



江苏省采空区治理与生态修复工程技术研究中心

# 高陡边坡植生孔复绿关键技术研究

吴圣林

Tel: 13951351099

中国矿业大学 徐州中矿岩土技术股份有限公司

2025年10月



# 目 录

- ◆ 1. 高陡边坡植生孔复绿技术图景
- ◆ 2. 植生孔复绿关键技术和产品
- ◆ 3. 产业化应用及修复案例
- ◆ 4. 指标总结

# 生态修复研发原景

两山理论指导  
双碳政策支持





徐州五台山



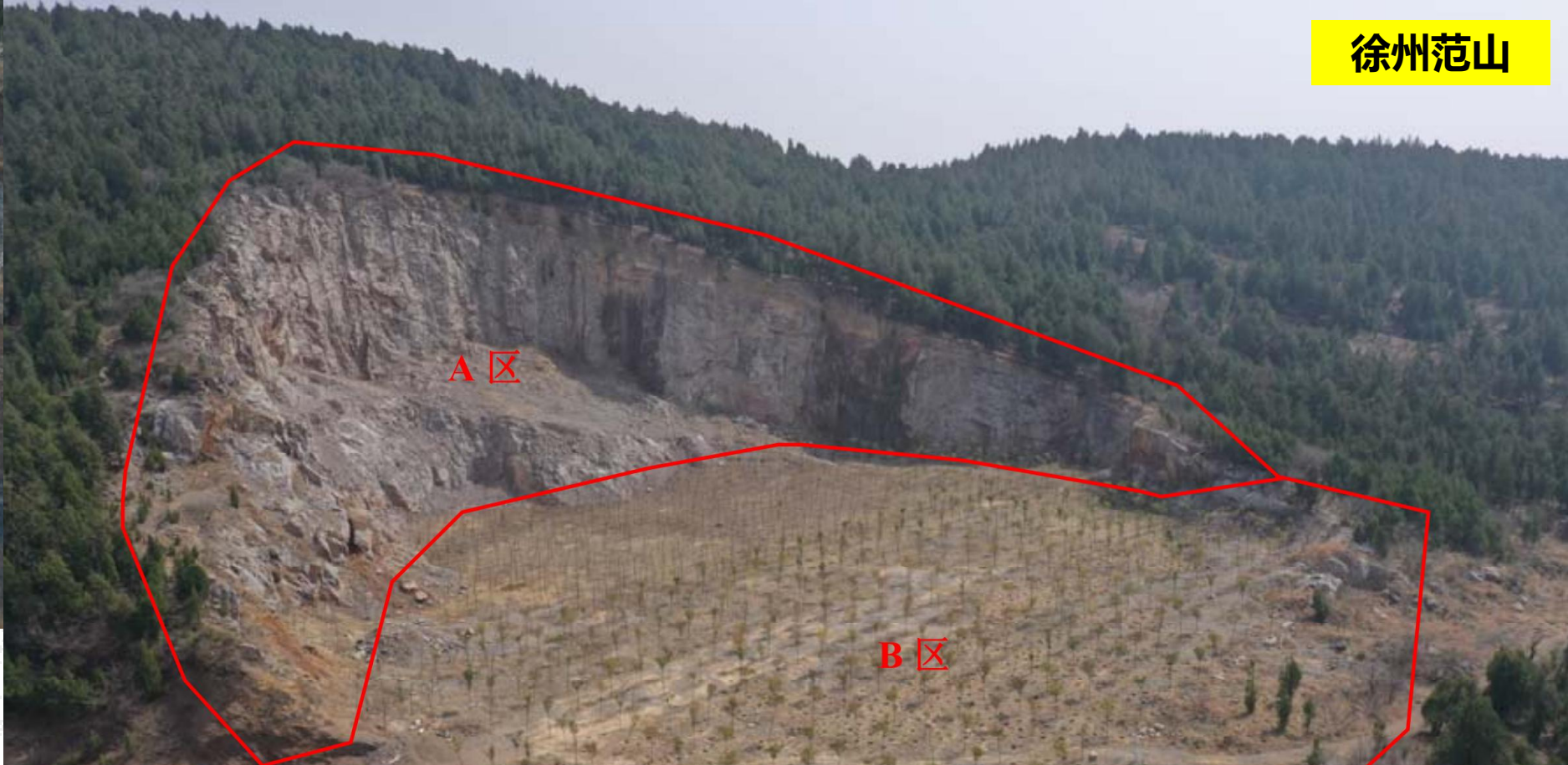
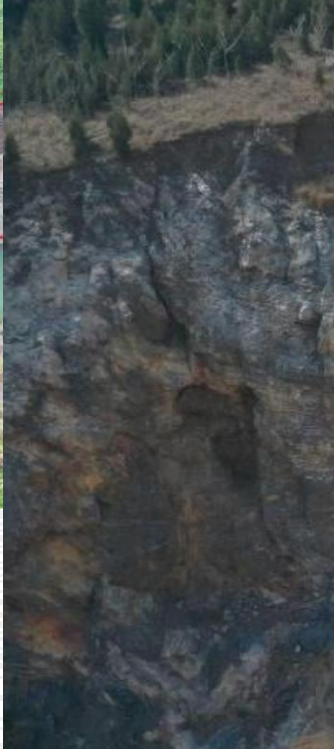
徐州磨山



徐州老回山



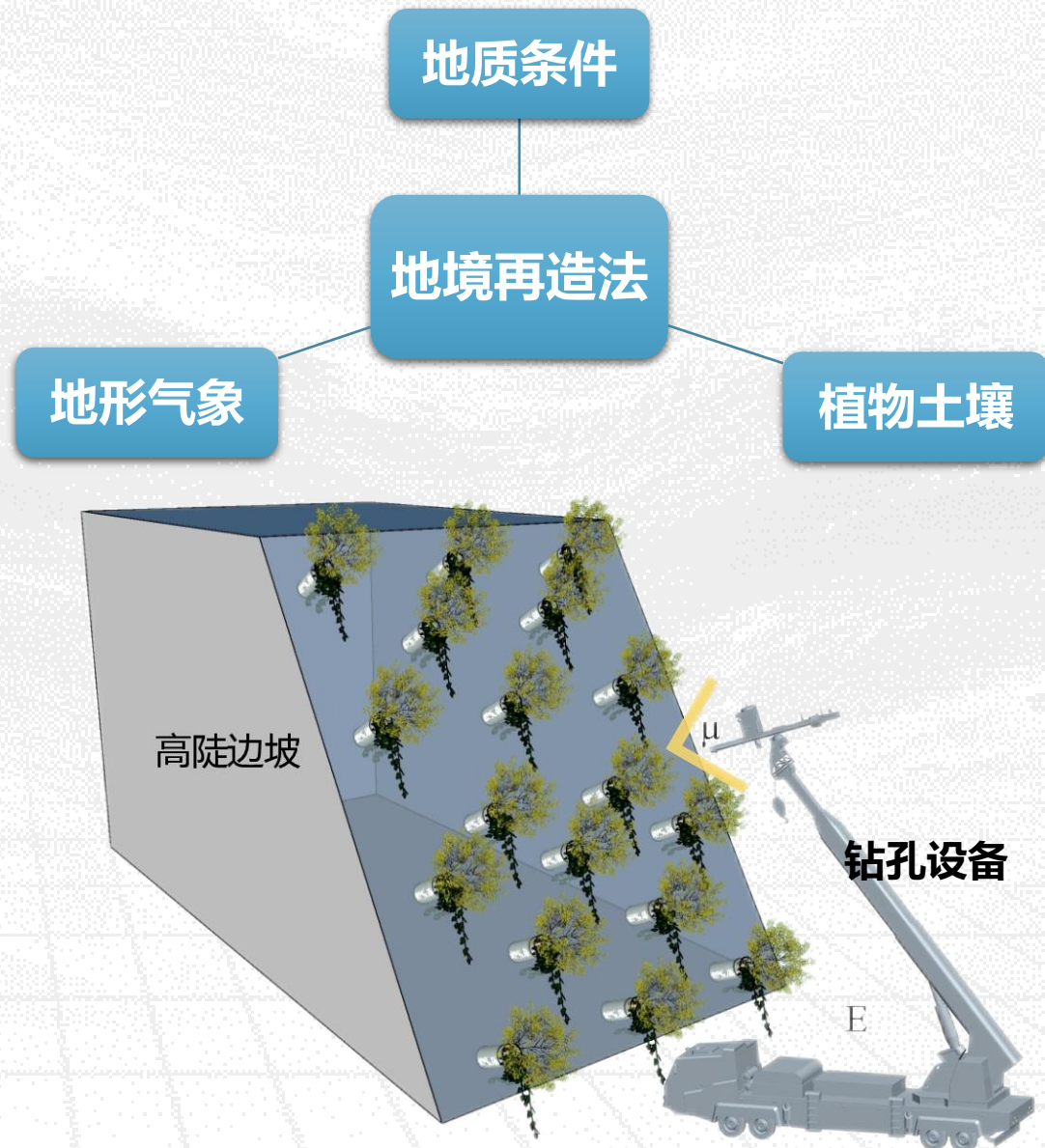
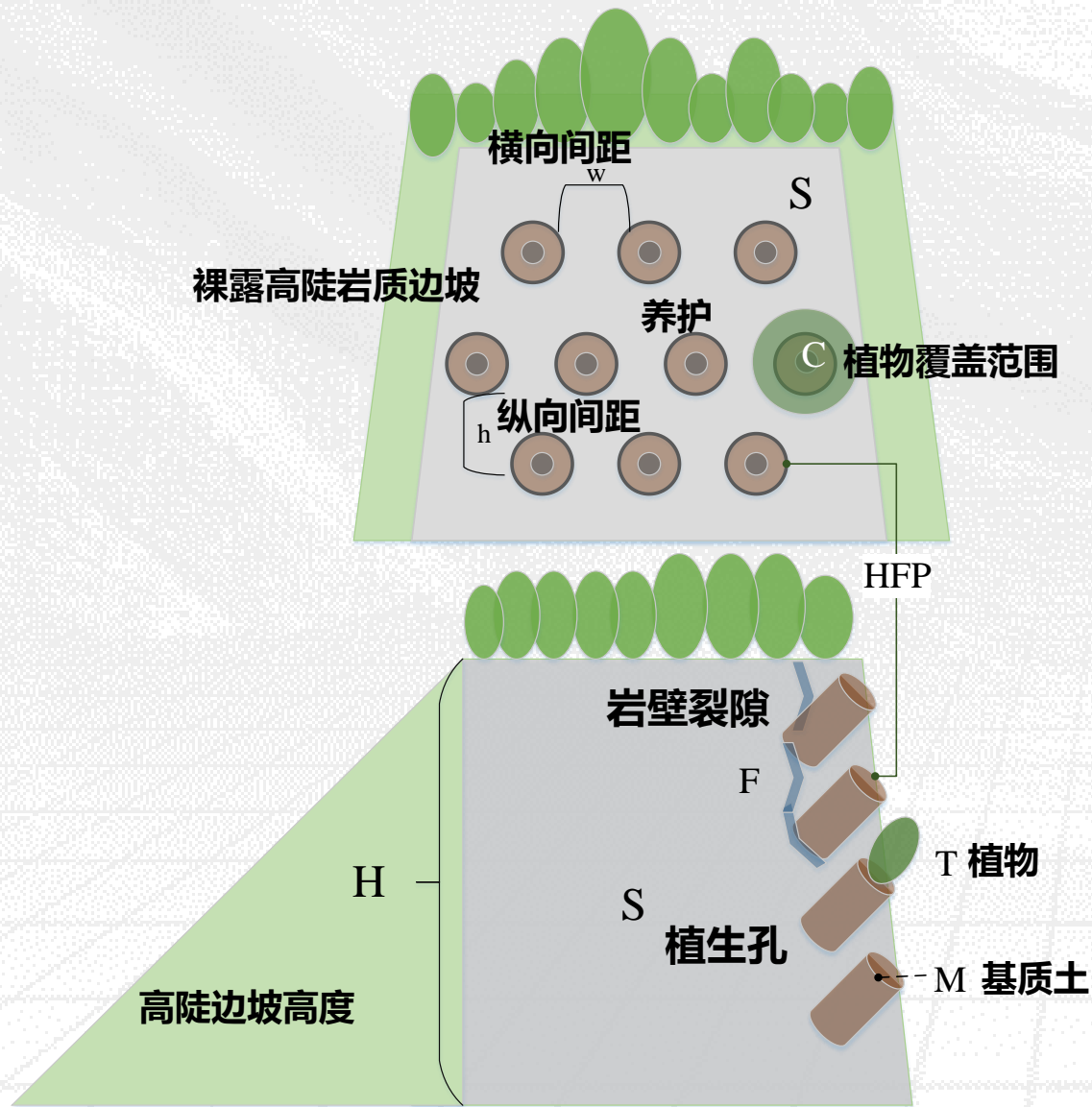
徐州范山



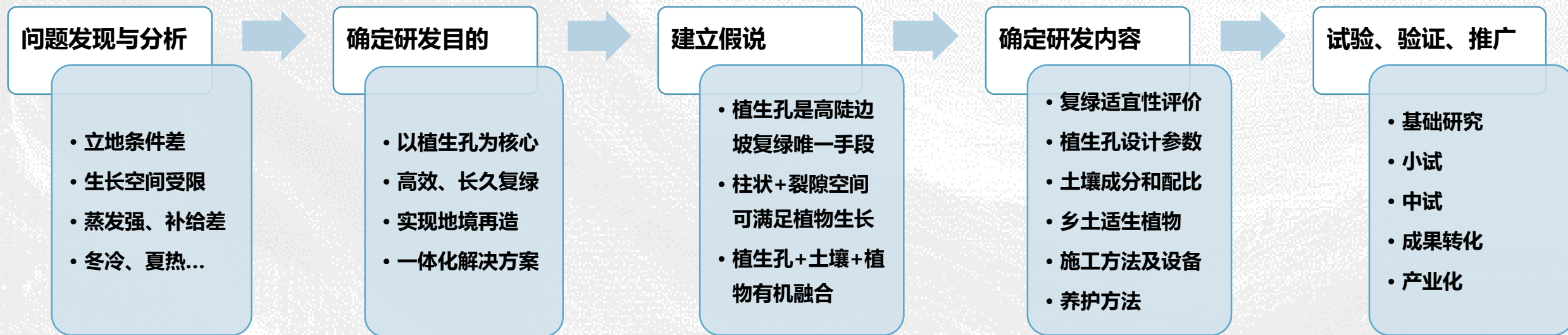
A区

B区

# 1.1 高陡边坡植生孔复绿——技术图景



# 1.2 高陡边坡植生孔复绿——研发技术路线



✓ 室内植物研究基地



✓ 基质土成分配比研发



✓ 智能化栽植温棚建设



✓ 产学研基地及产业化

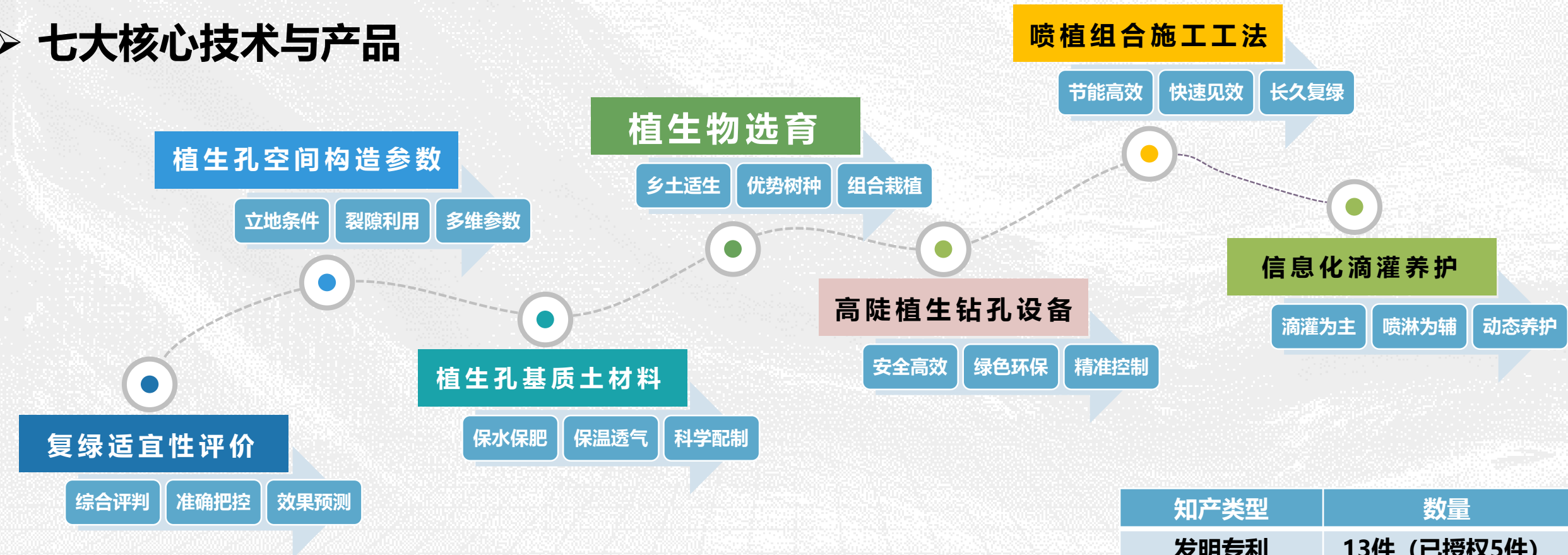


# 目 录

- ◆ 1. 高陡边坡植生孔复绿技术图景
- ◆ 2. 植生孔复绿关键技术和产品
- ◆ 3. 产业化应用及修复案例
- ◆ 4. 指标总结

# 高陡边坡植生孔复绿关键技术解决方案 • CMGT

## ➤ 七大核心技术与产品

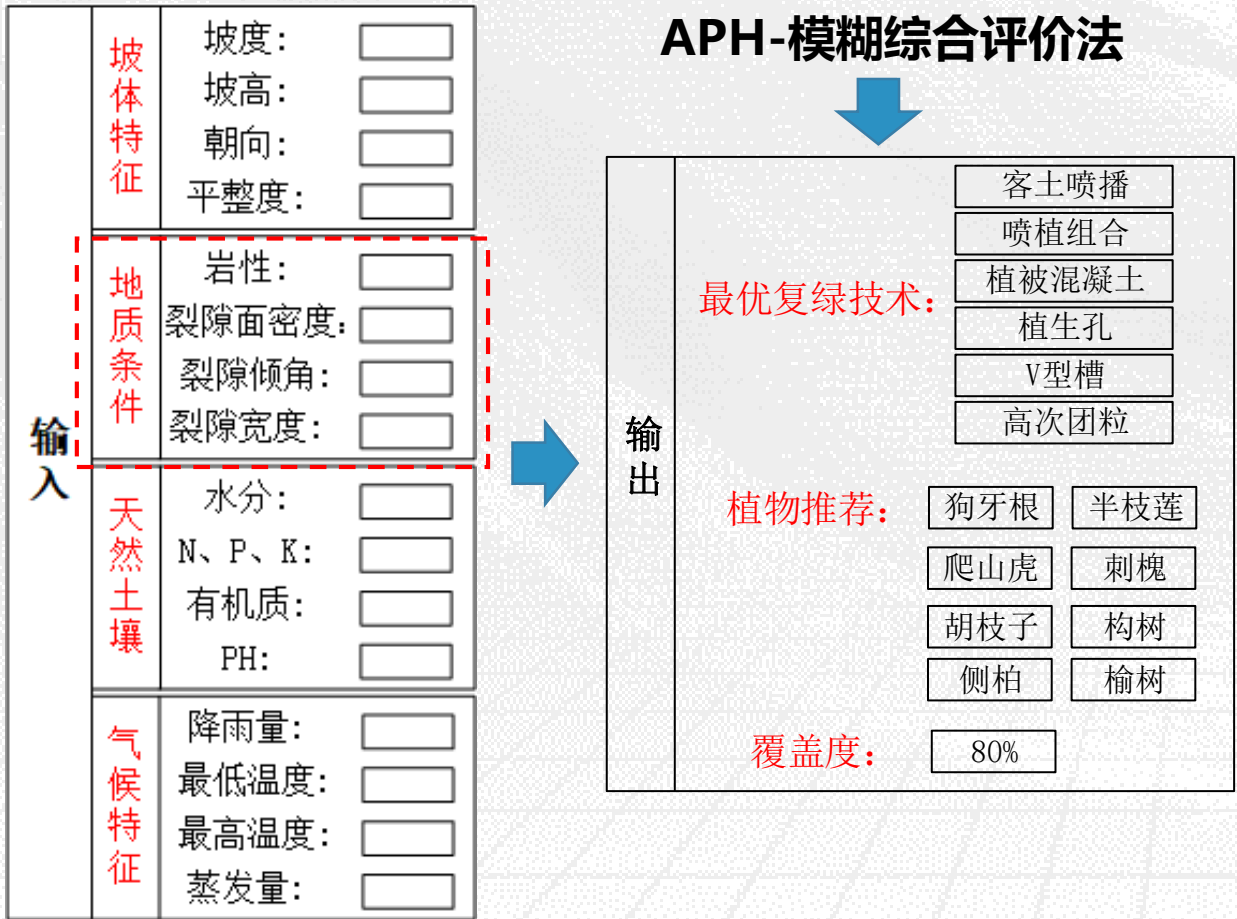


## ➤ 近两年知识产权

知产类型	数量
发明专利	13件 (已授权5件)
实用新型专利	11件 (已授权6件)
外观专利	已授权2件
工法	2项
软著	已授权1项
论文	已发表3篇

# 2.1 边坡复绿适宜性评价技术

## ➤ 适宜性评价模型



## ➤ 评价预测软件

**层次分析-判断矩阵输入**

目标层	准则层1	准则层2	准则层3	准则层4
坡体特征	1	2	4	3
地质条件	0.5	1	2	2
天然土壤	0.25	0.5	1	0.5
气候条件	0.3333	0.5	2	1

**判断矩阵合理性计算**

目标层	<input type="text" value="不需调整"/>
准则层1	<input type="text" value="不需调整"/>
准则层2	<input type="text" value="不需调整"/>
准则层3	<input type="text" value="不需调整"/>
准则层4	<input type="text" value="不需调整"/>

	坡度/°	坡高/m	坡向/°	平整度	岩石坚硬程度	裂隙面密度/(m/m <sup>2</sup> )	优势裂隙倾角/°	优势裂隙宽度/mm
权重	0.1556	0.2025	0.0486	0.0643	0.0271	0.105	0.0686	0.0542
输入实测值	82	25	222	0.75	8	5.39	75	3.2

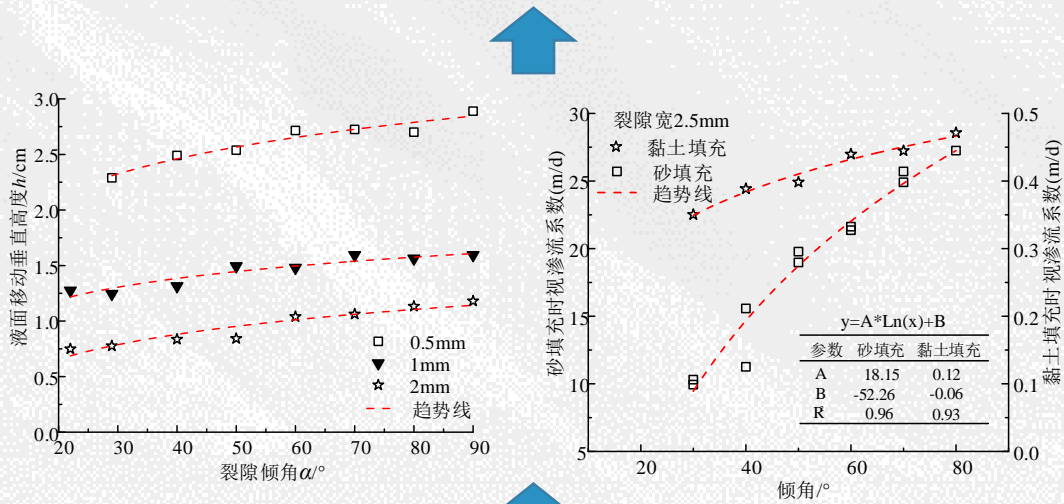
	N/(mg/kg)	P/(mg/kg)	K/(mg/kg)	pH	有机质/(g/kg)	年蒸发量/mm	年平均降雨量/mm	年平均气温/°C
权重	0.0356	0.0462	0.0111	0.0146	0.0176	0.0674	0.0442	0.0348
输入实测值	202	9.4	151	8.38	41.7	1321	999.4	16.1

**适宜性评价等级**

# 3.1 边坡复绿适宜性评价技术——方法及过程

## ➤ 裂隙导水储水试验

- ✓ 裂隙导水能力随裂隙倾角的增大而增大
- ✓ 储水能力随缝宽增大而减小、随倾角增大而增大



## ➤ APH-模糊综合评价法

准则层	权重系数	指标层	权重系数	综合权重	排序
坡体特征	38.91%	坡高	33.05%	12.86%	3
		坡度	42.93%	16.70%	1
		朝向	10.38%	4.04%	9
		平整度	13.64%	5.31%	6
地质条件	31.70%	岩石坚硬程度	9.21%	2.92%	11
		裂隙面密度	48.17%	15.27%	2
		优势裂隙倾角	13.07%	4.14%	8
		优势裂隙宽度	29.55%	9.37%	4
天然土壤	12.15%	速效氮	26.12%	3.17%	10
		有效磷	26.12%	3.17%	10
		速效钾	26.12%	3.17%	10
		pH	9.51%	1.16%	14
		有机质	12.12%	1.47%	13
气候特征	17.24%	年蒸发量	16.29%	2.81%	12
		年平均降雨量	29.71%	5.12%	7
		年平均气温	54.00%	9.31%	5

## 2.2 植生孔空间构造参数设计技术

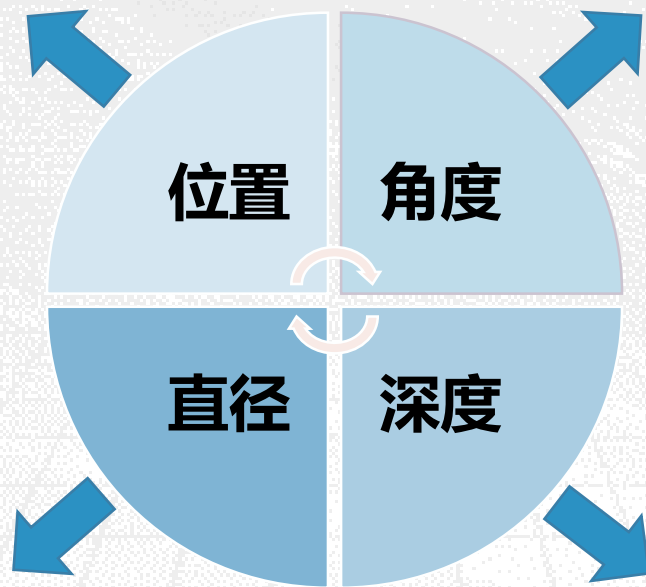
### ➤ 四大空间构造参数

裂隙利用分级评价

级别	体裂隙率	植生孔适宜性	植生孔间距/m
I	>6.0%	较适宜	1.2
II	6.0%~2.0%	适宜	1.0
III	2.0%~0.5%	一般适宜	0.8
IV	<0.5%	适宜性差	0.5

基于乡土植物冠幅推荐间距

植物类型	推荐植生孔间距/m
刺槐	2.0
榆树	1.8
卫矛球	1.6
女贞	1.4
臭椿	1.2
构树	1.0



#### ➤ 直径、深度设计方法:

综合考虑植物根域限制、裂隙穿切、保温保湿、钻孔效率、钻孔成本、坡体稳定性因素，确定植生孔的最优直径与深度。

➤ **最优角度设计原则:** “存住土、接住水、穿裂隙、抗蒸发、易施工”

#### ➤ 角度衡量指标:

孔内空间利用率、结构面揭露程度、接受水分补给能力、抗蒸发能力

#### ➤ 角度设计方法:

边坡条件 → 模型建立 → 数值仿真 → 指标计算 → 多指标综合判定

#### ➤ 最优直径、深度参数范围:

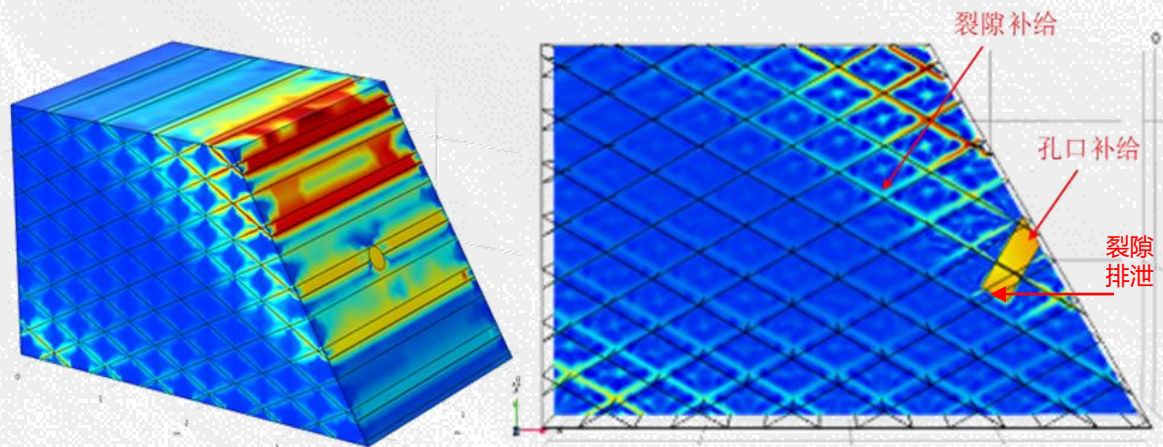
深度: 500~700mm

直径: 170~230mm

## 2.2 植生孔空间构造参数设计技术——方法及过程

### ➤ 植生孔最优角度研发过程

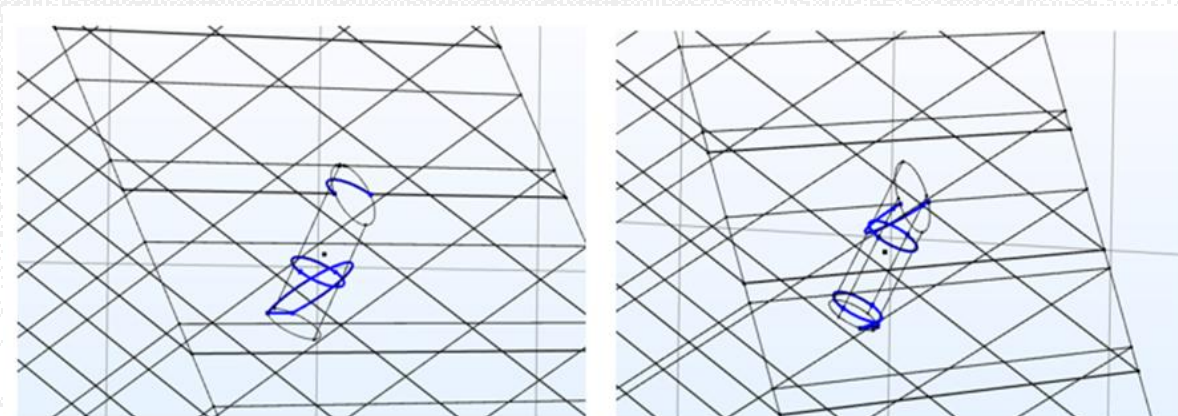
#### ✓ 降雨补给能力研究-COMSOL数值模拟



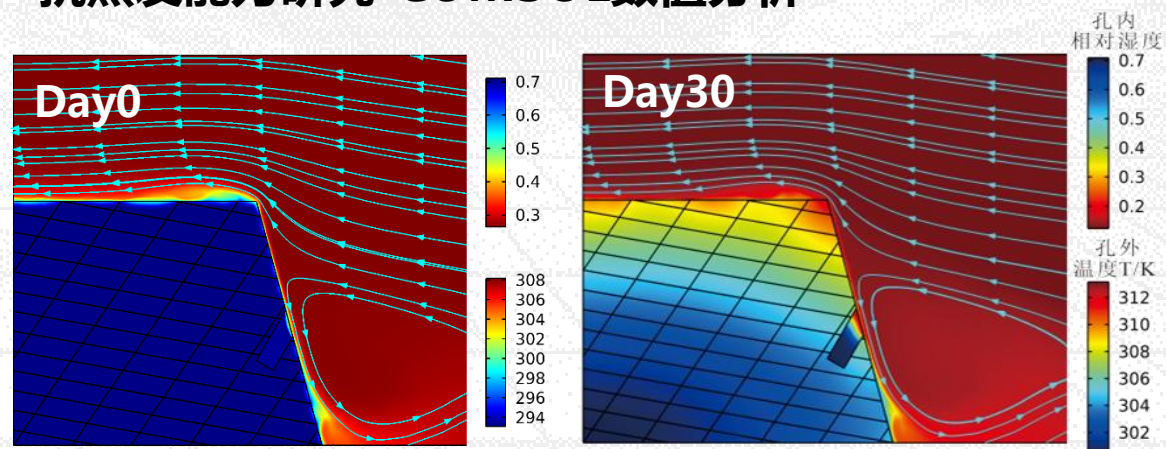
#### ✓ 植生孔水分补给及孔内温度试验研究



#### ✓ 结构面观测能力研究-三维建模分析



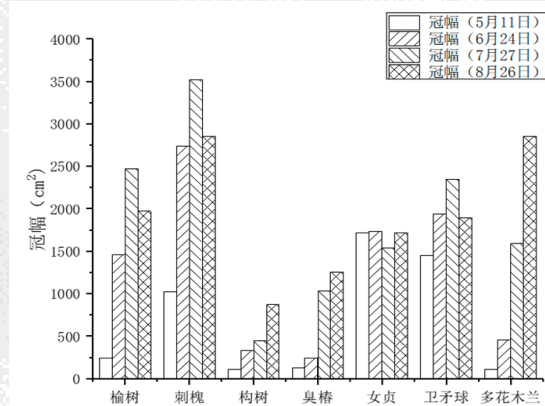
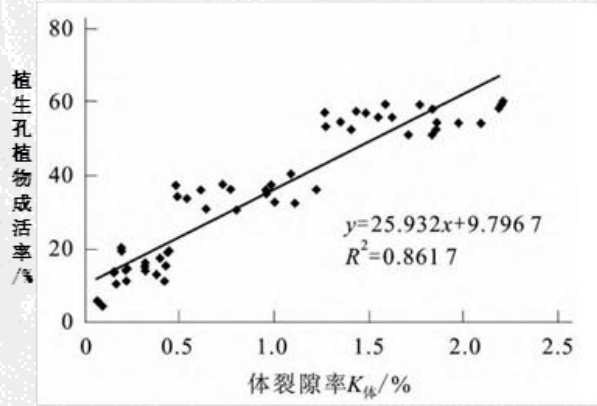
#### ✓ 抗蒸发能力研究-COMSOL数值分析



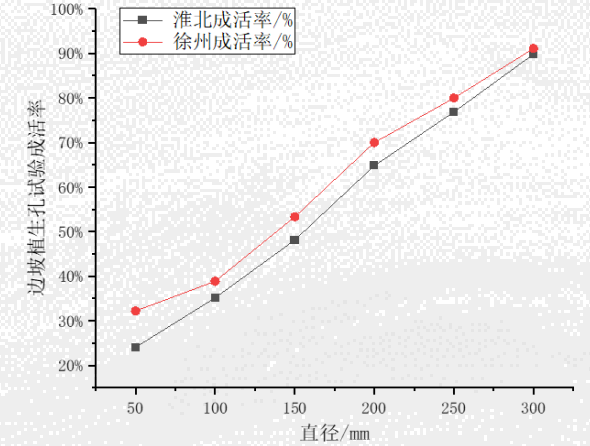
# 2.2 植生孔空间构造参数设计技术——方法及过程

## ➤ 植生孔间距、直径、深度设计技术研发过程

### ✓ 植生孔间距研究：裂隙利用、植物冠幅



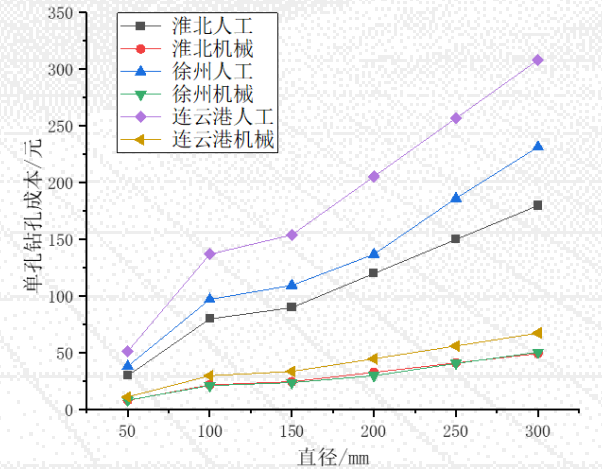
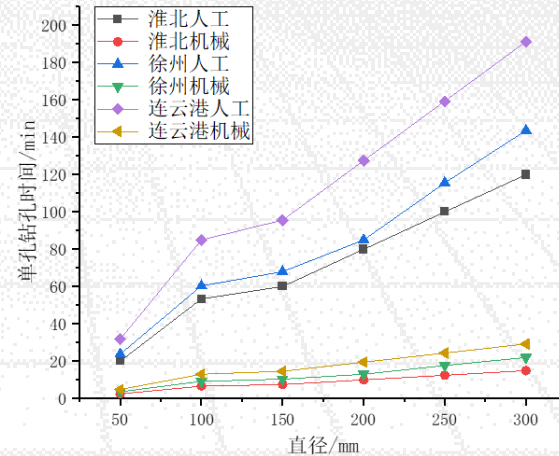
### ✓ 边坡栽植试验及成活率分析



### ✓ 植生孔直径-深度研究：室内栽植试验



### ✓ 钻孔效率及成本分析



# 2.3 新型植生孔基质土材料——保水、保肥、保温、透气

## ➤ 植生土成分、配比、性能及制备

成分	骨架土		增生改良剂					
	黏土 %	粉土 %	生物炭 %	保水剂 %	木屑 %	生根粉 %	复合肥 %	缓释肥 %
配比								

国家知识产权局

215123 **专利材料**

江苏省苏州工业园区金鸡湖大道1355号国际科技园2A1-A2单元 苏州三美知识产权代理有限公司 专利号: 202210243303.0

发件日期: 2022年05月30日

申请号或专利号: 202210243303.0 发文序号: 2022052401930470

申请人或专利权人: 徐州中矿岩土技术股份有限公司

发明创造名称: 植生孔基质土及其制备方法

**发明专利申请公布及进入实质审查阶段通知书**

上述专利申请, 经初步审查, 符合专利法实施细则第44条的规定。根据专利法第34条的规定, 该申请在38卷2101期2022年05月24日专利公报上予以公布。

根据申请人提出的实质审查请求, 经审查, 符合专利法第35条及实施细则第96条的规定, 该专利申请进入实质审查阶段。

ICAS 英格尔集团 MA 180920341238

第三方检测 检测报告

报告编号: SHX2303063201

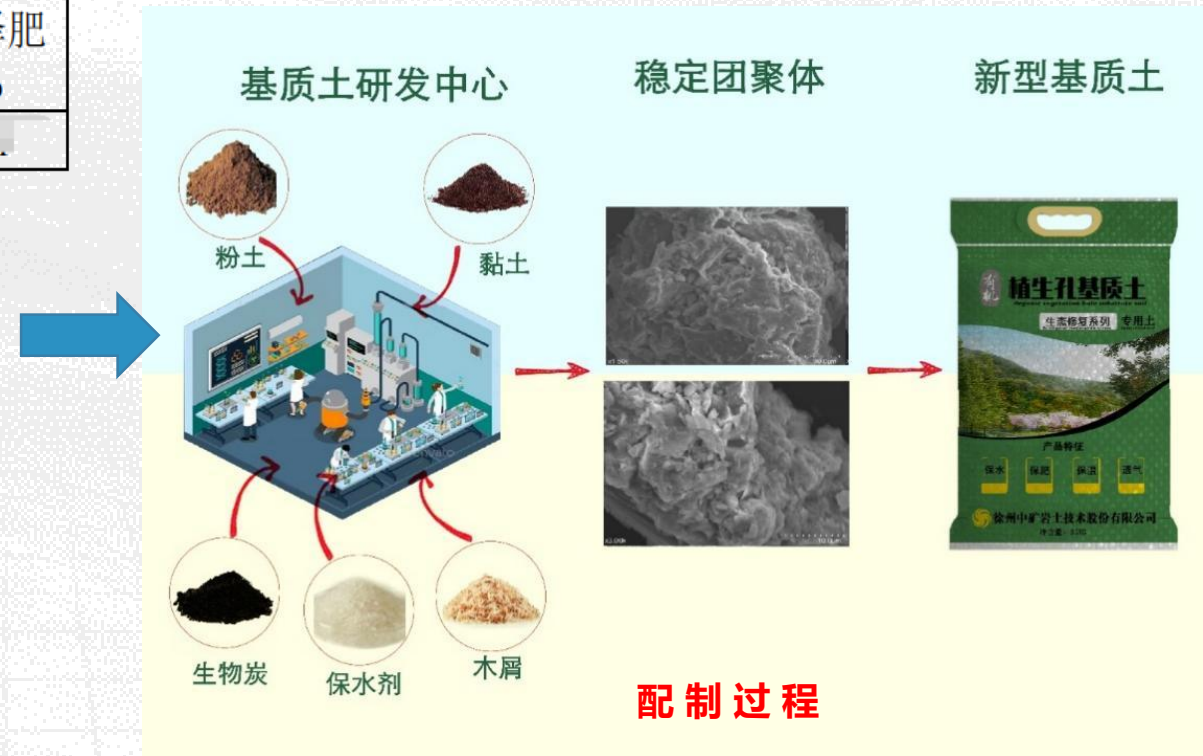
委托单位: 徐州中矿岩土技术股份有限公司

检测类别: 委托检测

样品名称: 植生孔复绿基质土

英格尔检测技术服务(上海)有限公司

NCA1430023



# 2.3 新型植生孔基质土材料——试验、分析过程

## (1) 四因素四水平正交试验

### ➤ 正交设计

因素 水平	A 黏土粉土比	B 生物炭/%	C 保水剂/%	D 木屑/%
1	15-85	1	0.1	1
2	30-70	2	0.2	3
3	45-55	3	0.3	5
4	60-40	4	0.5	7

### ➤ 极差分析 (保水为例)

因素 水平	A 黏土粉土比	B 生物炭/%	C 保水剂/%	D 木屑/%
1	30.20	33.02	32.06	32.72
2	34.04	32.34	33.17	32.88
3	33.44	33.37	34.55	35.02
4	35.23	34.19	33.13	32.29
极差	5.03	1.85	2.49	2.73
排序	1	4	3	2

### ➤ 方差分析 (保水为例)

来源	自由度	AdjSS	AdjMS	F 值	P 值
A 黏土-粉土比	3	150.393	50.131	20.46	0.017
B 生物炭含量	3	59.010	19.670	8.03	0.060
C 保水剂含量	3	77.258	25.753	10.51	0.042
D 木屑含量	3	17.885	5.962	2.43	0.242
误差	3	7.350	2.450		
合计	15	311.897			

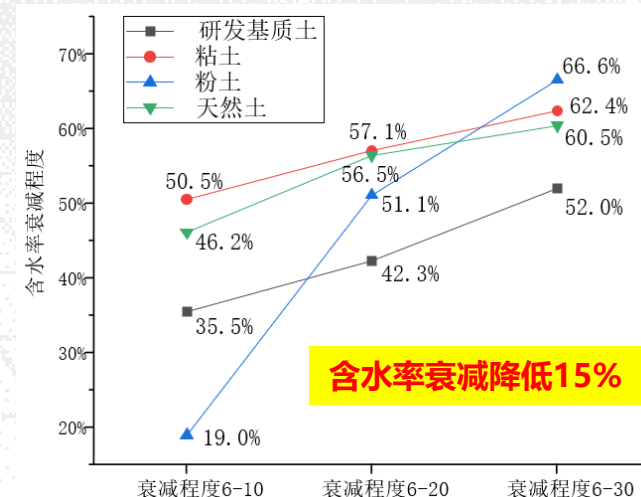
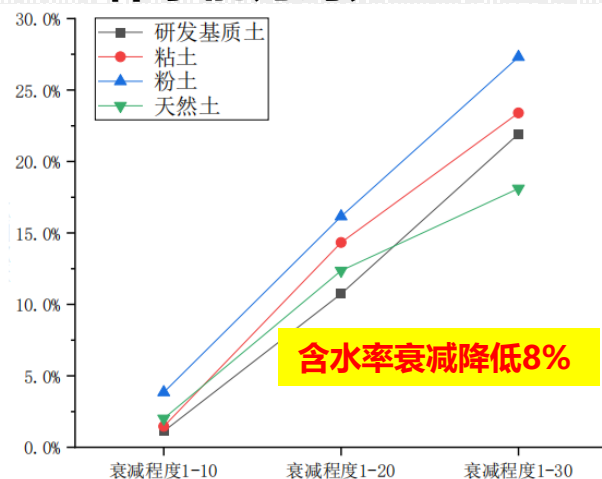
## (2) 行业基质土对比试验

### ➤ 试验设计

参照组编号	土壤类型
17	淮北喷播黏土
18	园博园植生孔粉土
19	自然土
20	自然土加生物炭 (3%)
21	自然土加保水剂 (0.3%)
22	自然土加木屑 (5%)

土壤	植生物	1	2	3	4	5	6	7	8
		侧柏	沙地柏	女贞	构树	荆条	臭椿	榆树	紫穗槐
1	淮北黏土	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
2	园博园粉土	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-6	2-8
3	望城岗天然土	3-1	3-2	3-3	3-3	3-4	3-5	3-7	3-8
4	预选研发植生土	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8

### ➤ 保水能力对比



# 2.3 新型植生孔基质土材料——试验、分析过程

## (3) 干旱胁迫试验

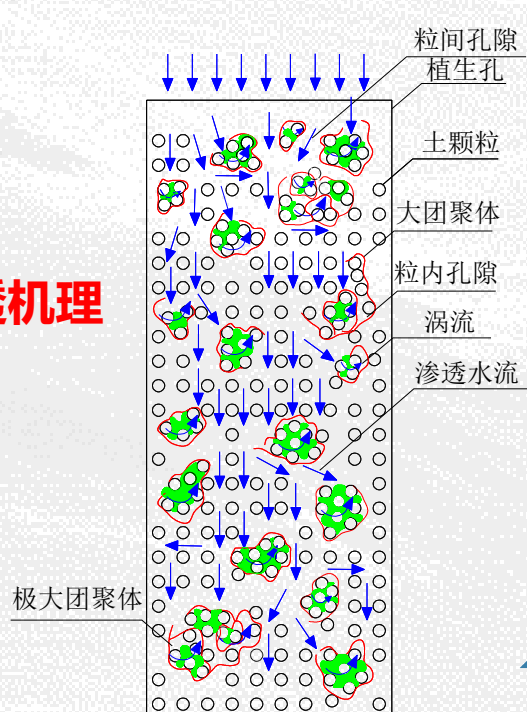
✓ 基质土含水量与时间、温度较好符合二元二次函数关系 ( $R^2 > 0.95$ ), 为养护提供指导。

试验组	01.01-01.30	04.01-04.30
拟合	冬季	春季
方程	$a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx$	
a	0.15679	-1.03241
b	0.11904	0.10569
c	-0.07375	0.14871
d	-0.00243	0.009
e	-0.0162	-0.00455
f	0.01064	-0.00195
拟合度 $R^2$	0.96036	0.9927

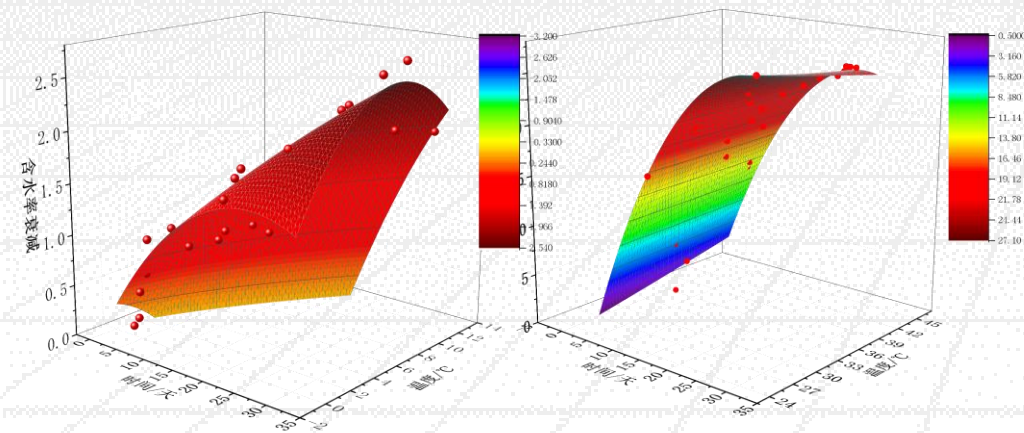
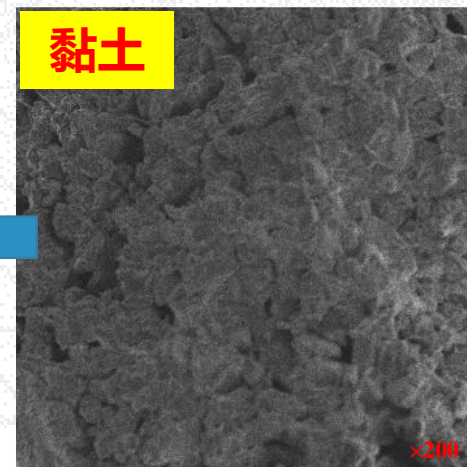
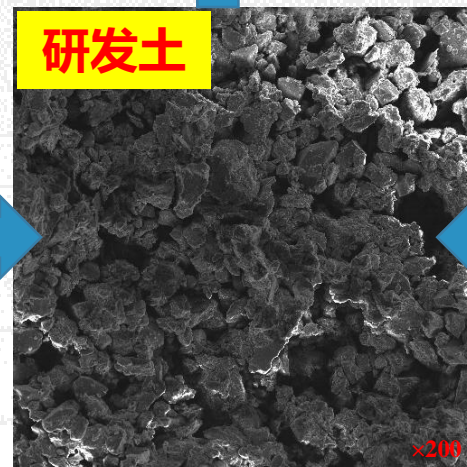
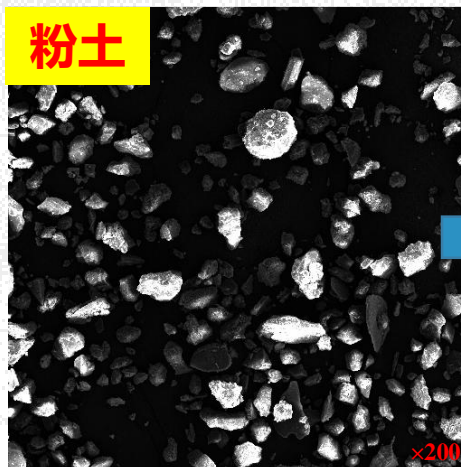
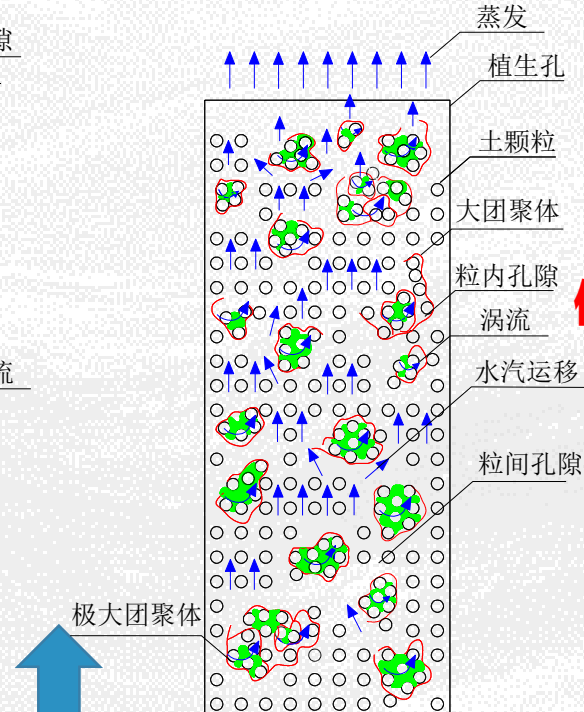


## (4) 微观结构分析 (渗透、保水机理)

渗透机理



保水机理

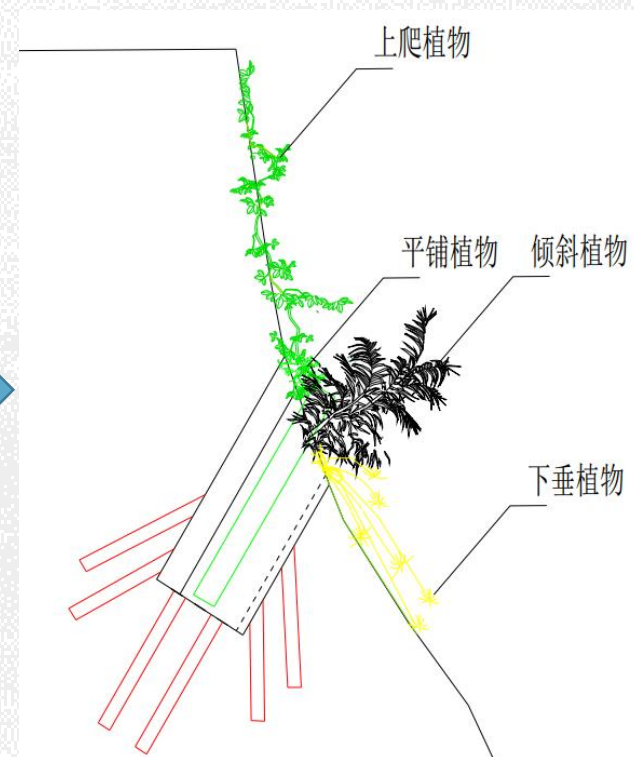
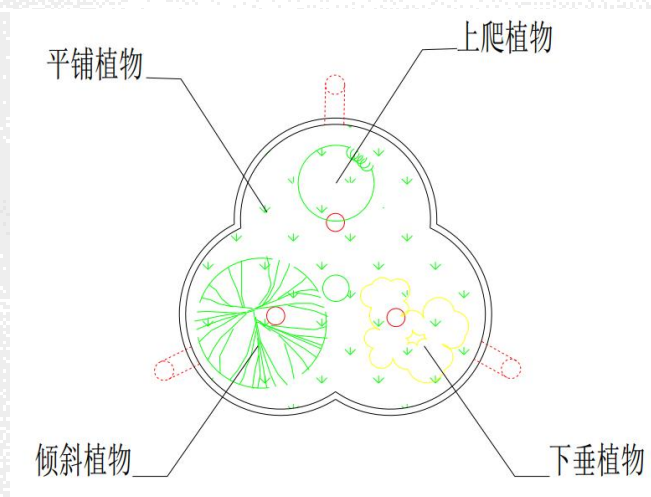


## 2.4 新型植生物备选库及空间架构技术

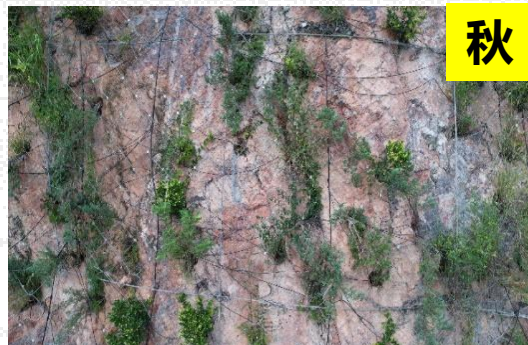
### ➤ 植生物备选库推荐树种

乔木	灌木	藤本	草本
侧柏	多花木兰	凌霄	半枝莲
荆条	女贞	中国地锦	狗牙根
紫穗槐	卫矛	五叶地锦	波斯菊
榆树	胡枝子	连翘	剩余几十种植物有待进步验证
刺槐	剩余十余种植物有待进步验证	扶芳藤	
构树		花叶蔓长春	
臭椿			
楝树			

### ➤ “倾斜-上爬-下垂-平铺” 新型空间复绿架构



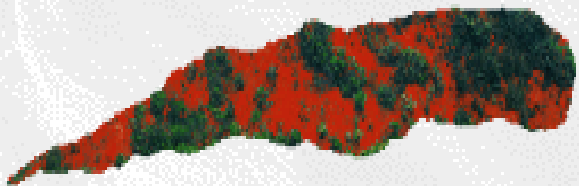
### ➤ 园博园植被验证季相变化效果



## 2.4 新型植生物备选库——实地调研与试验验证

### (1) 植被覆盖度GIS分析与优势树种定点跟踪

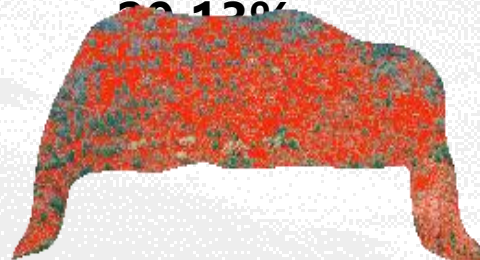
天然坡面: 30.13%



喷播: 96.8%



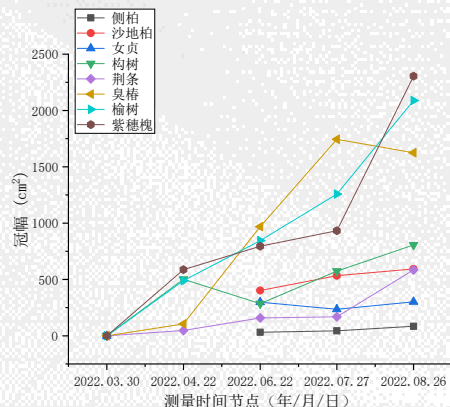
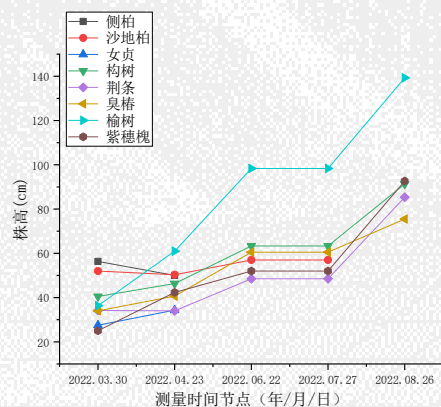
鱼鳞坑: 92.12%



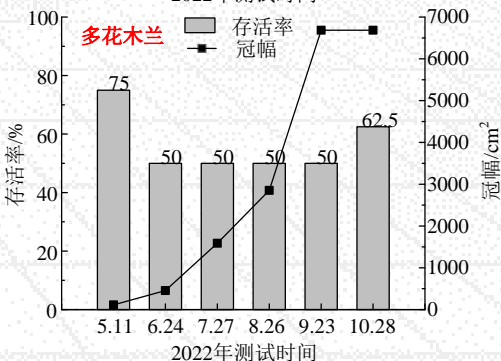
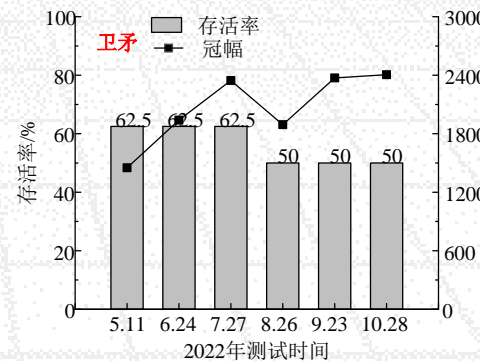
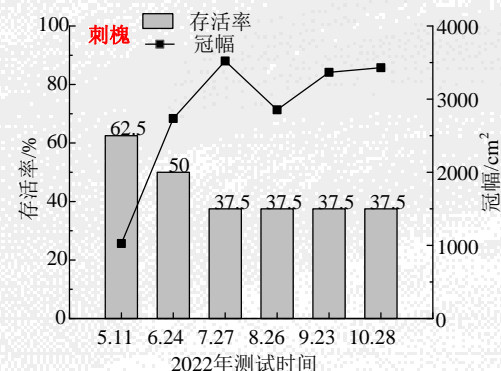
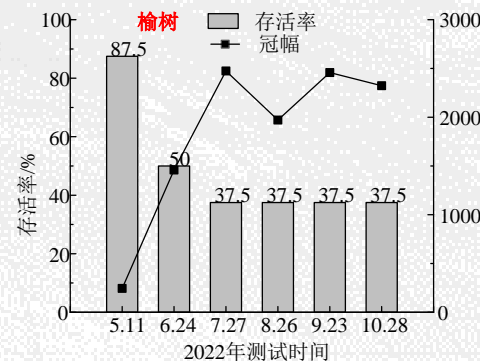
V型槽: 10.01%



### (2) 优势树种室内抗逆性对比试验



### (3) 筛选树种园博园工程验证



## 2.4 新型空间架构技术——调研分析与试验验证

### (1) 植物配置类型的实地复绿效果评估

复绿技术	适用坡度/°	适用坡高/m	植物组合类型	特征
客土喷播	<40	每级<10	草本+乔灌木	见效快、施工效率高
	40-60	每级<8		
围堰	<50	每级<10	乔灌木+爬藤	原理简单
V型槽	均适用	均适用	乔灌木+藤本	费用高、难度大
植生孔	>60	均适用	乔灌木+爬藤+草本	养护要求高、适用于裂隙发育坡面

### (2) 室内组合栽植试验 (乔/灌木+藤本)



直立乔木 (紫穗槐)      上爬藤本 (五叶地锦)



直立灌木 (荆条)      上爬藤本 (五叶地锦)

### (3) 室外组合栽植可行性验证 (乔/灌木+藤本+草本)



上爬藤本 (五叶地锦)      倾斜乔木 (刺槐)      平铺草本 (半枝莲)      下垂藤本 (连翘)



倾斜乔木 (沙地柏)      上爬藤本 (五叶地锦)      下垂藤本 (连翘)      倾斜乔灌木 (女贞、臭椿)

## 2.5 高陡边坡植生孔钻孔设备

### ➤ 功能需求、设计理念

✓ **抑尘:**  
高效控尘、抑尘;  
绿色施工、安全可靠

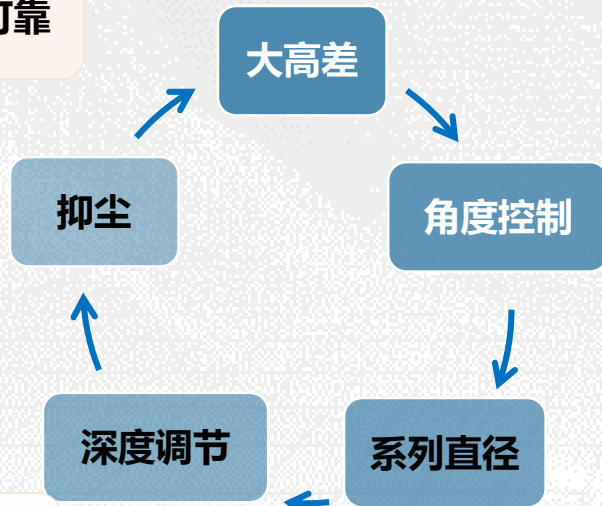
✓ **大高差:**  
0-50m高陡边坡工况;  
地面、平台适应;  
遥控操作、安全高效;

✓ **角度控制:**  
工况普通适应;  
竖直面无级调节 (0-180°);  
水平面无级调节 (0-270°)

✓ **深度调节:**  
植生孔孔深 > 2.5m  
钻杆延伸, 20-30m

✓ **系列直径:**  
匹配50-300mm系列直径钻头;  
植生穴、锚杆孔、爆破孔接口预

留



# 2.5 高陡边坡植生孔钻孔设备

样

✓

岩层面-1

裂隙位置



## ✓ 第三方检测认证

### 高陡边坡植生孔钻孔设备

#### 钻孔参数

规格型号	BPZK-50-200	整机重量	1500±5% kg
钻孔直径	50-300 mm	供电电压	24 V
钻孔深度	0-4.5 m	工作压力	<25 Mpa
钻孔角度	0-90 °	空压机风量	15-20 m³/min
钻孔速度	0.3-0.8 m/min	边坡角度	0-100 °
钻孔高度	<50 m	出厂日期	2023年2月
岩石硬度	30-160 Mpa		



徐州中矿岩土技术股份有限公司制造  
XuZhou China Mining Geotechnical Technology Co., LTD.

## 检验检测报告

Test Report

2023JQWT00030



产品名称: 高陡边坡植生孔钻孔设备

委托方: 徐州中矿岩土技术股份有限公司

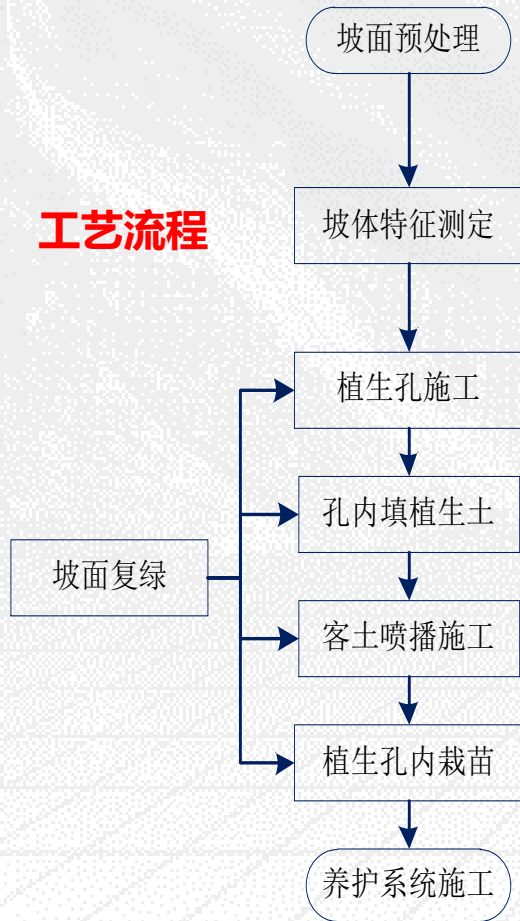
检验检测类别: 委托检验

徐州市检验检测中心  
Xuzhou Inspection Testing Center

## 2.6 喷播-植生孔组合复绿方法

### ➤ 工法一：坡度小于70°、单级坡高不超过15m

#### 工艺流程

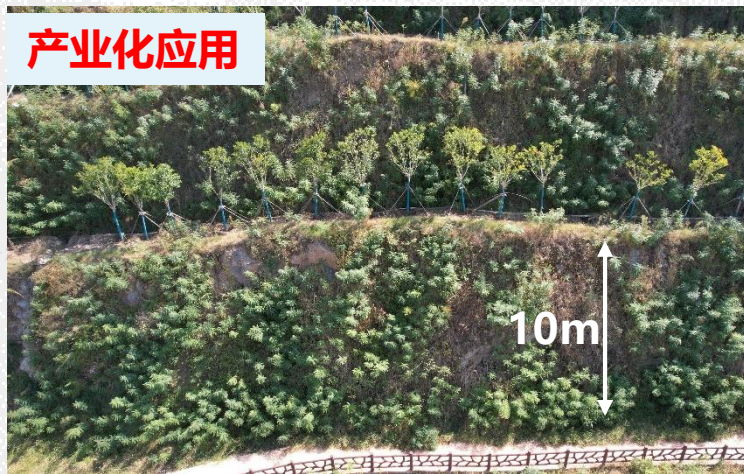


岩层面、坡面、天然裂隙产状测量

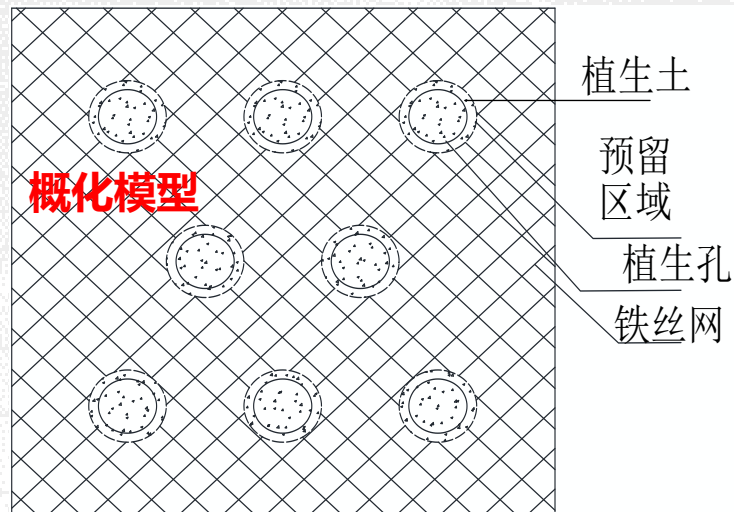
绘制赤平投影图

确定植生孔角度及深度

#### 产业化应用



#### 概化模型



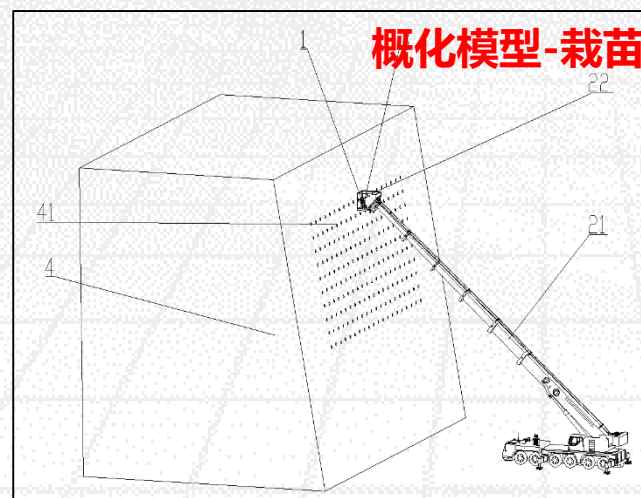
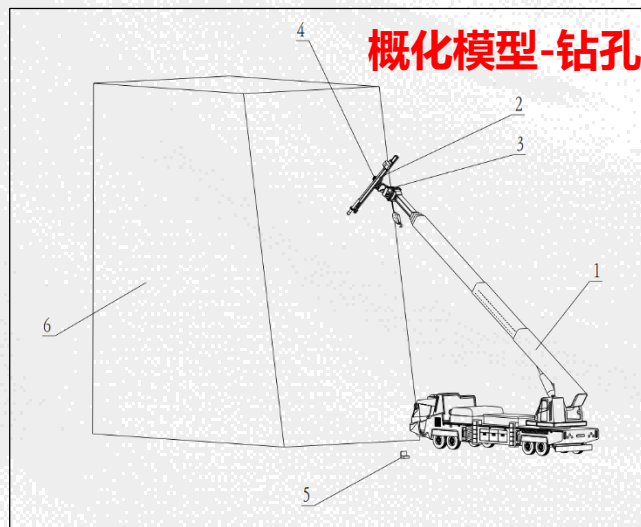
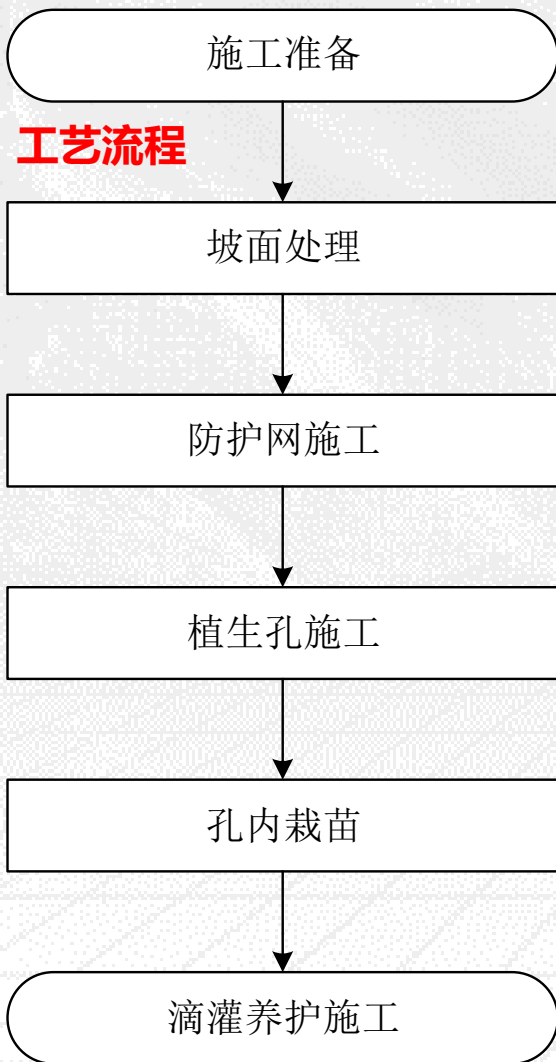
#### 挖改钻



- ✓ 专利：  
发明2件（实审）  
实用新型3件（授权）
- ✓ 工法：  
江苏省级工法（在申）

# 2.6 基于滴灌养护技术的植生孔复绿施工工法

## ➤ 工法二：坡度70°以上的各类岩质边坡

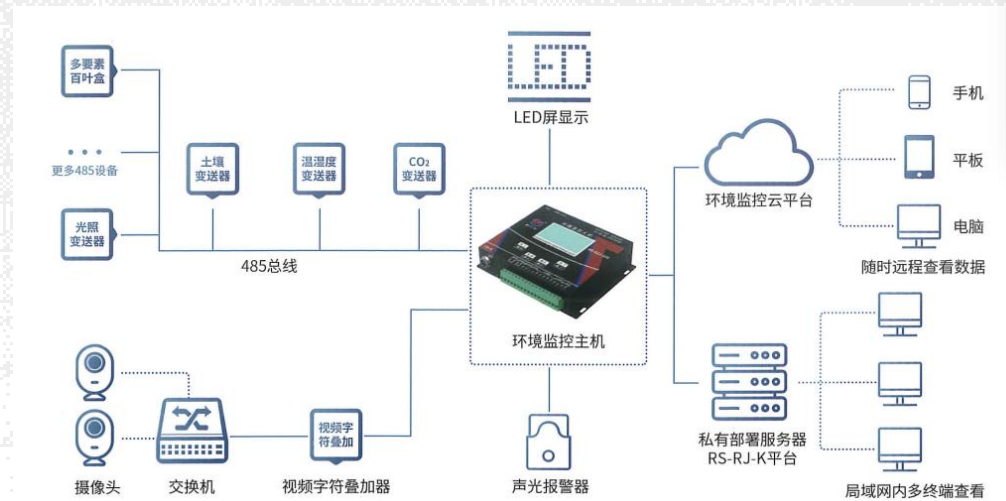


江苏省优质工程、省级工法及新技术应用

我的空间	工法申报信息	新技术申报项目	新技术验收申请
当前申报信息 (4份正在申报)			
<b>工法名称：基于滴灌养护的植生孔复绿施工工法</b>			
所属类别： 矿山	申报时间： 2022-09-07		
申报批次： 2022年度江苏省工程建设省级工法申报	主要完成人： 刘抗,杜占吉,王鹤群,赵天然,史继彪		
负责人： 刘抗	当前状态：		
<b>工法名称：高陡岩质边坡喷植组合复绿施工工法</b>			
所属类别： 矿山	申报时间： 2022-09-07		
申报批次： 2022年度江苏省工程建设省级工法申报	主要完成人： 丁陈建,刘抗,熊彩霞,宋豪,杜占吉		
负责人： 刘抗	当前状态：		

# 2.7 信息化滴灌养护技术

## 基于土壤肥力指标的信息化养护系统

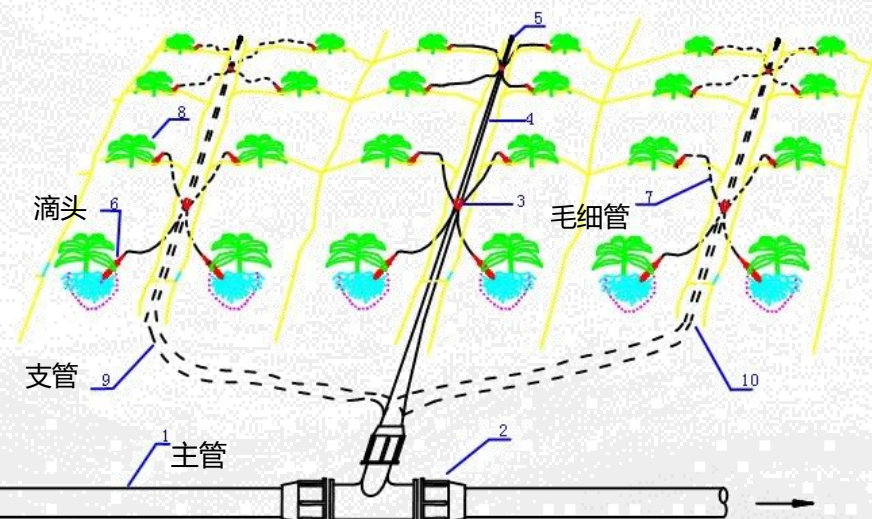


监测  
系统

养护  
系统

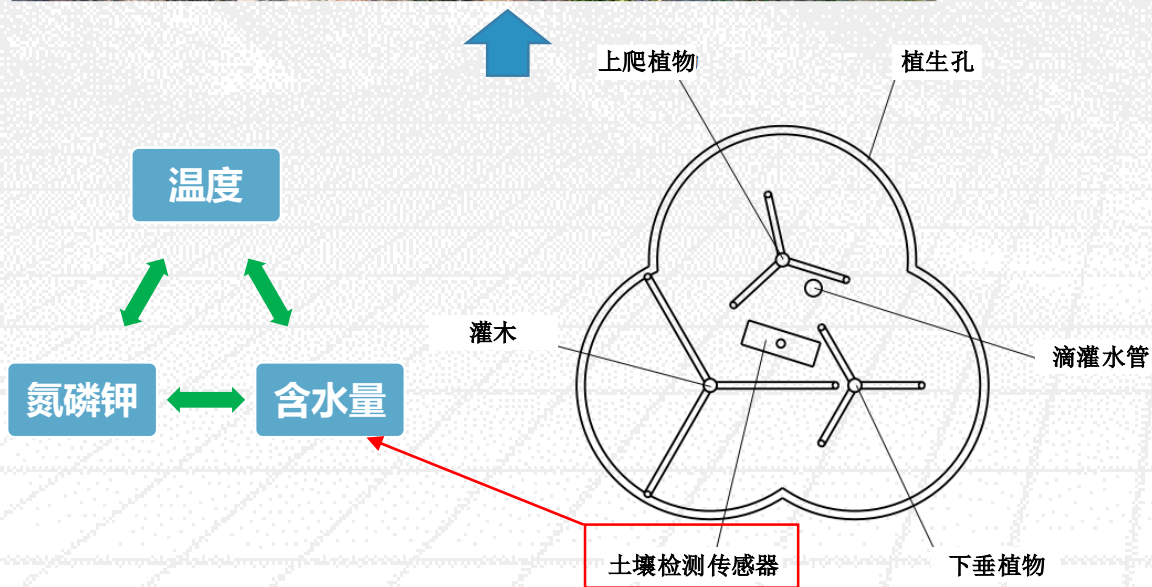
控制  
系统

网络  
平台

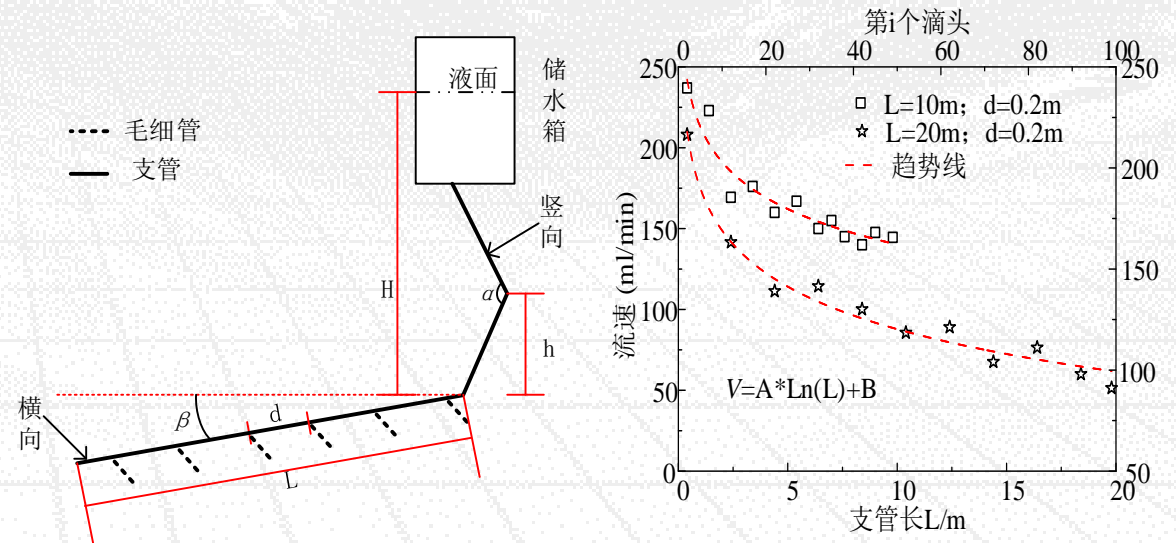
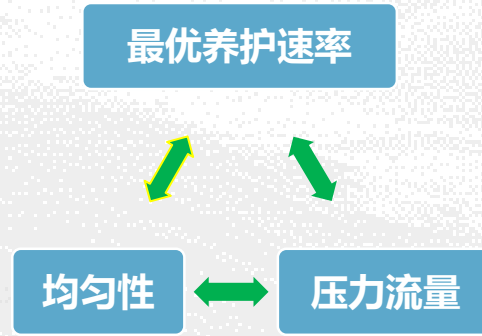


# 2.7 信息化滴灌养护技术

## ➤ 土壤肥力传感器研究



## ➤ 滴灌管路布设研究





# 目 录

- ◆ 1. 高陡边坡植生孔复绿技术图景
- ◆ 2. 植生孔复绿关键技术和产品
- ◆ 3. 产业化应用及修复案例
- ◆ 4. 指标总结

# 3 产业化应用及修复案例

产品定位-行业领先

植生孔复绿成套解决方案

应用场景

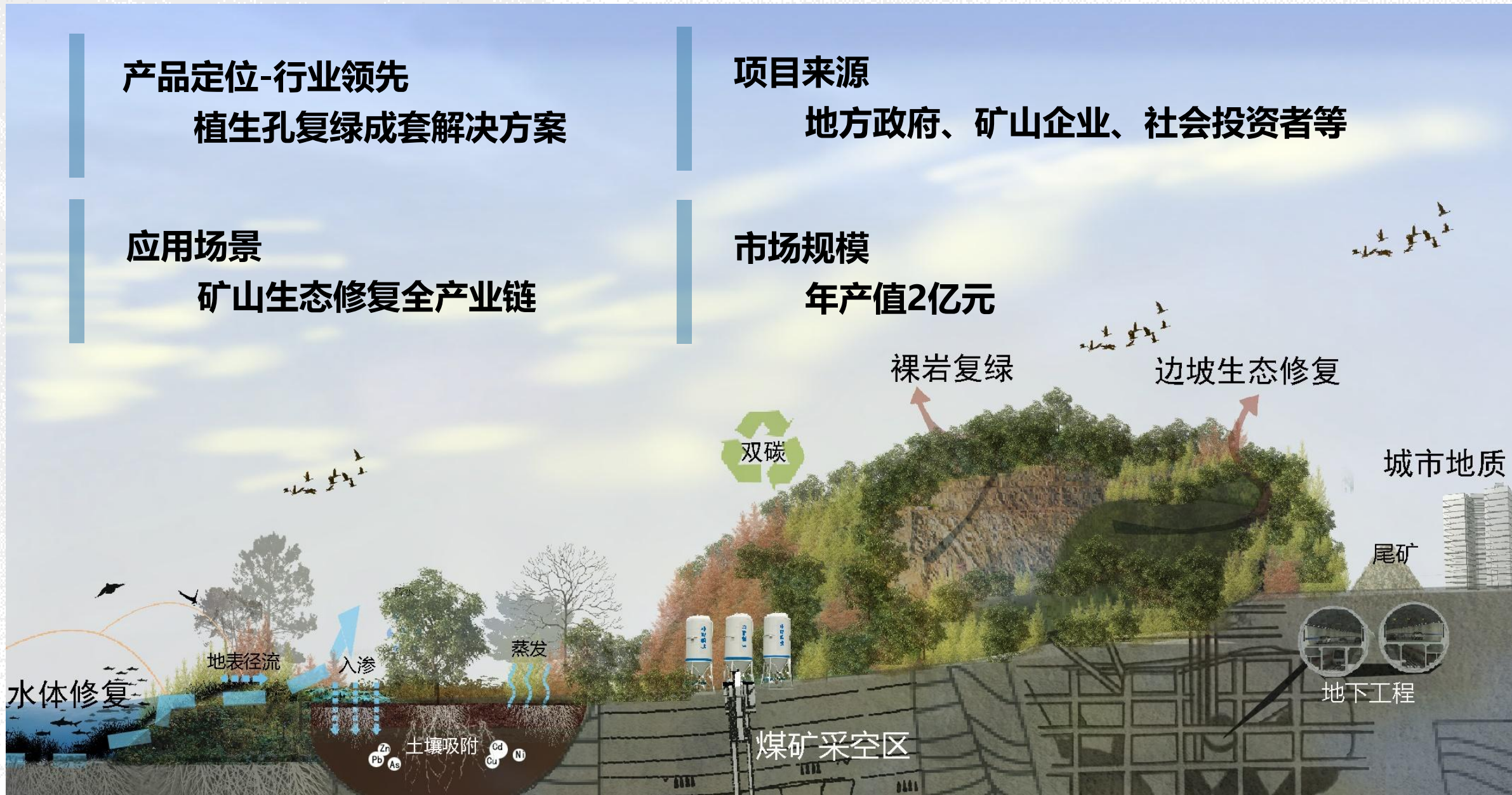
矿山生态修复全产业链

项目来源

地方政府、矿山企业、社会投资者等

市场规模

年产值2亿元

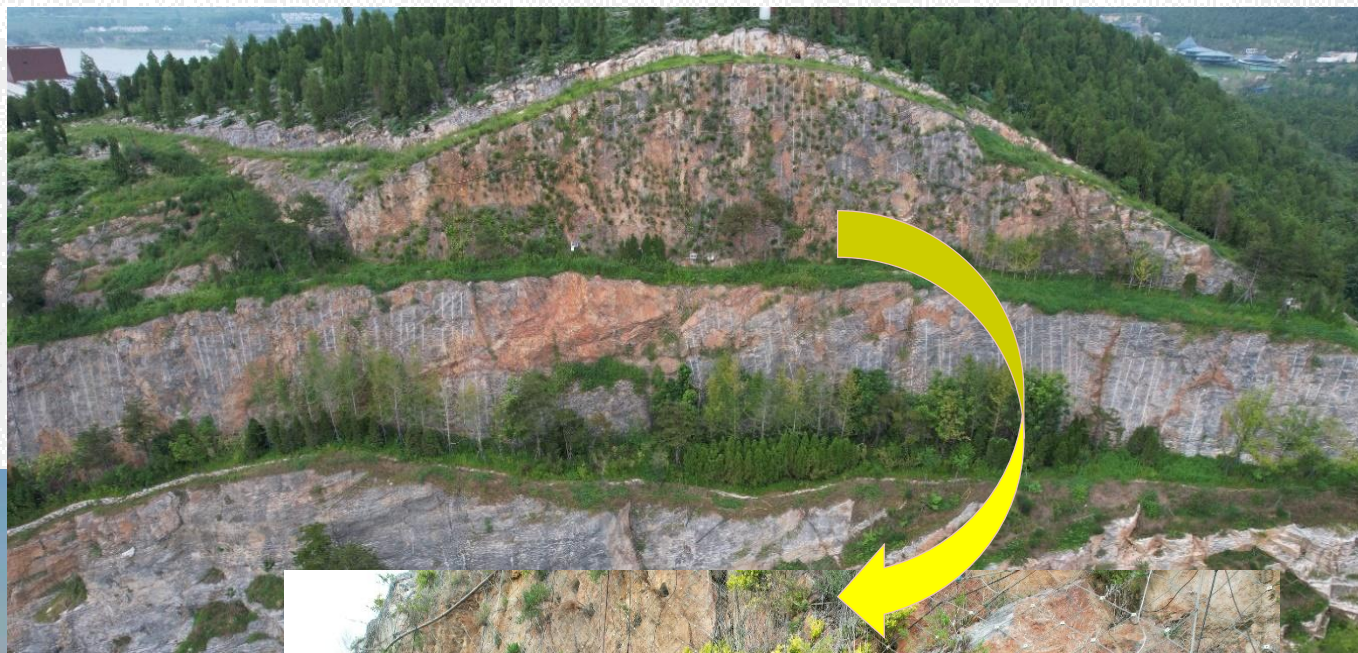


### 3 产业化应用及修复案例

#### ➤ 江苏省徐州市园博园宕口高陡边坡植生孔复绿工程（修复一年效果）

边坡工况：

- 坡度： $> 75^\circ$
- 坡高：单级坡高  $> 30\text{m}$
- 岩性：微风化灰岩
- 气候：干旱少雨



### 3 产业化应用及修复案例

#### ➤ 安徽省淮北市大山头宕口高陡边坡**喷播-植生孔**组合复绿（修复一年效果）

边坡工况：

- 坡度：> 60°
- 坡高：单级坡高 > 10m
- 岩性：微风化灰岩
- 气候：干旱少雨





# 目 录

- ◆ 1. 高陡边坡植生孔复绿技术图景
- ◆ 2. 植生孔复绿关键技术和产品
- ◆ 3. 产业化应用及修复案例
- ◆ 4. 指标总结

## 4 高陡边坡植生孔覆绿成套技术·指标总结

**适应工况**  
干旱缺水、冬冷夏热气候环境  
硬质自稳岩体  
坡度 > 60°

**效率指标**  
单孔钻孔时间小于2min/孔  
循环钻孔时间小于3min/孔

七项关键技术协同  
**高陡边坡植生孔  
覆绿技术**

### 质量指标

三月覆盖度：100%（喷植组合）。  
两年覆盖度：80%（仅植生孔）。  
植生孔参数：单级坡高0~40m、植生孔直径50~300mm、深度0.5~4.5m。  
新型植生土：保水能力提升20%，保肥、保温及透气能力提升5%-10%。

### 安环指标

不突破用地红线，不产生次生灾害  
充分利用工程废弃土，环保无污染  
施工过程中无明显粉尘



# 绿色矿山科技成果证书

成果名称：高陡岩质边坡植生孔复绿成套化解决技术与产品

完成单位：徐州中矿岩土技术股份有限公司 中国矿业大学

完 成 人：

丁陈建 宋豪 刘抗 赵天然 王鹤霖 杜占吉 史继彪 汪吉林  
李明亮 田玉新 崔永占

证书号：8112023ZLM044

2023年8月



技 术 名 称	高陡边坡植生孔成套化解决技术与产品		
技术持有单位	徐州中矿岩土技术股份有限公司	主要完成人	丁陈建等
通 信 地 址		联 系 人	

专  
家  
评  
荐  
意  
见

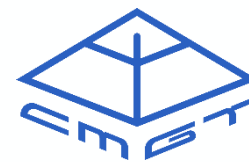
植生孔成套化解决技术与产品，整合了植生孔前期评价，植生孔应用构造，数控钻孔机，孔内基质改造，孔内植物配置，自动化养护与监测。

技术先进适用，具有创新性，技术推广应用能够取得良好的生态、环境、经济和社会效益。

同意推荐。

主审专家：

专家组长：



江苏省采空区治理与生态修复工程技术研究中心

**敬请指正，谢谢！**

汇报人：吴圣林

电 话：13951351099

中国矿业大学 徐州中矿岩土技术股份有限公司