

# 浙江温岭市废弃矿山植被恢复特性分析

王超<sup>1\*</sup>, 陶清华<sup>1</sup>, 王剑波<sup>2</sup>, 林雪锋<sup>3</sup>, 李振<sup>3</sup>, 郑怡<sup>4</sup>, 郭亮<sup>5#</sup>

<sup>1</sup>浙江省工程勘察设计院集团有限公司地质矿产调查研究院, 浙江 宁波

<sup>2</sup>浙江省温岭市自然资源和规划局地质矿产管理科, 浙江 台州

<sup>3</sup>浙江省台州市自然资源和规划局国土空间生态修复处, 浙江 台州

<sup>4</sup>浙江省台州市椒江区公用工程建设中心, 浙江 台州

<sup>5</sup>浙江省台州市椒江区农业农村和水利局, 浙江 台州

收稿日期: 2026年8月23日; 录用日期: 2026年9月28日; 发布日期: 2026年10月10日

## 摘要

目的: 旨在分析温岭市废弃矿山高陡岩质边坡的植被恢复难点。方法: 采用“方木条 + 镀锌铁丝网挂网 + 管状植生带 + 厚层基材喷播”工艺, 并在坡脚平台开展覆土种植, 对5座不同恢复年限(0.5~5 a)废弃矿山设置的40个样方开展植被调查。结果: 1) 本次调查共记录植物46科99属132种, 其中木本植物20科28属37种, 草本植物26科71属95种; 菊科、禾本科、豆科和蔷薇科在生态修复植物群落中占据重要地位, 一年生草本可快速完成定植。2) 不同坡位的植物群落组成存在较明显差异, 下坡的乔灌木与草本植物在种类、高度、盖度上均优于上坡和中坡。3) 乔 + 灌 + 草的建群种分别为银合欢、女贞 + 木蓝、苕麻 + 决明、五节芒, 设计种子配方中有意识地加入较多乔灌木种子, 属于人为促进植物群落正向演替的措施。结论: 温岭市废弃矿山整体植被恢复效果较好, 科属组成较为分散, 以乡土草本植物占据主导地位, 群落物种组成与结构逐渐向良性方向发展; 由于植物群落演替与恢复时间密切相关, 本次研究覆盖的0.5~5 a恢复区群落演替仍处于演替初期, 后续应当开展持续监测, 通过试验手段筛选一些可以抵御外来物种的抗性较强的树种, 并应用于被破坏的山体或其他生境, 掌握废弃矿山植物群落的演替规律。

## 关键词

废弃矿山, 植被恢复, 植物群落, 高陡岩质边坡, 浙江温岭

# Analysis of Vegetation Restoration Characteristics in Abandoned Mines in Wenling City, Zhejiang Province

Chao Wang<sup>1\*</sup>, Qinghua Tao<sup>1</sup>, Jianbo Wang<sup>2</sup>, Xuefeng Lin<sup>3</sup>, Zhen Li<sup>3</sup>, Yi Zheng<sup>4</sup>, Liang Guo<sup>5#</sup>

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王超, 陶清华, 王剑波, 林雪锋, 李振, 郑怡, 郭亮. 浙江温岭市废弃矿山植被恢复特性分析[J]. 世界生态学, 2026, 15(4): 585-597. DOI: 10.12677/ije.2026.154064

<sup>1</sup>Geological and Mineral Resources Survey Research Institute, Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>Geological and Mineral Resources Management Section, Wenling City Natural Resources and Planning Bureau, Zhejiang Province, Taizhou Zhejiang

<sup>3</sup>Department of Territorial Spatial Ecological Restoration, Taizhou Municipal Natural Resources and Planning Bureau, Zhejiang Province, Taizhou Zhejiang

<sup>4</sup>Jiaojiang District Public Works Construction Center, Taizhou City, Zhejiang Province, Taizhou Zhejiang

<sup>5</sup>Jiaojiang District Agriculture, Rural Affairs and Water Resources Bureau, Taizhou City, Zhejiang Province, Taizhou Zhejiang

Received: August 23, 2026; accepted: September 28, 2026; published: October 10, 2026

## Abstract

**Objective:** To analyze the challenges associated with vegetation restoration on high-angled rocky slopes in abandoned mining sites within Wenling City. **Methodology:** The “wooden strip + galvanized wire mesh installation + tubular vegetation belt + thick-layer substrate spraying” technique was employed; soil covering and planting were conducted on the slope base platform. Vegetation surveys were carried out across 40 sample quadrats established at five abandoned mining sites with varying restoration durations (0.5~5 years). **Results:** 1) This survey recorded 132 plant species belonging to 99 genera across 46 families, including 37 woody plant species (20 families, 28 genera) and 95 herbaceous plant species (26 families, 71 genera); the Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, and Rosaceae families play significant roles in the ecological restoration plant communities, while annual herbaceous plants can establish themselves rapidly. 2) There were notable differences in the composition of plant communities across different slope positions; the tree, shrub, and herbaceous plant communities on the downhill slopes exhibited higher species richness, greater height, and greater coverage compared to those on the uphill and mid-slope areas. 3) The founding species for the tree-shrub-herbaceous community were *Acacia* spp., *Ligustrum* + *Indigo naturalis*, *Mākā* + *Cassia*, and *Pterocarpus* spp.; the designed seed mixture intentionally incorporated a higher proportion of tree and shrub seeds, representing a human-driven measure to promote the positive succession of plant communities. **Conclusion:** The overall vegetation restoration efforts at the abandoned mining sites in Wenling City have yielded favorable results; the taxonomic composition of the vegetation is relatively diverse, with native herbaceous plants dominating the community, and the species composition and structure of these communities are gradually evolving toward a more sustainable state. Since plant community succession is closely linked to the duration of restoration, the communities within the 0.5~5-year restoration zones covered in this study are still in the early stages of succession; therefore, continuous monitoring should be conducted in the future. Through experimental approaches, tree species with high resistance to invasive species should be identified and deployed on damaged mountain slopes or other habitats to better understand the succession patterns of plant communities in abandoned mining areas.

## Keywords

Abandoned Mines, Vegetation Restoration, Plant Communities, Steep Rocky Slopes, Wenling, Zhejiang Province

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

采矿业是经济发展的重要推动力,但采矿活动结束后会遗留大量废弃矿山,其中高陡岩质边坡存在立面过高、坡度过陡的问题,对区域生态环境造成极大负面影响[1][2]。国际上高陡岩质边坡复绿一直是矿山生态修复领域的重点难题[3]。近年来,国内外高校、研究机构及企业已针对高陡岩质边坡生态修复开展了大量研究,形成了藤蔓垂直绿化[4]、植生袋[5]、爆破燕窝生态修复[6]、喷播绿化[7][8]、地境再造[9]等一系列技术,是科学消除矿山地质灾害隐患、改善生态环境、盘活利用土地资源、优化国土空间格局的有效途径。

对修复效果开展评价,是边坡植被恢复工作的重要环节。在防治土壤退化的过程中,植被发挥着不可替代的作用,尤其是在不稳定边坡,植被恢复已经展现出显著的治理成效。植被不仅是废弃矿山边坡生态修复的核心组成部分,其生长状况更是衡量生态防护效果的关键指标,因此深入探究植被恢复特征与群落演替规律,已经成为恢复生态学领域的研究热点[10]。

本文以温岭市废弃矿山高陡岩质边坡生态修复工程为研究对象,通过对生态修复完成后的区域开展植被调查,探讨该工程的生态修复效果,可为高陡岩质边坡生态修复技术的合理选择提供科学依据。

## 2. 研究区概况

温岭市地处浙江省东南沿海,121°09'50"~121°44'0"E,28°12'45"~28°32'02"N。区域构造基底属于新华夏系构造,为华南褶皱带的东延部分,发育多组北东向断裂构造。温岭市位于浙江省东南沿海火山岩带东南端,基底广泛分布白垩纪火山岩系,表层覆盖第四纪残坡积层,赋存有花岗岩风化壳型矿产资源。受季风影响,该地属于台风频发区,年均降水量达1400 mm,降雨侵蚀模数达5000 t/km<sup>2</sup>。花岗岩矿区呈带状沿北雁荡山余脉分布,长屿硐天等12处大型采场占区域总面积的8.3%。从优势矿种特征来看,凝灰岩探明储量达120 Mt,当地优质建筑石料入选杭州湾跨海大桥等国家级工程的指定建材。长屿硐天集雄、险、奇、巧、幽为一体,是我国海滨独具魅力的风景旅游胜地;采石场在空间上呈集群分布,形成28个大型古洞室群,总面积约31.8×104 m<sup>2</sup>,包含1314个洞窟,总容积近6×106 m<sup>3</sup>,在此基础上建成了长屿硐天世界地质公园和国家矿山公园[11]。

温岭市植被属于中亚热带常绿阔叶林北部亚地带,处于中亚热带常绿阔叶林北部亚地带和南部亚地带的过渡区域[12]。滨海植物与岩生植物区系发达,受历史上的人类活动影响与破坏,原生植被已消失,大部分区域被人工种植的马尾松、杉木、黑松、柑橘和次生灌丛取代。现有森林植被主要分布在西部山区,包括针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、竹林、灌丛等类型,还有杨梅、柑橘、枇杷、橙和柿等特色经济林。

## 3. 研究方法

### 3.1. 稳定性治理

以温岭市5个废弃矿山生态修复工程为研究对象,坡面复绿采用组合喷播加辅助措施,即方木条+镀锌铁丝网挂网+管状植生带+厚层基材喷播,坡脚挡土墙内平台覆土种植乔灌木、攀缘藤蔓植物,见表1。

Table 1. Basic information survey for slope sampling sites

表 1. 边坡样地基本情况调查

| 样地号 | 样地名称 | 所在乡镇 | 海拔/m    | 最终边坡角  | 坡向    | 喷播面积/m <sup>2</sup> | 基质厚度/cm | 竣工时间    |
|-----|------|------|---------|--------|-------|---------------------|---------|---------|
| 1   | 白山里村 | 大溪镇  | +4~78.4 | 40~45° | 北东    | 7990                | 15      | 2025-11 |
| 2   | 上街村  | 温峤镇  | +58~263 | 41~49° | 南西、北东 | 77495               | 12      | 2021-06 |

续表

|   |     |     |           |        |      |       |    |         |
|---|-----|-----|-----------|--------|------|-------|----|---------|
| 3 | 蒋山村 | 坞根镇 | +60~151   | 43°    | 东    | 32183 | 12 | 2023-10 |
| 4 | 姆岭头 | 城南镇 | +90~150.6 | 45°    | 南    | 27827 | 12 | 2023-12 |
| 5 | 盘马山 | 箬横镇 | +4~52.8   | 35~45° | 北、北东 | 20045 | 12 | 2025-11 |

对宕底平台进行削坡平整,坡面清除碎块石、崩落物,平台及底盘清理浮石、堆渣等;对难以清除的危岩或危石,采用随机锚杆加固,SNS 柔性主动防护网防护;挡墙、排水系统、安全防护栏设置。

### 3.2. 边坡复绿

#### 3.2.1. 加糙技术和挂网

采用增加方木条、管状植生带等加糙技术,使用 40×40×400 mm 方木条,间距 500×500 mm,呈梅花形布置。使用 14# PVC 包塑镀锌铁丝网,铁丝丝径 ≥2 mm,网孔 5 cm×5 cm。管状植生带 φ 80~90 mm,长 1000~2000 mm,用 18#镀锌铁丝绑扎在网片上;行距 50 cm,植生带基质配比见表 2。

Table 2. Vegetative strip substrate mixing ratio

表 2. 植生带基质配比

| 材料名称      | 壤土 | 泥炭土 | 蛭石 | 珍珠岩 | 有机肥 | 复合肥 |
|-----------|----|-----|----|-----|-----|-----|
| 材料用量(体积%) | 20 | 20  | 25 | 23  | 10  | 2   |

#### 3.2.2. 边坡绿化

采用厚层基材喷播方式进行全坡面喷播。喷播基质配制见表 3,喷播植物种子配制见表 4,基质和植物种子掺入周边林地土壤,搅拌机混合,通过专门机械喷附在网片面上,喷后及时覆盖遮阳网和浇水养护,促进喷播植物种子的发芽生长。

Table 3. Surface spraying substrate mixing ratio

表 3. 喷播基质配比

| 材料名称 | 壤土     | 泥炭土   | 草纤维  | 谷壳   | 蛭石   | 有机肥  | 复合肥  | 保水剂  | 粘合剂   |
|------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 材料用量 | 100 kg | 15 kg | 5 kg | 2 kg | 1 kg | 5 kg | 30 g | 25 g | 130 g |

Table 4. Engineering planting scheme

表 4. 工程植物配置

| 木本 | 植物名称                                                       | 种植方式                    | 草本  | 植物名称                           | 种植方式                    |
|----|------------------------------------------------------------|-------------------------|-----|--------------------------------|-------------------------|
| 灌木 | 美丽胡枝子( <i>Lespedeza thunbergii</i> subsp. <i>Formosa</i> ) | 种子(4 g/m <sup>2</sup> ) | 多年生 | 狗牙根( <i>Cynodon dactylon</i> ) | 种子(2 g/m <sup>2</sup> ) |
| 乔木 | 银合欢( <i>Leucaena leucocephala</i> )                        | 种子(2 g/m <sup>2</sup> ) | 多年生 | 高羊茅( <i>Festuca elata</i> )    | 种子(3 g/m <sup>2</sup> ) |
| 乔木 | 臭椿( <i>Ailanthus altissima</i> )                           | 种子(3 g/m <sup>2</sup> ) | 多年生 | 苜蓿( <i>Medicago sativa</i> )   | 种子(4 g/m <sup>2</sup> ) |
| 灌木 | 木蓝( <i>Indigofera tinctoria</i> )                          | 种子(2 g/m <sup>2</sup> ) | 多年生 | 决明( <i>Senna tora</i> )        | 种子(3 g/m <sup>2</sup> ) |
| 灌木 | 刺槐( <i>Robinia pseudoacacia</i> )                          | 种子(3 g/m <sup>2</sup> ) |     |                                |                         |

续表

|    |                                      |                         |
|----|--------------------------------------|-------------------------|
| 乔木 | 女贞( <i>Ligustrum lucidum</i> )       | 种子(4 g/m <sup>2</sup> ) |
| 乔木 | 湿地松( <i>Pinus elliottii</i> Engelm.) | 种子(2 g/m <sup>2</sup> ) |
| 乔木 | 女贞                                   | 苗木                      |
| 灌木 | 夹竹桃( <i>Nerium oleander</i> )        | 苗木                      |
| 乔木 | 樟( <i>Camphora officinarum</i> )     | 苗木                      |
| 灌木 | 石楠( <i>Photinia serratifolia</i> )   | 苗木                      |
| 灌木 | 野迎春( <i>Jasminum mesnyi</i> )        | 苗木                      |
| 灌木 | 小叶女贞( <i>Ligustrum quihoui</i> )     | 苗木                      |

3.2.3. 挡墙内绿化

坡脚挡墙内绿化，覆种植土厚度 > 80 cm，种植乔木、灌木、攀缘灌木。平台挡墙内绿化，侧覆土厚度 50 cm，种植灌木、撒播草籽，见表 4。

3.2.4. 喷灌系统及养护

简易喷灌系统安置自动喷头，以全面喷到为原则。养护管理，① 覆盖遮阳网，防止阳光暴晒和大雨对坡面的冲刷，保护植物幼苗，待幼苗长到 5 cm 时拆除。② 苗前浇水养护。③ 苗后养护，包括浇水、扶直、补种、病虫害防治等。

3.3. 调查方法

于 2025 年 11 月和 2026 年 6 月 2 次采用机械布点及典型抽样方法进行样地调查，每个样地布置 8 个样方，5 个样地布置了 40 个样方。在每个样地设置上坡 2 个、中坡 3 个和下坡 3 个样方；样地上坡、下坡、左右距边缘 5~10 m。因植物均为低矮乔灌木和草本，设定乔灌木层样方大小为 2 m×2 m、草本层样方大小为 1 m×1 m。在样方内调查记录植物的名称及其多度、盖度、生长情况、是否属于栽培等。多度按很多、多、一般、少、很少五个级别分别赋予 5、4、3、2、1 的定量值。

3.4. 统计方法

根据《中英文版植物志》(<https://www.iplant.cn/>)查询每种植物的分布来源，分别认定自然生长情况下的乡土种、外来种和人工栽培种(设计方案)。

重要值，将物种重要值(IV)作为衡量物种优势度的标准。计算样方内物种的相对多度(RA)、相对频度(RF)、乔木层的相对显著度(RD)，灌木层和草本层的相对盖度(RC)，由此得到植物各物种的重要值。乔木层物种重要值 = (相对多度 + 相对频度 + 相对显著度)/3 × 100，灌木层和草本层物种重要值 = (相对多度 + 相对频度 + 相对盖度)/3 × 100。

4. 结果与分析

4.1. 群落种类组成

据样方调查，温岭市 5 个废弃矿边坡生态修复(0.5~5 a)后共出现植物 132 种，分属 46 科 99 属，其中草本植物 95 种，分属 26 科 71 属，占植物总种数的 71.96%，从群落结构组成来看，草本植物为优势群落；灌木植物 23 种，分属 12 科 16 属，占植物总种数的 17.42%；乔木植物 14 种，分属 11 科 13 属，占植物总种数的 10.61%。这是由于温岭市地处中亚热带常绿阔叶林北部亚地带和南部亚地带的过渡区，故

植被恢复快、种类丰富。其中种数最多的是菊科 14 属 18 种，其次为豆科 13 属 14 种、禾本科 9 属 12 种、蔷薇科 6 属 9 种、旋花科 1 属 6 种、唇形科 4 属 5 种、蓼科 3 属 5 种、卷柏科 1 属 4 种、苋科 3 属 3 种、莎草科 2 属 3 种、十字花科 2 属 3 种、凤尾蕨科 2 属 3 种、大戟科 2 属 3 种、报春花科 1 属 3 种；种类组成中仅含 1~2 种的有 31 科，占总科数的 67.39%。菊科、禾本科、豆科和蔷薇科在生态修复植物群落中占据重要地位，科属组成较为分散，这说明温岭市废弃矿植被恢复效果较好，见表 5、表 6。

**Table 5.** Composition of families, genera, and species among woody plants with vascular bundles  
**表 5.** 维管束木本植物科、属、种组成

| 科名                     | 属数 | 种数 | 科名                 | 属数 | 种数 |
|------------------------|----|----|--------------------|----|----|
| 豆科(Fabaceae)           | 6  | 7  | 漆树科(Anacardiaceae) | 1  | 1  |
| 蔷薇科(Rosaceae)          | 2  | 5  | 无患子科(Sapindaceae)  | 1  | 1  |
| 木犀科(Oleaceae)          | 2  | 3  | 楝科(Meliaceae)      | 1  | 1  |
| 大戟科(Euphorbiaceae)     | 1  | 2  | 胡桃科(Juglandaceae)  | 1  | 1  |
| 五列木科(Pentaphylacaceae) | 1  | 2  | 柏科(Cupressaceae)   | 1  | 1  |
| 马鞭草科(Verbenaceae)      | 1  | 2  | 锦葵科(Malvaceae)     | 1  | 1  |
| 桑科(Moraceae)           | 1  | 2  | 大麻科(Cannabaceae)   | 1  | 1  |
| 夹竹桃科(Apocynaceae)      | 2  | 2  | 葡萄科(Vitaceae)      | 1  | 1  |
| 荨麻科(Urticaceae)        | 1  | 1  | 五加科(Araliaceae)    | 1  | 1  |
| 樟科(Lauraceae)          | 1  | 1  | 菝葜科(Smilacaceae)   | 1  | 1  |

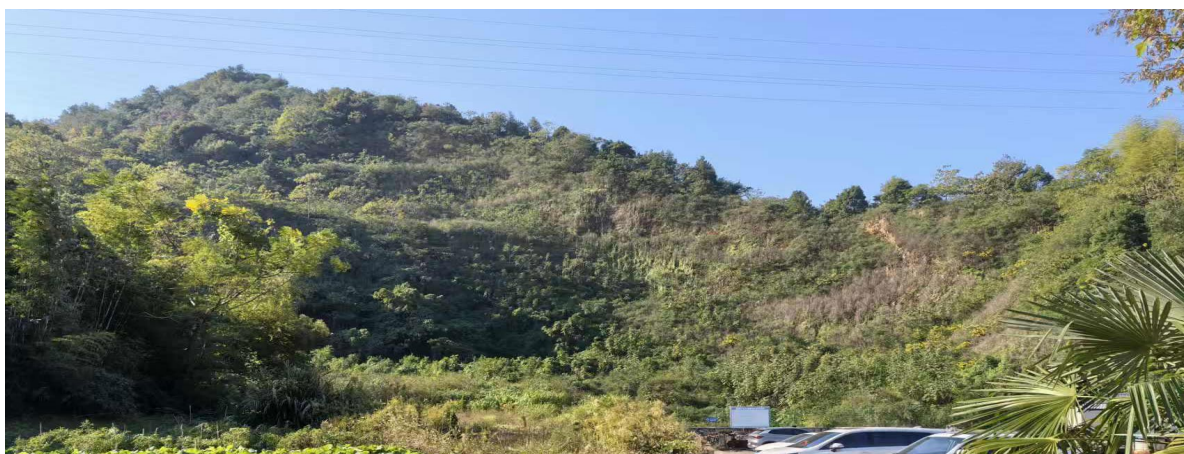
**Table 6.** Composition of families, genera, and species among herbaceous plants with vascular bundles  
**表 6.** 维管束草本植物科、属、种组成

| 科名                   | 属数 | 种数 | 科名                    | 属数 | 种数 |
|----------------------|----|----|-----------------------|----|----|
| 菊科(Asteraceae)       | 14 | 18 | 碗蕨科(Dennstaedtiaceae) | 1  | 1  |
| 禾本科(Poaceae)         | 9  | 12 | 铁角蕨科(Aspleniaceae)    | 1  | 1  |
| 豆科(Fabaceae)         | 7  | 7  | 蹄盖蕨科(Athyriaceae)     | 1  | 1  |
| 旋花科(Convolvulaceae)  | 1  | 6  | 伞形科(Apiaceae)         | 1  | 1  |
| 唇形科(Lamiaceae)       | 4  | 5  | 桔梗科(Campanulaceae)    | 1  | 1  |
| 蓼科(Polygonaceae)     | 3  | 5  | 茜草科(Rubiaceae)        | 1  | 1  |
| 卷柏科(Selaginellaceae) | 1  | 4  | 商陆科(Phytolaccaceae)   | 1  | 1  |
| 报春花科(Primulaceae)    | 1  | 3  | 天门冬科(Asparagaceae)    | 1  | 1  |
| 苋科(Amaranthaceae)    | 3  | 3  | 石竹科(Caryophyllaceae)  | 1  | 1  |
| 莎草科(Cyperaceae)      | 2  | 3  | 紫茉莉科(Nyctaginaceae)   | 1  | 1  |
| 十字花科(Brassicaceae)   | 2  | 3  | 大戟科(Euphorbiaceae)    | 1  | 1  |
| 凤尾蕨科(Pteridaceae)    | 2  | 3  | 海金沙科(Lygodaceae)      | 1  | 1  |
| 蔷薇科(Rosaceae)        | 2  | 2  | 大麻科(Cannabaceae)      | 1  | 1  |
| 酢浆草科(Oxalidaceae)    | 1  | 2  | 葫芦科(Cucurbitaceae)    | 1  | 1  |
| 鸭跖草科(Commelinaceae)  | 2  | 2  | 葡萄科(Vitaceae)         | 1  | 1  |
| 忍冬科(Caprifoliaceae)  | 2  | 2  |                       |    |    |



**Figure 1.** The Baishanli Village abandoned mine before ecological restoration in Daxi Town

**图 1.** 大溪镇白山里村废弃矿山生态修复前



**Figure 2.** The Baishanli Village abandoned mine after ecological restoration in Daxi Town

**图 2.** 大溪镇白山里村废弃矿山生态修复后



**Figure 3.** The Panma Mountain abandoned mine before ecological restoration in Wuheng Town

**图 3.** 箬横镇盘马山废弃矿山生态修复前



**Figure 4.** The Panma Mountain abandoned mine after ecological restoration in Wuheng Town  
**图 4.** 箬横镇盘马山废弃矿山生态修复后

**4.2. 群落类型划分**

植物群落的划分，根据植物生长类型的重要值及平均高度来确定样地的群落类型。乔 + 灌 + 草的建群种分别为银合欢、女贞 + 木蓝、苕麻(*Boehmeria nivea*) + 决明、五节芒。豆科等灌木、草本物种对生长环境的要求都不高，是具有较强的生长扩散能力的先锋植物和具有固氮作用的土壤改良植物，对早期群落构建具有促进作用。

在样地 1 和 5 中，坡向为北东，植被恢复 0.5 a，乔木层有女贞、银合欢、刺槐，灌木层有木蓝、苕麻、菝葜(*Smilax china*)，草本层有决明、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)占优势地位。样地 1 有植物 44 种，其中乔木 7 种、灌木 5 种，见图 1、图 2。样地 5 有 46 种植物，其中乔种 4 种、灌木 5 种，属于乔灌草群落起始阶段，见图 3、图 4。在样地 3 和 4 中，坡向为东南坡，植被恢复 2.5 a。样地 3 有植物 62 种，其中乔木 10 种、灌木 13 种，更新层有桉木(*Eurya japonica*)、细齿叶桉(*Eurya nitida*)等滨海特有植物；因乔木的入侵及原生乔木的种子传播，乔木比例增大，此时乔木与灌木相互竞争，因而该样地正处于灌木向乔木演替的乔灌丛阶段。样地 4 有植物 48 种，其中乔木 4 种、灌木 7 种。在样地 2 中，坡向为南西、北东，喷播面积最大，边坡坡度 41°~49°，坡度大，重力分力大，坡面径流速度越快，导致基质流失严重；植被恢复 5 a，有植物 57 种，其中乔木 8 种、灌木 13 种，植物种类较为丰富，群落物种组成与结构逐渐向良性方向发展，见表 7~9。

**Table 7.** Composition and characteristics of dominant tree species in the tree layer  
**表 7.** 乔木层优势种组成及特征

| 种名  | 1 号  |      | 2 号  |      | 3 号  |      | 4 号  |      | 5 号  |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   |
|     | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) |
| 女贞  | 22.6 | 2.8  | 21.3 | 3.1  | 21.7 | 3.2  | /    | /    | 72.5 | 2.7  |
| 银合欢 | 31.2 | 2.0  | 29.6 | 2.3  | 23.4 | 2.0  | 40.2 | 2.2  | /    | /    |
| 野桐  | 14.4 | 2.5  | 12.7 | 3.0  | 6.2  | 3.0  | 15.5 | 2.4  | /    | /    |
| 盐麸木 | 9.5  | 2.3  | 7.3  | 2.6  | 9.6  | 2.5  | 28.0 | 2.2  | /    | /    |
| 楝   | 7.7  | 2.4  | 9.8  | 3.0  | 8.3  | 3.0  | 16.3 | 2.1  | /    | /    |
| 刺槐  | 6.8  | 2.0  | 6.6  | 2.1  | /    | /    | /    | /    | 27.5 | 1.8  |

**Table 8.** Composition and characteristics of dominant species in the shrub layer  
**表 8.** 灌木层优势种组成及特征

| 种名  | 1 号  |      | 2 号  |      | 3 号  |      | 4 号  |      | 5 号  |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   |
|     | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) |
| 木蓝  | 30.5 | 1.3  | 25.1 | 1.5  | 24.3 | 2.6  | 33.4 | 2.2  | 33.7 | 1.2  |
| 苎麻  | 21.9 | 0.7  | 10.3 | 0.9  | 12.2 | 0.9  | 18.7 | 0.7  | 20.6 | 0.6  |
| 牡荆  | 18.2 | 0.5  | /    | /    | /    | /    | 21.3 | 0.6  | /    | /    |
| 黄荆  | /    | /    | /    | /    | 10.7 | 0.7  | 16.5 | 0.6  | /    | /    |
| 夹竹桃 | /    | /    | 12.6 | 2.3  | /    | /    | /    | /    | /    | /    |
| 菝葜  | 14.7 | 0.5  | 9.3  | 0.6  | 7.5  | 0.6  | 10.1 | 0.5  | 10.2 | 0.4  |
| 蓬蒿  | 14.7 | 0.4  | 8.7  | 0.5  | 8.6  | 0.5  | /    | /    | /    | /    |

**Table 9.** Composition and characteristics of dominant species in the herbaceous layer  
**表 9.** 草本层优势种组成及特征

| 种名      | 1 号  |      | 2 号  |      | 3 号  |      | 4 号  |      | 5 号  |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   | 重要值  | 高度   |
|         | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) | (%)  | (cm) |
| 决明      | 23.9 | 110  | 21.3 | 125  | 20.5 | 120  | 25.7 | 115  | 25.1 | 110  |
| 五节芒     | 11.3 | 160  | 9.7  | 175  | 10.8 | 170  | 9.5  | 165  | 7.3  | 155  |
| 鬼针草     | 7.1  | 45   | 6.5  | 53   | 3.3  | 55   | 5.3  | 55   | 6.9  | 50   |
| 小蓬草     | 6.2  | 42   | 5.3  | 50   | 6.8  | 45   | 4.7  | 50   | /    | /    |
| 葛       | 5.0  | 50   | 5.3  | 70   | 6.8  | 60   | 3.1  | 60   | 5.4  | 50   |
| 加拿大一枝黄花 | 7.6  | 47   | 4.5  | 55   | 6.8  | 50   | 6.4  | 55   | 5.4  | 40   |
| 狗尾草     | /    | /    | /    | /    | 2.6  | 50   | 5.9  | 55   | 4.6  | 50   |
| 海金沙     | 4.4  | 40   | 3.3  | 55   | 4.7  | 55   | 3.1  | 50   | 4.6  | 40   |
| 葎草      | 2.6  | 35   | 3.0  | 42   | 2.6  | 40   | 3.6  | 35   | 3.9  | 35   |

4.3. 坡位对植物群落的影响

植被恢复 0.5 a 后，坡面草本层以菊科的鬼针草、小蓬草(*Erigeron canadensis*)、加拿大一枝黄花、剑叶金鸡菊(*Coreopsis lanceolata*)、黄鹌菜(*Youngia japonica*)，豆科的决明、葛，禾本科的五节芒、狗尾草(*Setaria viridis*)等乡土和外来侵入草本植物为主，这些植物为优势种，草本层的平均高度 60 cm；植物从较为均匀的状态逐步形成镶嵌状态，各种群常呈现出群丛分布。灌木比重增加，坡面形成灌草群落。灌木层优势种为木蓝、牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)、苎麻、黄荆(*Vitex negundo*)，其中木蓝为主要建群种，灌木层高度 120 cm。乔木层皆为人工种植的女贞、楝(*Melia azedarach*)、构(*Broussonetia papyrifera*)、盐麸木，高度 240 cm。执行生态修复技术规范[13]，才能达到设计要求和设计效果。

不同的坡位，其植物群落的组成有较明显的差异，上坡的乔灌木层、草本层与中坡、下坡相比，无论是高度、盖度均略低于中坡、下坡，其主要乔灌木、草本植物也相对单一；下坡乔灌木与草本植物无论是种类、高度、盖度均优于上坡和中坡，得益于下坡喷播基质略厚，坡脚挡墙内土层深厚，见表 10。

**Table 10.** Plant communities at different slope positions  
**表 10.** 不同坡位植物群落

| 坡位 | 垂直结构 | 高度/cm | 盖度/% | 植物名称                                     | 植物类型     |
|----|------|-------|------|------------------------------------------|----------|
| 上  | 乔灌层  | 83    | 52   | 木蓝、牡荆、野蔷薇、菝葜                             | 落叶灌木常绿藤本 |
|    | 草本层  | 35    | 44   | 决明、鬼针草、小蓬草、葛                             | 一年、多年生   |
| 中  | 乔灌层  | 135   | 71   | 银合欢、盐麸木、木蓝、牡荆、苎麻、黄荆                      | 落叶灌木     |
|    | 草本层  | 56    | 48   | 决明、鬼针草、小蓬草、五节芒、葎草、葛                      | 一年、多年生   |
| 下  | 乔灌层  | 190   | 80   | 银合欢、女贞、木蓝、栎、夹竹桃、牡荆、楝                     | 落叶与常绿    |
|    | 草本层  | 75    | 53   | 决明、五节芒、鬼针草、小蓬草、加拿大一枝黄花、狗尾草、葛、海金沙、葎草、井栏边草 | 一年、多年生   |

**4.4. 外来植物侵入**

温岭市 5 个废弃矿边坡生态修复后，边坡人工植物群落尚处于演替前期的阶段，当一些人工喷播或栽植的物种无法适应边坡环境而生长缓慢甚至死亡时，边坡上会产生大量空余生态位，有大量的入侵性极强的葛(*Pueraria montana* var. *Lobata*)、加拿大一枝黄花、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、葎草(*Humulus scandens*)、鬼针草、构、五节芒等侵入到群落中，会快速占据这些生态位并逐渐占据优势，挤占其他物种的生长空间，葛甚至可以迅速扩展至整个坡面，通过化感作用威胁部分物种生存，从而导致人工坡面植被物种多样性降低，造成植被结构退化及功能崩溃。

加拿大一枝黄花是被列入《中国第二批外来入侵物种名单》的植物，随着加拿大一枝黄花入侵程度的增强，群落内的物种数逐渐降低，且外来入侵植物的重要值之和逐渐增加。重度入侵区维管植物种类减少 30%~50%，群落由多优势种向加拿大一枝黄花单优势种转变[14]。

葛茎叶抽生非常快，茎蔓生长速度 15 cm/d，一年可长 15~30 m。攀附和覆盖能力强，缠绕树木至死。葛藤是有害生物，其风险值  $R = 1.538$ ，入侵适生的风险值  $IR = 54$ ，属中度危险的林业有害植物，应加强防治管理，防止扩散蔓延[15]。芒属植物五节芒存在较高的入侵风险，其 WG-WRA 分值高达 34 分，为高风险。五节芒具有很强的无性繁殖能力和广泛的环境适应性等，是其造成入侵危害的重要属性[16]。

生物入侵改变物种的分布及入侵地的群落结构、威胁生物多样性、影响生态系统功能过程，是生态系统及进化过程产生快速变化的推手。外来入侵物种在新生境中通常由于选择压力的作用而产生以表型变化为标志的适应性进化[17]。植物入侵会显著降低入侵生态系统内乡土植物多样性，这种影响可以通过生态系统级联、营养和能量的储存和流动以及更高营养水平的多样性而产生[18]。

探索新的可用于废弃矿山高陡岩质边坡生态修复的乡土植物仍然是目前紧迫的任务，当今入侵植物如葎草、葛、加拿大一枝黄花在浙江地区的侵入现象极其严重，通过试验手段筛选一些可以抵御外来物种的抗性较强的树种，并应用于被破坏的山体或其他生境将成为下一步的研究工作[19]。

**4.5. 植物群落演替**

5 个边坡生态修复后，经过 0.5~5 a 的人工植物恢复，边坡群落形态和结构基本形成，物种多样性有了较好的提高，草本以及灌木的密度搭配较为合理，坡面形成了乔灌草结合的植物群落，功能相对稳定。边坡物种组成由最初施工单位喷播和种植的 6 种，增加到目前的 132 种。乔木增加 13 种，灌木增加 21 种，草本增加 94 种；有多种周边乡土乔灌草植物入侵并逐渐稳定。入侵植物以菊科的加拿大一枝黄花、鬼针草、小蓬草，禾本科的五节芒、狗尾草、狗牙根，豆科的葛为主。草本、灌木、乔木的物种数均增加，过渡到以乔灌木为主的植物群落，边坡的植物群落演替呈正向趋势。

豆科由于喷播时在种子设计方案中所占比例较大,比如乔木银合欢、灌木木蓝、草本决明。随着恢复年限的增加,它的比例呈下降趋势,但仍大于其他植物。菊科、禾本科的物种数量虽然也在持续增加,所占比例也在减少中,说明在植被恢复过程中,草本在群落中发挥的作用在逐渐降低,更新层如五列木科柃属等滨海特有植物,蔷薇科、大戟科、桑科、荨麻科、楝科的一些植物属于周围入侵树种,且随着恢复年限的增加,周围入侵乔灌木植物所占比例增加。同时,喜阴草本如繁缕(*Stellaria media*)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)、鸭跖草(*Commelina communis*)在乔灌木群落中的出现,表明群落结构越来越复杂,表明周围树种在边坡生态修复植被演替进程中所起的重要作用,植物群落也正在向与周边群落相协调的方向演替。

虽然调查对象生态修复的时间较短,但由于有意识地在设计种子中加入较多的乔灌木,边坡平台、坡脚挡墙内种植了乔灌木,这是人为促进植物群落正向演替。边坡的植物群落演替成一个相对稳定、并与周边环境逐步相协调的植物群落只需要 0.5 a 的时间,体现出生态修复对于边坡植被恢复的重要性。本次研究覆盖的 0.5~5 a 恢复区群落演替仍处于演替初期,后续应当开展持续监测,掌握废弃矿山植物群落的演替规律。

## 5. 讨论与结论

### 5.1. 讨论

废弃矿山高陡岩质边坡是生态修复的难点,存在坡面裸露、土体松散、保水保肥能力差、易坍塌滑坡等问题。采用组合喷播加辅助措施,即方木条 + 镀锌铁丝网挂网 + 管状植生带 + 厚层基材喷播,坡脚挡土墙内平台覆土种植乔灌木、攀缘藤蔓植物修复技术整合坡面整形、锚固加固、生态基材覆盖、适生植被混种、智能养护五大工艺,形成标准化作业流程。按照“降坡稳坡、规整坡面”原则优化边坡坡度,消除地质隐患;再通过锚杆挂网、格栅加固提升坡面稳定性,避免边坡垮塌;随后采用客土改良、生态基材喷涂技术重构坡面土壤层,提升保水保肥性能;“适地适树”选取适应性强的乡土耐旱灌木和草本作为先锋植物,快速实现地表植物覆盖,防止水土流失和土壤退化。

立地条件对植被恢复的群落特征影响明显,以乔灌木植被构建为恢复目标,阳坡的恢复难度最大,陡坡难于缓坡;岩石边坡表现为阳坡明显差于阴阳坡和阴坡[20]。坡度  $>45^{\circ}$  时,植被覆盖度降低,根系更倾向于横向扩展以抓住有限土壤。同时,陡坡上植物的种子停留和积累较少,进一步降低了更新的可能性[21]。坡度  $>55^{\circ}$  的陡坡植被的状况开始明显分异,这些生境多为极陡坡以及陡崖,地形也较为破碎,受水分和养分流失的影响,植被稀少,平均覆盖度仅为 4%~30% [22]。坡度  $>50^{\circ}$  的滨海迎风面高陡岩石边坡生境再造采用“挡土翼 + 坡面植生孔 + 植生营养袋 + TBS 厚层基材喷播绿化”综合处置技术[23]。

植物筛选要根据立地条件筛选出适生的植物物种,添加不同性状植物的混合种子对恢复群落的可持续性有重要意义[24]。矿山复绿的最终目的是在植物养护期结束后,在自然状态下植物能够长期成活与生长。克服恢复过程中的表土缺陷,设计有利于幼苗出苗的水文适宜土壤覆盖层[25],成为高陡岩质边坡能否长期复绿的关键性技术问题。

通过对边坡生态修复后植物群落特征变化的观测,群落物种组成与初播物种组成发生了明显变化。豆科、禾本科植物能达到混播边坡中生长快的要求,尤其是菊科植物具有较强的侵入性,在植被建植 0.5 a 内生长迅速,提升了群落结构的复杂性。豆科植物具有固氮、根深和耐旱的特点。

### 5.2. 结论

温岭市废弃矿山坡面复绿采用组合喷播加辅助措施,坡脚挡土墙内平台种植乔灌木、藤蔓植物的护坡技术提供了高陡岩质边坡植被重建的方法,植被恢复整体效果较好,科属组成较为分散,以乡土草本

植物占据主导地位,群落物种组成与结构逐渐向良性方向发展;菊科、禾本科、豆科和蔷薇科在生态修复植物群落中占据重要地位,一年生草本可快速完成定植。

由于植物群落演替与恢复时间存在密切相关,本次研究覆盖的 0.5~5 a 恢复区群落演替仍处于演替初期,后续应持续监测,通过试验手段筛选一些可以抵御外来物种的抗性较强的树种,并应用于被破坏的山体或其他生境,掌握废弃矿山植物群落的演替规律。

废弃矿山高陡岩质边坡植被的自然恢复是非常缓慢和困难的,应采取生态修复来加快植物群落形成。施工、监理单位执行技术规范,按设计方案施工。

## 基金项目

浙江省“尖兵领雁 + X”研发攻关计划项目(2024C02002);浙江省建设厅科研项目(2025K166);浙江省工程勘察设计院集团有限公司科技项目(ZGK-KY-2023-02)。

## 参考文献

- [1] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
- [2] 张进德,郗富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.
- [3] 谢建华.废弃采石场石质边坡植被重建与关键技术试验研究[J].亚热带水土保持,2018,30(3):11-13.
- [4] 曹鹤,杨新兵,刘煜光,等.河北省六种藤蔓植物石灰岩矿山环境栽种适应性[J].北方园艺,2020(17):74-79.
- [5] 何志华,柏明娥,高立旦.浙江海宁鼠尾山露采废弃矿山植被修复的群落结构和持水效应研究[J].林业科学研究,2008,21(4):576-581.
- [6] Beikircher, B., Florineth, F. and Mayr, S. (2010) Restoration of Rocky Slopes Based on Planted Gabions and Use of Drought-Preconditioned Woody Species. *Ecological Engineering*, **36**, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.11.008>
- [7] 赵平,赵廷宁,闫承琳,等.喷播绿化技术的起源与发展[J].中国水土保持科学,2024,24(5):9-21.
- [8] 刘本同,钱华,何志华,等.我国岩石边坡植被修复技术现状和展望[J].浙江林业科技,2004,24(3):47-54.
- [9] 万朝东,姜曹键,侯新东,等.岩质边坡复绿植物再造地境中微生物的群落特征[J].兰州大学学报,2025,61(3):319-324.
- [10] 雷涛,于洋,江大海,等.京沪高速公路典型路段岩石边坡植被恢复特性分析[J].中国水土保持,2025(6):62-66.
- [11] 祝介旺,李丽慧,傅燕,等.温岭大型古地下采石场长屿硐天凌霄硐洞室群工程地质条件评价[J].工程地质学报,2014,22(4):772-778.
- [12] 中国植被编辑委员会.中国植被[M].北京:科学出版社,1980:847-861.
- [13] 浙江省地质院.浙江省废弃矿山生态修复技术指南[M].北京:测绘出版社,2023:20-21.
- [14] 应碧旷,刘宇,魏馨,等.加拿大一枝黄花入侵对温州沿海区域植被结构的影响[J].浙江农业学报,2025,37(11):2325-2339.
- [15] 戴丽,陶惠萍,曾祥福,等.林业有害植物葛藤风险分析[J].中国森林病虫,2011,30(1):29-32.
- [16] 陈超,张辉,逯辉,等.芒属植物的地理分布、资源利用现状、潜在入侵风险及入侵特性[J].生物安全学报(中英文),2024,33(4):356-364.
- [17] 万宣伍,刘映红,罗林明,等.基于分子生物学方法的外来入侵物种入侵历史重构[J].生态学报,2015,35(4):1296-1309.
- [18] Livingstone, S.W., Isaac, M.E. and Cadotte, M.W. (2020) Invasive Dominance and Resident Diversity: Unpacking the Impact of Plant Invasion on Biodiversity and Ecosystem Function. *Ecological Monographs*, **90**, e01425. <https://doi.org/10.1002/ecm.1425>
- [19] 朱凯华,潘树林,尹金珠,等.舟山本岛岩质边坡植被恢复植物多样性及群落演替[J].北方园艺,2012(5):108-112.
- [20] 王英宇,宋桂龙,韩烈保,等.京承高速公路岩石边坡植被重建 3 年期群落特征分析[J].北京林业大学学报,2013,35(4):74-80.
- [21] 李成俊,孙琦,陈璋,等.道路边坡坡度对植被恢复中物种多样性的影响研究[J].植物研究,2013,33(4):477-483.

- 
- [22] 陈宝强, 张建军, 赵荣玮, 等. 晋西黄土区极陡坡植被特征及自然恢复困难度分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 329-335.
- [23] 卿翠贵, 王华俊, 姚文杰, 等. 锚喷边坡坡面植被恢复生境构建技术[J]. 中国水土保持, 2020(2): 34-36.
- [24] 秦坤蓉, 秦华, 林立, 等. 种子功能性状在道路边坡植被形成过程中的作用[J]. 林业科学, 2024, 60(3): 141-149.
- [25] Merino-Martín, L., Commander, L., Mao, Z., Stevens, J.C., Miller, B.P., Golos, P.J., *et al.* (2017) Overcoming Topsoil Deficits in Restoration of Semiarid Lands: Designing Hydrologically Favourable Soil Covers for Seedling Emergence. *Ecological Engineering*, **105**, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.033>