

山西低碳转型系列研究

# 重点行业的绿电消纳



## 版权说明

版权归自然资源保护协会与山西科城能源环境创新研究院所有。本报告免费下载，转载或引用请注明来源，不得用于任何形式的商业牟利。如有违反，我们保留依法追究其法律责任的权利。

## 课题组成员

山西科城能源环境创新研究院：赵跃华、许小静、秦艳、何泓  
自然资源保护协会：王佳、刘季熠、金秀芳



山西科城能源环境创新研究院（简称：科城研究院）成立于2017年，是一家以推动区域可持续发展为目标的非营利研究机构和协同创新平台、联合国气候变化框架公约观察员机构。自成立以来，研究院围绕应对气候变化、能源绿色低碳转型、资源循环高效利用、低碳包容性转型、新质生产力培育、环境社会治理等领域开展研究，从政策倡导、战略研究、技术建议、能力建设、策略传播等角度为政府、企业和公众提供绿色低碳转型解决方案。



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。

所使用的方正字体由方正电子免费公益授权

封面图片：长治高新区绿电园区 | 图源：长治高新技术产业开发区

# 执行摘要

山西新能源发展已进入规模跃升与结构转型的关键阶段。2025年底全省新能源和清洁能源装机达9048万千瓦，占总装机比重达55.1%，历史性超越煤电。与此同时，2026年省政府又提出“五年力争新增可再生能源装机1亿千瓦”的目标。在装机规模持续快速增长的背景下，破解消纳瓶颈、畅通就地利用渠道，是山西实现新能源可持续发展的必由之路。

山西高载能产业集中、用电需求体量大，提高工业行业绿电消纳水平不仅能挖掘可再生能源消纳潜力，也能助力产业低碳转型、增强绿色低碳竞争力，推动资源型地区能源与产业协同升级。本报告立足山西资源禀赋与产业实际，聚焦电解铝、数据中心、钢铁、装备制造四大重点行业，统筹行业特性、产业布局与风光资源的空间适配性，构建分行业差异化的绿电消纳模式，厘清落地梗阻并提出针对性建议，以期为山西打造能源与产业深度融合的绿电消纳新格局提供参考。

主要研究结论如下：

## 1、重点行业绿电消纳以采购类为主，投资类处于试点探索阶段

**电解铝行业**2025年进入重点行业绿电消费强制考核阶段，目前绿证采购为合规首选。同时，已有企业积极布局绿电直连、绿电园区等长期路径，目前处于前期规划或工程招标阶段。

**数据中心**省内暂未明确强制考核要求，存量项目受客户需求、风险规避或ESG考核指标等市场因素影响，积极推动绿电消费，方式以绿证采购为主。新建项目则探索多元化绿电消纳模式，通过新建专用输电线路、专用变压器等方式推动绿电就地消纳。

**钢铁行业**目前全行业仍以绿证采购为主要合规手段。出于降本增效等因素考虑，部分龙头企业已主动布局分布式光伏项目。目前，省内已建电炉钢项目用电仍主要来自公共电网。

**装备制造行业**尚未纳入强制考核范畴，行业整体绿电消费占比不高。部分企业受用电成本优化和出口外销市场碳关税政策驱动，积极推进绿电消纳，以自发自用的分布式光伏为主。

## 2、行业用电特征存在差异，决定了绿电消纳模式的选择不同

绿电消纳模式的选择受用电规模、电能质量要求、负荷刚性、可调节潜力以及产业布局与新能源资源匹配度的影响：

**电解铝行业**用电规模大、电力成本占比高、电能质量要求严苛、负荷刚性极强。省内产业布局主要围绕氧化铝企业或煤电厂建设，与优质风光资源区存在一定错配。

**数据中心**用电增速远超省内其他行业，核心算力负荷实际可调节空间小，供电可靠性要求极高。产业集群多布局于新能源资源相对丰富的中北部区域，一定程度上具备与新能源项目直接耦合的条件。

**钢铁行业**核心生产环节负荷调节空间小。产能主要分布于风光资源相对缺乏的中南部城市，钢铁企业扩大绿电实际使用规模，面临新能源指标获取难、跨区域输电成本高等挑战。

**装备制造行业**整体能耗在空间和时间上相对分散，具备一定柔性可调潜力。企业主要聚集于各类经济技术开发区及工业园区，多集中于山西中南部，欠缺优质新能源资源，且工业较密集，新能源可开发土地资源趋紧。

## 3、构建“一行一策”的差异化消纳模式，释放绿电消纳潜力

**电解铝行业打造铝电共生型绿电消纳体系。**在山西存量重点行业中，电解铝最有条件率先实现规模化绿电消纳，重点在于供给端的组合优化，解决“有绿可用”源头问题的同时，保障连续稳定生产，积极探索以绿电园区建设为载体，加快推进企业绿电直供与稳定消纳。

**数据中心打造算电协同融合发展示范。**数据中心的绿电消纳核心在于算力-电力协同。存量数据中心通过多年期绿电交易协议和绿证采购，逐年提高绿电消纳比例；增量数据中心在规划阶段便将绿电消纳纳入前置条件，积极开展绿电直连。

**钢铁行业打造梯次推进的绿电消纳体系。**钢铁行业的绿电消纳重点在于存量优化与增量突破的渐进路径。以绿证交易为托底，确保绿电消纳责任足额落实，并因地制宜推进自发自用分布式光伏项目。将绿电消纳深度融入电炉钢、氢冶金等降碳技术路线，推进新建项目同步衔接绿电直连项目布局，推动多年期绿电交易协议。

**装备制造行业打造园区协同的多元绿电消纳体系。**装备制造行业以产业园区为核心载体，聚焦分布式光伏、微电网示范等，兼顾成本优化与出口碳合规需求，快速提升行业绿电消纳水平。

## 4、问题和挑战

### （1）消费模式堵点待突破

企业可用于碳排放披露等合规用途的优质绿证资源日趋稀缺，价格采购和管理成本增加；绿电交易环节繁琐，省内不同区域交易范围、结算方式等细则不统一，5年以上购电合同的价格信息和可参考的市场案例也相对不足。

投资类模式（绿电直连、绿电园区等）推进面临着新能源资源与变电站容量约束凸显、电源及电网建设周期与负荷侧项目建设周期难同步、投资长期性与传统基金短期逐利不匹配等挑战。

### （2）政策引导机制待健全

对电解铝、钢铁等强制考核的行业尚未建立具有可操作性的指标分解机制，难以有效压实相关主体责任。

奖惩机制激励不足、约束偏弱。对未完成目标的惩戒措施不明确，对超额完成的激励机制不清晰。

制度衔接不畅。绿电消纳考核与碳排放权交易、碳排放双控等机制尚未有效衔接，碳减排效益难以转化为实际经济收益。

### （3）企业认知不足消纳偏被动

多数企业仅将绿电消纳视为考核合规性成本，未充分认识其在提升市场竞争力、平抑电价波动降本等方面的综合效益。过度依赖争取外部电价优惠，忽视系统优化、智能调度、技术降本等内生可持续手段。

## 5、建议

### （1）科学设立并合理分解绿电消费目标，压实主体责任

制定省级重点行业绿电消纳目标和分解方案，逐步将省级绿电消费考核范围扩展至数据中心、装备制造等重点行业。充分兼顾行业用能特点、资源禀赋等因素，探索差异化分解至企业，做到“行业有侧重、企业有弹性、总体保完成”。到2030年，全省重点行业绿电消费比例力争达到45%。

### （2）推动采购类模式与物理消纳路径协同发展，引导企业建立多元化绿电消纳策略

- 推动多年期绿电交易常态化：加快制定省级多年期绿电交易标准化合同范本，明确交易核心条款。推进长周期交易机制建设，鼓励新能源企业与重点用

能行业签订10年以上长期购电协议，并建立长协备案与履约监管机制，将履约情况纳入信用评价。

- 扩大绿电直连覆盖范围：将钢铁电炉改造、电解铝工艺升级等稳定用电增量技改项目纳入绿电直连支持范围。明确“过渡期用电不改变负荷属性”等政策口径，保障因电源建设滞后而暂用常规电的负荷可转为绿电直连。加快推进绿电直连项目清单管理与滚动实施，树立不同行业的示范标杆。

- 完善绿电园区全流程管理：健全园区认证与信息披露体系，设置绿电消纳占比、能效、碳排放等核心指标；统一园区绿电消纳核算、溯源与认证流程；建立绿电园区常态化评价与动态退出机制。

- 率先探索分布式绿电“隔墙售电”落地机制：细化接入标准、交易主体准入、过网费核定、结算流程等关键制度，优先在全省13个绿电园区中选取成熟试点，形成可复制样板。

### **（3）强化政策引导，增强重点行业企业绿电消纳内生动力**

- 与省级碳核算体系相结合：制定省级绿电碳减排量核算规范，推动绿电消纳量在碳排放考核中科学抵扣。

- 探索绿电消纳与产业调控联动机制：将绿电消费作为钢铁、水泥等重点管控行业生产指标分配的重要依据，并纳入行业环保绩效评价。

- 健全评估机制：建立季度监测、年度评估制度，发挥行业协会作用，建立企业自律与互查机制，并与金融机构共享评估结果。

- 引导中长期“耐心资本”投入：支持绿电园区、绿电直连项目申报地方政府专项债，争取政策性银行中长期低息贷款，吸引省属国企、大型发电集团等长期资本参与投资。

### **（4）做好绿电消纳服务保障，夯实项目落地与持续运行基础**

- 完善绿证交易服务机制：持续提升交易服务水平，简化核销流程，为企业提供绿证消费规划建议，避免因时间错配导致绿证失效或价值折损。

- 培育绿电交易专业服务市场：推动成立山西省绿电消费服务联盟，整合电力交易、碳核算、法律咨询等资源，提供一站式解决方案。

- 优化绿电溯源体系：在绿电直连项目和绿电园区中率先试点区块链技术赋能绿电消费核算及认证溯源，为应对国际碳合规提供权威凭证。建设省级电碳因子数据库，推动核算结果获得《欧盟碳边境调节机制》（CBAM）、全球企业可再生能源倡议（RE100）等国际规则认可。

# 目录

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 第一章 | 重点行业是绿电消费的主战场.....                              | 1  |
| 第二章 | 山西省重点行业绿电消纳现状.....                              | 2  |
|     | 2.1 电解铝行业 .....                                 | 2  |
|     | 2.2 数据中心 .....                                  | 3  |
|     | 2.3 钢铁行业 .....                                  | 4  |
|     | 2.4 装备制造行业.....                                 | 5  |
| 第三章 | 构建“一行一策”的绿电消纳模式和潜力展望.....                       | 6  |
|     | 3.1 电解铝行业 .....                                 | 6  |
|     | 3.2 数据中心 .....                                  | 9  |
|     | 3.3 钢铁行业 .....                                  | 11 |
|     | 3.4 装备制造行业.....                                 | 13 |
| 第四章 | 重点行业绿电消纳面临的挑战.....                              | 18 |
|     | 4.1 消费模式堵点待突破.....                              | 18 |
|     | 4.2 政策引导机制待健全.....                              | 19 |
|     | 4.3 企业认知不足消纳偏被动 .....                           | 20 |
| 第五章 | 支撑重点行业绿电消纳的保障措施和对策建议.....                       | 21 |
|     | 5.1 科学确定并合理分解省级2030年绿电消费目标，压实重点行业<br>主体责任 ..... | 21 |
|     | 5.2 推动采购类模式与物理消纳路径协同发展，引导企业建立多元<br>化绿电消纳策略..... | 22 |
|     | 5.3 强化政策引导，增强重点行业企业绿电消纳内生动力.....                | 23 |
|     | 5.4 做好绿电消纳服务保障，夯实项目落地与持续运行基础.....               | 24 |
|     | 参考文献 .....                                      | 26 |

# 第一章

---

## 重点行业是绿电消费的主战场

近年来，山西新能源装机规模持续攀升，截至2025年底，山西新能源和清洁能源装机9048万千瓦，占全省发电装机的比重达到55.1%，首次超过煤电。但同时就地消纳利用不足的现象日益突出，全省风电、光伏利用率自2023年开始下降，根据国家能源局监测评价结果，2024年山西未完成可再生能源电力总量消纳责任权重，成为全国少数未完成考核的省份之一。2026年山西省政府工作报告提出，未来5年全省可再生能源装机规模力争新增1亿千瓦的目标，唯有打通消纳堵点，加快构建以本地消纳促发展、以发展带消纳的良性循环，才能实现新能源规模扩张与提质增效协同推进。

工业领域是绿电消纳最具潜力的“主战场”。对于高载能产业密集、碳排放总量较大的山西省而言，推动重点高载能行业绿电就地消纳，不仅能够有效促进新能源消纳，更可为产业注入绿色竞争力，探索出一条资源型地区绿电引领、产业升级的高质量发展新路。

本报告综合考虑行业特性、未来用电增长潜力、政策约束和市场驱动等因素，选取电解铝、数据中心、钢铁、装备制造四个重点行业作为研究对象，深入分析其产业分布与风光资源的空间匹配格局，识别构建“一行一策”的绿电消纳模式，剖析落地过程中的堵点难点，提出支撑重点行业绿电消纳的对策建议，力求为山西构建产业与新能源深度融合的绿电消纳新格局提供有益参考。

## 第二章

---

# 山西省重点行业绿电消纳现状

绿证购买是当前省内钢铁、电解铝、数据中心等重点行业企业完成考核、满足客户需求或ESG等目标最主流最直接的消纳方式，自发自用分布式光伏凭借良好经济性成为装备制造企业自主降碳的优先实践路径，绿电园区、绿电直连等新模式正处于前期规划和试点探索阶段，下一步如何从试点先行转向规模化落地、从被动合规转向主动转型，是推动山西重点行业绿电就地消纳提质增效的核心方向。

## 2.1 电解铝行业

**在强制考核政策落地前，部分企业已参与的绿电交易多为“证电分离”模式，且以一年期合同为主。**据了解，目前部分企业参与的绿电交易往往仅涵盖电能本身，未将绿证纳入其中，这一现象的背后，是企业从控制用电成本角度出发的现实选择。2024年山西省新能源中长期交易（不含环境权益）均价为0.3173元/千瓦时<sup>[1]</sup>，若采购“证电合一”的绿电，需额外支付约0.015-0.030元/千瓦时的环境权益价格；而按照2024年全国绿证平均价格5.59元/个计算<sup>[2]</sup>，单独购买绿证的成本仅为0.006元/千瓦时。这意味着，绿电溢价是绿证价格的2.5倍以上，对于年用电量1亿度的企业而言，选择“证电合一”模式将比“绿证采购”模式多支付约200万元的成本。同时，企业签订的绿电采购合同也以一年期年度合同为主，市场上几乎没有期限为5年以上的中长期绿色电力交易协议，绿电消费的稳定性与可预期性仍有较大提升空间。

**随着强制考核的全面实施，购买绿证已成为省内电解铝企业目前完成绿电消费目标最主流、最直接的方式。**山西电力交易中心发布的重点用能企业绿证持有情况显示，省内4户电解铝企业全部在列。根据《关于2025年可再生能源电力消纳责任权重及有关事项的通知》(发改办能源〔2025〕669号)，重点用能行业绿电消费比例完成情况明确“以绿证为主”进行核算，在当前绿证价格低于绿电交易溢价的现实条件下，企业选择成本更优的绿证采购满足合规要求，是符合政策规定和现阶段市场机制的客观反映。

值得关注的是，在满足短期合规的同时，电解铝企业也在积极规划绿电投资类应用路径，为低碳转型做长期准备。山西中润铝业不断拓展分布式新能源项目布局，2023年底分布式光伏装机容量已达12.86兆瓦，年发电量1824.02万千瓦时。尽管由于电解铝行业用电规模巨大，分布式光伏发电量仅占该企业全部用电量的1%左右，但这标志着企业已开始从源头发力为长远发展做准备。此外，中润铝业正在参与规划建设155万千瓦兴县绿电园区项目，以期进一步保障企业未来的绿电需求。中铝山西新材料已建设完成30兆瓦分布式光伏项目，正规划二期20兆瓦分布式光伏项目，全部并网后年发电量可达6000万千瓦时。山西兆丰铝电新材料基于一期29.4万吨/年的产能置换项目，正在规划绿电直连配套方案，为产业绿色转型提供绿电保障。

**行业小结：**山西省电解铝行业正处于绿电消纳格局重塑的过渡阶段，强制考核催生了绿证市场的繁荣，但真正意义上的通过物理连接实现绿电直接消纳的模式仍在试点探索中，如何引导企业从“买绿证”转向“用绿电”，是政策设计需要回答的关键问题。

## 2.2 数据中心

在政策约束缺位的情况下，绿色已成为数据的核心市场竞争力，省内存量数据中心积极推动绿电消费，方式以绿证采购为主。山西不在八大国家算力枢纽节点之列，暂不受“国家枢纽节点新建数据中心绿色电力消费比例在80%基础上进一步提升”的考核要求，省内政策文件也暂未明确提出存量和新建数据中心的绿电消费目标考核要求。但随着绿色已成为数据的核心市场竞争力，受客户需求、政策趋势、风险规避或ESG考核指标等多重因素影响，省内数据中心积极推动绿电消费，方式以绿证采购为主。其中，大同灵丘秦淮数据中心通过绿证购买方式，2025年消费绿电约7.6亿千瓦时<sup>[3]</sup>，占全部用电量的33%。以绿证平均价格5元/个估算，在原有购电成本基础上，需额外支付约380万元的绿证购置成本，这笔“绿色溢价”并未计入任何政策考核，而是企业面向未来、面向市场的主动选择。

**一批新建项目正依托本地资源禀赋，积极探索绿电园区、算电协同等新型消纳模式。**秦能科技大同超级能源综合体算电协同绿电园区项目拟建设集中式风电30万千瓦、集中式光伏20万千瓦，通过新建专线专变直连园区，配套50兆瓦/100兆瓦时的储能电站，实现绿电在产业园区内就地消纳。作为省内首个算电协同方向的绿电园区，其“风光同场直供+配套储能+专线直连”的技术路线，或可为高载能、高稳定需求的数据中心绿电消纳提供参考范本。

**行业小结：**山西省数据中心存量项目受制于既有政策对新模式的合规要求、

设施条件和用电稳定性要求等因素，以绿证采购为主满足绿色需求；部分增量项目则依托新建契机，从规划设计阶段就将绿电直连、算电协同纳入考量。意味着对于存量项目，政策需着力降低绿证交易成本、打通绿电交易堵点；对于增量项目，则需加快规范绿电直连、绿电园区等新模式的审批流程，完善配套支持政策，让“算电协同”从试点走向普及。

## 2.3 钢铁行业

**绿电消费强制考核政策明确前，龙头企业已前瞻布局分布式光伏项目，从“屋顶”开始提升绿电使用比例。**晋南钢铁自2022年以来持续投资光伏发电项目，目前共建成分布式光伏电站37个，装机容量达到170MW，年发电量达到2亿千瓦时，占到企业年用电量约6%，每年降低用电成本约4500万元<sup>[4]</sup>。太钢集团已建成分布式光伏项目装机容量92.47MW，年发电量约6000万千瓦时，占到企业年用电量约1.5%，其中4300mm不锈钢中板轧制工艺全程使用厂房屋顶光伏所发绿电，产品碳足迹较传统工艺降幅达75%以上<sup>[5]</sup>。

**然而，分布式光伏的探索尚属少数企业实践，从全行业看，绿证采购仍是完成绿电消纳考核指标的主流路径，且已开展的绿电交易属“证电分离”模式。**2026年起，钢铁行业绿电消纳指标将进入实质性考核阶段，绿证采购成为绝大多数企业完成合规要求的主要手段。据了解，钢铁行业吨钢电耗约200-400kWh，按照绿电消费比例30%、绿证平均价格5元/个计算，吨钢电耗对应的绿证购买成本为0.3-0.6元；若绿证价格每上涨1元/个，吨钢成本将在目前水平上增加0.06-0.12元。在行业利润承压的背景下，绿电消纳指标加大、绿证价格上升等因素，都会推动企业更加重视长期投资项目与短期绿证采购的成本效益。此外，与电解铝行业类似，在绿电交易方面，目前企业已开展的交易以“证电分离”模式为主。2021年底，太钢按照“绿电优先、成本最优”原则，确定晋能控股电力集团、华能集团山西分公司为2022年度电力供应合作单位，此后连续三年绿电采购量超过11亿千瓦时<sup>[6]</sup>，占太钢外购总电量的比例超过18%，这部分绿电采购采用“证电分离”模式，企业初始动因往往是对经济性的考量，更深层的驱动力则是对政策趋势的预判以及构建未来绿色竞争力的战略布局。

**电炉钢作为钢铁行业绿色转型的关键方向，目前省内项目用电仍主要来自公共电网，电力来源的“含绿量”仍有待提升。**目前，省内已开展的电炉钢项目集中在两家企业，分别是太钢集团年产70万吨不锈钢的电炉生产线和山西通才工贸年产65万吨优质合金钢的电炉。这些电炉项目用电主要依托公共电网供给，尚未开展绿电供给的相关实践，这意味着，即使采用了更为低碳的电炉工艺，高碳的电力结构仍使其产品碳足迹维持在较高水平，电炉工艺相较于长流程的减排优势被部分稀释，减排效益仍未得到充分释放。

**行业小结：**钢铁行业的绿电消纳仍处于“浅层合规”阶段，绿证满足了政策要求，却尚未真正改变企业的用能结构；仅部分企业具有建设自发自用分布式光伏的资源条件，且仅能满足少部分用电需求；如何将龙头企业的先行探索转化为行业推广的绿电应用实践，如何开辟绿电直连等物理消纳新路径，是钢铁行业绿电消纳需突破的关键问题。

## 2.4 装备制造行业

**山西装备制造行业整体绿电消费占比不高，部分企业绿电消费呈现双重驱动态势，一方面受用电成本优化诉求显著驱动，另一方面由欧美外销市场碳关税政策牵引，方式以自发自用分布式光伏为主。**目前装备制造行业尚未被纳入强制绿电消费考核的范畴，大部分企业对绿电消费缺乏足够关注，绿电消费在行业整体用电结构中占比不高。而同时，在成本优化需求的驱动下，部分装备制造企业主动布局分布式光伏项目，探索绿电自用的降本路径。其中，面向欧美市场的出口型企业对绿电消费更加重视，以绿电物理溯源为核心支撑，自发自用分布式光伏已逐步成为行业兼顾成本可控、政策合规与市场可行的主流选择。以临汾某装备制造企业为例，截至2025年底，厂区内自建分布式光伏发电量占企业用电量比重达10%，三期项目全部建成后可提升至30%，项目投资回报期仅3.88年，回收周期结束后，自发自用绿电将实现近乎零成本供应，同时有助于企业满足海外市场碳关税要求，提升出口产品竞争力。

**行业小结：**成本优化是基础动力，市场碳约束是加速器，意味着对于政策尚未覆盖的非强制考核行业，政策设计的着力点不应只是简单套用强制目标，还要为市场机制发挥作用创造更好条件，例如降低分布式光伏开发门槛、建立绿电溯源认证体系等，助力企业看得见成本、算得清收益的同时提升产品低碳竞争力，推动绿电消纳市场化良性循环。

# 第三章

---

## 构建“一行一策”的绿电消纳模式和潜力展望

不同行业的用电特性、负荷刚性、产业布局与新能源资源匹配度存在差异，“一刀切”的消纳模式难以适配多元需求，也难以支撑从试点探索向规模化落地的跨越。需坚持分类施策、精准适配、一行一策的总体思路，形成与行业特征高度契合、与资源空间高效协同、与政策市场有效衔接的差异化绿电消纳体系。

### 3.1 电解铝行业

#### 3.1.1 用电特征与调节潜力

**电解铝企业用电规模对所在城市整体用电负荷的拉动作用突出，对电价波动极敏感。**2025年，全省电解铝产量117.8万吨，占全国约2.6%，按照电解铝生产单位耗电系数1.35万千瓦时/吨计算，全年用电量约160亿千瓦时，占全省用电量约5%。但单户企业用电规模大，对区域电力供需平衡和用电保障影响明显，以中润铝业为例，年度用电量超60亿千瓦时，约为吕梁市用电量的五分之一。电解铝生产的电力消耗成本超40%，对于电解铝产能50万吨、年用电量超60亿度的企业，电价每变动1分，将影响购电成本约6000万元。

**生产工艺不可中断且对电能质量要求高，辅助环节用电量占比不到2%，可调节负荷空间很少。**电解槽是电解铝生产工艺中的核心耗能设备，一旦启动须24小时不间断运行，意外停电会导致槽内铝液在几分钟到几小时内凝固，造成“凝槽”事故，生产恢复需要数月时间且耗费巨额资金，更可能损坏电解槽本体。同时，电解过程对电能质量极为敏感，电压或频率的微小波动均会直接影响铝液纯度与电流效率。通风、运输、照明等辅助环节的用电占比不足2%，整个生产系统刚性强，能够安全、灵活进行启停或功率调节的负荷空间微乎其微。

### 3.1.2 产业布局与新能源匹配性

山西省电解铝企业多围绕氧化铝企业或煤电资源建设，“煤电铝”向“绿电铝”转型面临资源错配挑战，绿电园区等政策为企业绿电消纳提供推进条件。截至目前，山西省内共有电解铝企业4家，产业发展具有鲜明的资源依赖特征，主要围绕氧化铝企业或煤电厂建设。这种“煤电铝一体化”模式旨在依托邻近的上游氧化铝供应或煤电资源获取成本优势，而这一布局与优质风光资源区存在一定错配。若要大规模消纳绿电，企业需在其现有生产基地周边甚至更远区域，寻找和建设新的风电、光伏等新能源电源点，面临新能源指标获取难度大、跨区域输电成本高、电网调配压力大等挑战。同时，省级绿电园区、绿电直连等政策出台为企业推进绿电物理消纳提供条件，其中，兴县绿电园区155万千瓦新能源项目签约落地，阳泉铝产业链绿电直连试点进入工程招标实施阶段。



图3-1 山西电解铝产能分布情况

数据来源：课题组根据公开资料整理

### 3.1.3 打造铝电共生型绿电消纳体系

山西省铝产业链呈现上游氧化铝产能充裕、中下游配套不足的结构失衡，电解铝作为衔接上游原料与下游精深加工的关键环节，对延链补链强链的支撑作用突出，加快由“煤电铝”向“绿电铝”转型对于锻造山西产业链低碳竞争优势具有重要意义。电解铝行业的绿电消纳重点更在于供给端的组合优化，而非负荷端的柔性调节，解决“有绿可用”源头问题的同时保障连续稳定生产，构建源荷高度耦合的刚性消纳模式，是符合山西实际的可行路径。把握省级绿电园区建设、绿电直连试点等政策机遇，叠加电解铝行业用电负荷集中、绿电替代需求明确、降碳作用明显、项目具备一定落地基础等优势，在增量负荷引进不足的情况下，山西电解铝行业是全省最具条件率先规模化实施绿电物理消纳的存量优质重点行业。建议：

- **深挖企业及周边绿电资源确保“有绿可依”**。立足各企业所在区域的风光资源禀赋，系统整合已建成、在建及待开发的新能源项目，构建多元互补的绿色能源供给体系。如兆丰铝业重点整合孟县西烟镇风电场二期100MW项目及已部分并网的晋能孟县100MW光伏等项目，中润铝业依托兴县经济技术开发区加快推进155万千瓦绿电园区新能源开发。通过资源摸排与统筹开发，保障电解铝行业实施绿电物理消纳具备“有绿可用”的资源前提。此外，探索“绿电-煤层气”耦合的园区多能互补模式，将兴县丰富的煤层气资源与绿电园区建设深度融合，充分利用气电的调峰作用平抑绿电波动，打造全国首个“风光气储”多能互补的零碳铝产业基地。

- **创新多元化绿电接入路径**。根据各企业所在区域的资源条件、电网条件、自备电厂配置等因素，灵活选择差异化的绿电供给模式：一是依托省级政策，支持兆丰铝业、中润铝业积极推进绿电直连试点和绿电园区建设；二是推动朔州能源铝硅合金以分布式光伏为切入点，紧抓朔州经开区绿电园区建设机遇，积极推动企业作为优质稳定负荷纳入园区负荷端统筹配套，探索通过“多用户绿电直连”模式进一步拓展绿电就地消纳空间；三是对于中铝山西新材料等拥有自备电厂的企业，在巩固市场化绿电、绿证交易的基础上，积极谋划自备电厂关停或转型，依托“以荷定源”原则探索绿电直连项目实践；四是针对运城等铝产业中心与新能源资源地理错配的问题，借鉴包头铝业“借用电网线路”的经验，利用现有电网冗余容量，通过市场交易与智能调度实现绿电跨区输送，打造山西新能源异地开发与绿电跨区输送模式试点。

基于上述组合优化路径，若山西省将电解铝行业作为存量重点行业中规模化实现绿电物理消纳的标杆予以打造，并在项目审批、绿电资源配置、电网接入、储能配套等方面给予针对性政策支持，四家电解铝企业全面实施绿电物理消纳模式后，全行业的绿电物理消纳比例将至少达到30%，为全省高载能行业结构性能源转型树立标杆范例。

## 3.2 数据中心

### 3.2.1 用电特征与调节潜力

数据中心已成为山西全社会用电量的主要增长点，省内数据中心主要集中在大同、太原、阳泉等市，其中大同最具该产业发展的资源和区位优势。2018-2023年，全省互联网数据服务业（以数据中心为主）用电量翻了356倍，5年平均增速224%，远超其他行业用电增速。2024年全省互联网数据服务业的用电量突破40亿千瓦时，占全省用电量1.5%，拉动全省用电增长超0.57个百分点。截至2024年底，在用、在建的约14个数据中心主要集中在大同、阳泉、太原3市，其中大同凭借其能源、气候和区位优势，逐步发展成为全国性算力高地，占全省数据中心用电量约97%。

数据中心的用电需求具有高度的绝对连续性，主要源于业务保障的刚性要求，而非物理生产工艺限制。与电解铝等工业行业因工艺不可中断不同，数据中心对供电连续性的要求更多是保障算力服务和数据交互不中断。虽然供电的绝对连续并不等同于负荷完全不可调节，理论上可通过智能调度算法，将离线渲染、模型训练、数据备份等非实时计算任务进行错峰、迁移或排队，一定程度上具备时间弹性，但在实际运行中，大量金融交易、云平台核心业务等场景对延迟极为敏感，必须严格遵守服务协议（SLA），基于业务调度的柔性潜力空间有限。数据中心更现实、更主要的柔性调节手段通常聚焦于占总耗电约10%-20%的空调制冷等辅助系统。据了解，全省数据中心平均PUE（电源使用效率）低至1.2<sup>[7]</sup>，优于全国1.42<sup>[8]</sup>的平均水平，在提供相同算力的前提下，低PUE数据中心的总用电量更少，且通常配备更智能、高效的温控系统和能源管理系统，用电负荷具备更强的可预测性与可调节性，有助于实质性提高绿电在总用电中的即时消纳比例。

### 3.2.2 产业布局与新能源匹配性

省内大型数据中心集群多位于新能源资源相对丰富区域，具备与新能源项目直接耦合的可能。根据山西“1+3+N”<sup>1</sup>的数据中心空间体系构建思路，省内新规划布局的数据中心项目多位于山西中北部地区，个别位于晋城、长治、运城等南部城市。中北部地区新能源资源相对丰富，具备实现算力与绿色能源供给融合的可能。《大同市数据产业发展三年行动计划（2024-2026年）》也明确提出依托广灵、灵丘、天镇等地的算力能源综合体项目，进一步促进新能源的本地消纳。例如大同市灵丘县秦能科技大同超级能源综合体算电协同绿电园区计划在园区20公里范围内布局500MW风光发电基地，通过新建专线专变实现绿电直供，并配

<sup>1</sup> “1+3+N”的数据中心空间体系指以太原为核心，大同、吕梁、阳泉为支撑，多市协同发展的格局

套建设50MW/100MWh园区侧储能电站，形成增程式储能架构，实现绿电就近直连和就地消纳。

### 3.2.3 打造算电协同融合发展示范

大同市所在的晋北地区是全国少有的兼具地理区位优势、新能源资源与良好数据产业发展基础的重点区域，在新能源外送消纳压力增大的背景下，推动本地绿电资源与数据中心高效结合，将绿色能源转化为地方经济价值，是保障新能源高质量发展的现实迫切需要。与电解铝行业产能布局基本稳定、打造“铝电共生”的物理直连模式不同，数据中心的绿电消纳核心在于算力-电力协同，其路径更强调市场化配置与新建项目前瞻规划，形成“存量渐进提升、增量高标建设、机制创新突破”的梯次推进格局，将大同数据中心集群打造为全国算电协同示范。建议：

- **推动存量数据中心通过多年期绿电交易协议和绿证采购，逐年提高绿电消纳比例。**鼓励大同秦淮、京东、抖音、中联、秦云等算力中心及太原、阳泉等重点数据中心，与省内新能源企业签订5年以上绿电长期购电协议，锁定绿电价格与消纳量，稳定企业投资预期。推动现有数据中心加装智能能源管理系统，挖掘系统调节潜力，参与需求响应。

- **推动增量数据中心在规划阶段便将绿电消纳纳入前置条件，积极开展绿电直连。**增量数据中心是打造“算电协同”示范的主战场，建议明确将“绿电消纳比例不低于80%”纳入本省新建数据中心项目的核心准入指标，推动山西增补为“东数西算”国家枢纽节点。以“环首都算力走廊”为依托，统筹灵丘、广灵、天镇等县区集群布局，将规模化数据中心引导至风、光资源富集区域集约建设。在大同数据中心集群等核心区域，加快增量配电网建设，整合分布式光伏、风电及储能资源，构建“绿电直连+增量配电”的供电体系。分批将具备绿电配套条件的数据中心项目纳入省级绿电直连试点，推动新建项目与新能源项目同步规划、建设和投产，实现绿电就地转化。

- **攻关算电协同核心技术体系与市场机制。**围绕算电协同规划、监测、运行全链条，加快构建算电协同技术标准体系，集中攻关协同规划、智能调度、市场交易等核心技术，积极研究完善绿电就近消纳价格机制，开展算电协同标准制定，形成可复制、可推广的算电协同“山西方案”。整合省内电信运营商网络与算力资源，积极对接新能源项目，探索通过省级绿电交易平台实现跨区域绿电调配，弥补中南部区域新能源资源分布不均短板，为全省数据中心规模化消纳绿电提供稳定保障。

基于算力产业发展规模、用电需求增速及绿电模式全覆盖预期，若增量项目全部按照80%绿电消纳比例建设，数据中心将成为全省绿电消纳占比最高的重点行业，树立资源型地区产业绿色发展标杆。

## 3.3 钢铁行业

### 3.3.1 用电特征与调节潜力

**钢铁行业用电总量大，但电力成本占比相对低。**2024年，全省钢铁行业用电量324.58亿千瓦时，占全社会用电量约11%。钢铁行业用能结构中焦炭占比超70%，其次原煤消费占比约16%，电力消费占比约10%，相较于焦炭、煤炭等化石能源的消耗量与原料成本规模，电费在钢铁企业总成本中的占比相对较低，一定程度上削弱了企业主动承担绿电溢价的经济动力。

**生产连续性要求高，核心生产环节负荷调节空间小，负荷的弹性与可调节性更多通过精细化调整辅助工序和工艺参数来实现。**省内传统高炉-转炉长流程冶炼工艺占比超95%，能量密度高度集中且刚性强，高炉中断会导致铁水凝固、耐火材料损坏，生产负荷调节空间有限。轧钢等工序可短暂中断或调整生产顺序，但频繁启停会降低设备寿命、增加能耗、影响产品质量，中断成本较高。太钢利用烧结系统原料工序料仓储备功能开展“避峰就谷”用电管控工作的实践表明，钢铁企业可通过工序间的精益管理与智能协同，在不影响主流程的前提下，将原料破碎、物料输送等部分非连续工序调整至绿电富余时段运行，为绿电消纳提供低成本、可推广的灵活性空间。

### 3.3.2 产业布局与新能源匹配性

**山西钢铁产能主要分布于南部城市，与省内新能源资源分布存在错配。**截至2024年底，山西省粗钢产能约7000万吨，钢铁企业21家<sup>[9]</sup>。省内太钢、建龙等钢铁企业多基于铁矿资源、焦炭、水源和交通枢纽布局，通常形成独立的工业区，其中太原市、运城市、临汾市三市粗钢产能占全省比重达60%，其次是长治市和吕梁市，产能占比约27%，晋城、晋中、大同、忻州分布有少量粗钢产能，占比13%左右，阳泉市和朔州市暂无钢铁产能分布。钢铁产能分布与省内风、光资源主要集中于晋北地区的分布情况存在错配，意味着南部钢铁企业若要大规模扩大实际绿电使用规模，将面临新能源指标获取难度大、跨区域输电成本高、电网调配压力大等挑战。

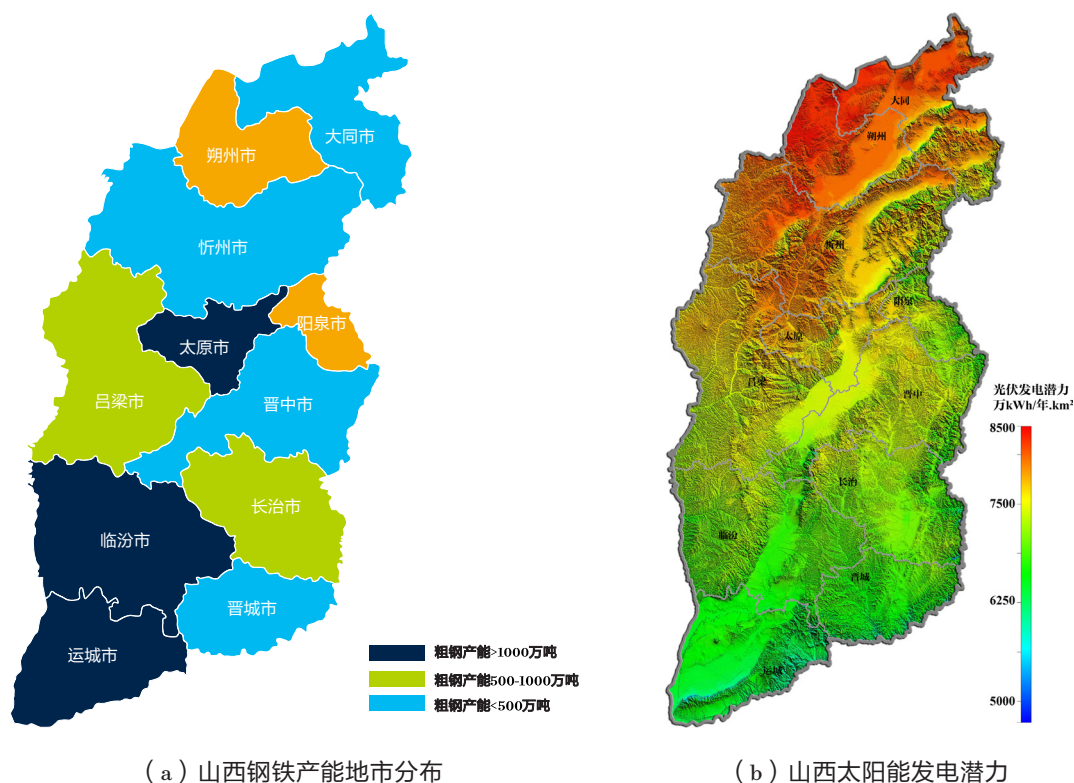


图3-2 山西钢铁产能分布与太阳能资源分布情况

资料来源：（a）课题组根据公开资料整理（b）王慧丽,蔡博峰,刘丽莎,等. 中国能源大省中长期温室气体排放路径研究:以山西省为例[M/OL].中国环境出版集团,2025

### 3.3.3 打造梯次推进的绿电消纳体系

作为全国重要的钢铁生产基地，山西吨钢碳排放强度高于全国平均水平，在“双碳”目标深入推进的背景下，钢铁行业转型已迈入深水区，传统高碳发展模式面临深刻变革。绿电消纳之于钢铁行业，并非简单的能源替代，更是推动全产业链深度脱碳的关键支点。

钢铁行业的绿电消纳关键不在于一步到位的物理直供，而在于存量优化与增量突破的渐进路径，短期以绿证交易为托底确保绿电消纳责任足额落实，同时结合企业厂区实际条件，因地制宜建设自发自用分布式光伏项目，重点覆盖非连续生产工序，依托“错峰就谷”策略深挖用电调节潜力，提升绿电就地消纳能力。此外，持续推进电炉钢项目谋划，在项目规划阶段同步衔接绿电直连项目布局，实现绿电供给与生产需求的提前匹配。中长期来看，将绿电消纳深度融入电炉钢、氢冶金等节能降碳技术路线，同时通过多年期绿电交易协议，逐年稳步提升绿电消纳比例，推动钢铁行业绿色低碳转型与新能源高效消纳协同发展。建议：

- **深挖现有产能绿电消纳潜力，推动存量优化。**充分利用钢铁企业厂房屋顶、闲置场地，规模化开发发自自用分布式光伏项目，优先为车间照明、办公设施及辅助生产环节供电，实现绿电就近消纳；深挖企业可调节负荷，依托水泵、空压机、除尘系统等辅助工序的弹性负荷潜力，纳入电网需求响应体系，支持企业利用能源管理平台通过AI算法优化生产时序；搭建钢铁行业专属绿电交易通道，鼓励企业通过省内电力交易平台，与晋北、晋西等新能源富集区的风光项目签订长期购电协议。

- **推动工艺技术转型与绿电消纳协同，提高增量绿电替代。**一是推进“绿电+电炉钢”协同发展。选取太钢、通才工贸等具备电炉钢产能基础的钢铁企业，开展短流程电炉+绿电直供降碳试点，支持优先配置风电、光伏等新能源资源，并对试点项目给予节能降碳专项支持与绿色金融倾斜。支持绿电消纳比例不低于30%的新建电炉炼钢项目建设，在项目规划阶段同步衔接绿电直连项目布局，从源头锁定绿色低碳发展方向。二是推动“绿电+绿氢”深度耦合的氢冶金试点。依托晋南钢铁、美锦等具备一定氢冶炼条件的企业，开展绿电制氢-氢冶金项目示范，有效降低吨钢碳排放强度。

通过存量挖潜与增量突破，山西钢铁行业有望形成分布式光伏广覆盖、负荷调节常态化、电炉绿电深耦合、氢冶技术示范化、绿电交易市场化的统筹梯次推进格局。到2030年，若全省短流程炼钢占比达到10%，考虑绿电+短流程试点取得突破，理想状态下电炉钢环节绿电消纳占比有望突破30%，成为行业绿电消纳的最主要增长点。

## 3.4 装备制造行业

### 3.4.1 用电特征与调节潜力

**山西装备制造行业用电量比重逐年增加，其中金属制品业、电气机械和器材制造业、通用设备制造业增长最快。**2015-2024年，全省装备制造行业<sup>2</sup>用电量从54.98亿千瓦时增至143.82亿千瓦时，平均增长11.28%，占全省用电量比例从3.17%逐年增加至4.84%。其中，金属制品业、电气机械和器材制造业和通用设备制造业增长最快，平均增速分别为19.65%、19.58%和18.49%。

**装备制造行业具备一定柔性可调潜力。**企业用电负载分散在各个生产车间，除少数大型冲压、焊接、喷涂设备瞬时功率较高外，整体能耗在空间和时间上相对分散。热处理、烘干设备等主要用能设备多为电炉，在严格工艺允许的范围内

<sup>2</sup> 根据国家统计局统计资料管理中心释义，装备制造业包括金属制品业，通用设备制造业，专用设备制造业，汽车制造业，铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业，电气机械和器材制造业，计算机、通信和其他电子设备制造业，仪器仪表制造业。[https://www.stats.gov.cn/hd/lyzx/zxgk/202405/t20240524\\_1953554.html](https://www.stats.gov.cn/hd/lyzx/zxgk/202405/t20240524_1953554.html)

具备一定的运行可中断性与时间平移能力。企业可通过调整生产班次、在电网高峰时段安排设备检修或暂停非核心、非紧急产线等方式，实现短期负荷的削减或转移。此类调控对生产进度影响可控，且对设备本身损害较小，构成了该行业作为优质柔性负荷的基础。

### 3.4.2 产业布局与新能源匹配性

山西装备制造产业呈现“差异化发展、区域间协同”的发展格局，整体分布于山西中南部，与新能源资源分布存在错配。省内装备制造企业主要聚集于各类经济技术开发区及工业园区，其选址核心逻辑在于获取产业链协同优势、劳动力资源及物流条件，目前初步形成以山西综改示范区为核心承载，轨道交通装备、煤机装备、新能源汽车、通用航空、重型机械为主导的太原产业集群；以大同经济技术开发区为依托，轨道交通装备、煤机装备、汽车及零部件、通用航空为主导的大同产业集群；以运城经济技术开发区为依托，轨道交通装备、汽车、节能环保、农机为主导的产业集群。整体而言主要聚集于中南部地区，与风光新能源资源富集区在地理空间上存在错配，规模化就地利用绿电存在挑战。



图3-3 山西高端装备制造产业集群

资料来源：山西日报《向特色高端装备制造强省迈进》，山西金融发展研究院

### 3.4.3 打造园区协同的多元绿电消纳体系

山西省装备制造业门类众多、布局较分散，精密零部件、轨道交通装备、重型机械、新能源装备等产品出口多个国家和地区，对突破国际绿色贸易壁垒、提升产品碳足迹竞争力的需求日益迫切。把握省级绿电园区建设等政策机遇，叠加装备制造业用能场景多元、分布式光伏开发潜力较大、出口产品绿电溯源需求明确、产业链协同降碳空间广阔等优势，山西装备制造行业应立足园区和企业实际灵活配置，逐步提升用能结构中的绿电比例，锻造产业低碳竞争新优势。建议：

- **以园区为单元统筹绿电资源，夯实规模化消纳基础。**一是优化园区绿电资源布局。依托全省差异化布局的绿电园区规划，优先将新能源装备、低空经济装备、智能制造等新建项目引导至大同、朔州、忻州等晋北风光资源富集区，推动源荷就近匹配。对晋中新能源汽车产业园、晋城光机电产业园、临汾智能制造产业园等中南部存量园区，结合晋南源网荷储一体化示范基地、晋东“新能源+”融合发展基地等新能源发展规划，因地制宜做好新能源和负荷统筹。二是推动分布式光伏规模化开发和覆盖。系统摸排各装备制造集聚区的厂房屋顶、停车场、闲置空地资源，全面推进自发自用分布式光伏项目建设，推动“应建尽建”。

- **创新绿电消纳模式。**一是支持龙头企业打造“微电网示范”。鼓励年用电量超1亿千瓦时的太原重工、大运汽车等龙头企业和链主企业，探索“源网荷储一体化”微电网模式。通过配置储能设施、接入智慧能源管理平台，实现源、网、荷、储协同调度，提升内部绿电消纳能力与供电稳定性，打造“零碳工厂”“零碳产品”品牌。二是支持外销型企业开展绿电直连示范。支持华翔、太重、定襄法兰等出口型企业配套建设专属风光储一体化项目，试点存量项目绿电直连。三是推动中小企业参与“负荷聚合响应”。引导中小企业将可中断负荷接入园区虚拟电厂，由负荷聚合商统一管理，通过参与电网需求响应获得辅助服务收益。四是探索推广园区“绿电团购”模式。针对中小企业单独参与绿电交易规模小、议价能力弱等问题，由园区管委会或运营平台统一对接新能源项目、电力交易机构，组织企业以集群方式签订中长期购电协议，形成“集中采购、按需分配”的绿电供应机制。五是探索开展园区“分布式绿电交易试点”。在山西综改示范区等园区率先探索分布式绿电交易试点，依托园区能源管理平台整合园区内分散绿电资源，通过隔墙售电或绿电园区等模式向多用户供电，推动源荷就近匹配。

- **完善绿电价值兑现机制。**支持园区建设覆盖全园的碳足迹管理与绿电溯源平台，利用区块链技术实现绿电来源、消费数据全程上链，确保绿电物理隔离输送与消费数据可追溯、可核证，为企业参与国际市场竞争提供绿色背书。

通过分布式光伏规模化覆盖，可满足装备制造企业10%-30%的绿电需求；结

合绿电交易市场拓展、绿电园区和绿电直连试点，装备制造行业有望成为山西绿电消纳比例提升最快的领域之一，为全省产业结构绿色低碳转型提供有力支撑。

表3-1 重点行业用电特征差异和绿电消纳模式选取重点

| 行业   | 用电规模与成本  | 电能质量要求   | 负荷特性与连续性  | 可调节潜力分析   | 产业分布和新能源匹配   | 绿电消纳重点  |
|------|--|--|---|---|--|---|
| 电解铝  | 用电规模巨大，一家50万吨产能的企业年用电量超60亿千瓦时。成本占比高，电力成本占生产总成本约40%。      | 要求稳定：对电压波动敏感，供电不稳可能导致电解槽凝固，造成巨大损失。                               | 连续生产：电解槽一旦启动，需24小时不间断运行。<br>刚性负荷：负荷曲线极其稳定，基本无波峰波谷，是电网的基础负荷。 | 调节能力极低：生产流程本身几乎不具备柔性调节能力。<br>间接参与：主要通过参与电力市场交易，利用价格信号引导全厂用电策略，而非直接调节生产负荷。 | 围绕氧化铝企业或煤电厂建设，与优质风光资源区存在一定错配；同时，省级绿电园区、绿电直连等政策出台为企业推进绿电物理消纳提供条件。 | 解决“有绿可用”源头问题，依托绿电园区和绿电直连试点，构建源荷高度耦合的刚性消纳模式，推动全行业规模化物理消纳。                                  |
| 数据中心 | 增长迅猛：大同市数据中心用电量已达全市用电量两成多。<br>单耗高：AI大模型一次训练耗电量大。         | 要求严苛：供电电压波动须控制在不超过4%，远低于一般工业±7%的标准。<br>高可靠性：采用双回路、多路电源供电，确保绝对可靠。 | 绝对连续：服务器需24小时不间断运行以保障数据访问。<br>高负载率：负荷稳定，但随业务量有一定波动。         | 调节能力很低：核心算力负载难以中断，调节会直接影响服务质量。<br>局部优化：可通过内部智能电力管理，优化空调制冷等辅助设施用电优化负荷调节。   | 多位于新能源资源相对丰富区域，具备与新能源项目直接耦合的可能。                                  | 存量以绿电、绿证交易托底，增量在规划阶段便将绿电消纳入前置条件，积极开展绿电直连，同时攻关算电协同核心技术。                                    |
| 钢铁   | 耗电大户：属于传统高耗能产业，用电量显著。                                    | 要求较高：需要稳定的电压保障产品质量。  | 部分连续：高炉冶炼等核心环节必须连续运行；部分辅助工序可间断。<br>负荷稳定：主要生产设备运行时负荷曲线相对平稳。  | 具备一定调节潜力：更多通过精细化调整辅助工序和工艺参数来实现。   | 主要分布于南部城市，与省内新能源资源分布存在错配。  | 短期以绿证交易托底，存量挖掘分布式光伏与负荷调节潜力，持续推进电炉钢项目谋划，在规划阶段同步衔接绿电直连项目布局；中长期融入电炉钢、氢冶金等深度降碳技术，同时扩大中长期绿电交易。 |
| 装备制造 | 规模多样：从中小型零部件厂到大型整车制造厂，用电规模差异大。<br>持续增长：高端装备制造等领域用电量增速较大。 | 要求适中：除精密加工等少数环节外，大部分装备设备对电能质量的要求不如另外三个行业苛刻。                      | 生产节奏可调整，具有相对较高的间歇性和可中断性。<br>负荷随生产线启停、工位作业变化而波动。             | 调节弹性最大：生产计划灵活，是理想的需求侧响应资源。可通过调整班次、安排设备轮休、在电价高时短暂中断非核心负荷等方式，为电网提供柔性调节能力。   | 整体分布于山西中南地区，与新能源资源分布存在错配。  | 立足园区和企业实际灵活配置，逐步提升绿电比例。   |

# 第四章

## 重点行业绿电消纳面临的挑战

山西重点行业绿电消纳不仅受绿电消费模式本身存在的诸多难题困扰，也面临政策引导、企业主体等多层面的系统性制约，导致绿电消纳提质增效面临较大挑战。

### 4.1 消费模式堵点待突破

**当前一段时期内，采购类模式仍是企业消纳绿电的主流模式，但企业通过规模化绿证、绿电交易提升绿电消纳比例仍面临多重现实挑战：**

- **优质绿证供给紧张，企业合规成本持续攀升。**《可再生能源绿色电力证书管理实施细则（试行）》明确规定，自2026年1月1日起，绿证持有方在核销声明绿色电力消费的绿证时，绿证对应电量生产年份应与绿色电力消费年份保持一致，并鼓励提高证电时间匹配精度。意味着往年积压的低价“陈证”无法用于抵扣当年配额，企业必须采购与用电年份匹配的当年生产绿证。受此影响，绿证市场出现显著的价格分化：核发年份为2025年的绿证价格涨至5.90元/个，核发年份为2024年的绿证价格回落至1.12元<sup>[10]</sup>。对企业而言，可用于碳排放披露等合规用途的优质绿证资源将更趋稀缺，其价格上涨将给高耗能企业带来短期采购成本压力。同时，绿证有效期管理进一步压缩了企业采购的时间窗口，企业必须在有效期内完成核销，加大了绿证采购的时间压力和管理成本。

- **省内绿电交易仍处于初级发展阶段，制度设计与市场实践有待突破。**绿电交易机制与规则相对复杂，准入、定价、履约等环节要求繁琐，叠加省内不同区域交易范围、结算方式等细则不统一，抬高了企业参与门槛与规模化采购难度。省内长期购电协议整体处于起步阶段，以年度合同和短期零散交易为主，5年以上合同价格信息披露不足，电解铝、钢铁等大负荷企业难以依托生产计划锁定长期绿电成本，市场波动风险管控能力较弱。

**投资类绿电消费项目开发与收益机制尚不健全，推进较缓慢：**

- **新能源资源与变电站容量约束日趋凸显。**绿电直连、绿电园区等负荷导向型项目遵循“以荷定源”规划逻辑，需在前期精准摸排风光资源禀赋、可开发土地规模、变电站接入条件及扩容潜力，确保新能源供给、用电负荷与电网支撑

高效匹配。当前实践中，资源统筹与前期论证存在明显短板，一方面资源筛查不精准，省级绿电园区申报数量较多，但可落地开发的风光资源有限，部分项目存在绿电实际供给能力与申报预期差距较大问题；另一方面变电站容量紧张且配置不均，新增项目常面临接入容量不足、审批周期拉长等问题，叠加充电桩、新能源项目等多方争抢容量，资源错配问题突出，制约项目落地实施。

- **项目存在“重申报、轻运营”问题。**山西目前已分三批在8个市布局13个绿电园区试点，部分园区可能将获取“绿电园区”试点称号视为最终目标，主要资源和精力集中于前期规划和评审材料的准备，以争取“一次过关”。一旦试点资格获批，后续的实质性建设、运营管理和持续优化动力便显不足，缺乏持续、稳定、高效的绿色电力生产和消纳能力，未能真正发挥其作为能源革命关键抓手的示范引领作用。其根源在于，目前的政策体系仍缺乏对试点园区全生命周期、动态化、可量化的持续监管与效能评估机制。

- **项目落地实践中存在建设周期“不同步”难题。**绿电直连等投资类项目均要求电源、电网、负荷“三同步”推进，而实际过程中发电侧与负荷侧建设周期常存差异。某绿电直连项目反映，电源及配套电网工程建设周期约2年，并网流程复杂，而用户侧负荷项目建设周期普遍更短，即便双方同步签约开工，也会出现负荷项目先行建成却无绿电可用的局面，若改用常规电网供电，还可能被认定为存量负荷，无法继续享受绿电直连相关政策。

- **项目投资的长期性与传统基金短期逐利性之间不匹配。**许多基金通常以3-5年为一个投资周期，并期望在此时间内实现退出，而绿电园区从基础设施开发、产业招商到稳定运营和盈利，往往需要一个更长的培育周期，这种期限错配导致资金无法真正沉下心来支持园区的长期发展。

## 4.2 政策引导机制待健全

**在指标考核方面，目前缺乏差异化的企业考核机制。**当前国家对钢铁、电解铝等重点行业实施绿电强制消纳考核并明确各省消费比例。但省内尚未结合企业的生产规模、转型基础等条件进一步建立差异化指标分解机制，压实主体责任。

**在奖惩机制层面，存在激励不足、约束偏弱等问题，仍需进一步完善。**从政策执行效果看，现有考核体系以绿电消纳比例为核心量化指标，虽便于直观评价完成情况，但也易引发企业短视行为，部分企业为完成考核在节点前集中突击采购绿证，仅实现凭证层面达标，并未真正带动新能源就地消纳，难以有效支撑能源结构转型。同时，现行政策缺乏细化的奖惩配套细则，对未完成消纳目标的主体惩戒措施不明确，对超额完成企业的激励机制亦不清晰，亟需后续针对性完善规则、优化配套政策，切实提升政策执行实效。

在制度衔接层面，重点行业绿电消纳考核与碳排放权交易、碳排放双控等关键机制尚未有效衔接，一定程度弱化了整体减排合力。对同时承担多重约束的企业而言，绿电消费无法在碳市场实现直接回报，导致企业将绿电消费视为合规成本，而非碳资产投资，内在经济动力不足。企业需分别应对多套核算、核查体系，也增加了运营与合规成本。碳市场价格信号未能有效传导提振绿电需求，绿电环境效益亦未在碳排放考核中得到充分体现，难以形成“1+1>2”的政策协同效应。近期《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》等文件已明确提出加强全国碳市场与绿电、绿证等机制的政策协同与制度衔接，推动政策融合将是下一步改革的重要方向。

### 4.3 企业认知不足消纳偏被动

**企业绿电消纳仍停留在完成考核的被动层面。**在绿电消费考核的刚性约束下，多数企业选择绿证采购模式完成考核指标，仍简单将其视为合规性成本负担，未能充分认识其在助力提升市场竞争力、平抑分时电价波动降低综合用电成本等方面的综合效益。这种情况下企业难以充分挖掘自身绿电消纳潜力，无法形成与政策导向、市场需求、自身生产相匹配的绿电消费行为，从而制约全省重点行业绿电实际消纳整体水平的提升。

**企业对绿电园区、绿电直连等模式的降本逻辑存在一定认知误区。**山西将绿电园区建设作为促进绿电消纳和能源转型的重要抓手，在全国电力统一大市场建设背景下，不能单纯依靠电网降低目录电价减少用电成本。绿电园区的核心竞争力在于其能够通过内部系统的协同优化、智能调度和能源管理，形成较传统供电模式更低的综合用能成本，若企业过度依赖向电网及政府争取电价优惠等外部路径，忽视园区整体科学运营与技术降本等内生可持续手段，将直接制约绿电园区模式的长效可持续发展。

# 第五章

## 支撑重点行业绿电消纳的保障措施和对策建议

针对山西省重点行业绿电消纳的落地挑战，围绕目标引领、模式创新、政策引导、服务保障等维度提出针对性建议，以期推动绿电消纳提质增效，促进资源型地区产业绿色转型与新能源高质量发展。

### 5.1 科学确定并合理分解省级2030年绿电消费目标，压实重点行业主体责任

#### 5.1.1 科学确定省级2030年重点行业绿电消费阶段目标

在国家已明确2026年重点用能行业可再生能源消纳权重指标的基础上，结合省内可再生能源发展目标、电网承载能力以及各行业用能特点，科学测算2030年重点行业绿电消纳总量目标。为高质量完成省政府工作报告提出的未来5年可再生能源新增装机力争达到1亿千瓦的目标，并将新能源利用率保持在90%以上，建议山西省2030年重点行业绿电消费比例达到40%，并力争达到45%的水平。

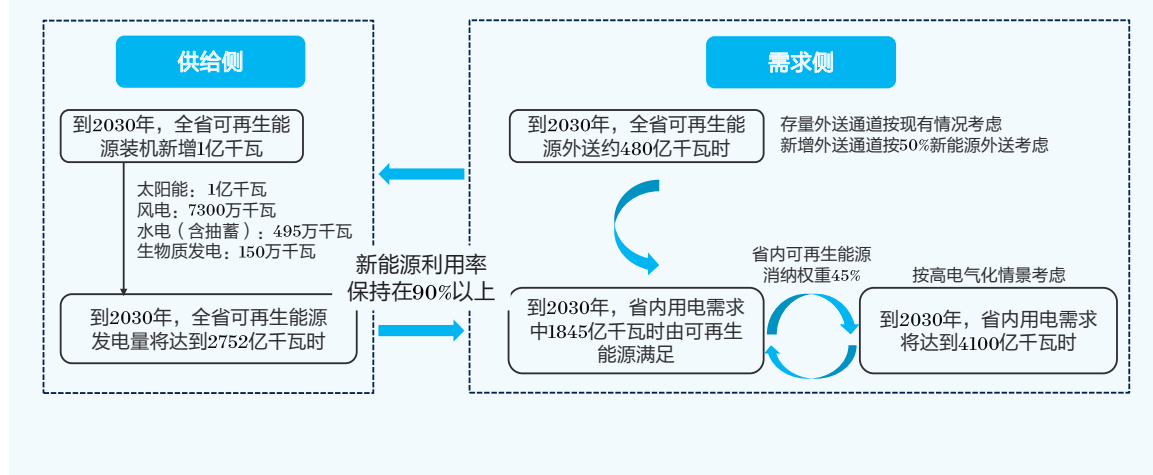
#### 专栏

##### **建议山西省主动抬高权重目标，争取国家对跨省跨区消纳的统筹支持，通过压实重点用能行业责任倒逼绿电直连、绿电园区等模式加速落地**

政策依据：2021年2月，国家能源局综合司印发的《关于征求2021年可再生能源电力消纳责任权重和2022-2030年预期目标建议的函》明确提出“经测算，2030年全国统一可再生能源电力消纳责任权重为40%，各地2021年实际完成情况与40%的差值，平均到9年，则为各地每一年需要提升的百分点”。

测算边界条件：以省政府工作报告提出的未来5年可再生能源新增装机力争达到1亿千瓦为2030年全省可再生能源发展目标，按照目前风电、光

伏利用小时数测算，到2030年，全省可再生能源发电量将达到2752亿千瓦时；扣除现有外送通道和新增外送通道的可再生能源外送电量，同时新能源利用率保持在90%以上。



### 5.1.2 将目标合理分解至重点行业及重点企业

制定省级重点用能行业绿电消费比例分解落实方案，在目前国家已将电解铝、钢铁、水泥、多晶硅和国家枢纽节点新建数据中心纳入考核范围的基础上，科学有序将省级绿电消费考核范围扩展至数据中心、装备制造等重点行业。充分兼顾企业用能结构、生产工艺、产能规模及既有消纳基础等现实差异，探索将行业目标差异化分解至企业，做到行业有侧重、企业有弹性、总体保完成。

## 5.2 推动采购类模式与物理消纳路径协同发展，引导企业建立多元化绿电消纳策略

### 5.2.1 探索多年期绿电交易常态化机制

加快制定省级多年期绿电交易的标准化合同范本，明确多年期协议的电量分配、价格机制、偏差处理、违约责任等核心条款，为发用双方提供清晰的法律指引。推进多年、年度、月度以及月内绿色电力交易机制建设，满足企业不同周期的绿电消费需求。鼓励新能源企业与钢铁、电解铝、数据中心等用户签订5-10年及以上长期购电协议，建立长协备案与履约监管机制，将履约情况纳入信用评级，对违约主体纳入信用评级负面清单，限制交易资格，保障市场秩序。

## 5.2.2 科学扩大绿电直连覆盖范围与适用场景

在山西《推动绿电直连项目有序建设实施方案》基础上，将钢铁电炉改造、电解铝工艺升级等形成稳定用电增量的技改项目，纳入绿电直连支持范围，释放存量产能消纳潜力。建议省级能源主管部门明确“过渡期用电不改变负荷属性”的政策口径，对于因电源建设滞后而与电网公司协商制定过渡阶段用电方案的负荷，在电源建成后可继续转为绿电直连用户，其负荷属性不因此变更。加快推进绿电直连项目清单管理与滚动实施，建立绿电直连项目动态管理机制，对条件成熟的项目及时纳入清单、加快推进。强化典型引领，建立不同行业产业类型示范标杆，总结提炼可复制推广的经验模式。

## 5.2.3 完善绿电园区全流程管理

制定园区绿电认证技术指南，统一消纳核算、溯源与认证流程，保障数据真实、认证权威；完善园区内风光项目立项管理，规范申报、配置、建设与运营全链条，实现新能源供给与园区用电需求精准匹配；出台分场景实施细则，明确不同类型园区差异化消纳目标、实施模式与支持政策，提升政策实操性与适配性；制定产业生态位指引，建立鼓励类目录与负面清单，依托全省产业布局引导园区错位发展、优势互补，避免同质化竞争；健全园区认证与信息披露体系，参照国家零碳园区标准，设置绿电消纳占比、能效、碳排放强度等核心指标，同步纳入产业集聚度、产出效益、规划匹配度等综合评价维度；建立常态化评价与动态退出机制，定期开展考核并公开结果，对连续不达标园区予以清退，保障示范建设质量。

## 5.2.4 率先探索分布式绿电“隔墙售电”落地机制

细化“隔墙售电”在山西落地的具体条件，明确分布式电源接入标准、交易主体准入条件、过网费核定方法、结算流程等关键制度要素，优先在已布局的13个绿电园区中选取条件成熟的园区开展“隔墙售电”试点，形成可复制推广的实践样板。

# 5.3 强化政策引导，增强重点行业企业绿电消纳内生动力

## 5.3.1 探索绿电消纳在省级碳核算中的合理应用

在2026-2030年期间，依托山西“电-碳”管理平台，结合山西电网碳排放因子，制定省级绿电碳减排量核算规范，推动绿电消纳量在碳排放考核中科学抵扣，实现减碳效益可核算、可应用。

### 5.3.2 探索绿电消纳与产业调控联动机制

探索绿电消纳与重点行业生产指标深度联动，将企业绿电消费比例作为钢铁、水泥等重点行业企业生产指标分配的重要依据，对高比例消纳绿电的企业给予优先支持。将绿电消纳指标纳入高载能行业环保绩效评价体系，在重污染天气应急响应期间，对消纳比例高的企业实施差异化管控，减少或免除错峰生产，对未达标企业加大管控力度。

### 5.3.3 健全跟踪机制做好成效评估

建立季度监测、年度评估制度，重点跟踪消纳进度、交易履约率等指标，评估结果向社会公开。对未完成指标企业在项目审批、用能权交易等方面施加适度约束，对连续不达标企业列入节能失信名单，联合金融机构限制信贷支持。同时发挥行业协会作用，建立企业自律与互查机制，协助企业规范绿电消费台账，引导企业积极参与绿电消纳。

### 5.3.4 引导中长期“耐心资本”投入

针对项目投资的长期性与传统基金短期逐利性之间的不匹配问题，支持绿电园区、绿电直连项目申报地方政府专项债，积极争取政策性银行中长期低息贷款，吸引省属国企、大型发电集团等长期资本参与投资。

## 5.4 做好绿电消纳服务保障，夯实项目落地与持续运行基础

### 5.4.1 完善绿证有效期提醒与预警机制

参考山东省成立国内首个省级绿证服务中心的经验，持续提升绿证交易服务水平，简化绿证核销流程，降低企业操作成本。为企业提供基于用电数据的绿证消费规划建议，帮助企业合理匹配消费年份，避免因时间错配导致绿证失效或价值折损。

### 5.4.2 培育绿电交易专业服务市场

鼓励售电公司和负荷聚合商提升绿电交易专业能力，为电解铝、钢铁、数据中心等大负荷企业提供定制化的绿电采购方案和风险对冲服务。引导售电公司开发多年期绿电采购合同模板、绿电组合采购策略等服务产品，帮助企业锁定长期绿电成本。推动成立山西省绿电消费服务联盟，整合电力交易、碳核算、法律咨询等专业资源，为企业提供一站式绿电消费解决方案。

### 5.4.3 优化绿电溯源体系

研究应用区块链技术赋能绿色电力消费核算及认证，在绿电直连项目和绿电园区中率先试点区块链绿电溯源应用，为参与国际碳合规认证的企业提供权威凭证。基于山西电力现货市场已形成的5分钟出清周期机制，建设省级电碳因子数据库，贯通发、售、用全链条绿色电力数据，开展小时级绿电消费核算服务，帮助企业核证绿色电力消费权益，推动核算结果获得CBAM、RE100等国际规则认可。

# 参考文献

---

- [1] 山西电力交易中心.山西电力交易中心2024年电力市场交易年报[R/OL].(2025-05-06)[2026-03-10].<https://www.jsesa.com.cn/col29/8127>.
- [2] 国家能源局.中国绿色电力证书发展报告(2024)[R/OL].(2025-04-21)[2026-03-10].<http://cenews.com.cn/news.html?aid=1246340>.
- [3] 秦淮数据集团.秦淮数据2025年可再生能源消费量冲刺19.8亿kWh[EB/OL].(2025-03-13)[2026-03-10].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1826447071609042820&wfr=spider&for=pc>.
- [4] 李娟,卢保红.山西临汾供电公司:高效助企纾困 打造光伏并网“临汾速度”[N/OL].中国能源网,(2025-05-13)[2026-02-25].[https://www.cnenergynews.cn/dianwang/2025/05/13/detail\\_20250513212556.html](https://www.cnenergynews.cn/dianwang/2025/05/13/detail_20250513212556.html).
- [5] 太钢集团.绿色太钢“碳”索未来——太钢绿色低碳转型实践[EB/OL].(2025-06-25)[2026-02-25].<http://news.10jqka.com.cn/20250625/c669168100.shtml>.
- [6] 太钢集团.太钢能源消费正式进入绿电时代[N/OL].中国冶金报—中国钢铁新闻网,(2022-02-16)[2026-02-25].[http://www.csteelnews.cn/qypd/jnhb/202202/t20220216\\_59707.html](http://www.csteelnews.cn/qypd/jnhb/202202/t20220216_59707.html).
- [7] 山西省互联网信息办公室.山西算力发展水平稳居全国前列[EB/OL].(2024-10-23)[2026-04-05].<https://www.ningwunews.com/info/1050/61429.htm>.
- [8] 央视网.有序引导设施建设 算力布局政策体系将持续完善[EB/OL].(2025-08-25)[2026-04-05].<https://5gai.cctv.com/2025/08/25/ARTIsXffBRkD4EYgGxYnqMtV250825.shtml>.
- [9] 山西省钢铁行业协会.山西省2024、2025年度钢铁行业重点排放单位名录[EB/OL].(2025-05-16)[2026-04-10].<http://www.sxgtxh.cn/hangyedongtai/2025-05-16/5551.html>.
- [10] 中国证券报.绿证交易活跃度提升,专家提醒别患上“依赖症”[N/OL].(2026-02-02)[2026-04-10].[https://epaper.cs.com.cn/zgzqb/html/2026-02/02/nw.D110000zgzqb\\_20260202\\_2-A03.htm](https://epaper.cs.com.cn/zgzqb/html/2026-02/02/nw.D110000zgzqb_20260202_2-A03.htm).





## 山西科城能源环境创新研究院

地址：山西省太原市小店区东融街中博信息产业园A栋7层

电话：0351-3531599



## 自然资源保护协会

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) 5332-1910

