

国家自然科学基金委员会《“双碳”基础研究指导纲要》

2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和（以下简称“双碳”），是我国的重大战略决策。实施“双碳”战略是破解资源环境约束、实现高质量可持续发展的必由之路，也是应对世界大变局、构建人类命运共同体、促进人与自然和谐共生的必然选择。

实现“双碳”目标，需要变革传统的经济社会发展模式，促进能源结构和经济结构的转型升级；需要转变发展理念，立足国情，先立后破，稳中求进，科学理性，依靠科技进步，稳步建立经济社会绿色发展的新格局。

实施“双碳”战略，将引发广泛而深刻的系统变革，在最大化发展和最小化排放两个临界点之间实现各要素全方位平衡和协调；需要处理好发展和减排、整体和局部、长远目标和短期目标、政府和市场四个基本关系；需要厘清气候-生态系统、能源结构、产业结构、科技发展和社会经济等多要素互动的复杂网络关系，优化“双碳”战略布局，重塑自然-社会-经济系统的相互关系，提高“双碳”目标与经济社会发展目标的协调优化能力。

实施“双碳”战略，迫切需要自然科学、技术、人文社会科学的综合支撑。其中，当前面临的基础科学挑战与关键技术瓶颈主要体现在图1所示的六个方面：具有顶层战略意义的“双碳”路径选择和优化；支撑顶层战略的政策与管理体系构建；支撑战略决策和行动计划科学原理与科学数据；具有核心地位的能源结构重塑；基于新型能源体系的产业结构重构；适应能源结构转型和产业结构调整生态环境优化。

为应对以上挑战，国家自然科学基金委员会在前期布局的基础上，特制定《“双碳”基础研究指导纲要》，旨在加强上述六方面的基础研究（图1），为优化完善“双碳”战略路径、全面实现“双碳”战略目标提供基础性、前瞻性和引领性的科技支撑。

《“双碳”基础研究指导纲要》是国家自然科学基金委员会组织相关领域专家进行广泛调研、深入研讨完成的，旨在统筹全委前期和未来的资助布局，引导各科学部深入凝练关键科学问题，科学遴选优先资助方向，着力促进多学科交叉和研究范式变革，为今后的项目资助提供方向性指导。该指导纲要也可能会随着环境目标的推进和技术路径的发展有所变化和调整。

一、“双碳”战略路径选择

总体目标：

围绕“双碳”目标与经济社会协同发展的路径选择和优化等关键科学问题，建立健全全球-全国-区域-地方多层次经济社会复杂系统战略路径选择的理论与方法体系，提升随时可根据技术和资源可及性科学优化“双碳”战略路径的能力。

重点领域与优先方向：

（1）全球视野下的“双碳”目标与路径措施：国际应对全球气候变化挑战的最佳路径；因地制宜的、与产业结构相协调的“双碳”现实路径分析等。

（2）现有能源结构、科技和经济社会背景下的潜在路径：实现“双碳”目标的各主要路径的碳足迹、碳成本、碳效应评价模型构建；高碳领域的低碳发展路径；低碳领域碳排放近零发展路径；固碳端负碳化发展路径；多路径耦合的储能技术路径量化调控研究等。

(3) “双碳”目标变革性技术与发展路径：面向“双碳”目标的现实综合路径；新型能源体系构建路径；新能源高效安全利用的变革性技术路径；各种先进储能技术的基础研究及技术比较等。

(4) “双碳”路径预测与动态优化：“双碳”路径新研究范式的构建；多层次多要素相互作用复杂网络构建；预测系统与路径动态优化研究。

二、“双碳”政策与管理

总体目标：

围绕实现碳中和的成本、效益、风险及激励约束机制等关键科学问题，研究不同“双碳”战略路径下优化经济社会发展和社会保障国家安全的政策与管理体系，探索贯彻人类命运共同体理念的全球气候治理机制，提升基础治理能力。

重点领域与优先方向：

(1) 综合影响评估与数值模拟：碳排放与社会经济互馈机理；碳减排的社会经济影响评估；极端气候和天气事件的社会经济影响评估；面向构建人类命运共同体的气候-经济复杂系统综合评估建模及数值模拟等。

(2) 碳中和经济政策与管理：碳社会成本评估；碳定价及监管机制设计；碳减排产业组织；绿色金融激励机制；宏观经济周期与碳减排协同管理；碳减排中的社会公正等。

(3) 碳中和技术政策与管理：碳移除技术政策；商业模式与监管机制；颠覆性能源技术政策；碳中和技术标准和管理等。

(4) 碳中和实施方案设计：区域协同减排方案与激励机制；重点行业协同减排方案与激励机制；二氧化碳和非二氧化碳协同减排方案；碳减排与保障经济社会安全协同等。

(5) 气候适应策略研究：气候适应能力评估和宏观策略；企业和居民适应行为及策略；气候适应技术与政策管理等。

(6) 气候治理：构建人类命运共同体的全球气候治理机制；国际碳泄露评估及对策；国际气候治理与合作；国际低碳技术和资金政策；碳中和法律法规体系建设等。

三、科学原理与数据

总体目标：

围绕气候变化与碳循环的互馈机制及气候变化的敏感度等关键科学问题，构建“可测量、可报告、可核查”的“双碳”观测与数据系统，发展新一代地球系统模式，实现碳排放空间的准确预估，为“双碳”战略路径的选择和优化提供支撑。

重点领域与优先方向：

(1) “双碳”背景与气候变化：气候变化的敏感度；气候弹性与阈值；碳中和措施的气候效应；“双碳”路径对未来气候的影响等。

(2) 碳循环及其与气候变化的互馈：自然碳汇的形成与维持机制；碳循环与气候变化的互馈机理；不同温室气体的协同效应；不同温控目标的排放空间评估等。

(3) 新一代地球系统模式：基于多层次复杂结构网络的新一代全球及区域地球系统模式关键子系统研发；数据同化方法与相关技术研发；通用支撑技术研发等。

(4) 观测与数据：陆地碳循环参数立体化观测；海洋和近海碳循环参数立体化观测；温室气体观测与反演；排放因子数据库及高分辨率排放清单等。

四、能源结构重塑

总体目标：

围绕清洁低碳安全高效能源体系的构建和优化等关键科学问题，突破可再生能源规模发展、核电安全高效利用、智能电网调控、各类储能等关键技术背后的基础科学瓶颈，研发支持可再生能源发展的能量储存和转换特性的材料与器件，支撑从化石能源为主向可再生能源为主的能源结构转型。

重点领域与优先方向：

(1) 可再生能源的高效利用：光伏、风电等清洁能源高效生产及大规模并网构建的理论与技术；储能、电网智能高效调控体系构建；多能互补模块化体系构建；多能多附加值利用原理；地热资源高效利用原理等。

(2) 核电共性关键技术：低品位核资源开采理论与技术；高性价比核安全体系构建；利用可控高反应性快中子干式核嬗变-增殖-产能的可调燃烧机制；核燃料全闭环循环体系构建；抗快中子辐照材料研制；可控热核聚变机制；高效热发电原理等。

(3) 氢能等二次能源与低碳化工协同体系构建：化石能源低碳高效制氢原理；氢能“制储输用”一体化产业体系构建及关键材料研制；高效经济的氢燃料电池的过程机理；高值流程制造业体系构建等。

(4) 电网调控及储能配套理论：水力智能电网调控原理；水电快速启动、经济长寿固定电池机理；间歇性可再生能源智慧调配机制；电热氢多源储能系统构建理论；新型电力系统实现途径等。

(5) 移动储能电源及交通应用：移动电池的高效安全利用原理；锂资源高效开采理论；高效储能材料研制；高效相变储热材料研制等。

(6) 能源资源综合开发与固碳：陆相油气等能源资源高效勘探开发原理；煤炭清洁化利用机制；二氧化碳高效驱油机制；地质碳捕获与碳封存原理；水电资源综合开发原理等。

(7) 碳中和能源结构动态优化：重大变革性技术预判；能源革命关键技术评估；转型风险评估与关键环节优化等。

五、产业结构重构

总体目标：

围绕碳氢氧化学键重构、工艺过程与系统、材料结构调控、电气化流程、智能化管控等关键科学问题，以绿色碳科学理念及多层次、多尺度研究范式，探索石化、冶金、建材、交通等产业的全生命周期碳减排机制与转型路径，实现基于未来能源结构和供给方式的产业重构与技术突破。

重点领域与优先方向：

(1) 低碳流程工业：低碳化学化工过程耦合机制；绿氢炼化流程调控机制；碳基资源催化转化机理；电化零碳负碳机制；全废钢电炉流程高效能与品质耦合原理；低碳流程再造的物化原理与调控机制等。

(2) 低碳建筑体系：碳酸盐分解耦合原位还原机制；绿氢及生物质燃料替代过程机制；冶金废渣利用机理；柔性智能碳中和建筑设计与运行维护机制等。

(3) 绿色交通体系：车辆体系能效提升与减排策略；新能源汽车关键材料与系统优化机制；基于交通大数据的运输结构优化机制等。

(4) 产业低碳转型路径：产业低碳转型新技术路径选择策略；氢基流程与电气化流程变革路径；智能控制与资源循环利用的全产业生态系统等。

(5) 碳化工与碳利用：基于绿色合成理念的人工光合作用机制；二氧化碳化工转化途径机制；生物质碳氧结构联用高效定向转化；熔盐电解耦合固碳机制等。

(6) 低碳工业智能化：大数据和机理分析相结合的工业碳排放智能预测与溯源；生产全流程智能低碳运行控制机制；工业低碳制造的协同优化机制；重大耗能设备智能低碳运行控制机制等。

六、生态环境优化

总体目标：

围绕“双碳”目标、生态环境和人类健康的互馈机制等关键科学问题，研究生态系统碳汇巩固和提升的科学原理及适应能源和产业结构变化的生态环境优化措施，评估“双碳”目标下的生态环境污染治理成效、生物安全、生物多样性和人群健康效益等。

重点领域与优先方向：

(1) 陆地生态系统碳汇精准计算及预测：陆地生态系统（森林、草地、农田、灌丛）全组分碳源汇的精准评估与比较；人为管理措施下和气候变化背景下陆地生态系统碳汇潜力评估等。

(2) 陆海生态系统碳汇稳固：生态系统碳汇的稳定性及维持机制；生态系统碳循环动态过程与驱动机制；国家自然保护地体系的碳汇功能；生物多样性保护与碳汇巩固协同的理论与技术原理等。

(3) 陆海生态系统碳汇提升：生物和生态系统碳捕获、利用与封存前沿技术；区域生态工程增汇原理与效应；生态工程增汇技术的模式系统集成；生态工程增汇效益及区域示范；碳汇国土空间管理的科学基础等。

(4) 治污增碳和减污降碳协同：固碳减污微生物分子机制及应用设计；农业“双减”与“双碳”关系；农业种植系统减排增汇与粮食安全；海洋污染防治与蓝碳增汇原理与技术；城市污染防治与降碳增汇等。

(5) “双碳”目标与生物安全：植物高效光合固碳机制与分子设计；新型高光效生物碳捕获与利用；生物入侵和迁移与碳汇；有害生物流行与碳汇；“双碳”目标下的生物安全评估等。

(6) “双碳”目标与人类健康：碳中和与人类健康收益及潜在风险；碳中和行动的新型污染物的健康危害；人群病原生物流行的监测及健康风险预警评估；极端气候变化与人类健康风险等。

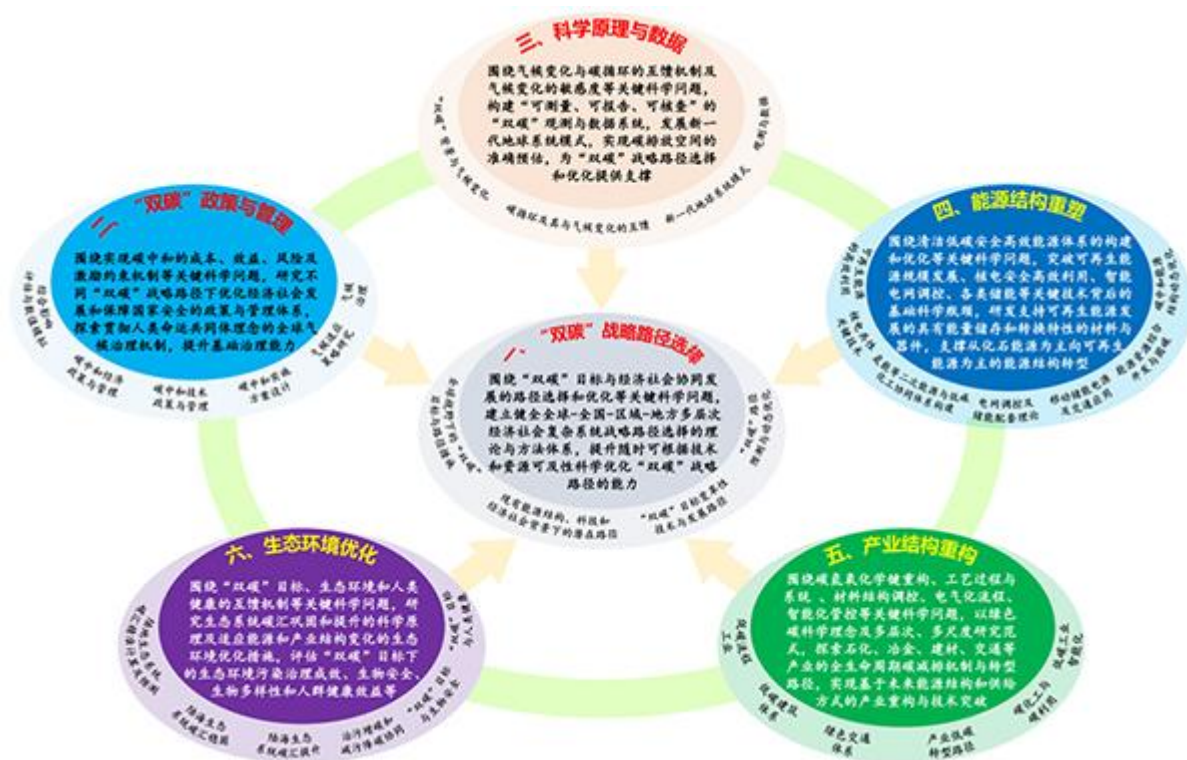


图1 《“双碳”基础研究指导纲要》重点研究方向概览

在“双碳”目标约束下，实现发展与减排、整体与局部、长远目标与短期措施、政府与市场等多层次复杂网络系统的优化与调控

国家自然科学基金委员会《“双碳”基础研究指导纲要》

日期 2022-07-18 来源： 作者： 【大 中 小】 【打印】 【关闭】

2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和（以下简称“双碳”），是我国的重大战略决策。实施“双碳”战略是破解资源环境约束、实现高质量可持续发展的必由之路，也是应对世界大变局、构建人类命运共同体、促进人与自然和谐共生的必然选择。

实现“双碳”目标，需要变革传统的经济社会发展模式，促进能源结构和经济结构的转型升级；需要转变发展理念，立足国情，先立后破，稳中求进，科学理性，依靠科技进步，稳步建立经济社会绿色发展的新格局。

实施“双碳”战略，将引发广泛而深刻的系统变革，在最大化发展和最小化排放两个临界点之间实现各要素全方位平衡和协调；需要处理好发展和减排、整体和局部、长远目标和短期目标、政府和市场四个基本关系；需要厘清气候-生态系统、能源结构、产业结构、科技发展和社会经济等多要素互动的复杂网络关系，优化“双碳”战略布局，重塑自然-社会-经济系统的相互关系，提高“双碳”目标与经济社会发展目标的协调优化能力。

实施“双碳”战略，迫切需要自然科学、技术、人文社会科学综合支撑。其中，当前面临的基础科学挑战与关键技术瓶颈主要体现在图 1 所示的六个方面：具有顶层战略意义的“双碳”路径选择和优化；支撑顶层战略的政策与管理体系构建；支撑战略决策和行动计划科学原理与科学数据；具有核心地位的能源结构重塑；基于新型能源体系的产业结构重构；适应能源结构转型和产业结构调整生态环境优化。

为应对以上挑战，国家自然科学基金委员会在前期布局的基础上，特制定《“双碳”基础研究指导纲要》，旨在加强上述六方面的基础研究（图 1），为优化完善“双碳”战略路径、全面实现“双碳”战略目标提供基础性、前瞻性和引领性的科技支撑。

《“双碳”基础研究指导纲要》是国家自然科学基金委员会组织相关领域专家进行广泛调研、深入研讨完成的，旨在统筹全委前期和未来的资助布局，引导各科学部深入凝练关键科学问题，科学遴选优先资助方向，着力促进多学科交叉和研究范式变革，为今后的项目资助提供方向性指导。该指导纲要也可能会随着环境目标的推进和技术路径的发展有所变化和调整。

一、“双碳”战略路径选择

总体目标：

围绕“双碳”目标与经济社会协同发展的路径选择和优化等关键科学问题，建立健全全球-全国-区域-地方多层次经济社会复杂系统战略路径选择的理论与方法体系，提升随时可根据技术和资源可及性科学优化“双碳”战略路径的能力。

重点领域与优先方向：

（1）全球视野下的“双碳”目标与路径措施：国际应对全球气候变化挑战的最佳路径；因地制宜的、与产业结构相协调的“双碳”现实路径分析等。

（2）现有能源结构、科技和经济社会背景下的潜在路径：实现“双碳”目标的主要路径的碳足迹、碳成本与碳效应评价模型构建；高碳领域的低碳发展路径；低碳领域碳排近零发展路径；固碳端负碳化发展路径；多路径耦合的储能技术路径量化调控研究等。

（3）“双碳”目标变革性技术与发展路径：面向“双碳”目标的现实综合路径；新型能源体系构建路径；新能源高效安全利用的变革性技术路径；各种先进储能技术的基础研究及技术比较等。

（4）“双碳”路径预测与动态优化：“双碳”路径新研究范式的构建；多层次多要素相互作用复杂网络构建；预测系统与路径动态优化研究。

二、“双碳”政策与管理

总体目标：

围绕实现碳中和的成本、效益、风险及激励约束机制等关键科学问题，研究不同“双碳”战略路径下优化经济社会发展与保障国家安全的政策与管理体系，探索贯彻人类命运共同体理念的全球气候治理机制，提升基础治理能力。

重点领域与优先方向：

(1) 综合影响评估与数值模拟：碳排放与社会经济互馈机理；碳减排的社会经济影响评估；极端气候和天气事件的社会经济影响评估；面向构建人类命运共同体的气候-经济复杂系统综合评估建模及数值模拟等。

(2) 碳中和经济政策与管理：碳社会成本评估；碳定价及监管机制设计；碳减排产业组织；绿色金融激励机制；宏观经济周期与碳减排协同管理；碳减排中的社会公正等。

(3) 碳中和技术政策与管理：碳移除技术政策；商业模式与监管机制；颠覆性能源技术政策；碳中和技术标准 and 规范管理等。

(4) 碳中和实施方案设计：区域协同减排方案与激励机制；重点行业协同减排方案与激励机制；二氧化碳和非二氧化碳协同减排方案；碳减排与保障经济社会安全协同等。

(5) 气候适应策略研究：气候适应能力评估和宏观策略；企业和居民适应行为及策略；气候适应技术与政策管理等。

(6) 气候治理：构建人类命运共同体的全球气候治理机制；国际碳泄露评估及对策；国际气候治理与合作；国际低碳技术和资金政策；碳中和法律法规体系建设等。

三、科学原理与数据

总体目标：

围绕气候变化与碳循环的互馈机制及气候变化的敏感度等关键科学问题，构建“可测量、可报告、可核查”的“双碳”观测与数据系统，发展新一代地球系统模式，实现碳排放空间的准确预估，为“双碳”战略路径的选择和优化提供支撑。

重点领域与优先方向：

(1) “双碳”背景与气候变化：气候变化的敏感度；气候弹性与阈值；碳中和措施的气候效应；“双碳”路径对未来气候的影响等。

(2) 碳循环及其与气候变化的互馈：自然碳汇的形成与维持机制；碳循环与气候变化的互馈机理；不同温室气体的协同效应；不同温控目标的排放空间评估等。

(3) 新一代地球系统模式：基于多层次复杂结构网络的新一代全球及区域地球系统模式关键子系统研发；数据同化方法与相关技术研发；通用支撑技术研发等。

(4) 观测与数据：陆地碳循环参数立体化观测；海洋和近海碳循环参数立体化观测；温室气体观测与反演；排放因子数据库及高分辨率排放清单等。

四、能源结构重塑

总体目标：

围绕清洁低碳安全高效能源体系的构建和优化等关键科学问题，突破可再生能源规模发展、核电安全高效利用、智能电网调控、各类储能等关键技术背后的基础科学瓶颈，研发支持可再生能源发展的能量储存和转换特性的材料与器件，支撑从化石能源为主向可再生能源为主的能源结构转型。

重点领域与优先方向：

(1) 可再生能源的高效利用：光伏、风电等清洁能源高效生产及大规模并网构建的理论与技术；储、电网智能高效调控体系构建；多能互补模块化体系构建；多能多附加值利用原理；地热资源高效利用原理等。

(2) 核电共性关键技术：低品位核资源开采理论与技术；高性价比核安全体系构建；利用可控高反应性快中子干式核嬗变-增殖-产能的可调燃烧机制；核燃料全闭环循环体系构建；抗快中子辐照材料研制；可控热核聚变机制；高效热发电原理等。

(3) 氢能等二次能源与低碳化工协同体系构建：化石能源低碳高效制氢原理；氢能“制储输用”一体化产业体系构建及关键材料研制；高效经济的氢燃料电池的过程机理；高值流程制造业体系构建等。

(4) 电网调控及储能配套理论：水力智能电网调控原理；水电快速启动、经济长寿固定电池机理；间歇性可再生能源智慧调配机制；电热氢多源储能系统构建理论；新型电力系统实现途径等。

(5) 移动储能电源及交通应用：移动电池的高效安全利用原理；锂资源高效开采理论；高效储能材料研制；高效相变储热材料研制等。

(6) 能源资源综合开发与固碳：陆相油气等能源资源高效勘探开发原理；煤炭清洁化利用机制；二氧化碳高效驱油机制；地质碳捕获与碳封存原理；水电资源综合开发原理等。

(7) 碳中和能源结构动态优化：重大变革性技术预判；能源革命关键技术评估；转型风险评估与关键环节优化等。

五、产业结构重构

总体目标：

围绕碳氢氧化学键重构、工艺过程与系统、材料结构调控、电气化流程、智能化管控等关键科学问题，以绿色低碳科学理念及多层次、多尺度研究范式，探索石化、冶金、建材、交通等产业的全生命周期碳减排机制与转型路径，实现基于未来能源结构和供给方式的产业重构与技术突破。

重点领域与优先方向：

(1) 低碳流程工业：低碳化学化工过程耦合机制；绿氢炼化流程调控机制；碳基资源催化转化机理；电化学零碳负碳机制；全废钢电炉流程高效能与品质耦合原理；低碳流程再造的物化原理与调控机制等。

(2) 低碳建筑体系：碳酸盐分解耦合原位还原机制；绿氢及生物质燃料替代过程机制；冶金废渣利用机理；柔性智能碳中和建筑设计与运行维护机制等。

(3) 绿色交通体系：车辆体系能效提升与减排策略；新能源汽车关键材料与系统优化机制；基于交通大数据的运输结构优化机制等。

(4) 产业低碳转型路径：产业低碳转型新技术路径选择策略；氢基流程与电气化流程变革路径；智能控制与资源循环利用的全产业生态系统等。

(5) 碳化工与碳利用：基于绿色合成理念的人工光合作用机制；二氧化碳化工转化途径机制；生物质碳氧结构联用高效定向转化；熔盐电解耦合固碳机制等。

(6) 低碳工业智能化：大数据和机理分析相结合的工业碳排放智能预测与溯源；生产全流程智能低碳运行控制机制；工业低碳制造的协同优化机制；重大耗能设备智能低碳运行控制机制等。

六、生态环境优化

总体目标：

围绕“双碳”目标、生态环境和人类健康的互馈机制等关键科学问题，研究生态系统碳汇巩固和提升的科学原理及适应能源和产业结构变化的生态环境优化措施，评估“双碳”目标下的生态环境污染治理成效、生物安全、生物多样性和人群健康效益等。

重点领域与优先方向：

(1) 陆地生态系统碳汇精准计算及预测：陆地生态系统（森林、草地、农田、灌丛）全组分碳源汇的精准评估与比较；人为管理措施下和气候变化背景下陆地生态系统碳汇潜力评估等。

(2) 陆海生态系统碳汇稳固：生态系统碳汇的稳定性及维持机制；生态系统碳循环动态过程与驱动机制；国家自然保护地体系的碳汇功能；生物多样性保护与碳汇巩固协同的理论与技术原理等。

(3) 陆海生态系统碳汇提升：生物和生态系统碳捕获、利用与封存前沿技术；区域生态工程增汇原理与效应；生态工程增汇技术的模式系统集成；生态工程增汇效益及区域示范；碳汇国土空间管理的科学基础等。

(4) 治污增碳和减污降碳协同：固碳减污微生物分子机制及应用设计；农业“双减”与“双碳”关系；农业种植系统减排增汇与粮食安全；海洋污染防治与蓝碳增汇原理与技术；城市污染防治与降碳增汇等。

(5) “双碳”目标与生物安全：植物高效光合固碳机制与分子设计；新型高光效生物碳捕获与利用；生物入侵和迁移与碳汇；有害生物流行与碳汇；“双碳”目标下的生物安全评估等。

(6) “双碳”目标与人类健康：碳中和与人类健康收益及潜在风险；碳中和行动的新型污染物的健康危害；人群病原生物流行的监测及健康风险预警评估；极端气候变化与人类健康风险等。

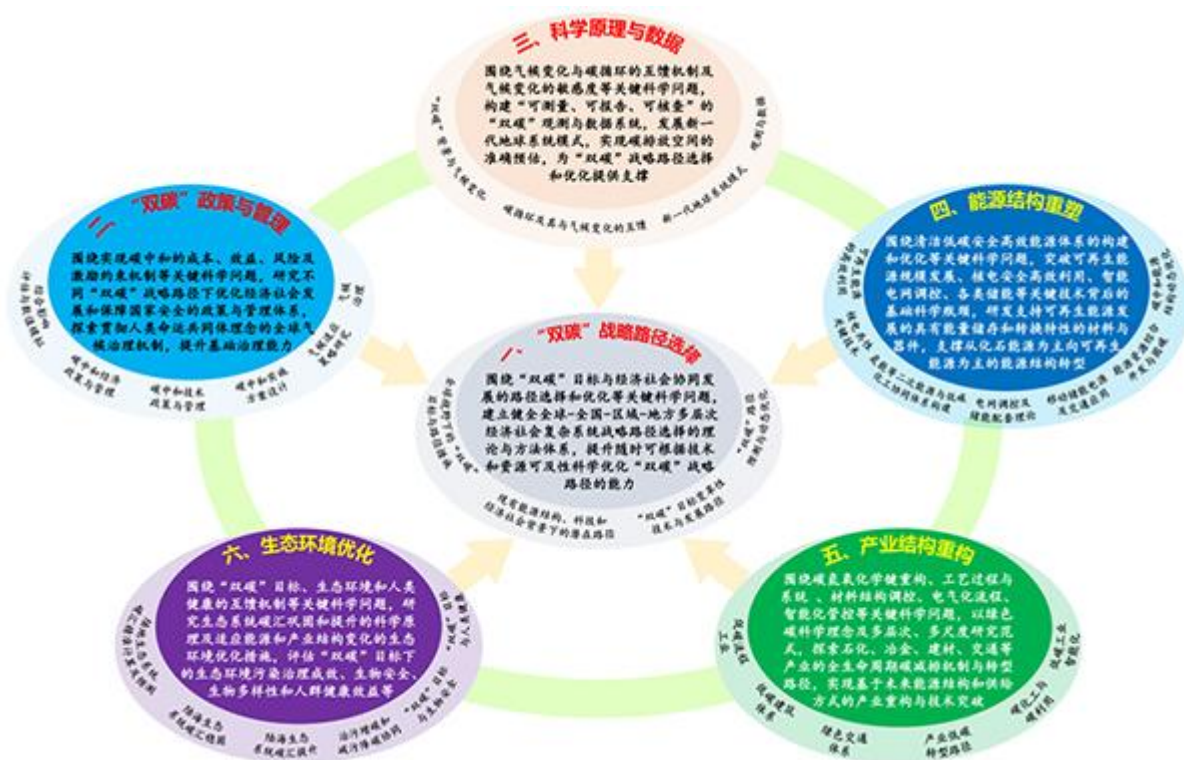


图1 《“双碳”基础研究指导纲要》重点研究方向概览

在“双碳”目标约束下，实现发展与减排、整体与局部、长远目标与短期措施、政府与市场等多层次复杂网络系统的优化与调控