

硅从何处来-工业硅产业简析

一、硅的基本属性

硅是一种化学元素，英文名称 Silicon，化学符号是 Si，原子序数 14，相对原子质量 28.0855，密度 2.4g/cm³，熔点 1414℃，沸点 2355℃，元素周期表上 IVA 族的类金属元素。硅的化学性质比较活泼，在高温下能与氧气等多种元素化合，不溶于水、硝酸和盐酸，溶于氢氟酸和碱液。硅有晶体硅和无定形硅两种同素异形体，晶体硅为钢灰色，无定形硅为黑色，晶体硅属于原子晶体，硬而有光泽，有半导体性质。

硅在自然界中分布极广，一般很少以单质的形式出现，主要以二氧化硅和硅酸盐的形式存在。地壳中约含 27.6%，是地壳中仅次于氧的第二丰富元素。硅是易融组分，硅在熔融过程中更倾向于进入熔体。因此在地壳或是地幔部分熔融的过程中，硅都容易在熔体中富集，最终使得地壳越发富集硅。

地球形成过程中就形成了化合态硅。化合态硅性质稳定也不容易返还成单质硅。另外单质硅确实性质稳定，与氧反应温度大概在三百多度，但是它是亲氧性元素，在地球漫长的历史中跟氧化合不易恢复成单质形态。

二、硅石-工业硅的起点

硅是组成岩石矿物的一个基本元素，在自然界中以石英砂和硅酸盐出现。硅对于地壳来说，占有非常重要的位置，因为地壳的主要部分都是由含硅的岩石层构成的。这些岩石几乎全部是由硅石和各种硅酸盐组成。长石、云母、黏土、橄榄石、角闪石等都是硅酸盐类；水晶、玛瑙、碧石、蛋白石、石英、砂子以及燧石等都是硅石。硅石均可作为工业硅的生产原材料，不过品位高的硅石如高纯石英砂则用来生产价值更高的石英坩埚等产品，而品位偏低且具备开采规模的硅石矿则多用来生产工业硅。

虽然资源丰富但世界硅资源分布不平衡。巴西最为丰富，我国硅资源也较多，大部分地区都有含硅矿石分布；马达加斯加和危地马拉硅石资源紧随其后。另外加拿大、俄罗斯、美国、法国、意大利、印度、澳大利亚、土耳其、缅甸等 30 多个国家和地区同样拥有较丰富的硅石资源。

由于水晶、脉石英、石英砾石、天然硅砂、石英岩和粉石英矿的储藏量属于我国国民经济的非支柱性的矿藏资源，也是我国多种未探明储藏量的非金属矿藏，因而全国的储藏量大部分是预测估算数或未知数，在开采和使用方面要考虑可持续发展的原则。

三、工业硅的制备

工业硅又称金属硅、结晶硅。据史料记载，1787 年存在于岩石中的硅首次被拉瓦锡发现，1800 年被戴维误认为是一种化合物。1811 年 J. L. 盖吕萨克和 L. -J. 泰纳尔加热钾和四氯化硅得到不纯的无定形硅，根据拉丁文 *silex*（燧石）命名为 *silicon*；同年 Gay-Lussac 和 Thenard 用硅的四氯化物与碱土金属反应，发现在反应当中生成赤褐色的化合物（可能是含不纯物无定形的硅）。直到 1823 年，硅首次以一种元素形式被瑞典化学家贝采利乌斯（Jöns Jacob Berzelius）发现，并在一年后用与盖-吕萨克大致相同的方法，提炼出了无定形硅；随后用反复清洗的方法将单质硅提纯。

但是为了抽取纯的硅，贝采利乌斯使用硅-氟-钙的化合物，干烧之后得到的固体，加水分解得到纯硅。1824 年，在斯德哥尔摩，贝采利乌斯通过加热氟硅酸钾和钾获取了硅。这个产物被硅酸钾污染，但他把它放在水中搅拌，由于水会与之反应，因此得到了相对纯净的硅粉末。1824 年 J. J. 贝采利乌斯用同样的方法，经过反复洗涤除去其中的氟硅酸，得到纯无定形硅。直到 1854 年，结晶的硅才被提炼出来；同年 H. S. C. 德维尔也第一次制得晶态硅。

规模化制备工业硅则通过碳质还原剂在矿热炉内还原二氧化硅制得。基本步骤包括：首先将合格硅石用水清洗除去泥土等杂质，经破碎机破碎至 20 到 100 毫米。然后筛分，再水洗除去碎石、石粉等，经称量后与石油焦按照一定比例混匀，将混匀后的合格料送至矿热炉进行冶炼除杂。硅液形成后通入空气增加透气性以进一步除杂，一部分硅液冷却后直接产出产品，一部分硅液送至特制硅包通氧进行精炼，精炼后的硅液再送入精炼炉进一步精炼、加氧增压分离除杂，浇铸冷却后产出高纯工业硅产品，经精选、清洗，最后破锭包装入库。

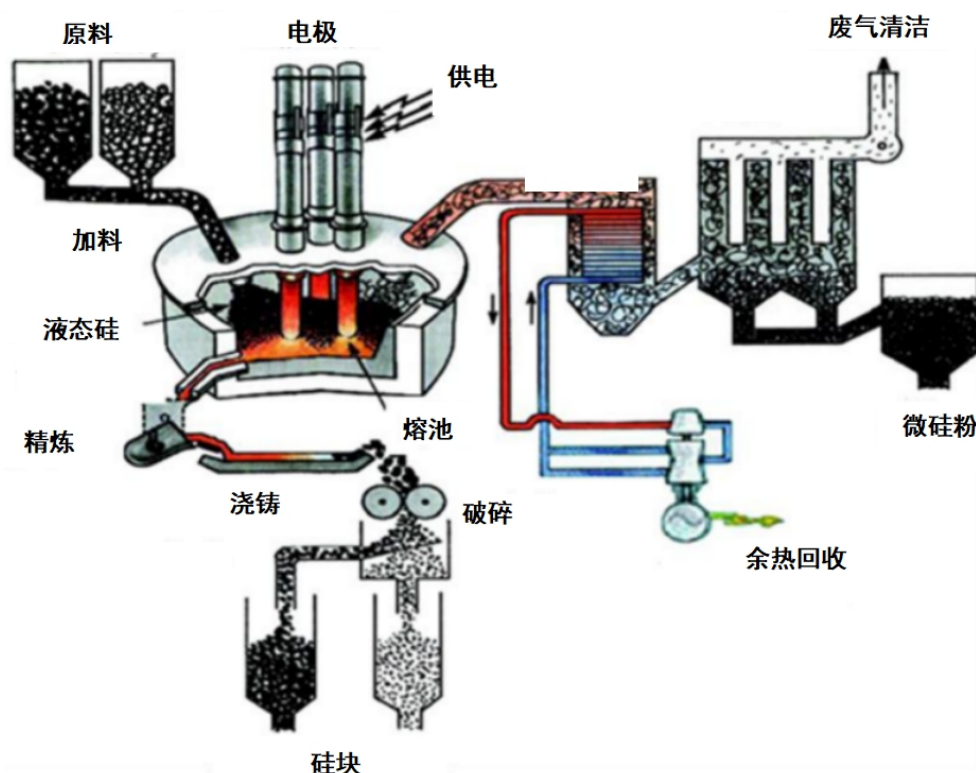
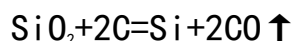


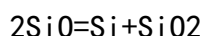
图 1：工业硅生产示意图

资料来源：公开资料 新湖研究所

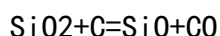
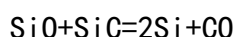
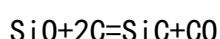
工业硅生产反应过程化学式如下：



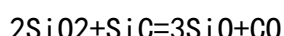
在实际生产中，硅石的还原比较复杂。从冷状态下炉内情况出发，实际生产中炉内发生的反应是：炉料入炉后不断下降，受上升炉气的作用，温度在不断升高。上升的 SiO 有下列反应：



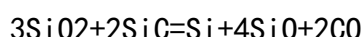
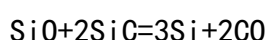
这些产物大部分沉积在还原剂的孔隙中。炉料继续下降，当温度升到 1820℃ 以上时，有下列反应：



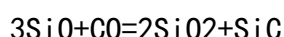
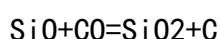
当温度再升高时，有以下反应：



在电极下有如下反应：



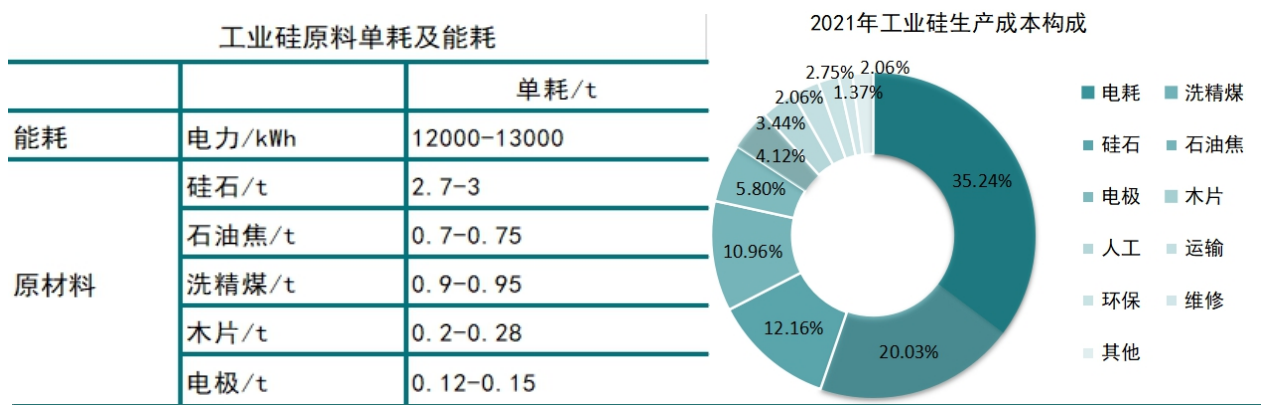
炉料在下降的过程中有如下反应：



在冶炼中，主要反应大部分是在熔池底部料层中完成的。碳化硅的生成、分解和一氧化硅的凝结又是以料层内各区维持温度分布不变为先决条件。碳化硅的生成很容易，而碳化硅还要求高温、快速反应，否则就会沉积在炉底；由此可知，必须保持中心反应区温度的稳定性。

由于冶炼在持续的高温中进行，工业硅生产能耗高，单吨电耗普遍在 12000-13000 度，因此其能耗占成本比重最大，在 30% 以上。成本占比其次的是碳质还原剂，而硅石占成本 10% 左右。

图 2：工业硅生产成本构成



资料来源：中国有色金属工业协会 新湖期货研究所

通过矿热炉冶炼生产的硅其硅元素含量基本在 98% 以上，含有的其他元素则以铁、铝、钙为主，还含有硼、磷、钛等微量元素。国家标准则以铁、铝、钙的含量对工业硅进行牌号分类。

表 1：常有工业硅牌号

牌号	Si 含量不小于/%	主要杂质元素含量/%不大于		
		Fe	Al	Ca
Si1101	99.79	0.1	0.1	0.01
Si2202	99.58	0.2	0.2	0.02
Si3303	99.37	0.3	0.3	0.03
Si4110	99.4	0.4	0.1	0.1
Si4210	99.3	0.4	0.2	0.1
Si4410	99.1	0.4	0.4	0.1
Si5210	99.2	0.5	0.2	0.1
Si5530	98.7	0.5	0.5	0.3

资料来源：公开资料 新湖期货研究所

四、工业硅产业链体系

从 20 世纪 50 年代开始，海外多各个研究小组开始了硅的研究工作，研究小组主要包括：贝尔实验室的 G.K. 迪尔 (Teal) 小组，主要研究硅单晶的生长；西门子集团的 W. Heywang 小组与豪斯科 (Halske) 材料研究实验室，主要研究硅的纯化，制出高纯硅；在普莱茨菲尔德 (Pretzfeld) 的 E. 斯潘科 (E. Spenke) 领导下的实验室也加入到硅的研究工作中。

1957 年基尔比 (Killby) 搭建了第一批功能化的集成电路。1960 年贝尔实验室的康 (Kahng) 和艾塔拉 (Atalla) 首次研制出 MOS 晶体管。这两项发明为硅集成电路在信息技术市场中的大规模应用开辟了道路。

随着全球信息科技的不断发展，工业硅材料需求增长迅猛。工业硅应用大体分三大板块，其中，含硅铝合金可用于汽车发动机、建材、汽车轮毂等产品制造；有机硅广泛应用于航空航天、电子电气、建筑、运输、化工、纺织、食品、轻工、医疗等行业；多晶硅主要应用于

光伏发电、半导体以及集成电路等领域。此外工业硅在耐火材料方面也有不少应用。近几年，太阳能光伏、汽车、建筑工程、电子信息等行业的加速发展加速了工业硅产业发展。

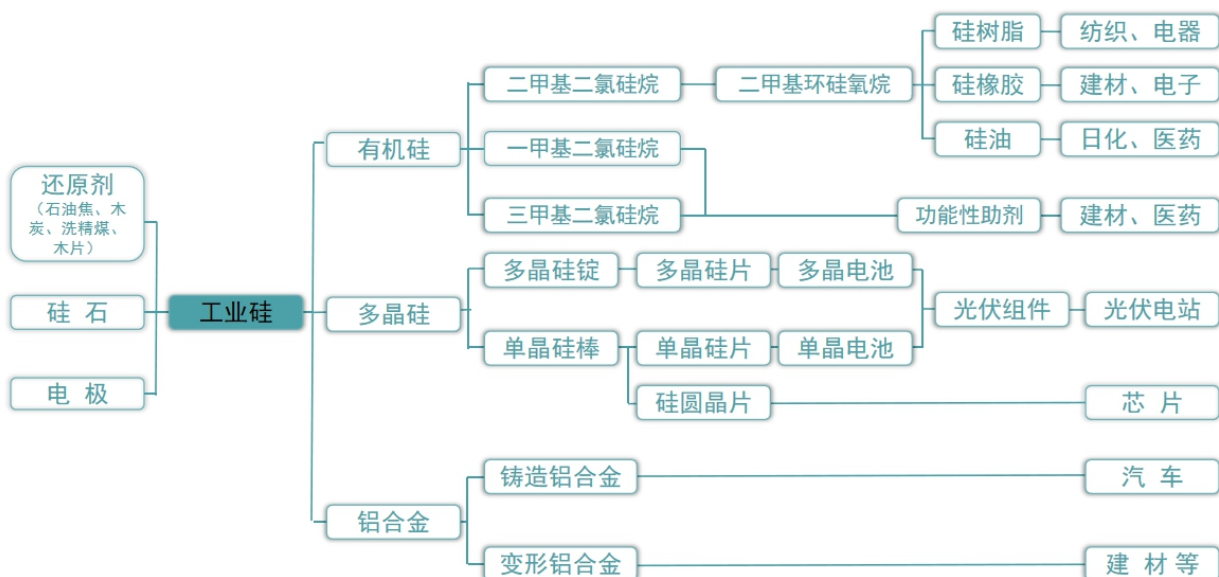


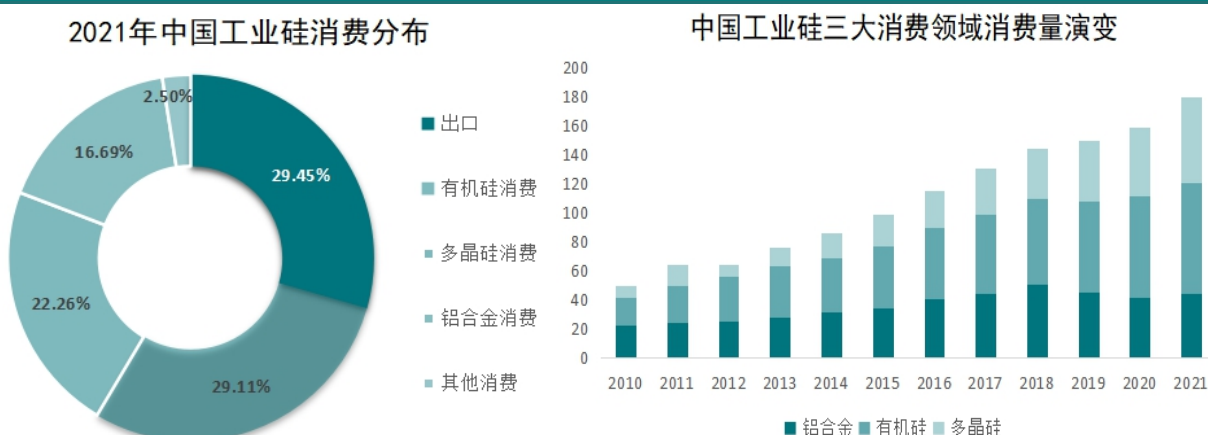
图 3：工业硅产业链示意图

资料来源：公开资料 新潮研究所

国内工业硅消费中，有机硅、多晶硅及铝合金呈三足鼎立之势。据中国有色金属工业协会数据，2021 年国内有机硅、多晶硅及铝合金对工业硅消费量分别为 76.9 万吨、58.8 万吨及 44.1 万吨，占国内消费量分别为 41.26%、31.54%及 23.66%。随着国内“双碳”推进，新能源尤其是光伏产业加速发展，多晶硅需求增长进入快车道，相应其对工业硅消费占比将不断提升并超过有机硅成为工业硅第一大消费板块之势。

由于海外产量下降，但需求不断攀升，对中国工业硅的依赖程度在上升，因此工业硅出口占国内产量也有较大比重，其中 2021 年出库量达 77.8 万吨，占国内产量近 30%。

图 4：中国工业硅消费分布



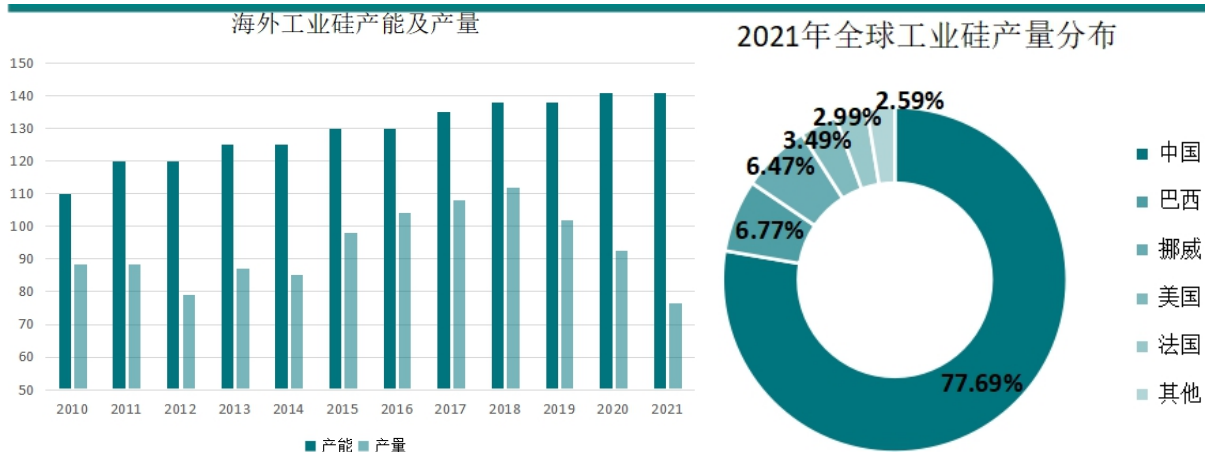
资料来源：中国有色金属工业协会 新潮期货研究所

五、海外工业硅现状

工业硅发展起步于海外，不过近 10 年以来，海外工业硅产业发展相对缓慢。这其中或与工业硅冶炼能耗高及矿石开采经济性不佳有一定关系。

据中国有色金属工业协会硅业分会数据，近几年海外工业硅产能维持在 140 万吨上下水平，而产量则在 2018 年达到 112 万吨峰值后明显回落，2021 年产量降至 80 万吨以下水平。海外主要工业硅生产企业包括美国的 Ferroglobe 和陶氏，挪威的埃肯和瓦克，巴西的 Rima 和 Liasa，以上企业基本占据海外 70% 以上的工业硅产量。

图 5：海外工业硅产能产量及产量全球分布（单位：万吨）



资料来源：中国有色金属工业协会 公开资料 新湖期货研究所

海外工业硅产能未有明显扩张计划，产量则呈萎缩态势。虽然美欧等则有意加大晶硅光伏产业投资，但对上游工业硅投资兴趣不大，因此海外工业硅产量或有所起伏，但产能或难有明显扩张。

六、中国工业硅发展

据相关文献，我国工业硅的发展始于 1957 年，在当时苏联帮助下在辽宁建成投产了采用单相双电极炉的第一个生产单位。1960 年以后，我国开始自行设计建设单相和三相电极工业硅炉。从上世纪 60 年代初至 70 年代末，先后在辽宁、河北、江苏、上海、天津、河南、青海、贵州等省区建成投产了十几个生产单位，形成了近 2 万吨/年的生产能力。这一阶段，我国的工业硅生产处于国内自产自销，能够达到自给自足的状态。

1980 年以后，我国的工业硅开始出口，随着出口量的迅速增加，生产企业数量迅速增长。到 80 年代末，我国的工业硅企业达到约 300 家。

1989 年的政治风波，使我国的工业硅生产遭受一次重大挫折，之后的几年，我国的工业硅企业关停或转产了一半以上。

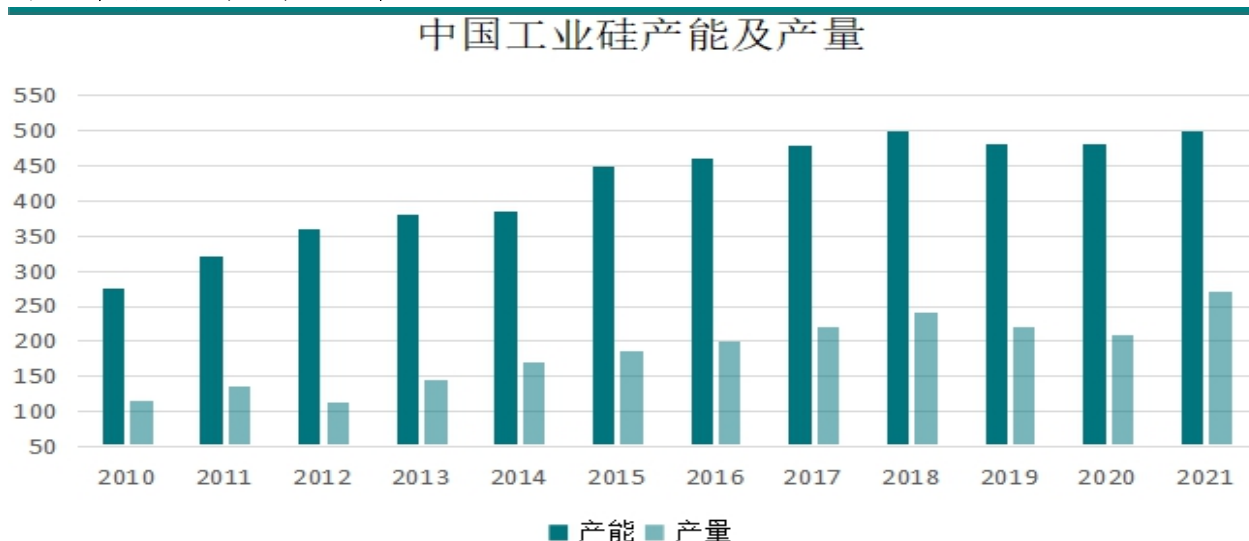
20 世纪 90 年代中期，世界工业硅出现了短暂的供不应求，价格上扬，我国的工业硅企业又有一些恢复生产，还有一些单位新建或增建了工业硅炉。

20 世纪 90 年代后期，受国际市场工业硅价格下滑和亚洲金属危机等因素影响，我国东北、华北、西北、华东等地区的一些工业硅企业又有一批停产或转产，同时在电力供应充足，且电价较低的贵州、云南、四川等省区又新建了一批工业硅企业。

进入 21 世纪，随着我国各地区能源和原材料供应状况和价格的不断变化，不适合继续生产的企业被迫关停，而具有能源等供应优势地区的新建工业硅企业的建设，仍在不断进行着。2004 年以来，国家对一些资源性产品行业出台了一系列宏观调控政策，工业硅行业是被国家宏观调控的行业之一。近几年来工业硅企业又面临着新的考验和抉择。

近十几年用来我国工业硅产业发展迅速，尤其近几年“双碳”背景下，光伏产业的快速发展带动下，工业硅产能再度迎来快速扩张期。据中国有色金属工业协会数据，2021 年底国内工业硅产能超 500 万吨，而到 2022 年底则超 600 万吨。2021 年国内工业硅产量达 270 万吨。

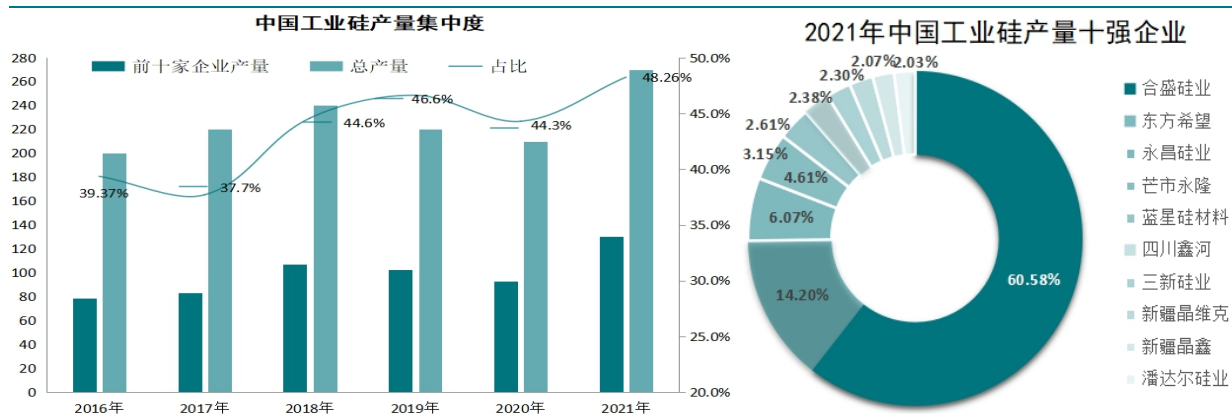
图 6：中国工业硅产能产量（单位：万吨）



资料来源：中国有色金属工业协会 新湖期货研究所

国内目前工业硅生产企业超 200 家，产能集中度有不断上升的趋势，尤其是龙头企业其产能占比在加速攀升。据中国有色金属工业协会数据，2016 年国内前十大工业硅企业产量占全国总产量的比重为 39.37%，到 2021 年这一比例攀升至 48.26%。尤为突出的是头部企业合盛硅业，期间其产量占全国总产量的比重自 16% 攀升至 30%。

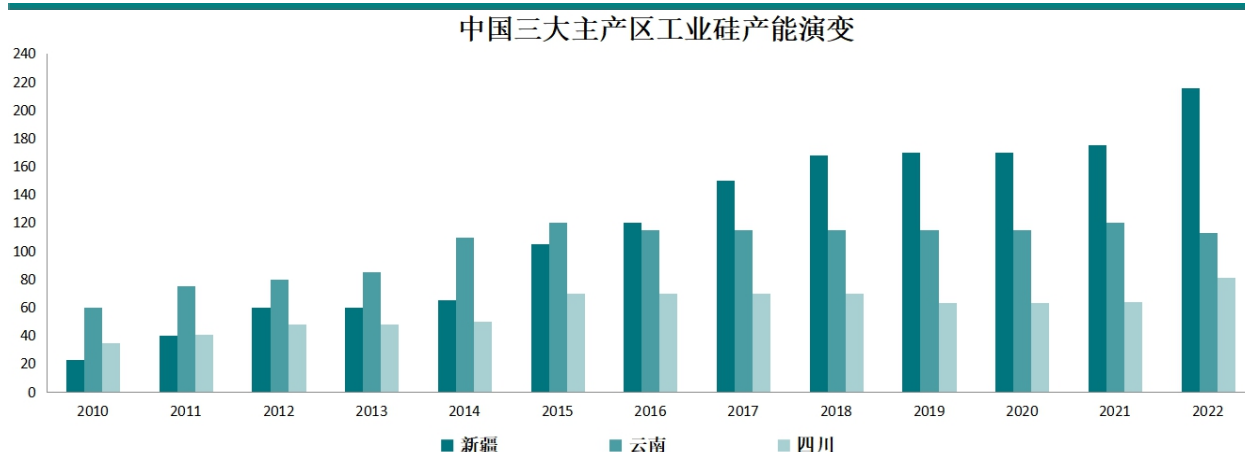
图 7：中国工业硅产量集中度



资料来源：中国有色金属工业协会 新湖期货研究所

分地区看，新疆、云南、四川为工业硅集中地区，这主要得益于三省能源成本低的优势，其中云南、四川水电为主，而新疆优势则在于具有丰富的煤炭资源，发电成本低。虽然云南、四川水电丰富给予冶炼厂较低的电力成本，但由于一年中枯水期电力供应不足，期间冶炼厂多不能满负荷运行，对冶炼厂来讲也是成本的增加。而新疆火电平稳，完全能满足全年满负荷运行用电，这也是近几年新疆工业硅产能扩张最为迅速的原因。

图 8：中国工业硅主产区产能变化

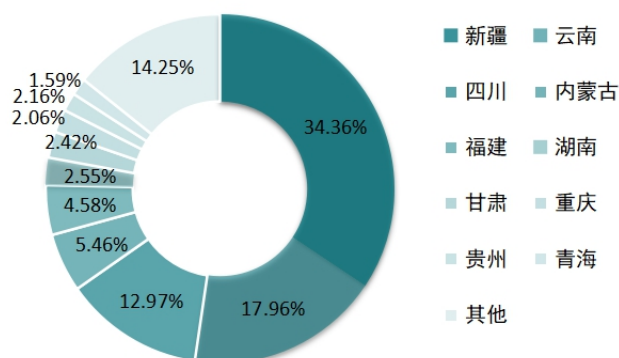


资料来源：中国有色金属工业协会 新湖期货研究所

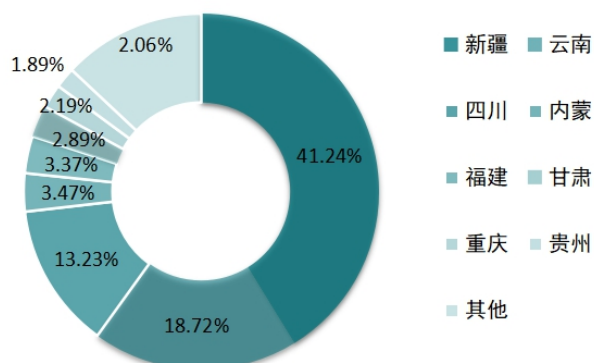
据百川盈孚数据，截至 2022 年 11 月底，新疆地区工业硅产能达到 216 万吨，占全国总产能的 34%。三大主产区产能合计达 410 万吨，占全国总产能的 65%。2022 年前十一个月新疆工业硅产量实现 123.3 万吨，占全国总产量 41.2%。三省产量合计 218.84 万吨，占全国总产量的 74%，区域集中度较高。

图 9：中国工业硅产能、产量分布

2022年中国工业硅产能分布



2022年1-11月中国工业硅产量分布



资料来源：百川盈孚 新湖期货研究所

在光伏产业加速发展的带动下，国内工业硅投资持续保持高热度，2022 年新增产能近 100 万吨，而 2023 年仍有超 100 万吨的产能规划，这其中云南、新疆仍是产能投资热点地区，此外，内蒙、甘肃等西北地区也是近两年产能建设的集中省份。

表 2：2023 年工业硅新增产能计划（单位：万吨）

地 区	企 业	计划新增产能
新疆哈密	晶和源新材料	9
黑龙江黑河	合盛硅业	10
云南保山	永昌硅业	10
云南昭通	合盛硅业	40
甘肃兰州	东方希望	20
内蒙包头	特变电工	10
内蒙包头	东方日升	10
内蒙包头	上机数控	8
合 计		117

资料来源：SMM 新湖期货研究所

小结

工业硅作为生产生活不可或缺的诸多商品生产所需的原材料，其在全球工业体系中的作用不言而喻。减碳降碳的大背景下，晶硅光伏作为赋予厚望的新能源产业，其未来加速发展也离不开工业硅产业的匹配。而将工业硅纳入期货市场，将有利于工业硅市场更趋规范化。作为全球最大的工业硅生产国与消费国，我国更需要发挥出自身市场对工业硅的定价作用，为产业健康稳定发展夯实基础。

分析师：孙匡文

从业资格号：F3007423

投资咨询从业证书号：Z0014428

电话：021-22155609

E-mail：sunkuangwen@xhqh.net.cn

审核人：李强

免责声明：

本报告由新湖期货股份有限公司（以下简称新湖期货，投资咨询业务许可证号 32090000）提供，无意针对或打算违反任何地区、国家、城市或其他法律管辖区域内的法律法规。除非另有说明，所有本报告的版权属于新湖期货。未经新湖期货事先书面授权许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发布。如引用、刊发，须注明出处为新湖期货股份有限公司，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。本报告的信息均来源于公开资料和/或调研资料，所载的全部内容及其观点公正，但不保证其内容的准确性和完整性。投资者不应单纯依靠本报告而取代个人的独立判断。本报告所载内容反映的是新湖期货在最初发表本报告日期当日的判断，新湖期货可发出其他与本报告所载内容不一致或有不同结论的报告，但新湖期货没有义务和责任去及时更新本报告涉及的内容并通知更新情况。新湖期货不对因投资者使用本报告而导致的损失负任何责任。新湖期货不需要采取任何行动以确保本报告涉及的内容适合于投资者，新湖期货建议投资者独自进行投资判断。本报告并不构成投资、法律、会计、税务建议或担保任何内容适合投资者，本报告不构成给予投资者投资咨询建议。