

# “大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项

## 2023 年度项目申报指南

(征求意见稿)

本专项面向持续改善我国生态环境和建设“美丽中国”的重大需求，瞄准大气 PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 污染和土壤/地下水复合污染的科技前沿，聚焦精准治污、科学治污和依法治污，阐明多污染物多尺度跨介质的污染成因，创新大气、土壤与地下水污染防治核心技术与装备，构建多学科跨行业精细化治理技术体系和产业化新模式，创建 PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 双降及碳达峰示范区和污染场地土壤与地下水协同治理示范区，支撑“十四五”期间大气、土壤污染防治两大行动计划，为基本消除重污染天气、实现大气 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 协同控制和全面提升土壤与地下水安全利用水平提供关键科技支撑。

专项拟解决两个基础科学问题：大气二次污染和区域土壤/地下水多介质污染的形成机理及气水土污染的相互影响，提出区域污染防治的路线图和技术途径；突破五大核心防治技术：多要素立体监测预警、污染源实时智能监管、大气污染全流程高效协同治理、土壤复合污染绿色修复、“能源-环境-健康-气候”综合调控等共性技术，构建多学科跨行业精细化治理技术体系；建立三大类集成示范区：PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 双降及碳达峰示范区、污染场地土壤与地下水协同治理示范区、大气与土壤-地下水污染协同综合治理示范区，形成气候友善型区域多污染物跨行业高效治理的“中国模式”。

本专项执行期为 2022—2026 年，按照分步实施、重点突出原则，2023 年指南拟在监测监管技术、成因机理研究、治理修复技术、决策支撑技术和典型区域实践等 5 个方面部署 6 个研究任务，其中青年科学家项目 16 项。

本专项指南（青年科学家项目除外）要求以项目为单元整体组织申报，需覆盖所申报指南方向二级标题（例如 1.1）下的所有研究内容和考核指标，项目实施周期为 3~4 年。企业作为项目牵头申报单位，其他经费（包括地方财政经费、单位出资及社会渠道资金等）与中央财政经费比例不低于 2:1。治理修复类项目（3 治理修复部分），其他经费（同上）与中央财政经费比例不低于 1:1。区域示范类项目（5 典型区域实践部分），其他经费（同上）与中央财政经费比例不低于 3:1。指南各方向拟支持项目数原则为 1 项（有特殊说明的除外），若同一指南方向下采取不同技术路线，评审结果相近，可以择优同时支持 2 项，根据中期评估结果择优再继续支持。除特殊要求外，每个项目下设课题数不超过 5 个，参与单位数不超过 10 个。

青年科学家项目要求由青年科学家作为项目负责人领衔担纲，覆盖指南中 1 项内容即可，项目实施周期为 3 年，项目不下设课题，参加单位原则不超过 3 家，项目负责人年龄要求，男性应为 1985 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1983 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。

本专项 2023 年度项目申报指南如下。

## 1. 监测监管技术

### 1.1 机载多污染物与云水化学高灵敏探测技术

**研究内容：**针对高空（对流层）大气活性污染物和云水污染过程，突破亚硝酸（HONO）、甲醛（HCHO）、挥发性有机物（VOCs）、颗粒相水溶性无机离子和有机污染物机载原位测量技术，研发离线颗粒物、挥发性有机物和云水多通道采集技术及相应配套的地面高化学分辨率分析方法，建立适航的大气细颗粒物和云滴粒径分布快速在线测量技术，建立区域甲醛等污染性气体高时空分辨机载遥感技术系统，构建污染物源排放-传输-转化的航测飞行系统化方案与定量运算技术方法，集成现有航测技术，构建多污染物与云水综合观测技术体系和机载软硬件集成平台，在重点区域开展技术应用与示范，形成对流层大气与云物理化学航测技术体系。

**考核指标：**机载测量技术和集成平台可适应于 0.7-1.0 大气压和航速 150-400 km/h，并有效支撑区域污染-云水相互作用机制研究。主要大气活性含氮含碳组分机载原位测量时间分辨率达到秒级，测量精度优于 10%，HONO 和 HCHO 检测限 < 10 ppt、VOCs 检测化学成分 100 种以上、主要成分检测限 < 100 ppt，颗粒水溶性离子检测限 < 0.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。离线颗粒物和云水采集自动切换通道 > 5、VOCs > 10，采样时间  $\leq 30$  秒；气溶胶粒径测量范围 10 nm – 10  $\mu\text{m}$ ，粒径通道数 > 30 个，数浓度检测限优于  $5 \times 10^3$  个/ $\text{cm}^3$ ；云水采样量、频次和化学

典型组份(各类含硫含氯酸根离子、生物质有机物特征离子、金属离子等)实现层云分层原位同步在线测量。机载遥感甲醛及含氮化合物观测,地面分辨率 $\leq 10$ 米,测量精度优于10%。测量典型区域不少于3个,飞行航次不少于15次,形成技术规范。

**关键词:** 机载高灵敏探测; 活性污染物; 云微物理与化学。

## 1.2 长寿命大气污染物监测关键技术与装备

**研究内容:** 针对长寿命大气污染物定点溯源和时空立体分布监测要求,建立适于不同环境条件监测需求的质控技术体系;攻克长寿命污染物高灵敏检测技术和粒子相实时进样在线监测的关键技术,研制长寿命污染物气/粒两相分布实时在线监测设备;突破长寿命污染物大气廓线和柱浓度地基遥感装备和反演算法,研发空间分布快速监测和污染溯源系统装备;选择重点区域、典型场景开展不同环境条件监测工程应用示范,形成具有自主知识产权的长寿命大气污染物高精度监测技术体系。

**考核指标:** 长寿命有机污染物(多环芳烃 PAHs, 邻苯二甲酸酯 PAEs, 多氯联苯 PCBs 等)气相检测限优于1 pptv,粒子相检测限优于1 ng/m<sup>3</sup>,最快响应时间 $\leq 1$  s,可检测的最大分子量510 amu,走航快测装备对气相长寿命有机物检测限优于10 pptv;整层大气廓线垂直分辨率优于5 km,廓线遥感组

分包括一氧化碳(CO)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、乙烷(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)、氰化氢(HCN)、氟利昂-11(CCl<sub>3</sub>F)、氟利昂-22(CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)、氟利昂-12(CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)和羰基硫 OCS 等，其中 CH<sub>4</sub>精度优于 0.5%，其他优于 5%；在不少于 3 类典型环境（背景大气、城市环境、典型农业源）开展应用示范。核心技术自主化率 90%以上，并形成相应的技术规范。

**关键词：**长寿命大气污染气体；实时立体监测；廓线遥感。

### 1.3 化学气候综合站关键监测技术与装备

**研究内容：**针对化学气候站大气组分高精度通量和垂直廓线等在线监测需求，重点突破影响气候的大气化学组分（CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>）、活性污染物（HCHO 和 HONO 等）和水汽高分辨率垂直廓线的固定和流动探测技术，以及 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、HCHO、HONO、三维风速（湍流）等高频地气交换通量（包括排放和沉降通量）测量以及光解速率和雾滴谱快速测量技术；形成自主可控的高精度化学气候站多参数综合探测技术系统，选择典型区域开展技术应用示范。

**考核指标：**CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/CH<sub>4</sub> 通量探测频率优于 50Hz，10Hz 下检测限 CO<sub>2</sub>≤0.1ppm、H<sub>2</sub>O≤4ppm，CH<sub>4</sub>≤5ppb。HCHO 和 HONO 垂直分辨率≤100 m，时间分辨率≤10min，HCHO 检测限≤200 ppt，HONO 检测限≤15ppt。CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/CH<sub>4</sub> 廓线反演误差≤7%，时间

分辨率 $\leq 2\text{min}$ 。光解速率探测  $J(\text{O}^1\text{D})$ 、 $J(\text{NO}_2)$ 、 $J(\text{HCHO})$ 、 $J(\text{HONO})$ 、 $J(\text{H}_2\text{O}_2)$ ，反演误差 $\leq 10\%$ 。超声风速测量频率达  $100\text{Hz}$ ，实现自主可控，误差不高于国际同类设备；雾滴谱粒径测量范围  $2\sim 50\ \mu\text{m}$ ，粒径通道数 $\geq 30$ ，时间分辨率 $\leq 0.1$  秒。叶绿素荧光探测光谱范围  $650\text{-}800\ \text{nm}$ ，反演误差 $\leq 10\%$ 。集成高精度化学气候站多参数综合探测技术系统，实现影响气候变化的气态化学组分和颗粒化学组份种类在线测量覆盖  $95\%$  以上，地气交换通量测量准确度超  $75\%$ 。核心技术自主化率  $90\%$  以上，并形成相应的技术规范。

**关键词：**高频通量；廓线监测；化学气候站综合探测技术。

#### 1.4 移动源超低排放实时监测监管技术与质控体系

**研究内容：**针对新标准下重型车、非道路移动机械、船舶、飞机等移动源超低排放污染及碳排放在线监测及质控体系的需求，开展移动污染源超低排放高温原位传感、在线监测、高灵敏遥测等关键技术研发。具体包括：开发柴油车高温原位颗粒物、二氧化碳传感器；研发移动源排放污染气体及颗粒物便携式高精度快速在线监测设备，构建交通环境识别高排放车的技术体系；研制船舶和飞机排放污染气体高灵敏度跟踪遥测成像设备和算法；构建监测设备的标定与质控技术体系，在重点城市、大型立交桥、港口、机场开展应用示范。

**考核指标：**高温环境下传感器峰值耐温不低于 800℃，原位颗粒物和 CO<sub>2</sub> 检测限分别优于 1 mg/m<sup>3</sup>、50 ppm，误差范围 ±6%，氨气(NH<sub>3</sub>)、SO<sub>2</sub>、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 检测限分别优于 0.1 ppm、1 ppm、0.3 ppm、10 ppm 和 1 ppm，误差范围 ±2%，颗粒物采样数浓度 (PN) 和 NO 检测限分别优于 1×10<sup>14</sup>#/kg 和 2g/kg;PN 实时监测浓度测量范围 3×10<sup>3</sup>~10<sup>7</sup>#/cm<sup>3</sup>。污染气体自动跟踪遥测距离不少于 1500 米，NH<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub> 等柱浓度检测限 10 ppm·m；醛类、苯系物等 VOCs 排放靶向遥测识别检测限 0.1 ppb。以上在线监测设备时间分辨率≤1s，核心技术自主化率 90%以上。完成包括高海拔、高低温等不同环境条件下监测设备性能测试评价；开展不少于 4 类移动源（重型车、非道路移动机械、船舶、飞机等）排放监测应用示范；形成在线测量技术规范与质控方案，建立可溯源至国家计量标准的 PN 分析仪校准技术与平台，形成至少 2 项国家测量标准或计量规范（征求意见稿）。

**关键词：**移动污染源；高温原位传感；排放智能监测。

## 1.5 大气多污染物目标观测技术与集群走航探测系统

**研究内容：**突破大气多污染物目标观测和质控技术，探索建立大气污染精准调控为对象的目标观测技术框架；突破多污染物目标观测适应不同移动载体速度走航技术，针对激光雷达、VOCs 和气溶胶质谱、在线组份分析设备，活性污染物、

OH 和 NO<sub>3</sub> 自由基等观测设备,研制相应的适合高速交通网(包括高速铁路)高精度立体探测设备和移动观测系统;研究立体走航集群探测与模式数据动态融合、基于烟羽/预报走航、数据智能分析和效果评估等预报指挥技术,形成支撑大气多污染物目标观测的集群探测系统;选择典型地区,构建集群立体走航探测指挥平台,针对千公里尺度大气污染输送过程,开展集群走航系统质控、适应性试验和目标观测技术验证。

**考核指标:** 适合高速公(铁)路网的大气多组分(细颗粒物、臭氧及其前体物)及气象要素的高精度探测技术,探测时间分辨率小于 5 分钟,工作环境适应-10°C~40°C,水平分辨率小于 100 米,垂直空间分辨率小于 15 米,单目标污染物时间分辨率小于 1 分钟。系统实现跨平台组网和观测数据融合,至少包括 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub>、苯、甲苯、VOCs、活性污染物、OH 和 NO<sub>3</sub> 自由基等大气污染多要素目标观测的技术体系和数据融合方法,时间分辨率小于 5 分钟;目标观测技术支撑空气质量模式组分预报准确率提高 20%以上;集群立体走航指挥平台至少指挥 25 辆以上走航车,并可协同指挥走航船、火车或无人机群,实现支撑烟羽追踪的科学研究与污染过程的精细调控,满足评判 NO<sub>x</sub>/VOCs 控制方案减排效果需求。

**关键词:** 智能走航探测;区域尺度;目标观测方法体系。

## 1.6 多尺度近实时排放清单技术及数据产品研发



**研究内容:**突破基于立体移动和定位观测平台的排放通量探测和网格化排放反演技术,研发近实时源汇一体化反演技术及数据产品;研发融合在线监测、交通流量、船舶定位 AIS 轨迹、卫星遥感等多源大数据的自然源(沙尘、海盐和植被排放等)和人为污染源排放实时追踪、质控、多元校验技术、自然与人为活动水平短临预测技术,实现各类源排放准实时表征和未来 14 天的短临预估;研发排放多时间尺度无缝表征算法,构建近实时排放清单在线技术平台,研发适用于大气环境形势分析、不同时空尺度大气污染溯源、空气质量短中期预测等场景的排放清单近实时动态数据产品,并在国家到城市层面开展应用示范。

**考核指标:**近实时网格化排放通量空间分辨率达百米-千米级,误差小于 30%;全国尺度多污染物近实时源汇反演数据集,时间分辨率不低于 1 周,空间分辨率不低于 3km;针对不同类型源的排放近实时表征技术,总数不小于 5 项;近实时动态排放清单和 14 天预估清单数据产品,包括各类人为源和自然源(沙尘、海盐、植被排放等),包含 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、NH<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 等主要污染物和汞、砷、铅等重金属,VOCs 和颗粒物化学组分(含汞、砷、铅等重金属)满足主流大气化学模式需求,时间尺度实现年-月-日-小时无缝衔接,覆盖时段不小于三年,空间尺度实现全国-区域-城市-园区四层嵌套,分辨率全国不低于 3km、城市不低于 1km,并可根据自适应网格

动态调整空间分辨率；数据产品在国家平台和不少于 4 个区域/城市工作实践中得到应用。

**关键词：**排放通量探测；一体化反演；近实时排放清单产品。

### 1.7 环境大气大数据耦合同化技术及智能感知共享平台

**研究内容：**围绕精准治污环境大数据集成分析与应用需求，突破多环境要素大数据质控、自治和融合技术，建立多因子约束下颗粒物组分平衡同化方法，发展卫星、雷达和地面观测数据集合卡尔曼滤波和四维变分耦合同化和垂直反演技术，构建常规污染物监测网数据、组分观测网数据以及光化学监测网数据与高分辨率模拟数据的准实时质量控制和同化综合分析系统；研发环境监测和模拟大数据的快速融合、大数据人工智能挖掘、自动感知分析和无碍共享技术，支撑建立国家环境大气智能感知共享平台，快速感知大气污染事件、重污染过程、来源成因并提出调控建议，并形成支撑我国大气污染精细化治理的综合同化数据集，选择国家业务单位开展技术验证和平台示范应用。

**考核指标：**形成我国关键大气污染物天空地多元观测数据、全空间同化融合的耦合同化分析技术，具备常规污染物、气溶胶组分、大气挥发性有机物等关键大气污染物浓度的准实时分析能力，数据空间分辨率优于 100 米，时间分辨率 $\leq 1$  小时，数

据融合的时滞性不超过 30 分钟；建成国家环境大气智能感知共享平台，对大气污染事件快速感知准确率超 90%，针对重污染生消过程，智能给出气象、排放、化学过程影响、来源成因和调控建议，更新频率小于 3 小时；省、市和科研共享单位超过 100 个，并在业务单位示范应用。

**关键词：**四维数据重构；智能感知技术；数据共享机制。

### 1.8 多尺度自适应环境大气动力学模式与再分析数据集

**研究内容：**研究自适应网格模式中大气复合污染关键理化过程的表征新方法，突破喷涌式动态排序和扩散式动态排序算法等虚拟补位技术和保形守恒耦合技术，构建适用于高分辨率模拟的尺度自适应参数化方案；突破基于大数据驱动的人工智能建模技术及排放、气象与化学过程精细实时解耦技术，构建依据不同污染状况自适应网格调整和嵌套高效算法，研制新一代多尺度自适应环境大气动力学模式；研发天空地多元数据质控与近实时迭代自适应网格模式再分析技术，形成高精度自适应多污染物多组分再分析数据集；选择在国家典型区域开展业务化应用示范。

**考核指标：**研制新一代多尺度、自适应环境大气动力学模式，实现人工智能、理化机制数值方案、多尺度集成技术的有效融合，确保安全可控，支撑环境大气预报模式的动力框架由固定网格向三维自适应网格转变。自适应网格模式实现从区

域、城市、街区、园区的自适应模拟，支撑城市-园区尺度空气质量小时日变化的智能精准业务预报和调控需求，大气细颗粒物和臭氧预报准确率提高不低于 15%；分辨率为全球达十公里、区域达一公里，街区、园区达 100 米级。形成新一代可支持个体暴露评估的多组分多污染物再分析数据集，再分析资料全国空间分辨率不低于 3 km、中东部地区不低于 1 km，时间分辨率为小时，覆盖时间不少于 5 年，数据集要素包括二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、大气细颗粒物、可吸入颗粒物、臭氧、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳和有机气溶胶。

**关键词：**多尺度环境大气预测；自适应网格预报模式；再分析数据集。

### **1.9 场地污染物模块化流动检测成套装备**

**研究内容：**针对当前我国污染场地检测与监管缺乏流动式现场监测成套装备等问题，开发污染场地多介质智能检测技术和新型感知器件，研制流动式现场快速检测设备与载具；开发面向新型检测技术和设备的精准定位与导引系统；研制可独立支持现场快速采样检测、空间数据分析与风险预判的车载式技术集成智能化装备。

**考核指标：**研发污染场地流动式现场快速检测设备，涵盖建设用地土壤污染风险管控标准中的 85 种污染物，检测限低于一类用地筛选值，超筛选值识别准确率高于 95%，检测时间

<2 小时；开发面向新型检测技术和设备的精准定位与导引系统，定位精度满足空间尺度小于 1 米；开发多模态多源数据融合技术，建立集数据交换共享、场地模拟仿真、风险预警等功能的综合管理系统，预报与仿真精度平均误差小于 20%；研制可独立支持现场快速采样检测、空间数据分析与风险预判的车载式技术集成智能化装备，并制定技术规程，由 3 个生态环境监测部门在 9 个典型污染场地开展应用示范。

**关键词：**流动式现场快速检测；车载式技术装备集成；稳定性可靠性；执法检测及监管。

### **1.10 场地污染土壤高保真采样技术及装备**

**研究内容：**针对污染场地水文地质条件复杂、空间异质性强，采样过程扰动大、样品易污染等关键难题，基于场地污染物时空分布特征和统计规律，建立多尺度、多污染物、动态化的场地污染土壤采样布点优化方法；研发多介质、高压条件下污染土壤样品的低扰动采样技术，开发土壤高保真采样成套设备，实现土壤样品空间位置精准还原与土体结构精准保存；选取典型污染场地开展应用示范。

**考核指标：**形成具备全过程质控体系的典型污染场地土壤调查布点动态优化方法，在刻画精度不变的前提下样点数量降低 >30%，并开发现场动态布点辅助决策智能化手持终端；研发场地土壤原位性状高保真采样设备，样品空间位置精度达到

1cm，土壤样品压缩率低于 3%，样品交叉污染率低于 5%；开发 VOCs 原位高保真采样设备，VOCs 采样损失率低于 5%；集成开发移动式高保真采样技术平台，其中核心元器件抗高压性能较之当前同类产品提高 >30%；选择不少于 3 个典型污染场地开展高保真取样技术及设备应用验证示范，编写相关技术规范（征求意见稿）不少于 2 项。

**关键词：**空间异质性；采样布点优化；高保真采样技术；移动式采样装备。

### **1.11 土壤与地下水 DNAPLs 精细刻画关键技术**

**研究内容：**针对化工、石油等重点行业场地土壤-地下水中重非水相液体（DNAPLs）污染物运移过程复杂、精细刻画困难等问题，发展耦合场地异质性、时空变异性和 DNAPLs 污染物多介质多界面分布特征的精细刻画技术；构建土壤-地下水中 DNAPLs 污染物迁移扩散多场耦合数值模型；自主研发土壤-地下水中 DNAPLs 精细刻画三维可视化软件系统；开展实际污染场地应用示范。

**考核指标：**研发土壤-地下水中 DNAPLs 的多介质界面迁移转化原位表征与精细刻画技术，空间分辨率达到分米级，阐明土壤-地下水系统中 DNAPLs 的固-液-气多相分配与跨介质界面迁移转化机制；构建土壤-地下水中 DNAPLs 迁移扩散多场耦合数值模型，精准模拟预测场地 DNAPLs 的传

输扩散通量，模拟误差 <30%；研发土壤-地下水中 DNAPLs 污染物精细刻画三维可视化软件系统，实现场地土壤-地下水中 DNAPLs 污染源区分布、污染羽边界和分层污染物浓度的三维动态可视化精细刻画，并选取典型污染场地开展应用示范验证，污染羽边界刻画精度小于 1 米；编制相关技术规范或指南（征求意见稿）不少于 2 项。

**关键词：**DNAPLs；污染羽边界；三维可视化软件系统。

## 2. 成因机制研究

### 2.1 大气氧化性演变规律与大气自净能力驱动机制

**研究内容：**围绕大气氧化性的科学内涵和量化表征，选择典型季节和区域，开展氢氧自由基(OH)、过氧自由基(HO<sub>2</sub>、RO<sub>2</sub>)、含氮自由基(NO<sub>3</sub>)和卤素自由基(Cl等)及前体物的精细化闭合观测，在分子水平上厘清日间和夜间大气自由基的来源与转化机制；阐明近地面、边界层和对流层大气自净能力的驱动机制，量化城市和区域大气氧化性的构成(气相和多相)、强度和关键来源；解析我国重点区域大气氧化性和大气自净能力的演变规律，提出以大气氧化性调控和自净能力提升为核心的二次污染与气候变化协同应对的化学原理。

**考核指标：**在典型区域建立不同代表性环境的大气氧化性闭环观测站 2~3 个，主要自由基(OH、HO<sub>2</sub>、RO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>

和 Cl 等) 和活性前体物测量误差小于 15%，获得冬夏等典型季节各 1 个月以上在线观测数据；建立大气复合污染条件下大气氧化性的理论模型和表征方法，典型大气自由基浓度和主要通道氧化速率等的模拟准确度提升 50%；定量解析冬夏等季节对流层和 5 类下垫面边界层大气及 10 个污染过程的大气氧化性构成和主控因子，提出针对臭氧、PM<sub>2.5</sub> 和短寿命温室气体协同的大气氧化性调控原理和技术方案。

**关键词：**大气自由基；大气氧化性；大气自净能力。

## 2.2 大气活性碳及含碳颗粒物来源、转化及环境效应

**研究内容：**针对大气活性含碳物种研究薄弱这一突出短板，研发 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧污染相关的大气有机物活性成分及其反应性和挥发性测量的新方法，开展大气有机物活性成分化学行为的闭环观测实验；研究实验室和外场条件下关键大气有机碳成分转化机制，阐明多相化学对自由基和有机颗粒物生成的影响；研究地气交换过程和交换通量对大气含碳物种的影响，量化天然源和人为源的不同贡献；建立有机碳大气化学机制及模式参数化方案，定量评估总有机碳及其大气转化过程对 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧生成的关键影响因子及气候效应，提出基于大气化学活性的减排策略和技术方案。

**考核指标：**建立与 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧污染相关的大气有机物反应性、挥发性及成分测量新方法，建立典型区域大气含碳物种



及相关污染物科研观测网（含综合站 3 个以上、通量站 2 个以上），主要成分浓度测量误差小于 10%，通量测量误差低于 30%，获得冬夏等典型季节各 1 个月以上在线观测数据；厘清含大气碳物种气相化学和多相化学转化机制，形成我国大气复合污染条件下有机碳大气化学机制参数化方案，含碳物种浓度模拟准确度提升 50%；量化评估 10 个以上污染过程大气含碳物种及源排放对典型区域和主要代表性城市  $\text{PM}_{2.5}$  和臭氧污染生成的贡献、气候效应及控制途径，提出基于大气化学活性的含碳污染物优控物种清单和减排策略。

**关键词：**大气有机碳；化学反应机制；反应性和挥发性测量。

### 2.3 大气边界层动力学与污染过程生消相互影响机制

**研究内容：**针对区域污染过程和复杂地形，开展大气边界层理化综合观测试验，研究边界层内气象（热力、动力和大气辐射等）和污染相互作用机制，以及区域边界层上层和自由大气交换过程，阐明重点区域和典型城市大气边界层动力学、热力学、理化结构和演变规律；开展特大城市  $\text{PM}_{2.5}$  组分和臭氧前体物通量观测试验，发展非均匀下垫面湍流和污染物垂直交换测量新方法和参数化新方案；自主研发新型大气边界层动力学模式，准确量化垂直交换与区域传输对地面  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  污染生消过程三维立体分布的影响；选择典型污染过程，模拟揭示

边界层动力学影响污染生消过程的机制，提出相对应的  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{O}_3$  污染协同垂直调控方法。

**考核指标：**构建适用于特大城市和复杂山地地形的大气边界层动力学模式，实现自主可控，水平分辨率 $<100$ 米，垂直分辨率 $<20$ 米，可合理表征边界层理化结构特征及垂直日变化，对关键化学组分和  $\text{O}_3$  模拟提升 20%；阐明大气污染物，特别是  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  的垂直耦合机制，提出评估垂直交换对地面污染过程影响的技术方法。大气边界层理化综合观测试验站点不少于 3 类，包括特大城市、边界层上层和典型区域；特大城市通量观测试验至少包括冬夏各 1 个月，测量的颗粒物化学组分不少于 5 种，挥发性有机物不少于 10 种，通量测量误差低于 30%；量化大气污染物在区域输送过程中边界层动力、气象和化学影响贡献，揭示不少于 8 次典型区域输送污染过程的区域垂直传输机制，提出至少 1 个特大城市和 1 个区域  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{O}_3$  污染协同垂直调控原理。

**关键词：**大气边界层；热力学；垂直交换机制。

## 2.4 工业集聚区复合污染精准源解析技术体系

**研究内容：**针对工业集聚区企业生产历史复杂、土壤-地下水污染物种类繁多、源汇关系不明等问题，开发工业集聚区生产布局演进与场地污染高风险区域智能辅助识别系统；基于非靶向分析、同位素分析等污染解析技术，建立工业集聚区特征污染物高精度指纹图谱库；研究土壤-地下水反应界面污染交互、

迁移、衰减与稳定同位素分馏的耦合机制，发展复合污染高精度溯源、多源叠加污染精准时空解析及污染源贡献率解析技术；构建基于遥感、监测与模拟的高精度源解析数据库和可视化移动监管平台。

**考核指标：**选择长三角、京津冀、粤港澳大湾区等重点区域，建立工业集聚区场地污染高风险区域智能辅助识别系统，空间解析分辨率 <1 米；创建我国典型工业集聚区特征污染物高精度指纹图谱库，污染物种类不少于 200 种；突破多源复合污染高精度溯源、长时间污染精准时空解析及污染源贡献率解析技术，对工业集聚区场地污染溯源准确率 >90%；建立工业集聚区复合污染高精度溯源可视化移动监管平台；在不少于 3 个工业集聚区（面积不小于 5 km<sup>2</sup>）开展应用示范；形成相应的行业技术规范（征求意见稿）3~5 项。

**关键词：**遗留与在产场地；卫星遥感；化学指纹；示踪技术。

## 2.5 场地非均质含水层污染物时空高精度识别与精细表征

**研究内容：**针对场地含水层非均质性（如低渗透透镜体等）对原位化学/生物和强化自然衰减等修复效果的制约机制不明等问题，研发不同尺度含水层结构非均质性的刻画模拟与成像技术，研究结构非均质性对典型污染物分布和迁移转化的影响及机理；研发含水层非均质介质氧化还原容量的表征方法与设备，研究氧化还原容量的空间分布规律与污染物迁移转化的关

系及其对人为扰动的响应机制；探讨含水层结构非均质性和化学非均质性对污染物化学/生物与强化自然衰减等修复的制约机制与主控因子；开展实际场地应用示范。

**考核指标：**研发场地含水层地质结构不同尺度非均质性的精细刻画与成像技术，空间分辨率达到厘米级，阐明氯代烃、砷、酞酸酯等 3 类以上污染物在含水层非均质介质中的空间分布规律与迁移转化机理及其与非均质性的关系；研发具有自主知识产权的含水层非均质介质氧化还原容量的现场快速分析和离场精确分析设备各 1 套，测试精度分别达到  $\text{mmol e}^-/\text{kg}$  和  $\mu\text{mol e}^-/\text{kg}$  级，样品使用量提高到  $\text{g}$  级；探明含水层结构非均质性和化学非均质性对污染物化学/生物与强化自然衰减修复的制约机制，建立含水层非均质性与污染物降解的定量关系模型，模拟误差  $<30\%$ ；选择不少于 2 处典型污染场地开展应用示范。

**关键词：**含水层非均质性；污染物降解；氧化还原容量。

## 2.6 重点行业场地新污染物环境风险

**研究内容：**针对化学农药制造、原料药制造、染料制造、有机氟化工等行业场地土壤-地下水中的新污染物环境风险问题，筛选识别场地土壤-地下水未知新污染物，探讨未知新污染物与高关注新污染物的种类及其浓度水平，明晰场地土壤-地下水中新污染物的空间分布特征；研发场地新污染物溯

源关键技术，阐明场地新污染物的源汇机制；建立场地土壤-地下水中耦合“污染源-迁移途径-受体”的生态风险指标体系；研发场地新污染物生态风险定量评价方法与技术，提出场地土壤-地下水新污染物的风险阈值。

**考核指标：**明确化学农药制造、原料药制造、染料制造、有机氟化工等 3 类以上重点行业场地未知新污染物与高关注新污染物及其浓度水平，定量刻画土壤-地下水新污染物的空间分布特征；建立新污染物指纹图谱溯源技术及通量预测模型，实现 3 类 10 种以上新污染物精准溯源，模型模拟误差 <30%；构建面向土壤-地下水中新污染物的生态风险指标体系；建立土壤-地下水新污染物环境效应与风险定量评估方法技术，制订相关技术规范（征求意见稿），提出土壤-地下水中 3 类 10 种以上未定标新污染物的生态风险阈值。

**关键词：**新污染物；精准溯源；源汇机制；风险阈值。

## 2.7 土-水相互作用对场地土壤污染风险与修复长效性的影响机制

**研究内容：**针对区域降水、地表径流等过程对场地土壤污染风险的影响，研究土-水相互作用下场地土壤重金属和有机污染物的空间分布与迁移转化规律；研究土-水相互作用对土壤污染物生物有效性及其向地下水和地表水迁移扩散的影响与机制，建立基于场地及周边土壤-地下水-地表水的污染物风险演

变与评价模型；研究土-水相互作用下场地土壤微生物的种群演替规律，探讨土-水相互作用对污染物生物转化及场地土壤自净的影响与机制；研究土-水相互作用对场地土壤污染阻控与修复长效性的影响。

**考核指标：**阐明土-水相互作用下污染物时空分布与动态演化机制，建立污染物时空演化模型，在实际场地开展验证，模型误差 <30%；筛选场地土壤污染风险评估敏感生物受体不少于 2 类，建立土-水相互作用下污染物跨介质风险评估模型；探明土-水相互作用对场地土壤微生物种群演替及场地自净的影响规律；选择 4 类以上土壤污染阻控修复材料，构建土-水相互作用下污染阻控与土壤修复的长效性预测模型，预测误差 <30%。

**关键词：**土-水相互作用；生物有效性；污染风险；修复长效性。

## 2.8 场地新污染物跨界面迁移转化与归趋

**研究内容：**针对精细化工等重点行业场地中全氟化合物等新污染物跨界面迁移转化与归趋的关键问题，建立面向场地新污染物迁移转化过程解析的稳定同位素示踪技术；厘清场地新污染物赋存形态、多相分配过程及主控因子；研究新污染物在土-水-气-生多介质界面的迁移过程；探讨物理-化学-生物过程耦合的场地新污染物转化机制及影响因素，建立场地新污染物

跨界面迁移、转化与归趋模型，并开展示范验证。

**考核指标：**建立场地中全氟化合物等 3 类 10 种以上新污染物的稳定同位素示踪技术；精准刻画土壤-地下水新污染物多相分配行为，选择实际场地验证，污染物浓度误差 <30%；阐明物理-化学-生物过程耦合的新污染物迁移转化动力学；建立场地新型污染物跨界面迁移转化归趋模型，选择典型场地（面积 >1 公顷）开展示范验证，污染物浓度模拟误差 <30%。

**关键词：**新污染物；同位素示踪；跨界面传输；迁移转化归趋。

## 2.9 典型区域土壤-地下水系统多场耦合水质演化与污染机制

**研究内容：**基于我国地下水类型多样、土壤-地下水污染模式多元等特点，分别在干旱内陆盆地地区、半干旱高原草原区、半湿润平原区、潮湿丘陵山区等典型区域选择代表性地区，研究土壤-地下水系统中强迁移性污染物（重金属、有机污染物、氮素等）的多介质多界面迁移和衰减过程；探讨污染物迁移转化过程中介质场-动力场-化学场-生物场多场耦合机制及调控原理；研发典型污染物迁移路径同位素示踪技术和衰减过程监测技术，结合地下水数值模型研究不同典型区土壤-地下水污染的时空演化规律，提出土壤-地下水污染模式；开展现场验证。

**考核指标：**识别出 4 类以上典型区土壤-地下水污染的主控因子，探明地下水水质时空演化规律，实现污染物靶向溯源；

阐明污染物迁移转化过程中介质场-动力场-化学场-生物场多场耦合机制与调控原理，建立多场耦合的污染物迁移转化模型，地下水水位与污染物浓度的模拟误差 <20%；研发典型污染物迁移路径同位素示踪技术和衰减过程监测技术，空间分辨率达米级，实现污染物精准溯源；提出 4 类以上不同类型典型区土壤-地下水污染模式；选择不少于 2 个典型区开展综合示范性验证，模拟误差 <20%。

**关键词：**强迁移性污染物；多场耦合；迁移路径；土壤-地下水污染模式。

### 3. 治理修复技术

#### 3.1 钢铁行业多污染物低能耗高效协同治理技术及装备

**研究内容：**针对我国钢铁行业大气污染物和碳排放总量大、现有超低排放系统能耗高及“双碳”背景下短流程电炉烟气净化需求迫切的现状，研发烧结烟气污染减量耦合能质增效技术，优化提升多污染物总量削减及节能降碳效率；研发球团烟气嵌入式节能环保技术，显著降低球团工序运行能耗；突破羰基硫水解催化剂关键材料，研发高炉煤气深度净化技术；研发短流程电炉烟气减污降碳技术；形成全面覆盖钢铁行业长、短生产流程下的多污染物低能耗高效协同治理技术与装备，并在国家大气污染防治重点区域内开展工程应用示范。



**考核指标：**在钢铁行业长、短流程生产所涉及的烧结/球团/高炉和电炉等主要工序、主流生产规模设备（360m<sup>2</sup>及以上烧结机、100万吨/年及以上球团、2000m<sup>3</sup>及以上高炉、60t及以上电炉）建立应用示范工程4套以上，连续稳定运行2000h，净化后烟气污染物排放浓度比现有国家超低排放限值降低20%以上，烧结工序固体燃料消耗量降低15%以上，烧结吨矿烟气量削减35%以上，球团嵌入式脱硝运行能耗较现有脱硝工艺降低40%以上，高炉煤气总硫（含有机硫和无机硫）浓度≤30mg/m<sup>3</sup>，电炉烟气二噁英在现有国家排放限值基础上降低80%以上，电炉烟气净化系统能耗降低15%以上。

**关键词：**钢铁烟气能质增效；羰基硫水解催化剂；电炉烟气减污降碳。

### 3.2 有色冶金难处理烟气低能耗高效治理技术及示范

**研究内容：**针对不同气候条件地区有色冶金高尘、高湿、高硫等复杂环境难处理烟气及无组织排放问题，重点研发高碱尘高湿烟气余热利用耦合NO<sub>x</sub>低温处理、大气量低浓度气态氟化物高效分解与同步脱除、高硫高尘烟气多重金属梯级脱除与回收、高尘多污染物含能废气资源化利用、无组织排放低能耗治理等核心技术与装备，构建有色金属难处理烟气低能耗短流程深度净化方法，形成创新工艺及成套装备，并在国家大气污染防治重点区域内开展工程应用示范。

**考核指标：**针对不同气候条件地区，建立主流冶炼工艺应用示范工程 4 项以上，单项工程处理能力 $\geq 80000\text{m}^3/\text{h}$ ，连续稳定运行 2000h，冶炼烟气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，其他烟气污染物排放浓度比国家标准特别排放限值降低 20%以上，烟气铈脱除率 $>95\%$ ，CO 烟气产品粉尘浓度 $< 1\text{mg}/\text{m}^3$ ，杂质气体浓度 $< 1\text{mg}/\text{m}^3$ ，符合化工原料气要求；吨金属生产无组织排放比例降低 20%；烟气污染治理系统运行能耗整体下降 20%以上。

**关键词：**有色冶金；短流程低能耗治理；梯级回收。

### 3.3 建材行业烟气多污染物短流程高效协同治理技术及示范

**研究内容：**围绕水泥、玻璃、砖瓦等建材行业烟气常规污染物与非常规污染物短流程高效协同治理及温室气体减排的需求，突破颗粒物与气态污染物协同一体化控制技术瓶颈，研发高温滤料及中低温合成纤维负载催化组分的一体化复合材料和制备技术；研究多场耦合协同净化烟气中重金属、三氧化硫、卤化物及有机物等技术与装备；研究基于燃料替代、工艺节能优化等的烟气污染物与温室气体的源头减排技术，开发协同处置固废等水泥与砖瓦炉窑的烟气多污染物深度治理成套技术与装备；在国家大气污染防治重点区域内开展多污染物一体化净化及协同处置固危废深度治理示范工程。

**考核指标：**形成建材行业烟气中颗粒物与气态污染物一体化控制技术产品及装备，多场耦合协同净化烟气中重金属、三氧化硫、卤化物及有机物等技术与装备。在水泥、玻璃、陶瓷、砖瓦等建材行业主流生产规模设施上建成烟气多污染物短流程高效协同治理技术示范工程 4 项以上，连续稳定运行 2000h，烟气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物的排放浓度分别 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $40\text{mg}/\text{m}^3$ ；水泥及砖瓦协同处置固危废等替代燃料后烟气中 VOCs 浓度 $< 10\text{mg}/\text{m}^3$ ，二噁英类浓度 $< 0.1\text{ng}/\text{m}^3$ ，重金属铅和镉浓度均 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ，汞浓度 $< 0.03\text{mg}/\text{m}^3$ ；玻璃炉窑烟气中氯化氢与氟化物浓度分别 $< 10\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $3\text{mg}/\text{m}^3$ ，重金属铅和砷浓度均 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ；燃料替代与工艺节能优化协同实现煤炭消耗量和碳排放量均下降 20%以上；形成建材行业减污降碳技术指南或规范（征求意见稿）。

**关键词：**建材污染一体化控制；多场耦合协同净化；燃料优化与节能降碳。

### 3.4 化工园区减污降碳协同治理与技术集成示范

**研究内容：**针对化工园区大气污染源多、多呈间歇性或无组织排放、废气成分复杂、治理难度大等问题，研究园区物质流和能量流对大气污染物排放的影响，耦合园区生产工艺链、污染控制链和监测监管链，构建针对园区减污降碳协同治理的

整体解决方案。重点研发生产工序的污染物源头减量、多污染物高效协同净化、污染物高效回收与资源化利用、全流程智能优化控制与能源梯级利用等耦合技术，形成挥发性有机物、卤化物、氨等污染物高效低能耗协同治理技术与装备，集成开发复杂组分污染物和温室气体排放高精度监测监管与精细治理的园区减污降碳协同治理支撑技术系统及智能管控平台，并开展工程应用示范。

**考核指标：**在 2 个及以上典型化工园区实现示范，挥发性有机物、卤化物、氨等污染物排放浓度比现有国家排放标准限值降低 50% 以上，并满足下一阶段最新国家标准，污染治理系统整体运行能耗降低 20% 以上，并建立园区减污降碳协同治理智能管控平台，园区单位 GDP 产值的污染物排放强度下降 30% 以上；编制园区废气治理技术标准或指南（征求意见稿）2 项以上。

**有关说明：**要求其他经费与国拨经费 3:1 配套。

**关键词：**化工园区；多污染物高效协同净化；减污降碳协同治理。

### 3.5 近零排放高效能柴油车控制技术及应用

**研究内容：**研发面向未来柴油车近零排放控制技术体系，重点突破发动机与后处理系统一体化控制、热管理与排温控制、密偶催化剂（CCC）、电加热催化剂（EHC）、远程在线数据

评价方法等关键技术，形成长寿命集成式后处理装备，实现自主可控的高效能柴油车近零排放后处理技术的示范应用，同步开展国 VIb 后处理技术的规模化应用，预研低碳/零碳内燃机（醇内燃机、氢内燃机等）排放控制技术。

**考核指标：**满足未来温室气体排放法规限值的前提下，近零控制技术使柴油车主要污染物排放国 VI 限值的基础上降低 50% 以上；规模化应用的后处理装备自主化率高于 60%，实现 20 万台满足国 VIb 标准的整车应用。

**关键词：**柴油车；近零排放；高效能、长寿命集成式后处理装备。

### 3.6 近零排放汽油车后处理关键技术及集成

**研究内容：**研发面向未来汽油车、油电混动车近零排放控制技术体系，重点突破后处理催化材料（三效催化剂、电加热催化剂、氨氧化催化剂等）、高目数超薄壁载体、小孔径与超高捕集率颗粒捕集器、冷启动/热启动等过渡工况和实际行驶条件下污染物排放（RDE）控制技术、燃油蒸发、系统集成与控制技术，实现自主可控的汽油车排放控制技术产品的规模化应用。

**考核指标：**满足未来温室气体排放法规限值的前提下，近零控制技术使汽油车主要污染物排放国 VIb 限值的基础上降低 50%，并满足 RDE 的排放要求；实现至少两类典型技术路

线的混动车的后处理技术示范应用；规模化应用的后处理装备自主化率高于 60%，实现 100 万台满足国 VIb 标准的整车应用。

**关键词：**汽油车；油电混动；近零排放；实际行驶条件下污染物排放控制。

### 3.7 非道路移动机械污染控制技术与应用

**研究内容：**研究工程和农业机械多污染物协同控制技术，重点突破抗硫抗灰分中毒催化与捕集材料、高抗振耐热冲击载体与柴油机颗粒捕集器（DPF）、发动机与后处理系统一体化控制、热管理、智能监管等关键技术，形成低成本长寿命集成式后处理装备，耦合高效清洁燃烧技术，实现自主可控的非道路移动机械后处理技术的规模化应用；开展面向下一阶段排放标准的污染控制技术预研。

**考核指标：**规模化应用的后处理装备自主化率高于 60%，实现 20 万台满足国 IV 标准的整机应用；形成满足下一阶段排放标准（参照非道路机械欧盟 Stage V 标准）的样机。

**关键词：**非道路移动机械；多污染物协同控制；低成本长寿命集成式后处理装备。

### 3.8 船舶超低排放控制及监测技术研究与示范应用

**研究内容：**针对船舶大气污染物与温室气体协同减排的需求，开展海船与河船本地化排放因子及全化学成分谱、船舶燃料全生命周期温室气体排放核算方法与减排策略、船舶

超低排放管控方案及技术路线研究；研究低能耗船舶 CO<sub>2</sub> 捕捉存储、高效 PM 捕集、高效甲烷逃逸治理等关键技术与装备；面向新型燃料动力船舶污染控制需求，开展甲醇动力船未燃碳氢化合物(HC)排放净化的关键技术研究 and 氨动力船 NH<sub>3</sub> 逃逸净化关键技术研究，形成未来新型燃料动力船舶排放控制技术储备；面向船舶排放监管能力提升需求，开展船舶高分辨率立体监测与智能精准管控技术及装备研究，开发船舶排放监测监管平台；开展船舶超低排放控制及监测监管系统样机研制，并在沿海及内河典型水域完成工程示范，为实船工程化应用及推广提供支撑。

**考核指标：**建立船舶污染物全化学成分谱与排放因子模型；形成国内船舶超低排放方案及路线与国际海运船舶超低排放强制性全球机制；形成船舶 CO<sub>2</sub> 捕捉存储系统样机，CO<sub>2</sub> 综合捕集率≥80%；形成 CH<sub>4</sub> 逃逸治理系统样机，CH<sub>4</sub> 转化率≥90%，甲烷加权排放≤1g/kW h；形成 PM 捕集系统样机，PM 捕集率≥90%，加权排放值≤0.1g/kW h；形成甲醇燃料发动机非常规碳氢脱除治理系统样机，脱除效率≥90%，甲醛加权排放量≤0.05g/kW h，总 HC 排放量≤5g/kW h；形成氨燃料发动机 NO<sub>x</sub> 及氨逃逸治理系统样机，NO<sub>x</sub> 排放满足 TIER III 要求，NH<sub>3</sub> 逃逸率≤30ppm；建立耦合联动污染控制装备的船舶排放监测监管分析系统，监测误差≤5%；在典型船舶上完成上述系统样机的实船示范≥1 项。

**有关说明：**要求其他经费与国拨经费 3:1 配套。

**关键词：**船舶；超低排放；新型污染物；智能精准管控。

### 3.9 非点源多介质氨、氮等污染综合治理技术

**研究内容：**研究氨与氮（包括但不限于 NO、HONO）在气-土-生多介质中的迁移转化及其与 PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 动态污染机制；创新种植业氨与氮氧化物全过程多介质深度协同减排的绿色低碳新产品、新技术与新模式；创制养殖业全链条氨源头深度减排与回收技术装备，构建密闭与开放式养殖场气液固废弃物氨与氮氧化物协同减排增值技术模式；创建区域水-土-气-生氨、氮协同减排与 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 的复合效应动态评估技术平台，提出区域氨、氮全域协同低碳精准减排方案与技术途径；集成经济可行的区域绿色低碳协同减排模式，在典型区域开展种养一体化的氨与氮氧化物协同减排与绿色发展工程应用示范。

**考核指标：**发布氨、氮（包括但不限于 NO、HONO）等跨介质迁移转化特征及其与 PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 动态污染关系蓝皮书；研制新一代氨氮与氮氧化物污染协同治理的新产品、新装备 4~6 套，形成种植业全过程和畜禽养殖场低成本氨氮减排增值模式，氨氮非点源多介质污染全过程控制效率提升 50%；区域水-土-气-生氨、氮协同减排与氨氮排放与 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 的复合响应动态评估模型与平台一套；种植业示范工程面积 1 万亩以上，示范养殖规模 10 万只以上，实现种养示范工程氨减排 40%以



上,氮氧化物减排 30%以上,减排技术节能 20%,成本减少 20%以上;形成氨与氮氧化物协同减排技术行业标准或指南 5 项。

**关键词:** 非点源污染; 精准减氨氮; 种养一体化。

### 3.10 含杂原子 VOCs 废气高效净化技术与应用

**研究内容:** 针对重点行业含杂原子 VOCs 废气的高效安全控制治理,研究含杂原子 VOCs 控制过程、反应中间物种与副产物生成机制,揭示不同类型污染物协同消除反应机理,研制含杂原子 VOCs 高效吸附与催化净化材料,开发含杂原子 VOCs 高效回收与安全治理技术工艺,研究净化过程协同与强化,形成系列含杂原子 VOCs 高效回收与安全治理关键技术与装备,在重点区域开展工程应用示范。

**考核指标:** 研制出含杂原子 VOCs 高效催化净化材料 3~4 种,含氯 VOCs 催化材料  $T_{50} \leq 300^{\circ}\text{C}$ ,净化效率  $\geq 99\%$ ,选择性  $\geq 95\%$ ;含氮 VOCs 催化材料  $T_{50} \leq 280^{\circ}\text{C}$ ,净化效率  $\geq 99\%$ ,选择性  $\geq 97\%$ ;开发出含杂原子 VOCs 高效吸附材料 2~3 种,比表面积  $\geq 1100 \text{ m}^2/\text{g}$ ,吸附量  $\geq 15\%$ ;开发出含杂原子 VOCs 高效回收与安全治理技术工艺,形成自主可控的材料与设备,在典型地区重点行业建成示范工程 3-4 项,单项工程气量规模不小于  $10000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,净化效率  $\geq 98\%$ ,实现杂原子 VOCs 的有效控制,排放浓度比国家标准限值降低 50%;制定国家(行业)相关含杂原子 VOCs 控制治理技术导则或指南不少于 2 项。

**关键词：**含杂原子 VOCs；高效吸附与催化净化材料；高效回收与安全治理。

### 3.11 重金属复合污染土壤长效矿化材料与制备技术

**研究内容：**针对典型场地重金属复合污染土壤防治需求，研究低碳、高效、长效、安全的多金属同步固定超稳矿化修复材料，探明矿化材料结构特征与重金属稳定化性能的构效关系，阐明超稳矿化材料同步稳定多金属的关键作用机制；研发超稳矿化材料生产及结构调控工艺和装备，形成绿色化、低成本、规模化制备技术，建立修复材料成套生产装备和规模化生产线；研究超稳矿化材料性能评价技术指标，形成超稳矿化材料产品标准和环境安全性综合评估方法；选择典型的多金属复合污染场地，开展超稳矿化材料现场高效工程应用示范并建立工程应用技术体系。

**考核指标：**研制快速反应（<7d）、抗酸性强（pH 4）的环境友好超稳矿化材料，实现镉砷铅多金属同步稳定化，Cd 稳定化率 >95%，As、Pb 等重金属稳定化率 >70%，稳定长效性 >3 年；建立超稳矿化材料低碳高效、经济安全的制备技术、成套装备和规模化生产线 1 条，生产成本降低 30%以上，年生产能力 >10000 吨；开发多金属污染土壤超稳矿化材料现场应用技术和工法不少于 2 项，形成超稳矿化材料工程应用技术指南（征求意见稿）不少于 2 项；建立超稳矿化材料性能评价指

标体系与环境安全性评估方法，编制产品质量标准（征求意见稿）；选择耕地、建设用地等典型场地多金属复合污染土壤，开展超稳矿化材料规模化应用示范，污染土壤处置量  $>2$  万  $\text{m}^3$ ，修复后土壤环境质量达到国家标准。

**关键词：**多金属同步稳定；长效矿化材料；制备技术。

### 3.12 在产医药化工园区土壤-地下水污染风险防控与原位协同修复

**研究内容：**针对在产医药化工园区安全生产和土壤-地下水污染防治需求，研发典型在产园区土壤-地下水系统中特征污染物及新污染物精准识别与刻画技术；构建医药化工在产园区土壤-地下水系统特征污染物及新污染物的源输入与跨介质迁移转化数值模拟与风险预警平台；研发不同区域不同类型在产园区土壤-地下水污染的分区分类分级评价方法，探索在产园区边生产-边管控-边修复的防治模式；研发基于安全运营和保护在产园区人体健康与周边敏感受体的长效阻控与高效修复技术、材料与装备，构建工业园区在产模式下土壤-地下水污染原位协同防治技术体系；选择典型园区开展工程应用示范。

**考核指标：**建立医药化工在产园区土壤-地下水系统特征污染物及新污染物筛查识别与精准刻画技术，污染物时空分布刻画精度比现有水平提高 50%，阐明典型在产园区土壤-地下水中

特征污染物的源输入及多介质多界面迁移转化机制；创建园区土壤-地下水多介质污染三维可视化数值模拟与风险预警平台，连续正常运行不少于1年，预测误差 <20%；提出在产园区土壤-地下水污染分区分类分级评价方法与边生产-边管控-边修复的防治模式；构建园区在产模式下土壤-地下水多介质污染控源-阻断-修复多技术原位协同防治技术体系，研发适用于在产区操作空间受限场景的低扰动修复与安全阻控技术6种，研制对建筑物/构筑物低影响的绿色低碳修复材料4种，开发适于小空间作业的原位专用修复装备1台/套，材料与装备价格不高于同类产品，性能提高20%，次生污染降低80%；选择不少于2类在产化工园区开展工程应用示范（单个面积 >10 km<sup>2</sup>），相同运行条件下治理成本较现有技术降低30%，实现土壤-地下水污染风险有效管控，保障园区安全生产，编制相关技术指南或规范（征求意见稿）不少于2项。

**关键词：**医药化工在产园区；特征与新型污染物；原位协同防治；风险预警平台。

### 3.13 盾构土处理处置与安全利用技术

**研究内容：**针对我国城市建设中盾构土方量巨大、污染状况与环境影响不明、处理处置及安全利用技术缺乏的问题，研究不同来源盾构土理化特性、污染特征、污染途径及其环境风险，探讨盾构施工药剂种类及使用工艺对盾构土污染及安全风

险的影响机制；研选环境友好、经济适宜的新型盾构药剂配方，研究盾构土性能改良及污染物固定削减功能材料；研发盾构土处理处置及安全利用技术和一体化装备，研究盾构土产品安全与质量综合评估方法；选择不同地质条件下典型施工场景产生的盾构土，开展技术集成和工程应用示范。

**考核指标：**探明盾构土污染特征、途径及风险；研选/开发新型盾构药剂配方不少于3种，建立盾构药剂添加标准，毒害物质残留浓度降低 >50%；研制盾构土性能改良及污染物固定削减功能材料，毒害物质释放率降低 >70%，形成适用于不同特性盾构土预处理、固化处置、无害化处理技术和成套装备，设备处理能力 >100 m<sup>3</sup>/小时；建立盾构土安全利用评估方法，选择不少于2类不同地质条件的盾构土开展技术集成和示范应用，实现盾构土安全利用，形成盾构土安全利用相关技术规范（征求意见稿）不少于2项。

**关键词：**盾构土；环境风险；一体化处置技术；安全利用；盾构药剂。

### 3.14 复杂地质条件固废填埋场地地下水复合污染长效阻控技术及装备

**研究内容：**针对存在基岩断裂带、溶洞等渗漏通道的复杂地质填埋场，开发地下深层基岩断裂带渗透通道的探测技术，明晰污染物传输机制，构建基于天-空-地一体化监测技术体系

及场地污染风险评价方法；研发深层基岩断裂带等渗漏通道长效阻隔材料及施工装备，构建阻隔墙围封、竖井渗流调控及可渗透反应格栅修复相结合的阻控管控技术体系；研制深层渗漏通道的高压注浆工艺与装备，形成复杂地质条件下固废填埋场地地下水污染风险管控技术与装备，开展示范性应用。

**考核指标：**开发深层基岩断裂带等渗漏通道精准探测技术，定位精度  $<2\text{ m}$ ；明晰地下水复合污染物传输机制，提出复杂地质填埋场地地下水污染风险评价方法；研发地下深层渗漏通道阻断材料 2 种以上，防渗性能比现有技术提升 10 倍以上；阻控管控技术及装备在 2 个以上典型填埋场进行示范性应用与验证，污染物迁移扩散通量降低  $>90\%$ ，技术应用成本降低 30% 以上，形成复杂地质填埋场地地下水复合污染阻隔管控技术与装备，编制技术标准或指南不少于 2 项。

**关键词：**基岩断裂带；固废填埋场；复合污染；扩散-演化规律；长效阻隔。

### 3.15 地下水复合污染原位高效反应带修复技术

**研究内容：**针对化工园区、工业集聚区等地下水复合污染有效防控需求，研究非均质地下水系统中典型复合污染物分布特征和迁移转化机制，开展地下水复合污染过程精细刻画和数值模拟预测预警；研制基于物化-生物协同的地下水复合污染原位高效修复和长效风险管控新材料；研发基于新材料的地下水

复合污染原位高效反应带绿色高效修复和低碳长效风险管控技术体系；建立复合污染地下水绿色高效修复与低碳长效风险管控效果评估方法；选择典型区域开展示范应用。

**考核指标：**阐明典型地下水系统中复合污染物多界面迁移转化机制，创建区域地下水复合污染三维可视化数值模型与风险预警平台，模拟误差 <20%，污染羽边界预测误差小于 1 米；研制原位绿色高效修复材料与长效风险管控材料 3~5 种，建立年产量不低于 10000 吨的材料生产线，材料生产成本较同类产品降低 30%；开发适用于不同情景、不同深度地下水复合污染的新型反应带修复技术与风险管控技术 3~5 项；选择典型区开展地下水复合污染原位修复与风险管控示范应用，材料一次使用连续稳定运行 2 年以上，修复反应带污染物总量与风险管控带特征污染物扩散通量均下降 90%以上，二次污染物下降 80%以上，地下水污染风险管控达标，技术应用成本较现有技术降低 30%。

**关键词：**地下水复合污染；反应带；绿色高效修复；低碳长效风险管控。

### 3.16 污染场地土壤功能重构的资源化利用新技术

**研究内容：**针对污染场地土壤功能重构的资源化利用问题，研究基于土壤生产/生态功能重构的污染物转化去除机制；研发绿色低碳的污染土壤生产/生态功能重构及综合利用技术，开发

污染土壤“源头治理与生产/生态恢复并行”模式；研究污染土壤资源化的经济性与安全性及其评价指标，开展资源化利用后跟踪监测评估；开发可行性评估-无害化处理-安全利用-跟踪评估的污染土壤资源化利用全过程监管方案与产业化模式，开展示范应用。

**考核指标：**建立基于生产/生态功能重构的污染场地土壤资源化利用可行性评估指标体系和技术方案；研发绿色低碳污染土壤功能重构与综合利用技术 2~3 项及成套装备；建立污染土壤“源头治理与生产/生态恢复并行”模式，污染土壤示范处理量  $>5000 \text{ m}^3$ ，实现土壤生产/生态功能重构，达到农用地土壤环境质量要求，并开展示范应用；构建涵盖可行性评估、资源化利用与后跟踪评估的全链条污染土壤资源化处理处置及安全利用监管模式，并形成相应的行业技术规范（征求意见稿）不少于 2 项。

**关键词：**场地污染土壤；生产/生态功能重构；资源化利用新技术；产品质量标准；安全利用规范。

## 4. 决策支撑技术

### 4.1 环境大气生物气溶胶暴露特征和健康风险防控

**研究内容：**针对生物气溶胶暴露的健康风险，建立生物气溶胶及分类测量的关键技术和集成技术体系，研究典型城市和



区域背景大气生物气溶胶（细菌、真菌、病毒）污染状况及粒径分布、时空变化特征、传输扩散规律及关键影响因素，重点研究生物气溶胶组成结构、生物活性及主要来源；研发单个生物气溶胶粒子捕获体系，研究大气污染及大气自由基对生物气溶胶浓度与活性的影响与机制，探索生物气溶胶对大气化学和云雾过程的影响；定量评估生物气溶胶主要致病成分（如鲍曼不动杆菌、曲霉属过敏原等）的人群暴露健康风险；研发综合测量集成平台，开展室外特定情景下有害生物气溶胶成分预警技术示范，提出生物气溶胶健康风险防控的技术规范和对策建议。

**考核指标：**自主研发的单个生物气溶胶捕获与活性识别样机不少于两套，捕获粒径不小于 1 微米，颗粒活性识别率不低于 90%；建成大气生物气溶胶及主要活性成分测量集成技术平台，在至少 2 个典型城市和区域背景地区示范观测，示范时长超过 1 年，生物气溶胶（细菌、真菌、病毒）测量的时间分辨率 1 小时，病原微生物鲍曼不动杆菌和致病成分如曲霉属过敏源测量的时间分辨率 12 小时；提交支撑健康评估的集成数据库，数据不少于 20,000 条，包括典型城市和区域背景四季大气生物气溶胶浓度、主要活性成分（如马赛菌、鲍曼不动杆菌、枯草芽孢杆菌等）及结构，时间分辨率到小时；发布影响生物气溶胶活性的关键大气污染物控制途径蓝皮书 1 份，形成大气和室外特定情景生物气溶胶健康风险评估技术方法指南（征求

意见稿) 2 项, 提出生物气溶胶风险防控对策建议 2~3 份。

**关键词:** 生物气溶胶; 健康风险; 生物风险防控。

#### 4.2 大气污染致病的全链条追因及疾病负担评价

**研究内容:** 针对与大气污染有密切关系的主要典型高发疾病(如呼吸系统、心脑血管疾病等), 研究“外部来源-人体暴露-疾病发生”全链条的影响机制, 量化大气污染与主要疾病发生的因果关系; 开展疾病人群和健康人群环境外暴露和人体内暴露的比较研究和模型解析, 辨识诱导重大疾病的关键污染因素及其人体暴露途径, 追踪其外部排放来源和大气环境过程, 并构建可视化技术集成平台; 开展典型区域高发疾病的疾病负担评价, 评估不同污染物暴露因素对主要疾病发生的贡献, 提出相应的健康风险消减对策和政策建议, 为实现基于健康风险调控的大气污染防治提供理论和技术支持。

**考核指标:** 建立大气污染有关的典型疾病(如呼吸系统、心脑血管疾病等)的疾病负担评价模型, 评估包含大气污染在内的>100 种暴露因素对主要疾病发生的贡献, 准确率达 90%; 针对 2 种以上典型高发疾病(包括呼吸系统、心脑血管疾病等), 辨识出与大气污染相关的关键致病因子, 形成“污染排放-人体暴露-毒性机制-人群健康危害”的全链条证据, 构建闭环研究的新范式; 形成大气污染健康风险和 Related 疾病防控的技术方法, 提出对策建议 2~3 份, 并在典型区域应用示范。

**关键词：**疾病负担；健康风险；全链条追因。

### 4.3 典型场景室内空气与餐饮油烟污染控制支撑技术及应用

**研究内容：**针对医院、幼儿和老年人园所、地铁站台和地下停车场等场景，研发应对多污染物的短流程高效节能净化和智能调控技术；重点突破电激发活性自由基氧化挥发性有机物、NO<sub>x</sub> 和异味等特征污染控制、湿度与霉菌耦合调控、气体储换热节能、动态跟踪调控等关键技术，形成典型场景室内空气品质调控技术体系并实现示范应用。针对多层居民楼和商用/餐饮一体化建筑等场景，研发高效低噪的油烟多污染物分离净化耦合技术，重点突破多点收集集中治理、排烟降噪和阻力均衡、非甲烷总烃控制、远程智能监控等关键技术，形成典型场景餐饮油烟清洁排放支撑技术体系并实现示范应用。

**考核指标：**建设典型场景室内空气质量调控示范工程 20 个以上，实现室内主要污染物浓度比《室内空气质量标准》（GB/T 18883-2022）限值低 40%以上，能耗降低 40%以上。建设涵盖住户 3000 家以上、商用/餐饮一体化场所 10 家以上餐饮油烟清洁排放示范工程，实现主要污染物排放浓度比北京市《餐饮业大气污染物排放标准》（DB 11/1488-2018）限值低 50%以上；净化作业时声压级室内、外噪声分别低于 62dB(A) 和 70dB(A)、振动低于 1 mm/s，成本降低 20%，普及率达 30%；所有示范工程连续稳定运行 6 个月以上；形成技术标准（征求

意见稿) 2~3 项。

**关键词：**室内空气；餐饮油烟；短流程净化；高效智能调控。

#### 4.4 多目标多污染物智慧协同调控模型系统与应用

**研究内容：**识别我国 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染中长期区域差异，研究建立大气污染重点区域多目标多污染协同调控技术框架；突破人为活动预估影响源排放预测技术，建立大气污染物、温室气体和汞的人为源多目标综合管控措施模型，量化不同区域产业、能源、交通等领域大气污染物、温室气体、汞等毒害物质的减排潜力；突破多环境目标下协同减排路径优化、多部门跨区域调控评估等关键技术，构建多因素多措施驱动下人为减排与多环境效应的动态响应模型；厘清人为、自然因子在污染减排中的作用规律，突破多污染物跨介质多环境效应综合评估技术等建模技术，研制经济-能源-污染-气候-健康耦合评估模型；设计污染物减排责任分担机制，构建综合调控技术平台，开展应用示范，量化大气污染物传输环境、健康、生态多维效应，提出多目标多污染物协同调控策略。

**考核指标：**提出重点区域多目标多污染协同调控框架；建成多污染物治理措施成本效益本土化数据库(数据不少于 3000 条)，涵盖常规大气污染物、温室气体和汞；涵盖能源、工业、交通、民用等重点源的减排综合评估模型，实现每 5 年间隔的

中长期全国分地级市多污染物减排评估和预测；建成多因子驱动下人为减排与多环境效应的动态响应模型，实现空气质量和大气沉降对人为减排响应的近实时定量评估，达到国际同类水平，系统响应时间在小时级，不确定度 $<20\%$ ，综合调控效率提升 $50\%$ ；建成基于大数据和人工智能的经济-能源-污染-气候-健康综合调控技术平台，实现区县尺度多污染物减排措施成本效益分析、多目标协同减排路径优化、多部门跨区域调控评估等功能，平台在国家和重点区域实现业务化技术应用示范。

**关键词：**多目标多污染物协同；调控与决策支撑平台； $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 协同。

#### 4.5 大气污染与气候变化应对的协同机制与关键支撑技术

**研究内容：**研究分区域分阶段大气污染防治与气候变化应对协同目标，研究协同目标分解理论，建立面向碳达峰与美丽中国建设目标的分区域分阶段减污降碳协同指标分解技术方法。研发大气污染物和温室气体排放变化驱动因素分解和定量表征方法，识别近20年大气污染物和温室气体排放变化的协同驱动机制及核心驱动因素，构建融合应对气候变化和大气污染调控的高精度环境模拟系统。研究大气污染防治与气候变化协同应对技术路径，突破大气环境和碳减排双重目标约束下的大气污染物和温室气体排放预测技术、协同减排路径优化、多部门跨区域调控评估技术，研制调控动态响应评估和协同路径

模型，定量分析主要措施对“美丽中国”与“碳达峰碳中和”目标实现的贡献和综合成本，提出空气质量改善与碳达峰协同技术路线图。研发关键行业和领域减污降碳协同增效技术评估共性方法，构建最优经济成本的减污降碳协同综合评估模型，评估重点行业核心技术协同效益，提出电力、钢铁、水泥、石化、铝冶炼等主要行业领域减污降碳协同增效推荐技术清单及其适用范围。研制大气污染与气候变化应对协同技术监管平台，探索减污降碳协同增效管理融合机制，提出大气污染和气候变化协同应对的相关法律、标准、制度体系、评估考核方法及监管对策。

**考核指标：**形成面向碳达峰与美丽中国建设目标的分区域分阶段减污降碳协同指标，覆盖电力、钢铁、水泥、石化、铝冶炼、机动车、非道路移动源等主要排放源温室气体和大气污染物，空间范围覆盖全国，空间分辨率到乡镇，分辨率达工序尺度，发布主要行业领域减污降碳协同增效推荐技术清单蓝皮书 1 份。区域高精度环境模拟系统，具备应对气候变化和大气污染环境调控能力，覆盖全国主要地区，空间分辨率达到 3 公里，模拟预测时段 2020~2060 年。我国分区域分阶段大气污染防治与气候变化应对协同指标分解技术与指南（征求意见稿）；调控动态响应评估和协同路径模型和大气污染与气候变化应对协同技术监管平台，实现自主可控，空间范围覆盖全国，分辨率到乡镇，大气污染物包括 PM<sub>2.5</sub>、臭氧及其前体物，

温室气体包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等，时间跨度（2013年—2060年）；提出“十五五”和“十六五”我国推进空气质量改善与碳达峰碳中和的协同技术政策路线图，包括技术路径、核心任务、管理措施以及评估考核方法，发布技术路径设计技术指南（征求意见稿）和管理措施蓝皮书2份，并被国家部委有关部门采纳。

**关键词：**碳污融合清单；协同路线图；综合管理体系；评估模型。

#### 4.6 土壤与地下水多要素协同作用的环境基准制定方法

**研究内容：**针对土壤-地下水复合污染、环境基准体系缺失问题，研究我国土壤-地下水多要素协同作用的敏感受体筛选和保护水平确定方法，构建多要素影响的环境基准制定技术框架；研究多要素协同作用下敏感受体的暴露特征和暴露量预测方法，解析敏感受体的剂量-效应关系；研发多要素协同作用土壤和地下水环境基准制定方法，建立我国关键本土物种数据的基准基础数据共享平台；选择典型跨介质特征污染物，制定土壤-地下水多要素协同作用的污染物环境基准。

**考核指标：**形成多要素协同土壤和地下水健康和生态基准制定技术框架，提出框架的关键模块和技术方法要点；构建多要素协同污染物暴露量预测、敏感受体剂量-效应关系量化模型，预测误差低于20%；建立本土化暴露特征参数数据库，形成基

准基础数据共享平台；制订不少于4类特征污染物基准值；制定相关技术指南或规范（征求意见稿）3项。

**关键词：**多要素协同；环境基准；敏感受体；剂量-效应关系；基础数据共享。

#### 4.7 典型区域地下水污染全过程防控与管理技术

**研究内容：**围绕复杂地质条件和产业分布区地下水污染防控的重大需求，解析多源、复杂地层结构地下水污染源-汇关系；研究建立风险源指标筛查方法，创建分类分级地下水污染风险源管控技术；研究复杂区域地下水污染时空分异性，构建污染风险重点防控区划分适宜方法；研发区域地下水污染全过程、信息化监管技术，研究污染风险控源-阻断-整治全过程防控技术，开发地下水污染风险长效防控管理模式，开展示范与应用。

**考核指标：**建立区域地下水污染风险源评价指标与管控技术，风险源识别率 >90%；建立区域地下水污染全过程、信息化监管技术平台，实现污染风险动态实时、可视化监控；形成复杂区域地下水污染风险重点防控区划分方法，建立污染风险控源-阻断-整治全过程防控技术体系，选择不少于3类地下水污染防治试验区开展示范应用，90%风险源得到管控，地下水污染负荷降低90%以上，地下水安全利用率不低于90%；编制相关技术标准或规范（征求意见稿）3项，形成相关政策或技术文件，被有关政府采纳或应用。



**关键词：**区域地下水污染；指标筛查；分异特性；防控区划；长效管理。

#### 4.8 新改扩建工矿用地污染防治与信息化监管技术

**研究内容：**针对冶炼、焦化、化工、油气开采等新改扩建用地污染防治重大需求，研究特征污染物长期潜在扩散风险评估方法；研发重点设施设备渗漏监测与预防技术，开发稳定可靠的传感监测、数据采集、智能分析与预警系统，研发地下管网渗漏在线监测设备；研发污染动态诊断与智能监管技术，形成污染防治与监管技术体系；选择典型新改扩建工矿用地，开展污染防治与监管技术示范应用。

**考核指标：**形成长期潜在扩散风险评估成套指标方法，实现全过程新改扩建工矿用地安全评估；新改扩建工矿用地渗漏检测精度达到厘米级，响应时间 <1 小时，防漏检测率提高 90%；建立传感检测、数据采集、动态预警与智能监控信息化平台；选择 3 类重点监管行业新改扩建工矿场地开展示范性应用，实现实时可视化污染动态与预警表达，有效控制污染风险；形成新改扩建工矿用地污染防治与监管技术方案，被有关政府采纳或应用；编制相关技术规范文件 2 套（征求意见稿）。

**关键词：**新改扩建工矿用地；典型污染物传感器；一体化装备；隐蔽泄漏监测；在线分析；风险监管。

#### 4.9 高渗地层污染扩散通量与风险管控技术体系

**研究内容：**针对高渗透、非均质地层地下水污染长距离、大面积快速扩散风险和危害，研究地层结构、流态、污染扩展的内在关系，识别污染扩散机制与优势流通道；研究地下水污染羽流长距离扩散驱动力与限制性因素，建立污染物扩散通量评估与风险表征模型；研究污染扩散风险监测与预警技术，研发控源-截获-净化协同的污染风险管控技术体系，提出高效、低成本的污染风险长效管控技术方案。

**考核指标：**探明地下水污染扩散动力学机制，高精度刻画地下水污染扩散优势通道，精度达到厘米级；建立大尺度污染物迁移扩散通量评估模型，时间步长 <12 小时，预测误差 <20%；建立污染风险全过程多维度监测与预警响应平台，形成控源-截获-净化协同的污染风险管控技术体系，在 3 个不同水文地质条件区开展示范应用，监测预警特征指标不低于 10 项，响应时间 <24 小时，污染物扩散通量降低 90%，形成污染风险长效管控技术方案。编制相关技术标准或规范（征求意见稿）3 项，形成相关政策或技术文件，被有关政府采纳或应用。

**关键词：**非均质地层；污染扩散机制；通量模型；长效管控。

#### 4.10 海陆交互带地下水污染诊断与风险管控技术体系

**研究内容：**针对我国海岸带海陆物量交换频繁，污染时空

演化复杂问题，解析海陆交互带跨介质、多界面污染成因与主控因素，研究海陆污染交互作用，揭示海陆交互带物量交换量化关系；探究海陆交互带污染界面时空演化与驱动机制，研究建立海陆交互作用带地下水污染风险预警系统；研发源识别-过程模拟-风险预警的全链条技术体系，形成海陆交互带地下水污染风险防控技术方案。

**考核指标：**厘清海陆交互带物量交换与演化路径，形成海陆交互带地下水污染负荷评估模型，误差范围 <10%；建立海陆交互带地下水污染界面时空演化预测模型，界面刻画精度米级；构建海陆交互带地下水污染风险预警模型体系，预警特征指标不少于 5 项，响应时间 <24 小时；选择不少于 3 个典型区域开展应用示范，形成的污染物优先防控清单和风险管控方案被政府采纳。

**关键词：**海陆交互带；地下水污染；诊断预警与风险防控。

#### 4.11 高地质背景土壤污染风险管控与安全利用技术及应用

**研究内容：**针对砷、镉、汞、铬等元素地质高背景区土壤污染过程复杂，污染风险防控与安全利用技术体系缺失等问题，识别高背景叠加工业活动的土壤污染风险成因，研究地质高背景区土壤污染风险评估技术；研发污染风险管控与绿色修复成套技术，构建“风险管控-绿色修复+安全利用”技术体系与风险防控模式；研究土壤污染风险管控与修复效能的全流程评估方

法,提出地质高背景区土壤污染风险评估-安全利用全过程协同监管技术,并开展示范应用。

**考核指标:**厘清高地质背景区土壤污染方式与风险形式,创建污染风险评估指标与技术,构建出污染风险水平空间分区方法,单元尺度不超过  $0.1 \times 0.1 \text{ km}^2$ ;形成污染风险管控与绿色修复成套技术,能效比传统技术提高 30%以上;创建“风险管控-绿色修复+安全利用”技术体系与风险防控模式,选择不少于 3 个典型区域开展示范应用,单个面积不小于  $0.1 \text{ km}^2$ ,污染风险降低 90%以上,土壤安全利用率 >95%;编制相关技术标准或规范不少于 3 项(征求意见稿)。

**关键词:**地质高背景地块;健康风险评估;长期风险管控;绿色低碳修复。

## 5. 典型区域实践

### 5.1 京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{O}_3$ 协同治理技术集成示范与协同防控机制创新

**研究内容:**以  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  协同防控、消除重污染天为重点,提升区域立体监测预警、成因溯源、精准管控和智慧监管等关键技术,建立区域大气污染传输通道立体观测体系,开展试点地区  $\text{NH}_3$  减排及其对重污染天气消除影响目标观测研究,精准研判区域  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  复合污染时空演变规律和来源成因,量化

区域间、城市间大气污染跨界传输影响；建立重点行业和领域 NO<sub>x</sub> 与 VOCs 协同治理和智慧监管技术体系，提出成熟可推广应用的重点行业协同治理方案，提出空气质量目标驱动的能源结构、产业结构和交通结构调整的系统方案，探索构建区域大气氨排放控制管理体系；建立 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度双降目标约束下的精细化控制技术体系，深化区域 O<sub>3</sub> 污染协同和基本消除重污染天的大气污染联防联控与应急联动机制，提出破解跨区域、跨部门利益冲突导致大气污染治理“责权利”不对等瓶颈问题的创新机制方案；构建四大结构调整、污染协同减排和区域过程调控相结合的空气质量精细化管控技术体系，构建可复制可推广的 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 协同防控技术示范区。

**考核指标：**以 PM<sub>2.5</sub> 为主线，推进 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧双高污染的协同治理，深化 1+X 联防联控机制和体制，创建跨省超大城市群区域大气污染综合治理的国际范例，科技助力京津冀各城市 PM<sub>2.5</sub>“十四五”全面达标、基本消除重污染天气、臭氧污染进入下行通道。区域大气污染传输通道立体观测融合至少 3 颗高分卫星、16 个以上通道站、25 辆以上走航车观测，观测时间分辨率≤30 分钟，污染物含括 VOCs、PM<sub>2.5</sub>、臭氧等常规污染物以及关键自由基，目标观测追捕重污染气团峰值准确度超过 80%；系统厘清区域 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 复合污染时空演变规律和来源成因，量化区域间、城市间 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染跨界传输影响，成因量化结果多模式校验准确度超过 90%；提出可推广应用的重

点行业  $\text{NO}_x$  与  $\text{VOCs}$  协同治理和智慧监管方案，行业治理和监管落实到园区和排放口，监管可信度超过 95%；提出“十四五”期间基本消除区域重污染天的管控路径和政策建议方案，基本消除重污染天气管控方案目标实现准确度超 90%，被京津冀各省级政府采纳应用；构建  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  浓度双降目标约束下的空气质量精细化管控技术体系，提出破解大气污染治理“责权利”不对等的创新机制方案，发布蓝皮书 2~3 份，并被京津冀及周边地区大气污染防治协作机制及省市级政府采纳应用。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**重污染天消除； $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  协同管控；“责权利”机制方案；精细化管控技术示范。

## 5.2 粤港澳大湾区二次污染与气候变化协同应对的综合防控技术示范与实践

**研究内容：**针对粤港澳大湾区建设“美丽湾区”协同应对二次污染与气候变化的技术与管理需求，通过开展粤港澳三地合同步观测和模拟，研究粤港澳大湾区跨境、跨区域、跨城市的二次污染形成、传输与演变机制及其对气候变化的响应；研发工业源等重要污染源近实时排放表征技术，构建涵盖粤港澳三地的大气组分、温室气体和有毒有害物质动态排放清单；建立新一代基于统一质控的大湾区光化学、 $\text{PM}_{2.5}$  组分和温室气体立体监测网络，构建粤港澳大湾区空气质量健康指数（AQHI），

研发基于空气质量预报系统的大湾区健康风险预测与评估平台；建立综合考虑环境-经济-能源-健康多污染物耦合评估模型，开展“双碳”目标下粤港澳大湾区实现 WHO-III 空气质量目标的路线图研究，提出基于四大结构调整与末端控制相融合的大湾区一体化大气污染物与温室气体联合减排科学方案和跨境协同实施机制；构建粤港澳大湾区二次污染与气候变化协同应对综合防控和高密度城市空气质量精细化管治技术体系，并在粤港澳三地同步开展应用示范。

**考核指标：**探索和建立与 WHO-III 相适应的二次污染与气候变化协同应对的关键技术、技术体系、实施机制和典型案例，科技助力粤港澳大湾区 PM<sub>2.5</sub>“十四五”全面实现 WHO-II、部分城市达到 WHO-III、臭氧 3 年滑动平均值比 2020 年下降 15%。具体指标：构建粤港澳标准统一的大湾区二次污染与温室气体监测网络、动态源排放清单、人群和个体健康预警和多污染物协同调控平台，天空地数据融合和同化的分辨率达到 1 km 和 1 小时，粤港澳综合同步观测数据集包括冬夏等典型季节各 1 个月以上在线观测数据，近实时网格化排放通量空间分辨率达百米级、误差小于 30%，7 天区域臭氧污染预报准确率由 60% 提升到 80%；提出与“美丽湾区”目标相适应的环境空气质量标准（征求意见稿）、粤港澳空气质量健康指数预报技术指南（征求意见稿）各 1 份；构建四大结构调整、大气污染物和温室气体协同减排相结合的大湾区一体化联合减排科学方案和跨境

协同实施机制，并被粤港澳三地政府采纳应用。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**二次污染；气候变化；协同应对；粤港澳大湾区。

### 5.3 四川盆地多介质跨圈层大气污染与气候变化协同控制技术与应用示范

**研究内容：**针对成渝双城经济圈高质量发展和环境空气质量深度改善的技术需求，研究盆地复杂地形和气候变化条件下区域边界层气象演变规律、大气臭氧与 PM<sub>2.5</sub> 及前体物变化特征、主要污染物多介质（大气、农田、山地）相互作用，揭示影响大气污染变化的关键驱动因子；开展不同气象条件下区域二次污染形成机制的定量化研究，构建二次污染及其前体物的非线性关系，定量评估二次污染局地生成与区域传输、前体物人为源与天然源排放的贡献；构建基于多污染物跨介质相互作用的二次污染监测预警与协同控制业务化决策支持平台，实现二次污染快速精细解析与会商诊断，推动区域二次污染物前体物控制决策方案应用示范；研究成渝双城经济圈绿色低碳发展途径，提出能源结构、产业结构、交通结构和土地结构优化情景下气候协同的空气质量达标路线与深度改善战略，制定大幅减排 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的区域和城市技术方案。

**考核指标：**形成能源结构清洁化和产业结构低碳化快速发



展过程中解决大气污染问题和气水土生多介质协同治理区域PM<sub>2.5</sub>和臭氧污染的示范案例，科技助力成渝地区达标城市数从40%到“十四五”全面达标、约50%城市达到或接近WHO-II的要求、臭氧污染进入改善通道。具体指标：阐明四川盆地复杂地形下二次污染物耦合形成机制，多技术定量典型污染事件二次污染与前体物非线性关系的一致性达到90%；建成基于多污染物跨介质相互作用的二次污染物立体监测预警与决策支撑业务化平台，复杂地形表征垂直分辨率小于50米，跨大气、土壤和地下水的典型污染物超过10个（包括典型碳、氮、硫同位素），天空地数据融合和同化的分辨率达到1 km和1小时，7天区域臭氧污染预报准确率由50%提升到80%，实现二次污染防控方案优化和效果的快速评估；提出成渝双城经济圈二次污染物调控原理与协同控制技术方方案，以及气候协同的空气质量根本改善战略与绿色低碳发展路径，并被省级人民政府采纳应用。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**复杂地形；气候变化；二次污染；协同应对。

#### **5.4 长三角PM<sub>2.5</sub>与臭氧全面达标技术及协同降碳策略集成示范**

**研究内容：**围绕长三角区域空气质量全面达标与减污降碳等紧迫需求，研发适合长三角湖陆交错等复杂下垫面、量化减

污降碳协同的天空地一体化集成探测技术，阐明区域大气污染物及温室气体传输规律，揭示区域边界层理化结构对人为排放和气象要素响应机制，突破污染过程全面达标精细化管控技术；解析区域能源、环境、健康、生态的相互作用机制，构建长三角  $\text{PM}_{2.5}$  和臭氧污染全面达标技术以及考虑减碳策略的协同调控决策平台，实现大气污染物和温室气体实时动态源汇监测与监管、污染过程达标削峰降级、应急措施制定及评估；创新区域一体化协作机制，开展四大结构调整和重点行业深度治理减排潜力评估，提出空气质量全面达标及碳达峰约束下协同减排技术方案；开展重点区域和典型行业应用示范，支撑 2030 年区域空气质量全面达标，推进与应对气候变化的协同。

**考核指标：**可应用于复杂城市群区域二次污染特征及演化过程精细化表征的天-空-地一体化综合探测和融合平台，探测范围覆盖整个长三角，垂直达到 10km 高，天空地数据模式同化和融合水平精度分辨率达到 100 米，时间分辨率 10 分钟，相对误差小于 10%；提出长三角  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{O}_3$  全面达标与协同减排的技术方案与路径，构建区域空气质量及碳减排协同调控业务化决策技术及平台；建立可实现未来 7~14 天长三角区域二次污染过程防控的防控方案优化与效果快速评估系统，防控对象达到乡镇和企业，时间尺度达到小时，投入业务化应用；形成成熟可推广应用的结构调整与重点行业深度治理关键技术案例库和减排潜力数据库，提出区域产业、能源、交通运输结

构调整路径与技术方​​案；提出区域空气质量全面达标及碳达峰技术方案及区域一体化协作机制深化建议，被长三角省级政府管理部门采纳。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>-碳协同控制；立体集成探测与数据融合；智能模拟与监管技术。

## 5.5 汾渭平原复杂山地污染传输机制与协同治理技术示范

**研究内容：**基于汾渭平原区域复杂山地的地形特征、气象因素及能源、产业布局特征，构建天-空-地基相结合的立体综合观测体系，开展同位素测量、无人机监测和边界层-对流层垂直探测与遥感反演监测，研究汾渭平原复杂地形、边界层特征及 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 复合污染成因，量化评估区域重污染天气 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 传输规律与影响；针对区域钢铁、焦化、煤化工、民用燃烧源等重点行业排放突出特征，完善区域动态更新的高时空分辨率污染源排放清单，构建行业治理技术和管控措施减排效果定量评估技术方法，评估其减排和环境效果，提出中长期减污降碳协同路径；集成并进一步提升“监测监管-成因溯源-管控评估”等区域大气污染联防联控技术体系，制定 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染协同控制和基本消除重污染天气综合解决方案，提出复杂山地城市群大气污染联防联控机制优化建议；以西安、太原等城市绿色发展升级转型为重点，开展典型行业和领域大气污

染物与主要温室气体监测，研发重点区域与行业减污降碳路径优化关键技术，集成清洁能源与用能方式绿色改造技术，为其他城市绿色发展转型提供范例。

**考核指标：**汾渭平原区域钢铁、焦化、煤化工、民用燃烧源等重点行业治理技术和管控措施库一套；每周动态更新的高时空分辨率污染源排放清单，工业源落实到关键工序过程，空间分辨率达到 1 公里；汾渭平原 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 区域传输研究数据集 1 套，涵盖重要区县不少于 10 个，水平分辨率达到 3 km，时间分辨率小时，时间跨度不低于 2 年；提交区域 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 减排综合技术方案，以及 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染协同防控综合解决方案；西安和太原等关键城市基本消除重污染天气和减污降碳路径优化方案各 1 套，完成不少于 5 个重点行业和重要领域的温室气体排放监测，研究成果被汾渭平原地区省级政府采用。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**复杂地形-气象-污染影响机制；特色行业治理与管控；盆地区域联防联控机制；减污降碳优化。

## 5.6 长三角精细化工园区场地复合污染协同修复技术集成及示范

**研究内容：**针对长三角精细化工园区连片污染场地分布广、土壤-地下水复合污染严重、交互过程复杂、单一技术难以解决等难题，筛查确定优先控制污染物清单；研究特征污染物在浅

埋复杂流场环境行为、污染通量、时空分布和交互作用；厘清多种赋存形态的典型污染物与环境介质的界面作用机制，提出并建立分区分类分级的风险评估方法及管理手段；研究靶向、高效、长效的新型绿色修复技术体系；建立长效稳定的多介质协同整治体系与多技术集成体系及低碳修复模式，开展技术应用示范。

**考核指标：**构建长三角化学原料、原药制造等综合精细化工园区土壤-地下水优先控制污染物清单，覆盖园区高风险特征污染物 >90%；探明长三角浅埋复杂流场中特征污染物的环境行为、交互作用和时空演化规律，构建污染物多介质迁移转化模型，模拟误差 <20%；建立化工园区土壤-地下水污染分区分类分级风险评估方法；形成土壤-地下水污染综合防治技术体系，研选不少于 6 种低碳、绿色、持久且经济可行修复材料，修复效率提高 30%以上；创建精细化工园区多点连片污染场地土壤-地下水协同治理新模式，开展应用示范面积 >5 km<sup>2</sup>，有效示范周期不少于 1 年，修复后土壤-地下水污染风险管控达标，治理的总体能耗及碳排放当量降低 30%；编制相关指南或技术规范（征求意见稿）2 项以上。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**长三角精细化工园区；多介质协同治理；多技术协同修复。

## 5.7 珠三角典型产业集群区土壤与地下水协同修复技术及示范

**研究内容：**针对珠三角电镀、制革、陶瓷等典型村镇级产业集群区土壤-地下水污染协同治理及周边污染敏感区域综合防控需求，研究集群区复合污染来源、形成机制与多介质跨界面交互作用；研发特征污染物高精度准确识别与风险筛查技术，形成优先控制污染物管控清单；研发快速响应、高灵敏度实时在线监测技术及装备，建立土壤-地下水复合污染智能监控与预警网络；研选绿色、低碳、高效的场地污染防-控-治技术；构建集群区及周边敏感用地土壤-地下水污染综合防控和安全利用新模式，开展区域性应用示范。

**考核指标：**建立珠三角典型村镇级产业集群区多源跨区域土壤-地下水多介质污染源解析、动态交互及历史反演的精准示踪技术体系，揭示典型村镇级产业集聚区土壤-地下水污染多介质跨界面交互作用特征，构建区域污染物迁移转化模型，模拟误差  $<20\%$ ；构建产业多次迭代的集群区场地及周边敏感用地优先管控污染物清单（涵盖 2 个以上典型产业）；建立覆盖集群区及周边敏感用地的土壤地下水污染智能化实时监控与预警平台；构建绿色、低碳、高效的场地多介质复合复杂污染防-控-治技术库，针对集群区及周边敏感用地分别提出绿色、低碳、高效的场地多介质复合污染防控技术体系与综合防控解决方案；选择至少 2 个典型产业集群区（单个面积  $>5\text{km}^2$ ，且辐射周边敏感用地面积  $>10\text{km}^2$ ）开展应

用示范，土壤-地下水环境质量到达管控标准，污染地块安全利用率 >95%；编制相关指南、技术规范或标准（征求意见稿）2 项以上。

**有关说明：**要求部（部）省联动。

**关键词：**珠三角产业集群区；周边敏感用地；多介质复合污染；区域综合防控。

## 5.8 特大城市群工业集聚区大气-土壤-地下水污染综合防控关键技术及示范

**研究内容：**针对长江中游特大城市群工业集聚区水-土-气复合污染综合防控需求，重点关注多介质挥发性污染物的跨单元跨区域传输途径，集成多介质跨界面通量原位在线监测与区域立体、动态探测技术，阐明区域碳氮硫等关键元素，汞、VOCs、BaP、氨氮等特征污染物在大气-土壤-地下水中的时空分布、排放与沉降特征；揭示多污染物地气相互作用机制及演变规律，厘清多界面生物地球化学循环关键过程，建立区域大气-土壤-地下水复合污染物的多界面多过程传输与动态预测方法；开发跨介质三维追踪溯源技术，识别污染物界面通量和环境健康风险，提出优控污染源筛查方法以及污染负荷消减量核定方法；综合集成多介质污染控制的材料、技术和设备，构建阻断多源多介质污染物跨单元跨区域传输的技术与设备体系；开展大气-土壤-地下水的多源多污染物跨介质综合管控示范，显著提升

特大城市群水-土-气污染综合治理水平。

**考核指标：**建成多介质跨界面通量原位在线监测与区域立体、动态探测网，代表性观测点位不少于 50 个，可同时探测大气、土壤和地下水中的碳氮硫等关键元素，汞、VOCs、BaP、氨氮等特征污染物；提供涵盖特大城市群范围的至少 1 年的、月际特征污染物在多介质中的三维动态分布特征、地气交换通量、排放和干湿沉降量的系统性数据；区域大气-土壤-地下水复合污染物的多界面多过程传输与动态预测模型，可根据动态监测数据实现参数的实时校正，精度不低于 1:50000，浓度预测误差小于 20%；跨介质三维追踪溯源技术，分辨率达到百米级，优控污染源筛查方法以及污染负荷消减量核定方法适用于跨地区跨介质，污染负荷消减量细化到单个优控污染源和年尺度，核算误差小于 20%；集成多介质污染控制的材料、技术和设备，污染物跨介质传输削减率达到 90%以上；在大气、土壤和地下水污染问题较突出区域，建成综合管控示范区（面积  $>100 \text{ km}^2$ ），实现污染地块安全利用，地下水质量达到 III 类水质标准，空气质量优良率达到 90%以上；提出区域土-水-气多介质污染综合防治系统解决方案，构建可复制可推广的区域场地污染绿色防控新模式。

**关键词：**区域水土气复合污染；多介质跨界面传输；污染溯源；区域防控新模式。



## 5.9 西北煤-电集聚区土壤与地下水污染综合防治关键技术及示范

**研究内容：**针对黄河中上游大型煤炭聚集地煤-电开发密集、土水环境脆弱、保水采煤矛盾尖锐的特点，研究不同开采方式下地下水位的动态变化特征及重金属、硫化物和多环芳烃等典型污染物在地下水中的释放、迁移与转化规律；开展土壤-地下水污染分区多水平动态监测，建立矿渣堆场、地下采空区、露天采坑等区域地下水中典型污染物的传输与风险预测模型；研发土壤-地下水重金属、硫化物及多环芳烃等典型污染物修复材料、装备与技术；创建煤-电集聚区多点源复合污染的分区多水平立体修复技术；通过集成创新，形成西北煤-电集聚区土壤-地下水多点源控制、多区协同、多水平修复的治理技术体系，并开展工程示范。

**考核指标：**研发煤-电集聚区土壤-地下水污染物的现场快速探测与识别技术，探测指标数覆盖地下水质量标准中的重金属、硫化物和多环芳烃，检测限不低于Ⅰ类水限值；开发具有自主知识产权的特征污染物三维动态分布可视化模型和软件系统，空间误差低于1米，浓度误差小于10%；构建土壤-地下水污染物传输模型及环境风险评估模型，精度>85%；创建煤-电集聚区多点源复合污染的分区多水平立体修复技术，（覆盖2个矿区及煤电废物处置场地、2个不同地下水含水层），污染物去除率>90%，且稳定运行2年以上；

形成标准规范 2 部。

**关键词：**干旱-半干旱区；煤-电集聚区；土壤-地下水复合污染；区域污染协同治理。

### **5.10 北方喀斯特废弃矿区地下水污染防控与安全利用关键技术及示范**

**研究内容：**针对我国北方喀斯特地区煤炭与岩溶地下水伴生特点和酸性矿坑水污染防控关键技术需求，研究废弃煤矿区矿坑水分布规律，建立矿坑水高精度探测理论和方法；揭示矿坑水与地下水、地表水相互作用规律，建立矿坑水污染岩溶地下水的预测预警模型；识别矿坑水形成条件和关键水文-生物地球化学过程，研发矿坑水的抑制、阻控和资源化技术；阐明矿坑水特征污染物在岩溶地下水中迁移、转化规律，研选岩溶地下水污染防控技术；通过集成创新，构建北方喀斯特废弃矿区矿坑水污染的“防-控-治-用”全链条技术体系，并开展工程示范。

**考核指标：**矿坑水探测理论和方法 1 套，矿坑水污染岩溶地下水预测预警模型，精度不低于 20%；矿坑水的抑制、阻控和资源化技术不少于 3 种，采空区积水量降低 70%以上且稳定，硫酸盐和铁锰等关键组分资源化 70%，pH 值 6.5-8.5；岩溶地下水污染修复技术不少于 3 种，建立 3 个以上示范工程（单个规模  $>10\text{km}^2$ ），岩溶地下水和地表水特征污染物去

除率 >90%，修复后的水质达到 III 类以上，工程示范区总体降碳 >30%，形成北方喀斯特废弃矿区岩溶地下水综合防控方案，制定相关规范标准 3 项以上。

**关键词：**北方喀斯特废弃矿区；污染预测预警；岩溶水污染修复。

## 6. “青年珍珠链”项目（青年科学家项目）

### 6.1 大气复合污染追因与治理前沿技术

**研究内容：**针对大气污染协同控制原理与精细化治理技术体系中原创性理论创新比重小、核心瓶颈技术突破慢等问题，以多污染物多介质交互作用为主线，研究多污染物跨介质不同环境问题相互关联和深度融合的核心科学问题，突破高精监测预警技术和尖端治理技术瓶颈，探索多污染跨介质综合治理的新思路。

- 高精度在线探测技术：生物气溶胶多组分高灵敏度监测技术、臭氧及前体物无盲区同步垂直探测技术、云雾精准采样与理化性质在线测量技术。
- 来源成因核心原理：硫转化机制与同位素示踪技术、VOCs液相与固相氧化机制及分子识别技术、城市残留层化学机制及影响量化评估、污染物跨介质溯源模拟技术。
- 尖端治理技术前沿：烟气减污降碳协同治理的新材料、低能耗废气治理的新技术、烟气污染物资源化增值利用新方法。

**考核指标：**聚焦关键科学难题，实现技术突破，技术原理独特，突出自主原创性研发，在大气污染高精监测预警技术、来源成因核心原理、跨介质迁移扩散溯源模型、尖端治理技术前沿等方面取得原创性的基础理论和技术创新引领。

**拟资助项目数：**10 项，其中高精度在线探测技术 3 项、来源成因核心原理 4 项、尖端治理技术前沿 3 项。

## 6.2 地下水新污染物分析传感技术及核心器件

**研究内容：**针对地下水卤代化合物等新污染物原位监测的需求，创新地下水新污染物原位传感检测方法，研发地下水新污染物高选择性、高灵敏度、高准确度的传感器件，开发集成传感信号处理和数据传输的小型监测设备，在重点行业污染场地开展现场在线检测验证。

**考核指标：**聚焦关键问题，创新地下水卤代化合物等新污染物原位监测传感器件和设备，其中卤代烃类新污染物检出限达到地下水 III 类标准。

**拟资助项目数：**3 项。

## 6.3 土壤-地下水系统中微塑料形成机制与污染风险

**研究内容：**针对历史不规范填埋场或塑料加工场地中微塑料来源、形成及风险机制不明等问题，研究土壤-地下水系统中微塑料成分、粒径、形态等污染特征，探明场地土壤微塑料的形成机制与跨介质迁移特征，研究土壤-地下水系统中微塑料的

全过程暴露途径，识别敏感生物受体，明确微塑料的尺度-剂量-效应关系，评估微塑料的潜在环境风险。

**考核指标：**建立适用于场地土壤体系的微塑料分离技术和分析方法，阐明微塑料形成机制；建立微塑料在土壤-地下水中跨介质迁移转化模型，预测误差 <30%；建立土壤-地下水中微塑料健康风险评估技术模型。

**拟资助项目数：**3 项。

## 7 集成项目

### 7.1 土壤与地下水污染综合治理理论与技术体系

**研究内容：**基于重点专项研究成果梳理与凝练，研究建立土壤、地下水污染综合治理科技创新方案；研究建立综合治理技术、材料与装备评估标准体系和绿色创新治理模式；系统凝练综合治理体系与重大标志性研究成果，研究形成综合治理技术原理与方法体系，创制综合治理技术、材料、装备等工程化应用系统，研究建立污染风险防控与预测预警技术体系；研究制定污染综合治理与安全利用系统解决方案。

**考核指标：**提出土壤-地下水污染综合治理科技创新体系；建立风险防控与治理技术评估方法，形成评估标准 5 项，提出综合治理技术体系与创新模式；凝练标志性成果 6 项，制定污染综合治理与安全利用成套技术方案；建立高效精准监测监管、绿色可持续修复与风险管控智慧决策系统，政府采纳或推广应

用。

**关键词：**绿色创新治理模式；综合治理技术体系；智慧决策管理系统。

北京大学 A000009