

## 土壤重金属污染的生物炭修复技术

项目成熟阶段

 实验室研发 中试放大 成熟应用

**概况：**农田耕地土壤污染的修复技术要求原位地有效修复，同时不破坏土壤肥力和生态环境功能。发展绿色、安全、环境友好的土壤生物修复技术既能满足这些需求，又能适用于大面积污染农地土壤的治理，具有技术和经济上的双重优势。

利用农业废弃物（如植物秸秆、牲畜粪便等）生物质，在一定温度下通过厌氧/缺氧经热解炭化制备成生物炭，并将生物炭按照一定比例添加入Cd、Pb污染的重金属农田土壤中。生物炭具有多孔性和大比表面积的特点，同时生物炭中含有有机阴离子和碳酸盐等大量碱性物质，能够修复大量土壤中的重金属，实现重金属的固定，降低土壤中重金属的生物有效性和在农作物可食部分的浓度，从而降低食物重金属对人体的毒害作用。生物炭同时可以提高酸性土壤的pH，改善土壤酸化，提高保水率，进一步改良土壤，提高农作物的产量。

**技术特点：**本研究开发出了可有效阻控水稻可食部分（稻米）中镉积累的生物炭阻控技术，其主要特征是将水稻秸秆在高温、缺氧条件下加工成生物炭，在水稻种植前期按照一定比例施用在镉超标土壤中即可。

该技术目前正处于田间试验阶段，通过控制稻田水分管理模式，和施用生物炭为主的阻控技术，可使稻米镉含量约降低30-40%。该技术稻田超标镉阻控效率高，对于污染面积大，同时要求不破坏土壤肥力和生境的农田土壤修复比较适宜。该方法适用于中轻度镉超标的水稻田，特别是pH<6.0的酸性水稻田污染。但相对于镉超标5倍以上的重度污染土壤并不适用。



由不同农业废弃物制备的生物炭

## 基于废弃生物质循环利用的水热炭土壤修复技术

### 项目成熟阶段

 实验室研发

 中试放大

 成熟应用

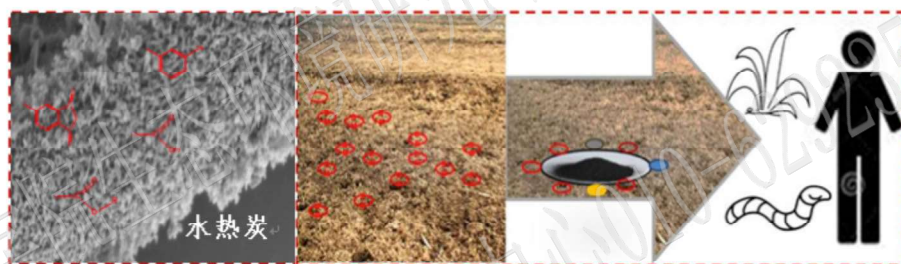
**概况及应用领域：**将废弃生物质（如农作物秸秆、禽畜粪便等）转化为水热炭并将水热炭按照一定比例添加到污染土壤中达到土壤修复目的的水热炭土壤修复技术具有技术与经济上的双重优势。水热炭中的营养元素可以直接被作物吸收，水热炭发达的孔结构以及丰富的表面官能团，可以有效提高土壤保水保肥效果；水热炭-土壤强的界面作用可以改变土壤中污染物的赋存形态，实现土壤中重金属的钝化以及有机污染物的限域释放，从而有限的阻断重金属以及有机污染物进入作物的路径；另外，水热炭芳香化程度低，可快速补充土壤中的有机质，提高土壤肥力。

**技术特点/设备参数：**（1）生产成本低；移动式生产设备便于就近对生物质进行转化利用；（2）可对水热炭的化学组成、表面官能团以及孔结构进行调控，适用不同污染土壤（重金属污染、有机物污染以及复合污染）的修复；（3）该技术可对多种不同来源生物质进行共处理转化水热炭修复剂。

**专利和获奖情况：**该核心技术已申请3项国家发明专利。

**市场分析：**由于农业生产的污水灌溉，化肥、农药、农膜等农业投入品和畜禽粪便的不合理使用造成农田土壤复合污染非常严重（重金属、有机污染物），修复污染土壤实现农村可持续发展是我国面临的重要挑战。该技术以废弃生物质为原料制备的土壤原位修复剂可以高效原位钝化土壤中的重金属、有机污染物，提高土壤肥力，在实现在提高土壤修复效率、降低修复剂生产成本的同时也为大量废弃生物质找到了一条行之有效的高附加值利用技术，具有非常广阔的应用前景。

**合作方式：**技术转让、技术服务。



废弃生物质制备的水热炭

## 基于微量元素平衡的农田土壤重金属污染生物阻控技术

### 项目成熟阶段

 实验室研发 中试放大 成熟应用

**概况及应用领域：**在系统研究土壤—作物体系不同微量元素间竞争和拮抗关系的基础上，研发出基于微量元素平衡的农田土壤重金属污染生物阻控技术。该技术利用生物地球化学机制，依据土壤性质及作物类型，形成以微量元素为主要成分的复合调理，一方面通过元素拮抗降作物重金属吸收，另一方面通过改变土壤重金属赋存形态，降低其生物可利用性，达到改善土壤环境质量和提升土壤重金属环境容量，进而保障农产品安全的目标。该技术已经成功应用于稻田镉污染治理、菜地重金属污染治理和冬小麦土壤重金属污染修复。

**技术特点/设备参数：**（1）基于该技术形成的产品，针对性强，原材料易获取，价格低廉，修复效果良好且对作物生产有益。（2）施用方式简单，可以作为基肥或追肥施用，不影响农业生产，每亩施用量小于100公斤，易操作易推广。

**专利和获奖情况：**该核心技术已申请1项国家发明专利并授权。

**市场分析：**我国农田重金属污染严重，未来10-20年甚至更长一段时间，农田重金属污染都将是困扰我国很多区域社会发展的一个重要问题之一，初步估算，我国有上亿亩的重金属污染农田需要修复或改良。相比传统的钝化修复技术、植物萃取技术等，本技术结合农业生产的特点可在低成本下实现中轻度重金属污染农田的生产，在农田重金属污染修复方面有广阔的应用前景。

### 实际应用案例：

- 湖南省攸县稻田镉污染修复示范工程（100亩）
- 韶关市翁源县铁龙林场重金属污染土壤修复示范EPC工程（969亩）
- 河南济源冬小麦重金属污染耕地修复示范工程



湖南省攸县大同桥镇稻田镉污染修复示范工程

## 原油污染土壤生物修复工艺

项目成熟阶段

实验室研发

中试放大

成熟应用

**概况及应用领域：**化学与物理处置法去除环境污染物存在成本高、二次污染等一系列问题，而生物处理技术则避免了上述问题。本技术研发的原油污染土壤生物修复工艺，依据不同油田原油污染土壤的情况提供合理的工艺方案，实现原油污染土壤的生态治理。本技术体系在处理效果、处理成本、前期投入、能耗、不引入二次污染等环节具有明显的优势。本技术体系可用于石油开采、石油炼制、石油产品下游生产和服务造成的环境污染修复治理领域。

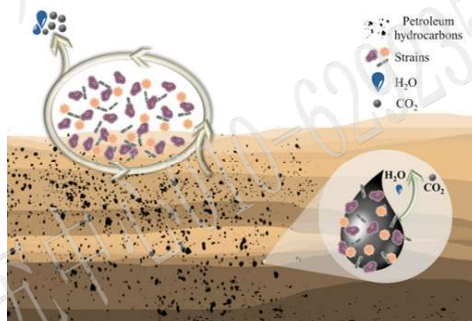
**技术特点和工艺流程：**本技术体系涉及的生物修复工艺包括原位生物修复和异位生物修复，根据现场实际环境和治理需求，提供生物堆法、生物通风法、生物强化发、生物刺激法和生物反应器等多种技术。工艺流程包括：工艺设计、生产实施、维护验收三个主要阶段。污染土壤处理后可满足环保要求，总石油烃含量小于2‰，土壤微生物生物量恢复至周边未污染土壤指标相当。

**专利和获奖情况：**该核心技术已申请3项国家发明专利并授权。

**市场分析/应用前景：**目前我国每年产生的含油污泥总量达500余万吨，石油污染土壤面积超过3亿m<sup>2</sup>，且逐年呈上升趋势。各石油企业均面临含油污泥综合利用及处置的问题，技术需求迫切。生物修复对环境影响小、无二次污染；设备投资少，成本低；操作简单，应用前景广阔。

**示范与应用案例：**针对西部某油田场地石油污染土壤，开展了生物修复中试实验，实验处置了100吨高含油污泥，通过强化微生物修复效果，处理后的土壤其含油率小于2‰，达到国家标准。

**合作对象及方式：**技术开发和转让、技术服务



石油污染土壤的生物修复技术

## 有机污染土壤热及耦合修复技术及装备

### 原位电阻加热及耦合土壤修复技术

项目成熟阶段  实验室研发  中试放大  成熟应用

**概况及应用领域：**热脱附技术利用热交换加热土壤，使有机污染物挥发或分离的土壤修复技术。该技术修复效率高，但面临能耗大、周期长、成本高的瓶颈。原位电阻加热通过高密度电法精准布点和运行参数的反馈调节，实现低碳高效土壤修复。原位电阻加热耦合化学氧化、微生物修复等技术可大幅降低修复能耗、缩短修复周期、降低修复成本，在农药厂、化工厂等有机污染场地修复中具有广泛应用前景。

**技术特点/设备参数/工艺流程：**

- 耦合技术节能40%以上，节约土壤修复成本15%以上
- 污染物去除率达97%以上，修复周期减少15%以上
- 结合高密度电法，实现精准布点加热和运行参数反馈调节

**专利和获奖情况：**

该核心技术已获得2项国家发明专利授权

**市场分析/应用前景：**

该技术可广泛应用于石油化工、退役有机污污染场地修复技术的节能降耗。

**示范与应用案例：**原位电阻加热及耦合土壤修复技术在苏州市土地储备中心的苏州溶剂厂原址北区28万 $m^3$ 有机污染土壤原位电流加热修复工程中进行了中试运行，实现了有机污染土壤节能高效修复。

**合作对象及方式：**技术转让、技术服务



电阻加热耦合化学氧化/微生物技术技术原理



苏州溶剂厂电阻加热土壤修复中试现场

## 有机污染土壤热及耦合修复技术及装备

### 异位燃气堆体加热土壤修复技术

项目成熟阶段  实验室研发  中试放大  成熟应用

**概况及应用领域：**异位燃气堆体加热技术是在污染土壤堆体中设置燃气加热棒提高土壤温度，使有机污染物从土壤中挥发后收集处理的土壤修复技术。针对热脱附土壤修复中能源利用率的瓶颈，该技术通过管路优化布设、热量二次回用大幅提升污染物的去除率，降低修复能耗，在有机污染场地修复中具有广泛应用前景。

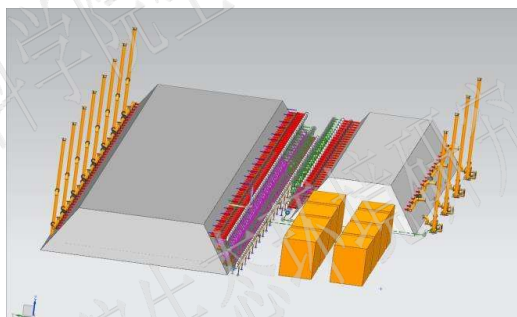
**技术特点/设备参数/工艺流程：**

- 适用于高粘、高含水率等不同质地土壤
- 污染物去除率高，修复周期短
- 修复过程可控，能耗相对较低

**市场分析/应用前景：**异位燃气堆体加热土壤修复技术大幅削减了修复成本，在退役农药厂、化工厂等有机污染场地修复中应用前景广泛。

**示范与应用案例：**异位燃气堆体加热土壤修复技术在山东省临沂市罗庄区石油烃污染土壤修复项目中应用，大幅缩短了修复周期，修复后土壤满足建设用地一类用地风险筛选值要求。

**合作对象及方式：**技术转让、技术服务



异位燃气堆体加热技术技术原理



山东省临沂市某化工厂有机污染土壤修复工程

## 有机污染土壤热及耦合修复技术及装备

### 撬装化异位直接/间接热脱附技术

项目成熟阶段  实验室研发  中试放大  成熟应用

**概况及应用领域：**热脱附技术通过加热污染土壤促使土壤中挥发、半挥发性有机污染物脱附去除，直接热脱附通过火焰加热、间接热脱附通过高温烟气加热。撬装化设备集成重要功能组件和智能化装备，增强了设备机动性，大幅缩减了安装周期。

**技术特点/设备参数/工艺流程：**

1. 撬装化直接热脱附装备处理能力 $\geq 20\text{t/h}$ ，结合自主研发的土壤预干燥或烟气余热利用技术，能耗 $\leq 2700\text{MJ/t}$
2. 撬装化间接热脱附装备处理能力 $\geq 8\text{t/h}$ ，结合自主研发的分段中心加热和烟气热回用技术，能耗 $\leq 1800\text{MJ/t}$
3. 装备集成化、撬装化、智能化、全国产化

**专利和获奖情况：**撬装化直接热脱附和间接热脱附技术分别获得两项国家发明专利授权。

**市场分析/应用前景：**撬装化异位直接/间接热脱附装备通过全国产化实现成本优化，通过集成化、撬装化、智能化提升了修复效率，广泛适用于退役化工厂等有机污染场地修复。

**示范与应用案例：**撬装化异位直接和间接热脱附技术分别在广东省广州市广船项目和柳州市造漆厂土壤修复项目工程应用，处理能力和能耗均达到设计要求。

**合作对象及方式：**技术转让、技术服务



广州市广船项目撬装化直接热脱附



柳州造漆厂间接热脱附装置工程应用

## 有机污染土壤热及耦合修复技术及装备

### 污染土壤与油泥阴燃处理技术

项目成熟阶段  实验室研发  中试放大  成熟应用

**概况及应用领域：** 阴燃技术以重石油烃污染土壤、油泥为处理对象，反应启动后仅利用有机污染物或固废自身反应热量，而污染土壤多孔介质或固废提供充裕的反应比表面积，且能蓄热保温传递热量引燃下游区域，实现反应自维持。

**技术特点/设备参数/工艺流程：**

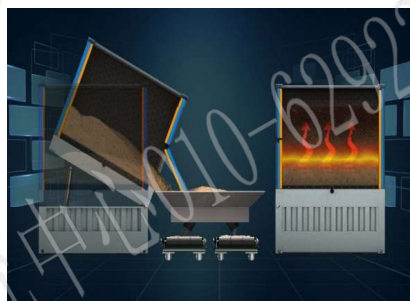
- 反应自维持，点火后无需外部燃料，处理成本低
- 可回收油类物质，实现资源化利用
- 适用范围广，处置效果好，二次污染可控

**市场分析/应用前景：** 阴燃技术广泛适用于焦化、石化等重污染场地与污泥、油泥、粪便等有机高含水固废处置。

**合作对象及方式：** 技术转让、技术服务



污染土壤与油泥阴燃处理技术  
中试平台



20吨/批次阴燃  
装置示意图



## 有机污染土壤热及耦合修复技术及装备

### 热修复过程数值仿真&工程计算平台

项目成熟阶段

实验室研发

中试放大

成熟应用

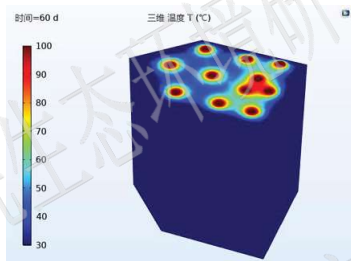
**概况及应用领域：**针对土壤热修复过程中能耗高、修复周期难预测、工程实施缺乏理论指导等现状，开发了三维数值仿真模型，高精度预测土壤内热量传递、物质迁移等过程；基于三维仿真模型，开发了工程计算平台，用于指导工程设计和优化。

**技术特点/设备参数/工艺流程：**

- 预测修复周期、能耗等，精准评估修复成本
- 理论指导施工，避免过度修复
- 直观、深入认识修复过程，优化工程实践

**市场分析/应用前景：**热修复过程数值仿真&工程计算平台广泛适用于各种类型的有机污染场地热修复参数设计和工程模拟。

**合作对象及方式：**技术转让、技术服务



热修复三维数值仿真技术

原始数据	修复目标	优化变量 (输出)
修复见地面积 (m <sup>2</sup> )	土壤平均含水率 (%)	
污染物深度 (m)	土壤平均含油量 (kg/m <sup>3</sup> )	
污染物浓度 (mg/L)	土壤温度 (kg/m <sup>3</sup> )	
污染物挥发系数 (L/s)	土壤导热系数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	
污染物挥发速率 (m)	土壤初始温度 (K)	

工程优化计算平台

## 丛枝菌根真菌技术产品及其应用

### 项目成熟阶段

 实验室研发

 中试放大

 成熟应用

**概况及应用领域：**丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是广泛存在于陆地生态系统中的植物共生真菌，能够和80%左右的陆地植物建立菌根共生体系。很多研究证明，丛枝菌根(AM)不仅能够改善植物矿质营养，同时在增强植物抗逆性，防治土传病害和稳定土壤结构等方面也具有重要作用。由于AMF的广谱适应性和功能多面性，近年来菌根技术在农林业和生态工程中的应用得以快速发展。

#### ● 在可持续农业中的应用

大多数农作物都对AMF表现出一定的菌根依赖性。AMF可以促进作物对土壤养分的吸收，在促进作物生长和提高产量的同时，提高养分利用效率，减少化肥用量，有利于维持农业可持续发展。

#### ● 在园林绿化中的应用

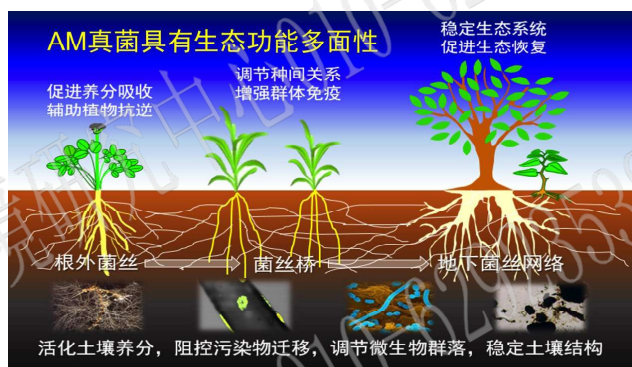
大多数园艺作物都可以与AMF形成共生体系，如茄科、葱科、大多数果树、草本香料、中草药、观赏花卉等。园艺作物经济价值较高，且习惯于采用苗圃和容器育苗，这为植物苗期菌根化提供了便利条件。菌根接种后，可以缩短苗木的出圃期，提高移栽成活率、促进苗木生长、增强抗病性，最终提高产品产量和品质，增加园艺作物的经济附加值，以较小的投资获得较大的收益。

#### ● 在生态恢复和环境治理中的应用

矿区采矿活动之后废弃的土地，通常土壤结构不良、有机质及矿质养分含量低，植物生长受到限制。菌根技术有可能成为克服矿区生态重建中障碍因素的有效途径。对于需要重建植被的矿区退化土壤，应用AMF可以快速建立具有物种多样性和结构稳定性的植被；对于轻度污染的农田，可以通过AM共生体系阻隔重金属向作物地上部或是籽粒中的累积，维持农业生产并保障食品安全，也可以联合重金属超积累植物对污染农田进行生物修复。

对于轻度污染的农田，可以通过AM共生体系阻隔重金属向作物地上部或是籽粒中的累积，维持农业生产并保障食品安全，也可以联合重金属超积累植物对污染农田进行生物修复。

**技术特点/设备参数/工艺流程：**研究团队分离获得优良AM真菌*Rhizophagus irregularis*



## 丛枝菌根真菌技术产品及其应用

BGC AH01，系列试验证明这个菌株在促进植物吸收养分和水分，减轻植物重金属毒害，增强植物抗逆性等方面表现突出，具有很高的商业应用价值。我们对这个菌株申请了专利保护，并研发了菌种连续扩繁装置，为菌剂规模化生产奠定了基础。

基于专利菌株研制了内生菌根菌剂，菌剂的技术安全性、有效性通过了中华人民共和国农业农村部肥料登记评审委员会认证。



丛枝菌根真菌应用技术体系

### 专利和获奖情况：

获授权国家发明专利2项，实用新型专利1项。

获得国家自然科学二等奖1项；国家科技进步二等奖1项；省部级科技奖励3项。

### 示范与应用案例：

在北京开展的田间实验表明，施用菌剂显著提高了玉米生物量和磷吸收量，增加了玉米籽粒产量和百粒重，可以达到和施用磷肥相同的效果；在干旱贫瘠的土壤上施用菌剂能够促进药用植物甘草的生长，提高了甘草根系中活性成分总黄酮及总皂苷含量积累，且田间作用效果能持续两年以上；2023年在山东退化土壤（过量施肥、连作障碍）上开展田间实验，应用菌根化育苗技术，玉米实收增产30%左右；2023年在新疆棉区（干旱、盐碱化）开展了上万亩的菌根真菌示范推广实验，取得了积极应用效果，通过菌根真菌菌剂拌种或二次包衣，平均每株棉花至少多结一个棉桃，亩增产10%以上，最高增产40%以上。

研发团队也积极推进了菌根技术在退化土壤生态修复方面的应用示范，包括在内蒙古自治区鄂尔多斯煤矿废弃地进行生态重建示范试验，以及应用 AM 真菌调控土壤微生态，控制药用植物的土传病害。

### 合作对象及方式：

和相关企业合作研发适应不同应用场景的菌根技术产品；

为相关用户提供技术服务或直接供应产品。

## 基于生态系统服务供需的区域生态修复空间识别与划定方法

项目成熟阶段

实验室研发

中试放大

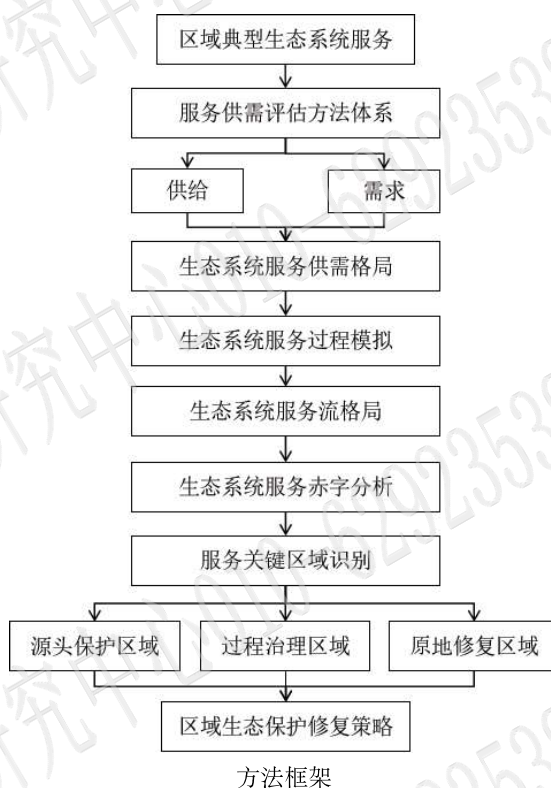
成熟应用

**概况/应用背景：**生态保护修复是防治生态退化和恢复受损生态系统的重要措施。在生态保护修复工程规划与实施中，如何更加精准识别生态保护修复空间并明确保护修复目标，为人类提供更加可持续生态系统服务，是当前生态系统管理与国土空间生态修复中的关键技术需求。

在国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目、中国科学院先导计划项目等支持下，经过长期探索，研发团队探索了水源涵养、水质净化、洪水调蓄、土壤保持、生物多样性维持及固碳释氧等各种生态系统服务的供给和需求，及其与居民福祉关联的机制与定量分析方法，建立了生态系统服务流供给与需求匹配过程识别和评估方法，形成了一套生态系统服务供需赤字区、进而划定生态保护修复关键区域和保护修复目标确定的技术方法。该技术方法可以为科学开展生态保护修复规划和方案提供技术支撑，并已在多个案例区域得到成功应用。

**技术特点：**该技术将生态系统服务供需以及山水林田湖草生态关联性耦合到区域生态保护修复关键区域识别方法中，充分考虑区域自然-社会-经济系统及人类福祉的需求，突破传统方法仅从生态系统服务供给退化角度评估以及以往生态修复以小尺度、单一生态修复工程和单一目标为主的局限，以InVEST模型、遥感、GIS等技术手段，结合生态系统服务供需特征、流动过程与路径，设计服务供给-人类受益-系统修复的级联框架，构建流域生态系统保护修复关键区域识别方法模型，可准确辨识不同要素系统下影响人类福祉与生态健康稳定的关键区域。

**应用对象及产出：**该技术可应



## 基于生态系统服务供需的区域生态修复空间识别与划定方法

用于山水林田湖草一体化生态保护修复工作，为生态保护修复提供一套辅助决策的应用工具，提升生态保护修复工程的系统性和科学性，提升生态保护修复综合效益，在区域生态规划中作为一种评估方法也具有良好适用性。

成果在“瓯江源头区域山水林田湖草沙一体化保护和修复绩效评估”、“丽水市国土空间生态修复专项规划”、“首都西部生态屏障区山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”、“海南南部典型热带区域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”等区域生态修复实践和香溪河流域、海河流域生态安全评估等研究实践中得到了成功应用；在多项国家和部门规范和标准制定中起到了重要的科技支撑作用。生态退化空间辨识方法为自然资源部《国土空间生态保护修复工程实施方案编制规程》（TD/T1068-2022）中的生态问题识别与诊断、修复措施时空布局提供了关键的方法支撑；要素关联空间分析方法为自然资源部《国土空间生态保护修复工程成效评估规范》（报批稿）中的生态成效-关联性评估部分提供了重要依据。未来技术成果将更广泛的应用于山水林田湖草沙一体化保护和修复区域以及国土空间修复实践中，将成为指导国土空间生态保护修复与格局优化的一套辅助决策的科学评估工具。

### 知识产权情况：

1. 发明专利1项；  
一种结合生态系统服务供需的生态修复空间划定方法（202211174320.X）
2. 相关成果发表9篇中英文科技论文

## 适用于寒旱区露天煤矿排土场土壤-植被修复技术

### 项目成熟阶段

 实验室研发

 中试放大

 成熟应用

**概况/应用背景：**我国因采煤特别是露天开采造成的土地资源破坏、生态环境退化已成为制约经济可持续发展的重大战略问题。内蒙古是世界最大的“露天煤矿”之乡，也是我国北方生态安全屏障的重点地区。在国家重点研发计划项目、内蒙古自治区重点研发和成果转化项目、国电投重点科技项目等支持下，经过长期基础研究和示范推广，研发团队通过应用生态学、土壤学、植物学、土壤微生物学、水土保持等多学科专业知识和技术方法，凝练出1套“适用于寒旱区露天煤矿排土场土壤-植被修复技术”。该技术采取物理-化学-生物措施相结合的土壤改良技术，以及植物物种筛选和群落构建技术，将露天煤矿排土场修复为稳定的，并向自然草原过渡的生态系统。该技术方法可以为高寒、干旱、沙化严重草原脆弱区科学开展露天煤矿生态保护修复提供技术支撑。

**应用对象及产出：**针对寒冷、干旱、风大矿区的露天煤矿排土场土壤贫瘠和植被恢复困难等问题，研制了适用于寒旱地区露天煤矿排土场的土壤-植被修复技术。

(1) 筛选出8种适合排土场修复的乡土植物，并进行植被群落构建模式的示范，面积达7800亩以上。

(2) 修复后的排土场示范区植被覆盖度分别达到85%和90%以上，演替成为近自然的状态。

(3) 排土场物理-化学-生物多种措施相结合的土壤改良技术，显著提高植被养分累积量，氮含量提高14-32%，磷含量提高21-30%。

**知识产权情况：**研发团队完成理论研究与技术示范，具有自主知识产权。已申请发明专利1项，发表9篇中英文学术论文。

### 示范与应用案例：

1. 内蒙古白音华煤电有限公司露天矿排土场植被恢复（3041亩）

2. 内蒙古白音华蒙东露天煤业公司排土场植被恢复（4800亩）



内蒙古白音华矿区示范区