

报告

县域低碳转型与绿色发展 ——曲沃县试点研究

2023 年 9 月

中节能生态产品发展研究中心有限公司

自然资源保护协会

中节能生态产品发展研究中心

中节能生态产品发展研究中心是中国节能环保集团有限公司所属专业从事咨询服务的全资子公司，作为节能环保领域的综合性咨询服务机构，长期致力于政府部门节能环保政策研究和规划咨询、重要国际机构节能环保课题研究、各领域重大节能环保项目工程咨询等服务。

自然资源保护协会（NRDC）

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700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40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。NRDC在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。请访问网站了解更多详情 <http://www.nrdc.cn/>

课题编写人员：

陆海	副主任研究员	中节能生态产品发展研究中心
梁安娜	研究员	中节能生态产品发展研究中心
王光泽	研究员	中国环境保护集团有限公司
潘支明	城市项目主任	自然资源保护协会
周雅婧	城市项目官员	自然资源保护协会

Cover Image by Scott Webb on Unsplash.

© Natural Resources Defense Council 2023

所使用的方正字体由方正电子免费公益授权

目 录



执行摘要	i
第1章：概述	1
1.1 曲沃县经济社会发展概况	2
1.2 曲沃县能源生产和消费现状	6
1.3 曲沃县绿色低碳发展的基础条件、挑战与机遇	7
第2章：曲沃县重点领域节能减碳潜力分析	9
第3章：曲沃县太阳能开发潜力和应用场景分析	11
3.1 县域发展太阳能的独特优势	12
3.2 曲沃县太阳能开发潜力分析	12
3.3 曲沃县太阳能应用场景分析	14
第4章：曲沃县生物质能开发潜力分析	19
4.1 全国生物质能概述和发展情况	20
4.2 县域发展生物质能的独特优势	21
4.3 曲沃县生物质能开发路径分析	21
4.4 曲沃县生物质天然气开发潜力评估	22
第5章：曲沃县其它能源开发潜力分析	24
5.1 其它能源概况	25
5.2 工业余热	25
5.3 地热能	27
5.4 污水厂余热	28
5.5 冷库排热	29
5.6 工业副产氢	29
第6章：增收节支分析	30
第7章：绿色低碳转型政策和技术建议	32
7.1 供给侧方面	33
7.2 基础设施方面	33
7.3 需求侧方面	33
7.4 储能方面	34
7.5 电力市场方面	34
7.6 商业模式方面	34



第8章：低碳转型路线图	35
8.1 近中期（2023-2030）	36
8.2 远期（2030后）	36
第9章：重点推荐项目	38
9.1 县域公共机构综合节能改造项目	39
9.2 县域生物天然气项目	40
9.3 农业产业园低碳无废改造项目	41
参考文献	43



执行摘要

山西省是我国重要的能源基地和煤炭资源大省，其绿色低碳转型不仅关乎全国“双碳”战略，而且关系山西省经济结构转型的成败。以往对山西省绿色低碳转型的研究多集中于能源部门、高耗能工业和城镇建筑，而对占全省GDP半数以上的县域甚少涉及。县域是包含三次产业的国民经济基本单元，拥有新能源开发消纳潜力和能源资源跨行业耦合基础。县城是农业转移人口就近城镇化的重要载体，承载三成的城镇人口，亟需缩小与城市在基础设施和公共服务上的差距，在资源和环境约束下释放产业发展和居民消费潜力。另一方面，我国农村已完成脱贫攻坚，作为城市与农村的纽带和桥梁，县域承担着新农村建设重任，亟需推进乡村振兴和农业农村现代化。

山西县域绿色低碳转型需要融入当地经济社会发展，改造提升传统主导产业，培育壮大新兴特色产业，吸引青壮年劳动力回乡就业创业，促进形成产业、就业、公共服务和环境质量的正向发展循环，助力以县城为载体的城镇化建设和以县域经济为载体的新农村建设。

在自然资源保护协会（NRDC）的支持下，中节能生态产品发展研究中心以山西省临汾市曲沃县作为研究对象，开展县域低碳

转型路径研究。曲沃县是晋南以重工业为主导的典型县，本研究聚焦曲沃绿色低碳转型，分析其经济社会、产业发展及能源利用的现状、趋势，评估可再生能源开发潜力和应用场景，旨在基于县域财政和国土规划约束，提出促进曲沃县绿色低碳转型的政策和技术建议，识别重点推荐项目。以下是本研究主要结论：

1、县域绿色低碳转型面临挑战

（1）县域共性挑战

县级财政承压：依靠县级财政投入难以大规模补贴绿色低碳项目投资，亟需引入不同所有制社会资本。

发展策略受限：县域如果照搬发达地区，采取适度超前的绿色低碳转型发展策略，将加重企业和居民负担。

基础设施滞后：中西部县域基础设施底子薄，建筑密度低，建设成本高，改造速度慢，投资回收长。

外部环境倒逼：县域主导产业处于产业链下游，初级产品和原材料占比高，产品同质化严重，面临上游传导的碳排放履约、ESG评级压力。

能力建设欠缺：发展思路仍停留在能源供给侧和单项技术应用上，转型能动性不强，缺乏专业人才和配套能力建设。

用地政策趋紧：新能源用地政策收紧，已有违规占地项目被拆除。

（2）曲沃县独特挑战

曲沃县是晋南钢铁、焦化集聚区，流程工业GDP占比超60%，能耗占比近80%，绿色低碳转型难度大。

2、可再生能源和余热余能的开发潜力

曲沃县目前还没有开发风电。北部崇山和南部绛山在落实生态保护的前提下，可开发集中式风电；中部盆地可结合终端应用场景发展分散式风电。

曲沃县光热资源条件虽不及晋北地区，但本地消纳能力较强，适宜利用各类建筑屋面、设施农业、交通廊道、矿山生态修复和非水源地水面发展光伏和光热，并结合需求侧场景因地制宜地设计开发利用模式，实现本地高比例消纳。曲沃县光伏开发潜力超过1吉瓦（其中分布式光伏开发潜力超过300兆瓦），年发电量超过11.5亿千瓦时。

曲沃县每年产生秸秆19万吨、粪污20万吨，目前还没有进行规模化能源利用，如果能源化比例达到40%，每年可产生物天然气约3,000万立方米，有机肥约14.4万吨。发展以农业废弃物为原料的生物质能虽然只能满足曲沃县一定比例的能源需求，但可协同处置其

它有机废弃物，改善县域生态环境，提高农产品溢价，并通过生物燃气调峰电源对县域新型能源系统提供支撑。

丰富的工业余热和副产氢是曲沃县的最大特色。曲沃县流程工业能耗占比近80%，可回收余热约为能源消耗的1/4-1/3，如果高比例回收利用工业余热，基本可满足县域内非流程工业和民用部门对中低温用热的需求，实现能源梯级利用，减少用热电气化对电力系统的冲击。曲沃县每年副产氢约4万吨，如果全部作为氢能重卡燃料，可行驶4.7亿公里，将极大促进曲沃和周边地区重载交通减污降碳。曲沃县可利用现阶段副产氢的成本优势培育壮大氢能产业链，改变“一钢独大”的产业结构。

充分利用曲沃县各类环境热能提高热泵供能效率，延缓供暖电气化增加的电力负荷。曲沃县的污水处理厂和冷库可作为冬季热泵供暖的低品位热源，满足约40万平方米建筑冬季供暖需求。集中热网未覆盖且有冷暖双供需求的公共建筑适宜就地开发利用浅层地热能。

3、绿色低碳转型的惠民效益

曲沃县发展1吉瓦光伏需要200人以上的专业运维队伍，可基于县域分布式光伏数字平台组建县域第三方分布式光伏运维平台公司，招聘本地中等教育程度劳动力，尤其是吸引外地务工的曲沃籍人员回乡就业，组织特种作业和光伏运维培训，确保100%持证上

岗。发展农村户用分布式光伏将为农村居民和村集体带来售电、租赁、看护、清洁等多种收入，同时节约用电成本。

曲沃县投建一座年产1,000万立方米生物天然气工厂，可提供厂内生产岗位约50个，间接带动厂外就业50个以上。利用电能替代增加县域就业岗位，如电动车、电动农机具维修与充换电和以电热泵为代表的家电销售、安装和维修等。探索建设乡村能源站，整合农林废弃物分布式收集、有机肥分销、农机服务、新能源技术推广等服务项目，创造稳定就业岗位，服务农村绿色低碳转型。

曲沃县企业可利用电力市场化交易节约电力成本；取得有机农产品认证，获得溢价收入；通过节能改造开发CCER；利用绿色金融工具降低融资成本。

4、主要政策和技术建议

曲沃县绿色低碳转型需要因地制宜，坚持能效优先，充分吸收山东、河北、河南等北方省份在光伏开发方面的经验和教训，平衡长期发展和短期收益，根据不同应用场景，选择对应的开发模式。

（1）能源供给

系统评估新能源开发潜力，谋划“县域源网荷储一体化示范项目”，大幅提高新能源装机规模和消纳水平。存量煤气发电机组逐步开展“适氢化”改造。结合生物天然气和煤层气利用适度发展燃气发电。

（2）能源需求

探索在钢铁冶炼流程应用绿电进行电加热，提高绿电渗透率。重点挖掘离散工业和公共机构的可中断负荷和可调节负荷，根据新能源季节出力特点合理安排停产检修时段，探索负荷聚合商和虚拟电厂应用。进一步促进电能替代，逐步淘汰存量的化石燃料锅炉。谋划建设大规模电解水制氢装置，作为县域内过剩风光电的重要消纳途径。

（3）能源存储

利用县域内污染地块或未利用地建设大规模跨季节储热，存储工业余热、太阳能光热、燃气发电余热和过剩风光电等，用于满足冬季集中供暖和全年非流程工业用热。配合工业副产氢、绿氢、生物天然气和煤层气发展，完善县域储气设施。

（4）基础设施

推进县域配电网升级改造，尤其是农网巩固提升，促进分布式可再生能源就近消纳。结合产业园区或基础好的村庄开展多能协同供应和自平衡为特征的并网型微网示范应用。搭建县域分布式光伏数字平台，基于数据驱动开展预测性维护和光伏功率预测，组织运维平台公司。

（5）电力市场

鼓励和引导重点用能企业、燃气发电企业和新型储能企业积极参与山西省电力市场交易，利用好中长期分时交易和现货交易，探索有偿需求响应，提高电力市场化水平。

（6）商业模式

鼓励本地企业和居民利用闲置屋面和空地自主投资光伏，引导不同所有制社会资本参与绿色低碳项目投资，保护合法权益。将县域集中式光伏开发纳入EOD项目统筹考虑，推动光伏+生态修复模式。鼓励综合能源服务商将分布式光伏、分散风电投资纳入产业园区综合能源系统，统一规划、分步实施，提高本地消纳水平。采用整县推进模式实施县域生物天然气项目和公共机构综合节能改造。采用能源环境一体化托管模式对重点园区实施低碳无废改造。

5、重点推荐项目

（1）县域公共机构综合节能改造项目

采用“整县推进+能源费托管服务模式”，将县域内的公共机构整体打包，委托一家节能服务公司投资改造和托管运营。公共机构综合节能改造可在传统节能改造项目外增加分布式光伏、充电桩等新项目，提高本地可再生能源开发和消纳能力；探索碳减排量开发、电力负荷聚合等新业态，成为县域公共机构碳资产管理平台

和负荷聚合商，与用能单位分享碳减排量交易和有偿需求响应市场收益。

（2）县域生物天然气项目

采用“有机废弃物资源化利用整县推进模式”，县政府组建跨部门工作组整体对接，授予沼气项目实施主体“整县禽畜粪便处理特许经营权”、“县域有机肥销售特许经营权”，并为项目实施主体协调解决物料收储，搭建收储网络，布局生物质分布式网点，协助落实下游有机肥消纳。项目实施主体享有各类支持资金。

（3）农业产业园低碳无废改造项目

以能源环境综合解决方案为抓手，引入“能源环境一体化托管模式”，推进农业产业园低碳无废改造，将园区能源托管服务和环境污染第三方治理结合，由一家能源环境综合服务商为园区经营主体和终端企业提供包括融资、设计、施工、运维全过程的能源环保托管服务，并协助园区经营主体申请支持资金，制订农产品碳足迹方法学，管理和开发园区碳资产。

第 1 章

概述

1.1 曲沃县经济社会发展概况

1.1.1 区位和交通¹

曲沃县位于山西省中南部，隶属临汾市，县域总面积 437.9 平方千米，总人口约 21 万（2021 年）。曲沃县与相邻的侯马市是晋陕豫三省经济联系的重要枢纽，区位优势明显。

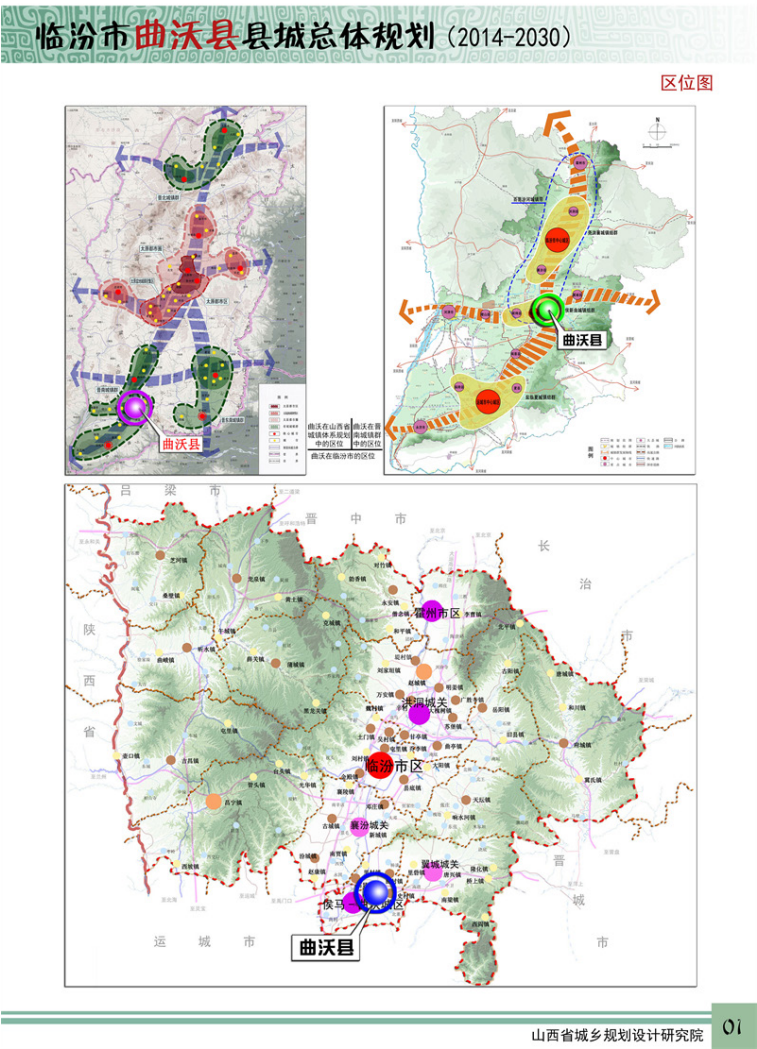


图 1-1：曲沃县域总体规划（2014-2030）（图片由曲沃县政府提供）

1 公共数据，曲沃县人民政府网官网：www.quwo.gov.cn

在自然地理区位上，曲沃县地处汾河平原中部，位于山西的主要灌区和重要商品农业生产基地，是国家级限制开发的农产品主产区。

在经济地理区位上，曲沃县处于中西部承接东部产业转移的主要通道，处于山西省经济产业重点发展轴带——大同运城经济带上，是晋南寻根溯源旅游带的组成部分，东与晋城历山、蟒河风景区相连，西可达壶口瀑布景区，处于全省“十”字型旅游带上。

在交通区位上，曲沃县地处晋陕豫省际联系中心，“十”字形对外交通框架使得曲沃县成为晋南地区重要的交通枢纽。南北向：紧邻山西省南北重要通道——大运高速以及山西与陕西的主要联系通道——大西高铁，108 国道和南同蒲铁路在县域南北向穿越，成为晋南地区乃至山西省南北交通的重要节点；东西向：晋侯高速

处于山西省高速公路网“三纵十二横”的第十一横，是晋南地区东西向交通的重要节点，侯月铁路在县域内穿过，向东可达山东日照，为承接东部沿海产业转移提供便利的交通条件。

1.1.2 人口²

曲沃县七普常住人口 216,595 人，与六普相比减少 20,438 人，减幅 8.62%，年均减少 -0.90%，2021 年末常住人口 212,289 人，常住人口出生率 7.73‰，死亡率 10.47‰，自然增长率 -2.74‰，首度转负。曲沃县七普城镇化率 45.24%，与六普相比提高 14.95 个百分点，2021 年末城镇化率 46.28%，低于临汾市平均水平 7.87 个百分点，低于全国平均水平 18.44 个百分点。

表 1-1：曲沃县人口变化趋势

曲沃县人口普查情况	第六次人口普查	第七次人口普查	变化
城镇人口（人）	71,794	97,988	36.48%
农村人口（人）	165,239	118,607	-28.22%
常住总人口（人）	237,033	216,595	-8.62%
占临汾市比重（%）	5.49%	5.45%	0.04个百分点
城镇化率（%）	30.29%	45.24%	14.95个百分点
总人口性别比	103.33	103.89	0.56
劳动年龄总人口（人）	182,563	152,483	-16%
总抚养比（%）	29.80%	42.00%	12.2个百分点
人口平均受教育年限（年）	9.13	9.75	0.62

2 （2021, 06 16）. 曲沃县第七次全国人口普查公报，曲沃县人民政府网官网：
http://www.quwo.gov.cn/ggsj/tjgb/202208/t20220826_19338.html
 （2022, 05 05）. 曲沃县 2021 年人口发展情况简析，曲沃县人民政府网官网：
http://www.quwo.gov.cn/ggsj/tjxx/202208/t20220826_19409.html

综上，曲沃县已进入人口下降周期，七普常住总人口占临汾市比重较六普下降 0.04 个百分点，劳动年龄总人口（15-65 岁）减少 16%，2.5 万劳动力常年在外，从事保安、家政、个体经营等职业，足迹遍及大半个中国；城镇化率和人口文化素质持续提高，仍有较大上升空间。七普总抚养比（少儿抚养比 + 老年抚养比）42%，虽较六普上升 12.2 个百分点，尚低于全国平均水平 4.3 个百分点。

1.1.3 经济发展³

“十三五”时期，曲沃县地区生产总值突破百亿元，年均增速 6.9%。2021 年，曲沃县地区生产总值完成 158 亿元，按可比价格计算增长 12.3%，其中第一产业增加值 22.2 亿元，增长 7.8%；第二产业增加值 99.7 亿元，增长 16.9%；第三产业增加值 36 亿元，增长 5.9%，三次产业结构比为 14.1: 63.1: 22.8，第二产业占比较 2016 年提高了 7.5 个百分点，产业结构以工业为主导，依赖钢铁、焦化等重工业拉动 GDP 增长。

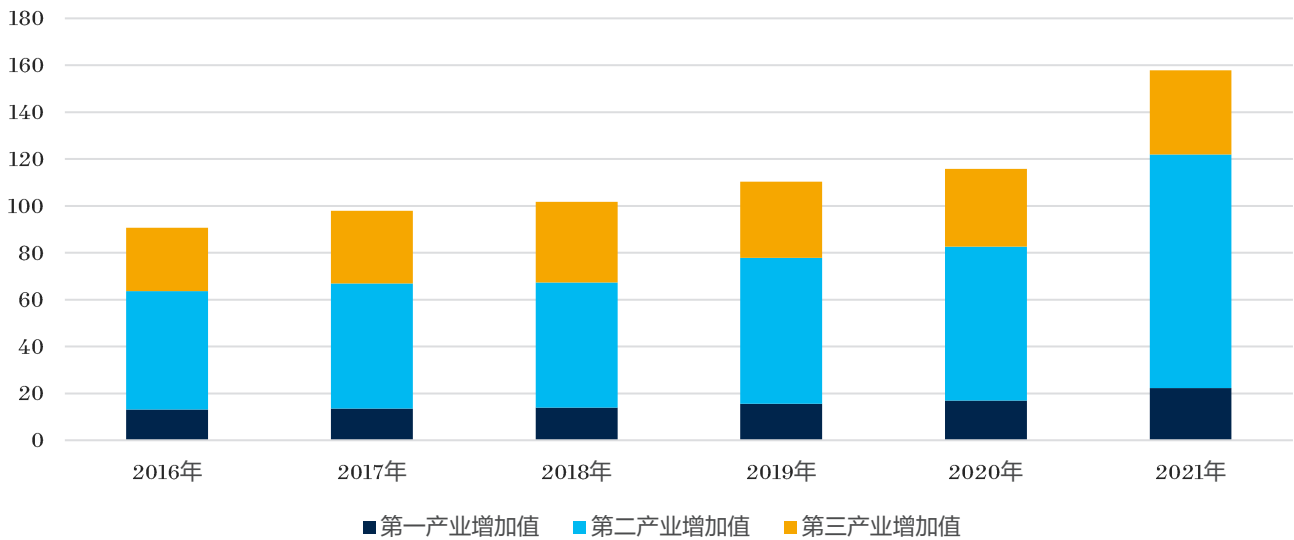


图 1-2：曲沃县“十三五”以来国民生产总值（亿元）

2021 年，曲沃县实现农林牧渔业总产值 35.8 亿元，全年粮食播种面积 47.1 万亩，其中小麦 25.2 万亩，产量 8 万吨；玉米 21.4 万亩，产量 7.9 万吨；肉类总产量 1.2 万吨。粮食播种面积和产量较 2016 年减少 8.53% 和 23.19%。根据 2022 年曲沃县政府工作报告，曲沃县粮食播种面积需要稳定在 47 万亩，产量稳定在 16 万吨以上，坚持稳粮保粮，执行最严格的耕地保护制度，坚决遏制耕地“非粮化”、防止“非农化”。

2021 年，曲沃县拥有规模以上工业企业 32 家，完成营业收入 797.4 亿元，增长 39.3%，利润总额 39.4 亿元。全县实现规模以上工业总产值 706.3 亿元，其中重工业占总产值 99.9%，生铁产量 766.2 万吨，粗钢产量 913.9 万吨，钢材产量 978 万吨，焦炭产量 382.9 万吨，较 2016 年增长 78.48%、56.68%、19.76%、600%，分别占临汾市总产量 60.53%、71.57%、74.28%、23.75%，已成为临汾市钢铁、焦化产业集聚区。两大民营钢铁企业（晋南钢铁、通才钢铁）入围民企五百强，贡献工业增加值 80% 以上。

3 统计公报，曲沃县人民政府网官网：<http://www.quwo.gov.cn/ggsj/tjgb/>

2021 年，曲沃县财政总收入 13.5 亿元，一般公共预算收入 5.7 亿元，一般公共预算支出 15 亿元，年末地方政府债务余额 6.8 亿元，财政自给率 38%，较 2016 年提高 19 个百分点，与临汾市水平基本一致；政府负债率 120%，较 2016 年下降 45 个百分点，县域财政状况持续改善。

2021 年，曲沃县人均生产总值 73644 元，人均可支配收入 26,644 元（城镇常住居民 40,148 元，农村常住居民 19,294 元），按现价计算，较 2016 年增长 99.27% 和 45.13%，比临汾市 2021 年同期高 52.04% 和 3.64%，处于临汾市下辖县中上等水平。

1.1.4 产业布局

曲沃县产业格局以冶金工业和文化旅游为主导，现代农业为基础，现代物流、农副产品加工、铸造业为支柱，装备制造、战略性新兴产业（节能环保产业、生物医药产业、新能源产业、新能源汽车产业）、新型建材、生产性服务业为新的经济增长点，努力实现传统产业新型化、新型产业规模化、产业发展循环化、经济发展低碳化，加快产业结构转型升级和园区建设，提高产业集中度，提升区域竞争力，着力形成“一环、五园”的产业空间布局。

“一环”：指由 108 国道、234 省道、县乡道组成，是全县重点打造的产业集聚环。

“五园”：曲沃千万吨级钢铁工业园区、马庄科技创新园区、山西国际陆港综合保税园区曲沃项目区、三星好利精密铸造循环经济工业园区、紫金山黄金产业开发工业园区。

1.1.5 地理和气候

曲沃县位于东经 111 度 24 分—111 度 37 分、北纬 35 度 33 分—35 度 51 分之间，隶属山西省临汾市，位于山西省中南部，北依塔儿山（崇山）、桥山、圪顶山和襄汾县为界，南靠紫金山（绛山）同绛县为邻，东与翼城县接壤，西北隔汾河和襄汾县相望，西南与侯马市毗连。

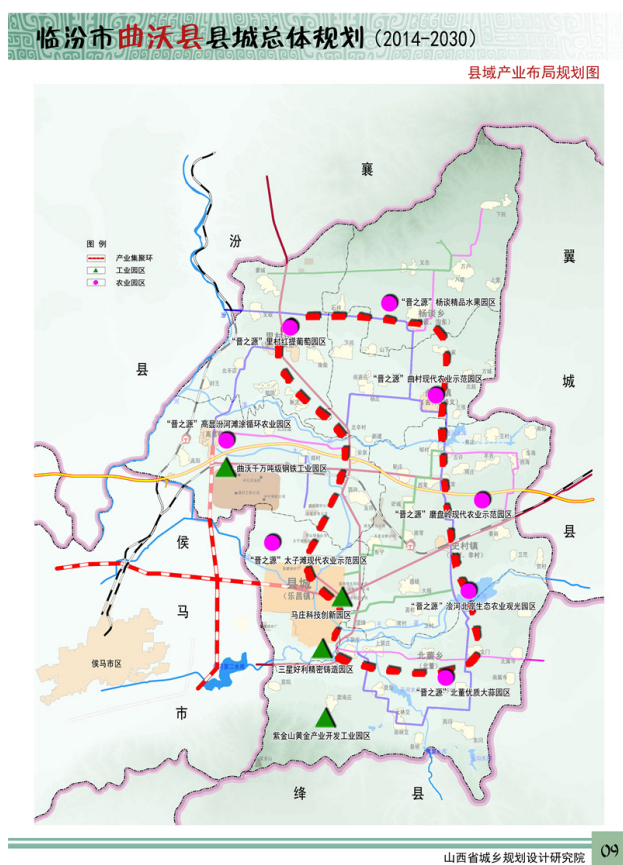


图 1-3：曲沃县县城总体规划（2014-2030）
（图片由曲沃县政府提供）

曲沃县属暖温带半干旱大陆性气候，气候温和、四季分明、光照充足。全年无霜期 210 天，初霜一般出现于 10 月中旬末下旬初，最早在 9 月下旬，终霜期出现于 4 月上旬。一般在 11 月中下旬地面开始有冻土，次年 2 月中下旬开始解冻，最大冻土深度 52 厘米。光热资源丰富，年平均日照时数为 2,387.8 小时。春冬两季多风，春季东南风偏多，冬季西北风偏多，年平均风速 1.8 米/秒，风力 2 级。最大风力 8 级，年平均出现 3 次左右。

1.1.6 地形地貌

曲沃县地处侯马断陷盆地东部。盆地呈东西向展布，大部为冲积平原。地貌主要为平原和丘陵。其中平原区主要分布在浍河、汾河流域及太子滩湖积平原，面

积 303.46 平方千米，占全县总面积的 69.4%。地面坡度在 3 度左右，海拔 400—500 米，地势平坦，沟壑较少，是主要农业产区。

1.1.7 地质水文

曲沃境内除南北两山出露基岩外，其余均为黄土所覆盖。地表水体主要为河流与水库，地表、地下水可利用量达 1 亿立方米，主要河流有汾河、浍河、滏河、黑河、天河、曲村河和排碱渠七条河流，泉水有沸泉、西海温泉、太子滩温泉。全县共有水库 9 座（1 座省管水库，2 座降等水库，6 座县管水库），总库容 17,980 万立方米，浍河水库库容量达 1 亿立方米，为晋南地区最大的水库。地表水可利用量 7,812 万立方米，工业水资源为 4,046 万立方米，非水源地露天水面面积 7,776 亩。

1.2 曲沃县能源生产和消费现状⁴

1.2.1 能源生产情况

2022 年曲沃县规上工业总发电量 17.43 亿千瓦时（其中煤气发电量 16.95 亿千瓦时，光伏发电量 0.48 亿千瓦时），焦炭产量 362.6 万吨，LNG 产量 12.15 万吨，氢气产量约 4 万吨。

1.2.2 电力和可再生能源发展情况

截至 2022 年底，曲沃县累计电力装机容量 719.5 兆瓦，电源包括煤气发电和光伏发电两种，没有煤电、风电、生活垃圾发电和农林生物质发电。煤气发电均为钢厂的自备电厂，总装机容量 477.5 兆瓦。光伏发电总装机容量 242 兆瓦，其中分布式光伏备案容量 129.5 兆瓦，常住人口人均光伏装机 1.14 千瓦。禽畜养殖有小规模沼气应用，但早期实施的小沼气池项目基本处于闲置状态。秸秆以肥料化利用为主（13 万吨/年），饲料化利用为辅（3 万吨/年），综合利用率 94%。

晋南钢铁与中国华能拟合作建设 1,300 兆瓦“新能源+储能”项目。该项目一期 300 兆瓦光伏已于 2023 年并网发电，项目新建 300 兆瓦光伏发电、220 千伏升压站和储能设施，占地面积约 6,700 亩，总投资 13.1 亿元。电站建成后年发电量约 4.3 亿千瓦时，如果全部用于电解水制氢，每年可生产氢气约 1 亿立方米。晋南钢铁利用厂区内闲置空地和厂房屋面建设 120 兆瓦分布式光伏，也已全部并网发电。

1.2.3 能源消费情况

2022 年曲沃县能源消费总量 689.74 万吨标煤（等价值，下同），规上工业能源消费总量 675.95 万吨标煤，年消费 5,000 吨标煤以上高耗能企业 14 家，能源消费总量与钢铁行业产量高度相关。城镇居民用电量 7,602 万千瓦时，农村居民用电量 11,643 万千瓦时。

1.2.4 能效情况

2022 年，曲沃县主要工业产品全部达到国家钢铁行业能效目标，高炉 365.21 千克标煤/吨，转炉 -28.66 千克标煤/吨，焦化 137.33 千克标煤/吨，水泥 7.15 千克标煤/吨。

2022 年，曲沃县完成中条水泥、胜利工贸两家企业的供热解绑工作，共改造 329 户。曲沃县利用晋南、通才两家钢厂的工业余热和侯马热电厂余热为县城及周边村提供集中供热。地热应用包括 3 对 6 口井，供热面积约 20 万平方米，出水温度不到 40 摄氏度。曲沃县从 2018 年开始大力推进清洁取暖改造，截止 2021 年底，共完成 6.2 万户、857.47 万平方米改造任务，其中煤改气 2.8 万户，401.48 万平方米，集中供热 2.5 万户，432.77 万平方米，煤改电 4672 户，57.42 万平方米，基本实现清洁取暖全覆盖。

曲沃县共有 104 家县城和乡镇党政机构，供热面积 65.25 万平方米，2022 年共消耗电力 1,884.7 万千瓦

⁴ 根据曲沃县现场调研数据整理

瓦时，天然气 32.3 万立方米，汽油 36.7 万升，柴油 27.52 万升，综合能耗 7,541.72 吨标煤。

1.3 曲沃县绿色低碳发展的基础条件、挑战与机遇

1.3.1 绿色低碳发展的基础条件

曲沃县经济社会发展水平在临汾市乃至晋南地区处于中上水平，拥有千万吨钢铁产能和与之配套的焦化、水泥产业，是重工业集聚区。晋南钢铁已率先构建钢化联产模式，成为山西省“氢能产业链链主”企业。

曲沃县工业能效水平较高，工业余热开发潜力巨大。工业余热虽不属于可再生能源，但如果合理回收利用，能替代化石能源，促进能源梯级利用，形成生产部门内部、生产部门和生活部门之间的能源耦合，有利于降低全社会能耗和碳排放。目前曲沃县对工业余热的利用方式只有冬季集中供暖，未来可开发大规模跨季节储热，克服余热排放和用热需求在时空上的错配，缓解主动/被动停产限产影响，实现工业余热全年高比例回收利用，取消冬季供暖的燃气调峰热源，带动县域内的非流程工业用热全面淘汰化石能源，减轻用热电气化对电力系统的冲击。

曲沃县水资源丰富，但地形地貌以盆地平原为主，缺乏水电和抽水蓄能开发潜力。北部崇山和南部绛山在落实生态保护的前提下，可开发集中式风电；中部盆地风力资源一般，但可结合终端需求场景发展分散式风电。曲沃县光热资源较好，可开发潜力巨大，而且本地消纳能力较强，适宜发展太阳能光伏和光热应用，但要因地制宜地设计开发利用模式，避免“一刀切”。曲沃县是传统农业强县，农业废弃物资源丰富，目前生物质能开发尚处于初级阶段，具备规模化开发潜力。

曲沃县已建成和规划建设的污水处理厂、冷库、变电站都能为周边生产生活提供全年稳定的低品位热源。同时，因地制宜地开发浅层地热能进行冷暖双供，能显著提高综合能效，减少电力增容。

1.3.2 绿色低碳发展面临的挑战

1.3.2.1 县域共性挑战

- 县级财政难以独立支撑绿色低碳转型。我国经济面临需求不足和下行压力，县域受分税制和土地出让收入减少影响，财政压力尤其突出，依靠县域本级财政投入难以补贴可再生能源开发，亟需引入不同所有制的社会资本。
- 绿色低碳发展难以照搬发达地区模式。我国长期存在城乡二元结构，县域尤其是广大农村的经济社会发展水平长期落后于城镇，居民人均可支配收入偏低，周边大中城市的虹吸效应使消费能力强的青壮年人口不断流失。县域绿色低碳发展如果照搬发达地区模式，采用适度超前的发展策略，势必加重企业和居民负担。
- 基础设施发展滞后，投资成本高。光伏、风电和电动车对县域配电网、充电桩等基础设施的容量和管理水平提出了更高的要求。我国中西部县域基础设施发展水平普遍落后于周边城市，县城与农村之间、各乡镇之间发展不平衡；县域建筑密度低，基础设施建设成本高，改造速度慢，投资回收难。
- 外部环境倒逼能源结构转型。我国已搭建全球最大的强制碳市场，首批纳入电力行业，未来还将逐步扩展到钢铁、有色、建材等高能耗、高排放行业。全国自愿减排市场也进入启动倒计时，由此引入的碳排放履约成本、ESG 评级等机制将倒逼产业链主导企业开源节流，加快能源结构转型。县域主导产业通常处于产业链中下游，初级产品占比高，产品同质化强，必将面临来自产业链上游传导的压力。
- 对可再生能源的认识水平和能力建设有待提高。县域地方政府和重点企业普遍认识到双碳战略和可再生能源发展的重要性和紧迫性，但发展思路仍停留在能源供给侧和单项技术应用上。煤炭消费主导的县域不同程度地存在路径依赖，对可再生能源替代有“等靠要”心理，转型能

动性不强。熟悉可再生能源技术和市场开发的专业人才不足，亟待加强配套能力建设。

- 新能源用地政策逐步收紧。各级政府落实生态保护红线、永久基本农田和城镇开发边界三条控制线，随着新能源用地政策逐步收紧，已有违规占地项目被强制拆除。

1.3.2.2 曲沃县独特挑战

- 钢铁行业主导的产业结构增加了能源转型难度。钢铁行业是中国碳排放最高的制造行业，占比高达 16%。由于化石能源消耗高，高温高热需求大，固定资产寿命长，过程排放暂时无法取消和可再生能源应用成本较高等因素，钢铁行业及其所属的流程工业是最难减排的产业部门，给曲沃县能源转型提出严峻挑战。

1.3 绿色低碳发展的机遇

1.3.3.1 县域共性机遇

- 国家政策促进可再生能源增量发展。双碳目标的提出，为可再生能源产业大发展吹响了号角，吸引社会资本相继涌入。国家发改委明确能耗双控原则，新增可再生能源消费不纳入能源消费总量控制，将激励县域发展可再生能源满足增量能源需求，助力产业发展和新型城镇化建设。县域生产生活电气化也将提高对本地新能源发电的消纳能力。
- 可再生能源已具备成本比较优势。最近十几年，光伏和风电技术快速迭代，度电成本大幅下降，我国大部分省份已实现平价上网⁵，未来仍有进一步下降空间。可再生能源替代存量化石能源，加速实现能源转型的时机已经成熟。
- 利用资源优势为产业赋能。太阳能和风能的能量密度低，占地大，随着硬件成本不断降低，地租在风光电成本中的占比越来越高。县域地

租相对较低，生产的风光电除满足自身需求外，还可供应周边城市，成为县域未来重要的支柱产业。中东部县域靠近全国电力负荷中心，发展风光电可降低长距离输电损耗。县域拥有丰富的农业废弃物资源和土地资源，适于发展各类生物质能应用和光伏 + 农业，为农业农业现代化、乡村振兴和三产融合发展赋能。发展可再生能源产业和节能服务产业，可创造潜在就业机会，吸引青壮年劳动力回乡就业创业。

1.3.3.2 曲沃县独特机遇

- 实施战略拉动，主动对接各级战略。曲沃县地处国家“一带一路”大商圈，连接关中平原城市群和中原城市群，可对接黄河流域生态保护和高质量发展国家战略、山西转型综改试验区、能源革命综改试点、临汾建设省域副中心城市等省市区域战略，助力可再生能源高质量发展。
- 依托产业优势，培育氢能产业链。晋南钢铁已率先构建起“钢铁 - 焦炭 - 化工 - 氢能”一体化产业模式，不仅减少自身碳排放，还将通过售氢、加氢发挥跨行业协同减碳作用。利用工业副产氢在现阶段的成本优势培育壮大曲沃县氢能产业链，改变“一钢独大”的产业结构，远期探索规模化绿电制氢、生物制氢、氢能炼钢、氢能装备等发展方向，提高曲沃县氢能产业发展水平。
- 延申产业链条，促进三产融合发展。曲沃县可以绿色低碳转型为导向布局延申现有产业链，优化产业结构，利用晋陕豫黄河金三角智慧果蔬成果转化示范县机遇，大力开发“农光互补”和生物质能，通过与现代农业深度结合的余热和可再生能源应用，逐步取代化石能源，改善区域环境质量，打造绿色循环农业，进而提高农产品溢价和农民收入，实现生态产品价值提升，形成良性发展格局。

5 中国电力企业联合会. (2023). 2023 年度全国电力供需形势分析预测报告.

第 2 章

曲沃县重点领域 节能减碳潜力 分析

“十三五”以来，山西省积极推动钢铁行业产能减量置换，要求1,200立方米以下高炉、100吨以下转炉（电炉）、50吨以下合金电炉逐步实施产能置换。曲沃县两大钢铁企业相继投产一批先进钢铁产能，晋南钢铁新建4×1,860立方米高炉和4×150吨转炉，通才工贸新建1×280立方米高炉、2×100吨转炉和65吨合金电炉。

曲沃县已成为临汾市乃至山西省重要的钢铁和焦化产业集聚区，显著提高了区域钢铁产业装备水平，降低了单位产品能耗、碳排放和污染物排放，但客观上也加强了曲沃县域经济对重工业的依赖。钢铁、焦化能耗占全县能耗总量近八成，钢铁、焦化行业的产量控制和压减、余热余能利用、能效提升和产业结构调整升级仍是曲沃县压减能耗总量和能耗强度的关键。

曲沃县先进产能占比高，钢铁和焦化能效提升对曲沃县削减能耗总量的贡献较小。2021年，晋南钢铁吨钢综合能耗502千克标煤，低于当年全国钢铁行业吨钢综合能耗平均水平（550.43千克标煤）。2022年，曲沃县钢铁、焦化工序能效（高炉365.21千克标煤/吨，转炉-28.66千克标煤/吨，焦化137.33千克标煤/吨）均达到行业基准水平，如果保持2022年生铁、粗钢、焦炭产量不变，并达到国家标杆能效标准，钢铁和焦化产业总能耗还能下降约15万吨标煤，仅占2022年曲沃县能耗总量的2%。

根据有关机构预测⁶，2030年我国粗钢产量约9亿吨，如果届时曲沃县粗钢年产量下调至900万吨，其中长流程粗钢750万吨（仅保留“十三五”以来投产的先进产能），短流程电炉钢150万吨，焦炭300万吨，水泥80万吨，工业能效都达到标杆水平，长流程工业总能耗将达到约425万吨标煤，较目前下降约100万吨标煤。

晋南钢铁已购入400辆氢能重卡和50辆电动装载机，利用工业副产氢和绿电发展短倒运输和中长途运

输示范，3年内计划推广使用1万辆氢能重卡，建设氢能零碳智慧物流平台，将有力推动曲沃县乃至周边地区货运交通减污降碳。

钢铁工业余热是曲沃县城及周边公共建筑和2.5万户居民冬季供暖的主要热源，但只能利用冬季4-5个月，超过半年的非供暖季余热被白白排放。工业余热是工业生产的副产品，不仅受生产工艺影响，而且受环保限产、错峰限产等人为影响，存在较大的波动性。曲沃县可在非供暖季将钢铁余热作为非流程工业热源或存入大规模跨季节储热中，充分挖掘钢铁、焦化等流程工业的余热潜力，缓解停产限产对余热供热的影响，带动县域相关产业降本提效、节能减排。

晋南钢铁将基于长流程炼钢的钢化联产作为钢铁绿色转型发展方向，回收各类煤气生产化工产品、LNG和氢气，碳排放下降幅度高于综合能耗下降幅度，2022年吨钢二氧化碳排放已达1.4吨，较行业平均水平低0.3吨。曲沃县如果保持长流程粗钢年产量不变，吨钢二氧化碳达到1吨，每年将减排二氧化碳320万吨，符合未来以碳排放双控为导向的考核机制。

我国城镇化已进入后半程，建筑用钢需求将逐渐下降。曲沃县钢铁产业需要适时调整产品结构，逐步减少建筑用钢比重，为新能源、高端装备制造等战略性新兴产业研发生产高附加值钢铁制品，降低单位产值能耗强度和碳排放强度；研发生产输氢专用钢管，助力延申氢能产业链。

曲沃县公共机构能耗占比低，节能减碳贡献小，但公共机构节能改造的阻力小、见效快、模式成熟，适于优先实施。县域公共机构产权明晰、建筑能耗强度较高，但单个机构的建筑规模较小，曲沃县可采取“整县推进”模式，将县域内的公共机构整体打包，吸引社会资本投资系统改造，提供能源托管服务。湖北省县级市宜都的成功经验⁷可为曲沃县提供参考。

6 汪旭颖，吕晨，管志杰，蔡博峰，雷宇，严刚，李冰。（2022）. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究. 环境科学研究, 339-346.

7 张胜杰. (2022, 8 1). 湖北宜都率先启动 174 家公共机构能源托管服务——公共机构试水整县能源托管. 中国能源报.

第 3 章

曲沃县太阳能开发潜力和应用场景分析

3.1 县域发展太阳能的独特优势

县域发展太阳能有利于就近替代存量化石能源或满足能源增量需求（新增可再生能源消费不纳入能源消费总量），提高终端电气化率，促进县域产业发展和人民生活水平提升，助力县域能耗双控目标和碳达峰工作。

光伏系统投资中的场地租金占比越来越高，县域的场地租金、建筑密度和建筑高度较低，遮挡较少，有利于降低光伏系统投资成本，促进光伏规模化开发。中东部县域靠近全国电力负荷中心，发展本地光伏发电可减少长距离输电损失，为周边城市提供富裕的绿色电力，提高本地收入。

县域太阳能开发可与农业大棚、禽畜圈舍、养殖水面、物流仓储、文旅康养、自来水厂、污水处理厂等丰富的应用场景结合，打造光伏/光热+应用，提高本地消纳水平，促进县域产业绿色发展。

发展太阳能可为农业经营主体降低能源开支，提供售电、租赁或清洁服务收入，为县域创造光伏专业运维岗位，带动电动车、电动农机等相关行业间接创造就业岗位，促进居民增收，助力县域经济发展。

3.2 曲沃县太阳能开发潜力分析

山西省南北长约 550 千米，东西宽约 290 千米，地处中纬度大陆性季风气候区，日照时间较长。从太阳能辐射的空间分布看，全省年总辐射量介于 4,600-5,800 兆焦/平方米·年，南北差异超过 1,100 兆焦/平方米·年，山西北部为太阳总辐射高值区，平均总辐射量 5,300 兆焦/平方米·年，中心地区接近 5,800 兆焦/平方米·年，属于 B 级很丰富地区。山西中南部总辐射量在 5,200 兆焦/平方米·年以下，属于 C 级丰富地区。

利用业内常用的 Meteonorm8.0 软件，代入历史气象数据模拟计算，曲沃县多年平均水平年总辐射量为 1,361 千瓦时/平方米·年（4,900 兆焦/平方米·年）；12 月最低，为 59 千瓦时/平方米·月；5 月最高，为 163 千瓦时/平方米·月；二者比值为 0.36，达到 B 级太阳能资源稳定度。曲沃县全年水平面直接辐射量 547 千瓦时/平方米，仅占总辐射量 40%，属 C 级太阳能资源直射比，安装跟踪支架的收益较低，建议以固定式支架为主。曲沃县全年气温和风速都在光伏系统正常工作范围，年雷暴日 31.1 天⁸，需要合理设计防雷接地系统。

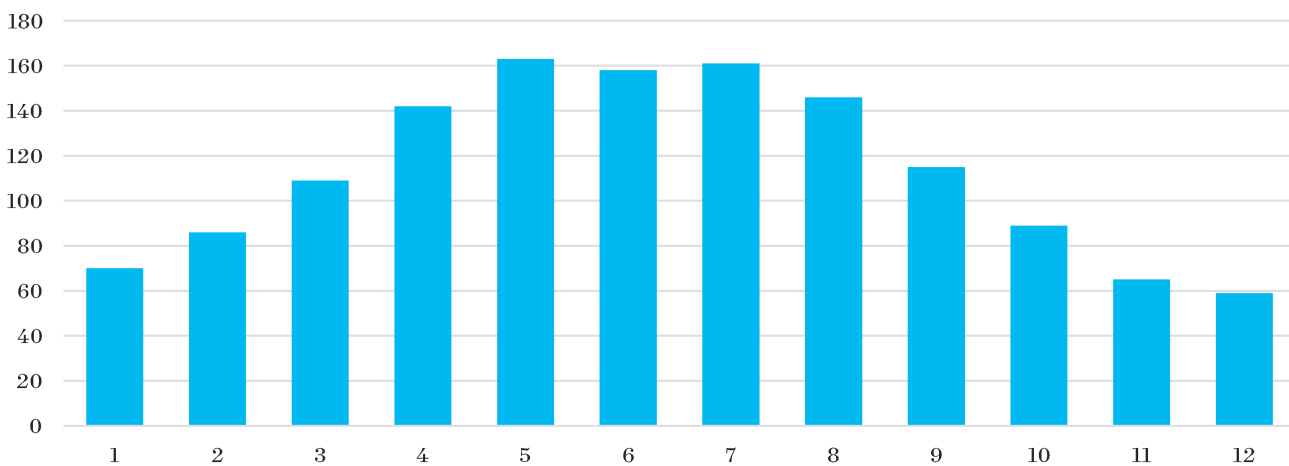


图 3-1: 曲沃县太阳能辐射量月度分布

8 (2016). 全国各地雷暴日资料整理. 建筑电气. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA5MTU2MDQzNw==&mid=2651552157&id_x=1&sn=a3b0fc83b90f921a5ca65978a3f544fe&scene=27

综合分析，曲沃县太阳能辐射量属全国太阳能资源 C 级地区，太阳能资源丰富且稳定，虽不及山西北部地区，但仍有较大的开发价值。截至 2022 年底，山西省累计光伏装机 1,696 万千瓦，2025 年计划达到 5,000 万千瓦⁹，2023-2025 年需新增约 1,100 万千瓦 / 年，按照曲沃县常住人口占山西省比例，曲沃县 2023-2025 年平均每年需新增 67 兆瓦光伏装机，相当于 2022 年底曲沃县光伏总装机的 27.7%。根据《山西省推进分布式可再生能源发展三年行动计划（2023-

2025）》，屋顶分布式光伏项目和“全部自发自用”地面分布式光伏项目在落实各项建设条件的基础上，不再纳入山西省年度计划，由各地能源主管自行组织实施。

以曲沃县 1 兆瓦光伏系统为例，选用晶硅电池组件，取最优固定安装倾角 32 度，首年满发小时数 1,250 小时，首年衰减率 2%，此后每年衰减 0.55%，25 年年均发电 115 万千瓦时，多年年均等效利用小时数 1,150 小时。

表 3-1：1 兆瓦光伏 25 年发电量

年份	1	2	3	4	5
年发电量	125	122	121	121	120
年份	6	7	8	9	10
年发电量	119	119	118	117	117
年份	11	12	13	14	15
年发电量	116	115	115	114	113
年份	16	17	18	19	20
年发电量	113	112	112	111	110
年份	21	22	23	24	25
年发电量	110	109	109	108	107
25年年均					115

2022 年，在太阳能光伏等效利用 1,200 小时地区，地面集中光伏电站 LCOE 约 0.28 元 / 千瓦时，分布式光伏 LCOE 约 0.27 元 / 千瓦时¹⁰。山西省燃煤发电基准电价 0.332 元 / 千瓦时，曲沃县多年等效利用小时数略低于 1,200 小时，集中式和分布式 LCOE 应在 0.3 元 / 千瓦时以内，光伏已具备平价上网条件，在国家

地方补贴均取消的背景下，可以实现盈利。随着光伏装机容量增长，未来中午将调整为谷电时段，工商业光伏项目可能需要更大容量配储以实现盈利。

近年山东省出现了集中汇流开发模式，光伏投资公司从全村农户统一租赁屋面并整合开发，将各户屋面的

9 山西省人民政府，山西省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，山西省发展和改革委员会：https://fgw.shanxi.gov.cn/fggz/wngz/fzgh2/202104/t20210416_177332.shtml

10 中国光伏行业协会，(2023). 中国光伏产业发展路线图 (2022-2023 年)

光伏发电集中汇流至一台或多台专用升压变压器高压并网（10 千伏），其实质是把分布式光伏变为集中式光伏，优点是就不再受村级变压器容量限制，缺点是新增的专用变压器需要一定装机规模分摊成本，不支持农户自主投资，必须全额上网。

调节为特征的光伏开发形式，具有贴近用户负荷，减少输配损失等优势。曲沃县分布式光伏应用场景可分为户用、工商业（含公共机构）两大类。

3.3 曲沃县太阳能应用场景分析

分布式光伏是在用户所在场地或附近建设运行，以用户侧自发自用为主，多余电量上网在配电网系统平衡

县域户用分布式光伏主要利用农村住宅屋面或周边空地建设。北方户用分布式光伏已在山东、河北、河南得到广泛推广，但受限于村级变压器容量，推广初期无法做到应铺尽铺。

3.3.1 户用分布式光伏

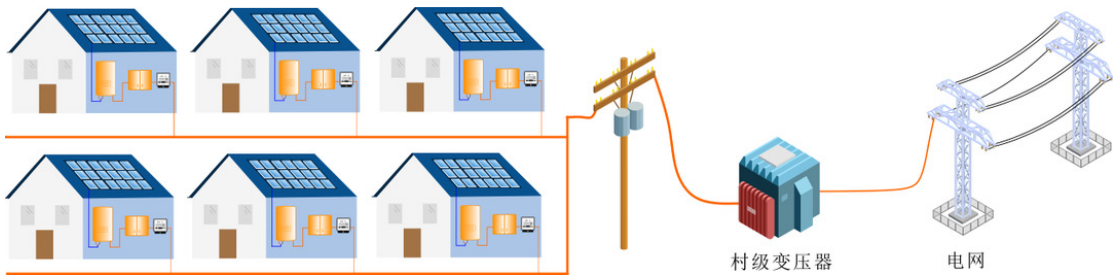


图 3-2：农村传统户用光伏模式¹¹（农户安装逆变器、计量表，通过原有农网线路和村级变压器在低压侧并网）

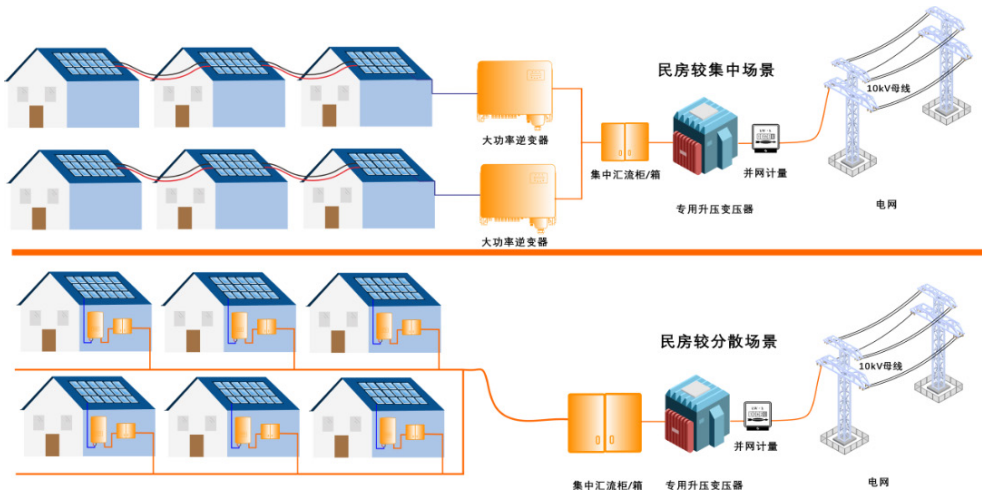


图 3-3：集中汇流模式¹²（屋面整合开发，根据场景选择合适容量的逆变器，最后集中汇流至一台或多台专用升压变压器，在高压侧并网。）

11 （2022）. 整县推进一整村集中汇流解决方案. 阳光工匠光伏网: <https://mp.weixin.qq.com/s/2HI3-VjISPIrXETK5pZrA>

12 （2022）. 整县推进一整村集中汇流解决方案. 阳光工匠光伏网: <https://mp.weixin.qq.com/s/2HI3-VjISPIrXETK5pZrA>

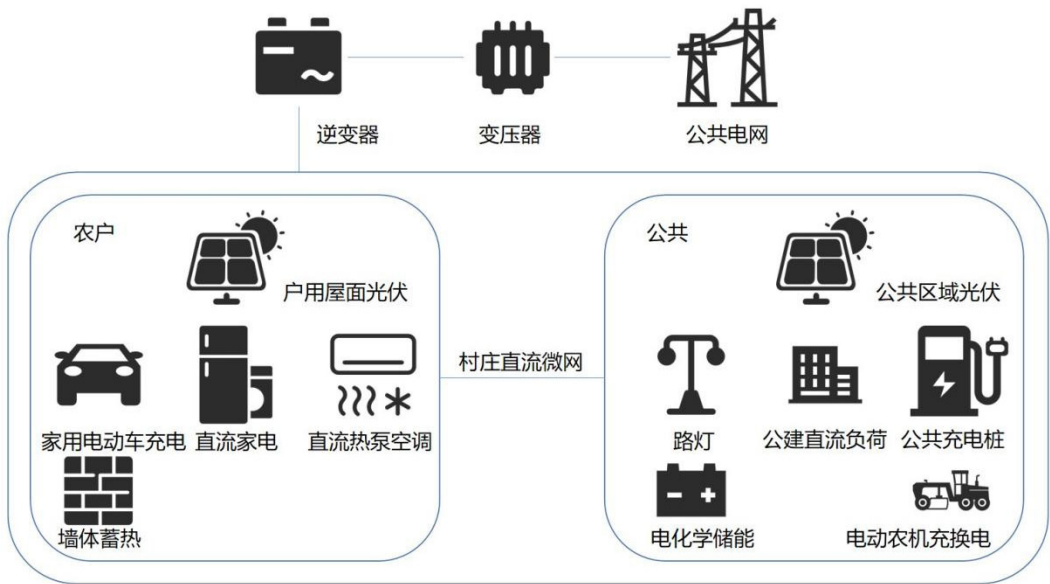


图 3-4：农村直流微网模式（农村终端用电电气化、直流化，搭建村庄直流微网，通过各类直流负荷 / 储能的有序互动，实现分布式光伏发电的高比例本地消纳）

为促进光伏本地消纳，减轻电网负担，业内也在探索农村直流微网（光储直柔）模式，这是一套由分布式光伏、供暖电气化、围护结构保温和蓄热改造、直流家电、电动车 / 电动农机充电和直流微网构成的源网荷储综合能源系统。

曲沃县农村住宅户均屋面水平投影面积按 100 平方米考虑，总计 45,000 户，如果能铺设 25% 的农宅屋面，总装机容量约 112.5 兆瓦。截至 2022 年底，曲沃县户用分布式光伏装机容量约 30 兆瓦，仍有很大的发展潜力。

3.3.2 工商业分布式光伏

县域工商业分布式光伏利用非居住建筑物或构筑物安装，曲沃县可重点选取物流产业园和设施农业打造光伏 + 应用，结合公共机构综合节能改造发展公建分布式光伏。

曲沃县是晋南重要的陆路交通节点，将现代物流作为县域重点发展的支柱产业，物流园区光伏是曲沃县分布式光伏的理想场景。利用物流园区仓储建筑屋面集中

铺设光伏组件，最大限度地开发现场可再生能源，选用集保温、隔热、防水和发电于一体的 BIPV 组件，在发电同时提高仓储建筑围护结构性能，降低暖通能耗。目前中短途货运电动车已趋成熟，将电动物流车辆、可更换动力电池组和梯次利用的旧动力电池作为物流园区的分布式储能单元，通过有序充电和 V2G 实现储能单元与园区微网的有序互动，以变化的充电功率实现对物流园区用电负荷的调节，必要时储能单元向微网馈电，实现对光伏出力波动的补充，支撑园区微网稳定运行，减少对公共电网冲击。物流园区通过此模式可提高光伏发电消纳比例和绿电渗透率，节约能源成本。曲沃县规划 2030 年物流仓储用地达 34.42 万平方米，物流园区建筑密度一般为 50%，建筑屋面总面积约 17.21 万平方米。考虑屋面通风需求，光伏安装比例取 80%，物流园区屋面分布式光伏总装机容量约 13.8 兆瓦。



图 3-5：碳中和物流园区¹³（2021 年京东“亚洲一号”西安智能产业园通过节能改造 + 光伏 + 储能 + 核证减排量，获得北京绿色交易所和华测认证（CTI）颁发的碳中和证书，成为中国首个获评的碳中和物流园区。）

光伏 + 农业项目是指利用永久基本农田以外的农用地开发的光伏复合项目，包括农光互补、林光互补、牧光互补、渔光互补等。光伏与设施农业结合是目前较成熟的光伏复合项目形式，光伏板起到遮阳和节水作用，板下适于发展喜阴蔬菜、食用菌、花卉、中药材种植和水产养殖，光伏发电就地满足设施农业生产过程的暖通、给排水、灌溉、补光照明等用电需求，补齐设施农业短板，探索发展基于清洁能源的人工环境农业，实现稳产增产。曲沃县设施农业大棚约 2 万亩，养殖鱼塘约 3,345 亩，合计约 1,500 万平方米，如果能利用其中 10% 铺设光伏，总装机容量 150 兆瓦。

县域公共机构分布式光伏利用党政机关办公及附属建筑，政府投资的学校、医院、文化体育场馆、科技馆等公共建筑安装。这类公共建筑的可利用屋面较小，且可能存在遮挡，南立面虽能铺设薄膜光伏，但发电效率较低，因此收益低于普通工商业光伏项目，适宜将分布式光伏作为公共机构综合节能改造的子项工程，由中标的节能服务公司统一规划、分步实施。办公楼和学校在工作日能保证较高的光伏自用比例，节假日可考虑向周边居民开放带充电桩的停车位，提高光伏自用比例。曲沃县公共机构屋面面积约 80 万平方米，按照 50% 的光伏铺设比例，总装机容量约 40 兆瓦。

13 （2022）. 京东率先建成中国首个“零碳”物流园区. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1727009259804377626&wfr=spider&for=pc>



图 3-6：中国节能长兴渔光互补项目

表 3-2：曲沃县分布式光伏潜在装机容量估算			
屋面资源	屋面总面积(万平方米)	拟建设比例	光伏建设规模（兆瓦）
农村住宅屋面	450	25%	112.5
物流园区屋面	17.21	80%	13.8
设施农业屋面	1500	10%	150
公共机构建筑屋面	80	50%	40
分布式光伏总装机规模（万千瓦）			316.3

根据初步估算，曲沃县分布式光伏潜在装机容量超过 300 兆瓦，将带动投资约 10 亿元。农村住宅屋面和设施农业屋面估算建设比例较低，还有较大的开发潜力，可以结合农宅改造、农网升级和设施农业提质升级统筹推进。

3.3.3 集中式光伏

集中式光伏是指利用戈壁、荒坡、滩涂等未利用地集中开发建设光伏发电阵列，所发电力直接升压并入公共电网的光伏开发形式，具有单体规模大，单位投资和

运维成本低，便于无功和电力控制等优势。曲沃县集中式光伏场景包括位于山地的尾矿库生态修复 + 光伏和位于平原水面的水上光伏。

尾矿库生态修复 + 光伏是利用坡度平缓（小于 35 度）的南向废弃矿山或荒山建设的集中光伏电站。山地接受的太阳辐射量高，环境温度低，光伏发电效率高。光伏板减少地表蒸发，板下可承包给周边农户种植喜阴经济作物，并为光伏板提供有偿清洁服务，提高土地综合利用率和农民收入。曲沃县可重点利用废弃矿山（位于县域北部的铁矿和南部的金矿），借鉴山西省矿山生态修复光伏项目的成熟模式，引入社会资本，在矿山生

态修复同时投建集中光伏项目，变废弃矿山为“金山银山”。曲沃县在山地（三类地形区）投建 10 兆瓦集中光伏项目，选取发电效率 22% 光伏组件固定式安装，以 110 千伏并网，总用地约 333 亩。¹⁴ 曲沃县如果能利用 2 万亩废弃矿山或荒山荒坡铺设集中式光伏，总装机容量可达 600 兆瓦，带动投资约 24 亿元。

水上光伏是利用桩基固定或水上浮台将光伏组件安装在水面上进行发电的光伏开发形式。由于水面上空

无遮挡，且水体对光伏组件有冷却作用，水上光伏发电效率较同地区地面光伏高。水面铺设光伏可降低蒸发量，抑制水中微生物生长，起到净化水质的作用。曲沃县可利用非水源地露天水面，在经过系统论证不妨碍行洪和生态保护的前提下，引入社会资本投建集中式水上光伏项目。曲沃县非水源地露天水面约 7,776 亩，如果能利用其中 10%（约 800 亩）铺设水上光伏，总装机容量约 30 兆瓦，带动投资 1.3 亿元。



图 3-7：中国节能安徽宿州淮北矿区采煤沉陷区水上光伏项目

3.3.4 工商业太阳能非电利用

在能源转型的新形势下，太阳能非电利用有望在县域工商业发挥积极作用。太阳能光热系统的能量转换效率约 50%-60%，是目前普通商用晶硅组件的两倍以上，对于终端用能以中低温热为主的农业大棚、养殖圈舍和食品加工等场景，直接利用太阳能光热，并耦合常规能源满足供暖或工艺用热，可减少能量转换，有效提高可再生能源利用率。太阳能热利用系统一般都配备廉价的

储热装置，没有电力并网需求，节约电网投资。新一代 PV/T 组件可在光伏发电的同时收集太阳能光热，最大限度地利用太阳能，但成本依然较高。

14 国土资源部. (2015). 光伏发电站工程项目用地控制指标. 中华人民共和国自然资源部.

第 4 章

曲沃县生物质能 开发潜力分析

4.1 全国生物质能概述和发展情况¹⁵

我国农业自然资源人均占有量低，生物质能开发以非粮生物质能（农业废弃物、生活垃圾和城镇污泥）为重点。

4.1.1 物理转换

生物质直燃发电是我国生物质能最重要的利用方式。截至 2022 年底，全国生物质直燃发电装机 4,132 万千瓦（其中生活垃圾焚烧发电 2,386 万千瓦，农林生物质发电 1,623 万千瓦，沼气发电 122 万千瓦），占全国电力总装机 1.6%。2022 年生物质发电量 1,824 亿千瓦时，占全国总发电量 2.2%（丹麦、芬兰达到 15%）。

我国生物质固体成型燃料年利用 2000 万吨。生物质燃料有害成分远低于煤炭，是理想的工业和民用锅炉替代燃料，但由于部分生物质锅炉存在运行不规范、排放不达标等问题，广东、河北等省近年推出了地方性限制政策。

我国生物质清洁供热面积超过 3 亿平方米。农村取暖和炊事炉具是生物质固体燃料重要的应用场景，“煤改生物质”的供暖成本与散煤相当，不增加农户采暖负担，地方财政只需补贴初装费，无需补贴运行费。

4.1.2 热化学转换、生物转换

生物质热裂解的反应条件较高，经常与其它处理技术耦合使用，可实现气炭联产。裂解气成分复杂，但成本低；生物炭可作为肥料或替代冶金焦炭。

我国生物天然气年产约 3 亿立方米。厌氧发酵产沼气工艺的反应条件温和，在我国推广较早，但传统户用沼气池存在规模小、运维差、产气不稳定、净化水平低、储气能力不足、人畜共患病风险高等先天不足，应向规模化、专业化发展。

4.1.3 制约我国生物质能发展的障碍

我国有机废弃物资源年产生量约 35-37 亿吨¹⁶，能源化利用率近 10%，至少还能提升一倍，生物质能开发速度落后于太阳能、风能，与先进国家存在较大差距。我国秸秆“五料化”利用中，肥料化和饲料化合计占比 6 成以上，能源化仅占 11%¹⁷，是秸秆资源化利用的短板。

我国生物质能发展相对滞后是多方面原因造成的。生物质能涉及农业、林草、发改、能源、住建、工信、环保、财政等多个政府职能部门，管理职能过于分散，且缺乏顶层制度设计和跨部门统筹，掣肘现象时有发生，如地方环保监管“一刀切”，误伤到合规的生物质能利用项目。受农业产业化和规模化发展阶段所限，我国农林废弃物分布相对分散，收储运成本高、效率低，农业废弃物收储不仅无法收费，还需要额外付费。生物质直燃发电国家补贴逐步退出，省级补贴也在不断缩减；生物质能非电利用缺少普惠政府补贴，也未建立生态价值补偿机制（如生物天然气绿证）和自愿减排市场。非粮生物质能的工程设计经验和装备制造水平有待提高，综合转化效率不高，非电利用水平较低；部分核心设备仍依赖进口，缺少有针对性的行业标准、市场监管和技术监督，只能参考化工、天然气等相关传统行业的设计和排放标准，推高了工程造价；生物质能项目因异味存在邻避效应，导致选址困难。

15 中国产业发展促进会生物质能产业分会. (2023). 2023 中国生物质能产业发展年鉴.

16 中国产业发展促进会生物质能产业分会，德国国际合作机构，生态环境部环境工程评估中心，北京松杉低碳技术研究院. (2021). 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书.

17 (2016, 05 26). 我国主要农作物秸秆综合利用率超过 80%. 中华人民共和国中央人民政府: https://www.gov.cn/xinwen/2016-05/26/content_5077037.htm

4.2 县域发展生物质能的独特优势

利用县域丰富的农业废弃物资源开发生物质能，就近替代存量化石能源或满足能源增量需求（新增可再生能源消费不纳入能源消费总量），可提高县域能源保障能力，助力县域能耗双控目标。生物质能虽然只能满足县域一定比例的能源需求，但如果适度发展生物燃气调峰电源，将为县域继续提高风光电渗透率，建设新型电力系统提供有力支撑。

现代生物质能产业可生产优质二次能源，实现自身生产的零碳乃至负碳排放，副产有机肥可部分替代化肥，增加土壤碳汇，促进农业与能源、工业、交通、建筑的部门耦合，减少污染物和温室气体排放，为生态产品价值实现提供可行路径，助力县域双碳目标。

太阳能和风能资源即使不开发利用，也没有环境风险，而农业废弃物如果得不到妥善处理，将会导致严重的环境危害，影响农业生产和粮食安全。发展现代生物质能产业，有助于提高县域农业废弃物综合利用率，改善县域人居环境，提高生物安全保障能力；打造生态循环农业，回收不可再生的磷资源，增加土壤有机质；减少农药、化肥用量，提高绿色农产品溢价；为培育生物基材料、生物化工、生物医药等生物经济高附加值产业奠定基础。

发展生物质能有助于农村劳动力就近就地转移就业，促进县域三产协同发展。生物质能工厂及其上游收储和下游销售环节可创造长期工作岗位和季节性工作岗位，并带动有机农业、生物材料、生物医药等绿色经济新业态发展，吸引创造间接就业。

4.3 曲沃县生物质能开发路径分析

曲沃县年作物秸秆产量约 19 万吨，可回收 17 万吨，其中肥料化利用 13 万吨，饲料化利用 3 万吨，秸秆综合利用率 94%。年禽畜粪污产量约 20 万吨，规模化养殖场普及了粪污无害化处理设施，主要作为肥料利用。

综合考虑物料收储难度、技术成熟度、生态环境价值、系统耦合性、经济可持续性、商业模式和政策支持

等因素，结合中国生物质能发展的经验和教训，建议曲沃县采用“生物质大规模厌氧发酵技术路线”，以禽畜粪便和秸秆为发酵原料生产沼气，核心工艺是秸秆预处理 + 中温湿式厌氧发酵。

4.3.1 物料收储方面

曲沃县经纬跨度不到 30 公里，且耕地以平原地形为主，在物料合理运距内，运输成本相对较低。以禽畜粪便和秸秆混合作为发酵原料，不仅提高整体发酵效率，也符合种养结合的要求。为提高收储效率，降低自燃风险，节约生物天然气工厂占地，打通收储和还田循环，曲沃县可以村镇为单位，依托农业合作社设置生物质分布式网点（Biohub），开展农业废弃物收集、初加工和有机肥分销，部署物联网传感器，搭建整县收储大数据平台。曲沃县通过开展农业生产托管服务，农业规模化、集约化和机械化基础好，可依托生产托管服务经营主体开展秸秆打捆和收储，生物天然气工厂有偿收购或以一定比例有机肥兑换收购。未来在生物质分布式网点基础上，整合分布式光伏安装运维、农机服务、电动车和家电维修、新能源技术推广，探索建设“乡村能源站”，为农村绿色低碳转型提供支撑，同时创造本地就业岗位。

4.3.2 技术成熟度方面

大规模生物质厌氧发酵技术装备的核心工艺技术成熟可靠，国内外成功案例多，符合世界生物质能技术发展潮流。

4.3.3 综合价值方面

大规模厌氧发酵较好氧堆肥能利用生物质能，实现农业废弃物资源综合利用；较养殖场自建沼气池具有规模化、专业化优势，有利于延申高价值应用；较秸秆直接还田避免土质疏松、碳氮比失调和病虫害，减少甲烷排放；较秸秆直燃或气化能更有效地回收利用农业废弃物中的营养元素。

4.3.4 系统耦合性方面

沼气厌氧发酵反应温度在 55 摄氏度以内，冬季环境温度较低时需要加温维持，目前通常依靠燃烧自产沼气解决。曲沃县拥有丰富的工业余热资源，具备与厌氧发酵工艺耦合的条件。山西省是中国非常规天然气储量较高的省份，生物天然气可与煤层气协同，共同促进甲烷减排。生物质气化和液化与生物质固体燃料和生物质直燃发电相比，能参与更高价值的应用场景，如生物气替代常规天然气发电，提供电力灵活性；生物液体 / 气体燃料作为航空、水运、公路重载运输和重型农机的替代燃料，推动难以电气化的部门深度脱碳。曲沃县将发展大规模电解水制绿氢，利用副产绿氧发展纯氧沼气燃烧，能大幅提高烟气中的二氧化碳浓度，实现低成本碳捕集。

4.3.5 经济可持续性方面

在必要的政府补贴和地方政策支持下，沼气工厂可通过多项举措开源节流，构建多元化收入结构，实现可持续发展。能源销售是沼气工厂最主要的收入来源。沼气脱碳提纯需要增加初始投资和运营成本，而中国尚未建立天然气绿证制度，导致提纯后的生物天然气缺乏成本优势，因此除非有稳定可靠、价格合理下游工商业大客户或城市燃气公司，不建议沼气脱碳提纯。沼气工厂以就近销售沼气为主，也可通过沼气蒸汽锅炉或沼气热电联产，生产零碳电力和蒸汽趸售给电网和热网，或隔墙销售给周边电 / 热用户（需要支持隔墙售电）。工业蒸汽相对居民用热价格更高，且不局限于供暖季。沼气发电与生物质直燃发电相比，负荷调节范围宽、响应快、变负荷能力强，通过沼气储存和灵活发电参与电力现货市场和辅助服务市场，充当县域灵活电源，有望取得更高的发电收益。未来沼气发挥灵活性还有一种可行方式，即利用过剩风光电电解水，制备的绿氢加入沼气，在甲烷菌的作用下使氢气和沼气中的二氧化碳转化为甲烷。沼气工厂远期可考虑结合生物气二氧化碳捕集与封存（BGCCS），借鉴“钢化联产”思路，将沼气中的二氧化碳作为高附加值生物合成工业的含碳原料，取得更高的经济价值和碳减排环境效益。沼液、沼渣加工成有机肥或养殖垫料，在县域内销售，替代一部分化肥，

符合循环农业要求（需要县域授予有机肥销售特许经营权）。除传统的气、电、热、肥销售外，沼气工厂还需要在保障安全生产的前提下，参考欧洲经验，采用合理配置，压缩投资规模；优化生产工艺，提高发酵效率和沼气热值；借助数字化手段提高收储和销售效率；安装现场光伏 / 光热，优化生产工序，挖掘可中断和可调节电力负荷，提高可再生能源渗透率和过程余热回收率；自有车辆全面采用电动车，鼓励第三方收储车辆采用电动车，厂内结合分布式光伏安装有序充换电站，有条件的规模养殖场铺设粪便运输管道；引导禽畜粪便处理逐步向有偿收费转变；探索 BGCCS 负碳应用，挖掘沼气生态环境价值，开发污染物（二氧化硫、氨氮、总磷、化学需氧量（COD））减排量和温室气体（二氧化碳、甲烷、氧化亚氮）核证减排量（CCER）。

4.4 曲沃县生物质天然气开发潜力评估

曲沃县 6 年小麦平均年产量 8.35 万吨，可产生生物天然气 2,886 万立方米。玉米 6 年平均产量 9.29 万吨，可产生生物天然气 3,127 万立方米。大牲畜（牛为主）5 年平均存栏量 3,722 头，可产天然气 131 万立方米。猪 5 年平均存栏量 78,465 头，可产天然气 344 万立方米。羊 5 年平均存栏量 65,690 只，可产天然气 287 万立方米。禽类 5 年平均存栏量 1,481,260 羽，可产天然气 379 万立方米。兔粪污总产气量较低，不再单独计算。

综上，曲沃县两大主粮和主要禽畜的农业废弃物生物天然气开发潜力总和约 7,154 万立方米。考虑到物料采集率，如果农业废弃物资源化比例达到 40% 左右，投建县域生物天然气项目，每年可产生生物天然气约 3,000 万立方米，折合近 4 万吨标煤，年产有机肥 14.4 万吨，带动固定资产投资约 3 亿元。

表 4-1: 曲沃县主要农作物产量和畜禽存栏量

年份		2016	2017	2018	2019	2020	2021
作物年产量 (万吨)	小麦	9.63	8.71	8.7	7.36	7.68	8
	玉米	11.07	10.12	10.2	8.29	8.14	7.9
	蔬菜及 菌类	35.52	36.9	34.3	36.9	38.23	42.2
	苹果	3.62	4.41	2.54	4.7	5	5.2
	葡萄	2.76	3.61	2.49	2.94	2.48	2.3
年均畜禽存 栏量 (头/只/羽)	大牲畜	3590	3,893	3,583	3,595	3,950	N/A
	猪	90,123	110,004	78,712	50,189	63,296	N/A
	羊	747,41	79,293	69,716	50,423	54,277	N/A
	禽类	1,484,530	1,605,246	1,522,992	1,332,066	1,461,464	N/A
	兔	76,400	51,300	38,400	122,500	161,200	N/A

数据来源: 2016-2021 年临汾市统计年鉴

第 5 章

曲沃县其它能源 开发潜力分析

5.1 其它能源概况

除太阳能和生物质能外，曲沃县还有其他可开发的能源，按能源载体分为热能和氢能，若合理布局，跨行业耦合，根据应用场景开发利用，可实现能源梯级或耦合利用，替代化石能源，减少碳排放。

热能按温度从高到低有工业余热、电解槽余热、冷库排热、浅层地热能、污水处理厂余热。温度较高的工业余热可直接换热利用，汇入集中热网，无需改变现有热网和建筑供暖末端，在县域范围内作为各类建筑和禽畜圈舍的冬季供暖热源和生物天然气发酵保温热源，在非供暖季作为非流程工业中低温热源或存入大规模跨季节储热中。温度较低的环境热能需要利用热泵提升才能满足周边生产生活需要，但其品位高于环境空气，能显著提高热泵能效，延缓用电电气化带来的用电负荷过快增长，而且有些支持冷热双供，可提高热泵供暖设备利用率，增强经济性。能效水平较低的老旧建筑更换热泵需要同步进行围护结构改造，以保证供暖效果。热泵与建筑本体和储热/储冷结合作为可调节负荷，可提高新能源消纳能力。

曲沃县工业副产能源包括焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、LNG 和工业副产氢。从钢铁、焦化行业深度减碳角度考虑，未来各类煤气和 LNG 应优先作为化工原料或冶金还原剂，而不是替代性燃料，所以副产氢是曲沃县未来主要的工业副产能源。

5.2 工业余热

钢铁、焦化是曲沃县的支柱产业，其中占主导的长流程转炉炼钢包括焦化、烧结、炼铁、炼钢、铸轧五道工序，几乎每道工序都有集中和可回收的低品位余热，且热量巨大。目前主要利用高炉冲渣水余热在冬季供暖，余热回收率仅 10% 左右，其它工序余热没有得到有效利用。长流程炼钢（不含铸轧）余热余能理论产生量约

4.685 吉焦/吨粗钢（以下简称“吨钢”），现有技术可回收余能量 1.874 吉焦/吨钢，占比约 40%。由于铁水显热及高炉煤气化学能在后续炼钢工序中已被利用，不再计入余热余能资源。¹⁸

曲沃县有晋南钢铁、通才工贸两大钢铁企业，2022 年粗钢产量近一千万吨，如果长流程转炉炼钢年产量取 850 万吨，不稳定系数取 0.8，供暖时长取 5 个月（150 天），工厂每年生产时间取 330 天，假设冬夏日产量相同，余热余能技术回收率按 40% 测算，则供暖季技术可回收的钢铁工业余热总量约 579 万吉焦，曲沃县单位建筑面积耗热量按 0.3 吉焦/平方米考虑，约可满足 1,930 万平米建筑冬季供暖需求，合 2.27 平方米/吨钢，远大于曲沃县目前的集中供暖面积（不到 500 万平方米），余热供暖仍有挖潜空间。

从中长期发展趋势看，曲沃县钢铁产能继续扩张的空间受限，现有产能利用率还有可能下降，这将导致技术可回收余热减少。为保证钢铁工业余热仍能满足冬季建筑供暖需求和其它行业用热需求，需要继续深入挖掘余热回收潜力，借鉴国内先进经验，设定吨钢热回收指标（2 平方米/吨钢），为同时满足余热回收率和超低排放标准的企业豁免错峰生产，实现差别化管理。

2022 年曲沃县能源消费总量 689.74 万吨标煤，规上工业能源消费总量 675.95 万吨标煤，根据现有能效水平推算，流程工业（钢化联产（含长流程炼钢、焦化、化工）、短流程电炉钢和水泥）能耗占比达 75%，其余非流程工业和民用能耗占比约 25%。流程工业可回收余热约为能源消耗的 1/4-1/3，曲沃县流程工业余热如果能充分回收，基本可满足非流程工业和民用部门对中低温用热的需求。

18 赵晓宇. (2017). 钢铁工业余热余能及节能技术能效提升研究

张琦, 沈佳林, 谢升. (2022). 冶金能源高效利用与优化管控. 冶金自动化 (4).

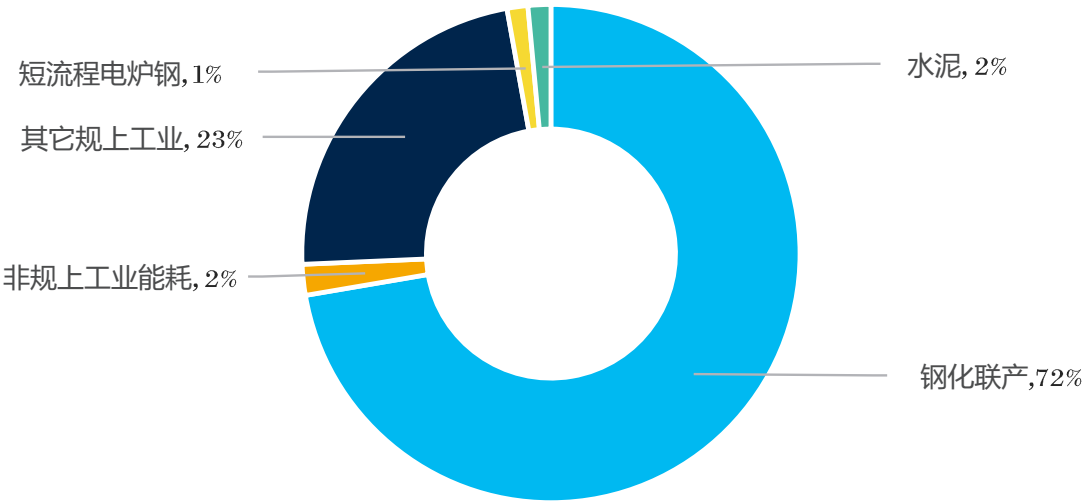


图 5-1：曲沃县 2022 年能源消费结构

目前曲沃县只能利用冬季 4-5 个月钢铁和水泥余热满足城镇集中供暖，为应对停产限产和生产负荷波动，配置了燃气调峰热源，同时还要从临近的侯马热电厂引热，超过半年的非供暖季余热没有得到利用。为实现工业余热全年高比例利用，曲沃县可建设大规模跨季节储热（建议一万立方米以上）。一是大幅提高余热回收利用能力，不仅能回收钢铁、焦化等工业余热，而且能回收燃气发电和电解槽余热，回收非供暖季工业余热，破解余热排放和余热利用在时间上不匹配的难题；二是为县域内的农副产品加工、生物医药、冷链物流提供稳定、廉价的中低温热源，促进相关产业降本提效、节能减碳，提高市场竞争力；三是大幅提高城镇集中供热可靠性，不再需要昂贵的燃气调峰热源，降低供热成本，减少用热电气化对县域电力系统的冲击；四是发挥储热的成本优势（只有储电成本 1/10），“以热储电”，减少县域内的弃风弃光。大规模跨季节储热最早出现在北欧国家，内蒙、河北、西藏等地区已有示范项目，通常采用蓄热水（90 摄氏度左右）深坑方式，规模越大，热损失越小。曲沃所在的气候区 1 立方米库容可满足 1 平方米建筑的供暖热量年需求。曲沃县可结合土壤修复，利用污染地块建设大规模跨季节储热，探索有曲沃特色的工业余热利用模式。

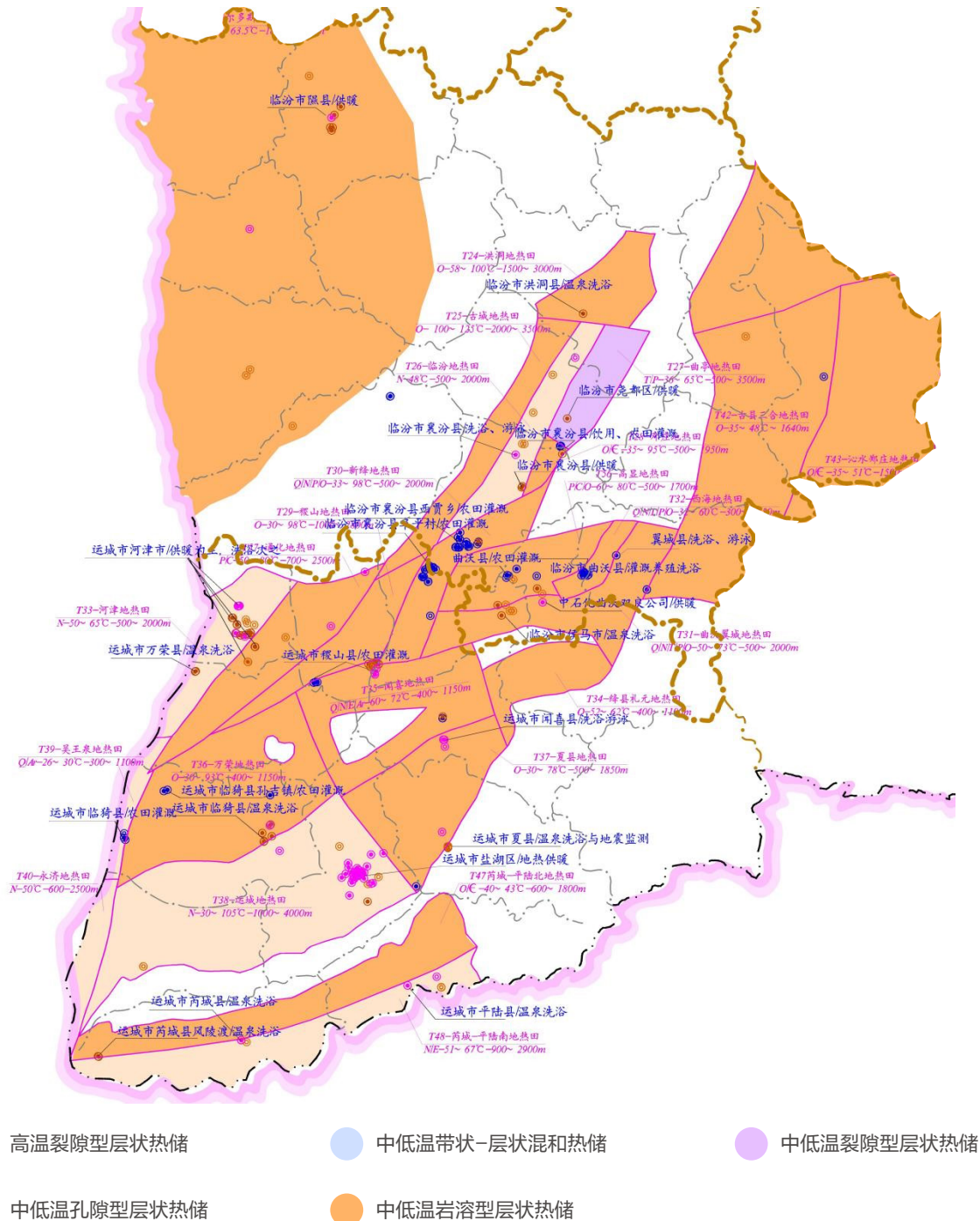
表 5-1：曲沃县钢铁、焦炭和水泥产量						
年份	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
生铁产量（万吨）	429.3	401	613.5	640.3	739.71	766.2
粗钢产量（万吨）	583.3	560.4	734.5	796.8	913.93	913.9
钢材产量（万吨）	816.6	751.6	725	906.9	1,001.62	978
焦炭产量（万吨）	54.7	48.5	57	206.4	349.48	382.9
水泥产量（万吨）	153.7	140.7	150.7	184	164.03	134

数据来源：2016-2021 年曲沃县国民经济与社会发展统计公报

5.3 地热能

根据《山西省地热能分级分类利用指南（试行）》，临汾盆地曲沃县地热田名称为曲沃翼城地热田，地热分

级为 II-1，热储层时代为 Q/N/T/P/O，储层类型属于岩溶型层状热储层，编号为 T31，分区面积为 1, 130 平方公里，已有地热井 12 口，其中已利用 6 口 3 对。



采用热储法计算浅层地热能储存量，储热层分为饱 水带和包气带，计算参数取值表如下所示。

表 5-2：地热计算参数		
ρ_s 为岩土体密度	kg/m^3	1,910
C_s 为岩土体骨架的比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	1,575
ϕ 为岩石的孔隙率	%	0.44
M 为计算面积	km^2	1,130
d_1 为包气带厚度	m	5
d_2 为地下水面到计算下限位置的岩土体厚度	m	195
ρ_w 为水密度	kg/m^3	1,000
C_w 为水比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	4,182
w 为岩土体的含水量	%	0.27
ρ_a 为空气密度	kg/m^3	1.29
C_a 为空气比热容	$\text{KJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	1,003
ΔT 为利用温差	$^\circ\text{C}$	5

根据以上参数取值以热储法估算¹⁹，曲沃县浅层地热能资源量约 79 亿吉焦，总量相当可观，但浅层地热能的出水温度低，对取热场地、供能末端和建筑能效有一定要求，有些还需要热泵提温，导致开发成本相对较高，这些因素都制约了浅层地热能曲沃推广。浅层土壤可在夏季作为空调热汇，所以浅层地热能比较适合曲沃县集中热网未覆盖且有冷暖双供需求的建筑，采用冷暖双供也有助于维持地温平衡，实现浅层地热能的可持续开发。

5.4 污水厂余热

污水厂可利用余热与污水处理量和提取温差有关，冬季污水源热泵进口水温不宜低于 12 摄氏度，夏

季污水温度一般在 25 摄氏度以下，能作为空调热汇，满足周边建筑供冷需求，因此污水源热泵与浅层地热能一样能实现冷暖双供。污水余热属于低品位环境热能，需要就近利用，对建筑能效、供能末端有一定要求，可能限制其在县域推广。

目前曲沃县污水处理厂日处理量 1.6 万吨，冬季最低水温约 15 摄氏度，可提取 5 摄氏度温差，假设污水处理量与排放量一致，污水比热容与水一致，则污水中可回收的热能为 334.56 吉焦 / 天，供热时长取 5 个月（150 天），供暖季可回收热量为 50,184 吉焦，单位建筑面积耗热量按 0.3 吉焦 / 平方米考虑，曲沃县污水余热回收可满足 16.7 万平方米周边建筑供暖需求。曲沃县污水日处理量远期将提高到 3.1 万吨，可满足 32.4 万平方米周边建筑供暖需求。

19 GB/T 11615-2010, 地热资源地质勘察规范

5.5 冷库排热

冷库制冷系统的冷凝温度一般在 35-45 摄氏度之间，略高于环境温度，属低品位环境热能，冻结间的单位制冷负荷远高于冷藏间。冷库余热利用热泵提升，冬季可作为供暖热源，非供暖季可满足周边生产生活低温用热需求。

曲沃县 2020-2022 年建设农业冷库 7 万立方米以上，远期将达到 12 万立方米，上万立方米库容有 3 家，大部分冷库温度在 -8 摄氏度及以上。按照预冷库温度为 1-5 摄氏度，冷却时间 12 小时计算，单位容积制冷负荷取 120 瓦 / 立方米，未来曲沃县预冷库所需制冷量约 172.8 兆瓦时 / 天，冷凝器排热量按制冷量 1.2 倍计算，热回收效率取 15%，可回收冷凝热量约 111.97 吉焦 / 天，供暖时长取 5 个月（150 天），采暖季可回收的冷凝热量为 16,795.5 吉焦，单位建筑面积耗热量按 0.3 吉焦 / 平方米考虑，约可满足 55,985 平方米建筑冬季供暖需求。大型冷库周边可优先布局有全年低温用热需求的行业，利用一套热泵系统实现冷热双供，综合能效比将达到 5 以上。

5.6 工业副产氢

钢铁、焦化行业产出的工业副产氢可作为公路重载运输燃料，比柴油和 LNG 更环保低碳，不仅能帮助钢铁厂减少自身物流碳排放，还可带动县域及周边地区减少公路货运碳排放，发挥协同减碳作用。曲沃县近三年焦炭平均产量约 365 万吨，每年可副产氢约 4 万吨，如果不考虑高炉和烧结工序应用，全部作为氢能重卡燃料，按照平均 8.5 千克氢 / 百公里的消耗量，约可行驶 4.7 亿公里。

曲沃县应利用工业副产氢在现阶段的成本优势，在氢能重卡的基础上，抓紧培育壮大氢能产业链，延申相关应用，改变曲沃县“一钢独大”的产业结构，延申发展绿氢、氢能重型农机等新兴产业。

第 6 章

增收节支分析

曲沃县农户自主投资户用分布式光伏可获得售电收益，按照 10 千瓦 / 户装机容量、0.332 元 / 千瓦时上网电价、0.5 元 / 千瓦时平均居民电价计算，每户每年发电 1.15 万千瓦时，若自用 0.25 万千瓦时，上网 0.9 万千瓦时，可节约电费 1,250 元，获得售电收入 2,988 元。农户将屋面租赁给专业光伏公司可获得租赁收益，约 1,500-2,000 元 / 年。农村公共区域安装分布式光伏，村集体可获得设备看护费，约 1 万元 / 年。农村留守老人可承担力所能及的清洁工作，获得一定的收入。集中式光伏每万千瓦装机约需维护人员 1.2-1.5 人，按照 600 兆瓦集中式光伏总装机规模约需要维护人员近 100 人。分布式光伏每万千瓦装机约需维护人员 2-3 人，按照 300 兆瓦县域分布式光伏总装机规模，约需维护和后台管理人员 100 人。曲沃县可基于县域分布式光

伏数字平台组建县域第三方分布式光伏运维平台公司，招聘本地中等教育劳动力，尤其是吸引外地务工的曲沃籍人员回乡就业，组织特种作业和光伏运维培训，确保 100% 持证上岗。

曲沃县投建一座年产 1,000 万立方米生物天然气工厂，可提供厂内生产岗位约 50 个，间接带动厂外就业 50 个以上。电动车、电动农机具维修与充换电，以电热泵为代表的新家电销售、安装和维护都将带来潜在的就业岗位。

曲沃县企业可利用电力市场化交易节约电力成本；通过节能改造开发 CCER；取得有机农产品认证，获得溢价收入；利用绿色金融工具降低融资成本。

第 7 章

绿色低碳转型政策和技术建议

曲沃县绿色低碳转型需要因地制宜，坚持能效优先，充分吸收山东、河北、河南等北方省份在光伏开发方面的经验和教训，平衡长期发展和短期收益，根据不同应用场景，选择对应的开发模式。新能源良性发展需要遵循规模开发和高效利用相结合、本地消纳和合理外送相结合、电源开发和电网建设相结合的原则，从多方面系统谋划、统筹推进，逐步提高本地消纳比例，控制弃风弃光率。引导本地重点企业自主投资，吸引不同所有制社会资本积极参与，鼓励居民自主投资或出租场地，依法保护各方的合法权益，具体可从以下几个方面开展工作：

7.1 供给侧方面

由县发改牵头，统筹自然资源、林草、农业农村、环保、水利、文物保护、供电等部门和单位，系统评估曲沃县太阳能和风电开发潜力，研究生物质能发展的可行路径，谋划适应曲沃县资源禀赋和发展要求的“县域源网荷储一体化示范项目”，大幅提高县域内风光发电装机和消纳水平。

随着曲沃县域内新能源装机比例提升，电源侧波动性大幅增强，而现有电化学储能技术尚不能完全替代传统同步电源，需要加快灵活性电源建设和改造，提高电源侧调度调节能力。曲沃县没有煤电、生活垃圾发电和农林生物质发电装机，两大钢铁企业配置 477.5 兆瓦煤气发电装机，是比煤电更优越的灵活性电源，但煤气应优先作为冶金还原剂或化工产品原料，煤气燃烧发电不能降低钢铁和焦化行业碳排放，煤气发电不宜作为未来主要的调峰电源。曲沃县可探索对存量煤气发电机组进行“适氢化”改造，从掺氢开始逐步提升氢气比重，利用氢气发电作为零碳调峰电源。曲沃县也可结合县域生物天然气项目和煤层气利用，适度增加沼气/煤层气发电装机。如果年发电消耗折标天然气 1,000 万立方米，发电量约 4,000 万千瓦时，年满负荷利用 800 小时，需 50 兆瓦燃气发电装机。燃气发电应参与山西电力现货市场，只在电价较高时段启动，配备蓄热装置或存入大规模跨季节储热，充分利用燃气发电余热。

7.2 基础设施方面

曲沃县需要继续推进县域配电网升级改造，尤其是农网巩固提升，结合“千乡万村驭风行动”、“千家万户沐光行动”，加强农村电网发展规划与分布式可再生能源开发相衔接，推动农村生产生活电气化。建设和完善适应大规模、高比例可再生能源接入、电动车/电动农机充换电等发展需求的高可靠性、数字化有源配电网，构建多元化应用场景，促进分布式可再生能源就近消纳。鼓励综合能源服务公司结合产业园区或基础好的村庄，开展多能协同供应和自平衡为特征的并网型微网示范应用。借助物联网采集设备搭建县域分布式光伏数字平台，掌握全县所有分布式光伏项目的实时运行数据，基于数据驱动开展预测性维护和光伏功率预测，不断提高光伏运维管理水平，有效降低弃光。探索建设乡村能源站，整合农林废弃物分布式收集、有机肥分销、分布式光伏运维、农机服务、电动车和家电维修、新能源技术推广等功能，创造稳定就业岗位，服务农村绿色低碳转型。培养选拔一批年富力强、高素质的县级电网调度运行人员。

7.3 需求侧方面

对标国内外先进水平，进一步降低钢铁、焦化的单位工序能耗水平，提高先进产能比重，探索在钢铁冶炼流程应用绿电进行电加热，替代化石能源加热，提高绿电渗透率。规上企业普及在线能耗监测系统，根据峰谷电时段优化用电负荷，重点挖掘离散工业的可中断负荷和可调节负荷，根据新能源季节出力特点合理安排停产检修时段，探索负荷聚合商和虚拟电厂应用。县域内的非流程工业优先利用各类余热，并根据需要调整产业空间布局。推动分布式光伏主要应用场景（农宅、农业大棚、禽畜圈舍、工业园区、高速服务区等）的终端用能逐步电气化，推动农业生产、农产品加工与包装、仓储保鲜、冷链物流等全产业链电能替代，逐步淘汰燃煤和燃气锅炉，在同时有冷热需求的场景推广冷热联供型热泵应用。不能接入集中热网的公共建筑优先采用电热泵供暖，并尽可能利用各类余热和地热能作为低位热源，减少配电容量，延缓供暖电气化带来的用电负荷过快增长。谋划建设大规模电解水制氢装置，作为县域内过剩风光电的

重要消纳途径，围绕所生产的绿氢和绿氧开发氢能物流、充氢站、氢冶金、氧气农法等下游应用。利用能源托管模式对县域内的公共机构进行综合节能改造，实现能耗限额管理，并探索电力负荷聚合。引入具有家电、电动车、充电桩等行业背景的跨界农村光伏投资商，推广直流热泵空调、有序充电桩、电动车和电动农机，提高本地消纳能力，探索在基础条件好、产业兴旺、全年常住人口稳定的村庄开展农村直流微网模式试点。

7.4 储能方面

利用县域内污染地块或未利用地建设大规模跨季节储热，存储钢铁、焦化等流程工业余热，或太阳能光热、燃气发电余热、过剩风光电等，用于满足冬季集中供暖和全年非流程工业用热。鼓励企业和农村居民因地制宜投资建设各类储热系统。除光伏配建储能、电网公司投建储能外，重点发展新型电化学储能，鼓励各种类型用户侧电化学储能，如工商业企业自主投资的储电/储热/储冷系统和专业储能企业投资的电化学储能电站和集光储充于一体的综合能源服务站。配合工业副产氢、绿氢、生物天然气和煤层气发展和完善县域储气（氢气、天然气）设施。

7.5 电力市场方面

山西是我国首个实现电力现货市场不间断试运行的省份。2021年山西电力现货市场纳入燃气发电机组，为曲沃县适度发展燃气调峰发电创造了基础条件。随着电力峰谷价差扩大、峰谷时段优化，电力市场价格信号将更好地引导企业改变用电负荷，曲沃县需要鼓励和引导重点用能企业、新型储能企业和燃气发电企业积极参与电力市场交易，利用好中长期分时交易和现货交易，探索有偿需求响应，提高电力市场化水平。

7.6 商业模式方面

曲沃县未纳入整县屋顶分布式光伏开发试点名单，可借鉴光伏整县推进的经验和教训，按照县域可接入容量和不同的光伏应用场景，推动各类“光伏+”模式，制订合理的开发策略和商业模式，具体场景包括：将县域集中式光伏开发纳入生态环境导向开发（EOD）模式项目统筹考虑，推动光伏+生态修复模式，探索尾矿治理和矿山生态修复与集中光伏开发相结合；引导现有重点企业和导入企业自主投资分布式光伏，充分利用建筑屋面和交通廊道；鼓励综合能源服务商将分布式光伏投资纳入产业园区综合能源系统，统一规划和分步实施，提高本地消纳水平；鼓励不同行业背景、不同所有制的市场主体依法平等参与工商业和户用光伏投资，丰富行业生态；制订“一村一策”的农村分布式光伏推进方案，全年常住人口稀少、消纳能力差的村庄采用集中汇流开发模式，以升压外送为主，全年常住人口较多、产业基础较好的既有村庄或新建农村集中居住点，结合基础设施改善，探索农村微网开发模式，推动集结构加固、保温改造、热泵供热、电动车/农机充换电、分布式光伏和农村微网于一体的综合改造模式。采用整县推进+特许经营模式推进县域生物天然气项目，搭建覆盖全县的农林废弃物收储和有机肥还田体系。

第 8 章

低碳转型路线图

8.1 近中期（2023-2030）

曲沃县全县太阳能实现规模化发展，光伏总装机容量在现有基础上翻两番，力争达到 1 吉瓦，人均光伏装机容量达到国内同类资源区领先水平。建成大规模生物天然气和沼气发电项目，初步搭建县域农业废弃物收储体系，基本解决禽畜粪污处理问题。工业余热利用水平大幅提高，大规模跨季节储热首期工程投入使用，形成有曲沃特色的工业副产氢产业链，因地制宜建成一批余热和低温环境热能利用项目。县域配电网进一步完善，规上企业全部参与电力市场交易。县域公共机构能效水平和运营质量达到寒冷地区公共建筑较高水平。分布式光伏、生物天然气、电动车、储能、节能服务等能源转型相关行业成为吸引曲沃籍青壮年劳动力回乡就业创业的热点。

力争到 2030 年，曲沃县可再生能源就地消纳电量占全社会用电量达到 90% 以上，建立和完善适应低碳转型的体制机制，初步建成多能互补的县域低碳能源系统，根据不同应用场景培育一批可复制和推广的商业模式，形成重工业强县低碳转型的“曲沃模式”。

8.2 远期（2030 后）

曲沃县形成以太阳能为主导、风能为补充、生物质能和煤层气为支撑的一次能源结构和以绿电、氢能和工业余热大规模利用为特色的二次能源格局，实现可再生能源的高比例开发和高质量消纳，生产生活终端用能全面实现电气化和数字化。县域工业企业、能源企业和新型储能市场主体主动适应电力现货市场，挖掘灵活性资源，对县域乃至省内可再生能源的消纳能力显著提高。钢铁工业增加绿电和绿氢消费，减少碳排放，品种结构迈向中高端。工业、农业和服务业园区普及综合能源服务和环保第三方治理服务，综合能效和产品服务环境足迹达到国内领先水平。县域农业废弃物、城乡有机废弃物和生活污水实现全量处理和高效综合利用，生物质能成为县域多能互补低碳能源系统的重要补充和本地风光电消纳的主要支撑。利用 BGCCS 开发碳汇，助力县域尽早实现碳中和。可再生能源及相关产业成为县域财政支柱和吸纳居民就业的重点行业。

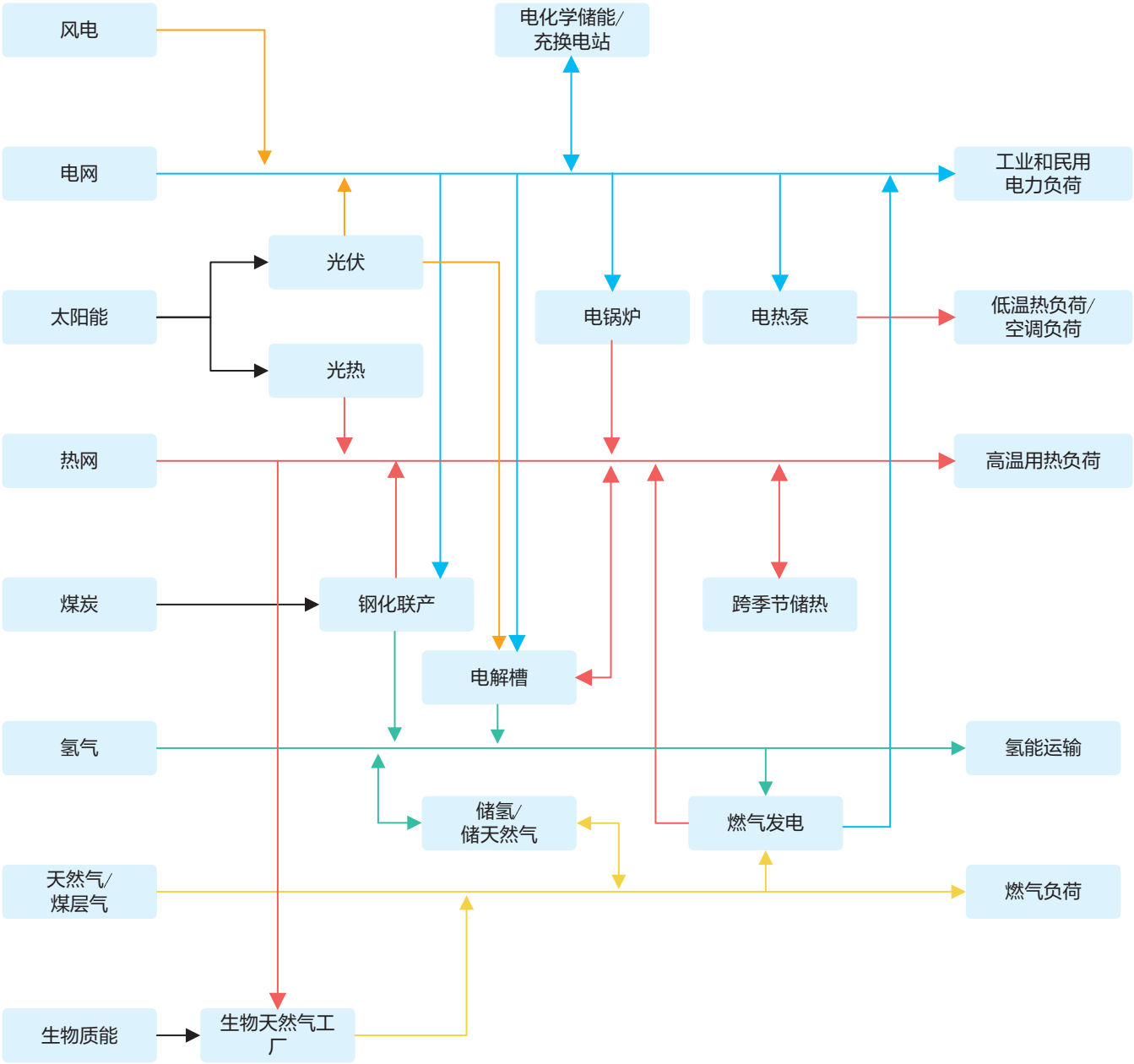


图 8-1：曲沃县远期能源体系设想

第 9 章

重点推荐项目

重点推荐项目不仅需要结合曲沃县产业特点和应用场景，而且要符合以下几个标准。一是有节能降碳潜力、行业耦合价值或示范宣传价值；二是有明确的政策支持或资金补贴；三是有可行的商业模式、稳定的现金流和潜在的收入渠道，可完全由社会资本投资；四是有类似成功案例或相近案例。

9.1 县域公共机构综合节能改造项目

9.1.1 推荐项目综述

我国公共机构的建筑能耗强度通常高于当地住宅，以往节能改造工程依赖财政资金投入，重改造轻运营，导致改造标准偏低、进度偏慢、运行效果不佳。2022年9月国管局、国家发展改革委和财政部联合印发《关于鼓励和支持公共机构采用能源费用托管服务的意见》，提出通过市场化机制激发市场主体活力，在公共机构节能改造中鼓励和推广能源费用托管服务，实现公共机构绿色低碳发展。能源费托管符合“能源即服务”的发展趋势，公共机构采用能源费托管后，节能率一般能达到15%以上，个别项目能达到30%以上。县域公共机构的建筑规模一般小于城市，单个公共机构的节能效益有限，为发挥规模效应，降低交易成本，吸引社会资本投资，可采取“整县推进”模式，将县域内的公共机构整体打包，委托一家节能服务公司投资改造和托管运营。公共机构综合节能改造可在传统节能改造项目外增加分布式光伏、充电桩等新项目，提高本地可再生能源开发和消纳能力；探索碳减排量开发、电力负荷聚合等新业态，成为县域公共机构碳资产管理平台和负荷聚合商，与用能单位分享碳减排量交易和有偿需求响应市场收益。

9.1.2 外地参考项目

国网湖北综合能源服务有限公司在湖北省宜都市（县级市）成功实施了整县推进+能源费托管模式，2022年宜都市174家公共机构预计可节约用电300万度，节约费用200万元，年节电率达10%，降低二氧化碳排放量299吨。

9.1.3 曲沃落地建议

曲沃县县域公共机构综合节能改造项目也可采用整县推进+能源费托管服务模式，主要步骤包括：明确改造建筑范围，完成能源审计，确定能源基准（含水耗基准）；组织政府采购，选定节能服务公司；由县机关事务管理局与节能服务公司签订公共机构能源费托管整县推进合同；节能服务公司自筹资金，承担合同约定内的软硬件初投资，组织完成改造施工；节能服务公司提供专业运维服务，代缴电/气/水费，接受县机关事务管理局和用能单位监督，确保国有资产安全；用能单位根据能源基准确定的能源费用（含水费）支付给节能服务公司作为托管费用，节能服务公司通过科学管理节约能源资源，减少费用支出，确保用能单位在合同期内符合公共建筑能耗限额考核目标，并回收项目投资和财务成本，获得合理利润。合同期结束并结清托管费后，节能服务公司投资设备的产权归用能单位所有。以目前曲沃县公共机构能耗水平为基准，如果能实施县域公共机构综合节能改造项目，假设节能率15%，每年将节约综合能耗1100吨标煤。

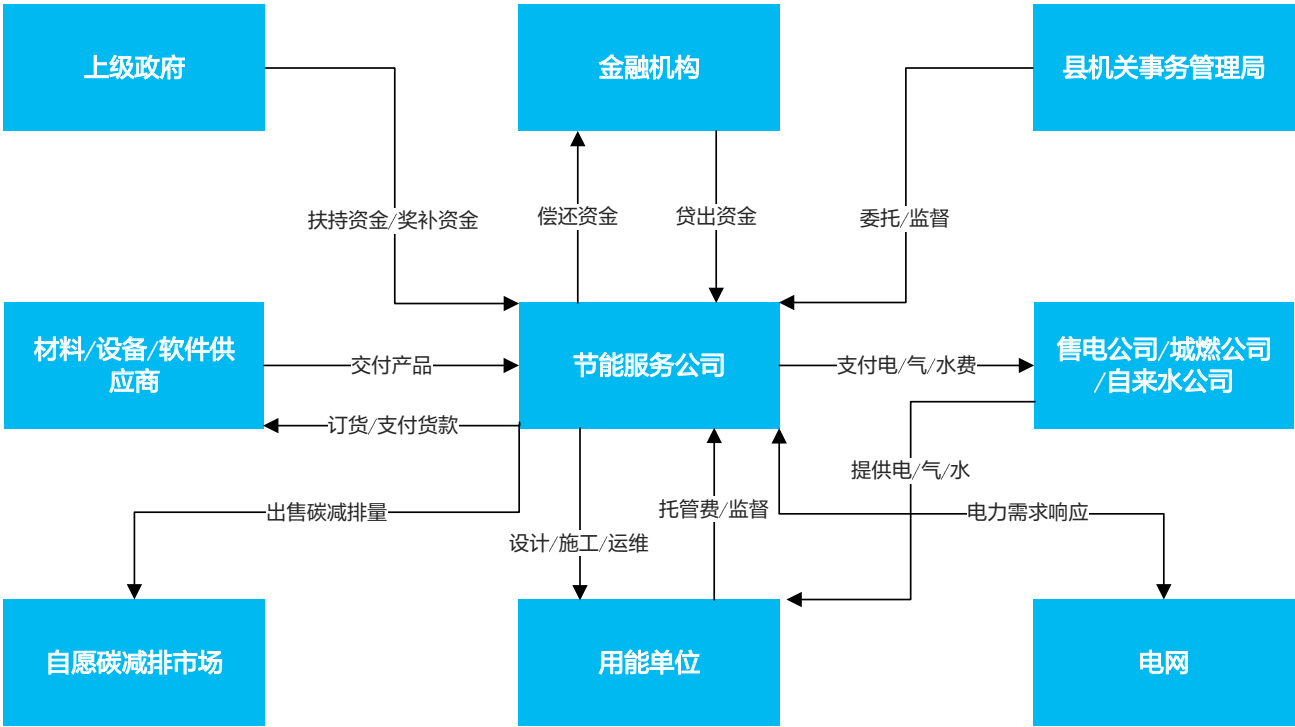


图 9-1：县域公共机构综合节能改造项目商业模式

9.2 县域生物天然气项目

9.2.1 推荐项目综述

县域拥有发展生物质能的物质条件和客观需求，但目前能源化占比和综合利用水平偏低，规模化和产业化与先进国家有较大差距。2019 年 12 月国家发展改革委等十部委联合印发《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见》，制订生物天然气发展目标，提出加快生物天然气工业化、商业化开发建设，建立健全生物天然气产业体系等意见。

9.2.2 外地参考项目

安徽阜南县探索县域有机废弃物全利用、县域利用全覆盖、复合利用全循环的“三全”模式，以特许经营

引入社会资本投资和长期运营，规划建设 8 个生物天然气工厂，建立覆盖全县的有机废弃物收储网络，可满足全县禽畜粪便、秸秆、病死禽畜、餐厨垃圾和藤蔓的无害化处理和资源化利用，年产生物天然气 2,000 万立方米（折标），有机肥 20 万吨。

9.2.3 曲沃落地建议

根据曲沃县农业废弃物资源条件，建议以县域内收集的禽畜粪便和秸秆为原料，采用秸秆预处理 + 中温湿式厌氧发酵技术路线，首期建设一座年产 1,000 万立方米（折标）生物天然气工厂，占地约 100 亩，年处理 9 万吨农作物秸秆和 6 万吨禽畜粪便，年产 1,000 万立方米生物天然气和 4.8 万吨有机肥，总投资约 1.4 亿元，项目建设期 1 年。根据后续需求，生物天然气项目可追加投资，倍增处理能力和产能，增加对农村粪便、城镇

餐厨垃圾、市政污泥、园林废弃物的收集处理，实现对全县有机废弃物的全量资源化利用。

生物天然气项目采用整县推进 + 特许经营模式，县政府组建由县长或分管副县长牵头的生物天然气项目跨部门工作组，包括农业农村、发展改革、生态环保、工业和信息化、自然资源、住房和城乡建设、公安交管、城市管理和各乡镇，整体对接项目实施主体，避免政出多门。采取“有机废弃物资源化利用整县推进模式”，县政府授予沼气项目实施主体“整县畜禽粪便处理特许经营权”，并为项目实施主体协调解决物料收储，搭建收储网络，布局生物质分布式网点。项目实施主体享有农作物秸秆禁烧和综合利用奖补资金、畜禽粪污资源化利

用中央专项资金和地方支持资金。县政府授予项目实施主体“县域有机肥销售特许经营权”，并协助落实下游有机肥消纳市场主体，项目实施主体享有有机肥还田补贴。县发改 / 能源部门协调城燃公司、热网公司、电网公司、售电公司和重点用能单位，协助项目实施主体实现气热电趸售或就近隔墙销售。县政府将该项目作为县域生物质资源化利用和循环经济重点项目予以支持，协助项目实施主体申报国家和省级典型案例，申请相应资金补贴。县政府授权项目实施主体搭建和维护“整县农业废弃物资源化利用大数据平台”，并根据需要在各环节安装物联网传感器，实现远程在线监测，为企业优化生产组织、县有关部门提高管理效率提供数据支撑。

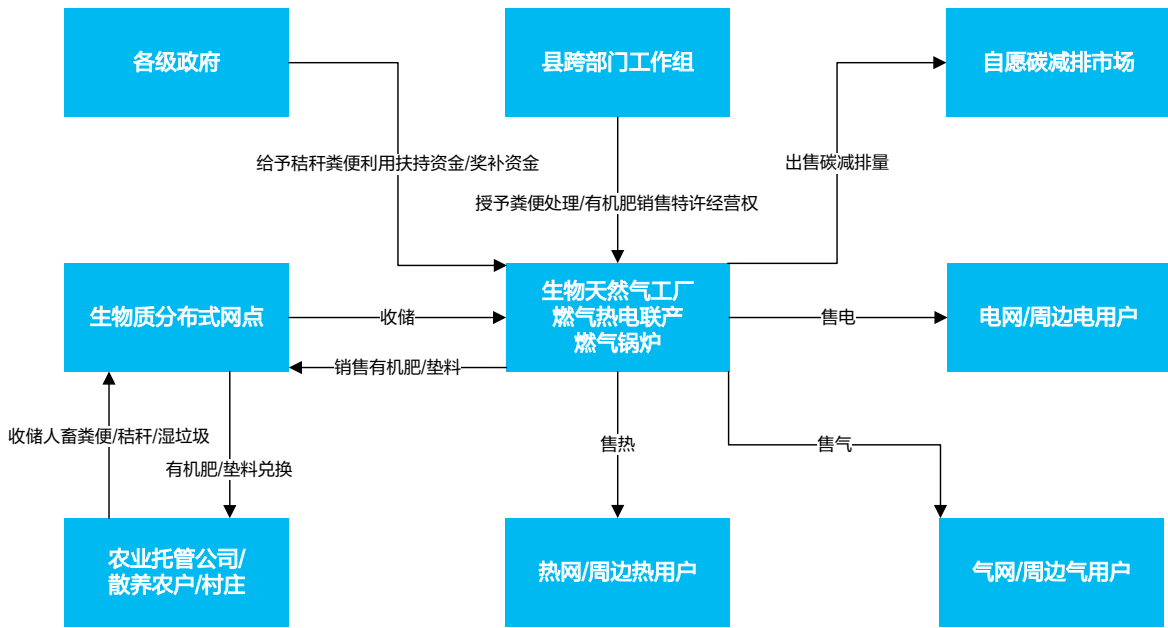


图 9-2：县域生物天然气项目商业模式

9.3 农业产业园低碳无废改造项目

9.3.1 推荐项目综述

农业产业园包含特色农产品种养殖、加工和仓储物流全链条，是县域农业高质量发展的主要载体和三产融

合发展的核心节点，但传统农业产业园的能效和环保标准偏低，制约价值创造能力提升，亟需按照低碳循环化理念进行系统改造升级。经营主体缺少专业经验和改造资金，需要创新商业模式，吸引社会投资。

9.3.2 外地参考项目

产业园能源环境一体化托管模式暂无项目案例，但产业园能源托管（冷、热、压缩空气等二次能源）和环境综合治理托管服务已有很多成熟案例，国内外有关机构已开始推出园区能源环境一体化转型咨询服务。将产业园的能源和环境统筹考虑，由一家综合服务商统一提供全过程专业托管服务，既能降低产业园经营主体的管理成本，又能最大限度地落实减污降碳、协同增效，是值得探索的新方向。

9.3.3 曲沃落地建议

曲沃县可通过合理的产业布局 and 空间规划，按照以农为本、要素集聚、产业融合、绿色发展、创新驱动的要求，以设施农业基地建设和提升改造为核心，推进现代农业循环产业园示范区建设，构建集订单农业、集约化育苗、标准化生产、流程化加工、贮藏保险、分拣包装与物流配送于一体的产业链条，并在此基础上对农业园区进行低碳循环化改造，打通能量流、物质流和信息流。

重点开发园区和周边的工业余热和园区内的分布式光伏、太阳能光热、分散风电、浅层地热能等清洁能源，应用冷库热回收、高温热泵等节能技术，搭建数字化的微能网和能源环境监控平台，通过分布式污水处理实现污水本地处理和分质利用，发挥节能环保协同效应，创建低碳无废农业产业园区，大幅降低农产品环境足迹，提高农产品绿色溢价。

曲沃县拥有丰富的工业余热资源，可通过合理的产业布局 and 空间规划，以能源环境综合解决方案为抓手，引入能源环境一体化托管模式，推进农业产业园低碳无废改造，重点着眼于园区需求并兼顾与县域相关产业部门的耦合，将能源托管和环境污染第三方治理结合，由一家能源环境综合服务商为园区经营主体和终端企业提供包括融资、设计、施工、运维全过程的能源环保托管服务，协助园区经营主体申请扶持资金、政策性贷款、贴息等支持性政策和农业领域的示范认证，制订农产品碳足迹方法学，管理和开发园区碳资产。县域其它类型园区也可结合自身特点尝试此模式。

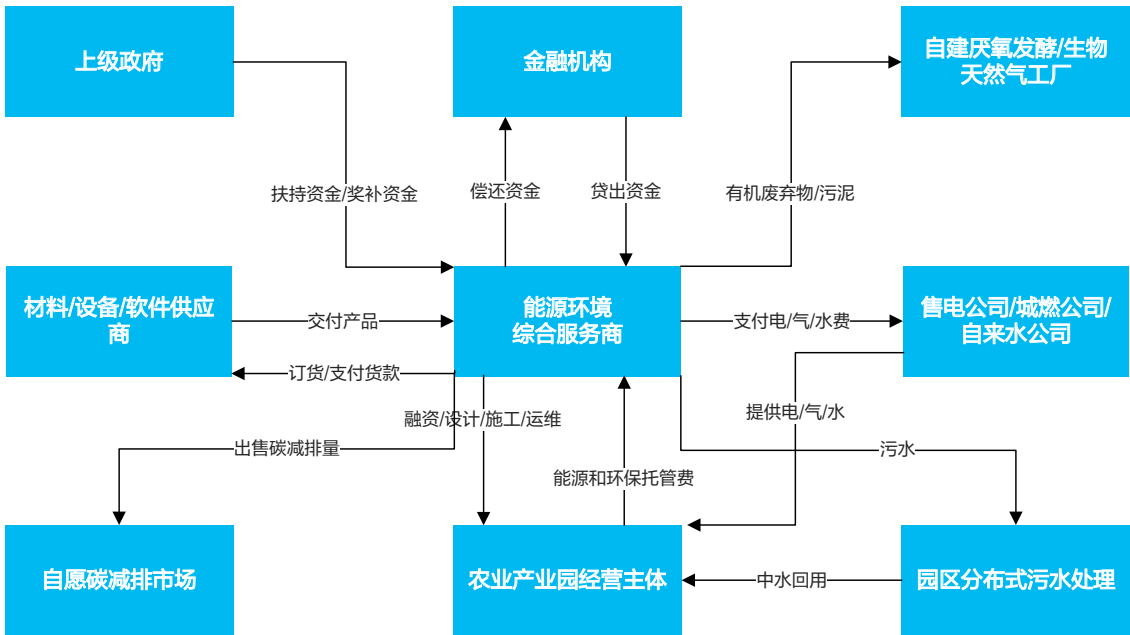


图 9-3：农业产业园低碳循环化改造项目

参考文献

- [1] 国家能源局,生态环境部,农业农村部,国家乡村振兴局.(2023). 农村能源革命试点县建设方案. 国家能源局: http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-03/15/c_1310705024.htm
- [2] 国家能源局,农业农村部,国家乡村振兴局.(2021). 加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见. 国家能源局: http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/29/c_1310411188.htm
- [3] 国家发展改革委,国家能源局,国家乡村振兴局.(2023). 关于实施农村电网巩固提升工程的指导意见. 中华人民共和国发展和改革委员会: https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202307/t20230714_1358371.html
- [4] 国家发展改革委.(2021). “十四五”生物经济发展规划. 中华人民共和国发展和改革委员会: https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202205/t20220510_1324436.html
- [5] 山西省人民政府.(2023). 山西省碳达峰实施方案. 山西省人民政府: https://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfxgkzl/fdzdgknr/lzyj/szfwj/202301/t20230119_7825853.shtml
- [6] 山西省人民政府.(2022). 山西省电力市场运营管理办法. 山西省人民政府: https://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfxgkzl/fdzdgknr/lzyj/szfbgtwj/202211/t20221102_7352675_gfwj.shtml
- [7] 山西省人民政府.(2023). 山西省推进分布式可再生能源发展三年行动计划. 山西省人民政府: https://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfcbw/zfgb2/2023nzfgb/d2q_76595/szfbgtwj_77833/202302/t20230222_8027560.shtml?eqid=b70ecdb200000a66000000046433768a&wd=&eqid=b28ac1ad000d76fd00000003649152eb
- [8] 曲沃县人民政府.(2021). 曲沃县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. 曲沃县人民政府: http://www.quwo.gov.cn/zfxgk/zcwj/xzfwj/202201/t20220121_3799.html
- [9] 曲沃县人民政府. 曲沃县县城总体规划 (2014-2030)
- [10] 曲沃县人民政府. 曲沃县城镇燃气发展规划 (2021-2035)
- [11] 曲沃县人民政府. 曲沃县域农村清洁能源采暖专项规划 (2018—2025)
- [12] 国家电投, 西门子能源.(2022). 2022 中国县域绿色低碳能源转型发展报告
- [13] 能源基金会, 清华大学建筑节能研究中心.(2022). 农村清洁用能体系助力减污降碳及乡村振兴
- [14] 江亿, 清华大学建筑节能研究中心.(2020). 2020 中国建筑节能年度发展研究报告
- [15] 江亿, 清华大学建筑节能研究中心.(2021). 2021 中国建筑节能年度发展研究报告
- [16] 江亿, 清华大学建筑节能研究中心.(2022). 2022 中国建筑节能年度发展研究报告
- [17] 江亿, 清华大学建筑节能研究中心.(2023). 2023 中国建筑节能年度发展研究报告
- [18] 中国光伏行业协会.(2023). 中国光伏产业发展路线图 (2022-2023 年)
- [19] IEA.(2022). IEA Bioenergy Annual Report 2021
- [20] IEA.(2020). IEA Iron and Steel Technology Roadmap
- [21] IEA.(2022). IEA The future of Heat Pumps



NRDC北京代表处

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