煤控研究
China Coal Cap

2022.03

内蒙古采煤沉陷区生态修复与可再生能源利用研究

——以布尔台煤矿为例探讨政策如何鼓励/支持煤矿进行生态修复和可再生能源利用

NRDC 自然资源保护协会 NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心

中国煤炭消费总量控制方案和政策研究（煤控研究项目）

中国是世界煤炭生产和消费第一大国。以煤炭为主的能源结构支撑了中国经济的高速发展，但也对生态环境造成了严重的破坏。为了应对气候变化、保护环境和减少空气污染，国际环保组织自然资源保护协会 (NRDC) 作为课题协调单位，与政府智库、科研院所和行业协会等 20 多家有影响力的单位合作，于 2013 年 10 月共同启动了“中国煤炭消费总量控制方案和政策研究”项目（即“煤控研究项目”），为设定全国煤炭消费总量控制目标、实施路线图和行动计划提供政策建议和可操作措施，助力中国实现资源节约、环境保护、气候变化与经济可持续发展的多重目标。请访问网站了解更多详情 http://coalcap.nrdc.cn/

NRDC 自然资源保护协会
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

自然资源保护协会（NRDC）是一家国际公益环保组织，成立于 1970 年。NRDC 拥有 600 多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC 自上个世纪九十年代中起在中国开展环保工作，中国项目现有成员 30 多名。NRDC 主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。请访问网站了解更多详情 http://www.nrdc.cn/

鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心

鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心于 2021 年 2 月成立，隶属鄂尔多斯市林业和草原局。主要承担森林、草原、湿地、陆生野生动物、野生植物、生物多样性、林木种苗、防灾减灾等的建设与保护工作；承担鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区的建设管理相关工作；协助开展林业和草原领域的合作援助项目等工作。中心由原林草系统 13 个独立法人事业单位整合重组，多年来，在林业和草原建设及保护工作中积累了丰富的技术和管理经验。现有在职职工 98 人，大学本科以上学历 73 人，其中博士研究生 3 人，硕士研究生 39 人；取得中级以上专业技术职称 65 人，其中正高级工程师 6 人，副高级工程师 22 人，工程师 37 人。

煤控研究报告

《内蒙古采煤沉陷区生态修复与可再生能源利用研究》
《“十四五”山西省非煤经济发展研究》
《碳达峰碳中和背景下山西煤电行业转型发展研究》
《碳达峰碳中和背景下山西焦化行业转型发展研究》
《中国典型省份煤电转型优化潜力研究》
《碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
《中国典型省份煤电转型优化潜力研究执行摘要》
《碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究执行摘要》
《碳达峰碳中和目标约束下水泥行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
《碳达峰碳中和目标约束下电力行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
《碳达峰碳中和目标约束下钢铁行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
《碳达峰碳中和目标约束下煤化工行业煤炭消费总量控制路线图研究》
《山西省“十四五”煤炭消费总量控制政策研究》
《“十四五”电力行业煤炭消费控制政策研究》
《新冠疫情后的中国电力战略路径抉择：煤电还是电力新基建》
《中国散煤综合治理研究报告 2020》
《“十三五”时期重点部门煤控中期评估及后期展望》
《“十三五”电力煤控中期评估与后期展望》
《中国煤控项目“十三五”中期评估与后期展望研究报告》
《中国实现全球 1.5℃ 目标下的能源排放情景研究》
《持续推进电力改革 提高可再生能源消纳执行报告》
《2012 煤炭的真实成本》

请访问网站了解更多详情 http://www.nrdc.cn/

封面图片：American Public Power Association on Unsplash

煤控研究项目系列报告

内蒙古采煤沉陷区生态修复与可再生能源利用研究

——以布尔台煤矿为例探讨政策如何鼓励 / 支持煤矿进行生态修复和可再生能源利用

鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心

自然资源保护协会（NRDC）

2022 年 03 月

课题组专家及团队

姓　名	单　位	职　务
姜　现	生态环境部环境与经济政策研究中心环境战略部	助理研究员
刘耕源	北京师范大学环境学院，环境模拟与污染控制国家重点联合实验室	教授，博士生导师
高　永	内蒙古农业大学沙漠治理学院	二级教授，博士生导师
武曙红	北京林业大学生态与自然保护学院	教授，博士生导师
魏文栋	上海交通大学国际与公共事务学院	副教授，博士生导师
颜宁聿	北京师范大学环境学院	博士研究生
黄露希	内蒙古农业大学沙漠治理学院	博士研究生
许茜茜	北京林业大学生态与自然保护学院	硕士研究生
谷　望	上海交通大学环境科学与工程学院	博士研究生

自然资源保护协会

项目负责人：**张洁清**

项目参与人员：**钱京京、陈吟颖、黄辉、华宁、王娟**

鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心

项目负责人：**郭跃**

项目参与人员：**王瑞平、郭跃、李强、闫伟、宋秀敏、迟悦春、吴梓宁、辛静、聂琴、娜荷雅、孙维娜、陈宏伟、苏一鸣、张志钢**

目录

1. 背景 1

2. 煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源利用的国内政策梳理 4

2.1 全国煤矿及废弃煤矿矿区情况概述
2.2 煤矿及废弃煤矿矿区生态修复国内现行法规政策
2.3 可再生能源开发和利用国内现行法规政策

3. 煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源再利用的国际经验 20

3.1 引言
3.2 美国
3.3 德国
3.4 英国
3.5 国内外的对比与经验总结
3.6 小结

4. 布尔台煤矿沉陷区进行生态修复和发展光伏产业的环境、经济效益分析 33

4.1 布尔台煤矿采煤沉陷区生态＋光伏示范基地建设模式
4.2 布尔台煤矿沉陷区生态修复的环境、经济效益分析

4.3 布尔台煤矿沉陷区发展光伏产业的环境、经济效益分析
4.4 布尔台生态修复与可再生能源利用模式推广的挑战与难点

5. 基本结论与政策建议 53
5.1 基本结论
5.2 政策建议

参考文献 58

1

背景

中国是煤炭生产和消费大国，多年的煤炭开发利用已经产生了很多存量的废弃煤矿矿区，未来压减煤炭还将会产生新的增量的废弃煤矿矿区，特别是在内蒙古等中国重点煤炭开采地区尤为突出。虽然中国制定了相关强制性政策，要求煤矿开发经营者履行生产者责任，对废弃煤矿矿区进行生态修复，从而弥补煤矿开采带来的生态破坏等负外部效应，但是通常被煤矿开发经营者认为是一种成本和负担，缺乏内在的激励动力。从中国目前废弃煤矿矿区看，许多地方适合发展光伏或者风电等可再生能源。如果通过合适的制度和政策设计，探索和推广把废弃煤矿矿区生态修复与可再生能源开发利用联结起来的模式，既能够激励煤矿开发经营者开展废弃煤矿矿区的生态修复，同时又能够将废弃矿区资源变废为宝，为国家可再生能源开发利用提供广阔的空间载体，形成双赢格局，将对于中国实现双碳目标以及“十四五”生态文明建设目标具有重要的现实意义。

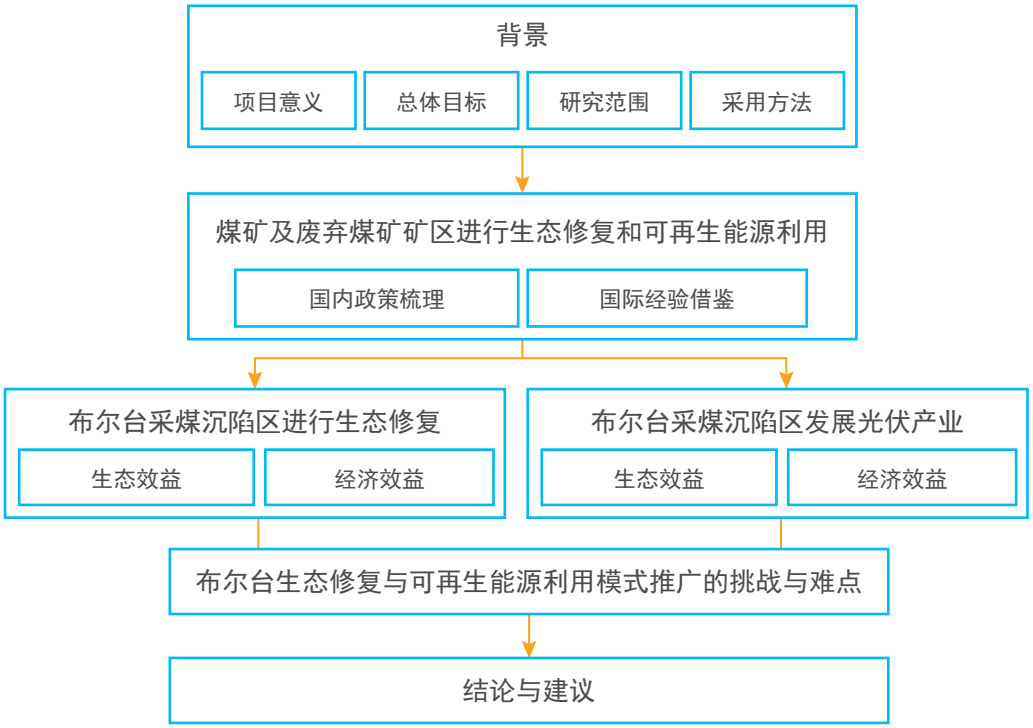
内蒙古是我国煤炭探明储量和开采量极为丰富的省份，12 个盟市中有 11 个分布有煤矿，这其中，鄂尔多斯市的煤炭产量更是在全国遥遥领先。作为我国重要的煤炭能源基地，鄂尔多斯市始终坚持“在开发中保护、在保护中开发”，正确协调处理生态环境保护和经济发展关系。近年来，以创建国家现代能源经济示范城市为契机，开展一系列让黑金“绿”起来的实践探索，走出了一条煤矿区生态修复治理与绿色产业融合发展之路。位于鄂尔多斯市伊金霍洛旗境内的布尔台煤矿将光伏发电与矿区生态综合治理有机结合，通过实施采煤沉陷区“生态 + 光伏”生态治理新模式，将生态建设、光伏精准扶贫、资源循环利用等融合链接，打造了采煤沉陷区释放生态效益、经济效益、社会效益的生动样本，对黄河流域煤炭基地的生态环境保护修复和可持续发展具有借鉴意义和示范效应。

因此，本研究以位于内蒙古地区的布尔台煤矿为案例，梳理煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源利用的国内政策，总结相关国际经验，分析布尔台煤矿沉陷区进行生态修复和发展光伏产业的环境、经济效益以及存在的问题和挑战，提出可行的政策建议，以期为中国复制推广鼓励和支持煤矿进行生态修复与可再生能源利用的模式提供决策依据和参考。

本研究的研究对象范围界定于布尔台采煤沉陷区生态 + 光伏示范基地。该示范基地生态治理区总面积为 4 万亩，其中，1.5 万亩生态治理区主要位于规划区内的林地和光伏板阵间，2.5 万亩生态产业区主要位于光伏板下和光伏板阵间，按“林光互补”和“农光互补”的模式种植饲料灌草，光伏发电整机装机达容量 50 万千伏，预计光伏总投资 21.4 亿元、生态修复投资 3.2 亿元。截至 2021 年 12 月底，光伏发电示范项目全部建成，已实现首期并网发电，年均发电量约 9 亿千瓦时。

本研究的方法主要包括文献总结、专家研讨等定性分析、数据统计等定量分析以及实地调查研究等。数据来源包括统计部门公开的官方统计数据以及布尔台煤矿提供的可向社会公开的数据资料。

本研究读者对象主要面向关注废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源利用的国家部委、地方政府、科研机构、国际组织、商业和金融部门、投资机构、民间社会组织和社会公众等。


背景
项目意义
总体目标
研究范围
采用方法
煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源利用
国内政策梳理
国际经验借鉴
布尔台采煤沉陷区进行生态修复
生态效益
经济效益
布尔台采煤沉陷区发展光伏产业
生态效益
经济效益
布尔台生态修复与可再生能源利用模式推广的挑战与难点
结论与建议

2

煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源利用的国内政策梳理

2.1 全国煤矿及废弃煤矿矿区情况概述

中国是一个煤炭大国，2019 年煤炭查明资源储量达到 1.72 万亿吨[1]。同时，中国也是煤炭生产与消费大国，2020 年中国煤炭产量 39.0 亿吨，约占全世界煤炭总产量的 50.40%；煤炭消费量为 82.27 艾焦耳，占全世界煤炭消费总量的 54.33%，煤炭生产量与消费量均居全球第一[2]。长期以来，煤炭是中国最主要的一次能源和重要的工业原料，2020 年中国煤炭消费量增长 0.6%，占能源消费总量的 56.8%，比上年下降 0.9 个百分点。

目前，中国煤炭开采呈现规模化集约化态势，且以大型现代化煤矿为主体，在产煤矿区域集中分布特点明显。相较于 1988 年全国煤矿数量为 6.5 万处、平均单井规模仅为 1.52 万吨 / 年的情况，截至 2020 年底，全国煤矿数量减少到 4700 处以下、平均单井（矿）产能提高到 110 万吨 / 年以上[3]； 30 万吨 / 年以下煤矿 1129 处、产能 1.48 亿吨 / 年，较 2018 年底降幅分别达 45%、41%[4]。全国建成年产 120 万吨以上的大型现代化煤矿 1200 处以上，产量占全国的 80% 左右；其中年产千吨级煤矿 52 处，产能 8.2 亿吨 / 年，约占全国生产煤矿总产能的 1/5[3]。2020 年，中国 14 个大型煤炭基地产量占全国总产量的 96.6%，比 2015 年提高 3.6 个百分点[3]。2019 年底，根据各省份发布的煤矿生产能力公告，中国共有在产煤矿 3219 座，具体分布情况如图 2-1 所示，其中山西在产煤矿 643 处，高居首位，内蒙古有 383 处，四川、黑龙江的在产煤矿数量也均在 300 处以上。从地域分布看，全国 52 处千万吨矿井分布在 7 个省区、14 个地市（州），其中，内蒙古自治区 21 处，产能 3.91 亿吨 / 年，居各省区首位；鄂尔多斯市 11 处，产能 2.06 亿吨 / 年，在地市（州）中排名仅次于榆林市[5]。

1 数据来源：国家统计局，https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C01&sj=2020.

2 世界能源统计年鉴 2021，https://www.bp.com/zh_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html.

3 中国煤炭工业协会，2020 煤炭行业发展年度报告 .http://att.dahecube.com/f/210304/61aebf6c2e2674534b066b140ce0f0d6.

4 国家能源局淘汰煤炭落后产能工作成效显著 .http://www.nea.gov.cn/2021-03/24/c_139832361.htm.

5 煤炭工业协会，我国在产千万吨级煤矿已达 52 处 .http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=120629.

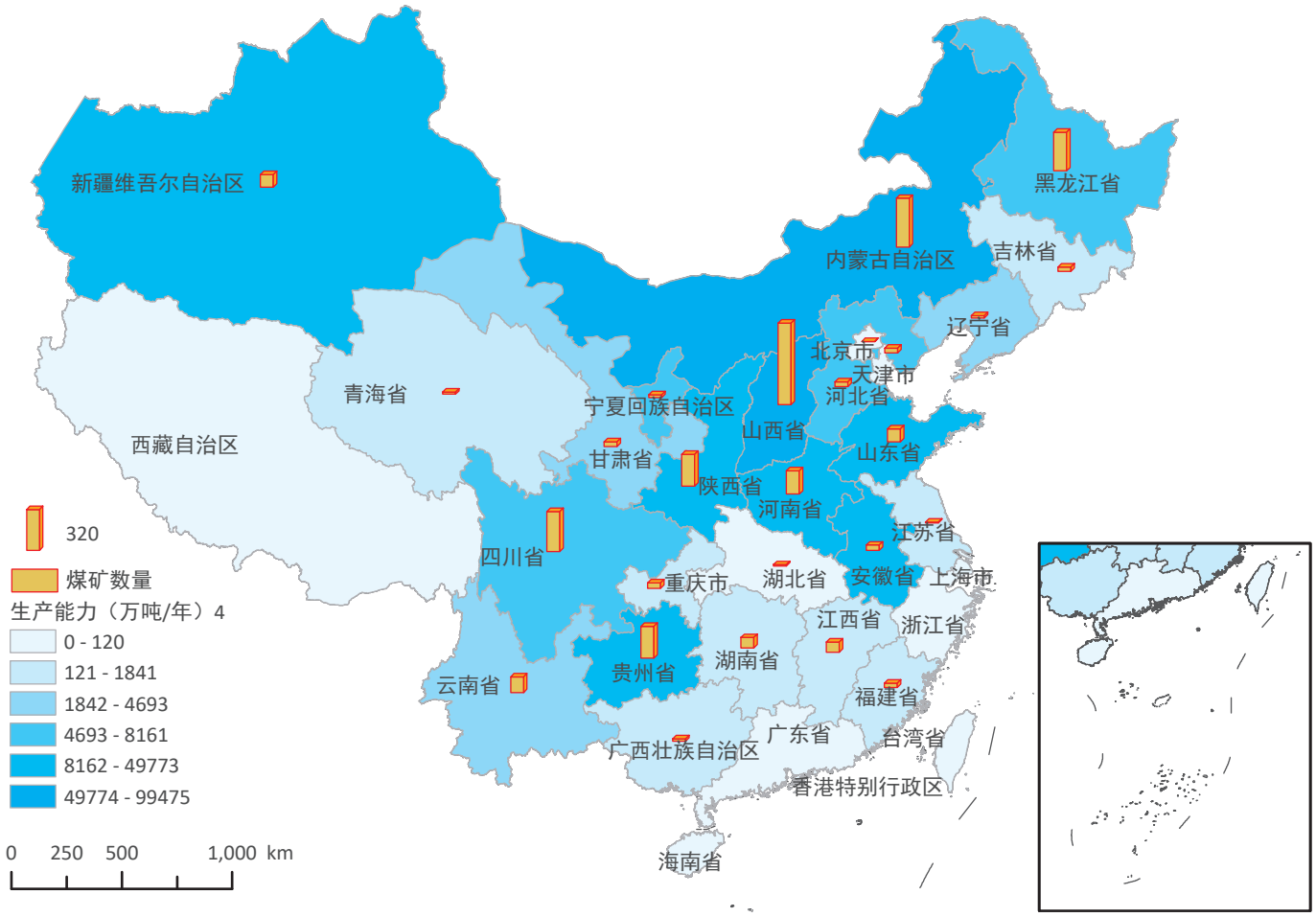


图 2-1 2019 年各省份在产煤矿分布情况

资料来源：根据各省份 2019 年煤矿生产能力公告整理所得。

2016 年，国务院提出煤炭行业化解过剩产能目标，全国 25 省份接续出台煤炭行业去产能方案，关闭退出一大批煤矿。“十三五”期间，全国煤炭行业结构不断优化，淘汰退出煤矿 5464 处、产能 9.4 亿吨[6]。从关闭退出煤矿数量来说（见表 2-1），湖南省关闭最多，将近 510 处，清退煤炭产能 3500 余万吨；其次是云南、贵州、江西、四川四省，均关闭煤矿在 400 座以上，合计退出煤炭产能 2.2 亿吨左右。北京市在“十三五”期间关闭了最后 5 座煤矿，彻底退出了煤炭行业；目前全国无生产煤矿的省份分别是北京、天津、上海、浙江、广东、海南、西藏。

6 国家矿山安全监察局，2021 年首次新闻发布会 .https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/xwfbh/202101/t20210111_376885.shtml.

表 2-1 25 省份“十三五”期间关闭退出煤矿数量分布

关闭退出煤矿数量	省份
451 处以上	湖南、云南、贵州、江西
351~450 处	四川、重庆
251~350 处	黑龙江、湖北、辽宁
151~250 处	河南、新疆（含建设兵团）、福建、陕西
51~150 处	河北、陕西、吉林、甘肃、山东、内蒙古、广西
50 处以下	宁夏、青海、江苏、安徽、北京

2.2 煤矿及废弃煤矿矿区生态修复国内现行法规政策

中国矿山生态修复历史欠账多、问题积累多、现实矛盾多，据遥感调查监测数据，截止 2018 年底，全国矿山开采占用损毁土地约 5400 多万亩，其中历史遗留矿山占用损毁约 3400 多万亩[7]。近年来，随着对废弃矿山修复的认识不断深入，国家及各部委从规划管控、系统修复、资源利用、土地供应、保障机制等方面对矿山生态修复提出了相应要求，矿山生态修复和绿色矿山建设等工作稳步推进。2019 年全国新增矿山恢复治理面积约 4.8 万公顷，其中在建和生产矿山新增恢复治理面积约 1.92 万公顷，废弃矿山新增恢复治理面积约 2.88 万公顷[8]。

1. 开采前矿区环境保护和恢复治理承诺有关规定

我国《环境保护法》规定开采自然资源时要合理开发并依法制定、实施生态保护和恢复治理的方案，这为含煤矿在内的矿山生态环境修复提供了原则性法律依据。采矿企业在开采矿产资源前须编制环境影响评价报告，申请办理采矿许可证、取水许可证等。根据《矿山地质环境保护规定》《水法》等法律规章，企业办理相关许可时应当制定矿

7 自然资源部，《自然资源部关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》政策解读 .http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/25/content_5463897.htm.

8 自然资源部，中国矿产资源报告 2020.http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202010/P020201022612391799194.pdf.

山地质环境保护与土地复垦方案，或明确污染物处理措施、对地面塌陷及水位下降等采取的补救措施，如果占用森林、草原等，需要缴纳相应的植被恢复费用。这在准入关口明确了企业的矿山环境保护和治理恢复责任，即要求企业在开采前做出实施矿山环境保护和恢复治理的承诺。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
			国家层面
1	2014-7	矿产资源开采登记管理办法	采矿权申请人申请办理采矿许可证时，应当向登记管理机关提交开采矿产资源的环境影响评价报告。
2	2015-1	中华人民共和国环境保护法（修正）	开发利用自然资源，应当合理开发，保护生物多样性，保障生态安全，依法制定有关生态保护和恢复治理方案并予以实施。
3	2016-12	煤炭采选建设项目环境影响评价文件审批原则（试行）	企业对井工开采项目的沉陷区及临时排矸场、露天开采项目的采掘场及排土场，应明确生态恢复目标，提出施工期、运行期、闭矿期合理可行的生态保护与恢复措施。
4	2016-7	中华人民共和国水法（修正）	因疏干排水导致地下水水位下降、水源枯竭或者地面塌陷，采矿单位或者建设单位应当采取补救措施。采矿单位直接从地下取用水资源应当申请领取取水许可证，提交的申请资料中需要包括取水对生态与环境的影响、退水中所含主要污染物以及污水处理措施等内容。
5	2019-7	矿山地质环境保护规定	采矿权申请人申请办理采矿许可证时，应当编制矿山地质环境保护与土地复垦方案，报有批准权的自然资源主管部门批准。
6	2019-12	中华人民共和国森林法（修订）	矿藏勘查、开采以及其他各类工程建设，应当不占或者少占林地；确需占用林地的，应当经县级以上人民政府林业主管部门审核同意，依法办理建设用地审批手续。占用林地的单位应当缴纳森林植被恢复费。
7	2021-6	中华人民共和国草原法（修正）	进行矿藏开采和工程建设，应当不占或者少占草原；确需征收、征用或者使用草原的，必须经省级以上人民政府草原行政主管部门审核同意后，依照有关土地管理的法律、行政法规办理建设用地审批手续。因建设征收、征用或者使用草原的，应当交纳草原植被恢复费。

2. 开采中责任履行及监管要求

现阶段，我国矿区生态修复基本已确立“谁开发谁保护”“谁破坏谁治理”“谁投资谁受益”等原则。按照我国矿山“边开采、边治理、边恢复”的要求，采矿权人应当在开采过程中履行矿山生态环境修复义务，并按照销售收入的一定比例提取矿区生态修复资金专项用于矿区生态修复，在矿山闭坑前或者闭坑后的合理期限内完成矿区生态修复工作。自然资源、环保、水利等部门按各自职责范围对其义务履行情况进行监督管理。此外，落实“边采边治”理念的一项重要制度是绿色矿山建设制度，相关政策文件、标准规范对煤炭行业绿色矿山矿区环境、资源开发方式、节能减排等方面要求进行了规定，通过绿色矿山建设整体提升资源利用效率、加强矿山生态环境保护治理和土地复垦。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
国家层面			
1	2019-8	中华人民共和国土地管理法（修正）	因挖损、塌陷、压占等造成土地破坏，用地单位和个人应当按照国家有关规定负责复垦；没有条件复垦或者复垦不符合要求的，应当缴纳土地复垦费，专项用于土地复垦。
2	2011-2	土地复垦条例	生产建设活动损毁的土地，按照“谁损毁，谁复垦”的原则，由生产建设单位或者个人（以下称土地复垦义务人）负责复垦。相关单位或个人需按要求编制土地复垦方案、实施土地复垦工程，国土资源主管部门对其进行监督管理并会同农业、林业、环保等部门组织验收。
3	2019-12	中华人民共和国矿产资源法（修订草案）(征求意见稿)	以专章形式专门规定了矿区生态修复工作，指出矿业权人应当履行生态修复义务，按照矿业权出让合同和矿产资源勘查方案、开采方案开展矿区生态修复工作，边生产、边修复，在矿山闭坑前或者闭坑后的合理期限内完成矿区生态修复工作。
4	2019-7	矿山地质环境保护规定	采矿权人应当依照国家有关规定，缴存矿山地质环境治理恢复基金，开采矿产资源造成矿山地质环境破坏的，由采矿人负责治理恢复，治理恢复费用列入生产成本。
5	2017-3	关于加快建设绿色矿山的实施意见	将绿色矿业发展示范区建设与工矿废弃地复垦利用、矿山地质环境治理恢复、矿区土壤污染治理、土地整治等工作统筹推进。明确用地、用矿、财政、金融四方面激励政策。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
6	2018-10	煤炭行业绿色矿山建设标准规范	对煤炭行业绿色矿山矿区环境、资源开发方式、资源综合利用、节能减排等方面要求进行了规定，指出应贯彻“边开采、边治理、边恢复”的原则，及时治理恢复矿山地质环境，复垦矿山占用土地和损毁土地。
内蒙古自治区			
1	2019-11	内蒙古自治区矿山地质环境治理恢复基金管理办法（试行）	对基金的提取、使用及监督管理等内容进行了明确规定。适用于行政区域范围内的新建、生产矿山及有责任人的闭坑矿山。
2	2020-11	关于印发自治区绿色矿山建设方案的通知	健全完善自治区绿色矿山规划体系，建立健全绿色矿山标准体系，创建绿色矿业发展示范区，推动绿色勘查示范工程建设，严格新家矿山准入标准，推进生产矿山达标建设，推动矿地和谐发展。2025 年底前，全部矿山达到国家或自治区绿色矿山建设标准，不符合绿色矿山建设标准的矿山企业依法逐步退出市场。
3	2021-2	关于矿产资源开发中加强草原生态保护的意见	按照“谁破坏、谁治理”原则，严格执行矿山生态环境保护与恢复治理标准，因地制宜开展生态修复，提升废弃矿山、采矿沉陷区和煤田（矸石）火区治理效果。自然资源、生态环境、林草等部门要按照职能职责，督促矿产资源开发企业严格落实矿山地质环境保护与土地复垦方案，切实做好被占用草原的矿山环境综合治理工作。鼓励企业修复无主矿山，并依法依规、科学合理利用修复后的土地。
4	2020-8	关于印发自治区矿山环境治理实施方案的通知	生产矿山要严格执行法律法规相关规定，做到“边生产，边治理”。矿山企业要严格按照矿产资源开发利用方案、环境影响评价文件、水土保持方案、矿山地质环境保护与土地复垦方案等要求，分阶段、按计划完成各阶段治理工作。矿山服务到期闭坑前，要按方案要求对矿区内破坏单元进行相应治理。

3. 已关闭 / 废弃矿山生态修复有关规定

针对矿业权人受过高的修复成本等因素影响而生态修复积极性不高、怠于履行生态修复义务，以及我国存在大量历史遗留损毁土地的客观状况，国家在督促采矿权人对在建和生产矿山履行生态修复义务的同时，加强政府和社会力量的双向发力，强化矿山生态修复资金投入保障，推动构建“政府主导、政策扶持、社会参与、开发式治理、市场化运作”的矿山生态治理模式。历史遗留损毁土地主要由县级以上人民政府或自然资源主管部门组织复垦整治，国家对含历史遗留矿山生态修复治理在内的重点生态保护修复涉及的中央与地方财政事权和支出责任已进行明确划分，对典型重要山水林田湖生态保

护修复工程中央财政还会给予奖补。同时，国家出台了一系列政策鼓励社会资金投入，通过释放矿山生态修复领域土地政策红利，探索利用市场化方式推进矿山生态修复。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
1	2019-7	节约集约利用土地规定（修正）	县级以上地方自然资源主管部门应当对工矿用地进行整理复垦，统筹开展农村建设用地整治、历史遗留工矿废弃地和自然灾害毁损土地的整治，通过实行复垦再利用促进土地优化利用。
2	2016-9	关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知	将实施矿山环境治理恢复列为山水林田湖生态保护修复应统筹包括的第一项重点内容，明确要突出重要生态区以及居民生活区废弃矿山治理的重点，抓紧修复交通沿线敏感矿山山体，对植被破坏严重、岩坑裸露的矿山加大复绿力度，并提出以中央财政对典型重要山水林田湖生态保护修复工程给予奖补。
3	2016-7	关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见	通过完善用地用矿政策、鼓励第三方治理、强化科技支撑等措施，加快构建“政府主导、政策扶持、社会参与、开发式治理、市场化运作”的治理模式
4	2019-12	关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见	对历史遗留矿山废弃土地中的集体建设用地，集体经济组织可自行投入修复，也可吸引社会资本参与。
内蒙古自治区			
1	2020-8	关于印发自治区矿山环境治理实施方案的通知	综合考虑各地区治理工作的复杂程度、资金保障能力和市场主体参与积极性等因素，分类、分区、分阶段实施治理。创新资金投入机制，按照“谁投资、谁受益，谁治理、谁受益”的原则，通过政府引导和市场化运作方式，制定鼓励社会资本投入矿山环境治理的政策措施，激发矿山企业主动性和第三方治理企业活力，吸引社会各方积极参与矿山环境治理。

4. 矿区生态修复后土地利用有关规定

为推动开展矿山地质环境恢复和综合治理，国家对矿山生态修复中土地开发利用的支持和激励政策作了很多规定，总体上可将其大致分为两类。一是通过退还已缴纳耕地占用税、给予补贴、赋予从事种植业、林业、畜牧业等生产的土地使用权等激励措施，将矿山建设用地复垦为耕地、林地、牧草地等农用地。二是从土地复垦和产业发展相结合角度鼓励对修复土地进行多元利用，将矿山地质环境恢复和综合治理与相关产业发展

融合推进，如鼓励矿山企业参与矿山地质公园建设、经营和管理，探索矿山地质环境恢复和综合治理与地产开发、旅游、养老疗养、养殖、种植等产业的融合发展，矿山企业将依法取得的国有建设用地修复后用于工业、商业、服务业等经营性用途，等等。随着简化用地手续、实行差别化土地供应期限和供应方式等用地优惠政策日益完善，矿山生态修复市场化运作、科学化治理的模式也愈发成熟。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
1	2017-12	关于改进管理方式切实落实耕地占补平衡的通知	历史遗留工矿废弃地复垦形成的新增耕地节余部分，均可纳入补充耕地管理，用于耕地占补平衡。
2	2019-8	中华人民共和国土地管理法（修正）	对土地复垦义务人在规定的期限内将生产建设活动损毁的耕地、林地、牧草地等农用地复垦恢复原状的，退还已缴纳的耕地占用税。社会投资复垦的历史遗留损毁土地属于无使用权人的国有土地的，可以确定给投资单位或者个人长期从事种植业、林业、畜牧业或者渔业生产；县级以上地方人民政府将历史遗留损毁的建设用地复垦为耕地的，按照有关规定可以作为非农建设占用耕地时的补充耕地指标。
3	2016-7	关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见	鼓励引进国外矿山地质环境恢复和综合治理的新技术和新模式，鼓励矿山企业参与矿山地质公园建设、经营和管理，探索矿山地质环境恢复和综合治理与地产开发、旅游、养老疗养、养殖、种植等产业的融合发展
4	2019-12	关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见	正在开采矿山将依法取得的存量建设用地和历史遗留矿山废弃建设用地修复为耕地的，经验收合格后，可参照城乡建设用地增减挂钩政策，腾退的建设用地指标可在省域范围内流转使用。正在开采矿山将依法取得的存量建设用地修复为耕地及园地、林地、草地等其他农用地的，经验收合格后，腾退的建设用地指标可用于本企业在省域范围内新采矿活动占用同地类的农用地。在符合国土空间规划和土壤环境质量要求、不改变土地使用权人的前提下，经依法批准并按市场价补缴土地出让价款后，矿山企业可将依法取得的国有建设用地修复后用于商业、服务业等经营性用途。

5.“十四五”时期矿山生态修复与绿色发展要求

从规划层面来说，“十四五”时期系列规划部署对未来矿区发展和生态修复治理工作做出了系统谋划，更加强调融入国土空间生态修复和绿色发展大格局，进行全要素统

筹、系统性治理。按照有关规划要求，黄河重点生态区、长江重点生态区（含川滇生态屏障）、东北森林带、北方防沙带几个重点区域要加强历史遗留矿山生态修复。各省份应制定 2021-2035 年国土空间生态修复规划，针对各种生态退化、破坏问题科学确定生态修复目标和措施，为科学开展生态修复工作提供依据。

序号	时间	规划名称	相关主要内容
国家层面			
1	2020-6	全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021-2035 年）	实施青藏高原矿山生态修复、黄河重点生态区矿山生态修复、长江重点生态区矿山生态修复、东北地区矿山生态修复、三北地区矿山生态修复重点工程，重塑地形地貌，重建生态植被，恢复矿区生态。
2	2021-3	中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要	加强土地节约集约利用，支持工矿废弃土地恢复利用；提高矿产资源开发保护水平，发展绿色矿业，建设绿色矿山；加强黄河流域矿山生态修复；对资源型地区实施采煤沉陷区综合治理和独立工矿区改造提升工程。
内蒙古自治区			
1	2021-3	内蒙古自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要	加大生态系统保护力度。严禁在草原上乱采滥挖、新上矿产资源开发等工业项目，已批准在建运营的矿山、风电、光伏等项目到期退出。加快推动绿色低碳发展。全面推进绿色产业、绿色企业、绿色园区发展，建设绿色矿山，推广绿色建筑。
2		内蒙古自治区“十四五”生态环境保护规划	实施矿山环境治理恢复，加快露天矿生态修复及采空区灾害治理，着力推进绿色矿山建设。

2.3 可再生能源开发和利用国内现行法规政策

《可再生能源法》是我国可再生能源的专门法律、基干法律，使可再生能源的开发利用逐渐步入法制轨道，其确立的总量目标制度、全额保障性收购制度、分类（上网）电价制度、专项基金制度等多项基本制度成为了中国可再生能源法律政策体系的基础。但《可再生能源法》难以对可再生能源开发利用中的具体问题进行规定，其有效实施有

赖于国务院及其有关部门适时出台配套的法规、规章、技术规范及相应的发展规划。自2005 年以来，国家出台了一系列支持、规范可再生能源行业发展的政策、方针，内容涉及发展技术路线、建设运行规范、能源发展机制和上网电价等内容。从“九五”计划到“十四五”规划，国家对新能源行业的支持政策经历了从“开发出具有知识产权的技术”到“大力发展”再到“加快壮大”的变化，风能、光伏发电始终是我国支持新能源发展的重要组成部分，且“十四五”时期风电和光伏发电量的占比提升还将进一步加速。

1. 项目准入政策

我国可再生能源项目的投资建设有审批、核准和备案三种准入方式。从 2013 年开始，风电项目的核准权限从国家发改委下放至地方政府投资主管部门，光伏发电项目已由核准制改为备案制，且大部分省份已将备案权限进一步下放至地（市）或县（区）级。国家对于可再生能源并网发电项目实施电力业务许可管理，风电、光伏发电项目许可准入监管不断加强，但为鼓励分布式发电及可再生能源发展，项目装机容量 6MW（不含）以下的太阳能、风能等可再生能源发电项目被纳入豁免情形。2021 年 8 月，我国提出建立可再生能源发电项目开发建设按月调度机制，对可再生能源发电项目从核准（审批、备案）、开工、建设、并网到投产进行全过程调度，这将进一步推动可再生能源发电项目开发建设，确保实现全年开发建设目标。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
国家层面			
1	2020-3	关于贯彻落实“放管服”改革精神优化电力业务许可管理有关事项的通知	深入推进简政放权，简化发电类电力业务许可管理，项目装机容量 6MW（不含）以下的太阳能、风能、生物质能（含垃圾发电）、海洋能、地热能等可再生能源发电项目，不纳入电力业务许可管理范围。太阳能、风能、生物质能（含垃圾发电）、海洋能、地热能等可再生能源发电可简化发电类电力业务许可申请要求。
2	2021-8	关于开展可再生能源发电项目开发建设按月调度的通知	建立可再生能源发电项目开发建设按月调度机制，对可再生能源发电项目从核准（审批、备案）、开工、建设、并网到投产进行全过程调度。
内蒙古自治区			
1	2020-7	关于进一步加强全区风电、光伏发电项目建设管理的通知	严格执行国家和自治区关于风电、光伏发电领域企业投资项目核准和备案管理的各项规定。从 2020 年起，对于超国家建设规模核准、备案风电和光伏发电项目的盟市，将采取“区域限批”等措施。

2. 项目用地管理政策

在强化基本农田红线、生态保护红线、城镇开发边界控制线“三线”约束、规范项目用地的同时，主管部门出台了多项土地管理政策，支持风电、光伏产业发展。光伏、风电项目用地方式包括直接发包、租赁、转包三种方式，项目不得非法占用永久基本农田，避免涉及生态敏感区域，对于占用林地、草地等特殊区域的，除按照规定办理建设用地手续外，还须经相应主管部门履行额外审批手续。2015 年，原国土资源部下发《关于支持新产业新业态发展促进大众创业万众创新用地的意见》，明确对新能源项目用地作出规范和界定，该文件被作为光伏、风电等项目用地政策的基本依据。对于风电项目占用林地和草地、光伏电站建设使用林地、光伏扶贫项目用地及利用农用地复合建设光伏发电站项目等情况，国家在规范用地行政审批行为、促进项目节约集约用地的前提下，通过采取差别化用地政策给予政策优惠及便利。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
国家层面			
1	2014-9	关于进一步落实分布式光伏发电有关政策的通知	提出因地制宜利用废弃土地、荒山荒坡、农业大棚、滩涂、鱼塘、湖泊等建设就地消纳的分布式光伏电站
2	2015-9	关于支持新产业新业态发展促进大众创业万众创新用地的意见	光伏、风力发电等项目使用戈壁、荒漠、荒草地等未利用土地的，对不占压土地、不改变地表形态的用地部分，可按原地类认定，不改变土地用途，在年度土地变更调查时作出标注，用地允许以租赁等方式取得。
3	2015-11	关于光伏电站建设使用林地有关问题的通知	对于森林资源调查确定为宜林地而第二次全国土地调查确定为未利用地的土地，应采用“林光互补”用地模式，“林光互补”模式光伏电站要确保使用的宜林地不改变林地性质。
4	2017-7	关于支持光伏扶贫和规范光伏发电产业用地的意见	光伏复合项目场内道路用地可按农村道路用地管理；利用农用地布设的光伏方阵可不改变原用地性质；采用直埋电缆方式敷设的集电线路用地，实行与项目光伏方阵用地同样的管理方式。
5	2019-2	关于规范风电场项目建设使用林地的通知	对风电场建设使用林地禁建区域、限制范围作出规定，强化风电场道路建设和临时用地管理，加强风电场建设使用林地的指导和监管。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
6	2021-6	中华人民共和国草原法（修正）	进行矿藏开采和工程建设，应当不占或者少占草原；确需征收、征用或者使用草原的，必须经省级以上人民政府草原行政主管部门审核同意后，依照有关土地管理的法律、行政法规办理建设用地审批手续。因建设征收、征用集体所有的草原的，应当依照《中华人民共和国土地管理法》的规定给予补偿；因建设使用国家所有的草原的，应当依照国务院有关规定对草原承包经营者给予补偿。因建设征收、征用或者使用草原的，应当交纳草原植被恢复费。
内蒙古自治区			
1	2020-7	关于进一步加强全区风电、光伏发电项目建设管理的通知	合理布局和有序推动风电、光伏等新能源发展。原则上重点在荒漠地区、边境沿线、采煤沉陷区、露天矿排土场等地布局风电、光伏电站，其他地区原则上不再布局新的风电、光伏发电项目。
2	2021-11	关于实行征占用草原林地分区用途管控的通知	对生态保护红线外的基本草原区东部区域，新上风电、光伏项目以及配套电源送出工程应尽可能避让该区域或利用原有外送通道。 对东部地区呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市、锡林郭勒盟实行最严格的林地保护制度，严格控制新上能源资源型产业项目占用林地，严格控制已批准在建运营的矿山、风电、光伏等各类项目新增占用林地。保障中部地区呼和浩特市、包头市、乌兰察布市和鄂尔多斯市重点能源建设和战略资源项目使用林地需求，严格控制各类建设项目占用国家级公益林地、天然林。全区各地新建风电场项目禁止占用天然林、乔木林地，新建光伏电站项目阵列组件只能占用无林地。

3. 电价与补贴政策

2006 年起，我国开始对可再生能源发电实行基于固定电价下的补贴政策，补贴资金主要来源于随电价征收的可再生能源电价附加。2018 年后，国家加快推进光伏发电上网平价工作，目前我国陆上风电和集中式光伏电站的新增项目建设正式告别财政补贴，实行平价上网，按当地煤电基准价执行，新建项目可自愿通过参与市场化交易形成上网电价。在补贴退坡情形下，国家建立实施绿色证书自愿认购交易机制，鼓励风电、光伏平价上网项目和低价上网项目通过绿证交易获得合理收益补偿来相应代替财政补贴。对于存量可再生能源补贴拖欠、资金滞后问题，国家通过鼓励金融机构与企业协商展期或续贷、发放补贴确权贷款等绿色金融手段来缓解企业资金周转压力。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
1	2017-2	关于试行可再生能源绿色电力证书核发及自愿认购交易制度的通知	试行期间，国家可再生能源电价附加资金补助目录内的风电（陆上风电）和光伏发电项目（不含分布式光伏项目）可申请证书权属资格。风电、光伏发电企业出售可再生能源绿色电力证书后，相应的电量不再享受国家可再生能源电价附加资金的补贴。
2	2019-1	关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知	鼓励风电、光伏平价上网项目和低价上网项目通过绿证交易获得合理收益补偿。
3	2020-1	可再生能源电价附加资金管理办法	明确可再生能源电价附加补助资金由可再生能源电价附加收入筹集。完善可再生能源补贴管理模式、补贴顺序、补贴上限、补贴计算方法和补贴范围。
4	2020-2	关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见	目录制改为清单制。新增海上风电和光热项目不再纳入补贴范围。按照合理利用小时数核定可再生能源发电项目中央财政补贴资金额度，并确定了各类项目全生命周期合理利用小时数。 鼓励金融机构按照市场化原则对于符合规划并纳入补贴清单的发电项目，合理安排信贷资金规模，切实解决企业合规新能源项目融资问题。
5	2021-3	关于引导加大金融支持力度 促进风电和光伏发电等行业健康有序发展的通知	金融机构按照商业化原则与可再生能源企业协商展期或续贷，自主发放补贴确权贷款，对补贴确权贷款给予合理支持。通过核发绿色电力证书方式适当弥补企业分担的利息成本。足额征收可再生能源电价附加。
6	2021-6	关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知	明确 2021 年起对新备案集中式光伏电站、工商业分布式光伏项目和新核准陆上风电项目，中央财政不再补贴，实行平价上网，同时为支持产业加快发展，明确 2021 年新建项目不再通过竞争性方式形成具体上网电价，直接执行当地燃煤发电基准价。

4. 税收优惠政策

我国现行税费政策中已有一些有利于可再生能源产业发展的优惠政策。国家重点扶持的公共基础设施项目享受企业所得税“三免三减半”政策，其中包括核风力、水力、太阳能发电等电力项目。在增值税方面，风电实行增值税即征即退 50% 的优惠政策，光伏发电增值税优惠政策于 2018 年底到期，税务机构暂未出台优惠政策继续文件。在项目用地税收方面，国家对可再生能源产业不是执行税收减免政策，而是从选址角度鼓励避免使用税务成本高的土地。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
国家层面			
1	2015-6	关于风力发电增值税政策的通知	自 2015 年 7 月 1 日起，对纳税人销售自产的利用风力生产的电力产品，实行增值税即征即退 50% 的政策。
2	2017-2	中华人民共和国企业所得税法（修正）	企业从事国家重点扶持的公共基础设施项目投资经营的所得，可以免征、减征企业所得税。国家重点扶持的公共基础设施项目，是指《公共基础设施项目企业所得税优惠目录》规定的港口码头、机场、铁路、公路、城市公共交通、电力、水利等项目。
3	2018-4	关于减轻可再生能源领域企业负担有关事项的通知	地方能源管理部门在进行可再生能源项目布局时，应充分考虑土地类型及适用政策等因素，避免在适用城镇土地使用税和耕地占用税增加土地成本偏多的范围内规划布局集中式风电、光伏电站项目。
内蒙古自治区			
1	2017-12	内蒙古：关于明确光伏发电企业城镇土地使用税政策适用问题的通知	对光伏发电企业用地，如果土地性质属于农用地或未利用地，且被实际用于养殖、水土保持、植被恢复、荒漠化治理、盐碱化治理工作的，可按条例中“直接用于农、林、牧、渔业的生产用地”免征土地使用税。对光伏发电企业的光伏板阵列基座、升压站、变电站、厂区道路等生产用地，以及办公用地、生活用地，应照章征收土地使用税。

5. 可再生能源消纳利用政策

为促进可再生能源开发利用，我国正式建立了可再生能源电力消纳保障机制，并实施可再生能源开发利用目标导向管理模式，对消纳情况进行全面监测、评价、考核。绿证交易作为补充（替代）完成消纳量的方式之一，自愿认购的可再生能源绿色电力证书对应的可再生能源电量可等量记为消纳量。绿色电力交易立足能源生产到能源利用的全生命周期，在机制上为风、光为主的绿色能源开辟了优先交易、优先执行和优先结算的渠道，精准化匹配绿色电力消费意愿，以市场化方式引导绿色电力消费，体现出绿色电力的环境价值，产生的绿电收益将用于支持绿色电力发展和消纳，更好促进新型电力系统建设。此外，国家对保障可再生能源电网接入、提高电力系统调峰能力、协调推进储能发展等提出一系列政策举措，为可再生能源消纳提供了有力保障。

序号	时间	政策文件	相关主要内容
1	2016-2	关于建立可再生能源开发利用目标引导制度的指导意见	指导各地区落实全国可再生能源开发利用约束性指标、科学编制可再生能源开发利用规划、明确责任与义务、建立监测和评价制度，形成一个规划开发、运行消纳、监测评价的“闭环”管理体系，实现可再生能源开发建设与消纳利用并重。
2	2016-7	可再生能源调峰机组优先发电试行办法	包括完善调峰激励、鼓励跨省区补偿、增加调峰能力、强化信用监管、加强组织管理等多项内容，通过提高电力系统调峰能力，有效缓解弃水、弃风、弃光问题。
3	2017-11	完善电力辅助服务补偿（市场）机制工作方案	提出实现电力辅助服务补偿项目全覆盖,鼓励储能设备、需求侧资源参与提供电力辅助服务，允许第三方参与提供电力辅助服务等措施，以完善电力辅助服务补偿（市场）机制为核心，全面推进电力辅助服务补偿（市场）工作，提高电网灵活性，促进新能源消纳。
4	2018-2	关于提升电力系统调节能力指导意见	加快推进电源侧调节能力提升，推进各类灵活调节电源建设，积极支持太阳能热发电，推动产业化发展和规模化应用。推动新型储能技术发展及应用，特别是在调峰调频需求较大、弃风弃光突出的地区，结合电力系统辅助服务市场建设进度，部署建设一批新型储能电站。
5	2019-5	关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知	对各省级行政区域设定可再生能源电力消纳责任权重，自愿认购的可再生能源绿色电力证书对应的可再生能源电量可等量记为消纳量
6	2021-3	清洁能源消纳情况综合监管工作方案	聚焦清洁能源消纳主要目标完成和重点任务落实、可再生能源电力消纳责任权重落实、清洁能源优化调度、清洁能源跨省区交易消纳等六个方面，组织开展清洁能源消纳情况综合监管。
7	2021-5	关于 2021 年可再生能源电力消纳责任权重及有关事项的通知	对 2021 年可再生能源电力消纳责任权重和 2022 年预期目标做出了具体安排。
8	2021-7	关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知	鼓励发电企业通过自建或购买调峰储能能力的方式，增加可再生能源发电装机并网规模，促进风电、太阳能发电等可再生能源大力发展和充分消纳。
9	2021-9	绿色电力交易试点工作方案	明确了绿色电力交易定义和交易框架，强调了绿色电力交易的优先原则，规范了绿色电力产品的交易方式，厘清了绿色电力产品的市场化定价机制，提出了绿色电力交易的衔接与发展预期。

3

煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源再利用的国际经验

3.1 引言

欧美发达国家在煤矿开采和矿山修复方面起步较早，并有较多成熟经验。譬如，美国的废弃矿区生态恢复率高达 70%，位于世界前列[9]。美国平均每年采矿用地 4500hm^2，其中 47% 的矿业废弃地恢复了生态环境[10]。截止 2000 年，德国约有 61.8% 的矿区已被复垦[11]。英国煤炭开采历史悠久，曾经是欧洲乃至世界的产煤大国。我国经过长时间的高强度开采，已有大量的矿井因资源枯竭而关闭。据不完全统计，2014-2018 年我国关闭煤矿井 7516 个、非煤矿井 27877 个[12]。近年来，我国工矿废弃地复垦和生态恢复也已经受到政府和社会的高度重视，并出台了一系列政策和措施。本章阐述了美国、德国和英国在法律法规、资金来源和生态修复案例以及可在生能源利用方面的主要做法，通过对比分析国内外的异同，探讨我国在煤矿及废弃煤矿矿区进行生态修复和可再生能源再利用方面的不足与改进之处。

3.2 美国

1. 美国煤矿复垦相关法律法规

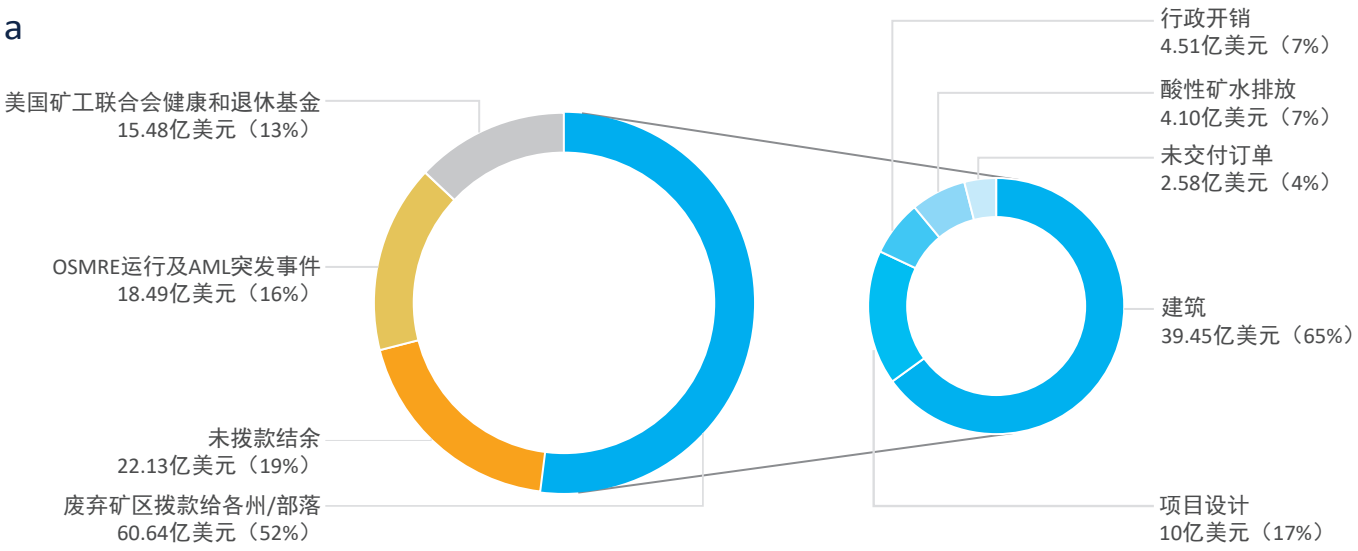
20 世纪初《矿山租赁法》对矿区生态环境的保护有明确的相关规定。1977 年美国联邦政府颁布了《露天采矿管理与复垦法》，随后各州陆续制定了相关法规条例[13]。美国内政部牵头的露天采矿与复垦执法办公室——专管全国的土地复垦工作，负责联邦政府复垦法律法规的制定，并与各州合作执行监管。各州资源部负责辖区内矿山的复垦工作。矿业局、土地局和环境保护署等部门协助对与本部门有关的土地复垦工作进行管理。在 1990 和 1992 年先后对《露天采矿管理与复垦法》进行修订，该法律体系沿用至今，并建立了自动化信息系统对全国矿山开采和复垦情况进行录入与核实[14]。

9 李金海 . 生态修复理论与实践 [M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2008.
10 王美仙 , 贺然 , 董丽 , 李雄 . 美国矿山废弃地生态修复案例研究 [J]. 建筑与文化 . 2015,(12),99-101.
11 梁留科 , 常江 , 吴次芳 , BORCHARD, K. 德国煤矿区景观生态重建 / 土地复垦及对中国的启示 [J]. 经济地理 . 2002,06,711-715.
12 王行军 . 关闭矿井资源开发利用状况研究 . 中国煤炭地质 [J]. 2021, 33(05), 20-24.
13 丁宝根 , 邹晓明 . 国外矿产资源开发生态补偿实践及对中国的借鉴与启示 [J]. 老区建设 . 2017, (14):27-31.
14 https://www.osmre.gov/programs/AVS.shtm

2. 美国废弃矿山生态修复的资金来源

复垦保证金制度规定由矿山经营者事先交纳一定数额的资金。数额基于但不限于复垦成本；应足以保证其无法执行复垦任务时，管理机关对其保证金的罚没能完成复垦任务，任何许可采矿区域的最低保证金数量为 10,000 美元；此外，可根据相关因素的变化而加以调整。保证金根据复垦完成的程度实行分三个阶段返还，分别返还 60%，25%，15%[15]。数据显示[16]，废弃矿区复垦基金通过对生产的每吨煤向煤矿经营者征收的复垦费筹集了 116.74 亿美元，已从收取的费用中向各州和部落分配了 60.64 亿美元；其分配具有强制性，进行逐年分配（图 3-1）。

a



15 程琳琳 . 美国煤矿复垦保证金制度及启示 [J]. 中国土地 . 2016, (10),43-45.

16 数据来源：https://www.osmre.gov/programs/aml.shtm

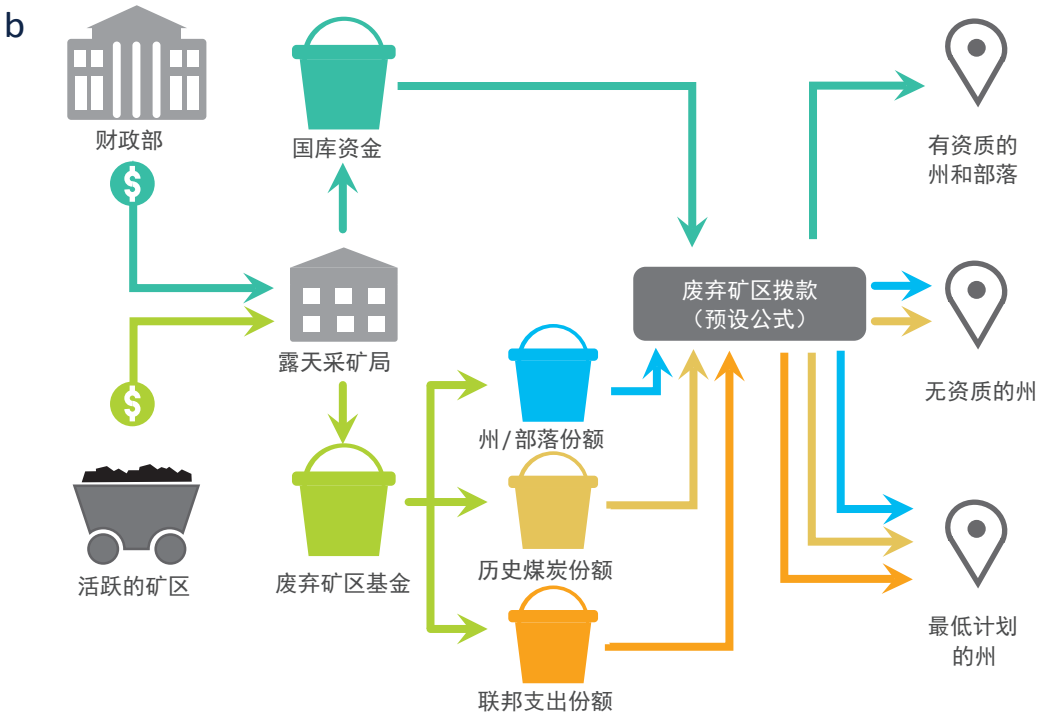


图 3-1 美国废弃矿区复垦基金构成（a）和分配流程（b）

3. 美国典型生态修复案例

美国新墨西哥州 La Plata Mine 煤矿矿区的生态修复项目采用“师法自然生态修复法”理念和技术[17]。通过应用 3S 技术对矿区进行调查，利用计算机模拟技术，设计出一种近似自然地理形态的人工修复模型，建成了一个景观相互协调、物种多样、高效持久的生态环境，取得了明显的社会、经济和生态效益。与传统生态修复方法相比，该方法可节约 10% 以上的投资，然而该方法也需要进一步完善相应的技术和管理等。

4. 美国煤矿矿区生态补偿 / 赔偿

复垦保证金制度被视为矿山环境生态补偿政策的重要组成部分[18]。历史遗留矿区的恢复由政府负责；在采煤矿区的生态修复由采矿企业负责[19]。针对一些不能从商业渠道获得保证金的小矿山，一些州实行一种联合储备金 (BondP001) 制度。条件是交纳一笔入

17 https://www.osmre.gov/programs/TDT/geomorph/200901/Presentations/2B_Bugosh.pdf.

18 孙清元 ; 冯春涛 . 国内外矿山环境补偿机制评介与经验启示 , 中国地质矿产经济学会 2007 年学术年会 , 中国新疆乌鲁木齐 , 2007, 8.

19 张成梁 ; B. Larry Li. 美国煤矿废弃地的生态修复 [J]. 生态学报 , 2011, 31 (01), 276-285.

门费和按年度交纳保险费。在内华达州，交纳保证金的比例分为 25%、40%、55%、70%、85%、100%。分期付款是指将核算的矿地恢复费用按比例分摊到预定的开采期内。如果开采期为 5 年，则第 1 年交 20%，到第 5 年时交到 100%。此外，《复垦法》特别要求矿山经营者在其保证金之外引入公共责任保险。

5. 美国废弃矿区的可再生能源利用

美国开展了“重振美国土地项目”等一系列项目评估废弃矿区土可再生能源利用的可能性[20]，具有诸多成功案例的经验，如表 3-1 所示。

表 3-1 美国废弃矿区的可再生能源利用案例

	案例	特点
太阳能发电	新墨西哥州 Chevron Questa 光伏发电项目	美国最大的废弃矿区光伏发电项目。具有可复制可推广的特点
抽水蓄能	新泽西州霍普山抽水蓄能电站	有效库容为 620 万 m^3，装机容量为 204 万 kW[21]。
风力发电	Dave Johnston、Somerset、Buffalo Mountain	均为废弃的露天煤矿，所发的电量能够满足周围居民的用电需求。
空气储能	麦金托什地区电站	发电容量 110MW[22]。

6. 美国经验小结

一是以《露天采矿管理与复垦法》为核心，各州因地制宜制定相应法规，并在各州成立相应的执法部门，形成了专业化、层级化的法律和监管体系。

二是完善的土地复垦制度体系是美国土地复垦率高的关键因素之一。

三是分类复垦制度为复垦的界限和责任提供明确依据，矿山土地复垦机构权责明晰，相互协作。

四是开采许可证制度为复垦计划和复垦保证金提供法律保障，矿山土地复垦基金和保证金制度保障了资金来源。

20 美国环保署 . 重振美国土地项目 . https://www.epa.gov/re-powering

21 霍冉 ; 徐向阳 ; 姜耀东 . 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望 [J]. 煤炭科学技术 . 2019,47(10),267-273.

22 付兴 ; 袁光杰 ; 金根泰 ; 班凡生 ; 夏焱 . 盐穴压缩空气储能库建设现状及工程难点分析 [J]. 中国井矿盐 2017, 48 (03), 14-18.

3.3 德国

1. 德国废弃煤矿矿区法律法规

1980 年《联邦矿产法》规定矿区景观生态重建属于采矿活动的一部分，要求对已开采的矿区进行生态恢复。《矿山还原法》规定凡是被破坏的土地 (包括农田和草地等) 必须还原再造，以恢复原来的自然景观。此外，各州设立了的《规划法》也对矿区的生态重建发挥着重要作用，基于州《规划法》的褐煤规划对景观生态重建作出框架性规定。1995 年联邦普通矿业条例将废弃矿区的景观恢复整合到运营程序中，要求采矿公司必须制定矿区废弃后的修复计划 [23]。《联邦自然保护法》要求企业对所造成自然景观的破坏，要通过土地复垦的方式进行恢复和治理，构造接近自然的景观。

2. 德国矿区生态修复的资金来源

德国的煤矿关闭工作由欧盟、联邦政府、州政府和煤矿企业四方共同完成，设立了约 100 亿欧元的煤矿关闭基金，作为后续土地复垦、矿井水处理等的费用。1992 年德意志联邦共和国与 Länder 柏林、勃兰登堡、梅克伦堡 – 西波美利亚、萨克森安哈特、图林根州和自由萨克森州签署了关于污染场地修复融资的行政协议。复垦所需资金按照联邦政府 75%，州政府 25% 的比例分担。20 世纪 90 年代的主要采矿风险的生态项目，有 21 个修复项目被授予重大生态项目的地位，每个项目都有至少 5000 万欧元的资金。截至 2008 年，在褐煤整治方面已经花费了超过 82 亿欧元。德国棕色煤炭的生态修复总成本为 92 亿欧元。

3. 德国矿区生态修复案例

德国杜伊斯堡公园位于鲁尔区较著名的煤矿和钢铁生产基地，关闭后，景观设计师彼得 · 拉茨对当地的自然生态，人文历史特征的充分挖掘之后，对其进行景观与生态改造，使其成为城市废弃地改造为城市公园的一个经典范例。杜伊斯堡发挥其港口优势，成为贸易中心，并建立了“船运博物馆”。埃森煤矿的案例于 2001 年被联合国教科文组织列为世界文化遗产，原来的建筑有的变身为煤矿博物馆、展览馆，有的成为办公楼、学校、工业设计园等 [24]。

---

23 https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/germany/mining.pdf.

24 江西省赴英、德煤炭开采及安全管理考察团 . 对英国、德国煤炭开采及安全管理的考察和认识 [J] . 江西煤炭科技 , 2008 (01), 42-43.

4. 德国煤矿矿区生态赔偿 / 补偿

《联邦采矿法》对采矿的赔偿进行了规定。矿业公司对生态修复负有全面的责任，法律规定其赔偿在矿区和受影响地区的土地恢复的情况下发生的损害。德国的矿区生态恢复补偿机制，针对历史遗留的矿区环境问题，联邦政府成立矿山复垦公司专门从事矿山恢复工作，所需资金按照联邦政府和州政府分别承担 75% 和 25%。对于新开发的矿区，根据德国联邦矿山法的规定，对矿区复垦提供具体措施是审批的先决条件；必须预留复垦专项资金，一般按企业年利润的 3% 留取；必须对矿山占用的森林、草地实行等面积的异地补偿。

5. 德国废弃矿区的可再生能源利用

德国已开发了矿井水地热利用工程 [25]、压缩空气储能电站 [26]、风力发电项目、太阳能发电等。德国目前最大的废弃矿井光伏发电项目——莱比锡区的 Meruo 矿光伏发电项目，总装机容量 166MW。2017 年，德国鲁尔集团与杜伊斯堡 - 埃森大学合作，将 Prosper-Haniel 煤矿改造成一个抽水蓄能设施，该工程完成后，可存储超过 100 万 m^3 的水，当地政府据此进行推广，以实现在 2025 年前将可再生能源比重提高至 30% 的目标 [27]。

6. 德国经验小结

一是通过法律明确规定生态重建属于采矿活动一部分。景观生态重建并不是将土地恢复到开采前的状况，而是建设为规划要求的状况。

二是利用法律、规划、技术手段保证的生态重建的可操作性。（1）法律手段。明确所有主体的权利、义务和各方责任；（2）规划手段。褐煤规划和企业规划对矿区生态修复进行具体规定；（3）技术手段。根据规定的各种用途而采取不同的技术措施，从而使复垦后的环境能满足规划中的要求。

三是废弃矿区的生态修复注重原始风貌（及生物多样性）的保护和历史价值的挖掘。遵循保护和修复的原则：（1）工业技术和相关遗址对现代建筑史的特殊意义；（2）遗迹所具有的历史价值，包括原材料提取和加工、生产技术等方面；（3）遗址对所在地方的重要意义。

25 霍冉；徐向阳；姜耀东 . 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望 [J]. 煤炭科学技术 2019, 47 (10), 267-273.
26 陈海生 . 压缩空气储能技术的特点与发展趋势 [J]. 高科技与产业化，2011，17(6):55-56.
27 德国首创废弃煤矿储能水电站 . 能源与环境 .2017(6),25.

3.4 英国

1. 英国煤矿相关政策法规

1944 年的《城乡规划法》规定各地方政府有权要求相关责任主体恢复荒芜的土地。1949 年起，联邦政府和各地方政府陆续制定矿区土地复垦工作计划。《复垦法》和《矿山开采法》对矿区生复垦进行了明确规定，并要求矿产开采与复垦同步进行。《矿山和矿场管理法案》、《废弃地法案》等一系列法律法规进一步对废弃煤矿区复垦、生态修复、环境保护等方面进行详细规定。《环境保护法》将污染行为定性为犯罪行为。英国国家煤炭局、环境部等部门也制定了保护、生态修复以及能源再利用相应的法律法规。此外，英国成立专门的执行和监督机构推动这些法律法规的实施，以确保废弃煤矿改造和修复工程的顺利实施。以威尔士地区为例，煤矿遗址修复改造计划由威尔士办公室组建的专家团队进行管理。

2. 英国矿区生态修复的资金来源

《矿物开采法》规定相关责任主体必须预留一定数量的资金用于采矿后环境和土地遭到破坏的恢复和治理工作。“弃用地拨款方案”规定了为矿区废弃和污染土地的复垦提供资金支持。此外，《环境保护法》也对土地复垦抵押金制度做了详细规定。资金来源主要包括：（1）政府财政。如煤矿惨案后，政府直接投入了 25000 万英镑开展废弃遗址的清理工作，其后又投入了大量的后续保障金等。（2）欧洲区域发展基金和复垦基金；（3）民间团体和个人捐款和馈赠；（4）政府招租。

3. 英国矿区生态修复模式及生态修复案例

在布朗博斯公园遗址保护和修复工程中[28]，一方面是将原有的煤矿遗址资源作为参观游览对象，另一方面也引入了公园建设，如植被、绿化、河流等一般元素。“伊甸园植物园”由热带生物群落温室和地中海生物群落温室组成[29]，其成就不仅在于解决了矿区的生态问题，还在于为公众带来了一种令人惊叹的文化体验。

4. 英国煤矿区生态赔偿 / 补偿

尽管当前没有看到英国专门针对煤矿矿区的生态赔偿或生态补偿的政策措施。但早在 1985 年，英国的《环境法》要求在农场经营中优先考虑生态保护的实施案例。1990

28 丁伟 . 英国煤矿遗址问题研究 . 陕西师范大学 , 2010.

29 李莎 , 董昭含 . 英国伊甸园矿坑再生景观 :20 年文化旅游运营模式研究 [J]. 工业设计 ,2020.(10), 84-86.

年开始实施保护生物多样性的北约克摩尔斯农业计划。农场主和国家公园主管机关按照自愿参与原则达成协议，目的是对促进并增强自然景观和野生动植物价值的农场主提供补偿。通过国家与农户之间的协议，充分明确国家在生态补偿中的主体责任，并划定区域内补偿标准和区域之间分界线上土地的补偿标准。

5. 英国废弃矿区的可再生能源利用

2020 年，英国地质调查局 (BGS) 和煤炭管理局 (Coal Authority) 将废弃煤矿相关的数据以地图的方式进行可视化，以确定调查矿井水作为可持续热源使用的潜力 [30]。目前，英国正在评估 30 多个利用地热矿能源的潜在热网。此外，伦敦地下被废弃的冗余空间建成了地下有机农场，英国正在考虑将 15 万个废弃煤矿改造成地下农场 [31]。

6. 英国经验小结

一是区生态修复立法早，生态修复历程久，后续发展较慢。

二是英国矿区生态修复的资金来源多样，社会和公众资金投入高。

三是明晰的修复计划、可造作性和行之有效的修复实践、后续管理的科学性和实效性。

3.5 国内外的对比与经验总结

1. 法律体系

与美国、德国、英国相比，我国的矿区生态修复立法方面的特点如表 3-2 所示。总体上，我国矿山生态修复制度在行政法规、部门规章、规范性文件等层面已形成相对系统的架构，我国更加强调全要素统筹、系统性治理。但法律法规的近年快速更新也带来了各级政府在学习和执行的程度和水平不一，需要更长的理解时间，而对转型过于急迫地执行可能会在一些区域产生理解偏差，使得上级要求、当地政府理解和大中小型企业的实际情况产生一些错位。因此，企业需要加快学习速度，理解与对接最新的各级规章

30 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685657352968335121&wfr=spider&for=pc
31 https://www.sohu.com/a/205193475_672753

政策。此外，我国的管理模式待改进，技术和信息支撑体系待完善，在公众参与方面也有待加强。

表 3-2 国内外矿山生态修复法律体系对比

	国家	内容
法律法规的特点	美国	以《露天采矿管理与复垦法》为核心；各州制定相应的土地复垦法规条例。
	德国	《联邦矿产法》、《联邦自然保护法》、《采矿项目环境影响评估条例》、《联邦普通矿业条例》等构成主要的法律体系；各州设立了相应的《规划法》。
	英国	形成了以《复垦法》、《矿山开采法》、《矿山和矿场管理法案》、《废弃地法案》、《煤炭工业法》等联邦颁布的法律为主，国家煤炭局、环境部等部门的法规为辅的法律体系。
	中国	以《矿产资源开采登记管理办法》、《土地复垦条例》、《矿产资源开采登记管理办法》等国家级法律为主导，部委和地方颁布相应的法规条例。如 2005 年国家环保总局发布《矿山生态环境保护与污染防治技术政策》；2018 年《内蒙古自治区地方煤矿管理条例》；2019 年自然资源部发布《矿产资源法（修订草案）》等。
相同之处		在国家建立核心法律体系，地方制定相应的法规条例。
不同之处		我国起步较晚，正在加速追赶，更加强调全要素统筹、系统性治理，但相关法规和技术政策分散于各项法律法规中，且各项规定的更新较快。如《矿山地质环境保护规定》已进行了第三次修订。
建议		以国家级法律为核心，出台专门针对废弃矿山生态修复和可再生能源利用的相关法规和技术政策。
专门机构的特点	美国	成立露天采矿与复垦执法办公室，各州设立矿产处。与资源部等部门权责明晰，相互协作，负责矿区生态修复工作。
	德国	成立矿业公司对生态修复负有全面的责任；德国联邦环境部从环境的角度参与管理矿产资源。
	英国	成立专门矿区生态修复的执行和监督机构，在地方设立专门的办公室组建专家团队对矿区生态修复进行管理。煤炭管理局对煤矿潜在的安全问题或对危害矿区环境的行为开展行政执法。
	中国	我国虽设立了国家和地方的矿山安全监察局，但其职能配置中并没有涉及矿区的生态修复。目前，尚未成立矿区生态修复的专门机构，矿区的生态修复工作繁多，主要由自然资源部、生态环境部、林草局等机构分管的具体事务。
建议		成立专门的执法和监督机构，对其各项权责进行明确的界定。

2. 资金来源

国外的废弃矿区 / 矿井生态修复由于有较为成熟前置金或保证金政策，使得对于后续矿区生态修复的资金有一定的来源保障，并且实行全程监控与责任追究，全程公众参与与监督。这种责任期限可能需要采矿闭坑后的几十年，甚至更长。国外的资金来源还包括一些基金或社会个体。

国内也从 2000 年提出并 2006 年正式发布规定建立矿山环境恢复保证金制度，但目前只在部门规章和地方法规中予以明确，各省市在具体操作过程中还存在缴存与治理不匹配、返还率低、缴而不治、一缴了之等问题。2017 年财政部、国土资源部、环境保护部联合发文以矿山地质环境治理恢复基金取代保证金，尝试增加资金来源，同时，仿效国际建立矿山地质环境动态监管机制，加强对企业矿山地质环境治理恢复的监督检查。

为了进一步开展矿区生态修复基金筹措仍需在国际经验基础上实现本国创新，可遵循以下几个原则：资金来源时空分散化，推动边开发、边修复，降低一次性金融压力；建立企业生态账户，实现修复的“绿水青山”可计量、可考核、可兑现机制，生态价值可通过企业 / 个人交易、购买等手段兑现为企业收益；破解废弃矿区新能源开发的土地、金融、税费壁障。

3. 生态修复技术

国外的矿区的开发的时间早，开发过程较慢，生态问题突显较晚，国外的生态修复基本都是在矿区废弃后才进行修复。与之不同的是，我国社会经济发展迅速，矿产资源开发的时间较晚、历时短、速度快、规模大。因此，我国在矿区的生态修复工作面临着开采与治理同时进行的难题。另外，部分特殊的矿区生态修复仍存在一定的技术难点，以高潜水位矿区为例，矿区 80% 以上为高标准粮田，人口密度大，地下矿产开采之后地面极易积水，导致耕地绝产、农田生态系统严重受损、人地矛盾激增，其耕地保护与恢复是世界性难题。

采复一体、生态修复、全过程监控是国际采煤沉陷地治理的前沿趋势，我国采煤沉陷地治理仍存在如下技术瓶颈：高潜水位煤矿区土地沉陷深、多次沉陷、损毁时间长，原有技术大都是沉陷稳定后治理，难以实现边开采边治理；现有的充填技术大都采用矿山固体废弃物为充填材料，存在污染的风险，环保生态型、高质量的充填复垦技术突破难；沉陷积水区域的封闭性和非连续性以及陆地生态系统转变为水陆两相生态系统的复杂性，导致沉陷区生态系统修复难；采煤沉陷地损毁信息具有多类型、多时空维度、显性隐性共存等特征，单一监测技术无法满足需求，尤其是大量级形变的开采沉陷监测、典型隐伏损毁信息获取难等，仍需进一步的技术攻关。

4. 可再生能源的利用

废弃煤矿矿区可以为发展可再生能源提供广阔的地域空间。将废弃煤矿矿区生态修复与可再生能源开发利用模式联动结合，有利于我国建设美丽中国和将实现双碳目标以及“十四五”生态文明建设目标。当前，我国废弃矿井资源开发利用的主要特点：一是地域空间广阔，开发利用难度大；二是能源结构、技术水平、产业政策等具有自身特点，因此无法直接照搬国外利用模式。

在政策制度方面，美国、德国等国家在可再生能源开发利用方面有着较为完善的调控监管计划和市场调节机制，如可再生能源配额制度、新能源补贴、税收优惠和退税、贷款担保、清洁可再生能源债券计划等，这些政策从客观上促进了废弃矿井可再生能源的开发利用。

在开发利用模式方面，国外主要有太阳能发电、风力发电、地热能利用等，开发利用模式多样化，光伏发电作为利用方式之一已经有了较为广泛的应用，抽水蓄能和空气储能技术在国外已经有成功的案例。但是国内的开发利用模式较为单一、利用率较低，多以旅游开发为主，资源开发则以煤层气抽采为主，其它的利用模式较少，诸如风光发电、地下水库、抽水蓄能电站、地下储气库、地下储油库、地下实验室、井下农业、地下医院、地下储物库、废料 (物) 等危险物质的处置等。

总体上，未来的开发利用中，我国需要在借鉴国外成功模式的基础上研究建立符合国情的模式，以“典型示范与稳步推广相结合，开发利用与经济发展相适应，安全优先和成本效益相统一，立足长远和科学布局相协调”为原则，走智能精准开发之路，并逐步总结形成一套完整的管理体系与规范标准。

3.6 小结

通过国内外的对比，我们得出以下三个启示：

一是激发企业动力。我国矿山生态建设要从被动到主动，从单纯的土地复垦、环境改善到有目的进行生态重建，以可持续发展为目标。把矿山恢复与企业可持续发展战略、生态责任等相结合；企业进行行业协同与技术对标。关键是让企业实实在在感受到绿色发展带来的好处。此外，要联动企业与地方，积极探索煤炭矿区社会经济发展与环境保护协调发展的模式，建立企业生态账户，修复的“绿水青山”可计量、可考核、可兑现，生态价值可通过企业 / 个人交易、购买等手段兑现为企业收益，提高社会治理与公共服务水平。

二是完善制度配套。对于绝大多数现役煤矿而言，修复工作不存在太多的技术、方法上的瓶颈。“重开采、轻修复”现象之所以长期、普遍存在，核心原因就在于开采是挣钱、修复是花钱。因此，相关投入需要落到实处，才是破解“轻修复”难题的关键。应先制定方案，后进行开采；边开采，边恢复；生态恢复应该成为矿山的日程工作；制定更灵活的修复基金制度。针对现有煤炭矿区生态环境治理能力与手段落后、现代信息技术应用不足、生态产品价值实现机制不明确等问题，应完善矿区自然生态资源产权、生态资源监管、生态修复、生态监测评价、生态资源经营与市场配置、生态补偿、财税金融扶持等制度体系，构建核心技术研发应用、高层次专业人才培养及绿色投融资管理等平台，多渠道、多途径、多领域提供政策与资金支持。

三是创新治理方式。需要创新废弃煤矿矿区的生态修复和可再生能源利用模式。除了经济效益外，系统考虑景观、生物多样性、低碳等综合因素。治理修复不是简单翻新土地、栽种植被，而是要实现矿山地质环境稳定、损毁土地复垦利用、生态系统功能改善等目标。推动煤炭产业实现从“末端治理”走向“全过程治理”，从“先开采后治理”走向“边开采边治理”，从“先开发后保护”走向“开发协同保护”，建立山、水、林、田、湖、草、沙等系统综合协同治理的方案，构建全要素、全过程、全方位的生态保护模式。同时，考虑景观形式与生物多样性。

4

布尔台煤矿沉陷区进行生态修复和发展光伏产业的环境、经济效益分析

4.1 布尔台煤矿采煤沉陷区生态 + 光伏示范基地建设模式

布尔台煤矿隶属国家能源集团神东煤炭集团（以下简称“神东集团”），位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗境内。矿区位于陕蒙接壤处，在地貌上处于鄂尔多斯高原与黄土高原的交接地带，是黄土高原地貌演化的典型过渡地带，为水蚀和风蚀共同作用形成的地貌。该区域环境脆弱，一旦受到干扰或破坏，生态系统极易发生退化，仅依靠自身的能力需要相当长的时间才能恢复，甚至有可能永远都不能恢复。针对布尔台脆弱的生态环境，神东基团在开发建设的过程中不断探索，逐渐形成“先治后采、治大采小、采治互动、以采促治、以治保采”的道路，创建了“外围防治圈、周围常绿圈、中心美化圈”以及“采前防治、采中控制、采后修复”的“三圈三采”的生态环境综合治理模式，为推进沉陷区治理工作和成效提供保障。在开展生态修复治理的同时，神东基团推进生态产业化，创新推出布尔台采煤沉陷区“生态 + 光伏”生态治理项目，把生态惠民和光伏减排有效结合起来，基地基本情况如下。

一是光伏部分。总装机容量为 50 万千瓦，总投资 21.4 亿元，2021 年 7 月光伏发电示范项目主体工程全部完工，9 月份已实现首期并网发电，年均发电量约 9 亿度，可实现年产值约 2.5 亿元。该项目划分为 3 个单体项目，分别为国家能源集团国电电力天骄绿能 25 万千瓦项目，光伏投资约 10.9 亿元；东方日升天骄绿能 15 万千瓦项目，光伏投资约 6.2 亿元；国家电投天骄绿能 10 万千瓦项目，光伏投资约 4.3 亿元。

二是生态治理部分。通过地企合作方式对项目区进行全面生态修复，上层空间用于发电，地面用于农林业种植，发展观光、特色果蔬采摘等旅游产业。生态治理总面积 4 万亩，总投资 3.7 亿元，其中投资 1.3 亿元用于生态治理区 1.5 万亩和 2.5 万亩生态产业区种植，0.3 亿元用于建设配套灌溉管网，0.4 亿元用于配套土地整治及道路等附属设施建设，投资 1.7 亿元用于配套流转土地 3.7 万亩。1.5 万亩生态治理区主要在规划区内的林地和光伏板阵间，计划种植乔灌木数量 209 万株，乔灌草比例 1：2:3。计划水土流失治理度 96%，地质环境治理率 100%，土地复垦率 100%，植被盖度由 19% 提高至 64%，区域植物达 103 种。2.5 万亩生态产业区主要在光伏板下和板间按“林光互补”和“农光互补”的模式种植饲料灌草，年总产值约 2788 万元。截至 2021 年 6 月初，布尔台生态 + 光伏发电区域周边已完成各类乔木种植 13 万余株，完成各类经济和生态灌木种植近 83 万穴，完成生态牧草种植约 1500 亩。

总的来说，布尔台煤矿采煤沉陷区生态 + 光伏示范基地建设按照“板上光伏发电、板下生态产业”的思路，将治理采煤沉陷区与发展光伏新产业相结合，一方面生产清洁能源，另一方面板下套种各类作物，在防风固沙、保护光电设备的同时发展智能生态农业，提高农业生产资源利用效率，推动形成绿色、集约发展模式，实现采煤沉陷区治理生态效益、经济效益和社会效益共赢的局面。

4.2 布尔台煤矿沉陷区生态修复的环境、经济效益分析

布尔台煤矿所在地区在 80 年代建矿初期为一片荒地，因当地干旱少雨的气候条件加之位于毛乌素沙漠和黄土高原过渡带，当地风蚀、水蚀及风沙问题严重，不利于植被生长。群落种类单一、物种少、生态环境脆弱不利于区域后续的开发利用，造成土地资源的浪费，且对周边居民的切身利益造成损害。

对此，神东集团实施开展生态修复工程，考虑到当地气候、土壤条件及矿井水供给的实际情况，选择了适合当地气候条件生长的本地耐旱植被，植被的覆盖使得矿区土壤质地得到了一定程度的改善。种植的乔木、灌木及饲草不仅对环境起到改善作用，也带来了直接的经济效益，产生良好的气候效益的同时，实现了经济可持续发展。同时项目实施为当地居民增加了就业岗位、增加了收益，对社会和谐稳定、保障产业发展、实现区域发展都具备重要作用。此外，良好的生态环境为后期实现光伏发电等可再生能源的大规模开发利用提供必要的环境条件。

1. 布尔台煤矿沉陷区生态修复的环境效益分析

（1）生态系统稳定性评价

大规模的煤层开采必将造成生物栖息地破坏、生境丧失或破碎化，而生态修复工程大幅度提高了项目区林草植被覆盖度。持续有效的管护使矿区生态系统日趋稳定，为多种生物提供了适宜的生存、繁育、迁徙场所，使该地曾经逐渐消失的野生动物又陆续频繁出现，重返栖息地进行繁衍生息，动物数量和种类明显增加，生物链更加完整，病虫害发生的机率和危害程度明显降低，区域生物多样性增加，物种基因库更加丰富。

植被盖度演变。植被是矿区生态系统维持平衡的关键要素，煤矿沉陷区受损生态系统的稳定性及抗逆性主要取决于该系统的生境稳定性和植被恢复状况。根据 2005 年至 2018 年布尔台矿区植被覆盖数据（图 4-1）可看出，矿区植被覆盖面积逐年增加。高覆盖度面积更是由 2005 年的 1.68km^2 增至 2018 年的 49.20km^2。此外，经过多年的修复，矿区植被总盖度更是由原来的 19% 提高至 64%。

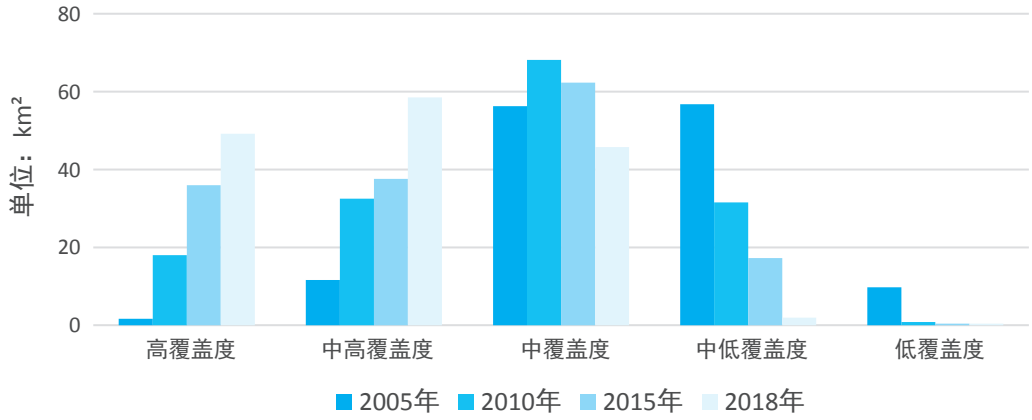


图 4-1 布尔台矿区植被覆盖度面积对比

植物群落评价。采煤沉陷区生态系统成分越复杂，其生态系统稳定性越强。植物群落稳定性分析评价是通过植物群落基本特征以及植物群落物种多样性进行的。植物群落基本特征是通过物种丰富度、群落物种个体总数、群落总盖度以及优势种来反映；植物群落物种多样性则是采用 Margalef 物种丰富度指数（F）、Simpson 指数（D）、Shannon-Wiener 指数（H）、种间相遇率（PIE）和 Pielou 群落均匀度（R）等指标进行分析。

表 4-1 不同植物群落基本特征

群落类型	物种丰富度			物种个体总数			总盖度 /%		
	5 年	10 年	15 年	5 年	10 年	15 年	5 年	10 年	15 年
樟子松群落	11.0	12.0	14.0	480.0	1238.0	1453.0	53.0	77.0	72.0
沙棘群落	7.5	8.3	7.7	163.8	192.7	277.7	57.0	70.7	91.0
沙柳群落	12.3	9.6	7.0	422.0	215.0	136.3	51.7	49.6	45.0
柠条群落	10.3	10.5	13.0	365.3	672.5	469.0	52.7	58.8	66.2
油蒿群落	5.0	2.7	-	50.3	35.3	-	63.3	46.7	-

注：“-”油蒿群落无 15 治理年限，故未有该年限下相关指标。下同。

表 4-2 不同植物群落类型物种多样性

群落类型	物种多样性指标	治理年限		
		5 年	10 年	15 年
樟子松群落	F	1.67	1.52	1.78
	D	0.77	0.40	0.79
	H	1.83	1.01	1.85
	PIE	0.77	0.40	0.79
	R	0.76	0.41	0.78
沙棘群落	F	1.29	1.44	1.21
	D	0.68	0.61	0.58
	H	1.43	1.34	1.26
	PIE	0.69	0.61	0.58
	R	0.72	0.62	0.62
沙柳群落	F	1.90	1.63	1.23
	D	0.80	0.74	0.61
	H	2.01	1.66	1.36
	PIE	0.80	0.74	0.62
	R	0.80	0.74	0.69
柠条群落	F	1.58	1.49	1.97
	D	0.68	0.63	0.75
	H	1.49	1.38	1.80
	PIE	0.69	0.64	0.76
	R	0.65	0.58	0.70
油蒿群落	F	1.24	0.66	-
	D	0.66	0.56	-
	H	1.33	0.95	-
	PIE	0.67	0.58	-
	R	0.74	0.86	-

矿区治理初期，以大面积飞播油蒿、针茅等灌草植物为主，形成的植被群落是以油蒿为主的单一群落，生态系统十分不稳定，一旦发生大规模病虫害（沙蒿金叶甲、茎腐病），生态系统就会破坏，生态环境就会急剧恶化，因此，规划区的植被生态系统必须要从单一群落向多群落生态系统转型，生态系统必须要由不稳定向稳定的生态系统转型。此外，稳定的生态系统为鸟类提供了栖息、繁衍、捕食的场所，常见的鸽形目、雀形目、隼形目等鸟类，鞘翅目、直翅目、双翅目、膜翅目等昆虫出现频率明显增加。

调查分析发现，矿区内樟子松、沙棘和柠条群落随治理年限的增加总体表现较好，后期基本无需人为干预，群落能表现出良好的生态效益；而沙柳和油蒿群落随治理年限的增加总体表现较差，后期需要人为干预和管理才能发挥较好的生态效益。矿区根据土地利用类型、土壤、气候和水文等条件，遵循自然和社会环境相协调的原则，总结出适合的植被配置模式。在风沙区，以灌草结合为主，种植沙柳、柠条、羊柴等沙生植物，撒播沙米、沙蒿等草籽；在丘陵沟壑区，推广以乔灌混交、针阔混交为主，种植油松、山杏、沙棘、紫穗槐等树种；在采煤沉陷区，以生态经济林为主，主要种植沙棘、野樱桃、文冠果、欧李等树种；在建设区，以园林景观为主，主要栽植景观树种国槐、垂柳、丁香等。

沉陷区植被盖度和物种数量的提高不仅增加了植株叶面积，提高了光合效率和光合产物的积累，还增加了物种基因库，为动植物及微生物提供了赖以生存的场所，使区域内生物多样性更加丰富，使脆弱的生态环境实现正向演替，有效地提高煤矿沉陷区域生态系统稳定性。

（2）土壤质量评价

采煤发生大面积塌陷、地下水位下降，塌陷区地表产生大量裂隙，改变了土壤的质地结构，增大了土壤的导水率。土壤有机质等化学特性是影响植物生长的重要因素。开采塌陷造成地表形成了许多裂缝和相对的坡地和洼地，土壤中许多营养元素随着裂隙、地表径流流入采空区，造成许多地方土壤中养分的短缺，严重影响了植物的生长。

通过参考同地区以往相关土壤状况经验资料，以及相关研究成果，综合分析计算得出原生土壤背景值，利用黄土高原土壤养分丰缺分级标准[32]，通过与矿区多年生态恢复后土壤质量水平进行比较分析，结果表明：矿区经过多年生态恢复，其土壤理化指标有了大幅度的提升，土壤肥力显著增加。

32 贾恒义，彭琳，彭祥林，余存祖．黄土高原地区土壤养分资源分区及其评价 [J]. 水土保持学报，1994(03):22-28.

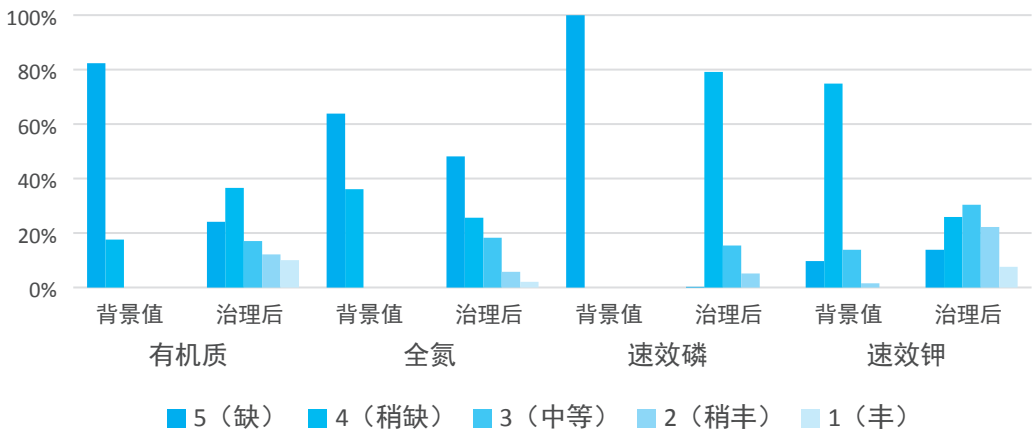


图 4-2 治理前后土壤性质比较

对矿区生态治理前后土壤性质平均值变化情况进行比较分析，结果如表 4-3 所示，矿区治理前后有机质含量平均增加了 32.48%，全氮含量增加了 36.36%，速效磷增加了 397.46%，速效钾增加了 44.57%。

表 4-3 生态治理前后土壤性质平均值变化

类型	有机质（g/kg）	全氮（g/kg）	速效磷（mg/kg）	速效钾（mg/kg）
原生土壤性质背景值	8.59	0.33	1.18	59.39
矿区治理后土壤性质	11.38	0.45	5.87	85.86
变化情况	+32.48%	+36.36%	+397.46%	+44.57%

煤矿开采活动对生态环境的干扰直接影响土壤质量，然而对矿产开采后的生态环境进行科学规划和合理利用，能够产生积极的影响。矿区所实施的草木种植、生态建设、微生物土地复垦等一系列措施，很好的改善了采煤沉陷区的土壤质量，在沉陷区重建了可持续健康的土壤生态系统。

（3）水土保持效益

开采塌陷形成了下沉盆地，下沉盆地使地表倾斜、坡度改变。坡度越大则径流量越大，冲刷量也越大，易引起水土流失。

表 4-4 布尔台矿区水土保持措施面积对比

单位：km^2

时间	梯田	水保林	人工草地	总计
2005	0.30	47.23	0.15	47.68
2010	0.09	57.46	0.00	57.55
2015	0.09	70.46	0.03	70.58
2018	0.09	76.32	0.83	77.24

通过收集矿区不同时期的水土保持资料，获取不同时期各项水土保持措施数量，参考《水土保持综合治理效益计算方法》（GB/T 15774—2008），计算矿区各项水土保持措施拦泥沙量与蓄水总量（表 4-5）。矿区自 2005 年大规模实施水土保持综合整治，配套林地、园地、草地水保措施开展矿区治理以来，坡面水土保持措施的拦泥沙量与蓄水量逐年升高，至 2018 年，矿区水土保持措施拦泥沙量为 115436.40t，蓄水为 116.00 万 m^3。

表 4-5 水土保持措施拦沙量及蓄水量

时间	拦沙量（t）	蓄水量（万 m^3）
2005	71835.00	71.97
2010	86449.20	86.46
2015	105974.40	106.01
2018	115436.40	116.00

矿区水土保持主要通过植物和工程措施相结合的方式。工程措施见效快，在治理初期能够有效的拦蓄水源，促进植物生长，待植被生长后期，通过植被根系等作用保护水土保持工程措施，初步形成了“工程促生物，生物保工程”的良好局面。

（4）防风固沙效益

在沙地营造固沙林，将沙丘固定的过程中，沙地水分条件逐渐变差。要维持固沙林的正常生长，其造林树种的选择、造林密度及配置就应符合当地气候条件。矿区在面对“抬头是荒山，低头是河滩；有风沙一片，无风一片沙”的初期矿区治理环境，矿区从周边的流动沙丘入手，全面采取网格固沙与灌草栽植，培育适合当地土壤环境的植物种群，分片治理、分步实施，逐步将流动沙丘固定，从根本上遏制了沙化不断扩张的趋势。

自 2005 年以来，矿区大面积建设沙障和林草措施相结合治理风沙危害，剧烈风蚀面积由 0.30km^2 减至 0.02km^2，减少了 93.3%，防风固沙功能逐年增加，矿区沙尘天数大大减少（表 4-6）。

表 4-6 布尔台矿区风蚀面积对比

单位：km^2

时间	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2005	9.92	26.55	29.96	12.62	0.40	0.30
2010	18.89	33.05	18.57	8.77	0.37	0.10
2015	30.06	32.80	9.23	7.38	0.24	0.04
2018	42.33	33.67	3.59	0.09	0.05	0.02

针对采煤塌陷导致的环境问题，矿区在开采煤矿的同时，及时对沉陷区实施地表裂缝填充和土地平整措施。此外，为有效的防治因塌陷造成的土壤肥力的下降和水土流失，对矿区的重点治理区，布设灌溉措施，修建水平沟、水平阶和梯田，实施柳杆障壁生态锚护坡措施，并逐步完善林草措施。在改善区域生态环境的基础上，通过土壤改良、培肥，积极研发矿区植被快速修复技术，优选适用于本地土壤、气候、近地表地质条件的植物和植物群，建立适应矿区条件的生态恢复体系。此外，在沉陷区开展生态 + 光伏和生态综合示范，探索出了一条生态脆弱采煤沉陷区现代能源经济 + 生态治理 + 生态产业的生态修复新思路。

2. 布尔台煤矿沉陷区生态修复的社会经济效益分析

（1）植被修复产生的碳汇收益

植物通过光合作用吸收大气二氧化碳，并以生物量的形式储存在植物体中，起到降低大气中二氧化碳浓度，调节碳氧平衡，缓解气候变化的作用。根据布尔台煤矿所提供

的数据，布尔台煤矿沉陷区的生态治理总面积 4 万亩，其中乔木 7920 亩，灌木 10485 亩，草本 18750 亩。根据《IPCC 关于土地利用、土地利用变化和林业方面的优良做法指南》和我国 2015 年国家温室气体清单中采用的缺省值，我国乔木年均碳汇量为 1.97tC/hm^2.yr；灌木林单位面积的碳储量为 8.9tC/hm^2。当地草本主要为苜蓿，每年都将进行割刈，且地下部分生物量及碳储量值极小，故不进行估算。4 万亩生态治理规划 2021 年 -2025 年完成，从 2025 年按照规划完成治理后进行估算，布尔台煤矿沉陷区到 2045 年将产生 27,024tC 的碳汇，相当于可实现 99,089 吨的二氧化碳中和。

表 4-7 2025-2060 年布尔台煤矿沉陷区植被恢复碳汇量（tC）

	2025	2030	2035	2040	2045
乔木	0	5200.8	10401.6	15602.4	20803.2
灌木	0	6221.1	0	0	0
累计	27024.3				

自从 2020 年 9 月国家主席习近平在第 75 届联合国大会的一般性辩论中提出我国将于 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和的承诺以来，如何实现“双碳”目标已经成为各级政府、各行各业关注的焦点。增加林业碳汇或自然生态系统作为目前实现“碳中和”目标的有效路径之一，也被国家、企业纳入了应对气候变化的行动方案。随着《碳排放权交易管理办法》于 2021 年 2 月 1 日起正式实施，林业碳汇项目作为 CCER 重要的项目类型，也开始正式进入我国的碳排放权交易市场。

实施生态治理工程后，布尔台煤矿沉陷区到 2030 年预计将产生 11,422tC 的碳汇，换算成碳信用可实现 4.2 万吨的碳信用，2045 年预计将产生 27,024tC 的碳汇，换算成碳信用的话就是可实现 9.9 万吨的碳信用。根据 VCS(自愿碳标准 ,Voluntary Carbon Standard) ARR 项目 (造林、再造林和植被恢复 , Afforestation, Reforestation and Revegetation) 所列风险评级对布尔台采煤沉陷区生态治理项目的风险进行评估，考虑其土地所有权属的清晰性、使用权的明确性，项目实施技术的可行性、相关专业知识的可获得性，项目的获批性等条件，判定其为低风险等级。ARR 项目低风险等级下的缓冲碳信用百分比范围为 0-20%，本项目采用保守估计法，扣除 20% 碳信用 [33]，即 2030 年预计实现 3.35 万吨的碳信用，2045 年预计实现 7.93 万吨的碳信用。

根据我国 2021 年 12 月 31 日全国碳市场收盘价 54.22 元 / 吨 [34]，这些碳信用 2030 年将产生 181.6 万元的碳收益，2045 年将产生 430 万元的收益。但因为我国的碳交

33 张小全等 . 林业碳汇项目理论与实践 [M]. 中国林业出版社 , 2010: 318-320

34 数据解析 2021 年全国碳市场 http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2022/0105/81701_2.html

易市场刚刚启动，碳配额和碳信用价格不稳定，参考 2020 年 CCER(China Certified Emission Reduction, 中国核证减排量) 中国的地方项目平均补贴价格，每吨二氧化碳当量平均补贴价格范围在 2.34-12.93 美元之间[35]，折合人民币为 14.8-81.8 元，因此我们根据深圳 2020 年每吨 14.8 元的水平以及布尔台煤矿沉陷区生态治理及山水林田湖草一体化生态修复示范项目种植的乔灌草面积，保守估计 2030 年布尔台煤矿沉陷区植被恢复的产生的碳汇量产生经济效益为 49.6 万元，2045 年布尔台煤矿沉陷区植被恢复的产生的碳汇量产生的经济效益为 117.4 万元。

（2）土地利用率提高，灌木、干草及作物经济效益

土地资源的合理配置关乎人民切实利益，煤矿开采后的沉陷区闲置导致了大量土地资源浪费，人民的切身利益受到损害。神东集团在不同矿区实行了差别化生态修复手段。在上湾采煤沉陷区因地制宜，结合实地情况做长远打算，考虑到矿区完全废弃后没有水资源供给情况，植被生长只能完全依靠天然降水，种植了适合当地条件的耐旱植被。在布尔台采煤沉陷区解决政府和当地矛盾问题冲突，协调生态保护和可再生能源发展之间的关系，探索出“生态治理 + 光伏产业 +X”的生态治理新模式，实现治理土地退化、推动生态惠民与发展光伏发电、推动新能源减排双行。

项目的实施使采煤沉陷区的土地资源得到合理的利用，生态修复后的植被景观取代了原有荒漠或矿区废弃地景观，土地资源质量及价值得到提升的同时，对当地也起到了美化作用，提高了人民群众的幸福度。项目的实施为农牧民带来直接的经济收入和就业岗位，有效缓解了人地矛盾。

布尔台采煤沉陷区统计，其生态修复治理工程投资 3.7 亿元用于生态治理，涉及总面积 4 万亩，在恢复地表植被的基础上考虑到生态效益与经济效益共存，设置了 1.5 万亩生态治理区和 2.5 万亩生态产业区。生态治理区计划水土流失治理度 96%，地质环境治理率及土地复垦率 100%，植被盖度由 19% 提高至 65%，区域植物达 103 种，新增乔灌木数量达 208.9 万株，主要在光伏工程板下和板间按“林光互补”和“农光互补”的模式种植饲料灌草，年总产值约 2788 万元，为当地居民带来了实际经济收益，也提高了其积极性，推动光伏产业发展，实现生态产业化、产业生态化。

35 “Allowance Price Explorer,” International Carbon Action Partnership, 2020, https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices

表 4-8 经济林作物经济效益

经济林类型	饲草	饲料灌木	经济灌木	经济乔木
主栽品种	苜蓿	饲料桑	大果沙棘	寒富苹果
种植面积 (亩)	18495	1965	2850	1950
单位产量（kg/ 亩 . 年）	500	250	160	600
作物单价（元 /kg）	2	4	6	4
单位产值（元 / 亩 . 年）	1000	1000	960	2400
年产值（万元 / 年）	1849.5	196.5	273.6	468

通过查阅文献和参考鄂尔多斯市人民政府、农牧局官网数据，我们采用保守估计的方法，采用当地提供的数据进行保守估算。项目区种植以“牧草之王”著称的苜蓿 1.8 万余亩，每年平均苜蓿干草产量 500kg/ 亩[36]，单价 2000 元 / 吨，年总产值可达 1849.5 万元；种植含自然抗生素，能提高畜禽免疫力的饲料桑 0.2 万亩，年产值 197 万元；种植大果沙棘 0.3 万亩，年产值 274 万元；种植产量高、效益好的寒富苹果 0.2 万亩，年产值 468 万元。

（3）增加就业岗位、提高农民就业率

双碳目标提出后，煤炭消费和生产减量成为大趋势，必然会出现煤炭产业相关员工安置等多方社会问题。项目实施充分考虑到经济效益与社会效益，推动生态产业收益反哺当地居民。除每亩地 30 年 7000-8000 元土地流转费直接进账及经济作物收益外，项目还提供了种植、维护等相关就业岗位，提高就业率，增加居民收入。

生态修复、光伏板搭建及后续经营和维护都需要大量的劳动力，这就为当地提供了许多就业机会，将当地剩余劳动力转化为工程的建设者。一期生态治理光伏发电示范项目建设集中饲草基地 4000 亩，当地居民通过参与光伏板搭建、植物浇水、除草、整形修剪、钩枯枝、防治病虫害等工作获得直接的劳务收入。光伏板清洗等固定就业岗位

36 鄂尔多斯市农牧局 , 鄂尔多斯市科技特派员农牧业服务创新成果展示 http://nmj.ordos.gov.cn/bmdt_79360/202012/t20201231_2830639.html

300-500 个，带动周边农牧民 1200 人实现产业增收，人均收入可达 5000 元。当地居民生产、生活条件得到根本的改善，项目后期的抚育、保洁、管护工作还将持续带来长期生态管护岗位和围水圈除杂、抹萌芽、施肥翻地、打药等短期工作需要。项目建成达产后可实现年利润约 1.6 亿元，带动农牧民增收约 6000 户、户年均增收约 1 万元以上，实现直接就业和农牧民转变为产业工人约 1500 人。

另一方面，工作期间通过开展种植和植被管护相关的技能培训，能够使农民获得先进的种植技术和管理技术，也增加了其生态意识，形成正确的生态道德观。项目在增加工作岗位、改善农民生计的同时，有效提升了当地农民的技术水平。

由此可见，矿区生态修复改善区域生态环境的同时，为项目区的社会稳定、经济发展也起到了十分积极重要的作用。

4.3 布尔台煤矿沉陷区发展光伏产业的环境、经济效益分析

布尔台煤矿沉陷区光伏项目为内蒙古自治区近期重点光伏项目，指利用矿区复垦土地发展光伏与种养殖业相结合的农光互补产业，将提高布尔台煤矿沉陷区的环境质量，减缓气候变化，推动产业结构由“黑色”向“绿色”转型。当前内蒙古自治区的电力结构主要以燃煤发电为主，光伏发电具有大规模替代燃煤发电的潜力。相较于高排放的燃煤发电，光伏项目的运行具有近零排放的优势，因此推行光伏替代可大幅度减少污染物排放，赋能清洁低碳、安全高效的现代能源体系建设。立足于国家总体布局以及乡村振兴战略，光伏精准扶贫服务与产业融合发展的生态文明建设体系能够为内蒙古自治区的产业转型与高质量发展赋能，筑牢兼具经济效益和生态效益的绿色屏障。通过精准发力和延伸布局，布尔台基于光伏的修复项目最终能为推动能源转型及实现碳达峰、碳中和长远目标提供强效助力。

1. 布尔台煤矿沉陷区发展光伏项目技术经济效益分析

1.1 布尔台采煤沉陷区光伏示范项目测算边界

光伏项目总体测算边界参数如下表（表 4-9）所示：布尔台沉陷区光伏项目中，集中式光伏项目的保障利用小时数为 1200 小时，增值税率为 13%，贴现率为 3.85%，增值税附加税 10%（包含城市维护建设税、教育费附加税、地方教育费附加等税费），运维成本 43 元 / 千瓦 · 年。

表 4-9 光伏项目测算边界

测算边界	数值	备注
发电小时数（h）	1675	
成本（亿元）	21.4	根据光伏企业提供：4280 元 / 千瓦
保障利用小时	1200	根据项目方提供蒙西地区当前保障小数计列
增值税率	13%	太阳能生产的电力产品在 13% 的税率基础上，享受增值税即征即退 50% 的政策。
贴现率	3.85%	根据中国银行贷款市场报价利率确定
增值税附加税（城市维护建设税、教育费附加、地方教育费附加）	10%	以增值税为基数征收
运维成本（元 / 千瓦·年）	43	包含维修、材料、人员工资、管理费用等年经营成本，其中，员工人数按 25 人，6 万元 / 人·年计算

布尔台煤矿沉陷区修复光伏项目年利用小时数约为 1675 小时，通过情景计算，如下表（4-10）所示：年发电量约为 8.375 亿千瓦时，25 年生命周期内总发电量 199.63 亿千瓦时，与现实情况相符。

表 4-10 光伏项目发电量计算

发电量计算	数值
发电量（亿千瓦时）	8.375
生命周期发电量（亿千瓦时）	199.63

1.2 布尔台采煤沉陷区光伏项目经济性分析

根据国家发展改革委《关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》， 2021 年起对新备案集中式光伏电站、工商业分布式光伏项目和新核准陆上风电项目，中央财政不再补贴，实行平价上网。项目针对 2021 年集中式并网项目开展经济性分析，假设所发电量在蒙西地区消纳、未跨省送出，项目运营期为 25 年。根据项目方提供资料，该项目 1200 保障小时数内所发电量按蒙西燃煤发电脱硫脱硝标杆电价 0.2829 元 / 千瓦时实

行平价结算，保障之小时数外按浮动的市场交易电价结算（目前根据项目方提供鄂尔多斯地区当前价格约为 0.055 元 / 千瓦时），首年市场交易率约为 28.36%，市场交易率较大且价格处于较低水平，极大地影响了项目收益。

表 4-11 光伏项目经济效益分析电价参考值

用电分类	含增值税电度电价（元 / 千瓦时）	首年对应电量比重
项目上网电价	0.2829	71.64%
市场化交易电价	0.055	28.36%

经济效益计算结果（表 4-12）显示，取贴现率为 3.85%，折旧及息税前利润为 1.303 亿元；平准化度电成本 LCOE 为 0.2048 元 / 千瓦时；全投资动态回收期为 23 年，远长于一般光伏项目所需的回报期；全投资静态回收期为 15 年；全投资税前内部收益率为 4.43%。

表 4-12 光伏项目总体经济效益计算结果

经济效益计算结果	数值
折旧及息税前利润（亿元）	1.303
LCOE（元 / 千瓦时）	0.2048
全投资动态回收期（年）	23
全投资静态回收期（年）	15
全投资税前内部收益率	4.43%

1.3 敏感性分析

敏感性分析是指从定量分析的角度研究相关因素发生某种变化对某一个或一组关键指标影响程度的一种不确定分析方法。本报告中所分析的是保障性收购小时数和市场交易价格的变化分别对于内部收益率的影响。敏感性分析参考项目保障性收购小时数合理取 1200 小时至 1500 小时间的四个数值进行，市场交易价格以 0.2829 元 / 千瓦时为基准上下浮动 15%。

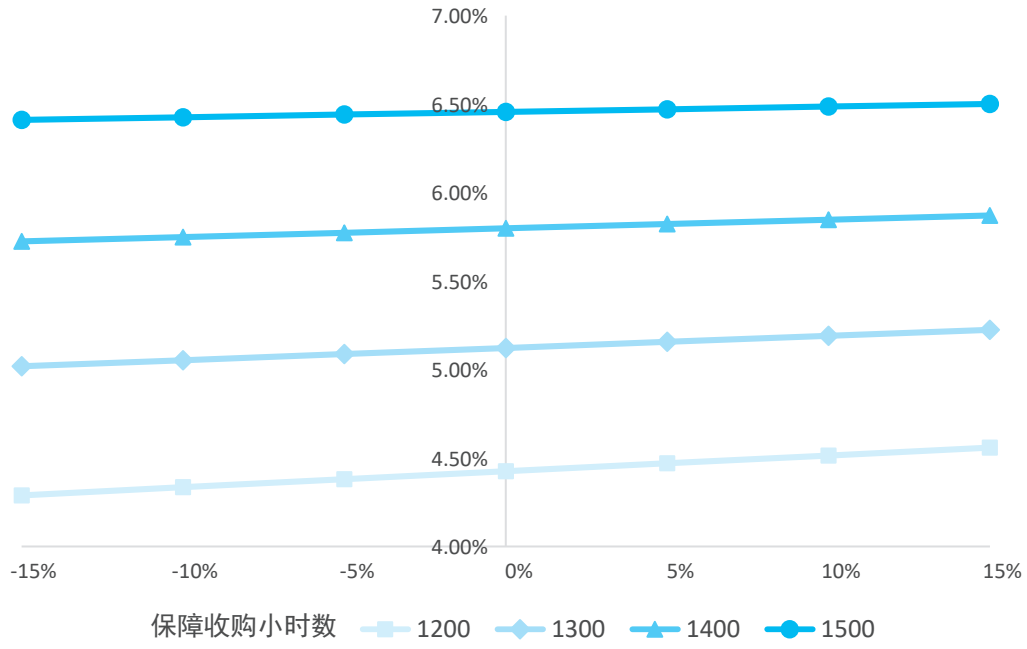


图 4-3 全投资税前内部收益率敏感性分析结果
（横坐标：市场交易价格浮动范围，纵坐标：全投资税前内部收益率）

结果表明，保障收购小时数对项目全投资税前内部收益率的影响显著，保障收购小时数越低，收购电价的变化对于内部收益率的影响越大。在保障收购小时数高于 1200 小时的情形下，若电价波动在 15% 范围内，能够保证项目内部收益率高于 4.28%。若能提高市场交易电价尤其是保障收购小时数，可以提升项目经济效益、增强抗风险能力。

2. 布尔台煤矿沉陷区发展光伏项目的环境效益分析

2.1 碳排放

二氧化碳是最主要的温室气体之一。近年来全球的二氧化碳排放正在急速上升，控制二氧化碳排放已刻不容缓。[37]

根据内蒙古自治区火力发电碳排放强度以及内蒙古基础情景下发电量，计算得出光伏发电的碳减排效益。如表 4-13 所示，若光伏发电替代同等发电规模的燃煤发电厂，则会产生巨大的碳减排效益，年碳减排为 89.61 万吨，25 年生命周期减排量为 2136 万吨。

37 魏文栋 , 张鹏飞 , 李佳硕 . 区域电力相关碳排放核算框架的构建和应用 [J]. 中国人口 · 资源与环境 ,2020,30(07):38-46.

表 4-13 发电碳排放强度与 CO_2 减排量

电力部门	燃煤发电
排放强度（千克 / 万千瓦时）[38]	10700
年减排量（万吨）	89.61
25 年生命周期减排量（万吨）	2136.00

2.2 大气污染物排放

大气污染物对于居民健康以及生态环境建设有着重大负面影响，是环境质量指标中的重要部分，直接反映了当地的空气质量情况以及治理效果。

光伏发电的大气污染物减排效益如表 4-14 所示，替代等量燃煤发电，能够有效削减大气污染物的排放，保障环境生态健康。SO_2 年削减量为 0.059 万吨，NO_X 年削减量为 0.119 万吨，CO 年削减量为 0.008 万吨，粉煤灰年削减量为 4.188 万吨，$PM_{2.5}$ 年削减量为 0.012 万吨。25 年生命周期内 SO_2、NO_X、CO、粉煤灰、$PM_{2.5}$ 减排量分别为 1.413、2.843、0.181、99.813、0.295 万吨。

表 4-14 光伏发电大气污染物减排量

污染物	SO_2	NO_X	CO	粉煤灰	$PM_{2.5}$
排放强度（千克 / 万千瓦时）[39]	7.08	14.24	0.91	500	1.48
年减排量（万吨）	0.059	0.119	0.008	4.188	0.012
25 年生命周期减排量（万吨）	1.413	2.843	0.181	99.813	0.295

2.3 重金属污染物排放

近年燃煤电厂普遍采用脱硫脱硝装置来降低大气污染物排放，然而此类装置是主要的重金属污染物排放源，在应用过程中大量重金属离子将排放到环境介质中，造成不可忽视的环境污染。

光伏发电的重金属污染物的减排效益如表 4-15 所示，单一项目的重金属污染减排

38 Jiang M , Li J , Wei W , et al. Using existing infrastructure to realize low-cost and flexible photovoltaic power generation in areas with high power demand in China[J]. iScience, 2020, 23(12):101867.

39 http://meicmodel.org/?page_id=547&version=1_3&year=2008%2C2010%2C2011%2C2012%2C2013%2C2014%2C2015%2C2016%2C2017&titleName=MEIC+v1.3

效果明显，有助于减少水体中的重金属浓度，保障居民用水安全与生态安全。重金属 Hg、As、Se、Pb、Cd、Cr 年减排量分别为 18.98、64.97、33.01、114.69、0.43、44.82 千克，25 年生命周期内减排量分别为 452.39、1548.72、786.81、2733.86、10.36、1068.36 千克。[40]

表 4-15 燃煤发电重金属污染物减排量

污染物	Hg	As	Se	Pb	Cd	Cr
年减排量（千克）	18.98	64.97	33.01	114.69	0.43	44.82
25 年生命周期减排量（千克）	452.39	1548.72	786.81	2733.86	10.36	1068.36

2.4 发电水耗

电力行业对于水资源的需求量大，而水资源消耗是环境资源消耗的重点。根据蒙西电网水耗强度计算得到水耗削减量结果（表 4-16）所示，光伏项目替代等量燃煤发电，发电水耗削减效益明显，水耗年削减量为 89.61 万立方米，25 年生命周期削减量为 2136 万立方米，对于水资源缺乏的内蒙古地区有相当程度的用水缓解作用。

表 4-16 光伏项目水耗削减量

电力部门	燃煤发电
蒙西电网排放强度（立方米 / 万千瓦时）	7.30
年削减量（万立方米）	89.61
25 年生命周期削减量（万立方米）	2136.00

2.5 布尔台光伏项目的愿景

布尔台煤矿沉陷区初步规划 5GW 光伏。分别为：纳林陶亥镇规划 1GW 光伏，占地 5.2 万亩；乌兰木伦镇规划 1.5GW 光伏，占地 8 万亩土地；红庆河镇规划 1.5GW 光伏，占地 8 万亩土地；扎萨克镇规划 1GW 光伏，用地 6 万亩。布尔台项目若能在加大

40 Wei W , Xin Z , Geng Y , et al. The reallocation effect of China's provincial power transmission and trade on regional heavy metal emissions[J]. iScience, 2021:102529.

采煤沉陷区修复力度的前提下，采用初期经验继续扩大规模，紧跟全国能源转型步伐，达到预期标准，并且将实际经验推广出去，能够显著推动中国能源结构调整与转型进程，对于中国实现“碳达峰、碳中和”目标起到很好的示范作用。

4.4 布尔台生态修复与可再生能源利用模式推广的挑战与难点

1. 光伏项目投资成本高

首先，生态修复以及光伏项目构建成本高，光伏项目总体投入为 21.4 亿元，小中型企业财政方面难以支持。并且内蒙古光伏项目储能比例计划将从 5% 上升到 15%，储能比例的上调将明显增加了项目的投资成本。

其次，内部收益率较低，全投资税前内部收益率为 4.43%，低于五年以上长期贷款基准利润率（4.9%），导致项目抗风险、通胀能力较低，贷款利率承受力有限，盈利前景一般。

再者，项目成本回收期较长，按 3.85% 的贴现率计算，全投资动态成本回收期为 23 年，高于一般光伏项目，项目成本回收时间长且收效不稳定，难以在更广泛的区域推广。此外，在调研过程中发现此类项目更多的承包商为国有企业，普通私营企业难以承接此类项目，因此很难形成大规模的推广。

2. 市场化交易价格低

由于蒙西电网清洁能源局部网架受限、终端清洁电力消纳能力缺乏，布尔台地区的保障收购小时数较低，保障收购小时之外上网电价仅为 0.055 元 / 千瓦时，成为制约光伏项目的发展的另一大因素。为破解消纳能力缺乏的难题，较好的就地解决方案是增加储能，即布尔台项目的目标方案，但储能项目成本较高，企业的成本压力大。

3. 保障利用小时数偏低

作为非领跑者光伏项目，保障利用小时数仅为 1200 小时，仅为总发电小时数的

71.64%，是光伏项目的发展推广另一层的限制因素。为破解收益保障问题，需要普遍提高保障利用小时数，若保障利用小时数能增加到 1500 小时，将提高光伏项目收益率和项目推广可行性，但这又对于电力消纳能力提出了新的考验。

4. 土地生态性质限制

光伏项目自身对于土地面积的要求较高，同时在生态修复及光伏项目建设的过程中，需要考虑区域环境的适宜性。光伏项目主要是按照“光伏 + 生态修复”的项目进行申报，根据现行政策，此类项目主要是使用戈壁、荒漠、荒草地等未利用土地，在涉及林地使用方面则限制较多。有林地、疏林地、未成林造林地、采伐迹地等均禁止使用，森林资源调查确定为宜林地而第二次全国土地调查确定为未利用地的土地可采用“林光互补”模式建设光伏电站。

布尔台煤矿位于鄂尔多斯高原东北部，以草原和荒漠地貌为主。布尔台地区光伏项目建立了 2.5 万亩的“林光互补”和“农光互补”的生态产业区。在调研过程中了解到，土地性质在不同区域定义有所差异，且在生态修复的过程中也会发生转变，导致用地情况与国家统计的情况不符的情况发生，例如部分土地在性质认定时已经被认定为保护林地，而实际情景与认定时有所差别，这给光伏项目推广带来较大限制。

5

基本结论与政策建议

5.1 基本结论

1. 中国采煤沉陷区生态修复与可再生能源利用前景广阔

中国煤炭生产与消费大国，“十三五”期间，全国煤炭行业结构不断优化，淘汰退出煤矿多达 5464 处。从目前废弃煤矿矿区所处位置来看，许多地方适合发展光伏或者风电等可再生能源。探索和推广把废弃煤矿矿区生态修复与可再生能源开发利用联结起来的模式，既能够激励煤矿开发经营者开展废弃煤矿矿区的生态修复，同时又能够将废弃矿区资源变废为宝，为国家可再生能源开发利用提供广阔的空间载体。近年来，中国积极推进开展矿山生态修复和绿色矿山建设等工作，在土地开发利用和资金投入保障等一系列政策激励下，矿山生态修复的市场化运作和修复后多元化开发模式愈加清晰。关于可再生能源开发利用，中国围绕项目建设准入、用地管理、财税优惠、消纳利用等方面出台了很多支持政策。虽然没有专门针对煤矿及废弃煤矿矿区进行可再生能源开发利用的政策规定，但在矿区开发式治理道路愈加清晰、国家支持风电和光伏等产业加速发展且给予差别化用地政策便利的情况下，推动煤矿及废弃煤矿矿区同步开展生态修复与可再生能源开发面临良好机遇。

2. 关于采煤沉陷区生态修复与可再生能源利用有众多国际经验可以借鉴

欧美发达国家在煤矿开采和矿山修复方面起步较早，在法律法规体系、资金投入机制、市场机制建设等方面有较多成熟经验；美国、德国、英国等国家在废弃矿区可再生能源开发利用方面也有诸多成功案例，建立起了较为完善的调控监管计划和市场调节机制。相比而言，中国还存在矿区生态修复立法起步较晚，实际执行中存在一些错位、偏差，管理模式、资金来源保障、技术和信息支撑体系还有待改进完善，关闭 / 废弃矿井开发利用模式较为单一、利用率较低等问题，但废弃矿区作为光伏发电的应用场所已形成了较好成效。充分发挥废弃矿区光伏发电开发利用模式示范作用，创新废弃煤矿矿区生态修复和可再生能源利用模式，可以从国外先进经验中获得有益的参考借鉴。

3. 布尔台采煤沉陷区进行生态修复的环境、经济效果明显

从环境效益角度来说，布尔台采煤沉陷区进行生态修复，一是使区域内生物多样性更加丰富，有效提高了煤矿沉陷区域生态系统稳定性；二是很好改善了采煤沉陷区的土壤质量，重建了可持续健康的土壤生态系统；三是坡面水土保持措施的拦泥沙量与蓄水

量逐年升高，通过植物和工程措施相结合的方式有效加强了矿区水土保持；四是大面积建设沙障和林草措施相结合治理风沙危害，从根本上遏制了沙化不断扩张的趋势。

从社会经济效益角度来说，布尔台采煤沉陷区进行生态修复，一是增加了植被修复产生的碳汇收益，预计布尔台煤矿沉陷区到 2030 年将产生 11,422tC 的碳汇。到 2045 年将产生 27,024tC 的碳汇，其碳汇量产生的经济效益保守估计分别为 49.6 万元、117.4 万元；二是提高了土地利用率，种植饲料灌草、灌木、作物等带来了实际经济收益，年总产值约 2788 万元；三是提供了相关就业岗位，提高当地居民就业率，增加了居民收入，项目建成达产后可带动农牧民户年均增收约 1 万元以上，实现直接就业和农牧民转变为产业工人约 1500 人。

4. 布尔台采煤沉陷区光伏发电项目环境与经济效益仍有较大潜力

在发展光伏产业的经济效益方面，布尔台沉陷区光伏项目 25 年生命周期内总发电量为 199.63 亿千瓦时；取贴现率为 3.85%，折旧及息税前利润为 1.303 亿元，平准化度电成本 LCOE 为 0.2048 元 / 千瓦时；全投资动态回收期为 23 年，远长于一般光伏项目所需的回报期；全投资静态回收期为 15 年，全投资税前内部收益率为 4.43%。保障收购小时数对项目全投资税前内部收益率的影响显著，在保障收购小时数高于 1200 小时的情形下，若电价波动在 15% 范围内，能够保证项目内部收益率高于 4.28%。提高市场交易电价尤其是保障收购小时数，可以提升项目经济效益、增强抗风险能力。

在发展光伏产业的环境效益方面，光伏项目替代等量燃煤发电，一是具有巨大碳减排潜力，年碳减排为 89.61 万吨，25 年生命周期减排量为 2136 万吨。二是能够有效削减 SO_2、NO_X、CO、粉煤灰、$PM_{2.5}$ 等大气污染物的排放，25 年生命周期内 SO_2、NO_X、CO、粉煤灰、$PM_{2.5}$ 减排量分别为 1.413、2.843、0.181、99.813、0.295 万吨。三是单一项目的重金属污染减排明显，能够有效减少水体中的重金属浓度，保障居民用水安全与生态安全，25 年生命周期内减排量分别为 452.39、1548.72、786.81、2733.86、10.36、1068.36 千克。四是发电水耗削减效益明显，水耗年削减量为 89.61 万立方米，25 年生命周期削减量为 2136 万立方米。

5. 推广布尔台生态修复与可再生能源利用模式还存在一定挑战

一是生态修复以及光伏项目构建成本高，小中型企业财政方面难以支持，并且项目内部收益率较低，成本回收时间长且收效不稳定，此类项目更多的承包商为国有企业，普通私营企业难以承接，很难形成大规模的推广。二是市场化交易价格低，由于电网清洁能源局部网架受限、终端清洁电力消纳能力缺乏，保障收购小时数与保障收购小时之外上网电价均较低，制约光伏项目发展。三是土地生态性质限制，光伏项目自身对于土

地面积的要求较高，同时在生态修复及光伏项目建设的过程中，需要考虑区域环境的适宜性，但土地性质在不同区域的定义有所差异且在生态修复的过程中也会转变，导致用地情况与统计情况不符情形发生，给光伏项目推广带来较大限制。

5.2 政策建议

1. 进一步强化矿区生态修复监管

完善管理体系，综合现有的采沉陷控制、土地复垦、地质环境治理和监测、环境监管、绿色矿山建设等领域的实践经验和具体技术规范，以矿山生态修复为统筹，构建形成“一般原则 + 具体指南 + 多层次目标”的矿山生态修复法律、政策和规范体系。强化源头管理，提高对企业编制的土地复垦方案、矿区生态修复治理方案的标准、要求，加强审查，并将治理方案作为生态修复治理验收的重要依据。严格监督矿业权人土地复垦和生态修复义务履行情况，对采矿生产过程中防治达不到要求的责令停产整顿，采矿结束后土地复垦和生态修复达不到规定标准的予以重罚。政府与治理实施主体签订合同或责任承诺，明确政策执行边界。加强动态监管，推进修复主体结合实际情况适时对生态修复规划、措施、工程、方法予以调整和改进。

2. 完善矿区用于可再生能源开发的土地利用政策

持续探索矿区“治理修复 + 土地开发利用”模式，以现有的市场化方式推进矿山生态修复政策为基础，研究制定配套的制度和办法，进一步放开复垦和修复后的土地开发利用方式，充分调动社会投资的积极性。统筹推进可再生能源推广应用与矿山生态修复工作，加强可再生能源规划与土地生态功能保护、国土空间规划等的衔接，合理规划矿区复垦和修复后的土地资源，结合实际情况将采煤沉陷区适当纳入光伏、风电项目用地，为发展光伏、风电等项目预留空间。

3. 推动可再生能源项目反哺矿区生态治理

对在采煤沉陷区开展的光伏发电无补贴项目实行更大力度的税费减免政策，如实行所得税免税等，推动企业按减免税额的一定比例提取发电收益，单列专项资金用于矿区生态修复。适当提高可再生能源发电的保障利用小时数，以保障合理收益为原则，为同

步开展生态治理、生态扶贫等的光伏项目确定一定量的平价保障小时数，依据燃煤发电基准价或竞争性配置电价实施保障性收购，推动煤矿、就近工业企业优先利用光伏发电量，企业因此增加的收益用来反哺生态恢复工作。

4. 推动清洁能源周边及外送消纳

加强可再生能源开发地区电网建设，着力完善与可再生能源开发相配套的基础设施，为矿区复垦、修复后发展可再生能源建设智能化输配电系统。充分挖掘现有跨区域输电通道输送能力，在完善省内电源富集地区和负荷中心电网的基础上，加快建设省际间电力外送新通道，做好远距离外送到高负荷中心的相关规划，提高可再生能源电力消纳比例，以增加发电企业的盈利能力，调动企业投资积极性。

5. 完善部门协调机制

加强生态环境、自然资源、林草、能源等部门间的统筹，建立推进矿山生态修复与可再生能源开发利用的部门联动工作机制。健全项目用能、用地、环评等协调机制，压缩立项审批、环评、能评以及产权证、许可证办理等各项工作时间，推动项目加快落地。明确划分各部门的监督管理职责，做到分工明确、责任清晰，协调矿山生态修复与可再生能源开发利用项目实施过程中的重大政策和问题。统一各部门对矿山生态修复标准、土地类型划分等事项的意见，建立光伏等可再生能源项目用地负面清单，适当放开采煤沉陷区域用地限制。

6. 加大绿色金融支持力度

开展“信贷 + 可再生能源产业项目”对接，鼓励支持矿区生态修复与可再生资源开发利用融合发展的绿色金融工具和服务模式创新。探索“绿色保险 + 银行 + 政府”信贷风险分担补偿机制、绿色基础设施不动产投资信托基金、绿色资产支持证券等新型绿色金融产品和服务在生态修复和可再生能源发展领域的应用。发挥政府投融资平台的作用，拓宽矿区生态修复与可再生能源开发企业的融资渠道，减轻民营企业尤其是中小型企业的资金压力。

参考文献

1. 国家统计局，https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C01&sj=2020
2. 世界能源统计年鉴 2021，https://www.bp.com/zh_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html.
3. 中国煤炭工业协会，2020 煤炭行业发展年度报告 .http://att.dahecube.com/f/210304/61aebf6c2e2674534b066b140ce0f0d6.
4. 国家能源局，国家能源局淘汰煤炭落后产能工作成效显著 .http://www.nea.gov.cn/2021-03/24/c_139832361.htm.
5. 煤炭工业协会，我国在产千万吨级煤矿已达 52 处 .http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=120629.
6. 国家矿山安全监察局，2021 年首次新闻发布会 .https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/xwfbh/202101/t20210111_376885.shtml.
7. 自然资源部，《自然资源部关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》政策解读 .http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/25/content_5463897.htm.
8. 自然资源部，中国矿产资源报告 2020.http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202010/P020201022612391799194.pdf.
9. 李金海 . 生态修复理论与实践 [M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2008.
10. 王美仙 , 贺然 , 董丽 , 李雄 . 美国矿山废弃地生态修复案例研究 [J]. 建筑与文化 . 2015,(12),99-101.
11. 梁留科 , 常江 , 吴次芳 ,BORCHARD,K. 德国煤矿区景观生态重建 / 土地复垦及对中国的启示 [J]. 经济地理 .2002,06,711-715.
12. 王行军 . 关闭矿井资源开发利用状况研究 . 中国煤炭地质 [J].2021,33(05),20-24.
13. 丁宝根 , 邹晓明 . 国外矿产资源开发生态补偿实践及对中国的借鉴与启示 [J]. 老区建设 .2017,(14):27-31.
14. https://www.osmre.gov/programs/AVS.shtm
15. 程琳琳 . 美国煤矿复垦保证金制度及启示 [J]. 中国土地 .2016,(10),43-45.
16. https://www.osmre.gov/programs/aml.shtm
17. https://www.osmre.gov/programs/TDT/geomorph/200901/Presentations/2B_Bugosh.pdf.
18. 孙清元 , 冯春涛 . 国内外矿山环境补偿机制评介与经验启示 , 中国地质矿产经济学会 2007 年学术年会 , 中国新疆乌鲁木齐 ,2007,8.
19. 张成梁 ,B.LarryLi. 美国煤矿废弃地的生态修复 [J]. 生态学报 ,2011,31(01),276-285.
20. 美国环保署 . 重振美国土地项目 .https://www.epa.gov/re-powering.

21. 霍冉 ; 徐向阳 ; 姜耀东 . 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望 [J]. 煤炭科学技术 .2019,47(10),267-273.
22. 付兴 ; 袁光杰 ; 金根泰 ; 班凡生 ; 夏焱 . 盐穴压缩空气储能库建设现状及工程难点分析 [J]. 中国井矿盐 2017,48(03),14-18.
23. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/germany/mining.pdf.
24. 江西省赴英、德煤炭开采及安全管理考察团 . 对英国、德国煤炭开采及安全管理的考察和认识 [J] . 江西煤炭科技 ,2008(01),42-43.
25. 霍冉 ; 徐向阳 ; 姜耀东 . 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望 [J]. 煤炭科学技术 2019,47(10),267-273.
26. 陈海生 . 压缩空气储能技术的特点与发展趋势 [J] . 高科技与产业化，2011，17(6):55-56.
27. 德国首创废弃煤矿储能水电站 . 能源与环境 .2017(6),25.
28. 丁伟 . 英国煤矿遗址问题研究 . 陕西师范大学 ,2010.
29. 李莎 , 董昭含 . 英国伊甸园矿坑再生景观 :20 年文化旅游运营模式研究 [J]. 工业设计 ,2020.(10),84-86.
30. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685657352968335121&wfr=spider&for=pc.
31. https://www.sohu.com/a/205193475_672753.
32. 贾恒义 , 彭琳 , 彭祥林 , 余存祖 . 黄土高原地区土壤养分资源分区及其评价 [J]. 水土保持学报 ,1994(03):22-28.
33. 张小全等 . 林业碳汇项目理论与实践 [M]. 中国林业出版社 , 2010: 318-320
34. 数据解析 2021 年全国碳市场 http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2022/0105/81701_2.html
35. “Allowance Price Explorer,” International Carbon Action Partnership, 2020, https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices
36. 鄂尔多斯市农牧局 , 鄂尔多斯市科技特派员农牧业服务创新成果展示 http://nmj.ordos.gov.cn/bmdt_79360/202012/t20201231_2830639.html
37. 魏文栋 , 张鹏飞 , 李佳硕 . 区域电力相关碳排放核算框架的构建和应用 [J]. 中国人口 · 资源与环境 ,2020,30(07):38-46.
38. Jiang M , Li J , Wei W , et al. Using existing infrastructure to realize low-cost and flexible photovoltaic power generation in areas with high power demand in China[J]. iScience, 2020, 23(12):101867.
39. http://meicmodel.org/?page_id=547&version=1_3&year=2008%2C2010%2C2011%2C2012%2C2013%2C2014%2C2015%2C2016%2C2017&titleName=MEIC+v1.3
40. Wei W , Xin Z , Geng Y , et al. The reallocation effect of China's provincial power transmission and trade on regional heavy metal emissions[J]. iScience, 2021:102529.

联系我们

地址：中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706
邮编：100026
电话：+86 (10) 5927-0688
传真：+86 (10) 5927-0699

♻ 再生纸印刷