

# “煤炭清洁高效利用技术”重点专项 2024 年度项目申报指南

(仅国家科技管理信息系统注册用户登录可见)

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“煤炭清洁高效利用技术”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2024 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：推进煤炭利用清洁低碳、灵活智能转型，在有效满足经济社会对能源需求的同时，保障国家能源安全，为能源系统平稳转型及碳达峰碳中和目标的实现提供科技支撑。

2024 年度指南部署坚持问题导向、分步实施、重点突出的原则，围绕煤炭高效清洁发电、煤炭清洁转化、二氧化碳捕集利用与封存 3 个技术方向，拟启动 18 项指南任务，安排国拨经费 2.11 亿元。其中，拟部署 3 项青年科学家项目，拟安排国拨经费 900 万元，每个项目不超过 300 万元。原则上，由企业牵头申报的项目配套经费与国拨经费比例不低于 2:1。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。除特殊说明外，每个方向拟支持项目数为 1 项，实施周期不超

过 4 年。除特殊说明外，申报项目的研究内容必须涵盖二级标题下指南所列的全部研究内容和考核指标。基础研究类项目下设课题不超过 4 个，项目参与单位总数不超过 6 家；共性关键技术类项目下设课题数不超过 5 个，项目参与单位总数不超过 10 家。项目设 1 名项目负责人，每个课题设 1 名课题负责人。

青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1984 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1982 年 1 月 1 日以后出生。原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

## **1. 煤炭高效清洁发电**

### **1.1 整体煤气化燃料电池(IGFC)发电关键技术研究(共性关键技术类)**

研究内容：开发以合成气为燃料的高效燃料电池发电技术；研究燃料电池堆模块化放大策略与热管理技术；研发集成燃料电池堆、燃烧器、换热器等关键部件的高紧凑发电系统；研究以煤制合成气为燃料的大功率燃料电池发电系统启停、运行安全控制策略与在线运行优化控制方法；构建 IGFC 系统模拟平台，研究系统优化配置与设计方法，分析不同的系统配置和设计方案对发电成本的影响。

考核指标：开发单套规模百千瓦级 IGFC 发电系统，采用富氢合成气（主要成分为  $H_2$  和  $CO$ ，其中  $CO$  体积含量不

低于 1%) 作为燃料时, 燃料电池发电功率  $\geq 200$  kW, 额定发电效率  $\geq 55\%$ , 长期运行时间  $\geq 1000$  小时 (实测), 千小时衰减率  $\leq 1.5\%$ , 其中单热区模组功率  $\geq 50$  kW。形成百兆瓦级 IGFC 发电系统设计方案, 净发电效率  $\geq 50\%$  (从煤气化开始计算)。

关键词: 整体煤气化, 燃料电池, 发电

## 1.2 无烟煤宽负荷燃烧发电与氮氧化物控制关键技术 (共性关键技术类)

研究内容: 研究无烟煤在宽负荷工况下燃烧、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 生成特性、炉内受热面高温腐蚀与结渣特性; 研发变负荷工况下低负荷稳燃、高效燃烧燃尽技术和炉内  $\text{NO}_x$  控制技术; 开发无烟煤锅炉炉内监测分析诊断技术, 建立无烟煤锅炉燃烧智能控制策略; 研发适用于宽负荷范围无烟煤锅炉运行的超低排放控制技术; 开展燃用 100%无烟煤煤粉锅炉工程验证。

考核指标: 在 300 MW 级及以上煤粉锅炉机组上完成工程验证, 实现锅炉全负荷燃用 100%无烟煤 (入炉物质为纯煤, 且  $V_{\text{daf}} \leq 10\%$ ) 的受热面壁温、结渣、腐蚀安全可控, 锅炉负荷运行范围 30%~100% (无外来热源稳定燃烧), 锅炉  $\text{NO}_x$  原始排放  $\leq 600 \text{ mg/m}^3$  (基准氧含量 6%), 烟囱出口污染物排放满足超低排放标准。

关键词: 无烟煤燃烧, 氮氧化物, 超低排放, 工程验证

## 1.3 燃煤锅炉低成本炉内超低氮氧化物控制技术 (共性

## 关键技术类)

研究内容: 研究电站锅炉宽负荷工况下燃煤历程中  $\text{NO}_x$  的分布和深度还原规律; 开发燃煤锅炉低成本炉内非选择性催化还原控制  $\text{NO}_x$  排放关键技术; 基于炉内燃烧诊断技术开展智能感知和数据挖掘研究, 形成变负荷工况下控制氮氧化物定向转化新方法; 研发燃煤非选择性催化还原低成本炉内还原  $\text{NO}_x$  的系统集成技术, 开展工程验证。

考核指标: 完成 600 MW 等级及以上燃煤电站锅炉  $\text{NO}_x$  深度还原技术工程验证, 锅炉 30%~100% 负荷工况下  $\text{NO}_x$  原始排放  $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  排放控制系统综合投资运行成本比传统选择性催化还原脱硝技术降低 50% 以上, 尾部烟气 CO 排放  $\leq 200 \text{ mg/m}^3$  (基准氧含量 6%)。

关键词: 燃煤电站锅炉, 低成本, 深度还原, 氮氧化物

### 1.4 700℃燃煤发电关键技术(共性关键技术类)

研究内容: 研发 700℃ 高参数机组关键高温镍基热部件的加工与焊接工艺及汽轮机缸体、轴系等大型铸锻件的设计制造技术; 设计并研制 700℃ 等级汽轮机高温镍基热部件的试验件, 开展试验件模拟实际运行的长周期试验验证; 研究 700℃ 超高参数锅炉及汽轮机的详细产品设计方案; 研究 700℃ 发电系统主辅机、回热系统优化与集成; 构建 700℃ 等级超高参数燃煤发电系统并完成方案设计。

考核指标: 掌握汽轮机缸体、轴系等大型铸锻件的设计制造技术, 设计 1 种汽轮机异材(镍基与铁基)焊接轴系的

模拟件，模拟比不小于 1:3；完成汽轮机关键热部件在温度  $\geq 700^{\circ}\text{C}$  下的长周期考核试验（试验时间大于 10000 小时）；掌握锅炉及汽轮机的详细设计技术，掌握  $700^{\circ}\text{C}$  等级超高参数燃煤发电系统优化和设计技术，完成 600 MW 等级  $700^{\circ}\text{C}$  超超临界二次再热发电机组方案设计，净效率不低于 50%。

关键词： $700^{\circ}\text{C}$ ，汽轮机，热部件长时性能，方案设计

### **1.5 燃煤烟气污染物低成本资源化利用技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究燃煤烟气污染物低成本高效脱除与产物资源化技术；研究烟气污染物组分定向转化新途径，开发污染物高值转化利用技术；研发资源化产物低成本分离提纯技术与装备；开发污染物脱除及资源化过程的二次污染物控制关键技术；形成低能耗、低成本的烟气净化与污染物资源化利用成套技术工艺及智能调控技术，并进行工程验证。

考核指标：建成烟气量不低于 50 万立方米/小时的工程验证系统，并通过 168 小时的性能测试，烟气污染物排放浓度满足国家燃煤电站超低排放限值要求，实现硫氧化物等两种以上污染物的资源化利用（污染物不包含飞灰，资源化回收产物不包含  $\text{CaSO}_4$ ），其中硫资源化回收率  $\geq 92\%$ ，资源化产物品质符合相关国家标准要求，与常规燃煤电站污染物脱除技术相比，系统综合投资运行成本降低 10% 以上。

关键词：超低排放，低成本，资源化，工业验证

## **2. 煤炭清洁转化**

## **2.1 煤转化过程控制系统关键技术和设备研制（共性关键技术类）**

研究内容：研究煤转化过程中能质传递与反应耦合机制，构建机理与数据驱动的多尺度数字孪生模型；开发适应煤种多变、加工路线复杂煤转化过程的智能决策系统；研究基于数字孪生模型的多目标在线优化技术；研发多工况、变负荷下煤转化装置智能自适应控制与故障诊断技术；开展煤高效清洁转化过程决策、优化与控制等关键技术及系统的工程验证。

考核指标：数字孪生模型对产品收率等多个关键指标的预测精度不低于 95%；研制出可用于不少于 2 个典型煤转化过程（其中一个为煤气化过程）的专用决策软件；在线优化结果误差范围小于预定值的 5%；形成一套智能控制与故障诊断系统，故障诊断误报和漏报率均低于 15%，涵盖不低于 20 种典型故障（关键设备、仪表、工艺等）的诊断，且具有未知故障识别能力；在原料处理量不低于 80 万吨/年的煤转化过程开展工程验证，决策方案执行精度误差降低 10%，关键产品收率提高 0.3%，关键被控变量波动范围降低 20%。

关键词：煤转化过程，数字孪生模型，智能控制，在线优化

## **2.2 新型煤制气体燃料关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研发高压循环流化床气化关键技术及装备，研发固体高倍率稳态循环、气固高温梯级分离技术及装备，开展

加压条件下灰化学性质预测和调控研究，研发稳态排渣技术及装备，开展高压循环流化床气化技术工业验证；开发流化床甲烷化催化剂及反应工艺，完成中试验证，形成成套工业技术；研制抗积炭、适应宽模数范围的固定床甲烷化催化剂，阐明抗积炭机理，开展固定床甲烷化高效工艺和关键设备的研究，形成合成气甲烷化工业化成套技术并开展示范验证。

考核指标：完成千吨级/日高压循环流化床气化关键技术验证，压力 $\geq 4.0$  MPa，碳转化率 $\geq 98\%$ ，梯级分离器固体分离效率 $\geq 99\%$ ；完成流化床甲烷化催化剂及反应工艺中试验证，CO+CO<sub>2</sub>转化率 $\geq 99\%$ ，甲烷选择性 $\geq 99\%$ ；固定床甲烷化催化剂适应模数范围 2.85~3.06，甲烷化工艺能量利用率 $\geq 95\%$ ，完成年十亿立方米级合成气甲烷化工艺软件包开发并开展年十亿立方米级工业示范验证，CO+CO<sub>2</sub>转化率 $\geq 98.5\%$ ，甲烷选择性 $\geq 99\%$ 。

关键词：高压循环流化床，气化，流化床甲烷化，固定床甲烷化

### **2.3 新型合成气制烯烃/芳烃类化学品关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究煤基合成气直接制低碳烯烃、轻质芳烃等过程的催化剂制备放大方法；开发合成气直接制烯烃、芳烃过程原料气净化工艺、反应器和反应工艺、分离工艺，形成成套技术；开展合成气制烯烃、芳烃催化剂规模化制备，反应、分离工艺中试验证以及经济性分析。

考核指标：完成合成气制低碳烯烃催化剂单次吨级制备验证，CO 单程转化率  $\geq 60\%$ ，CO<sub>2</sub> 单程选择性  $\leq 30\%$ ，C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> 烯烃选择性  $\geq 80\%$ ，C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> 烯烃时空收率  $\geq 320 \text{ g/(kgcat}\cdot\text{h)}$ ，完成年千吨级中试验证，完成 50 万吨/年工艺包编制；完成合成气制轻质芳烃催化剂单次吨级制备放大验证，CO 单程转化率  $\geq 60\%$ ，CO<sub>2</sub> 单程选择性  $\leq 30\%$ ，芳烃选择性  $\geq 60\%$ ，芳烃时空收率  $\geq 100 \text{ g/(kgcat}\cdot\text{h)}$ ，其中轻质芳烃（BTX）占比  $\geq 70\%$ ，完成年百吨级中试验证。

关键词：合成气，低碳烯烃，轻质芳烃，中试验证

## 2.4 煤转化过程中废水资源化利用关键技术（共性关键技术类）

研究内容：研究煤间接液化合成废水高值化利用分离关键技术，构建多元体系热力学模型，实现醇类化学品回收利用；研究煤气化高浓度酚氨废水高效预处理、低氧生物处理和资源化利用技术；研究高含盐废水高温芬顿氧化技术，开发芬顿催化剂；开发含盐废水离子交换膜精馏成套工艺技术及装备。

考核指标：形成煤间接液化合成废水中醇类产品精细分离成套工艺，产品纯度甲醇  $\geq 92\%$ 、乙醇  $\geq 98\%$ 、丙醇  $\geq 98\%$ ；形成煤气化酚氨废水资源化利用成套技术并进行工业化示范，单系列规模  $\geq 500$  吨/小时，预处理化学需氧量（COD） $\leq 2500 \text{ mg/L}$ ，生化处理后化学需氧量（COD） $\leq 100 \text{ mg/L}$ ，氨氮  $\leq 10 \text{ mg/L}$ ；芬顿催化高含盐废水化学需氧量（COD）去除率  $\geq 60\%$ ，催化剂寿命  $\geq 2$  年；形成离子交换膜精馏成套工艺技术，膜选择性



$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} \geq 20$ ，并实现吨/天级煤化工废水资源化工程验证，水回用率  $\geq 99\%$ ，盐纯度  $\geq 99\%$ 。

关键词：间接液化合成废水，酚氨废水，高含盐废水，高温芬顿氧化，离子交换膜

## **2.5 合成气转化直接制对二甲苯技术研究（青年科学家项目）**

研究内容：研究合成气转化直接制对二甲苯反应中的碳氧键活化和碳碳键偶联机制，构建芳烃产品碳数和异构化调控方法，揭示关键中间体高效定向转移机制，建立催化剂表界面配位结构与反应性能之间的构效关系，建立催化剂规模化制备方法并在固定床反应器中完成性能验证。

考核指标：完成高时空收率合成气转化直接制对二甲苯催化剂公斤级制备及性能验证，在固定床反应器中空速  $\geq 12000 \text{ mL}/(\text{gcat} \cdot \text{h})$  的反应条件下，CO 单程转化率  $\geq 40\%$ ，对二甲苯时空收率  $\geq 50 \text{ g}/(\text{kgcat} \cdot \text{h})$ ，对二甲苯在二甲苯中选择性  $\geq 50\%$ ，催化剂单程寿命  $\geq 200$  小时。

关键词：合成气转化，对二甲苯，催化剂

## **3. 二氧化碳捕集利用与封存**

### **3.1 可再生能源驱动 $\text{CO}_2$ 还原制高纯液体燃料与天然产物（基础研究类）**

研究内容：研究可再生能源发电系统实际波动工况下  $\text{CO}_2$  电解制免分离、高纯液体燃料新途径，搭建高效稳定的固态电解质电堆；优化级联系统组装工艺及参数，提升系统整体能效；

揭示电催化  $\text{CO}_2$  还原关键中间体的演化机制，建立催化剂配位环境与催化剂性能的定量关联模型，研发催化剂的批量制备技术；开发电催化－生物催化耦合  $\text{CO}_2$  升级转化技术，构建耦合催化系统；建立  $\text{CO}_2$  到平台分子再到  $\text{C}_{6+}$ 天然产物的级联催化过程，研究生物催化过程中代谢调控机制。

考核指标：催化剂活性电流密度  $\geq 1 \text{ A/cm}^2$ ，单一碳基液体产物选择性  $\geq 90\%$ ；实现催化剂的公斤级制备；建立百千瓦级直接绿电驱动的  $\text{CO}_2$  电解制免分离、高纯液体燃料（不含电解质盐的甲酸、乙酸等水溶液）固态电解质系统，系统整体能量效率  $\geq 30\%$ ，电流密度  $\geq 100 \text{ mA/cm}^2$ ， $0.1 \text{ M}$  高纯液体燃料的产率  $\geq 4$  公斤/小时，连续稳定运行  $\geq 200$  小时，产物中钾、钠等金属阳离子杂质总浓度低于  $10 \text{ ppm}$ ，硫、氯等阴离子杂质总浓度低于  $1 \text{ ppm}$ ；建立电催化－生物催化耦合的  $\text{CO}_2$  转化系统，实现萜类化合物等  $\text{C}_{6+}$ 天然产物原始浓度  $\geq 5 \text{ g/L}$ 。

关键词： $\text{CO}_2$  电解，免分离，液体燃料，天然产物，固态电解质

### 3.2 循环流化床（CFB）富氧燃烧碳捕集关键技术（共性关键技术类）

研究内容：研究循环流化床煤/生物质富氧燃烧条件下气固流动、燃烧组织及污染物控制技术；研发高氧浓度富氧燃烧热量有序转化及受热面布置技术；研发循环流化床富氧燃烧锅炉及其启停、空气富氧切换等关键运行策略；进行循环流化床锅炉富氧燃烧工业验证。

考核指标：完成  $40 \text{ MW}_{\text{th}}$  以上循环流化床煤/生物质富氧燃烧工程验证，富氧燃烧连续运行  $\geq 168$  小时，锅炉效率  $\geq 90\%$ ， $\text{NO}_x$  原始排放  $\leq 70 \text{ mg/m}^3$  (等效空气条件)，干烟气中  $\text{CO}_2$  浓度  $\geq 84\%$ ；形成  $350 \text{ MW}_e$  超临界循环流化床富氧燃烧锅炉设计方案，锅炉效率  $\geq 93\%$ ，比空气燃烧条件净电效率降低不超过 8 个百分点。

关键词：碳捕集，富氧燃烧，循环流化床，工业验证

### 3.3 化学链燃烧发电关键技术（共性关键技术类，青年科学家项目）

研究内容：研发适用于工业应用的高性能低成本载氧体；研发新型空气反应器、燃料反应器、物料循环装置等关键设备；建立化学链燃烧装置自热清洁运行的调控方法；开展煤/生物质化学链燃烧发电工程验证；开发工业规模化学链燃烧发电系统全流程工艺包。

考核指标：开发 2 种以上适用于工业应用的高性能低成本载氧体，生产规模  $\geq 100$  吨/年，载氧体载氧率  $\geq 4.0 \text{ wt}\%$ ，成本  $\leq 30$  元/公斤，使用寿命  $\geq 1000$  小时；完成耦合高温汽水循环的  $10 \text{ MW}_{\text{th}}$  级煤/生物质化学链燃烧发电关键技术的工程验证，产生的高温蒸汽用于辅助发电，全系统热态运行  $\geq 168$  小时，碳捕集效率  $\geq 92\%$ ，燃烧效率  $\geq 92\%$ ，实现原始烟气  $\text{NO}_x \leq 200 \text{ mg/m}^3$ ，实现燃料反应器出口干烟气的  $\text{CO}_2$  浓度  $\geq 90\%$ ；形成  $300 \text{ MW}_e$  级化学链燃烧发电系统全流程工艺包，比同等级循环流化床发电机组净电效率降低不超过 7 个百分点。

有关说明：拟支持 1 项常规项目，同时支持 1 项青年科学家项目，青年科学家项目要求如下：

研究内容：研究煤/生物质化学链燃烧过程中污染物生成抑制机理与载氧体中毒机制；研究长期运行中载氧体颗粒的活性衰减机制与阻滞方法；发展人工智能辅助高性能低成本载氧体主动设计方法。

考核指标：开发 3 种以上抗毒且性能稳定的载氧体材料，载氧体中毒率  $\leq 2\%$ ，活性衰减率  $\leq 5\%$ ，载氧体性能机器学习预测模型准确率  $\geq 85\%$ ，在 kW 级化学链燃烧连续装置上运行 100 小时验证上述指标。

关键词：化学链燃烧，载氧体，自热运行，汽水系统，工艺包

### **3.4 基于煤/生物质耦合燃烧高效清洁发电负碳排放关键技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究煤/生物质耦合燃烧清洁发电过程中  $\text{CO}_2$  的生成及碳富集规律；研发碱、氯等污染物对二氧化碳捕集过程的影响机制，研发  $\text{CO}_2$  高效低能耗捕集技术；构建耦合  $\text{CO}_2$  捕集的电厂负碳系统集成；完成高效清洁发电负碳排放技术工程验证，系统性评估技术经济性和环境效益。

考核指标：燃料中生物质掺混输入能量比  $\geq 7\%$ ，来源于生物质的  $\text{CO}_2$  负碳量  $\geq 1$  万吨/年， $\text{CO}_2$  捕集效率  $\geq 90\%$ ；烟气中  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、Cl 等污染物低于国家排放标准，系统  $\text{CO}_2$  捕集热耗  $\leq 2.2 \text{ GJ/t CO}_2$ 。

关键词：煤/生物质，CO<sub>2</sub> 生成，CO<sub>2</sub> 捕集，清洁高效，负碳系统

### 3.5 CO<sub>2</sub> 捕集与纯化过程中污染物高效脱除（青年科学家项目）

研究内容：研究烟气二氧化碳捕集过程吸收剂释放、降解逃逸机理，研发吸收剂逃逸监测和抑制技术；研究二氧化碳捕集、压缩、纯化过程中污染物转化特性和形态演变，研发高效污染物脱除方法。

考核指标：建立烟气处理量  $\geq 5$  立方米/小时装置，连续运行 72 小时，典型吸收剂逃逸低于  $5 \text{ mg/m}^3$ ，实现二氧化碳纯化运输前污染物高效脱除， $\text{NO}_x \leq 5 \text{ mg/m}^3$ ， $\text{SO}_2 \leq 1 \text{ mg/m}^3$ ， $\text{Hg} \leq 0.01 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 。

关键词：碳捕集与纯化，吸收剂逃逸，污染物，高效脱除

### 3.6 CO<sub>2</sub> 驱煤层气与封存技术（共性关键技术类）

研究内容：开展 CO<sub>2</sub> 增产煤层气与封存过程中多相多组分渗流和 CO<sub>2</sub> 运移规律研究；研究煤层气储层 CO<sub>2</sub> 注入、采空区封存过程中地质体多场演化规律和多尺度模拟技术；研究煤层气 CO<sub>2</sub> 注入 - 驱替封存方案优化技术；开展 CO<sub>2</sub> 驱煤层气地质封存技术现场试验。

考核指标：实验室尺度采收率提高 15 个百分点，工程尺度 CO<sub>2</sub> 驱煤层气 CO<sub>2</sub> 封存率  $\geq 60\%$ ；完成具有自主知识产权的 CO<sub>2</sub> 驱替封存过程多场模拟软件；在煤层气藏试验区水平井单井累计注入 CO<sub>2</sub> 量达到 10000 吨/年以上，现场应用采收率提高 10

个百分点。

关键词：CO<sub>2</sub> 驱煤层气、多相多组分渗流、现场试验

### 3.7 电驱动 CO<sub>2</sub> 还原制备气体燃料关键技术（共性关键技术类）

研究内容：研发低成本、高选择性、高稳定性工业电催化剂，形成高性能电极设计与制备技术；开发高效 CO<sub>2</sub> 电解池/堆，研发高耐蚀、高导电新型金属双极板与结构设计技术，探究电解池/堆多尺度能质传递强化与调控方法；开发针对燃煤烟气 CO<sub>2</sub> 捕集与电驱动 CO<sub>2</sub> 还原制气体燃料（以 CO 或 CH<sub>4</sub> 为主要产物）系统集成技术及成套装备。

考核指标：工业电催化剂实现在  $\geq 200 \text{ mA/cm}^2$  下连续稳定运行  $\geq 500$  小时，C<sub>1</sub> 产物法拉第效率  $\geq 90\%$ ；构建电驱动 CO<sub>2</sub> 还原电解堆，建成针对燃煤烟气（CO<sub>2</sub> 纯度为 10% 以上）工业气源的 CO<sub>2</sub> 捕集与电驱动转化系统集成中试装置，CO<sub>2</sub> 处理量  $\geq 10$  公斤/小时，C<sub>1</sub> 产物选择性  $\geq 70\%$ ，连续运行  $\geq 500$  小时。

关键词：电驱动，CO<sub>2</sub> 还原，气体燃料，电解堆，中试装置

### 3.8 规模化 CO<sub>2</sub> 微藻捕集利用关键技术（共性关键技术类）

研究内容：研制基于气液固多相强化传输的高效低成本光合微藻固碳反应器；选育适应典型区域生境高效抗逆固碳微藻良种，研究微藻固碳及抗逆分子机制；研发培育固碳优良微藻品种（ $\geq 2$  种）、微藻固碳反应器批量制造技术和控制系统；开

发适应含  $\text{SO}_x/\text{NO}_x$  或  $\text{H}_2\text{S}/\text{NH}_3$  等杂质的烟气高浓度  $\text{CO}_2$  高效节能节水型微藻固定技术，进行技术经济和碳足迹分析；开发典型区域环境的规模化微藻固碳成套工艺并开展工业验证。

考核指标：光合微藻固碳反应器的每亩固碳量较传统开放跑道池提高到 5 倍以上（达到  $>70 \text{ g-CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ），反应器单程固定  $\text{CO}_2$  效率  $>70\%$ ，单位固碳量能耗降低 30%（达到  $<1.5$  度电/ $\text{kg-CO}_2$ ），水耗降低 30%（达到  $<140 \text{ kg 水/kg-CO}_2$ ）；开展  $\geq 5$  个典型区域环境的微藻固碳工业验证，示范工程连续一周微藻固定烟气  $\text{CO}_2$  速率达到  $0.2 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，单个典型区域环境的微藻固定  $\text{CO}_2$  能力  $\geq 1000$  吨/年，累计微藻固定  $\text{CO}_2$  能力达到 4 万吨/年。

关键词：微藻固碳，光合反应器，抗逆良种，节能节水