

中国碳排放交易体系对铝行业的影响

聚焦中国前三大铝生产省份内蒙古

2025年9月



数据和免责声明

本分析仅供参考，不构成投资建议，且不应作为作出任何投资决定的依据。此文代表了作者对受评估公司自行报告的公开资讯的看法和解读。本文提供了公司报告的参考资料，但作者并未试图验证这些公司提供的公开自我报告资讯。因此，作者无法保证本文提供的所有资讯的事实准确性。作者和气候转型亚洲（Transition Asia）明确对第三方使用或发布参考本文的资讯不承担任何责任。

引言

铝冶炼是中国耗能最高、温室气体排放强度最大的工业生产过程之一，其温室气体排放占全国排放总量的5%。¹2024年，清洁能源技术对中国经济增长的贡献超过10%，而铝作为清洁能源技术所需的一种重要原材料，其减排对于中国实现“双碳”目标具有关键意义。鉴于中国全国碳排放权交易市场（ETS）于2025年将铝冶炼行业正式纳入覆盖范围，且碳交易在该行业的应用呈现不可逆的发展趋势，有必要重点考察区域性因素，包括地方电网供电来源、冶炼厂电力消费结构、电解槽技术和地方政策等，以支持差异化的减排路径设计。本研究深入探讨了内蒙古铝行业温室气体减排的现状，分析了中国ETS在不同情景下给铝冶炼行业带来的碳成本，并提出了有针对性的政策建议，以促进铝冶炼行业的可持续发展。

内蒙古概况

内蒙古自治区是中国第三大铝生产省份，其2021年与铝冶炼过程相关的碳排放为8,200万吨二氧化碳当量，占当年全国铝冶炼相关排放量的19%。自备燃煤电厂覆盖了内蒙古铝电解流程约77%的用电需求，这种对煤炭的依赖也是造成该行业排放居高不下的主要因素。在这些自备电厂中，超过一半的机组仍依赖亚临界技术，这比更先进的替代技术污染更严重。此外，这些电厂大多建成时间较短。若按平均35年的使用寿命计算，它们还有20-30年的运营期，这对内蒙古铝行业的长期降碳工作构成了巨大的挑战。

内蒙古拥有丰富的可再生能源资源，尤其是风能。近年来，该区可再生能源发电装机规模加速扩张，到2024年年中，风电和光伏装机已占到全省总装机容量的45%以上。政策层面亦鼓励内蒙古企业投资建设自备可再生能源电厂，以降低对自备燃煤电厂的依赖。²当前政策对新建自备燃煤电厂进行严格监管，原则上不允许建设新的项目。尽管如此，内蒙古的能源结构仍以煤电为主，使得内蒙古电网碳排放强度位居全国前列。³

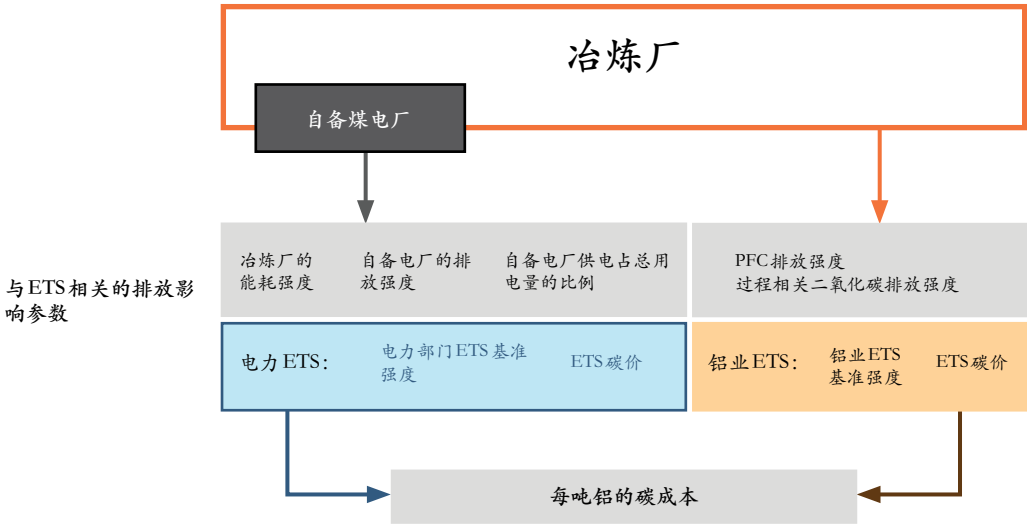
绿色低碳铝

生命周期分析发现，中国生产每吨原铝的排放强度约为14.8吨二氧化碳当量。⁴目前，全球尚无统一的绿铝定义，现有标准在排放阈值、排放范围和边界方面的规定也存在差异。⁵在中国，中国有色金属工业协会和中国有色金属学会将绿铝的定义分为“优选级”绿铝和“普通级”绿铝，前者指的是由100%绿电或100%再生铝原料制成的铝产品，后者指的是添加非绿电铝原料的比例不大于30%的铝产品。⁶

模型方法论

该碳成本模拟模型通过模拟中国全国碳排放权交易管理规则，以了解其对内蒙古铝冶炼行业的影响。本数据密集型模型涵盖了内蒙古的所有12家冶炼厂和39台自备煤电机组。模型测算的最终结果是碳成本，计量单位为“元/吨铝”（RMB/t Al）。

图1. 碳成本模型结构



在评估原铝生产的碳成本时，本模型仅考虑冶炼过程。上游铝土矿冶炼流程（将铝土矿精炼成可进行冶炼的高纯度氧化铝的过程）由于样本数据不足，未被计算在内。⁷而且内蒙古不是铝土矿资源丰富的地区，目前全省只有3家精炼厂。中国铝土矿储量集中在山西、河南、广西和贵州各省。⁸

4 Peng, T., Ou, X., Yan, X., & Wang, G. (2019). Life-cycle Analysis of Energy Consumption and GHG Emissions of Aluminium Production in China. *Energy Procedia*, 158, 3937–3943.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.849>
5 <https://international-aluminium.org/landing/low-carbon-aluminium-factsheet/>
6 <http://cgmc.cn/upload/11/cms/content/editor/1739519808146.pdf>
7 https://transitionasia.org/wp-content/uploads/2025/01/TA_Aluminium_Explainer_012025.pdf
8 https://transitionasia.org/wp-content/uploads/2025/06/TA_The_Chinese_Aluminium_Sector_2025N.pdf

1 <https://www.weforum.org/stories/2022/07/decarbonizing-china-aluminium-technology/>
2 <https://www.als.gov.cn/attach/0/17343c0575734e8f91134bf429eea839.pdf>
3 https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm

本研究共模拟了三种不同情景：

- 当前政策轨迹情景，根据电力行业ETS和可再生能源替代政策分析冶炼厂碳成本的变化趋势。依照当前电力行业ETS规定，计算仅考虑自备燃煤电厂发电的直接排放。
- 增强ETS影响情景，以当前政策轨迹情景为基础，探索在更高ETS价格（加速ETS情景）和更严格ETS法规（零基准情景）下的碳成本。
- 铝业ETS合规情景，探索铝冶炼流程需承担的碳成本。该情景涵盖冶炼厂的直接温室气体排放，包括阳极效应产生的全氟碳化物（PFC），即CF₄和C₂F₆，以及由于预焙阳极消耗的过程相关的直接二氧化碳排放。

中国ETS规则适用于所有年排放量超过2.6万吨二氧化碳的火电厂，自备电厂也包含在内。影响最终碳成本的两个主要变量是：1. ETS市场价格；2. 电厂的碳强度。中国ETS法规根据具体技术设定基准碳强度，例如，超超临界煤电电厂和亚临界煤电电厂分别有各自的碳强度基准值。只有碳强度高于基准的电厂需要通过市场购买配额实现履约，并且交易需要覆盖的总排放量仅限于高于基准的部分。

电力行业ETS碳成本计算简化版本：

碳成本 = (实际排放强度 (吨二氧化碳 / 千瓦时) - 排放强度基准 (吨二氧化碳 / 千瓦时)) x ETS 市场价格

尽管铝冶炼业参与ETS的详细信息尚未公布，本模型假设碳成本计算逻辑会基于实际排放与基准排放之间的差额计算。

需要注意的是，冶炼厂也可以使用电网电力。但是，电网电力的碳成本是由发电商承担，而非消费者。所以这些间接排放未被纳入本研究的范围。

模型结果综述

在当前政策轨迹情景中，基于碳价的上行趋势和愈发收紧的碳排放权市场规则，我们预计内蒙古冶炼厂的平均碳成本将从2021年的约120元/吨铝上升到2030年的400元/吨铝。该成本相当于2025年铝锭平均价格的2%。当前政策轨迹情景还考虑了当前已建和2030年前规划建设的自备可再生能源电厂。到2030年，投资建设自备可再生能源发电设施的冶炼厂将较未投资的冶炼厂平均节省约90元/吨铝的碳成本。尽管这一情况令人鼓舞，内蒙古的铝企业仍需大幅增加可再生能源的使用，才能实现煤电自备电厂向可再生能源的转型。

另一方面，模型还评估了技术进步的影响。当前全球最佳的可用技术（BAT），是中国山东魏桥拥有的全球最大600kA预焙电解槽，这是当今最节能的铝冶炼设备之一。如果冶炼厂均使用BAT技术，最多只能节省10元/吨铝的碳成本。这个结论基于假设，冶炼厂能耗从13.6兆瓦时/吨铝减少到12.6兆瓦时/吨铝，同时所有其他变量保持2021年水平不变。并且，内蒙古的冶炼厂相对规模较大、效率较高，这为进一步改进的空间有限，即使全面采用BAT，所能带来的碳成本节约也是有限的，不足以从根本上推动脱碳进程。

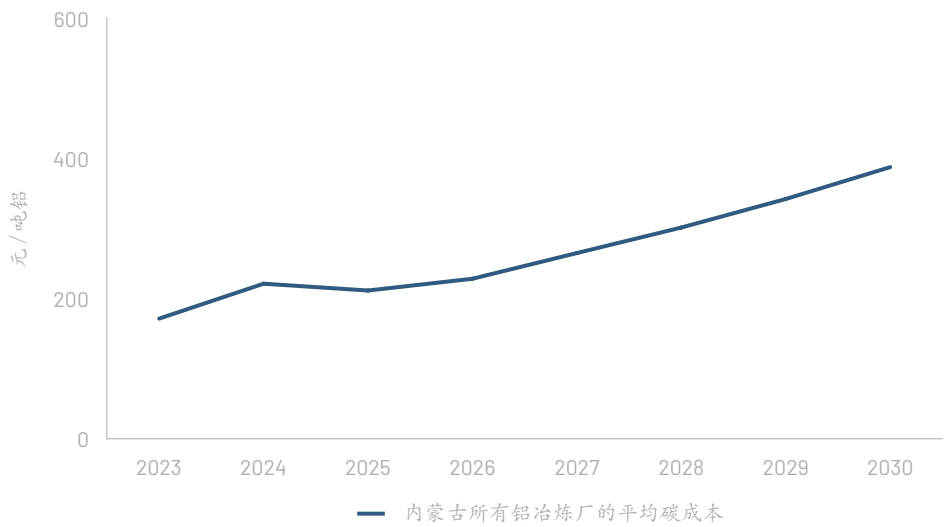
在各评估变量中，最显著的影响来自于电力行业ETS发电碳成本全覆盖的情景，即取消基准值企业需要全额支付其碳排放的情况。在该情景下，铝冶炼厂到2030年的碳成本可能会提高到1,500元/吨铝以上。在加速ETS情景下，ETS价格的快速上涨也可以显著提高碳成本，2030年碳成本将升至620元/吨铝，比2024的峰值增长了136元。

相比之下，在铝业ETS合规情景下，刚宣布将铝冶炼纳入ETS的政策仅会对铝冶炼的碳成本造成极微小的影响。参考欧盟ETS在第三阶段和第四阶段的基准变化，将铝冶炼纳入ETS后，到2030年铝冶炼企业的成本仅会增加约8元/吨铝。其主要原因是政策范围有限，仅涵盖生产流程相关的直接二氧化碳排放和PFC排放。而其他大额排放源例如间接电力的使用或者铝土矿冶炼流程都未包含在内。即使在将排放强度基准取消的全成本情景下，铝业ETS相关的平均碳成本到2030年也仅达到250元/吨铝，远低于电力行业ETS的影响。

当前政策轨迹情景

当前政策轨迹情景是最能反映现实的前景。这一预测以当前政策、技术进步和历史市场数据为基础。

图2. 内蒙古铝冶炼厂在当前政策轨迹下的平均碳成本，2023-30年



来源：TA 分析

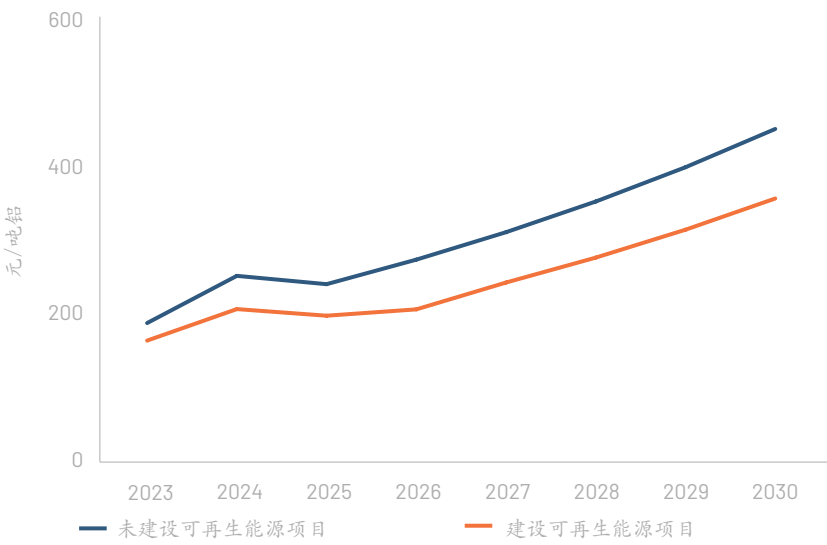
在当前政策轨迹情景下，内蒙古铝冶炼厂的平均碳成本预计将稳步上升，到2030年将达到约400元/吨铝。ETS价格上涨、更加严格的ETS排放强度基准是碳成本增加的主要驱动因素。

模型显示，内蒙古煤炭自备电厂的碳强度均高于电力ETS设定的基准值。若将此情况推广至大多数铝企业，为了让读者更直观的了解ETS的影响，我们以中国铝业的数据为例进行测算。这源于中国铝业较高的数据透明度。2025年上半年，中国铝锭的平均价格在2万元/吨左右波动，因此，最大碳成本约为当前铝锭价格的2%。对于中国铝业来说，这相当于铝锭价格2%的碳成本可能导致资本回报率（ROCE）下降2.3%。2023年，中铝的ROCE约为15%，营业收入为150亿元，使用资本990亿元，电解铝产量为680万吨。若在测算中将每吨铝增加400元的碳成本纳入ROCE计算，可以得出ROCE下降2.3%和营业利润下降约18%。

最大化利用可再生能源能够降低内蒙古企业碳交易压力

2023年，内蒙古政府正式发布了可再生能源替代政策，鼓励企业用自备可再生能源电厂替代自备燃煤电厂。⁹ 这些可再生能源电力必须在现场消纳，不允许接入公共电网。在当前政策轨迹情景中，我们计算了计划中的自备光伏和风电装机之外，冶炼厂仍需要的煤电装机。假设可再生能源发电小时数等于2023年水平，光伏和风电装机会替代一部分煤电装机，从而减少了自备煤电厂的用量占比，并节省了相应的碳成本。¹⁰

图3. 冶炼厂建设和不建设可再生能源项目的碳成本差异，2023–30年



来源：TA分析

在当前政策轨迹情景中，配备可再生能源发电项目的冶炼厂在2030年生产每吨铝的碳成本将达到356元，而没有可再生能源发电项目的冶炼厂则需为每吨铝产品额外支付约90元，总计450元/吨铝。值得关注的是，图中的上升趋势线表明，当前的可再生能源项目建设规模不足以抵消ETS履约带来的碳成本。

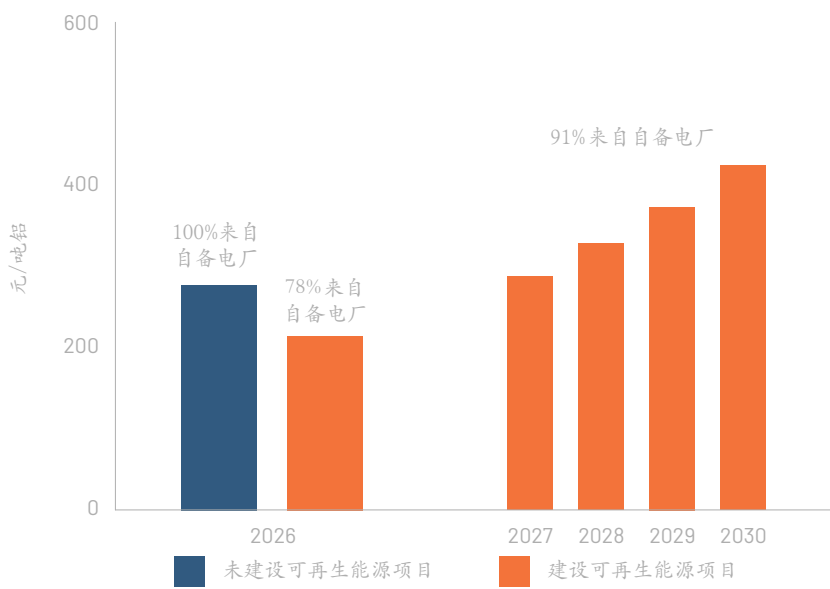
到2025年，内蒙古的铝业企业将安装约400兆瓦的光伏和风电装机。到2030年，风电和光伏装机容量将分别达到2,220兆瓦和940兆瓦，这些可再生能源发电容量都被纳入了我们的模型进，并且实现了同冶炼厂的一一对应。模型中包含的最大项目是中铝包头铝业拥有的1吉瓦风电和200兆瓦太阳能电厂，该项目还配备了2小时240兆瓦的电池储能。然而，这些电池储能的规模不足，无法实现白天储存可再生能源电力并在夜间释放。为了完全替代自备燃煤电厂，区域内的铝业企业不仅需要建设更多的自备可再生能源电厂，由于这些设施目前无法接入电网，它们还需要配备足够的储能容量以提高可再生能源电力的利用率。此外，内蒙古应进一步推动电网的脱碳，并扩大电网基础设施，使冶炼厂能够从电网购买比自备燃煤电厂更清洁的电力，或通过专用电网连接到可再生能源电厂，直购可再生能源电力。

理解冶炼厂层面机制：冶炼厂A的案例

行业的脱碳并不是简单的线性过程。虽然计算整个自治区范围的平均值可以为该区铝行业的减碳进程预测提供有用的参考，但这可能会掩盖个别冶炼厂的具体情况。例如，冶炼厂A计划在2026年增加300兆瓦的太阳能发电和350兆瓦的风能发电容量，以支持其现有的700兆瓦自备煤电。这一转变预计将把该厂煤电用量的份额减少22%，并降低30%的碳成本，相当于每吨铝节约62元。

按照计划，冶炼厂A将在2027年启动三个新的燃煤发电机组，将其自备煤电份额从78%提高到约90%，这实际上会逆转上述收益。目前尚不清楚这些燃煤机组是否仍会按计划建设，或是否已获得批准，但如果避免这些新的煤电机组，在当前政策轨迹情景下，冶炼厂到2030年可以节省多达100元/吨铝的成本。

图4. 冶炼厂A在当前政策轨迹情景下的碳成本，2026–30年



来源：TA分析

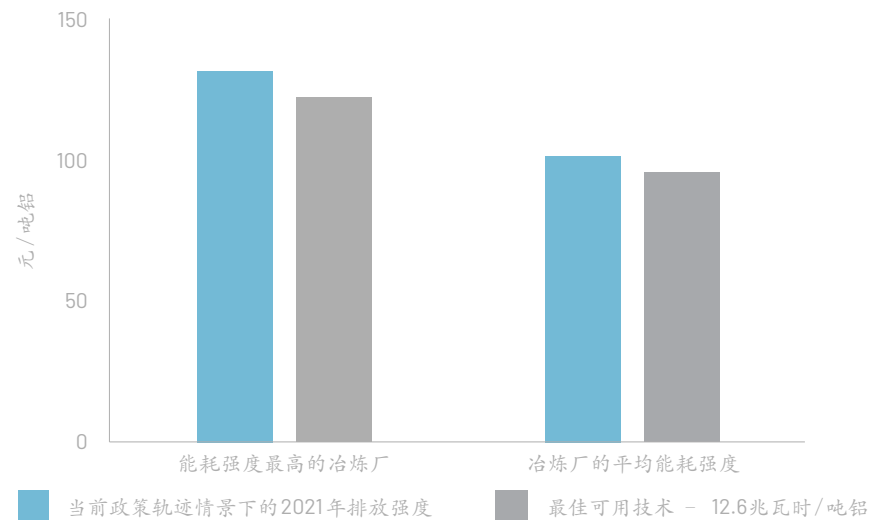
技术进步对碳成本的影响有限

对铝业企业而言，建设规模更大且具有更高电流强度的冶炼厂，可以提高当前效率并降低能耗强度。当前最先进的技术是山东魏桥集团拥有的600+kA电解槽，能耗强度为12.6兆瓦时/吨铝。

⁹ <https://www.nmxc.gov.cn/nmxc/gkxxgk/zfxxgkml/tzgg/2023112110034988685/2023112110024197118.pdf>

¹⁰ <https://m.bjx.com.cn/mnews/20240222/1362244.shtml>

图5. 内蒙古通过能耗强度改进可实现的碳成本节约潜力



来源：TA分析

为了评估在内蒙古地区使用BAT能减少多少成本，我们模拟了这样一个情景：将2021年基准年的所有12个冶炼厂的能耗强度统一设定为12.6兆瓦时/吨铝，然后将结果中的碳成本与实际能耗强度水平下的碳成本进行比较。分析结果发现，在内蒙古，技术改进可以将碳成本减少最多10元/吨铝，从全省角度看，平均每吨铝节约6元。鉴于当前各厂的能耗强度范围为12.7-13.6兆瓦时/吨铝，如果只通过效率提升，减碳的空间会非常有限。

不过内蒙古没有出现任何冶炼厂重建的公告，所以该地区不太可能在2030年前通过新技术实现显著的减排。其他减排技术比如通过电解槽热平衡或电极改造等改造冶炼厂也可以减少排放，但潜力很小。到2030年中国可实现商业化的改进技术只能带来不到1千瓦时/千克铝能耗节约。¹¹因此，这些并未被纳入本文分析。由于惰性阳极预计在2030年前不会实现商业化应用，因此也被排除在我们的分析之外。

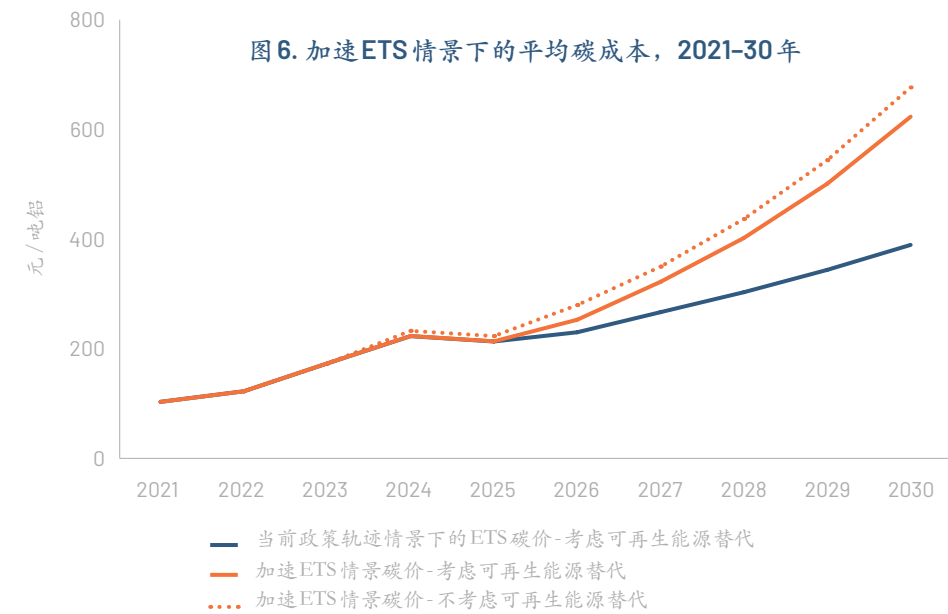
增强ETS影响情景——电力行业ETS变化对铝冶炼碳成本的影响

增强ETS影响情景探讨了在更严格和更具雄心的排放权交易框架下，铝冶炼厂的碳成本会如何演变。在基准情景基础上，该情景引入了两项关键压力测试：1.加速ETS情景模拟了显著更高ETS价格轨迹的影响，参考了欧盟ETS第3阶段免费配额数量急剧下降的历史趋势；2.零基准情景模拟了积极收紧基准排放强度的效果，设置免费配额的分配基准从2026年起就降至零。这些子情景共同测试了冶炼厂在更严格气候政策下的财务风险，突显了冶炼厂依赖煤电运营的风险，以及尽早采纳可再生能源可实现的潜在成本节约。

¹¹ Tan, C., Yu, X., Li, D., Lei, T., Hao, Q., & Guan, D. (2025). Different technology packages for aluminium smelters worldwide to deliver the 1.5° C target. Nature Climate Change, 1-8.

加速 ETS 情景

图6. 加速ETS情景下的平均碳成本，2021-30年



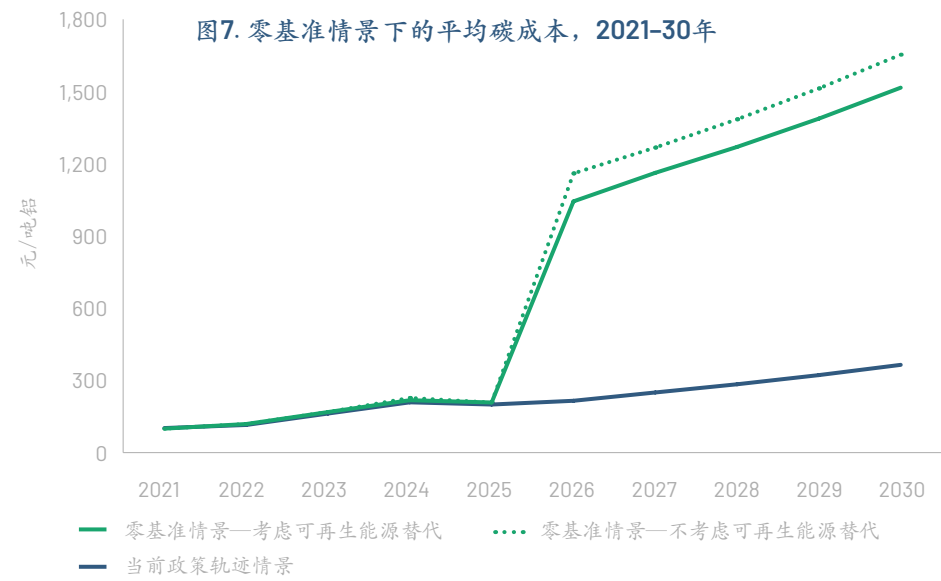
来源：TA分析

无论在当前政策情景下，还是加速ETS情景下，冶炼厂的碳成本在2030年前预计都将逐年增加。冶炼厂的碳成本对ETS价格非常敏感，当碳价上升到242元/吨二氧化碳时，铝冶炼厂的碳成本到2030年可能超过600元/吨铝，几乎是当前铝锭价格的3%。与当前政策情景的结果相比，这意味着到2030年每吨铝的碳成本会增加超过200元 - 达到当前水平的三倍。

此外，我们还进行了额外分析以了解在更高碳价情景和当前可再生能源部署下碳成本的变化。随着时间的推移，内蒙古铝冶炼厂当前的可再生能源建设速度会降低碳成本，但影响有限。到2030年，计划中的可再生能源项目在更高ETS价格情景下可实现的碳成本节约为50元/吨铝左右。

零基准情景

中国ETS对常规燃煤发电机组设定的基准碳强度已从2019年的平均0.93吨二氧化碳/兆瓦时逐年下降到2024年的平均0.8吨二氧化碳/兆瓦时。根据这一历史下降趋势，我们在当前政策轨迹情景中假设ETS基准碳强度的未来下降速度与历史保持一致。而在零基准情景中，基准碳强度被降至零，这样我们就可以更清楚地了解铝冶炼企业在所有碳排放都被覆盖情况下的碳成本。简单地说，在此情景下，参与ETS市场的企业从2026年开始需要为所有二氧化碳排放支付费用，而不是仅为排放强度基准以上的部分付费。



来源：TA分析

零基准情景对碳成本的影响是最大的，因为在该情景下，铝冶炼厂到2030年的碳成本会提高至1,500元/吨铝以上。此外，当前可再生能源项目的建设对碳成本增长的缓解作用也很小，计划中的可再生能源项目仅能帮助节省8%的碳成本，相当于137元/吨铝。

根据中国区域ETS市场试点和欧盟ETS的经验，碳市场未来可能会逐步取消免费配额。尽管中国政府在短期内尚未明确表示取消基准碳强度，但在长期愿景中，基准碳强度会逐步退出ETS。

铝业 ETS 合规

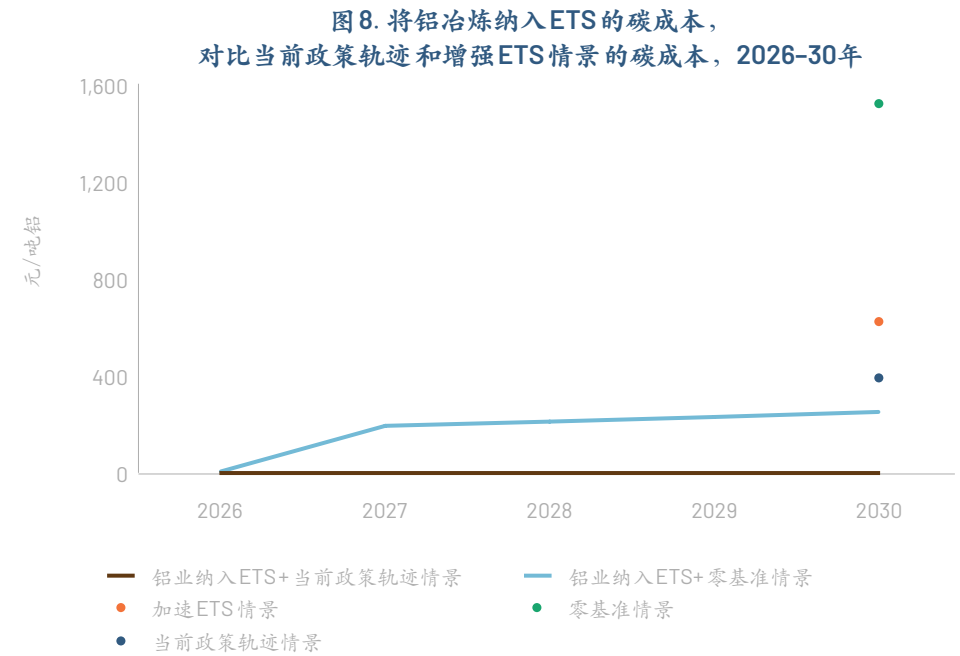
2025年3月，中国正式宣布国家ETS将覆盖钢铁、水泥和铝冶炼行业。在实施的第一年，配额将基于2024年经核查的实际碳排放进行发放。本期履约期到2025年底，企业在履约期内不需要支付碳成本。在接下来的两年中，配额的分配将遵循碳排放强度控制思路。

与电力行业ETS规则类似，该体系不考虑间接排放，仅考虑铝冶炼厂的直接温室气体排放，如二氧化碳、CF₄和C₂F₆。关于强度控制方法如何实施，还没有进一步的官方通知。根据电力行业ETS的成本逻辑，本模型假设两个强度基准，分别是PFC排放强度（吨二氧化碳当量/吨铝）和过程相关二氧化碳排放强度（吨二氧化碳/吨铝）。

由于数据不足，本模型参考了国家发改委关于计算铝冶炼温室气体排放的指导文件中的默认数值。起始基准为PFC排放强度和过程相关二氧化碳排放的总和，设定为1.648吨二氧化碳/吨铝。对于2030年的预测，我们参考了欧盟第三阶段和第四阶段的基准值，以逐步下调模型中排放基准值。

电力消耗是铝冶炼业排放强度最高的组成部分，但此类排放被排除在铝业ETS范围之外，因此，将铝冶炼纳入ETS预计对碳成本的影响可以忽略不计。到2030年，该情景下的碳成本估计仅为8元/吨铝。即使在考

虑碳排放全覆盖的极端情况下，即企业需要为所有二氧化碳和PFC排放（而非基准以上部分）支付费用，其碳成本也将仅仅上升到约250元/吨铝，仍然显著低于电力行业ETS的影响。



来源：TA分析

建议

1. 加强ETS设计以推动脱碳

为了实现脱碳目标，一套针对电力行业和铝冶炼行业的更严格的ETS法规是必不可少的。电力行业ETS将继续对铝行业的脱碳轨迹产生最实质性的影响，其作为最成熟的ETS行业，应优先发展。要实现这一目标，应逐步淘汰排放基准或减少免费碳配额的供应，使碳价升至合适的水平。如果足够有效，碳成本将增加到企业在财务报表中无法忽视的程度。

2. 通过政策和基础设施来支持可再生能源电力的应用

在行业内鼓励更高的可再生能源电力消费的政策是另一个关键因素。当前的自备可再生能源电厂建设计划还不足以完全替代煤电，也不足以规避未来ETS市场演变的影响。铝行业的脱碳越来越多地需要依赖于可靠的低碳电力供应。为了支持这一转型，政策需要关注三个具体领域。首先，地方政府应为铝行业设定可再生能源电力消费的强制性目标，以推动清洁电力的需求。其次，基础设施扩展，特别是电网输电能力的增强，是必不可少的。改进后的输电能力以及灵活的电网技术可以让冶炼厂在现场可再生能源项目基础上，能够直接获取更多并网可再生能源电力。第三，内蒙古的政策制定者应继续推动电网减碳，并充分利用当地卓越的风能和太阳能等自然资源。使用电网电力补充现场可再生能源电力可以减轻铝业企业在储能解决方案上的成本负担，给予其更大的灵活性，并减少电网排放给铝冶炼厂造成的影响。

3. 铝业企业应为不断上升的碳成本做好准备

铝业企业应警惕政策变化，并为与ETS相关的碳成本上升做好准备。那些易于获得可再生能源且有足够土地资源用于可再生能源开发的冶炼厂，需要建设更多的可再生能源项目，将燃煤电厂更多地作为备用电源。同时，投资足够的储能解决方案也很重要，因为此举可增强系统灵活性，使可再生能源资源得到充分利用。对于那些没有这些条件的冶炼厂，铝业企业应探索其他选项，并鼓励政策制定者推动并网可再生能源电力的增长。

附录1： 情景设计和假设

当前政策轨迹中的假设：

ETS 价格	按历史趋势速度上涨
ETS 基准碳强度	基准碳强度根据历史趋势，随时间越来越严格
电厂碳强度变化	保持不变，因为没有出现在2030年前退役、重建或大幅改造电厂的计划
自备电厂供电比例	根据现有和已宣布的可再生能源电力替代政策进行调整
冶炼厂的能耗强度	保持不变，因为没有出现在2030年前退役、重建或大幅改造冶炼厂的计划

增强ETS影响情景中的假设：

加速ETS情景

ETS 价格*	以更快的速度上涨，参考欧盟ETS第3阶段的价格变化趋势，当时的免费配额比例从80%减少到了30%
ETS 基准碳强度	基准碳强度根据历史趋势，随时间越来越严格
电厂碳强度变化	保持不变，因为没有出现在2030年前退役、重建或大幅改造电厂的计划
自备电厂供电比例	根据现有和已宣布的可再生能源电力替代政策进行调整
冶炼厂的能耗强度	保持不变，因为没有出现在2030年前退役、重建或大幅改造冶炼厂的计划

零基准情景

ETS 价格	按历史趋势速度上涨
ETS 基准碳强度	ETS 基准碳强度从2026年开始设为零
电厂碳强度变化	保持不变，因为没有出现在2030年前退役、重建或大幅改造电厂的计划
自备电厂供电比例	根据现有和已宣布的可再生能源电力替代政策进行调整
冶炼厂的能耗强度	保持不变，因为没有出现在2030年前退役、重建或大幅改造冶炼厂的计划

铝业ETS合规情景

ETS 价格	按历史趋势速度上涨
ETS 基准碳强度（PFC排放和过程相关二氧化碳排放）	基于欧盟ETS从第3阶段到第4阶段的铝冶炼碳基准
过程相关 PFC 排放	与基准保持一致
过程相关二氧化碳排放	与基准保持一致

*粗体变量表示各自情景中与当前政策轨迹相比发生变化的变量。

