够实现相互双向对话的有效沟通结构。
- 确保参与透明并有记录。
- 认识到 GRO 评估标准可能需要主观和客观。
- 列出在项目开始时实施和监测 GRO 的所有假设和程序。
- 遵循合理的逐步参与方式，避免循环论证，并明确解决主观问题。

利益相关者有效参与被确定为应用可持续修复策略以及更广泛原位修复的主要要求。在修复软终端用地时，特别是在城市和郊区地区，利益相关者参与可能比其他许多修复领域更为广泛和复杂，原因如下（Cundy 等人，2013 年）：

1. 对软终端用地来说，关注各方的数量更多，因为多重服务和规模意味着受益人和受影响组织或个人的范围更广。
2. 问题范围可能更复杂，因为预期的“服务”范围以及实现修复可能部署的更慢低投入（或温和）修复技术（见**第 3 章**）。
3. 风险管理提案可能更加复杂。
4. 部署也可能受到影响，由于与提供服务以及部署修复措施相关的很多技术和自然不确定性。

图 3 和**图 4** 提供了修复项目开发讨论进展的两种不同方案示例。这些示例是密切相关的。例如，两种情况均有初始概念阶段。当某人或某一小组有初步想法时，由小组部分个人进行开发，直到将这些想法呈现给更多利益相关者，以便提出更广泛一致的愿景。该愿景需要进一步技术阐述，以制定实施计划。所有这些阶段可能经历几次迭代。

棕地开发机会矩阵显示的直观可视化旨在推动这些讨论

棕地开发机会矩阵

- 支持早期棕地软再利用方案的初步确定或基准测试。
- 支持与利益相关者的探索性讨论。
- 提供描述初始设计概念的结构，以支持规划应用等。
- 提供结构，以便对不同再利用组合进行更详细的可持续评估，同时进行成本效益比较。

矩阵可用于利益相关者在不同时刻和活动的参与过程：在收集想法的初始阶段；在重新确定对所需服务和干预想法的更深刻阶段；以及在审查需再生棕地的初始设计过程中。

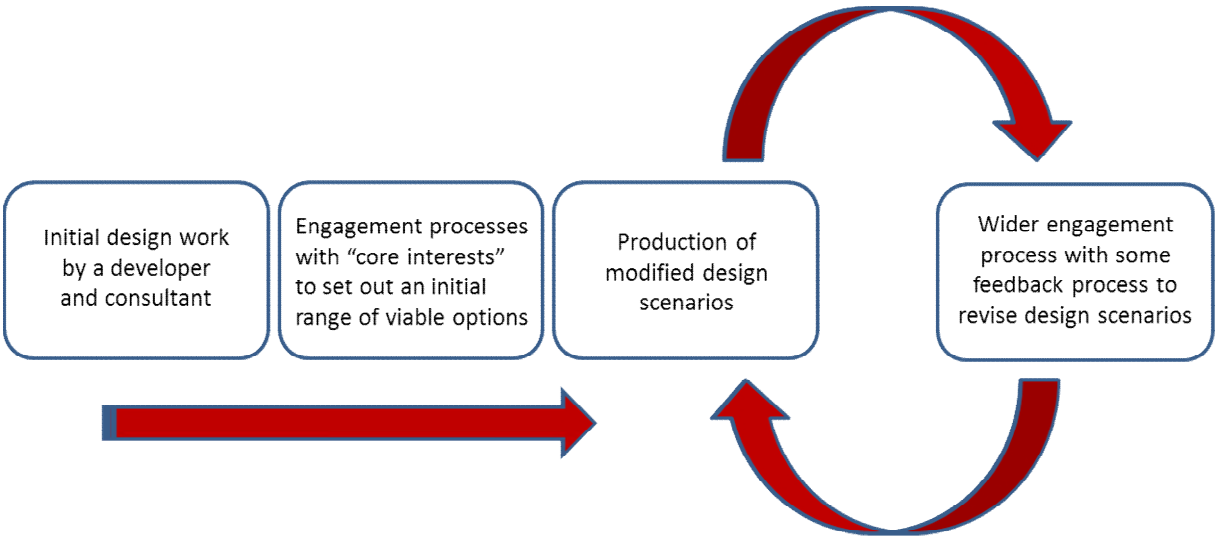


图 3："私人"修复项目开发设计方案示例（Cundy 等人，2013 年）

棕地开发机会矩阵

- **开始**：有关各方决定推进项目（例如：通过公共机构或社区领导的非政府组织）。
- **第 1 阶段**：与项目初始化相关的小部分利益相关者充分发挥自己的想法和抱负，以便将其呈现给其他关注或涉及方。
- **第 2 阶段**：大部分利益相关者就总体再生方案取得一致意见。这通常是包含三个阶段的迭代过程。
- **第 3 阶段**：详细设计，制定详细议定方案，以便根据具体场地特性和信息实施。

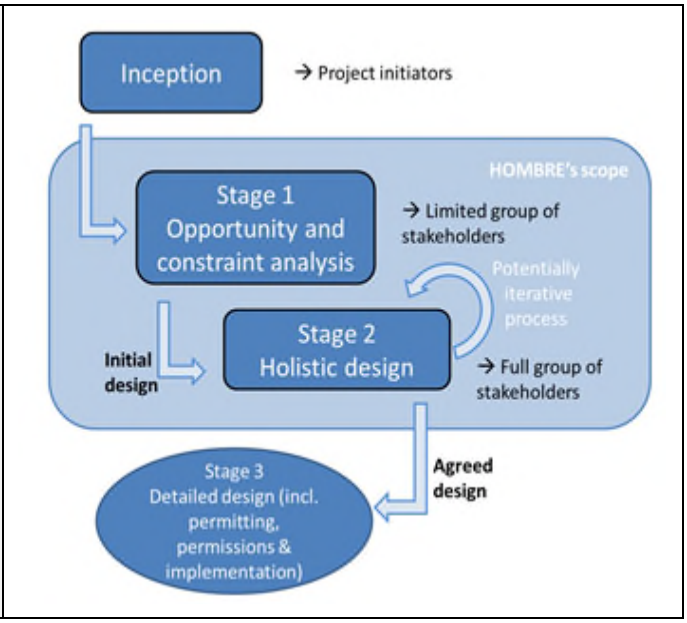


图 4：基于联盟的项目开发过程（Beumer 等人，2014 年）

在项目概念化和早期规划期间，棕地开发机会矩阵被视为具有多种功能，如图 5 所示，以帮助参与启动和支持项目的相关方确定可能从土地修复中获得的服务及实现这些服务所需的干预。棕地开发机会矩阵也可用于解释向地方和国家决策者（或直接涉及地方和国家决策者）作出的选择。HOMBRE 项目还开发了更详细的棕地开发机会矩阵版本，以便支持项目设计的后期阶段。这些内容没有纳入当前中国项目，因为首先我们有兴趣看到中国对本辅助决策的重视程度。在中国实施详细棕地开发机会矩阵相当费力，并且是一项更加长远的项目。

棕地开发机会矩阵

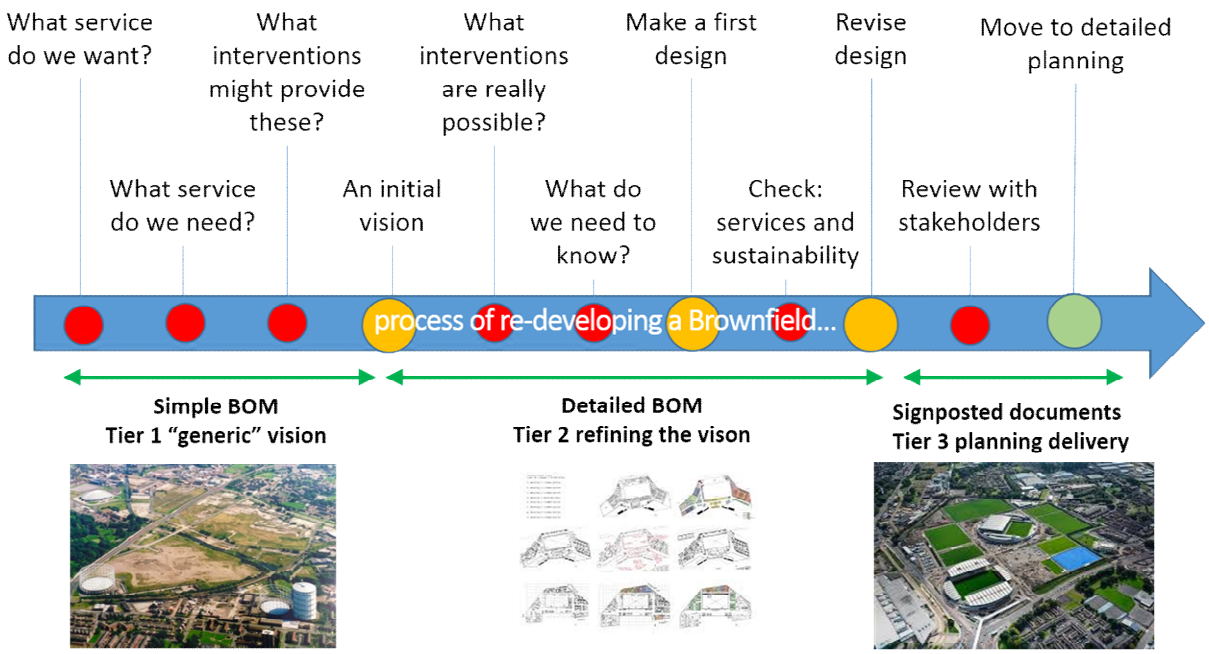


图 5 棕地开发机会矩阵使用时机（版权所有 © r3 Environmental Technology，2016 年）

棕地开发机会矩阵作为一系列活动组成结构化参与过程的一部分，由协调人员负责管理，以便在达成共识的过程中为不同利益相关者提供帮助。调动不同利益相关者以及指派协调人员和编写报告需要付出巨大努力和成本。因此，建议做法是在单次会议中讨论多项活动，然后通过电子邮件进行后续修改。相关活动如下：

- 开会和会议目的。
- 会议参与者相互介绍（两分钟“开场白”讲话）。
- 简单介绍软再利用、干预和服务，以及软再利用、干预和服务如何从棕地修复中带来价值。
- 小部分利益相关者进行“世界咖啡 ™（World Café™）”方式讨论，确定大家最关注的服务。
- 协调人员在全体会议上指导使用简单版本棕地开发机会矩阵，以找到能够提供所需服务的一系列最佳干预。矩阵本身包括示例和在线链接，说明各种有效服务/干预机会。
- 召开圆桌会议，讨论利用这些成果制定棕地再利用的初步共同愿景，并确定当前信息需求和后续步骤。
- 协调人员作会议报告，并通过电子邮件发表意见，以达成初步项目概念。

如第 3.2 节所述，为了支持这些活动，将大量组件形成“利益相关者参与包”，其中文版可在 http://cnukcontaminatedland.com/cn/downloads/网站查阅。利益相关者参与包包括：

- 会议议程拟制报表
- 棕地开发机会矩阵简版
- 完整的会议幻灯片
- 清单（服务、干预和价值形式）

框 3 还提供了一系列国际利益相关者参与资源，以便提供补充信息和良好实践指导。

框 3：国际利益相关者参与资源	
世界银行利益相关者参与协同废物处理和再利用、渗滤液管理	https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/938f1a0048855805beacfe6a6515bb18/IFC_StakeholderEngagement.pdf?MOD=AJPERES
世界银行利益相关者参与和申诉机制	http://siteresources.worldbank.org/INTRANETENVIRONMENT/Resources/244351-1279901011064/StakeholderEngagement-andGrievanceMechanisms_111031.pdf
世界银行利益相关者早期参与的战略方法（采掘业）	https://commdev.org/userfiles/FINAL_IFC_131208_ESSE%20Handbook_web%201013.pdf
世界银行多方利益相关者参与采掘业的创新方法	https://commdev.org/userfiles/FINALWebversionInnovativeApproachesforMultiStakeholderEngagementintheEI.pdf
美国环保局（USEPA）超级基金社区参与工具包文件	https://www.epa.gov/superfund/community-involvement-tools-and-resources
美国环保局环境正义宣传与参与	https://www.epa.gov/environmentaljustice/ej-2020-outreach-engagement
美国环保局风险交流指导文件	https://www.epa.gov/risk/risk-communication

3.4 案例研究：棕地机会矩阵在中国的应用

本信息由中英污染土地管理合作伙伴（CNUK 团队）以简要案例研究卡的形式提供。该研究卡详细描述了场地历史和现状、涉及利益相关者、特定问题以及如何采用棕地机会矩阵（BOM）通知和支持决策过程。请注意，某些情况下，棕地机会矩阵被回顾性使用。

例如，场地修复处于进行过程，或场地处于过渡阶段的情况。这意味着，在这些情况下，棕地机会矩阵的结论在某种程度无法得到验证。同时，场地利益相关者能够指出从项目开始就可获得棕地机会矩阵的应用前景。许多人表示，有兴趣与中国繁荣战略项目基金合作伙伴保持联系，并在未来项目中使用工具和概念。案例研究场地的利益相关者发现，与 CNUK 团队的合作为中国的再生过程开辟了新的视角。

案例研究 1：中国江苏省盐城市汇丰化工有限公司

<table>
<tr><th colspan="2">案例研究名称和省份：中国江苏省盐城市汇丰化工有限公司</th></tr>
<tr><td>简要概述</td><td>该场地是将在盐城市大丰镇进行调查和整治的第一个厂址。它位于中国江苏省盐城市大丰区农田区。该厂址在 1991-2015 年属于化工厂，生产各种农药。

主要污染物是用于生产农药、中间产品和农药的源材料，其中包括 VOC、SVOC、TPH 和氯化农药。厂址面积约 100,000m²。

厂址地层从上到下包括填充物、淤泥、细砂和粉质粘土。地下水位距离地面 1 m（bgs）。土壤和地下水都可能受到污染。

旧厂将在 2017 年拆除。该场址将被修复。在修复后，将建造现代化且更环保的工厂。第一阶段期现场调查已经完成，第二阶段调查将于 2017 年 1 月进行。修复行动计划将在现场调查完成后制定。</td></tr>
<tr><td>场地修复主要驱动因素</td><td>由于在 20 世纪 90 年代没有环境管理体系，场地已因化工厂的旧存储和管道系统泄漏被污染。新的“环境法律法规”要求场地所有者实施环境管理体系，并确保工厂符合新的环境标准。因此，将在场地上修建新的化工厂，并将制定新的环境管理体系，以便管理工厂环境。周围土地农场主要求化工厂不得释放污染物。</td></tr>
<tr><td>涉及利益相关者</td><td>• 地方当局，包括大丰镇、盐城市、地方环境保护局
• Hufeng 化工厂业主、工厂工人
• 周围农田的农场主</td></tr>
</table>

棕地开发机会矩阵

利用棕地机会矩阵采取的行动	与场地所有者和工厂工人召开会议，制定“保守”或“软”修复计划。除开挖、泵和处理及原位热修复技术外，厂主倾向于选择“软”的长期修复方法，包括源控制、液压控制和长期监测。
与案例研究相关的其他意见/参考	这是江苏省盐城市首个环境治理案例。使用棕地机会矩阵方法将指导修复技术选择和实施，以制定可持续且长期的环境修复示例。

案例研究 2：中国江西省利用能源厂修复重金属污染农田

案例研究名称和省份：江西省重金属污染农田	
简要概述	污染来自 20 世纪 80 年代初建成的华东内陆省份冶炼厂。在过去 30 年的生产中，释放出大量炉渣、废水和废气，导致严重污染周围环境。冶炼厂周围 166 公顷（约 412 英亩）的农田被重金属（主要是铜和镉）严重污染。幸运的是，本地区的地表水和地下水没有受到污染。 1-3：修复前 4-6：修复期间 7-9：修复后 在对受污染农田进行详细调查和风险评估后，提出了以下“调节–减少–恢复”的修复策略：(1) **调节**：首先，通过物理调节和化学改性（钝化和络合）的方法调节周围环境；(2) **减少**：结合物理化学-植物/生物方法，降低污染土壤中总的或有效态重金属浓度；(3) **恢复**：结合植物和农艺管理技术，恢复污染土壤的生态功能。培养生物能植物（巨菌草）极大地促进了污染土壤中的重金属还原。该项目于 2011 年开始，2014 年完成。
场地修复主要驱动因素	冶炼厂周围的大面积农田严重污染多年。作物生产表现欠佳，农民收入大幅减少。周围环境的生态和环境质量也受到影响。因此，农民对企业不满。他们希望企业找到解决方案，防止进一步的污染并解决现有污染问题。
涉及利益相关者	主要利益相关者是农民、当地居民、采掘业和冶炼厂运营商、监管机构，包括当地环境保护署、政府以及修复承包商。

棕地开发机会矩阵

	(1) 农民获得了更好的经济收益。水稻产量增加；作物种子中重金属的浓度降低，修复后作物种子的质量提高。巨菌草具有大量生物质（每年每公顷 7-21 吨），可用来发电，因为它有较高碳含量和较高热值。每亩巨菌草的发电量相当于 2-3 吨标准煤。 (2) 解决了长期存在的采掘业、当地居民、农民和政府之间的纠纷和紧张关系。 (3) 通过实施该项目，大大提高了当地环境保护的专业技能和能力。当地企业和农民也有了更好的理解和知识去处理重金属污染。 (4) 由于采用低成本修复战略，减少了采掘业的经济负担。每吨土壤的处理成本只有约 10-20 美元。
利用棕地机会矩阵采取的行动	• **有关污染土地再利用的讨论。**2015 年 11 月至 12 月期间，不同利益相关者举行了几次会议并反复讨论，得出结论：受污染农田可用于生产生物质和花卉苗木。这将很好地说明将场地修复和生物质能生产进行整合。 • **关于修复策略选择的会议。**本项目中，大面积农田受到严重污染。所以，不适合使用针对工业污染场地的大多数常用技术，包括挖掘和倾倒、土壤浸出、固化和稳定化、热解吸和植物修复等，因为待处理污染土壤量大、成本高、物理化学方法对土壤性质的潜在影响及作物生产后续影响的特性。因此，采用了由物理化学-植物修复-农艺方法组成的一体化战略。本修复策略试图实现土壤修复与景观美化，生态重建和经济效率之间的良好结合。 • **实地考察和修复示范。**该场地将被开发，从而为重金属污染土地修复、金属回收和能源生产提供示范和验证平台。在项目实施期间，主要关注农业和环境保护研究人员、修复企业、来自其他地区和/或省份的政府官员来考察场地。在本场地获得的经验将有助于其他重金属污染场地的决策和修复策略。本项目的成功受到了江西省省长鹿心社先生的好评。
与案例研究相关的其他意见/参考	修复后，农田土壤中的重金属浓度大幅下降，作物长势良好。植物覆盖裸露地面，保留水份，并减少重金属径流，因此控制了对地下水的渗透。污染地区的景观也得到改善，当前呈现出良好风貌和景象。植被得到恢复，并还为昆虫和鸟类繁殖提供了栖息地。生态系统得到恢复，且环境质量显着改善。

4 可再生能源应用的技术指导和战略

如果棕地或边缘土地被污染，则需要评估污染风险，以便确定是否需要任何方式或管理（如修复）措施。可能对人类健康或更广泛的环境，即水、生态造成威胁（Defra 2011 年；Nathanail 和 Bardos，2004 年）。对于存在的污染风险，需要考虑三种因素：有害物质的来源，可能受到影响的受体和连接来源与受体的途径（如**图 6** 所示）。这种组合称为污染物关联。在大多数发达国家，土地污染过程或多或少是基于风险的土地管理（Vegter 等人，2002 年）（Nathanail 等人，2014 年）。一些国家已经提供了广泛指导。在英国，这种高水平指导被纳入一系列示范程序（环境署和环境、食品及农村事务部，2004 年）。

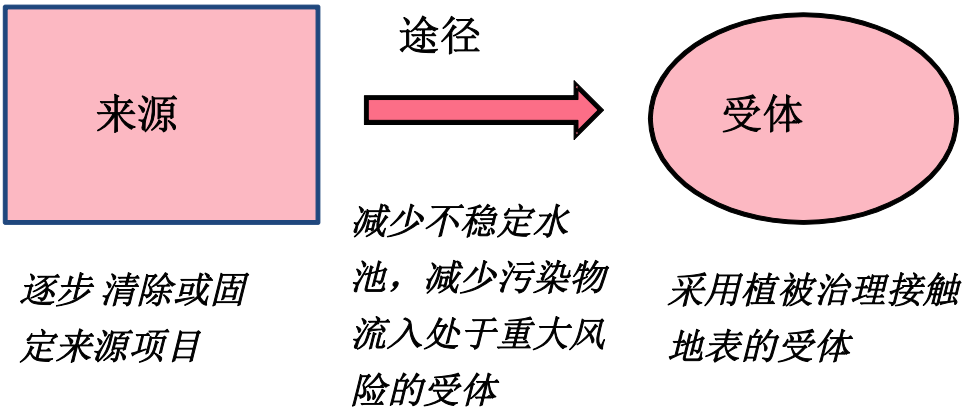


图 6：污染物关联以及在来源、途径和受体水平的不同的轻度修复干预。

最近，随着可持续修复概念的出现（见**第 5 章**），新模式是基于可持续风险的土地管理。这种方法体现了许多国家数十年的学习。例如，英国（Swansea 河谷下游）的第一个土地恢复项目在 20 世纪 50 年代开始规划。开始制定污染土地管理政策和框架的国家可以从这种学习中受益，并避免高昂成本和许多技术错误。例如，最近一个英国繁荣基金项目已体现了中国的这种学习（Coulon 等人，2016 年）。

风险管理是评估风险，并决定需要什么措施，即：风险是否重大。如果风险重大，则确定是否需要某种形式的修复干预来减轻风险。污染物关联的结构也表明可用于管理风险的主要干预点（Nathanail 等人，2007 年）：

- 来源，例如：作为污染源移除方案。
- 途径，例如：管理地下水羽流的扩散，包括通过监测的自然衰减。
- 受体，例如：通过密集种植以防止人类进入，或通过某种形式的规划（制度）控制来限制允许使用的土地（例如，不用于具有花园的住宅）。

风险管理方法可以整合不同层面的干预措施。例如，用于处理残余污染的途径控制部分源移除可以通过规划控制（例如，限制特定钻孔的用水）与额外保护相结合。**图 7** 提供在轻度修复背景下这些干预措施的例子。

存在生产生物质土地的特殊情况。生物质本身可能成为向人们甚至非粮食作物传播污染的途径，这取决于生物质如何使用和在何处使用。这种情况可能导致以下情况：

- 使生物质不适合使用；
- 产生仅适合在受控设施中使用的生物质，如能源设施中的废物；或者
- 需要采取缓解措施，如采用原位稳定来减少植物吸收（Andersson-Sköld 等人，2014 年；Jones 等人，2016 年）。

传统修复方法主要集中在控制、覆盖和移除填埋场上（或“挖掘和倾倒”）。从 20 世纪 90 年代末开始，已经采取以处理为主的修复策略，采用原位和非原位处理技术，如土壤冲蚀，污染地下水的“泵送和处理”。同时，广泛采用基于风险的污染土地管理方法。最近，根据低投入方法的早期想法，出现了**轻度修复方案（GRO）**的概念。轻度修复方案被定义为（如 Cundy 等人，2013 年）导致土壤功能和风险管理净收益（或至少没有大幅减少）的风险管理策略/技术。

这样强调土壤功能的维护和改进意味着对维持生物生产性土壤特别有用，这对于考虑用于场所（如城市公园、生物质/生物燃料生产等）的“软”最终用途非常重要（Cundy 等人，2016 年）。

本节基于欧洲委员会框架 7 研究项目（微量元素污染土地的轻度修复（www.greenland-project.eu））和第 2 章提到 HOMBRE 项目的输出提供了一系列轻度修复方案的技术指导，辅以美国国家环境保护局的植物修复技术信息（https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Phytotechnologies/cat/Overview）。

可再生能源应用的技术指导和战略

轻度修复方案涵盖多项技术，包括：

- 第 4.1 节中讨论的使用植物或真菌微生物过程去除、降解或固定污染物；和
- 第 4.2 节中讨论的原位稳定（采用生物或化学过程，如吸附到生物炭）或污染物提取。

生物生产性土壤包括农业、栖息地、林业、美化和景观用土壤。因此，当土地的“软”最终用途被使用时，轻度修复方案将趋向于最有利。

轻度修复方案最好用来去除某一场所的不稳定（或生物可利用）的无机污染物（如通过植物提取），去除或降解有机污染物（如通过植物降解），保护水资源（如通过根际过滤技术）或稳定或固定地下污染物（如植物稳定、原位固定/植物阻隔）。这些方法也可以根据上述根据污染物关联性结束场景来确定（Cundy 等人，2016 年）。

绿地公司（GREENLAND）项目形成了简单透明的决策支持框架，推广轻度修复方案的合理使用，鼓励利益相关方的参与，并在轻度修复方案有望成为可行方案时通过一套具体设计使用工具加以补充（Cundy 等人，2015 年）。该框架为三阶段模型或决策支持工具（DST），以 Microsoft Excel 电子工作簿方式体现，用于在选择污染场地修复方法时为决策和方案鉴定提供信息。可从 www.greenland-project.eu 下载。

智能运用的轻度修复方案可：(a) 通过抑制和稳定，加上长期去除或固定/隔离污染物提供基于途径控制的快速风险管理；和(b)提供一系列额外的经济（如生物质发电）、社会（如休闲和娱乐）和环境（如二氧化碳封存、滤水和排水管理，恢复植物和动物群落）利益（Cundy 等人，2016 年）。只要土地利用和土地管理实践不发生实质性变化（造成 pH、Eh 位移、植物覆盖等），涉及污染物原位稳定或逐步去除场所中不稳定（即生物可利用或易于提取的）污染物的植物修复技术便可作为持久解决方案。这一要求表明，可能需要某种形式的制度或计划控制。然而，对土地利用进行制度控制是采用常规技术（如限制食品生产使用）的城市修复的主要要素。因此，对植物修复的任何机构控制和管理要求作为先例持续了很长时间（Cundy 等人，2013 年）。

4.1 轻度修复—植物修复

植物修复是直接用有生命的绿色植物来现场减少污染土壤、污泥、沉积物和地下水的风险（州际技术与法规委员会，2009 年）。由于地表土壤中的高金属浓度或表层材料的机械破坏，植物修复还恢复了缺乏天然植被场所的植被覆盖，这可以通过减少对植物的金属毒性的改良剂来支持（Nwachukwu 和 Pulford，2008 年）。场所植被恢复减少了通过暴

可再生能源应用的技术指导和战略

露表面土壤的风蚀运输发生污染迁移和将土壤污染物浸出到地下水中的可能性（美国国家环境保护局，1999 年）。植物修复被视为提供廉价和低投入方法来修复非常规再生的候选区域（Bardos 等人，2010 年）。**表 2** 总结了各种植物修复方法。

表 2：植物修复过程变化（摘自 Nathanail 等人，2007 年）

类型	用途
植物提取	采用了在可收获的生物质中积累污染物的植物。超积累植物是能够将金属累积到干物质（主要是十字花科）%水平的植物。几乎没有商业可用类型存在。更常见的是使用木质生物质如柳树和杨树。已经使用螯合剂如乙二胺四乙酸（EDTA）进行一些试验以灌溉土壤, 并且因此增加了金属有效性，进而被植物例如印度芥菜吸收（Bardos 等人，2001 年）。
植物挥发	使用植物提取浅层含水层的挥发性污染物，这些挥发性污染物通过植物的地上部分分散到大气中。
植物固定	将土壤和地下水中的污染物固定到根区和/或土壤物质中。固定可能是吸附到根部和/或土壤有机质（如 PAH）的结果，或金属沉淀的结果。这些效果可能是植物生长的直接作用，或由根生长引起的土壤微生物和土壤化学过程所致。净效应是减少污染物迁移率。
植物抑制（备选覆盖层）	使用植物和栽培技术（如定期添加有机质）可以增加表土深度，从而在弃土堆和填埋土上形成覆盖层并减少污染物迁移。植物生长和添加有机质也可产生稳定效果（如通过控制地下的 pH 值和氧化还原条件）和上述植物稳定作用。植物栽培还可以通过渗透水，通过植物根部截水来中断含水层的污染（尽管这种效果具有季节依赖性）。
植物降解	通过植物代谢降解植物内（通过代谢过程）或植物外（通过酶或植物产生的其它化合物的作用）的有机污染物。
植物刺激/生物刺激	刺激根区中有机污染物的微生物生物降解，如根提供了有利于微生物形成和活性的条件；这种微生物活性引起了有机污染物的降解或稳定。

因此，植物修复可以通过抑制和稳定以及长期去除或固定污染物源项，从而提供基于途径控制的有机、无机和放射性污染物快速风险管理的轻度修复方案（GRO）。在北美，轻度修复方案的应用可能比欧洲更加发达。美国州际技术与监管委员会列出了美国的 48

个主要场所，并主办了“全面”植物修复试验（ITRC，2009 年）。通常情况下，轻度修复方案在北美的应用范围包括当地社区发起和实施且相对较小的植物修复项目，以及超级基金场地使用且涉及植树、软覆盖层等项目的大型“绿色技术”修复方案。

植物修复应主要用来逐渐去除某一场所的不稳定（或生物可利用）的无机污染物（如通过植物提取），去除或降解有机污染物（如通过植物降解），去除或降解有机污染物（如通过植物降解），保护水资源（如通过根际过滤技术）或固定地下污染物（如植物稳定，原位固定）。相比传统技术，它可能提供更具有成本效益的原位替代技术，从而修复中低度污染基质，如土壤、沉积物、尾矿、固体废物和水。

不支持现有的以处理为主的修复解决方案，但可以高度适用于基于植物的风险管理方法的情况示例包括：

- 大型处理区域，特别是污染可能引起关注但并非异常突起的地方
- 场地治理后需要土壤生物功能
- 与土壤质量相关的其他环境服务（如生物多样性、碳封存）受到高度重视
- 需要恢复边际土地，以便生产非粮食作物，并避免主要土地利用变化
- 具有预算限制
- 土地修复过程植物的部署限制（如根据面积和位置）。

相反，在需要立即重新开发（即在 1 年内）的场所、场所大部分地区属于硬面层或具有正常使用的建筑物，以及当地监管指南以总土壤浓度值为依据的情况下，植物修复的作用有限。部署根据当地土壤类型、污染深度、气候、场地地形和其他局部因素具有位置特定性。综合技术资源可从 www.greenland-project.eu，www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Phytotechnologies/cat/Overview 和 ITRC 2009 获得。植物修复部署的优缺点见**表 3**。

表 3：植物修复的优缺点

优点	缺点
• 可提供回收可用生物质（如作为原料或能源）的机会，以及与如水管理和土壤改良相关的一系列其他服务。 • 植物提取可去除污染土壤中的金属，此外这些金属可以从来自收获生物质的灰中回收，特别是使用“超积累植物”时。 • 植物提取可以快速除去溶解形式的金属，限制金属的传播能力，因此具有保护水资源和生态受体的途径管理应用价值。 • 植物降解、植物转化和根际降解可为一系列有机污染物（包括多环芳烃等顽固性形态）提供长期解决方案。 • 植物抑制、根际过滤和植物稳定过程可以同时为广泛的有机和无机污染物提供途径管理解决方案。 • 植物挥发可能是去除浅层地下水中某些挥发性有机化合物的有效方法。	• 植物提取过程可能耗时许多年（数十年），而且某些金属可能无法通过植物提取过程获取或用于植物提取过程。因此，植物提取作为去除土壤中大块金属的源管理工具在适用性方面有限。 • 极少类型的超积累植物适合实际修复使用。 • 需要评价收获的生物质（并且可能进行监测），以表明污染物没有迁移到其中。某些情况下，收获的生物质可能不容易使用，因为其金属含量可能需要监管机构的特殊许可。 • 可能需要栽培措施，重新分级或振松或其他土壤改良措施以帮助植物生长。 • 通常需要持续的管理和监控，如施肥（可通过回收物进行）以预防虫害和/或回收生物质。 • 效益——作为修复技术同时还带来其他益处，可能有季节性限制，如在植物休眠期间递减。修复有效性也受根深限制。 • 植物挥发是将污染物从一种基质（地下水）转移到另一种基质（空气），因此可能引起监管机构的反对。

4.2 轻度修复—添加改良剂

“轻度修复”的一种形式是使用改良剂，可结合到土壤表面通过原位稳定来实现修复（Jones 等人，2016 年）。稳定过程是一种途径控制形式。因为污染物保持原位，迁移率和生物利用度降低，因此减少了通过土壤剖面浸出的可能。固定过程包括吸附到生物质、土壤有机质（如多环芳烃与腐殖质吸附）和木炭等引入材料表面（Bardos 等人，2010 年）。对于微量金属，这种固定涉及最重要的过程是沉淀、溶解、吸附/解吸、络合过程和离子交换。改良剂可以是专门为特定功能设计的材料（如改性炭）或松散物料（如堆肥和炉渣）。固定也可以在土壤 pH 值修正之后如通过添加石灰进行。但这通常被认为是可逆的，并且不适合作为长期措施。尽管如此，一些情况下，改良剂可能会由于矿化过程而导致土壤 pH 值降低。因此，建议与浸灰剂结合使用（Kumpiene 等人，2008 年）。

可再生能源应用的技术指导和战略

被污染的许多棕地性质复杂，并且可能被大范围的污染物混合物污染。因此，可能有必要跨场地应用多种修复技术，和/或结合处理过程中各个过程以将污染物浓度降低到可接受的水平（不会造成危害的风险评估水平）。处理方法的选择严重取决于场地具体情况和污染物。

原位稳定主要用于减轻污染对植被恢复和地下水资源的可接受水平的危害风险。处理的改良剂和污染物实例包括：

- **改性炭/特定炭**：具有使用生物炭固定重金属和有机化合物的广泛研究（Ahmad 等人，2014 年；Lehmann 和 Joseph，2009 年）。一系列产品已经开发或正在开发中。这些产品可以基于具体原料，如骨生物炭或炭，包括零价铁等改性剂。新出现的应用可以是将木炭用作微生物接种物的载体来促进原位生物降解（生物添加）。
- **其他专有改良剂**（如 Daramend™）属于一种混合零价铁的有机物质，用于处理易于还原降解的有机污染物。
- **浸灰剂**：方解石、生石灰、熟石灰、白云石质灰岩
- **磷酸盐和磷灰石**：使用一系列高磷酸盐材料（如合成和天然磷灰石和羟基磷灰石、磷酸盐岩，磷酸酯盐、磷酸氢二铵、磷酸及其组合物）时，金属固定特别是铅固定已成功。
- **堆肥和其他有机回收物**：堆肥和有机改良剂如污水污泥已被发现可减少无机和有机物的流动性。然而，这种效果对材料和场所具有高度特异性，并且一些测试中已经发现溶解的有机质可迁移金属（Park 等人，2011 年；Nason 等人，2007 年）。
- **炉渣**：一些类型的炉渣，特别是高炉炉渣已经用于原位固定金属。
- **沸石**：对于使用天然存在的沸石材料来原位固定金属以促进植被恢复出现强烈的研究兴趣（Shi 等人，2009 年；Leggo，2013 年）。
- **铁/铁产品**：在氧化过程中，土壤和移动物种中的铁氧化物可吸附到所产生的氧化物/氢氧化物中。已经发现富含金属氧化物的改良剂与堆肥、肥料、棕闪粗面岩、气旋灰分或石灰结合可有效固定微量金属并促进植物生长（Cundy 等人，2008 年）。

表 4 总结了原位稳定的优点和缺点。

表 4：原位稳定的优缺点

优点	缺点
• 快速固定移动物种，有利于植被恢复和保护污染影响的水受体不会从场地扩散。 • 可以采用诸如堆肥和炭结合来同时实现风险管理和土壤改良服务。 • 使用炭/生物炭可以暂时将碳封存在土壤中。 • 改良剂可以通过平衡 pH 值，添加有机质，增加持水能力，重建微生物群落和减轻压实来恢复土壤质量。 • 与许多其他干预措施兼容，包括实现改进保护，生物多样性的措施（取决于所选改良剂）。 • 通常可使用现成的农业设备部署改良剂。 • 使用一些改良剂代表了可持续再利用废物（农业和工业）的一种手段。	• 结合多种改良剂时，需要小心谨慎；因为它们可能会相互干扰。 • 确认和验证可能相对复杂，特别是对监管机构产生长期保护作用的情况。 • 不可能保护人类健康，其中直接接触是主要的接触途径。 • 一些改良剂（如堆肥和消化物或污水污泥可能与气味或生物气溶胶的滋扰有关。其他可能造成场外粉尘排放的滋扰。特别重要的是发现具有高稳定性和低气味的有机改良剂，并且采用使气味生物气溶胶和/或灰尘的排放最小的应用方法

4.3 生产可再生生物质、生物原料和二次资源

- **生物原料和非粮食/经济作物**：生物原料描述了经工业加工或制造以产生增值产品的植物或动物材料。通常，对生物原料作物进行加工以将生物质还原为加工工业中常用的前体，如甲醇、脂肪酸等。生物原料的主要应用是生物燃料生产（参见**第 4.4 节**），但应用更广泛，如用于塑料制造。非粮食作物包括纤维（如亚麻）、染料（靛蓝）、精油（薰衣草）或其他用途的各种不同的种植作物。棕地对非粮食作物或生物原料的吸引力在于，这块土地不可能在粮食生产中发生冲突；并且作物的下游加工不太可能产生不可接受的污染物关联。二次资源描述了可以替代原材料的回收料（如代替骨料的碾碎的拆除废料）。生产生物质和生物原料（如木料）也可以提供重要的碳封存效益（美国国家环境保护局，2012 年）。

  一系列非粮食作物可以提供可用原料，如用于能源（见**第 4.4 节**），但生产过程的投入也可以在棕地上产生，如纤维、生物塑料、染料、精油和食物链外部的一系列其他用途。新出现的应用是将有机残余物，特别是木质纤维素残余物转化为“生物精炼厂”中可用的有机化合物。生物精炼厂是一种综合了生物质转化过程

和设备以利用生物质生产燃料、电力、热能和增值化学品的设施。生物精炼厂概念类似于今天的炼油厂，生产多种燃料和石油产品。

棕地可能进行食品生产，只要这不会通过污染食物产品带来风险。共同背景是在城市棕地发展社区农场（美国国际环保局，2011 年；Mok 等人，2014 年）。根据是否可将有害污染物关联引入食物链，也可以在棕地进行食品生产。常见例子是在先前棕地上设置的城市农场和土地分配。将棕地用于放牧也很常见，例如前填埋场和矿山弃土场；但需要仔细评估风险（Green 等人，2014 年）。某些作物如亚麻可以同时进行食品和非食品应用。

- **表土替代品/骨料生产。**某些场地，将不同选配骨料与有机质混合，可用的相对干净的骨料可能有机会进行表层土替代品生产（WRAP，2012 年）。由此，较大发展潜力是草皮栽培，但需要注意避免任何场外污染草皮出口。对于某些场所，现场回收利用可以大大减少进口原材料的恢复需要。其他可回收材料包括岩土用填料（道碴），如沙子或砾石。这些可用于场地重新分级或重新塑造，或场外以及用于修建土建工程，如声屏障或防洪屏障（Defra，2009 年）。中心和集群方法，即服务于多个现场的临时集中处理，使材料回收更可行，特别是在棕地多个区域或棕地附近存在合理接近的非原位操作时[**注**：在欧盟国家，再生材料的再利用也可能存在监管壁垒，特别是在场外]。
  目前，主要通过生物燃料的投入将棕地用于生物原料和非粮食作物。尽管如此，棕地的非粮食生产总体上仍然是一个新兴概念，并且除能源生物质外，只产生很少的公共或同行评审信息。

- **木材/林地（包括木纤维）**是棕地的潜在再利用。棕地再用于林地建设已经得到充分发展，并且可以从许多来源获得详细的指导（Cotton 等人，2012 年；Willoughby 等人，2007 年）。使用植物修复过程中产生的短轮伐期灌木的木纤维已在学术文献中有过讨论（Licht 和 Isebrands，2005 年）。

棕地作为新的回收设施和加工生物原料的现场越来越受关注。在撒丁岛，前工业用地既用作生物原料加工中心（用于生物塑料生产）现场，也从农地和退化土地用作生物原料生产中心。**表 5** 中总结了将棕地用于可再生生物质、生物原料和二次资源的优缺点。

表 5：将棕地用于可再生生物质，生物原料和二次资源的优缺点

优点	缺点
• 可提供回收可用生物质（如作为原料或能源）的机会，以及与如水管理和土壤改良相关的一系列其他服务。 • 回收原料或产品所用生物质的能源和碳平衡收益可能大于仅回收能源的收益。 • 可成为管理污染土地风险的植物修复策略的一部分。 • 可有助于城市绿化和城市农场项目，这些项目具有更广泛的可持续性和社区效益。 • 适用于因土工原因不适合建筑用途的土地。 • 与土壤发育和生物质碳储量以及化石燃料替代品相关；具有碳平衡优势并有碳融资可能。 • 与其他形式的土地利用（如农作物，放牧牲畜，公共绿地均可行，这取决于现场情况）兼容。	• 需要评价收获的生物质（并且可能进行监测），以表明污染物没有迁移到其中。某些情况下，收获的生物质可能不容易使用，因为其污染物含量可能需要监管机构的特殊许可。 • 可能需要栽培措施，重新分级或振松或其他土壤改良措施以帮助植物生长。 • 通常需要持续的管理和监控，如施肥（可通过回收物进行）以预防虫害和/或回收生物质。 • 效益——作为修复技术同时还带来其他益处，可能有季节性限制，如在植物休眠期间递减。修复有效性也受根深限制。 • 植物挥发是将污染物从一种基质（地下水）转移到另一种基质（空气），因此可能引起监管机构的反对。 • 棕地面积可能是一个限制因素。详细的可行性评估应显示项目的有效性（即至少在经济和环境方面）。

4.4 可再生能源发电

使可再生能源发电的一系列技术有可能部署在棕地上，包括生物质、光伏、风和地热/地质来源。可再生能源利用碳友好的来源，因此有助于减缓全球变暖。可再生能源生产支持实现对不稳定化石燃料市场的独立性，并且可能在能源紧缺或可变供应的领域中特别有用。因此，可再生能源生产既是生产能源的可靠的可持续手段，也是获得能源供应安全的策略，使其成为对能源供应商（即，遵守温室气体排放）和消费者（即以控制价格计为可靠供应）。与传统能源部门相比，研究显示绿色及可再生能源部门提供就业机会的潜力巨大（UKERC，2014 年）。

用于棕地再生的背景下时，可再生能源供应是正在进行的场地管理的潜在收入来源。还避免了使用绿地场所进行可再生能源生产，减少潜在的土地利用冲突。

可再生能源应用的技术指导和战略

典型的可再生能源变体包括以下内容：

- **风力：**独立于棕地场所（从几百平方米到几公顷）的尺寸、风力涡轮机尺寸（即，功率）和数量很容易适应最小化诸如噪声和视觉冲击的干扰。风力发电可以很容易地与棕地场所上的其它用途结合，即住宅、商业和其他软再利用，例如公园和花园（配给的土地）。在城市地区存在风力涡轮机可以提供更好的效率，尽可能减少由于长距离的能量传输的损失。在棕地场所安装风力涡轮机降低了原始绿色空间的消耗，并改善了其生态足迹。棕带上有风力涡轮机对最终存在于现场的污染物的归宿和转移几乎没有影响。然而，更大的风力涡轮机可能需要大量土方工程用于地基。因此，其安装应在经过详细的土壤调查之后进行，以防止可能移动污染物的污染热点中的不当作业。在棕地上安装风力装置的限制因素是与项目的经济可行性，即考虑供应能力（即风力条件的规律性）和需求（需求的峰值）有关的因素。

- **太阳能：**太阳能技术可大致分为被动式和主动式系统。被动式系统是在城市地区和建筑设计中应用以获得太阳辐射能的最大利益，从而有效地加热建筑物（即，选择适当的建筑元件朝向太阳的方向，使用适当的材料和空间布局在建筑物中散发热量等）的系统。被动式太阳能技术显示出与绿色基础设施类似的优势，因为它们有助于减轻城市热岛效应并改善城市舒适度。因此，在地方规模上，与重建场所的软再利用相结合可为投资者和用户提供实质性利益（即：通过热舒适性、节能建筑和有吸引力的资产价值提高生活质量）。

  主动式太阳能技术包括使用光伏面板和太阳能热收集器来捕获能量。主动式太阳能发电系统可根据目的和所需的电力容量直接安装在地面或建筑物屋顶上。世界先驱国家的经验表明，与季节性热能存储（STES）系统相结合可提高产热太阳能发电系统的效率。这些系统能够一次蓄热数月。因此，主要在夏季收集的太阳能热可用于全年加热。太阳能供应的季节性热能存储装置包括单个建筑和集中供热网。STES 蓄热介质包括深层含水层；原生岩、热交换器装备的钻孔；填充了砾石且顶部绝缘的一排大浅坑；以及大的绝缘埋地表水箱。因此，当与蓄热系统组合时，棕地上的太阳能发电系统的可行性评估应考虑对地表下岩石干预的可能限制，其中地下基础设施和/或污染物的存在可能阻碍操作或使操作复杂化。

- **地热能：**地热能是由自然存在于地下的热（岩石、土壤、地下水等）提供的能量。收集热量的技术可包括诸如地热热泵的系统，即地源热泵，其中基础设施被埋在较浅地下深度（几米）。其他处置可能到达更深的热源（热岩，几百米的地热

源）。最近地热能已经广泛用于加热建筑物，使其成为用于住房和其他建筑物（热能或发电）的可靠且可持续的能源，并且有助于减少温室气体排放和减轻气候变化。根据技术，地热能的利用可能需要最小的土壤表面以埋入地下基础设施并且能够进行热交换。这使得该技术完美地适用于混合软和建造应用的区域，其中住宅或工业建筑用地热源加热。预见现场地热能生产的棕地再生项目应考虑与地下基础设施的存在相关的可能限制。因此，其安装应在经过详细的土壤调查之后进行，以避免障碍物并防止可能移动污染物的污染热点中的不当作业。在较浅的污染热点情况下，承包商可利用地面作业来挖掘出被污染的土壤供进一步的非现场处理，是否在现场取决于背景具体参数和费用。Banks 描述了来自矿井水的英国能源示例（Banks，2012 年）。

- **生物燃料能源生产：**生物燃料是由活生物体产生的液体或气体燃料。这些通常是植物或植物衍生材料，即生物质。燃料通过热、化学和生化过程从生物质转化获得。液体生物燃料包括通过发酵淀粉（即来自小麦、大麦、玉米或马铃薯）或糖（即甘蔗或甜菜）产生的生物乙醇，以及通过酯基转移油料作物（包括油菜籽、大豆、向日葵、棕榈、椰子）和动物脂肪。已开发了从农作物的残余非食物部分和其他形式的木质纤维素生物质如木材、草和城市固体废物产生的新一代生物燃料，从而降低能源和食品部门之间的竞争。除运输部门以外，生物乙醇通过燃料电池技术为化工行业和电力行业带来前景。

- **生物甲烷/沼气**可通过在棕地上生长的可生物降解材料的厌氧消化产生。沼气也在含有可降解废物的填埋场中产生。如果未适当捕获填埋沼气，将引起温室气体排放和全球变暖。足够的遏制和填埋场沼气增值有助于缓解气候变化，并提供可再生能源供应。

- 已广泛证明来自棕地的**生物质的热转化可**产生电和热。它包含可应用于特定区域中特定类型地区的单一解决方案。例如，在受熔融沉降影响区域植物提取到柳树短轮伐期灌木（SRC）中，或在受多环芳烃（PAHs）等影响地区使用具有可收获生物量的草地作物或油菜籽固定植物（Bardos 等人，2010 年；Lord 等人，2010 年）。

使棕地复原，将其软应用于生物燃料原料，为投资者提供向可再生能源部门供应与其他原料资源（CLUSTER）相结合的原料或作为唯一来源的机会。如果在现场或附近定位，

并运行生物质转化设施，这项活动可能有助于在贫困地区创造绿色就业，并促进当地经济。生物燃料生产过程的副产品可转化为用于农业、园林和景观（即通过厌氧消化产生的消化物）或牛用食品（即生物乙醇生产的谷类作物副产品）的高品质堆肥。因此，产生生物燃料的棕地复原为投资提供了多种益处和服务。最后，也是最重要的是，从原棕地生长的原料生产生物燃料避免了与农业用地（即用于粮食生产的农作物）的竞争，并减少土地消耗，从而有助于减少温室气体排放和气候变化。在**表 6** 中总结了不同形式的可再生能源生产中使用棕地的利弊。

表 6：可再生生物质、生物原料和二次资源使用棕地的利弊

优点	缺点
• 棕地可提供机会为更好地由当地社区支持的可再生能源选址。 • 可再生能源提供收益支持棕地管理及恢复。 • 可再生能源可为受棕地影响的社区提供范围广泛的更广的经济、社会和环境效益；并且还可以支持其他场地管理需求（例如，通过生物质的渗滤液管理）或协同作业。 • 与其他形式的土地利用（例如，农作物、放牧牲畜、公共绿地）的兼容性都是可行的。	• 经济效益可能不足以完全包括棕地恢复费用（但仍然可以提供有用补偿）。 • 可再生能源供应通常需要长期使用场地（大约 20 年），这可能会减少其对新重建的长远可能性。然而，临时安装是可能的，例如，临时生物质能源植物丛或可移动光伏设施。 • 棕地面积可能是一个限制因素。详细的可行性评估应显示项目的有效性（即至少在经济和环境方面）。

4.5 案例研究

案例研究 1：生物质生产和植物修复（中国）

背景和场地说明

修复现场位于中国西南地区的广西省西北部。该地区以其丰富的有色金属矿产资源，尤其是铅（Pb）和锌（Zn）而闻名，因此该地区的采矿活动很重要。2001 年，由于该地区洪水情况严重，靠近一条主要河流的一个铅/锌矿山的尾矿坝坍塌。这就造成了采矿废弃物溢出蔓延到下游的农田。

据估计，约 700 公顷的农田被重金属污染。从受影响地区收集的 191 个土壤样品中，重金属浓度范围为：砷 19-55mg kg^{-1}，镉 0.2-4.0mg kg^{-1}，铅 285-416mg kg^{-1}。此外，50%的收集的土壤样品的重金属浓度超过农业应用的土壤中重金属

的国家限值。由于土壤污染物的毒性，最严重的受影响地区不再能够维持常规农作物的生长（图 1.1）。

对于受影响较小的地区，农业可持续发展，然而农业产量显著受到影响，并且对食品安全感到担忧。

图 1.1. 修复前的现场土壤条件

研究表明，大多数当地农产品含有高浓度的砷、镉和铅，分别超过国家食品标准水平 13%、27%和 33%。

植物修复项目计划和修复结果

由于成本效益和恢复当地土壤生态的可能性，植物修复被认为是最合适的方法。

在现场调查和初步可行性研究之后，计划并在三个选定场所进行植物修复示范项目：

- **场地 A**（11.1 公顷）的污染程度最高。主要修复目标是使用选定的超积累植物提取污染物，即蜈蚣草和东南景天。
- **场地 B**（5.6 公顷）和**场地 C**（2.8 公顷）受到中度污染，因此计划采用间作系统在经济作物之间种植蜈蚣草和东南景天。

在场地 B 上，选择甘蔗作为间作物，而选择桑树作为场地 C 的间作物。

每年从所有三个场所收获植物修复植物蜈蚣草和东南景天，并在现场专为修复项目所建的燃烧器中燃烧生物质。

经过两年的植物修复，三个场所的砷、镉和铅的浓度分别减少了 55%、86%和 30%。

所有三个修复场所都符合国家农业生产标准，这些场所表明了提高的土壤生产力（图 1.2）。

图 1.2. 修复项目两年后的改善的土壤条件

修复期内栽培的经济作物产品符合国家标准，并向当地农民提供了一定的财政补贴。

项目成本效益分析

表 1.1. 植物修复项目的费用

费用分解	每公顷费用（美元）
初始资本投资	
污染调查	825
确定修复策略	825
整地	577
苗圃设备	5894
灌溉系统	5987
道路、桥梁及涵洞	9548
燃烧器	7217
其他初始资本投资	3812
两年运营费用	
幼苗	165
耕地	781
移植	206
施肥	124
病虫害防治	124
灌溉	124
除草	412
收获	186
其他人工成本	658
苗盘	83
超积累植物幼苗	165
农作物幼苗	2522
农药	41
肥料	14,892
其他材料费用	923
采收机	297
焚烧机	322
危险废弃物处置	206

表 1.1 总结了修复的土地的每公顷费用。修复费用包括初始资本投资和运营费用，分别占总费用的 46%和 54%。

费用分解	每公顷费用（美元）
两年运营费用	
生产补贴	357
土地租金	309
燃料动力费	1948
施工监理	74
环境监理	4011
定期监测	3299
员工工资	990
管理费用	825
差旅费用	3889
水电费用	2006
其他间接费用	755
总费用	**75,375**

在两年修复期间，与经济作物的间作得到了显著的经济效益回报，以资助修复项目。

通过销售甘蔗和桑树等产品，分别实现了 90,932 美元和 45,220 美元的收益。

修复后，修复场地恢复为农业用地。这些恢复的农田地区如今每年平均生产价值 160,700 美元的农产品。因此，预计在修复期间和之后的直接收益将在大约 8 年内抵消修复费用。

除直接收益以外，修复还取得了一些无形收益，包括提高的生态系统服务，增加的土地价值和投资。然而，难以获取这些收益的准确财务价值，因此这不会在本案例研究中考虑。

此外，燃烧源自植物修复项目的生物质，仅作为废物管理策略。然而，如果回收来自燃烧过程的能量以补偿现场操作的能量需求，则预料到可进一步降低运营费用。

致谢： 作者向提供项目信息的中国科学院地理科学与自然资源研究所环境修复中心的 Mei Lei 教授和 Xiaoming Wan 博士表示感谢。

案例研究 2：使用太阳能辅助增强土壤气相抽提（SVE）进行有机土壤污染治理（中国）

背景

土壤气相抽提是处理有机土壤污染物的有效技术。然而，其应用和修复效率取决于季节性温度变化。土壤气相抽提项目通常在温度较高的春季和夏季时间明显取得更好的结果。产生热量的一种可能性是使用太阳能板。太阳能是一种无限的可再生能源。

试点研究场所位于北京（39°48'N，116°28'E），平均日照时数为 10 小时，年平均日照时数为 2800 小时，平均太阳辐照度为 800W m^{-2}。该地区的气候条件明显受季风影响，其特征在于可明显区分四季—短多风春季，长时间炎热的夏季，凉爽宜人的秋季和长期寒冷的冬季。

考虑到气候条件和太阳能资源的可用性，开发和测试了一种创新的太阳能辅助土壤气相抽提技术。自开发以来，该技术被证明有效地提高了有机土壤污染修复的修复终点，尤其适用于需要大量土方和短周转时间的项目。

土壤和污染物的污染

现场的主要污染物是挥发性有机化合物，主要为苯和萘。表 2.1 总结了具体污染参数。

表 2.1. 植物修复项目的费用

	苯	萘
初始浓度 mg/kg	220	179
目标修复浓度 (mg/kg)	50	50
沸点℃	80.1	217.9
蒸汽压力（pa）	12689	26
分子量	78	128
溶解度（水中）	微溶	不溶
初始浓度 mg/kg	220	179
目标修复浓度（mg/kg）	50	50

设备

使用异位气相抽提系统在现场进行修复。该系统由太阳能辅助加热系统和气相抽提系统组成。太阳能辅助加热系统包括太阳能集热管、电热装置和热水循环系统。气相抽提系统包括真空泵、抽提管道、蒸汽收集和输送管道、液体/气体分离器、气体净化装置、液体清洁和收集装置以及集成控制系统。

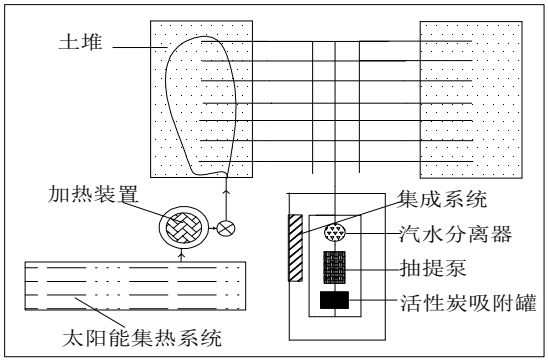


图 2.1. 系统布局

土壤气相抽提系统的布局和实验设置如**图 2.1 和图 2.2** 所示。在操作期间，太阳能集热管加热储罐中的水。储罐具有内置的带有热电偶的电加热元件。当没有足够的太阳能将水加热到设定温度时，电加热系统自动启动。然后将水泵入土堆 A 进行热交换。还设置了未土壤加热的对照土堆 B，以便比较土堆 A 的修复效率。

图 2.2. 修复场地视图

抽提管道安装在土堆下方。使用一层槌（粒度为 10cm，层厚度= 10cm）和一层 60 号（0.250mm）的网以改善气体扩散和分离的土壤进入管道。抽提管道装有压力表和流量计。此外，还安装了取样口和调节器。将污染的土壤堆放在砾石层上，首先使抽提管道连接液体/气体分离器，然后连接过滤系统，最后连接 XGB 高压涡流真空泵（功率=7.5kW，最大流速= 480m^3/h，最大压力=42kPa）。在释放入大气前，使用基于活性炭的气体净化系统清洁所抽提的气体。抽提系统的布局如**图 2.1** 所示。

堆底宽 4m，长 14m；堆顶宽 2m，长 12m。土堆坡度等级为 1:0.4。为了优化系统性能，在土堆设计期间考虑土堆中的负压、泵送速率、太阳能集热管的效率和抽提管中的污染物含量。在土堆的 7 个不同的深度监测土壤温度，如**图 2.3** 所示：H_1（20cm），H_2（50cm），H_3（75cm），H_4（100cm），H_5（120cm），H_6（140cm），H_7（170cm）。

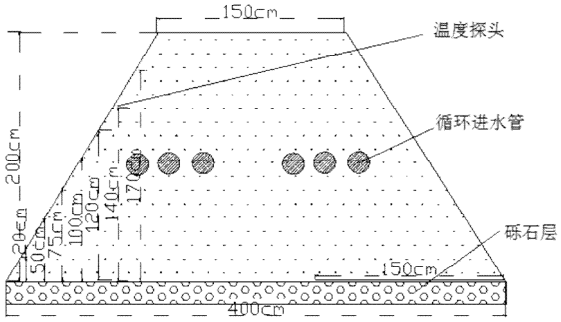


图 2.3. 土堆设计

太阳能辅助加热系统评估

太阳能隔离管的尺寸为 Φ0.05×1.4m，每根管的 0.07m² 用于评估太阳照辐射量。我们的太阳能收集系统的总表面积为 14m²，其平均太阳能集热量约为 17.28MJ.m².d⁻¹。根据上述数据，系统捕获的太阳能计算如下：

$Q = A \times J \times s \times (1-m)$

其中，Q 为我们的系统所捕获的能量；A 为总太阳能隔离管区；J 为每日总太阳能 =17.28MJ.m².d⁻¹；s 为热交换器效率 =0.50；m 为管道热损失；在本试点研究中使用的经验值为 0.1。

因此，捕获的总太阳能计算如下：$Q = 13.67 \times 17.28 \times 0.50 \times (1-0.1) = \mathbf{1.1\ 10^8\ J\ d^{-1}}$

抽提过程的理论热损失

需要处理的土壤体积为 65.4m³（98 吨）。土壤热容量为 1.4x10³J/（kg℃），平均土壤含水量为 12%。进行抽提时的土壤温度平均降低 3.04℃；因此，在试点研究条件下经抽提得到的热损失可计算如下：

$Q_{损失} = 1.4\ 10^3 J/(kg.℃) \times 3.04℃ \times 98000\ kg + 4.2\ 10^3 J/(kg.℃) \times 98000 \times 12\% \times 3.04℃ = \mathbf{2.78\ 10^8\ J}$

根据计算结果，太阳能输入不足以补偿经蒸汽抽提过程得到的热损失（$Q_{损失} > Q$）。

为此，抽提仅间歇地进行，并且在冬季加热主要取决于电加热。

土壤温度空间分布

使用温度探头在 7 个深度监测土壤温度：H1（20cm），H2（50cm）H3（75cm）H4（100cm）H5（120cm）H6（140cm）H7（170cm）（**图 2.3**）。

表 2.2. 土壤温度空间分布（环境温度@ -1℃）

抽提前		0.5h 后		1h 后	
样品号	温度℃	样品号	温度℃	样品号	温度℃
H1	10.3	H1	8.9	H1	6.6
H2	10.8	H2	8.4	H2	9.9
H3	16.0	H3	13.8	H3	11.7
H4	18.1	H4	15.2	H4	16.6
H5	15.6	H5	14.6	H5	11.8
H6	10.5	H6	10.0	H6	9.6
H7	10.4	H7	4.6	H7	-1.4

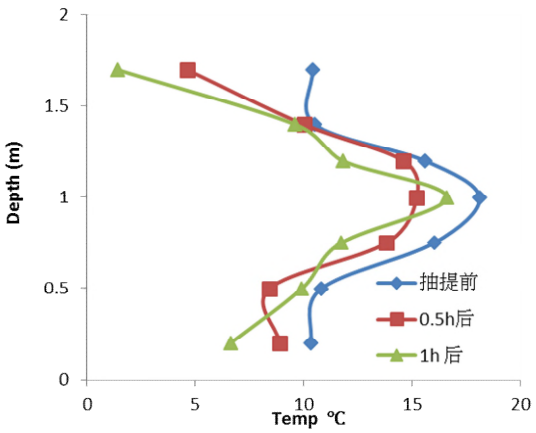


图 2.3. 不同深度的土壤温度变化（蓝色：抽提前；红色：0.5h 后，绿色：1h 后）

土壤温度随抽提操作时间的长短而变化，如**图 2.3** 所示。温度深度分布如下：$T_{1.0}$ ＞$T_{1.5}$＞$T_{0.5}$。例如，如果不进行抽提，进入土堆前水温为 40℃。一旦进入土堆，各深度的土壤温度如下：$T_{1.0}$ =12.1℃，$T_{1.5}$=18.5℃和 $T_{0.5}$=28.6℃。进行抽提时，水温为 23℃，各深度的土壤温度分别为 $T_{1.0}$=14.3℃ ， $T_{1.5}$=17.2℃ ， $T_{0.5}$=15.2℃（注：在 1 米深度处安装热管）。

修复结果

间歇地进行挥发性有机化合物抽提。收集 0.8m 和 1.5m 的土壤样品，分别用于化学分析和处理过程验证（**表 2.3 和 2.4**）

表 2.3 操作 17 天后的污染物浓度

样品号	取样层	苯（mg/kg）	萘（mg/kg）
1	第 1 层	135	127
	第 2 层	169	153
2	第 1 层	151	132
	第 2 层	142	136
3	第 1 层	121	133
	第 2 层	156	176
4	第 1 层	186	164
	第 2 层	113	124

注：此表了总结了操作 17 天后的结果。第 1 层深度为 0.8m，第 2 层深度为 1.5m。

表 2.4. 操作 30 天后的污染物浓度

样品号	取样层	苯（mg/kg）	萘（mg/kg）
1	第 1 层	36	43
	第 2 层	45	48
2	第 1 层	25	37
	第 2 层	42	44
3	第 1 层	33	31
	第 2 层	47	42
4	第 1 层	21	24
	第 2 层	32	42

注：此表了总结了操作 17 天后的结果。第 1 层深度为 0.8m，第 2 层深度为 1.5m。

操作 17 天后，能实现的苯和萘去除率分别为 15-48%和 14-30%（**表 2.3**）。由于抽提和重力产生的负压，污染物从顶土层迁移到底层。因此，在土堆的顶土层中发现污染物去除更为显著。

操作 30 天后，土壤污染物的浓度显著降低。苯和萘的去除率分别为 85-90%和 75-87%之间（**表 2.4**）。因此，太阳能辅

助增强土壤气相抽提能够实现苯和萘两者的修复目标。

致谢： 作者向为此项工作提供资金的中科鼎实环境工程有限公司和国家高技术研究发展计划（863 计划）（授权号：2013AA06A211）表示感谢。

案例研究 3：棕地到绿色能源（美国）

背景

美国马萨诸塞州布罗克顿的 Brockton Brightfield 位于曾被天然气工厂占据的一个地点，Brockton Brightfield[1] 太阳能农场归属于美国马萨诸塞州布罗克顿。该镇拥有 95,000 人口，位于马萨诸塞州波士顿南部 32 公里处。Brightfield 配备有 1,512 个 SCHOTT 太阳能模块，能够产生高达 465kW 的电能，为 77 个家庭提供能源。该设施被认为是由美国能源部资助的最大且最成功的 Brightfield 项目（De Sousa & Spiess，2013 年）。

场地历史和环境修复

Brockton 天然气厂在 1898 年和 1963 年间运作。该工厂包括干馏室、净化室、焦炭储存区、地上和地下油罐，焦油井和储气罐。煤气化相关材料（CGRM），即焦油、废净化废物、煤灰、煤粉、熟料和煤渣是气体生产所得的常见副产物。1964 年对该植物被破坏，造成 11 公顷的污染表面积。发现现场的土壤被挥发性有机化合物如苯、甲苯、乙苯、苯乙烯和二甲苯以及半挥发性有机物（例如多环芳烃）污染。

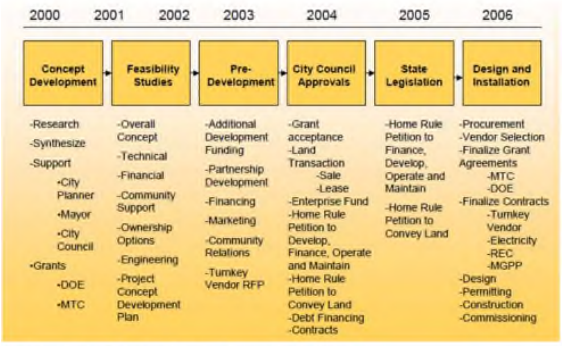
该城市在 2000 年开始从棕地到 Brightfield 项目将光伏阵列发展为太阳能公园（见图 3.1），其目标和目的如下：

- 以环保的方式重建棕地
- 开发新的当地清洁能源供城市使用
- 扩大城市税基
- 增强布罗克顿的形象
- 制定“布罗克顿太阳能冠军”概念，并通过使布罗克顿成为马萨诸塞州第一建立“冠军城市”标志
- 吸引光伏制造商来到布罗克顿。

于 2004 年完成该场地的修复工作，包括在标记为第 19 号地块和第 55 号地块的两个不同区域进行的措施。在第 19 号地块采取的措施包括处置 9.2m³ 的煤焦油，以及固结在 1.4 公顷不可渗透的高密度聚乙烯（HDPE）土工膜和一个单独的 0.66 公顷的清洁填料盖下的 1,853m³ 污染土壤。对于第 55 号地块，采取的措施是安装一个 0.67 公顷面积的可渗透盖，以及固结 732m³ 面积和 0.75 公顷的高密

[1] 术语 Brightfield 定义了通过建设无污染的太阳能发电和高科技制造将污染场所转化为可用的土地

度聚乙烯盖。此外，进行场地分级以改善排水，防止侵蚀以及避免接触污染土壤（Jensen，2010 年）。



Project timeline, Brockton Brightfields. Source: Ribeiro (2006, p. 46)

图 3.1. 项目时间表

Brightfield 项目说明

Brockton Brightfield 开始是由美国国家环境保护局向布罗克顿市授予创新津贴，用于研究棕地长期可再生能源解决方案的实施和融资（**图 3.2 和 3.3**）。在这种情况下，目标包括通过使用可再生能源证书（REC）向绿色能源开发商展示项目的长期财务可行性。作为一种可交易的商品，可再生能源证书证明 1MWh 的电力是由合格的可再生能源产生的。Brightfield 与 Constellation New Energy（一家地区性能源公司）签订了为期 20 年的协议，旨在获得可再生能源证书和电力。在最初的 5 年内，可再生能源证书以每兆瓦时 180 美元不等的价格出售，而在随后的 10 年中，价格固定为每兆瓦时 180 美元。此外，该公司接受购买由 Brightfield 产生的电，前 10 年的价格为 7 美分/KWh，合同最后几年为市价（美国国家环境保护局，2011 年）。

Brockton Brightfield (2009)

图 3.2. 太阳能板的安装

该项目的预算总额为 300 万美元，可通过州和联邦赠款、市政债券以及土地出售收益支付。截至 2010 年，Brightfield 每年带来 145,000 美元收益；该收入用于偿还建造和维护设施的费用。一旦满足贷款债务要求直至 2026 年，布罗克顿市将直接受益于可再生能源证书和电力的销售。

Brightfield 于 2006 年 9 月投入使用，在上线后，已生产了大约 2300MWh 的可再生能源，减少了 1.7 吨的碳排放量（图 3.3）。

Project design, Brockton Brightfields. Source: Ribeiro, Brownfields to Brightfields.

图 3.3. 项目设计概述

案例研究 4：美国拉克万纳的 Steel Winds

背景

美国纽约州的拉克万纳。八十年来，纽约州的拉克万纳被认为是美国钢铁生产的主要中心之一。然而，伯利恒钢铁公司（BSC）在 20 世纪 80 年代中期关闭，之前的活动在伊利湖畔留下了表面积为 647 公顷的污染土地（**图 4.1**）。在 1990 年，该场地被归入资源保护和恢复法设施调查（即超级基金财产）中。2002 年引入了对州和联邦环境法规的修改，这为棕地重建提供了激励措施，如棕地税收抵免和免于修复费用的责权保护。

图 4.1. 位于纽约州拉克万纳的 Steel Winds（来源：谷歌地图）

伯利恒钢铁公司在风模式的战略位置以及纽约州的支付政策，代替风能发电的财产税促进了世界上最大的城市风力发电场的建设。

现场历史和环境修复

对于 445 公顷的表面积，之前伯利恒钢铁公司的工程占用了两个城市，大部分场所在拉克万纳，一小部分在汉堡城。伯利恒钢铁公司工厂于 1909 年投产并于 1982 年停产。年产量达 700 万吨，伯利恒钢铁公司成为美国第四大钢铁厂。生产过程得到的产品是焦炭、焦炭副产品、结构钢、钢煤、钢筋和特种产品。由于该活动，钢渣被倒入伊利湖，形成 178 公顷的人造土地，称为渣填充区（SFA）。除了钢渣，渣填充区还接受其他废物，如废水污泥和疏浚物料。现场发生污染是由于三个主要作业，包括煤炭-焦炭生产，铁矿石-钢铁生产和支持作业。因此，最丰富的污染物是煤焦油、苯酚钠、硫酸铵、萘、轻油、硫和炉渣。Steel Winds 地块的占地为伊利湖岸线边一长条渣填充区。修复措施包括清除现有植被的场地，覆盖 30 厘米的干净土壤（即，总量为 29,000m^3），并播种以形成植被覆盖。此外，增强的有氧生物修复用于减少地下水污染。为此，将高级氧释放化合物®滤袋安装在上行梯度监测井中：三个位于场外，两个位于场内（Jensen，2010 年）。

Steel Winds 项目说明

在纽约州立大学布法罗分校进行风能开发研究后，一个 12 公顷的地块被选为渣填充区的潜在来源（**图 4.2**）。在 2006 年，美国国家环境保护局决定这个地块干净足以用来进行风能开发。随后，拉克万纳市与 BQ Energy 和 UPC wind （现在分别为 Apex Wind Energy Inc. 和 First Wind）合作实施了被称为 Steel Winds 的两个阶段的项目。

图 4.2. 伯利恒钢铁公司的风车（来源：Doug Benz for the New York Times）

Steel Winds I 于 2006 年 9 月开始了低级的开挖程序。2007 年 6 月完成了对 8 台可操作涡轮机（2.5MW）的部署，其总能力可达 20MW。作为降低费用的一种方式，该项目设计包括现有的基础设施（例如，道路和输电线），所以 Steel Winds I 的总费用为 3400 万美元。该项目的第二阶段，即 Steel Winds II，于 2012 年 2 月上线。在这种情况下，安装了 6 个额外的涡轮机后风力发电场的总能力增加到 35MW。目前有 14 个风力涡轮机向纽约州西部约 15,000 个家庭供电。在财务方面，Steel Winds 为地方政府带来了 19 万美元的年税收入。此外，Steel Winds 产生的电力像可再生能源证书一样出售给 Constellation New Energy（一家当地电力公司）。该协议促使 Constellation 在纽约州重建组合标准下实现其可再生能源目标，该标准要求 30%的电力来自可再生能源。除了能源生产，Steel Winds 项目作为磁铁重建后工业化的伊利湖海岸线：一个社区中心、一个商业中心、一个清洁燃烧发电厂（1,100MW）、绿道和自行车道是已经实施的一些项目（美国国家环境保护局，2012 年）。

案例研究 5：使用短轮伐期灌木提供有效的金属污染风险管理和修复解决方案（英国）

背景

英国英格兰西北部的利物浦和圣海伦斯

基于早前的案头研究和第一阶段调查，选定被视为受到地方当局或其他土地所有者污染的位于英格兰西北部利物浦和圣海伦斯地区的 5 块棕地（**表 5.1 和图 5.1**）。这 5 块棕地的土地曾用作不同用途（垃圾填埋场、工业垃圾和污水污泥），并且现场调查证实存在范围不一的微量元素污染，如**表 5.2** 所示。

各棕地共设置九个试验地块（分别为 30m×30m 或 21m×21m，每块棕地设置 1 至 3 个地块）。（使用履带式挖掘机）翻起约 30cm 深的土地，随后使用（拖拉机悬挂式机械）翻搅土壤并进行草甘膦杂草防除处理，从而在各棕地进行生物质栽培。

表 5.1　实验性试验位置和棕地概要说明

棕地缩写	详情
SUG	一个占地 3.8 公顷，位于商业和住宅区的城市废弃场所，毗邻交通繁忙的道路。该棕地曾作为社区花园，但在研究开始前未注意规划草地和灌木丛。
FAZ	该棕地曾作为污水处理场，但目前毗邻一家现代污水处理厂。该棕地约为 15 公顷，最近重新进行了实用性景观设计。栽种前对一块试验区进行污水污泥和污泥饼处理。
KIR	该棕地为占地 34 公顷的垃圾填埋场，位于农业景观内。自该垃圾填埋场于 20 世纪 70 年代关闭以来，这块贫瘠的草地（表土深度为 15cm）一直用于放牧牲畜。
MER	该棕地占地 6.6 公顷，是一块集中修剪并用于公共娱乐的美化草地，位于住宅和工业区内。土层浅（10 至 30cm）。其工业景观中包括一家建于 1873 年的制碱厂，后来成为工业垃圾场。
CRM	该棕地为 8.8 公顷的修剪美化草地，位于住宅和工业区，曾作为垃圾填埋场，上覆浅层土。

图 5.1. 一块位于 Cromdale Gove 的典型棕地，曾在 20 世纪 60 年代至 70 年代用作垃圾填埋场，收集家庭、工业和化学垃圾（包括煤矿废料、灰烬和碎石），现为上覆浅层土（深 10 至 30cm）的美化草地，周围环绕着住宅建筑和轻工业（French 等人，2006 年）。

此外，在栽培的前 2 年需要结合使用杂草修剪和除草剂，从而控制杂草。

表 5.2　土壤中的污染物浓度范围

污染物	各地块土壤样品中的范围（mg/kg）
镉	0-7.9
锌	2.8-1300
铜	10-880
镍	10-109
铅	45-1770
砷	4.9-5266

各地块采用完全随机区组设计（每种分类群占 10 个区，各区分别种植 12 颗植株，双排种植，间距为 1.5m×0.5m），种植 5 种分类群，即柳属、2 种杂交杨树、Alm1s、Bet11ia 和落叶松属（**表 5.3**）。

表 5.3　随机区组设计中各地块种植的林木物种和品种

分类群	缩写
欧洲和日本落叶松	LAR
欧洲白桦	BET
灰桤木	ALN
欧美杂交杨“Ghoy”	GHY
欧洲大叶杨“'Trichobel”	TRI
黄花柳 x *灰柳* x 蒿柳杂交种“Calodendron”	CAL
蒿柳“Orm”	ORM
*黄花柳 x 蒿柳杂交*种“Coles”	CLS
沙柳属 bwjatica“Germany”	GER
*蒿柳 x 伪蒿柳杂交*种“Tora”	TOR

遵循短轮伐期灌木管理的标准作法，在 1 年后仅对*柳属*和*杨属*进行人工修剪。再过 2 年后，人工采收所有柳属、杨属和桤木属的地上生物质。在第一生长季后和第三年末进行标准化叶面取样（对各区内侧 8 棵树的前三棵进行取样），以便用于金属测定；在第二次取样时，着重对污染热点处的树木进行取样，并且在采收的同时收集茎干样品。

修复结果

根据本案例研究，镉和锌在土壤-植物连续体中具有突出的可移动性。两者均为城市环境中常见的污染物，但镉是对动物毒性更强的金属，并且与人体健康和食物链的关系更密切。*柳属*中积累的镉浓度大大超过土壤中的镉浓度。CAL 和 GER 分类群的茎干中包含的镉浓度比 EDTA 可提取土壤浓度高 7 至 9 倍，比叶子中的浓度高 9 至 13 倍。这些数据可以与长期金属提取预测模型的生物质产量数据相结合。这些模型均为推测模型，其中假定金属不稳定性持续，土壤理化性质一致，生产力相同并且吸收率相同。显然，我们应当谨慎使用这些模型。但基于这些模型，在一般为 20 年的作物生命周期内，最有效的分类群（CAL）能从土壤中减少 5.6mg/kg 镉和 96mg/kg 锌。

灌木生产力

除砷含量居高不下的棕地（MER）外，落叶松属（LAR）外的植物的总体死亡率较低（平均为 11%）且与污染无关。所有棕地中，LAR 的死亡率非常高（20-77%）。第 1 年至第 3 年，桦木属的死亡率从 7%增长至 29%，这明显受到其他快速生长的分类群的竞争影响。

根据第 3 年收获数据（图 3）计算的植物产量显示，柳属和杨属分类群之间差别极大，并且桤木属产量极高。棕地（每年<2-9 吨/公顷）和地块（如 MER）之间也存在很大变化。
在英国，当木质生物质产量超过每年 8 至 10 吨/公顷时，视为实现经济回报。在本案例研究中，三块棕地（CRM、FAZ、KIR）中，四种杉属分类群（CLS、GER、ORM、TOR）和桤木属接近或超过该阈值。

结论

在本案例研究所示情况下，项目成果表明，至少在前 3 年内，种植木质生物质不会增加金属的不稳定性或在更广阔环境中的流动性。种植树木作为地面覆盖物有可能减少颗粒的再悬浮和对更广阔环境的污染。

因此，木质生物质可以提供有效的植物固定形式或监测式自然衰减。产生生物质的木本植物的栽培在提高美观性的同时，能提供经济利益（Paulson 等人，2003 年）。

使用植物提取法进行清理的时间尺度很长。但是，收集的证据表明这能为棕地的综合管理作出重大贡献。

柳属、杨属和桤木属的产量具有经济可行性，表明短轮伐期灌木在社区林业中具有潜在的价值。质量平衡模式表明，在为期 25 至 30 年的作物生命周期内，植物提取法可减少含较多移动元素（镉和锌）的污染热点。

致谢

本案例研究摘自法国 CJ 等人（2006 年）发表的著作。
欲知更多项目详情，请参阅原始报告。

案例研究 6：伊利诺伊州芝加哥市 Exelon 城市太阳能（美国）

背景

Exelon 城市太阳能项目是美国最大的城市太阳能发电站（**图 6.1**）。该城市太阳能项目位于西普尔曼（伊利诺伊州芝加哥市）的一个空置工业区内。

图 6.1. SunPower 光伏电池板安装在 Exelon 城市太阳能项目的单轴跟踪系统中（来源：SolarServer）

该项目由 Exelon 公司（一家总部位于芝加哥的能源公司）、SunPower（一家位于加利福尼亚的太阳能电池板制造商）以及芝加哥市环境和社区发展部合作开展。这台 10MW 的装置可以为 1500 个家庭供电。该项目于 2009 年 7 月开始建设，并于 2010 年 7 月将该电厂投入使用（SolarServer，2011 年）。

在 19 世纪 80 年代至 20 世纪 80 年代，西普尔曼附近为芝加哥的工业活动核心。在这期间，普尔曼汽车厂、荷兰男孩油漆公司、AM Forge 和 Ingersoll Products 等公司均位于该区域。机车刹车片、农用机械、轨道车和含铅油漆生产是西普尔曼生产的主要产品（S.B. Friedman & Company，1997 年）。

受去工业化影响，于 1998 年成立了作为工业园保护区（IPCA）--税项增额拨款（TIF）特区和伊利诺伊州企业的西普尔曼工业再开发区（WIRA）。该工业园保护区-税项增额拨款特区通过组合作业、土壤修复项目和基础设施改进促进了西普尔曼工业再开发区的恢复。通过这种方式，第 10 区、11 区和 12 区（共占地 16 公顷）被选为城市太阳能项目的建设场地。

整个第 10 区均为 Chicago Malleable Castings 公司所有。在该区域进行的调查发现，多环芳烃（PAH）、金属和石棉是

主要的污染物。11 区和 12 区分别用作国际收割机公司的库房和制造厂。第 11 区主要受石棉污染，而在第 12 区发现了轻质非水相液体、多氯联苯（PCB）、多核芳烃（PNA）、碳氢化合物、金属和石棉（Jensen，2010 年）。以上三个区域于 1999 年至 2000 年期间采取的修复措施涉及拆除地下储罐和 2,930 吨含石棉材料（ACM）。

来自地下储藏室和下水道的油性液体以及被多氯联苯污染的材料也被清除。此外，被铬（三价铬和六价铬）污染的地下水于 2007 年完成了原位处理。

针对多氯联苯的修复目标设定为 1mg/kg。多氯联苯含量超过 50mg/kg 的土壤被挖出后在满足《有毒物质控制法案》标准的垃圾填埋场中处置。

受铅污染的土壤在合适的伊利诺伊州设施中进行处置。最后，将含有碳氢化合物和多核芳烃的材料以及多氯联苯浓度低于 50mg/kg 的土壤和混凝土一同作为无害特殊废弃物弃置在当地垃圾填埋场中（Jensen，2010 年）。

芝加哥市为第 10 区和第 11 区进行的现场评估和修复措施共支付了 80 万美元。此外，还为太阳能发电厂建设期间需要进行的额外修复花费了 20 万美元。对于第 12 区，美国国家环境保护局从 1998 年至 2007 年提供了 95 万美元支持修复活动。

Exelon 城市太阳能项目说明

图 6.2. 伊利诺伊州芝加哥市 Exelon 城市太阳能（来源：Turner Constructions）

由 SunPower 设计和建造的 10MW 装置包括安装在 SunPower T0 单轴跟踪系统上的 32,292 个 SunPower 瓦特单晶模块（**图 6.2**）。这种专利设计允许电池板随太阳旋转。与固定阵列系统相比，T0 不仅能将太阳光捕获量提高 25%，而且还以更小的占地面积提供了更高的发电量。这些电池板每年可将阳光转化为 14,000 兆瓦小时的电力（Exelon，2016 年）。项目总成本为 6 千万美元。根据《美国复苏与再投资法案》（ARRA）为项目的可行性提供了至关重要的资金支持，因为《美国复苏与再投资法案》包括红利折旧，所以在 2009 年将地产的调整基数扣除 50%。剩余的 50%调整基数按照常规折旧计划进行折旧（Jensen，2010 年）。

5 可持续性评估和评价

评估土壤和地下水修复的可持续性及所有相关指导的英国可持续性修复论坛（SuRF-UK）是根据与来源广泛且属于不同利益相关者类型从业者的协商过程发展起来（CL:AIRE，2010 年）。英国可持续性修复论坛从一开始就确定需采用简单、健全和透明的方法，协助可持续修复决策，以使该决策能在不同的监管制度之间轻松转换，因此可以根据不同国家进行调整和采用。可持续性过去常被认为太复杂、昂贵和过于主观，有时被视为对人体健康和环境风险的一种替代标准，因此这一特点至关重要。

英国可持续性修复论坛确定了大量主要原则。在对污染的土地进行决策，以实现有效的可持续修复时，这些原则明确支持了风险评估和管理的主要作用（**表 7**）。此外，英国可持续性修复论坛明确提倡采用分层法，从而尽量减少决策的成本和复杂度，同时提供指导，以确定应考虑的可持续性事项，从而确保采取全面一致的方法，如**表 8** 所示（CL:AIRE，2011 年）。最近发布的国际标准化组织（ISO）标准（国际标准化组织，2016 年）中已采用分层法以及含基础原则的英国可持续性修复论坛。

表 7　与可持续修复相关的主要原则

原则	可持续修复
原则 1：人体健康及更广范围环境保护	修复【场地特定的风险管理】应消除对人体健康构成的不可接受的风险，并保护现在和未来的更广范围的环境，使其适于约定的土地利用，并适当考虑可用方案的成本、效益、有效性、持久性和技术可行性。
原则 2：安全施工做法	修复工程应保证所有工人和当地社区的安全，应尽量减少对环境的影响。
原则 3：前后一致、清晰、可重现的基于证据的决策	基于风险的可持续修复决策应考虑环境、社会和经济因素以及目前的影响和未来可能产生的影响。这种基于风险的可持续修复解决方案可实现最大化的潜在效益。[2] 效益与影响发生聚合或此消彼长时，应对这一过程进行解释并提供清晰的基本原理。
原则 4：保持记录与透明的汇报	修复决策（包括做出决策所用的假设和支持数据）应以清晰易懂的格式记录成文，以便向相关方证明采用的是可持续性（或不可持续性）解决方案。
原则 5：良好治理和利益相关方参与	修复决策应考虑利益相关方的观点，并遵守利益相关方可参与决策的清晰流程。
原则 6：可靠科学	应基于可靠科学、相关准确数据和清晰的假设、不确定因素和专业判断作出决策。这将确保决策依据是可用的最佳信息，确保决策合理性和再现性。
版权所有© CL:AIRE 2016 年。经许可转载。	

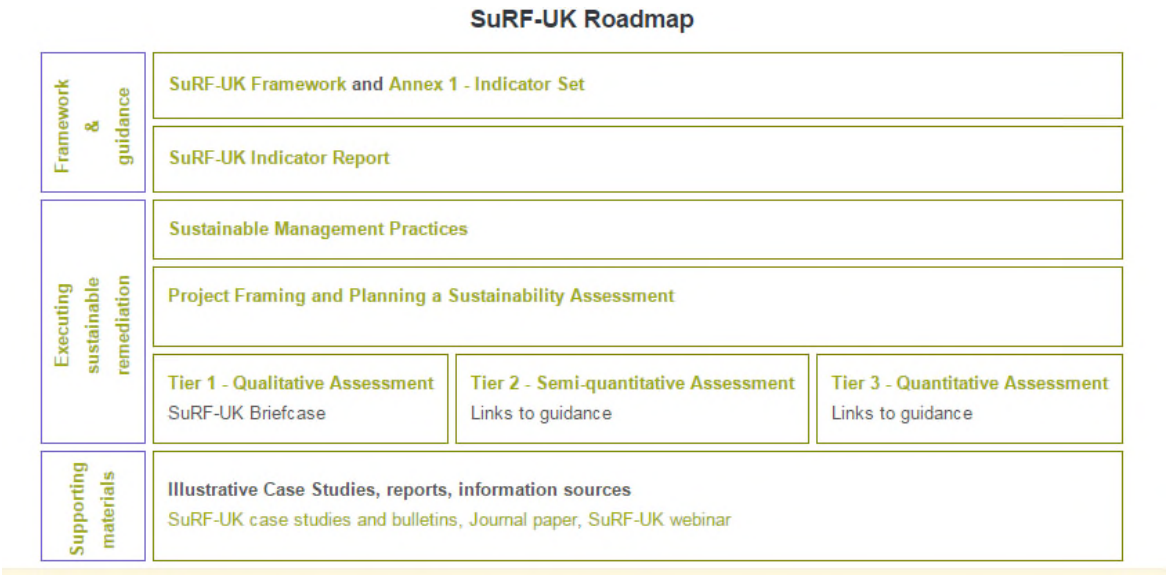
表 8　整个英国可持续性修复论坛的可持续修复项目

	环境	社会	经济
1	废气排放	人体健康和安全	直接经济成本和效益
2	土壤和地面条件	道德与公平	间接经济成本和效益
3	地下水和地表水	社区和地区	就业和就业资本
4	生态	社区与社区参与	诱发的经济成本和效益
5	自然资源和垃圾	不确定性和证据	项目期限与灵活性
版权所有© CL:AIRE 2016 年。经许可转载。			

英国可持续性修复论坛由一个独立的组织 CL:AIRE 进行协调，自 2009 年以来，它形成了**图 8** 所示的多项成果，可从 www.claire.co.uk/surfuk 免费下载这些成果。

英国可持续性修复论坛的系列出版物和工具可适用于所有人，并为可持续修复从业者提供了一系列好处。这些好处包括：

- 支持有效的风险管理
- 通过寻找土壤和地下水项目的最佳解决方案来产生价值
- 识别和避免项目风险
- 可证明遵守政府和/或公司的可持续发展政策和目标
- 为提供企业社会责任（CSR）计划、声誉和公共关系做出积极贡献
- 为可持续发展作出贡献。



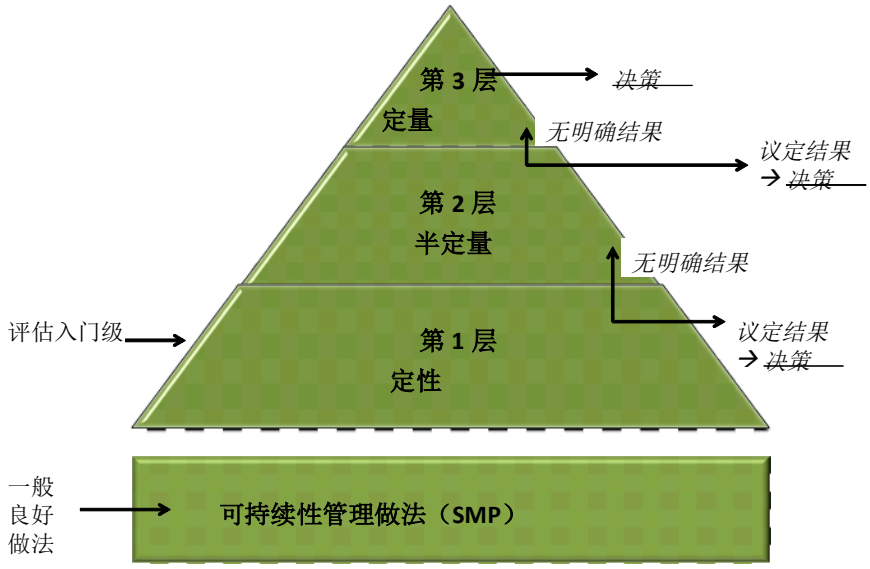
版权所有© CL:AIRE 2016 年。经许可转载。

图 8：英国可持续性修复论坛成果

在为修复决策的可持续性管理和评估提供框架和指导的同时，英国可持续性修复论坛也认识到简单的操作指导可以明显提高污染的土地处理法的可持续性，因此出版了《土地污染管理可持续性管理做法》（CL:AIRE，2014 年下半年）。英国可持续性修复论坛将可持续性管理做法（SMP）定义为“可以在土地污染管理项目的任何阶段实施的相对简单的常识性措施，以改善其环境、社会和/或经济绩效”（CL:AIRE，2014 年上半年和下半年）。这针对污染的土地确定了用于实现可持续更强的管理方法的两个起点，并作为分层过程的一部分，如**图 9** 所示：

- 简单良好的管理做法，以减轻已知的负面影响和增加已知的利益（可持续性管理做法）
- 用于规划、设计和方案鉴定的定性可持续性评估。

可持续性评估和评价

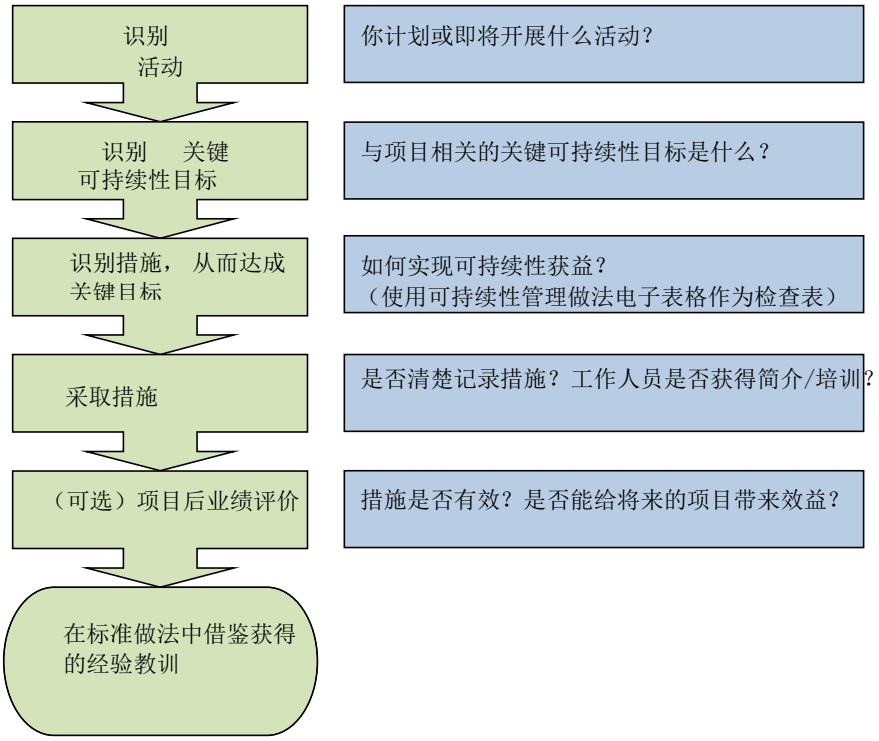


版权所有©CL:AIRE 2016 年，从 CL:AIRE 2014 年上半年开始，经许可转载。

图 9：可持续性评估分层法

可持续性管理做法有多种用途，例如提高项目的效益（如资源效率和成本）或减少项目的负面影响（如溢出和投诉），从而实现项目的“可持续性获益”。可持续性管理做法预期可直接使用，而不需进行正式的可持续性评估。当使用可适用于一系列项目类型的通用准则或标准，在工作计划层面寻求可持续性获益时也可使用这些做法。因此，使用可持续性管理做法被英国可持续性修复论坛看作一项入门级活动，用于支持作出任何额外的基于可持续性的决策。**图 10** 描述了这些可持续性管理做法的使用过程。

可持续性管理做法提供了实用且通常较便宜的措施，可为项目产生明显的“可持续性获益”。如果这些做法在逐项基础上能获得明显的益处，则应选择相应做法。可持续性管理做法以 Microsoft Excel 电子表格的形式提供，可从 www.claire.co.uk/surfuk 下载。还提供了一份报告，其中介绍了可持续性管理做法开发和可持续性管理做法电子表格的使用说明（CL:AIRE，2014 年下半年）。

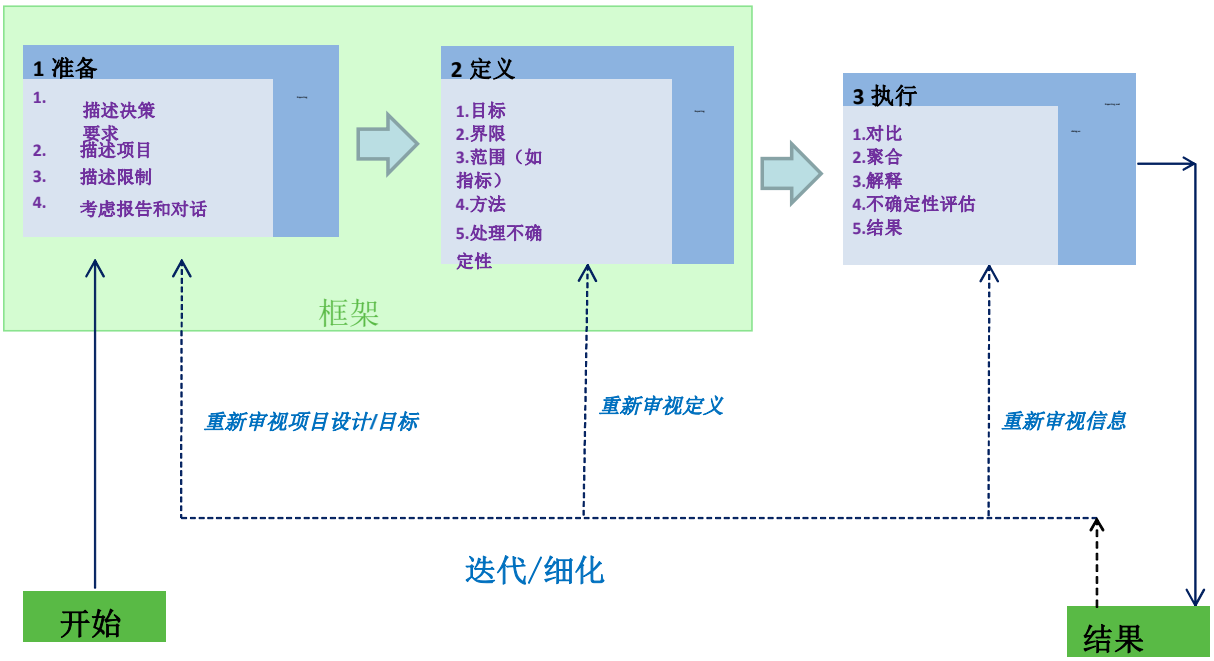


版权所有©CL:AIRE 2016 年。经许可转载。

图 10：使用英国可持续性修复论坛的可持续性管理做法

5.1 可持续性评估框架指南

英国可持续性修复论坛不提倡使用说明性工具执行定量或半定量可持续性评估，而是用于帮助行业进行分层鉴定。这些工具提供了可用于进行可持续性评估的广泛规则。大致的程序步骤如**图 11** 所示，用于维护可持续修复计划在评估、设计、实施和报告中采用的各种方法的一致性，从而建立可重现、透明和健全的方法。这些原则和程序阶段具体应用于每个棕地/项目，并且英国可持续性修复论坛将该实施过程称为可持续性评估的“框架”（CL:AIRE，2010 年）。



版权所有©CL:AIRE 2016 年。经许可转载。

图 11：英国可持续性修复论坛进行可持续性评估的方法（CL:AIRE，2014 年上半年）

适用的框架应当支持所有可持续性评估，即使它们只具有定性性质。这种方法也与最近发布的国际标准化组织标准（ISO，2016 年）基本一致。英国可持续性修复论坛发现，已发布的方法中仅少数适用于支持定性可持续性评估，因此，他们在 2014 年发布了支持这些要素的工具和指南，即可持续性评估框架指南（也被称为“公文包”）。该指南详细说明了如何构建可持续性评估框架以及如何进行定性评估。该指南包括一个交互式幻灯片集（Adobe PDF 格式），该幻灯片集在“日志薄”模板格式下记录决策（Microsoft docx 格式），随后在电子表格格式下记录评估（Microsoft xlsx 格式）。以上文件均可从 www.claire.co.uk/surfuk 免费下载，并列于 CL:AIRE（2014 年上半年）。

无论定性、半定量或定量，可持续性评估过程的所有层级均需采用框架过程。框架包括两组活动，各活动均包含大量步骤：可持续性评估方法的定义，以及随后的可持续性评估准备工作。

- 可持续性评估准备包括四个主要步骤：
  - (1) 描述决策要求；
  - (2) 描述项目；

(3) 描述机会和限制；和
(4) 考虑报告和对话。

这些准备活动提供了基本框架，其中必须对可持续性评估进行定义。

- 定义过程中考虑了五个问题：
  (1) 目标；
  (2) 评估界限；
  (3) 范围——可持续修复指标；
  (4) 可持续性评估方法；和
  (5) 处理不确定性。

框架指南采用超链接幻灯片形式，用户可根据需要对不同细节层次的幻灯片进行前后翻页。“日志薄”用于帮助可持续性评估小组记笔记（如需要）。其目的是帮助项目经理和可持续性评估员在以下情景中构建各自的可持续性评估方法框架：

- 将框架幻灯片作为交互式学习辅助器
- 将框架幻灯片作为备忘录的分步骤过程，以制定可持续性评估方法
- 在会议上使用框架幻灯片支持讨论
- 用日志薄格式记录假设和结果。

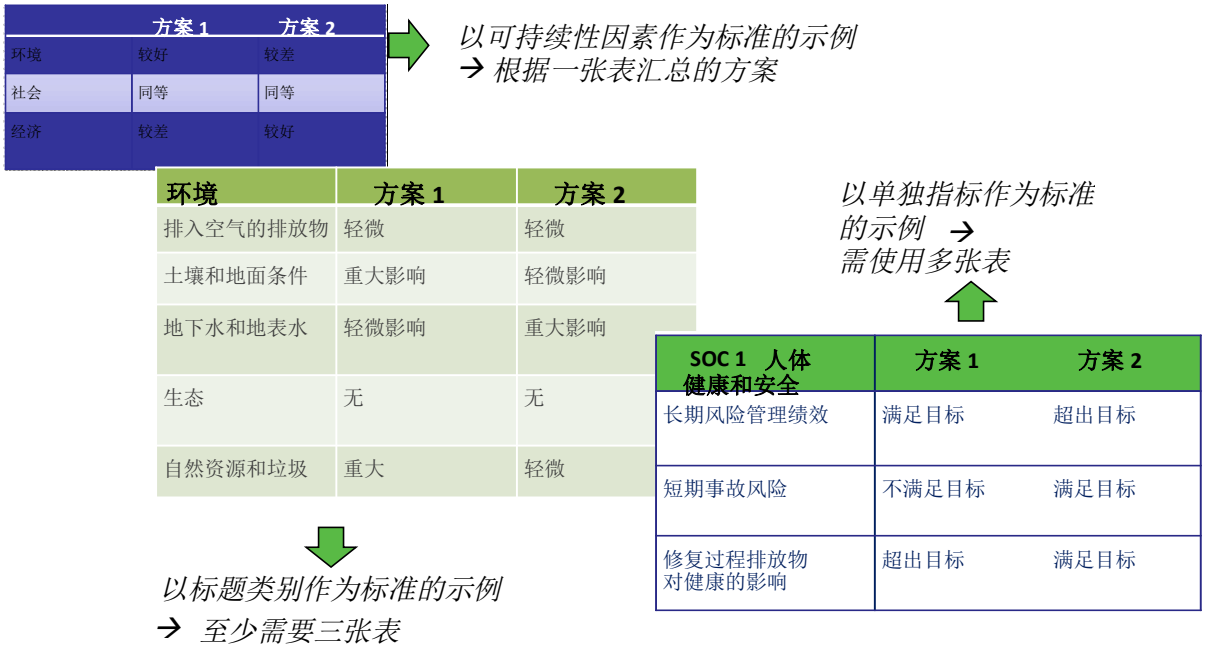
目前，国际上对“可持续修复”的关注促使人们就相关描述和定义快速达成了共识，英国可持续性修复论坛在这方面一直处于最前沿，其主要原则已被转载入新出版的国际标准化组织标准（Bardos 等人，2016 年上半年）。

5.2 定性可持续性评估指南

与框架指南相同，英国可持续性修复论坛的“定性评估指南”包括一个交互式幻灯片集（Adobe PDF 格式），该幻灯片集在“日志薄”模板格式下记录决策（Microsoft docx 格式）。还包括一个电子表格工具，用于系统地指导用户完成第 1 层定性评估的主要阶段（准备、定义和执行），并鼓励清晰记录决策。以上文件均可从 www.claire.co.uk/surfuk 免费下载，并列于 CL:AIRE（2014 年上半年）。

虽然第 1 层是最简单的层级，但仍然需要预先对评估构建充分的框架和进行规划。此外，虽然评估是定性的，但可以并应该利用现有的定量信息。评估结果由采用定性分类的简单表格组成，如“好”、“一般”或“较好”，或简单排名（见**图 12**）。如能适当清楚的区分这些被比较的方案，则不必在第 2 层和第 3 层进行更详细的评估。此外还开发了一种

电子表格工具，以便与多名利益相关者在商业基础上开展可持续性评估工作。该工具可通过网站 www.claire.co.uk/surfuk 免费下载。



版权所有©CL:AIRE 2016 年。经许可转载。

图 12：选择不同的细节层次作为英国可持续性修复论坛指标体系标准对对照表结果的影响

可持续性评估针对具体场所进行，具有主观性。这种评估考虑了不同利益相关者观点中包含的广泛因素，并由此对可持续性评估实施分层法，从而提供了重要优势，这种分层法以“需求”为基础，始于定性评估，并通过半定量和定量评估。这样的好处是：

1 决策的投入程度合适；

2 分层法支持更具包容性和透明的方法；

3 不同层级的相对优点和弱点以允许两者进行整体评估的方式相结合，还可以进行更详细的评估（如需要）；

4 分层法阐明了详细评估特别关注高度重要事项的理由；

5 为可持续发展做出贡献。

Bardos 等人（2016 年下半年）认为，可以进一步明确对可持续性的定性评估，并能使用可持续性的概念场地模型避免可能重复出现的影响。这种想法因采用“可持续性关联”而产生，因此与用于风险评估/管理的概念场地模型在开发时使用的“污染物关联”略有相似。虽然英国可持续性修复论坛指南并不包括这种方法，但这种方法完全符合该指南。英国可持续性修复论坛（CL:AIRE，2011 年）提供的详细的“附件 1”指标指南可作为一种便于确定潜在的可持续性关联的检查清单。可持续性关联由三部分组成：

- 产生压力的因素或影响可持续性的变化
- 受该压力或变化影响（积极或消极）的受体
- 连接两者的机制

因需投入大量时间，探讨使用概念场地模型实现可持续性的可行性的工作不仅获得了本项目的支持，还与前面提到的中国繁荣战略项目基金（SPF）哥伦比亚项目共享。许多开发工作在土地信托（阳光港滨江公园（PSRP），参见第 5.5 节）实施的某个特定的棕地修复项目下进行，并由一位来自中国科学院的布莱顿大学中国留学生负责。感谢土地信托、中国科学院和布莱顿大学对本报告编写的大力支持。

英国可持续性修复论坛“附件 1”指南提供了一份有用的检查清单，以确定可能产生有效关联的各种可持续性影响。在**图 13** 中，**表 8** 中的“空气类别”已扩展列出了英国可持续性修复论坛“附件 1”指南中包含的各种具体影响。对于每种影响，首先考虑其是否具有相关性（即存在实质压力或变化）。完成这一步骤时，等待评估的潜在关联以及被视为不相关的关联会被废弃，并解释其不具备实质相关性的原理。对于表 8 中列出的

可持续性评估和评价

所有英国可持续性修复论坛的标题类别重复该过程，然后可以添加用于剩余关联的机制和受体（参见**图 14**）。无机制或无受体=无连接。

可持续性修复论坛参考文献	评估标准	单独的潜在联接	相关性（+ / -）	证据 1
ENV 1	*环境* 废气排放	A.气候变化 - 温室气体（如 CO_2、CH_4、N_2O）	+	
		B.酸雨-排放氮氧化物（NOx）和硫氧化物（SOx）	-	生成量不足以形成重大酸雨影响，但能对局部空气质量产生影响
		C.地面空气质量-颗粒物（尤其是 PM5 和 PM10），地面臭氧等	-	仅产生局部影响，对大气无重大影响
		D.消耗臭氧层物质（如 O_3 和挥发性有机化合物）	-	生成量不足以形成重大酸雨影响，但能对局部空气质量产生影响

图 13：**使用英国可持续性修复论坛“附件 1”指南检查潜在可持续性关联的相关性**

可持续性修复论坛参考文献	评估标准	单独的潜在联接	压力/变化	机制	受体
	环境				
ENV 1	废气排放	A.气候变化 - 温室气体（如 CO_2、CH_4、N_2O）	温室气体	车辆和机器	大气
			温室气体	植被退化	大气
			温室气体	碳封存	大气
		B.酸雨-排放氮氧化物（NOx）和硫氧化物（SOx）			
		C.地面空气质量-颗粒物（尤其是 PM5 和 PM10），地面臭氧等			
		D.消耗臭氧层物质（如 O_3 和挥发性有机化合物）			

图 14：使用英国可持续性修复论坛“附件 1”指南指定潜在的可持续性关联

可持续性概念场地模型通过整合网络图中的个体关联构建，其中三列中的区块显示了“压力”、“机制”和“受体”以及它们之间的相互关联，如**图 15** 所示。根据机制是否产生好处（白色）或不利（灰色），可使用不同阴影显示各区块，从而有助于理解。也可用颜色标注相互关联，以指出关联是否包括在可持续性环境、经济或社会因素内，例如，使用附件 1 指南规定的颜色（绿色=环境；粉红色=社会；黄色=经济）。

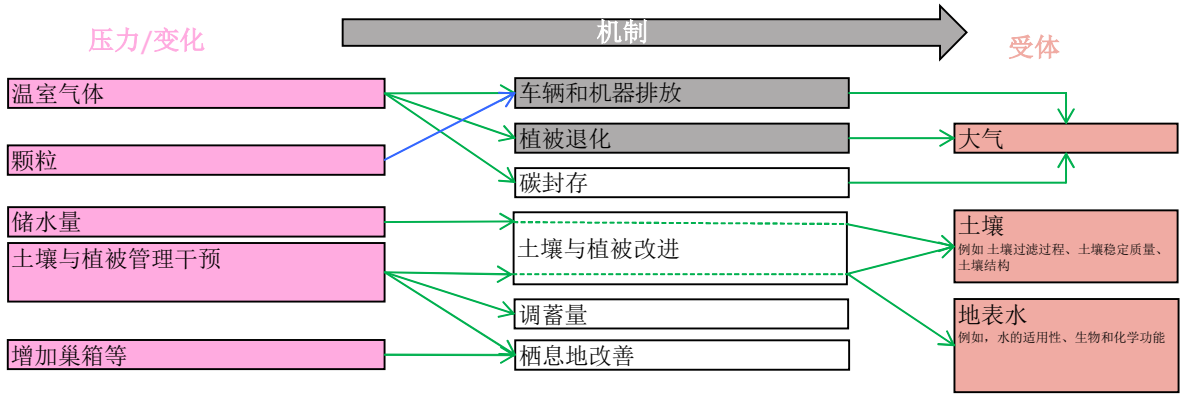


图 15：可持续性概念模型组成网络图

在许多情况下，可持续性关联具有共同的压力、机制或受体。在建立网络图时，应确保每个压力、机构或受体分别仅描述一次，即使它们之间可能存在多种相互关联。这条要求不仅使图表更明确，还确保删除了重复的关联。**第 5.5 节**提供了压缩此类可持续性概念场地模型，以改进阳光港滨江公园的案例研究。

5.3 通过价值评估方法进行定量评估的指南

虽然现已提供多种方法使用半定量和定量工具，但英国可持续性修复论坛意识到从业者需要适应和开发不同的方法以满足各自的需求，并确定需要提供某些基本指南（“框架”），以便确保这些方法的总体结构的一致性，同时使其符合整套主要原则。因为英国可持续性修复论坛认为市场上已有大量评分式系统（半定量），并且可通过适当使用成本效益分析或评估提供合适的定量评估方法，所以并未针对可持续性评估的半定量或定量方法开发具体方法。但这种观点并非毫无争议，并且基于成本效益的评估可能不被某些主要利益相关者接受，即使这些评估能支持私人和公共投资决策（Bardos 等人，2016 年下半年）。

使用可持续性概念场地模型有助于提高定量方法的透明度，尤其是消除有关特性不明显的忧虑。利益相关者可以一起商定三个分组中各组所含的个体关联，如**图 19——第 5.5 节**所示。所述三组如下：

- **直接经济回报**（与已恢复土地的特定服务有关，例如可再生能源供应；与直接成本的对比，例如部署修复系统）
- **经济性明显的广泛效应**，即，所有利益相关者均认为这类影响可被估值，如提高周围地产的价值。
- **经济性不明显的广泛效应**，即，在经济方面不可直接衡量，并且利益相关者可能认为估值存在问题。

为使成本和效益尽可能获得利益相关者批准，建议将成本效益和多项准则（评分式方法）与难以估价的部分相结合（Rosen 等人，2015 年）。使用可持续性关联提供的结构有利于实施这种方法。然而，有个别利益相关者需以货币形式提供所有估值。

示例情况可能是项目发起人希望显示的投资收益情况，如每 1 英镑投资产生£x 可持续性效益；也可能是不同的利益相关者必须制定投资实例来支持项目筹资的情况。在这种情况下，可持续性关联的结构也可发挥作用，该结构能将关联分组，以便部署最佳评估工具（Li 等人正在编写）。该方法已通过**第 5.5 节**所述的阳光港滨江公园案例研究进行了测试。

5.4 与利益相关者进行定性和定量评价

在整个可持续性评估过程中均需考虑利益相关者的看法。通常，最实用的方法是一种迭代法，该方法中，由某个小（核心）组从框架开始进行可持续性评估，并发展到对现有管理方案的初步定性排名。存储和处理此信息的便捷方法之一是使用电子表格，如从 www.claire.co.uk/surfuk 获取的模板。该模板为**表 8** 中的各类别分别提供了一系列排名（最多 15 个名次）。经过组合，这些排名可形成各可持续性要素的整体排名，从而形成整体可持续性。如**第 5.5 节**所示的雷达标图可作为一种高度透明的方法，用于告知结果。

在这之后，可以将这种初始框架和定性评估作为出发点，与额外利益相关者进行更具体的讨论。当然，这些讨论可能会重新审视框架和排名，这将会对评估方法和结果产生后续影响。初始工作通常由场地管理员及其顾问完成，然后管理和规划部门参与后续的迭代，并且获得的利益可能超过第三轮迭代的参与部门。显然存在其他排序方式。例如，对于社区项目而言，当地行动小组可能是重要的早期顾问之一。因为大部分人的时间有限，所以对他们而言，响应初始模型比“从头开始”启动思维过程更轻松，这也是在不同情况下以初步评估作为具体讨论平台的优势所在。在许多情况下，如仅需使用大纲视图或进行对比时，则只需采用一种简单的定性方法即可（Smith 和 Kerrison，2013 年）。

当情况更复杂或需要估值时，可持续性概念模型能提供帮助。同时，可持续性概念模型可源于同一迭代系列。在初始设计阶段，将投入核心小组建设可持续性评估框架的初级版本。在该小组的授权下，将通过访问更多的利益相关者确定更广泛的服务和主要关联，并改进评估框架，也可以决定拒绝从额外利益相关者处获取更多信息。如需获得可靠和可行的估值结果，同样应当重视各方利益相关者对关联排名、估值方法和可用信息的评论。**图 16** 总结了阳光港滨江公园项目中进行的可持续性评估迭代。由构成“核心小组”的三个利益相关方进行初步讨论：评估小组（Bardos 和 Li）、土地信托（场地出租人和开发人员）和 Autism Together（场地经理）。如获得土地信托的许可，也可能包括

许多其他利益相关者（包括场地业主、用户组、社区团体、地方当局和行动小组）。这些初步讨论收集了用于框架和“英国可持续性修复论坛”初始定性评估的信息，并且更详细地评审了英国可持续性修复论坛“附件 1”指南，从而为识别个体关联提供了信息。在此之后，从会议参加者处收集对初始框架和评估的书面评论。

同时，评估小组将已确定的个体关联编制为可持续性的概念场地模型。这能细化使用相关电子表格模板的初始定性评估中的关联排名。总体规划预计将吸引更广泛的利益相关者参与。然而，有人认为让他们参与整个可持续性评估将产生繁重的工作。因此，计划根据可持续性关联的具体问题单独接触额外的利益相关者，其中核心小组认为他们的意见具有相当影响力，还能对验证现有评估和模式起到一定作用。如果项目时间不足，则不进行上述的更广泛参与和验证。

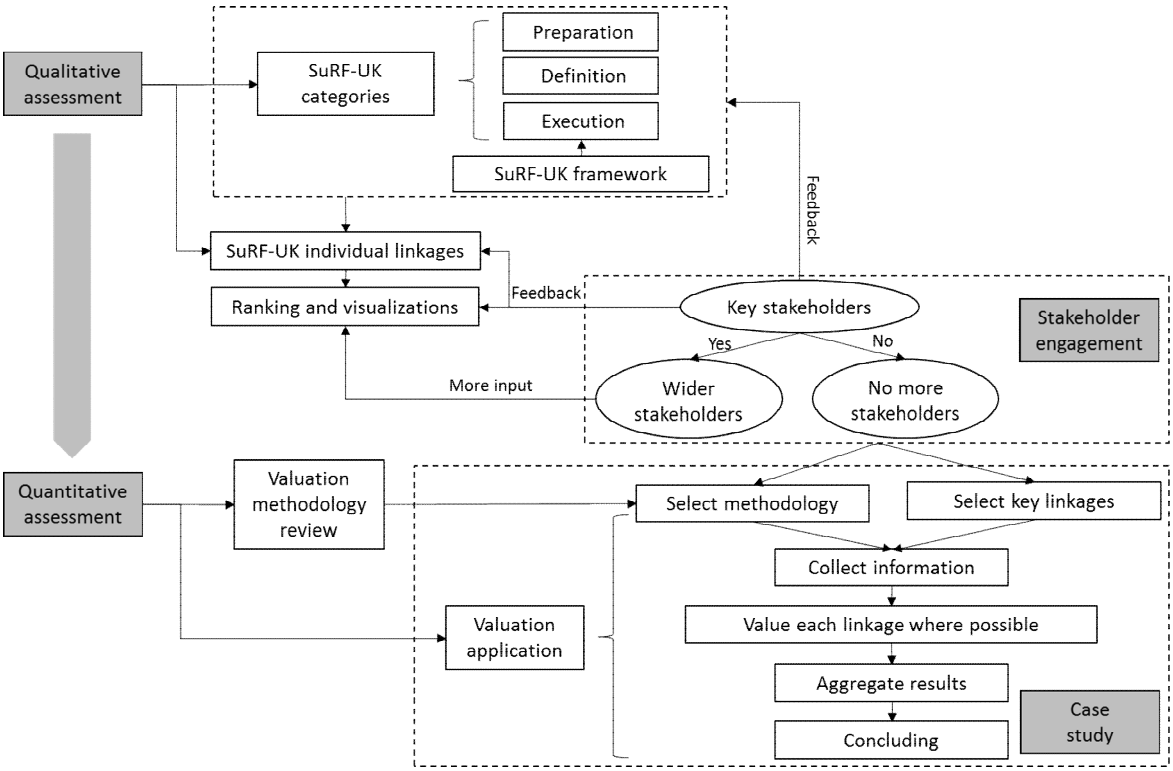


图 16：可持续性评估技术路线图示例[3]

[3] 来自 Li 和 Bardos 等人。（2016）用于软性再利用的棕地再生的可持续性概念场地模型：阳光港滨江公园（PSRP）案例研究。土地信托项目报告

可持续性评估和评价

作为阳光港滨江公园项目的一部分，在方法选择中具有重要影响的各类别所采取的估值方法也经过了详细评审，见**表 9**。其目的是提供完善、实用、可靠、全面和相对容易实现的估值方法。实用性的主要方面就是该方法对各种利益相关者的透明度。此外，因为对于某个类别实用的方法可能不适用于另一类别，所以这些评估标准考虑了英国可持续性修复论坛的不同标题类别（**表 8**）。通过这种方法，评审尽可能地将最佳估价方法“映射”至 15 种不同的英国可持续性修复论坛类别。该评审被许多熟悉棕地问题的欧洲成本效益评估专家发送给同行进行评审，以获得意见。他们的意见有效促进了审查的细化。此项评审基于完整的基本原理完成，并根据证据进行整体估值，所以具有良好的稳健性，该评审在假设和评估方面具有透明性，并且显然属于世界级估值方法。土地信托希望了解可持续性成果与公园投资的经济价值对比。如图所示，这包括在实施的评审中，使用最合适的估值技术分别估计概念场地模型中的所有可持续性关联的价值，然后汇合总价。关联估值会标记各自的不确定性，以及其归属的组类（见**图 19** 所示三组）。对阳光港滨江公园的研究是回顾性研究，回顾了在曾为垃圾填埋场的土地上开发的公园项目。虽然这能为建立和辩论方法提供良好基础，但不幸的是，随着时间的流逝，难以通过合理的时间和成本提供定性估值所需的完整信息。但该方法本身是完整的，并且适合在对比同一棕地修复项目的不同方法时预先进行方案鉴定。

表 9：用于评估估值方法的筛选标准

标准	原理
普及性	在当前的一系列研究中广泛使用或经讨论视为有前景的方法
实用性	因为应用相对简单，所以易于使用或通信，建议由经验丰富的专家使用
可靠性	普遍认为结果更好，并且不确定性较低
全面性	与其他标准相关，如果某一方法可以涵盖我们需要的所有利益，则能提高实用性并降低投入
低投入性	为实施估值而在可接受限度内所需的财务或时间成本，以及工作人员或其他资源投入。

5.5 PSRP 案例研究：Port Sunlight River 公园（英国威勒尔）

Port Sunlight River 公园（PSRP）位于英国西北部的威勒尔半岛，面积为 28 公顷。PSRP 从布朗巴勒港原先的垃圾填埋场转变为一个公共绿色开放空间，其中场地复用、公园创建和持续管理花费了 340 万英镑。土地信托在接管棕色地块并将其转换为公共绿地方面拥有丰富经验，对这块地获得了长达 99 年的地面租赁权。土地信托任命 Gillespies LLP 和 WSP 环境有限公司（WSPE）提供项目管理和景观恢复工程设计（WSPE、2012 年上半

年和 2012 年下半年）。Biffa 负责持续管理和监测现场附近的遮蔽、填埋气体和渗滤液处理厂。

公园于 2014 年开放，为游客提供了风景秀丽的海滨和各种各样的散步地带，而公园北部的一部分湿地以及相邻的默塞德河泥滩已经是大量水鸟的聚集地，是特别保护场所（**图 17**）。自公园开放以来，公园的日常管理工作由 Autism Together 负责。Autism Together 是一家专门的慈善机构，为自闭症人士提供服务。公园不仅为服务使用者提供了一个安全的避风港，通过日常维护任务来改善使用者的健康和福祉，而且它已成为对自闭症友好的胜地，因而对许多社会群体产生了积极的影响。

图 17：PSRP 视图和 PSRP 内的慢跑者（来自 http://thelandtrust.org.uk）

本项目的总体目标如下所示（土地信托 2015 年）：

a. 为健康、休闲和教育提供社区资源；
b. 可持续发展管理和提高公园的自然保护价值；
c. 将当地居民重新连到默西河；
d. 使公园安全，并提高公众访问率。

为了实现这些项目目标，下列四个主要项目服务支持 PSRP 项目的总体价值：

- **风险管理**：湿地区域减少洪水风险，促进水质管理。实施立法、指导和最佳实践所需的环境控制措施、健康及安全措施，以尽量减少施工期间对公园及周边地区的影响。
- **社区效益**：鼓励人们与他人见面并参与对人类健康和福祉特别有益的活动的机会。
- **绿色基础设施**：提供便利的高品质绿色开放空间，供人们使用便利设施、运动、休闲和娱乐设施。
- **生物多样性保护**：公园东部和北部与 SSI/SPA/Ramsar 地区（默西河口和湿地带）接壤，是多种稀有鸟类的重要栖息地。

可持续性评估和评价

基于英国可持续性修复论坛框架，PSRP 的可持续性评估分三个阶段进行，如**图 18** 所示。

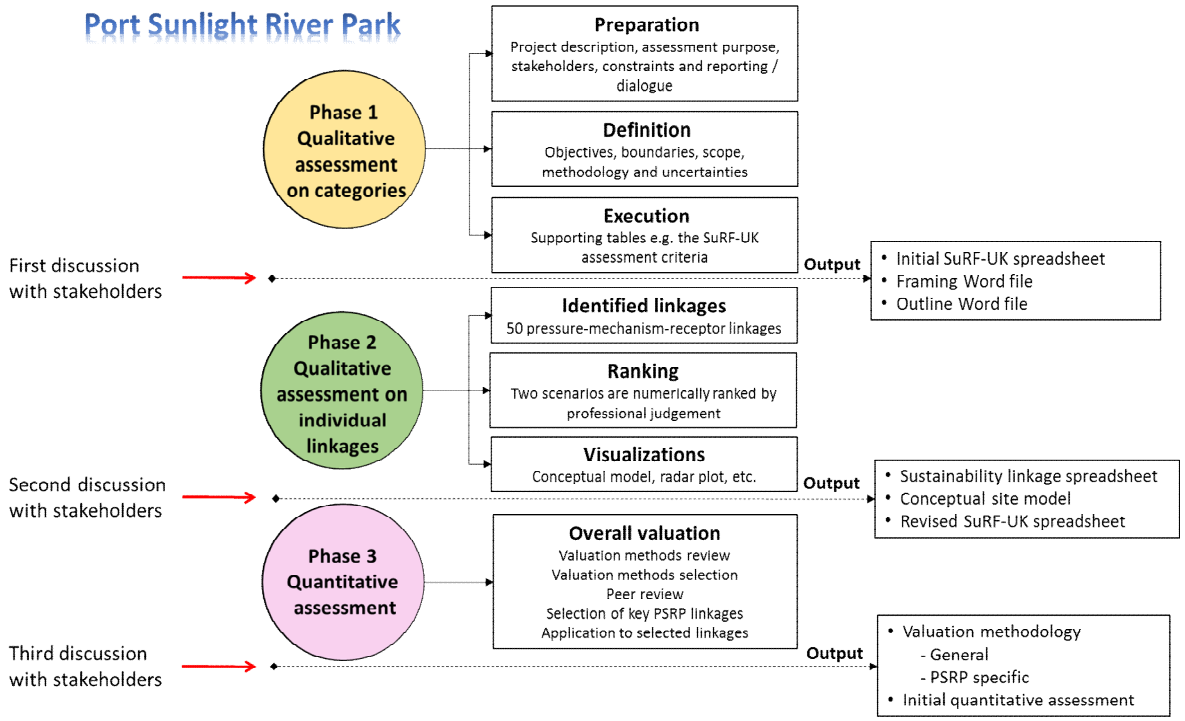


图 18：PSPR 的可持续性评估流程图

(1) **第一阶段——对类别的定性评估：**核心利益相关者通过面对面会议商定了每个步骤的可持续性评估框架的初步愿景以及每个步骤中包含的基本组成部分。并将讨论内容记录成相关文件。

(2) **第二阶段——对个体关联的定性评估：**需要更多的讨论来通过总体类别下的压力、机制和受体确定每个关联。然后，比较两种情景中的每个关联，进行排名并总计为总分，表明不同情景的相对更好或更差的表现。为了呈现更明确和更易理解的评估结果，以概念模型和雷达图的形式对量化的分数进行可视化，让感兴趣的受众可以更容易理解。还有更多的输出，如关联电子表格、概念网站模型和框架电子表格。

(3) **第三阶段——定量评估：**根据经济学家和棕地专家的意见，对环境、社会和经济效益货币化的评估方法进行了一般性审查和筛选。可以通过将所选估值技术应用于特定的单一关联来最终汇总 PSRP 项目提供的货币项目的综合效益。预期对估值方法和可持续性评估的最终报告。

可持续性评估和评价

第一阶段——类别的定性评估

根据英国可持续性修复论坛的指导和对主要利益相关者（土地信托和 Autism Together）的采访，通过三个主要过程（包括准备、定义和执行）使可持续性评估系统地进行。

- **准备工作**指关于可持续发展评估所需决定、项目内容、可能影响项目实施的机会和限制、项目参与人员以及评估结果报告和通信方式的描述。
- **定义**总结了第一阶段开展的筹备工作，并描述了可持续发展评估的目标、界限、范围、方法和不确定性。
- **执行**：当准备阶段和定义阶段已成功完成并达成一致时，可以实施执行阶段。这是通过生成和填写一些电子表格实施执行阶段，将确定的分配评估标准与每个补救选项进行比较。每个选项的具体信息为从相对较差到相对较好的排名提供了基础，然后可以根据排名结果来证明最佳选项。还应为每个选项记录评估的固有不确定性和与每个标准的评估相关的不确定性程度。使用基于个人关联的详细评估结果进一步更新关于类别评估的执行电子表格。

第二阶段——个人关联的定性评估

根据土地信托文件和利益相关者（布莱顿大学、，土地信托和 Autism Together）之间的网络会议、电子邮件和面对面访谈，确定了 15 个总体类别（**表 10**）下的 50 个可持续性关联，并提出“压力—机构—受体关联”（**图 19**）。**图 20、21 和 22 中**显示了将 PSRP 的创建与作为垃圾填埋场的现场持续管理的基线进行比较的雷达图。在每个图中，较低数字表示更好选项，即：在可持续性方面最有利。雷达图基于在评估各个可持续性关联的排名之后的详细平均类别排名。

表 10：考虑 15 个总体类别的概述

	重要类别	
环境	废气排放	1
	土壤和地面条件	2
	地下水和地表水	3
	生态	4
	自然资源和垃圾	5
经济	直接经济成本和效益	6
	间接经济成本和效益	7
	就业和就业资本	8
	诱发的经济成本和效益	9
	项目期限与灵活性	10
社会	人体健康和安全	11
	道德规范及公正	12
	居民区和地区	13
	社区与社区参与	14
	不确定性和证据	15

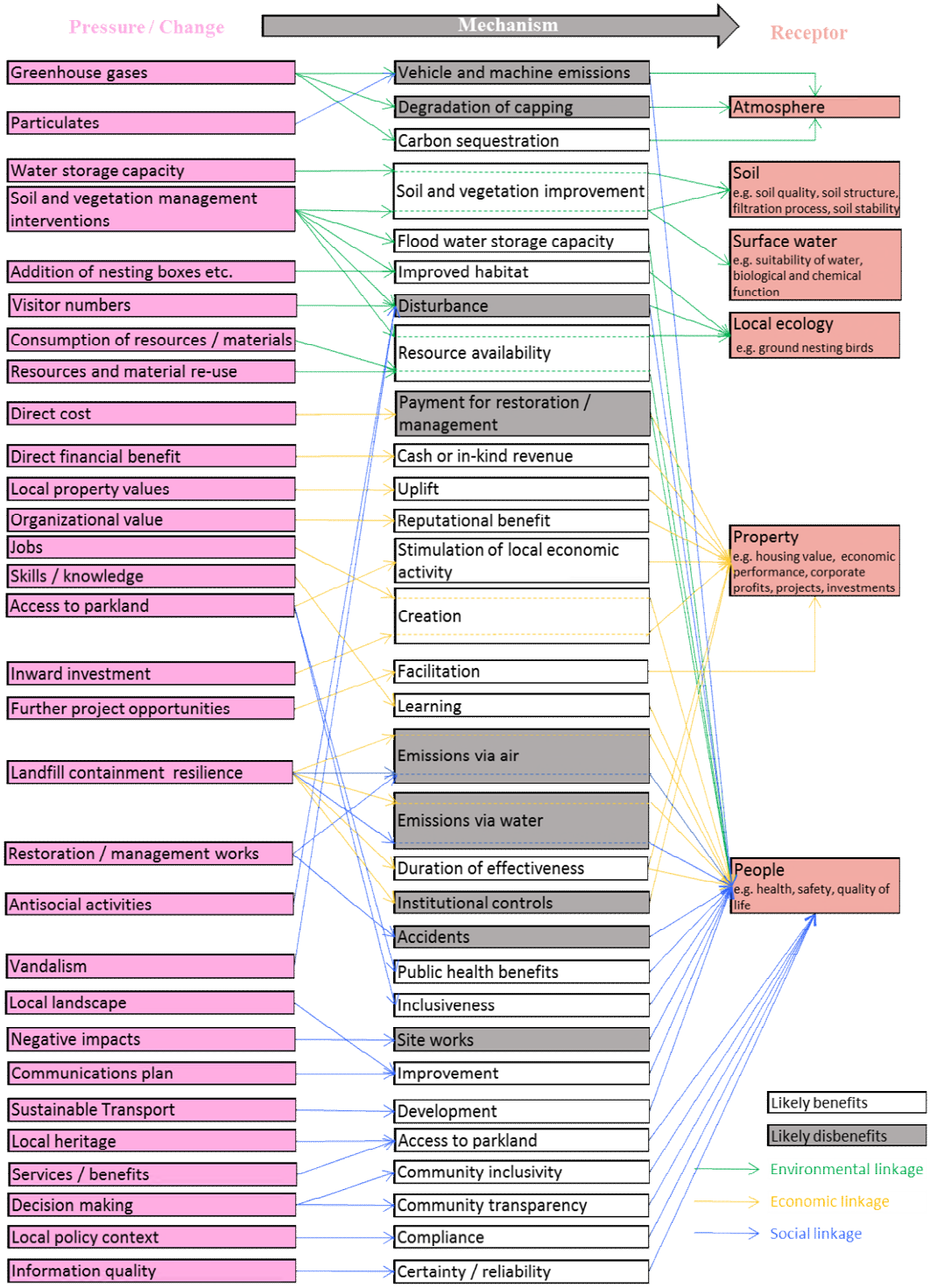


图 19：用于可持续性评估的压力—机制—受体关联

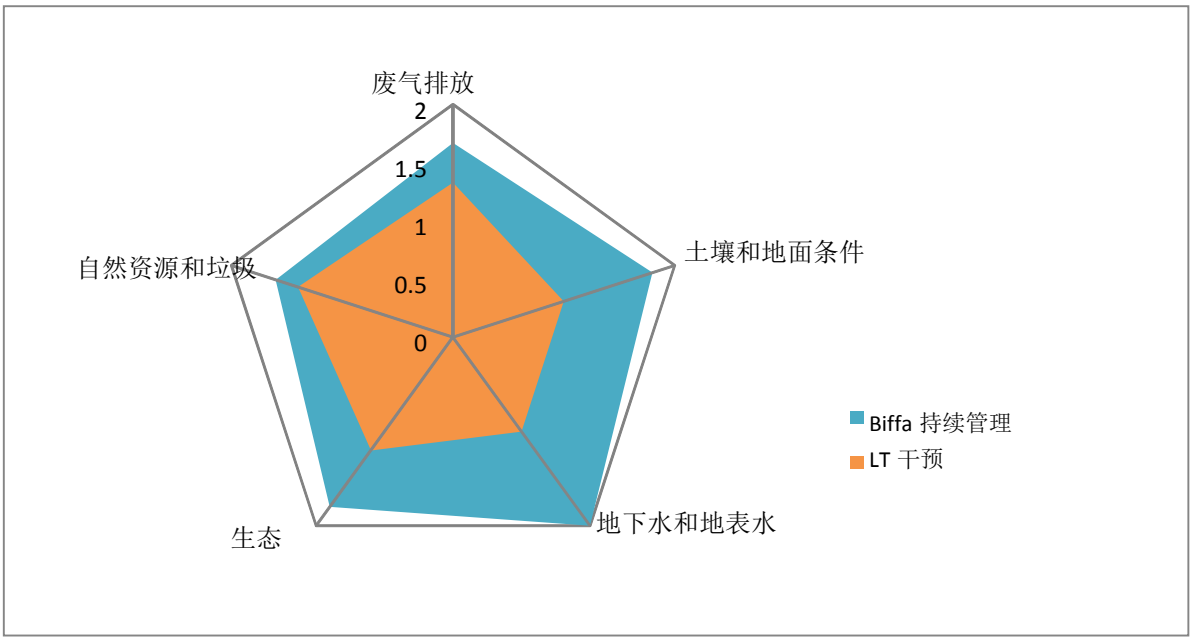


图 20：雷达图比较了 PSRP 的环境分级与基线，显示了所有类别的优异表现

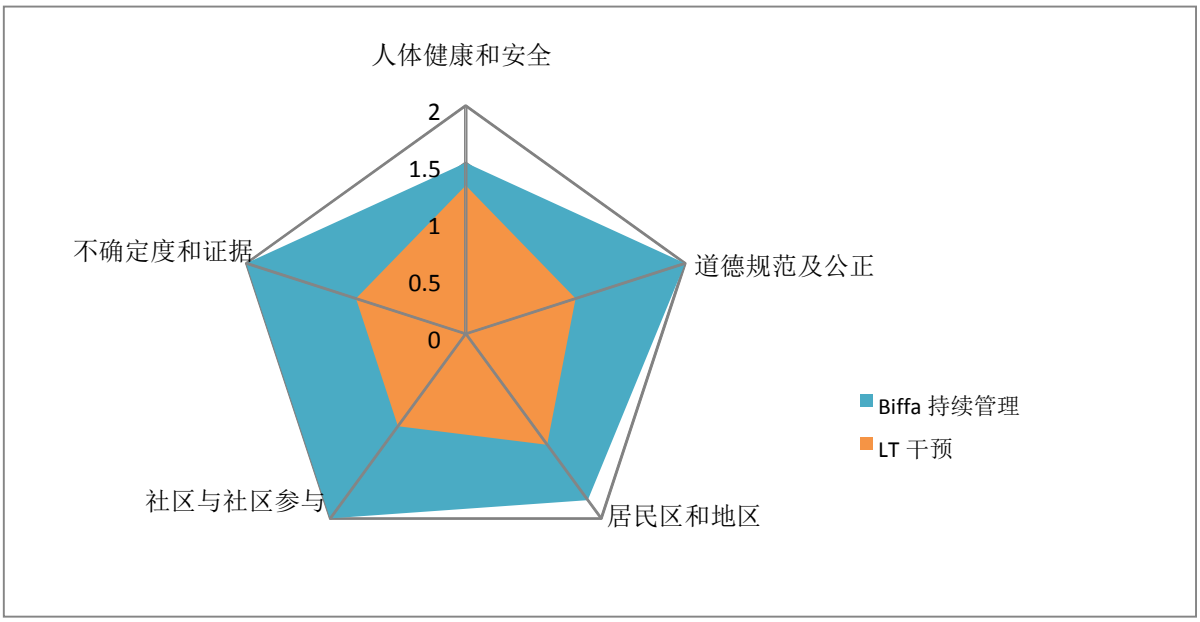


图 21：雷达图比较了 PSRP 的社会排名与基线，显示了所有类别的优异表现

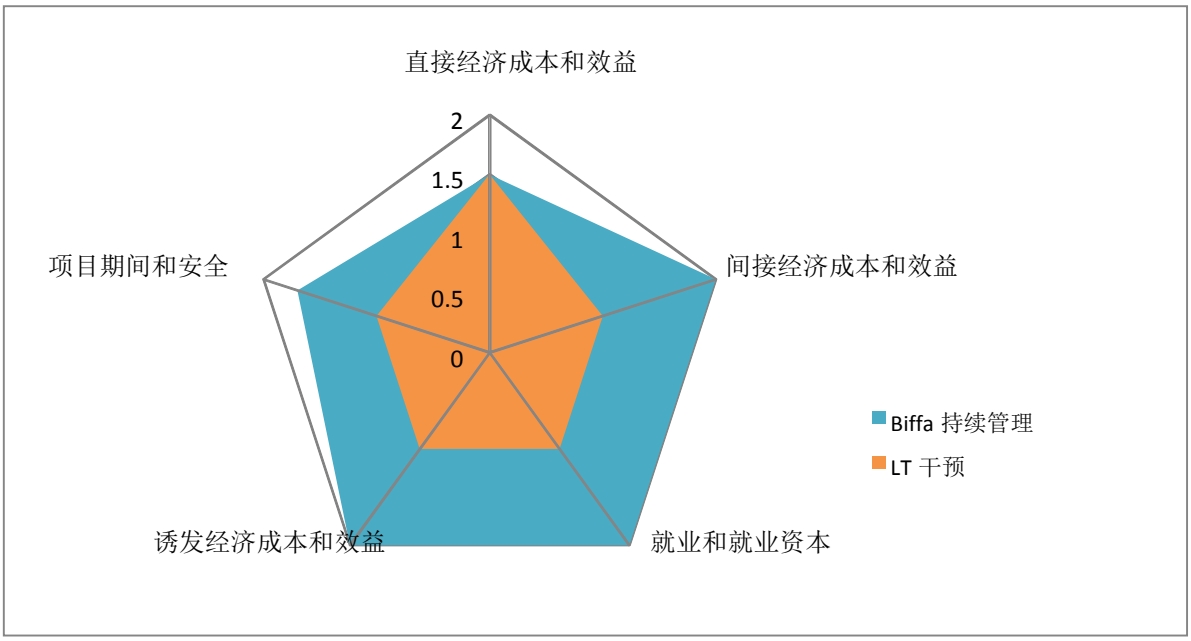


图 22：雷达图比较了 PSRP 的经济排名与基线，在五个类别中的四个类别中显示出明显优越的性能

第三阶段——个人关联的定量评估

表 11 审查并评估了五种估值技术和四种评估技术，以对表 15 中总结的 15 个经确定总体类别进行定量评估。

表 11：考虑估值和评估技术的概述

评估技术				
方法	**适用范围**	**变量/数据**	**优点**	**限制**
条件评估法（CV）采取措施前	通过诱发受访者的支付意愿（WTP）或接受意愿（WTA）来估计游憩效益，假设市场中的商品或服务	描述商品或服务（例如：如何提供商品或服务，付款方式和频率）、社会人口统计特征	广泛使用，几乎任何生态系统服务的使用和不使用价值，可能详细说明环境变化，即使变化尚未发生。	对假设情况的不准确和有偏见的反应，成本高，耗时
选择试验模型法（CE）采取措施前	通过根据受访者在假设市场中的折衷选择间接估算支付意愿，得出商品或服务的非市场价值	相关属性（例如：货币成本、服务、设施、旅行时间）、属性水平（基本、中等、较高）、社会人口特征	使用和非使用值，特别适合于政策决策，对定性排名或估计相对值的受访者易于使用	发展理论和有限的使用、认知困难、不确定性高、应用复杂和技术实验设计复杂

内涵定价法（HP） **采取措施后**	观察对周围物业价值的直接经济影响	房屋特征（平方英尺、建筑年份、批量、卧室等），舒适性特征（大小、设施、可达性等），社区特征（欧几里德距离、服务设施、交通状况等）和场地特征（污染、当前使用、环境评估等）	广泛使用，实际市场价格相对直接且无争议，房地产交易数据和特征数据随时可用	只使用价值，难以获得足够的利益变量，不可能捕捉到远离现场的人们的利益
旅行成本法（TC） **采取措施后**	通过调查受访者在实际选择中的支付意愿支付意愿或接受来衡量游憩效益	访问次数、旅行费用、社会人口特征	实际市场价格相对直接且无争议，相对便宜	仅使用价值，实践和理论问题，例如选择因变量、多用途或多目的地旅行以及访问成本
效益转移法（BT） **采取措施前或采取措施后**	将商品或服务价值从以前的原始研究转移到具有类似情况的兴趣场地	服务类型和数据要求取决于来源证据	节省成本和时间	转移错误不可避免、原始研究有限、有效性和可靠性低，对利益相关者的源价值的不一致
评价技术				
方法	**适用范围**	**变量/数据**	**优点**	**限制**
成本效益分析（CBA） **采取措施前或采取措施后**	货币价值、内外经济成果的净现值。	成本（劳动力、金钱、资源和其他投入）和效益（市场价格中的环境、社会和经济标准）	广泛使用，易于理解，在评估市场商品或服务的价值方面具有高确定性	受现有评价技术的限制，例如，一些环境项目不充分或其货币化不确定
社会投资回报（SROI） **采取措施后**	广泛地从实际经历变化的利益相关者的角度估计环境、社会和经济效益的价值	金钱、义务利用时间，各利益相关者群体中实际体验成果的相关者数量，对结果的财务代理服务，价值的减少（例如，自重、归因、流离失所）	国际认可和广泛应用，易于使用和理解，更加全面	比率结果不能比较、对财务代理服务不够严格和可信、难以识别影响或结果、成本高、耗时
自然资本账户法（NCA） **采取措施前或采取措施后**	评估环境资产提供的生态系统服务的价值以及维持这些效益所需的支出	环境资产类型、生态系统服务准备、成本、折现率和估值方法所需的具体数据	统计详细且全面，决策更好，广泛应用	受现有估值技术约束、技术应用复杂、存在多种不确定性、成本高、耗时
生态服务付费法（PES） **采取措施前**	通过买方和供应商之间的自愿交易为生态系统服务付费	生态系统服务的类型、买方/提供商/中介和数据需求取决于评估方法	完备、使用广泛	受现有评价技术约束，技术应用在整体上较复杂，耗时，实施过程复杂

- **将估值技术映射到英国可持续性修复论坛类别**

将估值技术映射到英国可持续性修复论坛类别，首先将服务/效益分为供应服务、调节服务、支持服务和文化服务，分别绘制成实心，然后以橙色、绿色、黄色和蓝色填充。然后，在五个环境、五个社会和五个经济方面（**图 23**），更广泛的服务/效益被映射到英国可持续性修复论坛类别（以虚线绘制），这有利于提供更加系统和明确的服务/效益。在第三阶段，根据不同估值方法的应用情况（以长点划线绘制），将估值技术和评估技术映射到用于不同服务估值的具体类别，包括生态系统服务、文化服务、任何服务和房产值。同时，根据表 6 中的筛选标准和表 7 中的一般总结来筛选方法，并使用符号①（高普及性），②（高实用性），③（高可靠性），④（高全面性）和⑤（低输入），这有助于决定使用哪一组方法来衡量哪一种益处。

根据量化服务和前面描述的五个标准，**图 23** 中的映射结果表明，建议结合旅行成本法（TC）或利益转移法（BT）支持的成本效益分析（CBA）作为全面更广泛利益估值的主要考虑因素。选择试验模型法（CE），其特征仅在于使用值和非使用值的高全面性。由于认知困难、不确定性大，应用复杂和技术实验设计，因此这种方法对于效益评价相对无效。社会投资回报法（SROI）或成本效益分析，具有相对较高的人气和全面性，可以系统地将棕地再生所带来的效益用于所有环境、社会和经济领域的软性再利用。然而，由于财务代理服务法的稳健性较低，因此社会投资回报法不如成本效益分析法。

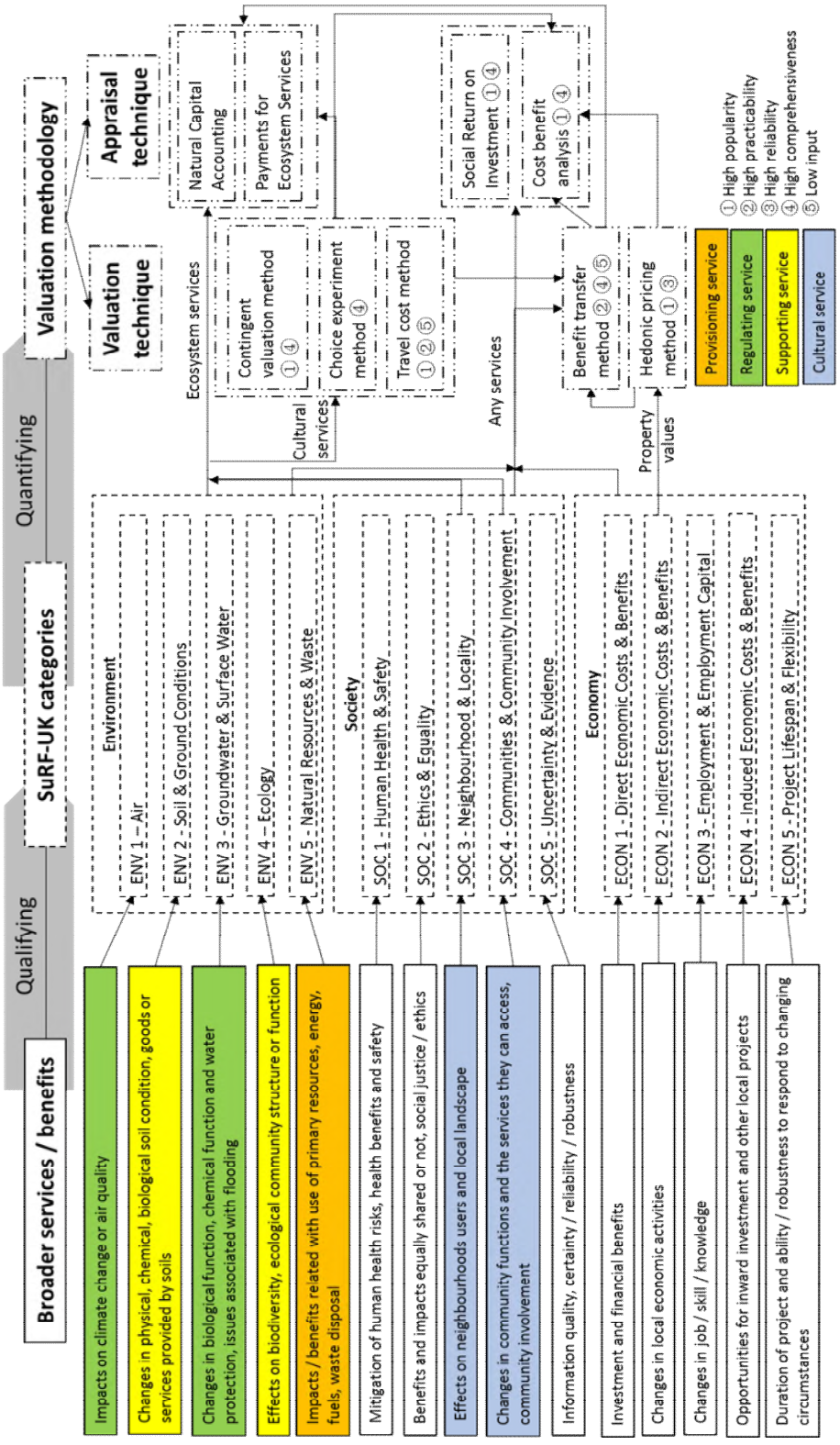


图 23：映射估值方法到英国可持续性修复论坛类别

可持续性评估和评价

- **•将定量技术应用于 PSRP 案例研究**

为了绘制个人可持续性关联以减轻估值难度，首先将所有关联分为直接财务相关性、经济上有形和经济上无形的相关性（**表 12**）。然后，根据**图 19** 中确定的个人关联，对**表 11** 中的估值方法的审查和**图 23** 中的规划结果，除了用于经济上无形的 27 个关联的考核方法外，为 23 个关联分配了基于最佳拟合的估值方法。

- **PSRP 案例研究限制**

虽然基于从文件和利益相关者访谈（主要是土地信托和 Autism Together）获得的详细信息描述了可持续性关联，但是对 PSRP 案例研究的方法应用存在以下三个主要限制：

1. 在概念场地模型中绘制的一些经济上无形关联很难估值，并被限定性方法所取代，这可能低估了整体估值。例如，“土壤和植被管理干预—扰动—本地生态”。
2. 对于与同一接受者的关联，没有足够的信息来证明每个关联带来的好处，这可能导致双重估值和高估。例如，土壤和植被管理干预和物流箱的增加均可以通过改善栖息地来影响当地生态。
3. 总体来说，即使所有必要证据均可用，但是 PSRP 计划的估值仍然是一项大规模工程。此外，由于“无干预”基准也是好推测，因此一些估值将是十分好推测的。这将限制其有用性。

表 12：服务和效益限制和量化

SuRF 参考	评估类别	相关性	个别可能连接	方法	定量特征	信息		需要工作的可行性
						我们需要的	我们拥有的	
ENV 1	废气排放	经济上无形	A. 气候变化——温室气体	重置成本法（RC）	• 不同植被的二氧化碳储存量 • 碳值	可从网站、文献等获得的数据		**低**
					• 植被类型和面积	现场调查出发点：预估无干预		
ENV 2	土壤和地面条件	经济上无形	D. 土壤侵蚀和土壤稳定性（包括引流）变化		• 土壤侵蚀防止成本	可从网站、文献等获得的数据		**低**
					• 每年土壤流失取决于降雨侵蚀性、土壤可蚀性、地形因素和植被管理因素	现场调查出发点：预估无干预		
		经济上无形	A/B/C/E	多准则分析法（MCA）	• 土壤质量、结构、滤水和岩土性质的变化程度	以评分的形式收集利益相关者的意见		**低**
ENV 3	地下水和地表水	经济上无形	A/C/E/G（水源保护）	影子定价法（SP）	• 平均降雨量 • 平均蒸发量 • 建造可用于水源保护的人工湖（例如水库）的费用	可从网站、文献等获得的数据		**低**
					• 植被面积	现场调查出发点：预估无干预		
ENV 4	生态	经济上无形	A. 植物群、动物群和食物链的影响	旅行成本法（TC）	• 社会人口学（性别、年龄、收入和教育） • 每个区域的访问次数和总人口 • 旅行费用（交通、住宿、机票、纪念品、	访问者对“度量”列的回答		**相对较高**

SuRF 参考	评估类别	相关性	个别可能连接	方法	定量特征	信息		需要工作的可行性
						我们需要的	我们拥有的	
					食品、旅行时间） • 关于生物多样性保护的支付意愿			
		经济上无形	B/C/D	多准则分析法（MCA）	• 生态群落结构的变化程度，对生态系统建设和影响或保护动物群的设备的的干扰	以评分的形式收集利益相关者的意见		低
ENV 5	自然资源和垃圾	经济上有形	A. 土地和废物资源的影响/效益	多准则分析法（MCA）	• 利用土地为当地社区和野生动物修建一个公园的福利水平	以评分的形式收集利益相关者的意见		相对较高
		经济上有形	B. 使用主要资源以及级替代项目内部或外部的主要资源	成本效益分析（CBA）	• 在园区修建期间消耗的主要资源的类型、数量和市场价格	关于 PSRP 恢复工作的报告，可以从 WSP/Gillespie 获得		低
		经济上有形	C. 在考虑能源/燃料类型/来源以及项目产生可再生能源的可能性的情况下使用能源/燃料		• 在园区修建期间消耗的主能源或燃料的类型、数量和市场价格	关于 PSRP 恢复工作的报告，可以从 WSP/Gillespie 获得		低
		经济上有形	D. 处理现场和场外材料以及处置废物造成的影响/效益		• 园区修建期间回收的材料的类型和数量 • 废物处置费用	关于 PSRP 恢复工作的报告，可以从 WSP/Gillespie 获得		低
ECON 1	直接经济成本和效益	直接财务相关性	A. 组织的修复/管理的直接财务成本和效益	成本效益分析（CBA）	• 公园修建和长期管理付款		LT 报告了 340 万英镑	相对较高
					• 以现金或非现金表示的直接财务效益	可从 LT 报告中获得财务效益数据		
ECON 2	间接经济成本和效益	经济上有形	C. 场地/当地土地/房产值变化	内涵定价法（HP）	• 标准户型和交易 • 影响范围	林业委员会 DLV 工作		低

可持续性评估和评价

SuRF 参考	评估类别	相关性	个别可能连接	方法	定量特征	信息		需要工作的可行性
						我们需要的	我们拥有的	
					• 当地房产市场 • 其他可能影响该区域房产值的因素			
		经济上无形	E/F	多准则分析法（MCA）	• 对企业声誉和区域经济表现的影响程度	以评分的形式收集利益相关者的意见		低
ECON 3FP	就业和就业资本	经济上有形	A. 创造工作	社会投资回报（SROI）/财务代理服务法（FP）	• 获得工作的人数，人员包括志愿者和有偿就业人员	可从 LT 获得数据		相对较高
		经济上无形	C. 措施前后的技能水平		• 通过参与公园维护工作而提升技能的人数	受访者的回答，用于学习园艺或环境技能的课程费用		相对较高
		经济上无形	D. 教育及培训机会		• 学习了野生动物和自然的人数	室外教育费用	20.6%来自“PSRP社会价值调查数据”电子表格	相对较高
					• 学习新操作技巧的人数	用于学习园艺或环境技能的课程费用	有31.9%的受访者学习了新的技能，但是我们不了解他们学习了何种技能	相对较高
		经济上无形	E. 创新和新技能		• 学习新技能的人数	学习新技能（例如循环）的课程费用		
ECON 4	诱发的经济成本和效益	经济上有形	A. 创造对内投资机会	成本效益分析（CBA）	• 公园为 SUSTRANS, AT. 等其他慈善团创造的机会	公园为各慈善团体创造的净收入		低
		经济上有形	B. 使用筹资计划，影响该地区其他项目/以及客户提高经济价值的能		• 其他帮助项目	这些其他项目创造的经济效益		低

可持续性评估和评价

SuRF 参考	评估类别	相关性	个别可能连接	方法	定量特征	信息		需要工作的可行性
						我们需要的	我们拥有的	
			力					
ECON 5	项目期限与灵活性	经济上无形	A. 风险管理效益期限		• 复原费用 • 限制故障风险	收集利益相关者的意见		低
		经济上无形	C/E/F/G	多准则分析法（MCA）	• 处理不断变化的情况、气候变化影响和变更的经济环境的解决方案以及持续制度控制的稳健水平	以评分的形式收集利益相关者的意见		低
SOC 1	人体健康和安全	经济上无形	A/B/C	多准则分析法（MCA）	• 施工和公园使用对工人、游客和邻居造成的风险水平	以评分的形式收集利益相关者的意见		低
		经济上无形	D. 人体健康效益	财务代理服务法（FP）	• 报告称公园可以帮助自己保持健康的人数	GP 询问费用	SOC 1-D 和 SOC 3-B/C 是已知的，但是其可靠性低，因为没有证据表明代理与公园使用的水平有关，而这些使用水平又不能经受住详细的审查	中等至相对较高
SOC 2	道德规范及公正	经济上无形	A. 社会公正和/或平等问题		• 参与 PSRP 活动的自闭症患者人数	对自闭症患者提供社会和其他照看产生的费用		中等至相对较高
SOC 3	居民区和地区	经济上无形	B. 当地社区对场地用途变化造成的更广泛影响		• 报告称公园有助于减少犯罪和反社会行为的人数	处理反社会行为事件产生的费用		中等至相对较高
		经济上无形	C. 建筑环境的变化，建筑保护、考古资源的保护		• 该区域类似私人休闲区的参观成本	参观人员的回答，及其对进入公园的支付意愿		中等至相对较高
		经济上无形	A/D	多准则分析法（MCA）	• 当地不利之处（来自交通/停车等）和福利（来自可持续交通运输的发展）水平	以评分的形式收集利益相关者的意见		相对较高
SOC 4	社区与社区参与	经济上无形	A. 社区发挥功能的方式及社区可使	财务代理服务法（FP）	• 报告称公园有助于聚集社区的人数	平均社交费用	84%的人员回答	相对较高

可持续性评估和评价

SuRF 参考	评估类别	相关性	个别可能连接	方法	定量特征	信息		需要工作的可行性
						我们需要的	我们拥有的	
			用服务的的变化					
		经济上无形	B/C/D/E/F	多准则分析法（MCA）	• 通信计划的质量水平，项目对当地文化和活力的影响，社区参与决策并遵守当地政策目标	以评分的形式收集利益相关者的意见		**相对较高**
SOC 5	不确定性和证据	经济上无形	A. 可持续性评估的可靠性	多准则分析法（MCA）	• 信息针对这两种情况的不确定性	以评分的形式收集利益相关者的意见		**相对较高**

6 结束语及建议

全球可持续修复的兴起和扩散说明了通过创新和协作重新思考现状，并促进共享环境和文化目标的力量。因此，本报告旨在影响中国“污染土地可持续修复”的政策，并为英国创造商业机会奠定基础。该领域在中国的重要性日益增长，同时，这些政策正在寻求国际专业知识。

该报告改编自英国可持续性修复论坛（www.claire.co.uk/surfuk）和国际可持续性修复论坛的项目，并吸收了 SPF 15SU32 技术和科学专家的意见。英国可持续性修复论坛框架为理解修复过程的可持续性和选择最佳方法提供了人们广泛认可的依据。在这个项目中，与哥伦比亚“关于恢复受汞污染的采矿土地用于可再生能源的战略和其他可持续再利用战略”项目相结合，本报告提供了使用特定可持续性关联开发的明确场地概念模型，以及如何评估这些可持续性关联的新指导，例如作为投资评估的一部分，比较资金和更广泛可持续性效益的概念经济评估。

用于量化这些效益的方法具有多种概念和实施，并且由于多种因素，例如一系列服务的非市场价值、成本和时间限制，不可用数据和利益相关者之间的冲突，在实施这些方法时存在重大挑战。因此，需要清晰的结构和可靠的评估工具来整合这些多样化信息，以支持可持续修复的决定和对社会有限资源的合理优先排序。还要求参与棕地修复和重建的利益相关者愿意接受对现场修复的整体观点。可持续性修复方面的主要挑战在于利益相关者（包括问题持有者、监管者、科学家、顾问、学者和公众）之间的知识转移。可以通过实际应用并易于获得经验和展示真实世界示例的棕地机会矩阵（BOM）等方法来促进和共享知识转移。

棕地机会矩阵提供了简单的筛选工具，允许：(1)对所需服务和干预做出结构化和透明的决策；(2)确定干预措施和服务之间是否存在强有力的协同作用，以及相对罕见的拮抗作用。无论特定干预如何提供服务，此交互仍然会创造增值机会。矩阵描述了每个机会可能产生价值的种类；(3)将定量和定性信息纳入综合可持续性评估的手段；(4)整合修复行动的成本效益分析，考虑对人类健康的影响和提供生态系统服务等外部因素；(5)补救替代方案的积极和消极影响的概述；(6)用于显示和调查相关利益相关者之间不同观点和偏好的影响和敏感性的结构。因此，矩阵可以用于绘制可能通过棕色地块重建项目实现机会的预期范围和项目随后的价值来源。

已通过 Excel 电子表格实现棕地机会矩阵，这有助于实际应用，可以在 CNUK 网站 http://cnukcontaminatedland.com/cn/下载。然而，与任何决策支持工具一样，棕地机会矩阵根据选择的边界条件和使用的输入产生结果。因此，棕地机会矩

结束语及建议

阵工具使用人员不应将棕地机会矩阵用作黑箱模型，而是必须熟悉该方法的概念和边界条件。

报告还通过一系列详细案例研究提供了有用的背景，分析了在考虑可再生能源选择和碳管理情况下可持续修复的优势、问题和挑战以及激励措施。案例研究用于说明如何将可持续治理与城市规划和公共领域设计相结合。公共领域设计支持开发用于土地管理、可持续修复和社区企业的低投入战略，战略用于棕地和边缘土地再利用。

最后，该项目与哥伦比亚项目“关于恢复受汞污染的可再生能源用采矿土地的战略和其他可持续再利用战略”之间的强有力协同使对棕地和边缘土地再利用采取了强有力的跨国方法，并为今后能够更加协调一致地开展合作创造了机会。

7 参考文献

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D. Vithanage, M., Lee, S. S. & Ok, Y. S. （2014 年）“生物炭用作管理土壤和水中污染物的吸附剂：综述”.《Chemosphere》99: 19-33.

Andersson-Sköld, Y., Bardos, R.P., Chalot, M., Bert V., Crutu, G., Phanthavongsa, P., Delplanque, M., Track, T., & Cundy, A.B. （2014 年）“开发和验证用于选择边际土地上生物质的实用决策支持工具（DST）”.《环境管理杂志》. 145: 113–121.

Banks, D （2012 年） 作为环境热源或污水坑的矿井水。英国 Markham 方案相关说明. http://www.gshp.org.uk/London/7_BanksGeothermalMinewater.pdf [2016 年 12 月刊登].

Bardos, R.P., Andersson-Sköld, A., Keuning, S., Polland, M., Suer, P. & Track, T. （2010 年） “基于农作物的系统根据可持续风险管理经济边缘退化土地”.《最终研究报告》.（振兴项目）《欧洲委员会第六框架计划项目 SNOWMAN（合同编号 ERAC-CT-2003-003219）报告》. www.snowman-era.net/pages/science.html [2016 年 12 月刊登].

Bardos, R.P., Bone, B.D., Boyle, R., Evans, F., Harries, N., Howard, T. and Smith, J.W.N. （2016 年上半年）“可持续性评估简单法与污染土地做法管理基本原理”. 《整体环境科学》563-564: 755-768.

Bardos, P., Jones, S., Stephenson, I., Menger, P., Beumer, V., Neonato, F., Maring, L., Ferber, U., Track, T.和 Wendler, K. （2016 年下半年）“棕色地块场地软性再利用价值优化”.《整体环境科学》. 563-564: 769-782.

Bardos R.P., Cundy A.B., Smith J.W.N., & Harries N. (2016c) “可持续整治特殊出版物”.《环境管理杂志》 184: 1-142.

Beumer, V., Bardos, P, Menger, P.等人（2014 年） “软性应用决策支持系统”. HOMBRE 项目交付物 D5.2. www.zerobrownfields.eu

Cappuyns V, 2016 年.“将社会指标纳入决策支持工具中，用于选择可持续场地修复”.《环境管理杂志》. 184: 45-56.

CL:AIRE （2010 年）“土壤与地下水修复可持续性评估框架”.2010 年 3 月, CL:AIRE, 英国伦敦.ISBN 978-1-905046-19-5 www.claire.co.uk/surfuk [2016 年 12 月刊登].

CL:AIRE （2011 年）“英国可持续性修复论坛可持续性修复评估指标（附录 1）”, CL:AIRE，英国伦敦. ISBN 978-1-905046-1292-5 www.claire.co.uk/surfuk [2016 年 12 月刊登].

CL:AIRE（2014 年上半年）“英国可持续性修复论坛公告 4”, 2014 年 3 月, CL:AIRE，英国伦敦. www.claire.co.uk/surfuk [2016 年 12 月刊登].

参考文献

CL:AIRE（2014 年下半年）.“土地污染管理可持续性管理做法”, 2014 年 3 月, CL:AIRE, 英国伦敦. www.claire.co.uk/surfuk [2016 年 12 月刊登].

Coulon, F., Bardos, R.P., Harries, N., Canning, K., Chen, M., Hu, Q., Jones, K., Li, F., Li, H., Gomes, D., Liu, M., Liu, R., & Yang X. （2016 年）“中国土地污染和棕地管理政策开发：学习英国经验”.《中英合作伙伴关于污染土地管理的报告》2016 年 3 月. 70 pp http://cnukcontaminatedland.com/uk/downloads [2016 年 12 月刊登].

Cotton, C., Barton, C., Lhotka, J., Angel P.N., & Graves D. （2012 年） “评估肯塔基东部地表矿山的造林成功率”Haase D.L., Pinto J.R., Riley L.E., 技术协调员. 国家院刊：森林和保护苗圃协会 2011. Fort Collins (CO): USDA 林务局，落基山研究站.院刊 RMRS-P-68. 16-23. http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p068/rmrs_p068_016_023.pdf [2016 年 12 月刊登].

Cundy, A. B., Hopkinson, L., & Whitby, R. L. （2008 年） “在污染土地和地下水修复中使用铁基技术：综述”.《整体环境科学》. 400: 42-51.

Cundy, A., Bardos, P., Puschenreiter, M., Witters, N., Mench, M., Bert, V., Friesl-Hanl, W., Muller, I., Weyens N., 和 Vangronsveld J. （2015 年）“轻度修复方案应用有效决策支持：绿地项目”.《修复杂志》25: 101-114.

Cundy, A.B., Bardos, R.P., Puschenreiter, M., Mench, M., Bert V., Friesl-Hanl, W., Müller, I, Li, X.N., Weyens, N., Witters, N. & Vangronsveld J. （2016 年） “棕地到绿地：从实用污染植物管理战略中实现更广泛效益”.《环境管理杂志》184: 67-77. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716301190

Cundy A.B, Bardos R.P, Church A., Puschenreiter, M., Friesl-Hanl M, Müller I., Neu S., Mench M., Witters N., & Vangronsveld J. （2013 年）“制定可持续性和利益相关者参与原则”.《环境管理杂志》129: 283-291.

英国环境、食品与农村事务部（2009 年）《施工场地土壤可持续利用的施工行业准则》 https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69308/pb13298-code-of-practice-090910.pdf [2016 年 12 月刊登].

英国环境、食品与农村事务部 （2011 年）《环境风险评估和管理指南》. https://www.gov.uk/government/publications/guidelines-for-environmental-risk-assessment-and-management-green-leaves-iii [2016 年 12 月刊登].

De Sousa, C. & Spiess, T., 2013 年“美国马萨诸塞州布罗克顿市布罗克顿 Brightfield：棕地可持续修复最佳实践”. 可在 http://brownfields.org.uic.edu/research-results/documents/BrocktonBrightfield-finalforposting-May102013.pdf [2016 年 12 月刊登]上查看.

参考文献

环境署和环境、食品与农村事务部 （2004 年）“土地污染管理模型程序”.《环境署研发报告 CLR11》.英国布里斯托环境署. www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/297401/scho0804bibr-e-e.pdf [2016 年 12 月刊登].

法国 CJ, Dickinson NM & Putwain PD （2006 年）“污染棕地的木质生物质植物修复”,《环境污染》,141 （2006 年）387-395. http://www.merseyforest.org.uk/files/documents/1193/French,+Christopher+et+al+-+Woody+Biomass+Phytoremediation+of+Contaminated+Brownfield+Land.pdf [2016 年 12 月刊登].

Green, I.D., Boughey, K., &Diaz, A. (2014 年) “历史垃圾填埋场中的潜在有毒金属：对放牧动物的影响”《水、空气和土壤污染》. 225: 2110-2122.

国际标准化组织 – ISO (2016) ISO/DIS 18504 “土壤质量—可持续性修复指南” http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=62688 [2016 年 12 月刊登].

美国洲际科技及法规委员会（ITRC）(2009 年）“植物技术和管理指导和决策树”，已修订. 植物报告, 2009 年 2 月 3 日，美国华盛顿美国洲际科技及法规委员会.http://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=64 [2016 年 12 月刊登].

Jensen, B.B., 2010 年. “棕地向绿色能源：利用大规模可再生能源设施重新开发受污染土地”.麻省理工学院. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/59747 [2016 年 12 月刊登].

Jones S., Bardos P., Kidd P.S., Mench M., de Leij F.; Hutchings T., Cundy A., Joyce C., Soja G., Friesl-Hanl W., Herzig R., & Menger P. （2016 年）“生物炭和堆肥增强铜固定和支持植物在污染土壤中的生长”.《环境管理杂志》. 171: 101-112.

Kabari, S., Coulon, F., & Prpich G. (2016 年). “努力为尼日利亚制定一个综合土地污染管理框架”.《整体环境科学》 571: 916 – 925.

Kumpiene, J., Lagerkvist, A., & Maurice, C. （2008 年）“使用堆肥稳定土壤中的 As、Cr、Cu、Pb 和 Zn—综述”.《废物管理》. 28: 215-225.

Leggo, P. J. (2013 年). “使用生物化肥提高植物在煤渣上的生长”.《国际环境与资源杂志》. 2: 59-66.

Lehmann, J.和 Joseph, S. (Eds.) （2009 年）“环境管理用生物炭：科学和技术”. 英国伦敦 Earthscan 出版社. http://www.routledge.com/books/details/9781844076581

Licht, L.A.和 Isebrands J.G. （2005 年）“将植物修复污染物去除与生物质经济机会联系起来”.《生物质与生物能源》. 28: 203 – 218.

Lord, R., Green, R., Oyekanmi, E., Atkinson, J., Parry, C., & Bridgewood, K. （2010 年）“绿化棕地用绿色废物：使用堆肥在以前开发的土地上种植能源作物”.在英

国土地复垦国际学术会议上陈述. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=BIOREGEN_Green_Waste.pdf [2016 年 12 月刊登]..

Mok, H., Williamson, V.G., Grove, J.R., Burry, K., Barker, F.S., & Hamilton, A.J. （2014 年）“永远的草莓地？发达国家的城市农业：综述”《可持续发展农艺学》. 34: 21-43.

Nason, M., Williamson, J., Tandy, S., Christou, M., Jones, D. & Healey, J. （2007 年）. “使用有机废物和堆肥来修复和恢复土地：最佳实践手册。”班戈大学环境和自然资源学院. ISBN: 978-1-84220-101-5. http://ies.bangor.ac.uk/TWIRLS/Web%20version%20Manual.pdf [2016 年 12 月刊登]..

Nathanail, C.P., & Bardos, R.P. （2004 年）“污染土地的复垦”《Wiley and Sons》. ISBN 978-0-471-98561-7, 256 页 http://www.wileyeurope.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471985619.html

Nathanail, J., Bardos, R.P., & Nathanail, P. （2007 年）“污染土地管理现成参考”. 更新 EPP 出版物/土地治理出版社.ISBN 1900995069. www.readyreference.co.uk [2016 年 12 月刊登].

Nathanail, C.P., Bardos, R.P., Gillett, A., McCaffrey, C., Ogden, R., Scott, D.,等人. （2013 年）. “国际污染土地识别和修复过程”.《英国伦敦环境、食品与农村事务部报告》. SP1004 SID 5. http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu&Module=More&Location=None&Completed=0&ProjectID=16289 [2016 年 12 月刊登].

Nwachukwu, O.I., & Pulford, I.D. (2008 年) “所选吸附剂材料作为修复铅、铜和锌污染土壤的潜在修复物的比较效果”.《土壤利用与管理》. 24: 199-207.

Park, J. H., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N., & Chung, J. W. (2011 年). “有机修复对增强重金属（土）污染土壤生物修复的作用”.《危险物质杂志》. 185: 549-574.

Ribeiro, L.A., 2006 年. “必须这么复杂吗？马萨诸塞的市政可再生能源项目。”麻省理工学院. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/37677 [2016 年 12 月刊登].

Rizzo, E., Bardos, P., Pizzol, L., Critto, A., Giubilato, E., Marcomini, A., Albano, C., Darmendrail, D., Döberl, G., Harclerode, M., Harries, N., Nathanail, P., Pachon, C., Rodriguez, A., Slenders, H., Smith, G.（2016 年） “比较可持续修复的国际方法”.《环境管理杂志》. 184: 4-17.

Rosen, L., Back, P-E., Söderqvist T., Norman J., Brinkhoff, P., Norberg T., Volchko, Y., Norin, M., Bergknut, M., Döbert, G.（2015 年）“评分：一种新的多标准决策分析方法，用于评估污染土地修复的可持续性”.《整体环境杂志》. 511: 621-638.

参考文献

Shi, W. Y., Shao, H. B., Li, H., Shao, M. A., & Du, S. (2009 年）“通过天然沸石修复有害重金属污染土壤的进展”. 《危险物质杂志》. 170: 1-6.

Smith, W.N., Kerrison, G.（2013 年）“用于分层式可持续修复评估的决策支持工具的基准”. 《水、空气及土壤污染》. 224: 1706-1717.

土地信托（2015 年) http://thelandtrust.org.uk/space/port-sunlight-river-park/

英国能源研究中心（2014 年）“低碳工作：有关能源效率和可再生能源的政策支持实现就业净增长的证据” - http://www.ukerc.ac.uk/publications/low-carbon-jobs-the-evidence-for-net-job-creation-from-policy-support-for-energy-efficiency-and-renewable-energy.html [2017 年 1 月刊登].

美国国家环境保护局（US EPA）(1999 年）美国国家环境保护局. “金属污染表面土壤的植物技术”. 《科技趋势》, 8 月发布号：34, EPA 542-N-99-005.

美国国家环境保护局（2011 年） “棕地和城市农业，安全园艺实践的临时指南” EPA 560/S-11/001 https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/bf_urban_ag.pdf [2016 年 12 月刊登].

美国国家环境保护局（2011 年） “布罗克顿 Brightfield：创新型绿色电源”。《废物和应急响应办公室（OSWER）创新试点成果概况》 http://www.redevelopmentinitiatives.org/search/index/pag/5?search_item=brownfields [2016 年 12 月刊登].

美国国家环境保护局（2012 年） “风电设备的发展有助于振兴锈带城市”“成功案例 — 在污染土地上选址可再生能源”. 可在 https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/success_steelwinds_ny.pdf [2016 年 12 月刊登]上查看.

美国国家环境保护局（2012 年）“通过再造林实现碳封存”美国国家环境保护局.超级基金整治及技术创新管理处（OSRTI） https://www3.epa.gov/climatechange/wycd/waste/downloads/forest-carbon-storage10-28-10.pdf [2016 年 12 月刊登].

Vegter, J., Lowe J., & Kasamas, H. (Eds).（2002 年）. “污染土地的可持续管理：综述”.报告. 奥地利联邦环境处代表 CLARINET, Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien, 奥地利. www.commonforum.eu/publications_clarinet.asp

Willoughby, I., Stokes, V., Poole, J., White, J.E. J., & Hodge, S.J. （2007 年）“在英国低地一系列差别地点种植 44 种造林用本地和非本地树种的潜力”. 《林业》 80: 531-553.

WRAP（2012 年）“关于在表土制造中使用 BSI PAS 100 堆肥的指南”《英国班伯里 WRAP 技术报告》 www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/TD%20soil%20manufacture%20Final.pdf [2016 年 12 月刊登].

https://dspace.org/

Promoting Sino-UK Collaboration on Developing Low Carbon and Sustainable Methodologies for Brownfields and Marginal Land Re-use in China

Coulon, Frederic; Campo Moreno, Pablo; Jiang, Ying; Longhurst, Philip J.; Bardos, Paul ...

2017-01

https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/19486

Coulon, F. et al. (2023) Promoting Sino-UK Collaboration on Developing Low Carbon and Sustainable Methodologies for Brownfields and Marginal Land Re-use in China. Cranfield University.

Downloaded from a DSpace repository. https://dspace.org/