

DOI: 10.20103/j.stxb.202403110497

谭许脉, 孙立祥, 杜忠毓, 李浩然, 党宁, 肖江, 张平选, 陈光才. 铜矿废弃地不同演替阶段植物群落特征及其稳定性. 生态学报, 2025, 45(4): 1900-1912.

Tan X M, Sun L X, Du Z Y, Li H R, Dang N, Xiao J, Zhang P X, Chen G C. Characteristics and stability of plant communities in abandoned copper mining sites with different successional period. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1900-1912.

## 铜矿废弃地不同演替阶段植物群落特征及其稳定性

谭许脉<sup>1,2</sup>, 孙立祥<sup>3</sup>, 杜忠毓<sup>1</sup>, 李浩然<sup>1</sup>, 党宁<sup>1</sup>, 肖江<sup>1</sup>, 张平选<sup>3</sup>, 陈光才<sup>1,\*</sup>

1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

2 南京林业大学, 南京 210037

3 铜陵市铜都森林公园管理处(国有林场), 铜陵 244000

**摘要:** 研究旨在分析铜矿废弃地生态恢复过程中植物群落结构特征及其稳定性, 以为矿区受损生态系统的植被恢复提供理论依据。采用“空间代时间”方法, 分析铜矿废弃地不同恢复年限[1a(R1)、10a(R10)、30a(R30)和45a(R45)]及对照区(CK)植物群落结构组成及其稳定性。结果显示:(1)不同恢复阶段, 优势物种有差异, 例如恢复初期(R1)为海州香薷(*Elsholtzia splendens*) + 茵陈蒿(*Artemisia capillaris*) + 鸭跖草(*Commelina communis*)群落, 恢复中期(R10)茵陈蒿、五节芒(*Miscanthus floridulus*)和海州香薷为优势种, 而恢复后期(R30和R45)为海州香薷 + 鸭跖草群落, 为该矿区废弃地自发演替的基本过程。(2)恢复过程中, 植物群落的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数及生物量先(R1和R10)增加后降低(R30和R45), Whittaker  $\beta$  指数随着植物群落恢复呈增加趋势。(3)R1、R10、R30、R45和CK植物群落 Godron 稳定性的交点与群落稳定参考点(20, 80)的欧氏距离依次分别为 23.19、43.91、24.25、15.41和10.78, 表明在自然恢复过程中, 植物群落物种丰富度增加, 群落稳定性和复杂性增强。该研究揭示了矿区废弃地植被的自然演替规律及其稳定性特征, 为铜矿废弃地植被恢复和群落演替动态提供了数据参考和理论依据。

**关键词:** 铜矿区; 植被演替; 物种多样性; 生物量; Godron 稳定性

## Characteristics and stability of plant communities in abandoned copper mining sites with different successional period

TAN Xumai<sup>1,2</sup>, SUN Lixiang<sup>3</sup>, DU Zhongyu<sup>1</sup>, LI Haoran<sup>1</sup>, DANG Ning<sup>1</sup>, XIAO Jiang<sup>1</sup>, ZHANG Pingxuan<sup>3</sup>, CHEN Guangcai<sup>1,\*</sup>

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

2 Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Tongling Forest Park Management Office of Tongling City (State-owned Forest Farm), Tongling 244000, China

**Abstract:** This study analyzes the characteristics of plant community structure and its stability during the ecological restoration process of copper mining areas, to provide theoretical basis for the vegetation restoration of damaged ecosystems in mining areas. The "space for time" method was used to analyze the composition structure and stability of plant community in different restoration years [1 year (R1), 10 years (R10), 30 years (R30), and 45 years (R45)] and control areas (CK) of copper mining areas located in Tongling city. The results show: (1) In the early stage of restoration (R1), the community species is dominated by *Elsholtzia splendens*+*Artemisia capillaris*+*Commelina communis*. In the middle period of restoration (R10), *Artemisia capillaris*, *Miscanthus floridulus*, and *Elsholtzia splendens* were the dominant species. In the

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32071736); 安徽省林业科技创新研究项目(AHLYCX-2022); 中央财政林业科技推广示范项目(皖【2023】TG09号)

收稿日期: 2024-03-11; 网络出版日期: 2024-11-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guangcaichen@sohu.com

R30 and R45, the community species was dominated by *Elsholtzia splendens* + *Commelina communis*. It is the basic process of spontaneous succession of the abandoned land in the mining area. (2) During the restoration process, the Shannon-Wiener index, Simpson index, Pielou evenness index, and biomass of plant communities firstly increased (R1 and R10) and then decreased (R30 and R45); Whittaker  $\beta$  index showed an increasing trend with the restoration of plant communities. (3) The intersections of Godron stability of the four plant communities and the control areas plant communities with the Euclidean distance to the community stability reference points (20, 80) are respectively 23.19 (R1), 43.91 (R10), 24.25 (R30), 15.41 (R45), and 10.78 (CK). The study indicates that during the natural restoration process, the species richness of plant communities increased and the stability and complexity of communities enhanced. By revealing the natural succession pattern and its stability characteristic on vegetation, this study provides theoretical support for vegetation restoration and community succession dynamics in copper mining areas.

**Key Words:** copper mining area; vegetation succession; plant species diversity; biomass; Godron stability

采矿活动导致的原生植被剥离、土壤结构破坏、生态系统结构和功能丧失等是目前亟待解决的问题<sup>[1-3]</sup>。采矿活动产生大量废渣的堆放给当地环境造成了巨大的污染,例如重(类)金属污染、滑塌、水力侵蚀等<sup>[4-5]</sup>。截止 2018 年,中国采矿累积损毁土地 361 余万  $\text{hm}^2$ <sup>[6-7]</sup>。固体废渣堆放量达 480 多亿 t,其中废石(土)占 386.9 亿 t,尾矿占 54.8 亿 t,煤矸石约 40.9 亿 t<sup>[8]</sup>。国家对此已出台相关政策,加大矿山地质环境恢复治理的力度,但废弃矿山所产生的环境问题仍然严峻,需要进一步治理。

矿区生态恢复是指依靠自然力量或通过人工干预,对采矿活动造成的地质灾害、土地破坏、植被破坏等生态问题进行恢复,以稳定地质环境,复垦受损土地,恢复和改善生态系统功能,是治理废弃矿山的有效措施<sup>[9-11]</sup>。通过地貌重塑和植被恢复等措施<sup>[12]</sup>,结合群落的自然演替,可有效改善矿区土壤结构和孔隙分布<sup>[2]</sup>、提高土壤养分储量<sup>[13]</sup>,改善群落结构<sup>[14]</sup>、增加植被覆盖度<sup>[15]</sup>、恢复矿区生态系统结构和功能<sup>[1]</sup>。然而,矿区恢复涉及多个环节(例如地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重现等)<sup>[16-17]</sup>,且由于所涉及技术和理论的复杂性,矿区恢复仍需进一步研究<sup>[18]</sup>。因此,矿区恢复依然是当前中国生态保护与修复工作的重要内容之一。

植物群落在矿区恢复中起着关键的作用<sup>[19]</sup>,如增强矿区水土保持能力、景观恢复能力等,植被演替过程和动态可直接决定矿区恢复的成效。不同植被演替阶段对人工干预恢复程度要求不同,在演替过程中,应逐步减少必要的人工管理措施,形成稳定且能正向演替的植物群落<sup>[20]</sup>。矿区废弃地是目前矿区生态恢复的重点区域,非生物条件、物种库和种间竞争是影响植被恢复的关键,而植物群落的稳定是植物群落结构和功能的综合反映,因此研究群落稳定性可以揭示植被的稳定性特征和变化规律,对指导退化矿区生态恢复具有重要意义<sup>[21]</sup>。M.Godron 指数法是一种经典的群落稳定性评价方法,可用于测定和比较植物群落的稳定性<sup>[22]</sup>,前人围绕森林<sup>[23]</sup>、灌丛<sup>[24]</sup>、草地<sup>[25]</sup>、矿区生态系统<sup>[26-27]</sup>等各类生态系统展开了大量的研究。如张琳等发现露天煤矿排土场边坡植被群落的稳定性随着恢复年限的增加整体呈上升趋势<sup>[26]</sup>。因此,通过综合分析植物物种多样性、群落生产力及群落的稳定性,可以更深入地了解矿区植物群落的生态特征和恢复进程,这对于评估和保护矿区的恢复效果具有重要意义<sup>[28]</sup>。

安徽省铜陵市号称“铜都”,是我国重要的铜矿资源区。然而,该区因采矿导致的矿渣堆积等问题严重影响了当地的生态环境<sup>[29]</sup>。近年来,该区生态恢复已经取得了一定的成效,植被和土壤条件得到了显著改善<sup>[30]</sup>。但长期来看,矿区的生态恢复能力相对较弱,主要表现在矿山生态恢复和保护缺乏有效的监测和评估,恢复效果并不牢固<sup>[31]</sup>,且自然演替过程中植物群落的结构特征和稳定性及其未来的演替方向尚不清楚。基于此,该研究采用“空间代时间”方法选择铜矿废弃地不同演替阶段植物群落开展研究,通过调查该区植物群落组成特征,计算植物物种多样性及群落稳定性。该研究主要解决两个科学问题:(1)铜矿废弃地不同演替阶段植物群落结构及演替动态如何变化?(2)铜矿废弃地不同演替阶段植物群落是否稳定并能自主恢复

演替? 研究能够揭示铜矿废弃地的植被演替特征及其稳定性变化,为矿区废弃地生态恢复的管理及未来演替动态提供数据支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国安徽省铜陵市,是长江三角洲中心区的城市之一,该铜矿位于铜陵市铜官区和池州市境内(图 1),东经 117°42'00"—118°10'6",北纬 30°45'12"—31°07'56",是中国重要的露天铜矿场,素有“中国古铜都,现代铜基地”之称。该区海拔 300—500 m,年平均气温为 16.2℃,年平均降水量 1370 mm,属于北亚热带湿润气候区,受大陆季风影响,四季分明。天然植被属亚热带常绿阔叶林及常绿、落叶阔叶混交林,主要种类有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、垂柳(*Salix babylonica*)和榔榆(*Ulmus parvifolia*)等,土壤类型主要为黄红壤(黄棕壤)、石灰(岩)土和红壤性麻砂土,土壤质量较差<sup>[32]</sup>。此外,由于风蚀和水蚀严重,该地区属于生态脆弱区,植被覆盖度较低。铜陵采矿历史已有 3500 多年<sup>[32]</sup>,因采矿产生的大量矿渣废弃物主要以堆放的方式处置,铜矿废弃地不仅占据了大量的土地,也大大减少了绿色植物的覆盖,破坏了生态平衡,严重污染了周围土壤<sup>[33]</sup>。

### 1.2 样地选择与调查方法

在多次全面踏查的基础上,以铜陵自然恢复的各铜矿废弃地植物群落为研究对象,采用“空间代时间”法,研究 1—45a 自然恢复过程中各阶段的植被特征,选择 1a(R1)、10a(R10)、30a(R30)和 45a(R45)植物群落进行研究,天然林可以有效准确地评估和预测铜矿废弃地所处的演替时期及未来演替趋势,因此本研究以天然次生林为对照样地(CK)。于 2022 年 7 月进行植被调查,并根据每个样地情况设置样方。其中 R1、R10、R30 和 R45 自然恢复的样地植物群落仅有草本植物,因此分别设置 15 个 1 m×1 m 的草本样方,而天然次生

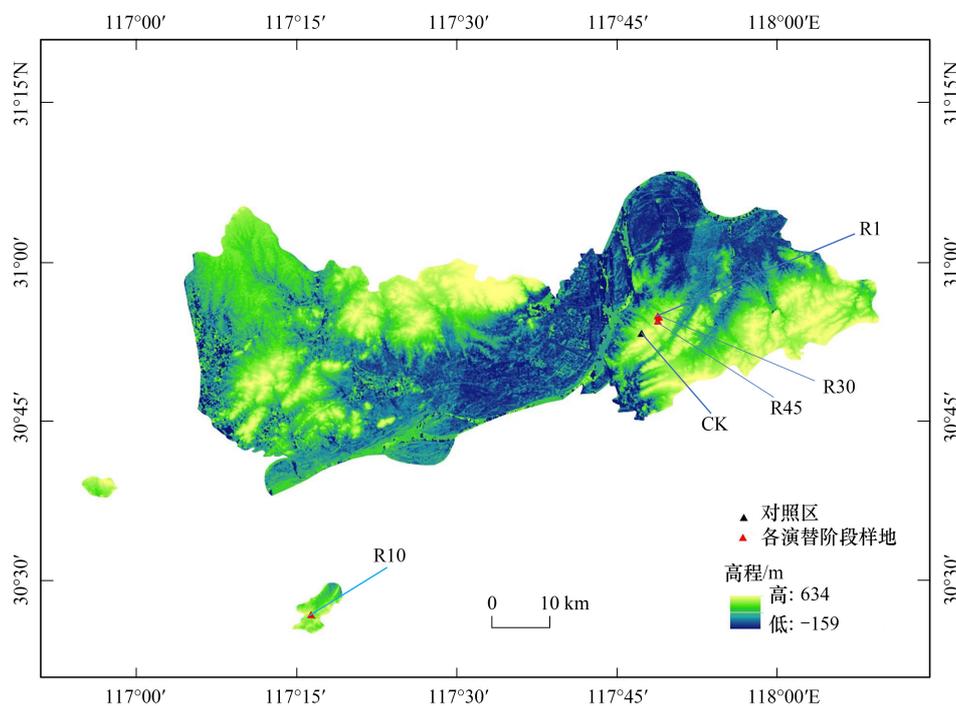


图 1 样地区位

Fig.1 Location of study area

R1: 自然恢复 1a 后的样地 The sample plots after 1 years of natural recovery; R10: 自然恢复 10a 后的样地 The sample plots after 10 years of natural recovery; R30: 自然恢复 30a 后的样地 The sample plots after 30 years of natural recovery; R45: 自然恢复 45a 后的样地 The sample plots after 45 years of natural recovery; CK: 对照区样地 The sample plots of the control areas

林样地的植物群落包含乔木和灌木,因此设置 3 个 10 m×10 m 乔木和灌木样方,并在每个样方内设置 5 个 1 m×1 m 的草本样方。调查样方内的植物种类、物种数量、物种盖度和物种高度等,并在植被调查后分别采用收获法和根钻法(直径 7.5 cm,土层 0—10 cm)对草本植物地上生物量和地下生物量进行收获。

### 1.3 数据统计与分析

重要值( $IV$ )反映植物物种(分为草本层、灌木层和乔木层)在其相应群落中的地位和优势程度,因此采用重要值来评估物种位置。本文将草本植物(蕨类和藤本植物归为草本植物)的重要值( $IV$ )分为五个等级: $IV < 1\%$ 为偶见种, $1\% < IV < 5\%$ 为伴生种, $5\% < IV < 10\%$ 为亚优势种, $IV > 10\%$ 为优势种,当  $IV > 30\%$ 为明显优势种;当废弃地内的明显优势种较多时,种间竞争程度会相对较低;反之,竞争程度较高<sup>[34]</sup>。重要值计算公式如下:

$$IV = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3 \quad (1)$$

Shannon-Wiener 指数( $H$ )、Simpson 指数( $D$ )、丰富度指数( $S$ )、Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ )和 Whittaker  $\beta$  指数( $\beta_w$ )可反映植物群落的组成和结构<sup>[35]</sup>,因此该研究采用这些多样性指数分析不同演替阶段群落植物物种的多样性变化情况。各多样性指数计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

式中, $P_i$ 表示第  $i$  个种的多度比例,即:

$$P_i = \frac{N_i}{N_0} \quad (3)$$

式中, $N_i$ 为种  $i$  的个体数, $N_0$ 为所在群落所有物种数的个体数之和。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i)^2 \quad (4)$$

$$S = N_s \quad (5)$$

$$J_{sw} = H / \ln S \quad (6)$$

$$\beta_w = S / \alpha - 1 \quad (7)$$

式中, $S$ 为物种丰富度, $N_s$ 为所研究各样方中记录的物种总数; $\alpha$ 为各样地的平均物种数。

采用改进的 Godron 稳定性测定法分析各演替阶段植物群落的稳定性<sup>[36]</sup>。该研究中各演替阶段均只有草本植物,因此只关注草本层植物群落的稳定性。该方法步骤如下:将群落中的所有草本物种按照其相对频度从大到小排序后,计算每个物种数的倒数和相对频度,将它们从上到下进行累加并用百分数(%)表示,得到物种数倒数的累积百分数和物种相对频度的累积百分数;然后以物种数倒数的累积百分数(种倒数累积百分数)为  $x$  轴、物种相对频度的累积百分数(种累积相对频度)为  $y$  轴绘制散点图,并采用一元三次方程进行拟合[式(8)],得到拟合曲线;使其与直线  $y = 100 - x$  相交[式(9)],其交点( $x, y$ )即为稳定参考点,该交点坐标与(20, 80)的距离为欧氏距离,该距离越大,表示植物群落越不稳定,反之越稳定<sup>[27, 37]</sup>。

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (8)$$

$$y = 100 - x \quad (9)$$

由于矿区植被异质性较高,因此该研究采用变异系数( $CV$ )来表征其变异程度,并依据经典统计学对变异系数等级划分,当  $CV \leq 10\%$ ,属于弱变异程度;当  $10\% < CV < 100\%$ ,属于中等变异程度;当  $CV \geq 100\%$ ,属于强变异程度<sup>[38]</sup>。

采用 Microsoft Excel 统计软件进行数据整理并计算物种重要值、丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数、Whittaker  $\beta$  多样性指数、草本地上生物量和地下根系生物量。用 SPSS 17.0 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小差异显著法(LSD)进行方差分析和多重比较,分别检验不同样地之间的物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数及 Whittaker  $\beta$  多样性指数和群落生物量的差异( $P < 0.05$ )。分析之前检验数据的正态性和齐性,如果数据不满足正态性或齐性的假设,对数据进行对数变换以使其符合正态分布,该研究的数据未转化或转化后满足正态分布的要求。

## 2 结果与分析

### 2.1 铜矿废弃地植物群落物种组成及重要值

不同恢复年限铜矿废弃地共计 20 种植物,以禾本科(Gramineae)、菊科(Asteraceae)和唇形科(Labiatae)等草本植物为主;对照区共发现 14 种植物,隶属 13 科 14 属,其中乔灌共计 9 种,隶属 8 科 9 属;草本植物 5 种,隶属 5 科 5 属(表 1)。R10 样地的草本植被种类最多,为 7 科 15 属 15 种。R45 样地的草本植被种类最

表 1 不同恢复年限铜矿废弃地植物物种组成

Table 1 Species composition of copper mine wasteland with different recovery years

生长型 Growth type	恢复年限 Restoration period	物种名 Species name	科名 Family name	属名 Genus name	科 Family	属 Genus
乔木灌木 Tree and shrub	CK	老鸦柿( <i>Diospyros rhombifolia</i> )	柿科(Ebenaceae)	柿属( <i>Diospyros</i> )		
		望春玉兰( <i>Yulania biondii</i> )	木兰科(Magnoliaceae)	玉兰属( <i>Yulania</i> )		
		刨花润楠( <i>Machilus pauhoi</i> )	樟科(Lauraceae)	润楠属( <i>Machilus</i> )		
		胡颓子( <i>Elaeagnus pungens</i> )	胡颓子科(Elaeagnaceae)	胡颓子属( <i>Elaeagnus</i> )		
		山茶( <i>Camellia japonica</i> )	山茶科(Theaceae)	山茶属( <i>Camellia</i> )	8	9
		漆( <i>Toxicodendron vernicifluum</i> )	漆树科(Anacardiaceae)	漆树属( <i>Toxicodendron</i> )		
		樟( <i>Cinnamomum camphora</i> )	樟科(Lauraceae)	樟属( <i>Camphora</i> )		
		翻白叶树( <i>Pterospermum heterophyllum</i> )	锦葵科(Malvaceae)	翅子树属( <i>Pterospermum</i> )		
		朴树( <i>Celtis sinensis</i> )	大麻科(Cannabaceae)	朴属( <i>Celtis</i> )		
草本 Herb	R1	海州香薷( <i>Elsholtzia splendens</i> )	唇形科(Lamiaceae)	香薷属( <i>Elsholtzia</i> )		
		鸭跖草( <i>Commelina communis</i> )	鸭跖草科(Commelinaceae)	鸭跖草属( <i>Commelina</i> )		
		狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )	禾本科(Poaceae)	狗尾草属( <i>Setaria</i> )		
		鼠曲草( <i>Pseudognaphalium affine</i> )	菊科(Asteraceae)	鼠曲草属( <i>Pseudognaphalium</i> )		
		刺蓼( <i>Persicaria senticosa</i> )	蓼科(Polygonaceae)	蓼属( <i>Persicaria</i> )	6	8
		五节芒( <i>Miscanthus floridulus</i> )	禾本科(Poaceae)	芒属( <i>Miscanthus</i> )		
		肺筋草( <i>Aletris spicata</i> )	沼金花科(Nartheciaceae)	肺筋草属( <i>Aletris</i> )		
		茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )	菊科(Asteraceae)	蒿属( <i>Artemisia</i> )		
	艾( <i>Artemisia argyi</i> )	菊科(Asteraceae)	蒿属( <i>Artemisia</i> )			
	R10	海州香薷( <i>Elsholtzia splendens</i> )	唇形科(Lamiaceae)	香薷属( <i>Elsholtzia</i> )		
		狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )	禾本科(Poaceae)	狗尾草属( <i>Setaria</i> )		
		鸭跖草( <i>Commelina communis</i> )	鸭跖草科(Commelinaceae)	鸭跖草属( <i>Commelina</i> )		
		茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )	菊科(Asteraceae)	蒿属( <i>Artemisia</i> )		
		五节芒( <i>Miscanthus floridulus</i> )	禾本科(Poaceae)	芒属( <i>Miscanthus</i> )		
		鼠曲草( <i>Pseudognaphalium affine</i> )	菊科(Asteraceae)	鼠曲草属( <i>Pseudognaphalium</i> )		
小蓬草( <i>Erigeron canadensis</i> )		菊科(Asteraceae)	飞蓬属( <i>Erigeron</i> )			
白首乌( <i>Cynanchum bungei</i> )	夹竹桃科(Apocynaceae)	鹅绒藤属( <i>Cynanchum</i> )	7	15		
铁马鞭( <i>Lespedeza pilosa</i> )	豆科(Fabaceae)	胡枝子属( <i>Lespedeza</i> )				
异叶黄鹌菜( <i>Youngia heterophylla</i> )	菊科(Asteraceae)	黄鹌菜属( <i>Youngia</i> )				
糙隐子草( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )	禾本科(Poaceae)	隐子草属( <i>Cleistogenes</i> )				
十字薹草( <i>Carex cruciata</i> )	莎草科(Cyperaceae)	薹草属( <i>Carex</i> )				
牛筋草( <i>Lespedeza pilosa</i> )	禾本科(Poaceae)	穆属( <i>Eleusine</i> )				
荩草( <i>Arthraxon hispidus</i> )	禾本科(Poaceae)	荩草属( <i>Arthraxon</i> )				
一枝黄花( <i>Solidago decurrens</i> )	菊科(Asteraceae)	一枝黄花属( <i>Solidago</i> )				
R30	鸭跖草( <i>Commelina communis</i> )	鸭跖草科(Commelinaceae)	鸭跖草属( <i>Commelina</i> )			
	海州香薷( <i>Elsholtzia splendens</i> )	唇形科(Lamiaceae)	香薷属( <i>Elsholtzia</i> )			
	刺蓼( <i>Persicaria senticosa</i> )	蓼科(Polygonaceae)	蓼属( <i>Persicaria</i> )			
	茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )	菊科(Asteraceae)	蒿属( <i>Artemisia</i> )			
	五节芒( <i>Miscanthus floridulus</i> )	禾本科(Poaceae)	芒属( <i>Miscanthus</i> )			
	十字薹草( <i>Carex cruciata</i> )	莎草科(Cyperaceae)	薹草属( <i>Carex</i> )			
	鼠曲草( <i>Pseudognaphalium affine</i> )	菊科(Asteraceae)	鼠曲草属( <i>Pseudognaphalium</i> )	9	11	
	白首乌( <i>Cynanchum bungei</i> )	夹竹桃科(Apocynaceae)	鹅绒藤属( <i>Cynanchum</i> )			
	艾( <i>Artemisia argyi</i> )	菊科(Asteraceae)	蒿属( <i>Artemisia</i> )			
	一枝黄花( <i>Solidago decurrens</i> )	菊科(Asteraceae)	一枝黄花属( <i>Solidago</i> )			
百蕊草( <i>Thesium chinense</i> )	檀香科(Santalaceae)	百蕊草属( <i>Thesium</i> )				
瞿麦( <i>Dianthus superbus</i> )	石竹科(Caryophyllaceae)	石竹属( <i>Dianthus</i> )				

续表

生长型 Growth type	恢复年限 Restoration period	物种名 Species name	科名 Family name	属名 Genus name	科 Family	属 Genus
	R45	海州香薷 ( <i>Elsholtzia splendens</i> )	唇形科 (Lamiaceae)	香薷属 ( <i>Elsholtzia</i> )	5	6
		鸭跖草 ( <i>Commelina communis</i> )	鸭跖草科 (Commelinaceae)	鸭跖草属 ( <i>Commelina</i> )		
		狗尾草 ( <i>Setaria viridis</i> )	禾本科 (Poaceae)	狗尾草属 ( <i>Setaria</i> )		
		糙隐子草 ( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )	禾本科 (Poaceae)	隐子草属 ( <i>Cleistogenes</i> )		
		鼠曲草 ( <i>Pseudognaphalium affine</i> )	菊科 (Asteraceae)	鼠曲草属 ( <i>Pseudognaphalium</i> )		
		百蕊草 ( <i>Thesium chinense</i> )	檀香科 (Santalaceae)	百蕊草属 ( <i>Thesium</i> )		
	CK	络石 ( <i>Trachelospermum jasminoides</i> )	夹竹桃科 (Apocynaceae)	络石属 ( <i>Trachelospermum</i> )	5	5
		金毛狗 ( <i>Cibotium barometz</i> )	金毛狗科 (Cibotiaceae)	金毛狗属 ( <i>Cibotium</i> )		
		沿阶草 ( <i>Ophiopogon bodinieri</i> )	天门冬科 (Asparagaceae)	沿阶草属 ( <i>Ophiopogon</i> )		
		芦竹 ( <i>Arundo donax</i> )	禾本科 (Poaceae)	芦竹属 ( <i>Arundo</i> )		
		流苏子 ( <i>Coptosapelta diffusa</i> )	茜草科 (Rubiaceae)	流苏子属 ( <i>Coptosapelta</i> )		

少,为 5 科 6 属 6 种。不同恢复年限铜矿废弃地的植物生活型以一年生草本植物为主,如海州香薷 (*Elsholtzia splendens*)、鸭跖草 (*Commelina communis*) 和鼠曲草 (*Pseudognaphalium affine*) 等;二年生和多年生草本植物类型较少,但随着演替的进行,其在群落中的种类逐渐增多,且具有成为群落优势种的趋势,如茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*) 和五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 等。

废弃地各样地内的草本物种分布格局为明显优势种、优势种、亚优势种和伴生种共存,除 R10 外,其他演替阶段和 CK 的植物群落均存在明显优势种(某个物种重要值>30%),且明显优势种和优势种的重要值差异较大。海州香薷是铜矿区常见种,其在演替各个阶段均存在(表 1)。R1 群落共有 6 科 8 属 9 种植物,明显优势种为海州香薷 (50.01%),茵陈蒿 (14.05%) 和鸭跖草 (10.74%) 为优势种。R10 群落共有 7 科 15 属 15 种,其物种丰富度是各个演替阶段样地中最高的,以茵陈蒿 (18.90%)、五节芒 (17.44%) 和海州香薷 (16.08%) 为优势种,此群落中无明显优势种,其各物种的种间竞争最强。R30 群落共有 9 科 11 属 12 种植物,其中海州香薷 (34.72%) 为明显优势种,鸭跖草 (14.60%) 和茵陈蒿 (13.53%) 为优势种。R45 群落物种丰富度最低,共有 5 科 6 属 6 种植物,海州香薷为明显优势种,重要值在各样地均为 50% 以上,鸭跖草 (18.38%) 为优势种。在对照区,朴树 (*Celtis sinensis*) 为乔木层明显优势种,樟 (*Cinnamomum camphora*) 为乔木层优势种,山茶 (*Camellia japonica*) 为灌木明显优势种,望春玉兰 (*Yulania biondii*) 和刨花润楠 (*Machilus pauhoi*) 为灌木层优势种,络石 (*Trachelospermum jasminoides*)、金毛狗 (*Cibotium barometz*) 为草本明显优势种,沿阶草 (*Ophiopogon bodinieri*) 为草本优势种。因此,恢复初期 (R1) 为海州香薷+茵陈蒿+鸭跖草群落;恢复中期 (R10) 为茵陈蒿+五节芒+海州香薷群落;恢复后期 (R30 和 R45) 为海州香薷+鸭跖草群落(表 2)。

## 2.2 铜矿废弃地植物群落多样性

铜矿废弃地不同演替阶段植物群落物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数差异显著(图 2)。Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数变化趋势一致,随着恢复年限的增加先升高再降低,均在 R10 时最大,R45 时最小(图 2)。物种丰富度在恢复年限尺度先升高再降低,R45 的物种丰富度最低,而 R1 和 R30 最高;Whittaker  $\beta$  指数则随

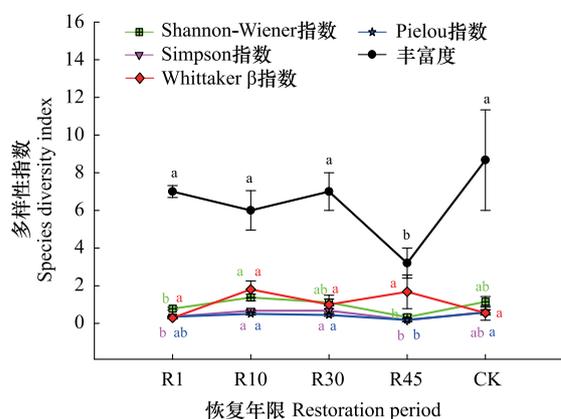


图 2 铜矿废弃地不同恢复年限和对照区植物多样性指数的变化特征(平均值±标准误,  $n=5$ )

Fig.2 Variations in plant diversity indices in copper mining areas undergoing different durations of restoration and control areas (Values are mean  $\pm$  SE,  $n=5$ ) 同一指数的不同字母表示不同恢复年限之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

着恢复年限的增加而波动变化,但整体呈增加趋势,R45 的 Whittaker  $\beta$  最高而 R1 的最低(图 2)。

表 2 不同恢复年限铜矿废弃地物种重要值/%(平均值,  $n=5$ )

Table 2 Species importance values of copper mine wasteland with different recovery years (Values are mean,  $n=5$ )

恢复年限 Restoration period	物种名 Species name	R1	R10	R30	R45	CK
草本 Herb	海州香薷 ( <i>Elsholtzia splendens</i> )	50.01	16.08	34.72	73.82	—
	鸭跖草 ( <i>Commelina communis</i> )	10.74	2.64	14.60	18.38	—
	狗尾草 ( <i>Setaria viridis</i> )	1.42	3.86	—	1.00	—
	鼠曲草 ( <i>Pseudognaphalium affine</i> )	5.18	0.55	4.05	2.14	—
	刺蓼 ( <i>Persicaria senticosa</i> )	8.22	—	3.56	—	—
	五节芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> )	7.90	17.44	10.61	—	1.82
	肺筋草 ( <i>Aletris spicata</i> )	1.12	—	—	—	—
	茵陈蒿 ( <i>Artemisia capillaris</i> )	14.05	18.90	13.53	—	—
	艾 ( <i>Artemisia argyi</i> )	1.32	—	5.80	—	—
	十字蕁草 ( <i>Carex cruciata</i> )	—	4.88	3.09	—	—
	白首乌 ( <i>Cynanchum bungei</i> )	—	1.47	0.67	—	—
	糙隐子草 ( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )	—	1.39	—	3.28	—
	百蕊草 ( <i>Thesium chinense</i> )	—	—	0.59	1.39	—
	小蓬草 ( <i>Erigeron canadensis</i> )	—	3.51	—	—	—
	铁马鞭 ( <i>Lespedeza pilosa</i> )	—	4.29	—	—	—
	牛筋草 ( <i>Lespedeza pilosa</i> )	—	12.82	—	—	—
	异叶黄鹌菜 ( <i>Youngia heterophylla</i> )	—	9.62	—	—	—
	菎草 ( <i>Arthraxon hispidus</i> )	—	0.47	—	—	3.25
	一枝黄花 ( <i>Solidago decurrens</i> )	—	0.47	0.54	—	—
	瞿麦 ( <i>Dianthus superbus</i> )	—	—	8.24	—	—
络石 ( <i>Trachelospermum jasminoides</i> )	—	—	—	—	39.03	
金毛狗 ( <i>Cibotium barometz</i> )	—	—	—	—	33.50	
沿阶草 ( <i>Ophiopogon bodinieri</i> )	—	—	—	—	11.82	
芦竹 ( <i>Arundo donax</i> )	—	—	—	—	2.35	
流苏子 ( <i>Coptosapelta diffusa</i> )	—	—	—	—	2.00	
灌木 Shrub	望春玉兰 ( <i>Yulania biondii</i> )	—	—	—	—	11.04
	山茶 ( <i>Camellia japonica</i> )	—	—	—	—	30.10
	刨花润楠 ( <i>Machilus pauhoi</i> )	—	—	—	—	12.38
	老鸦柿 ( <i>Diospyros rhombifolia</i> )	—	—	—	—	4.12
	胡颓子 ( <i>Elaeagnus pungens</i> )	—	—	—	—	3.72
	樟 ( <i>Cinnamomum camphora</i> )	—	—	—	—	4.78
	漆 ( <i>Toxicodendron vernicifluum</i> )	—	—	—	—	1.80
	翻白叶树 ( <i>Pterospermum heterophyllum</i> )	—	—	—	—	3.76
乔木 Tree	朴树 ( <i>Celtis sinensis</i> )	—	—	—	—	47.90
	樟 ( <i>Cinnamomum camphora</i> )	—	—	—	—	25.52
	望春玉兰 ( <i>Yulania biondii</i> )	—	—	—	—	6.64
	刨花润楠 ( <i>Machilus pauhoi</i> )	—	—	—	—	3.78
	山茶 ( <i>Camellia japonica</i> )	—	—	—	—	2.80
	漆 ( <i>Toxicodendron vernicifluum</i> )	—	—	—	—	2.74

— 代表无物种

### 2.3 铜矿废弃地植被生物量

铜矿废弃地 R1、R10 和 R30 植物群落草本生物量与 R45 和 CK 相比差异显著,且草本生物量和根系生物量均随着恢复年限的增加呈现先增加后降低的趋势(图 3)。不同恢复年限铜矿废弃地中地上草本生物量和

根系生物量均在 R10 时达到最大值(分别为  $425.60 \text{ g/m}^2$  和  $270.23 \text{ g/m}^2$ );恢复 30a 次之,为  $389.71 \text{ g/m}^2$  和  $136.25 \text{ g/m}^2$ ;恢复 45a 样地的草本生物量和根系生物量均最小(分别为  $113.64 \text{ g/m}^2$  和  $36.42 \text{ g/m}^2$ )。CK 样地的草本生物量较小( $152.56 \text{ g/m}^2$ ),但根系生物量最大,为  $368.61 \text{ g/m}^2$ 。不同恢复年限的铜矿废弃地地上生物量和根系生物量的变异系数均属于中等变异程度(图 3)。

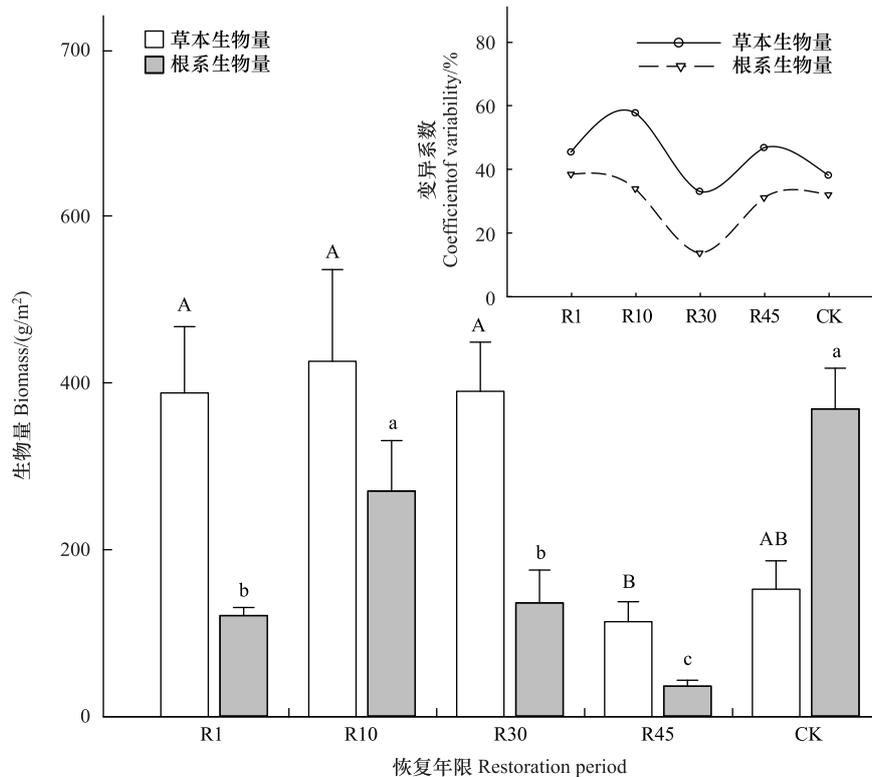


图 3 铜矿区不同恢复年限和对照区的草本和群落根系生物量变化特征(平均值±标准误,  $n=5$ )

**Fig.3 Characteristics of herbaceous and community root biomass variations in copper mining areas with different recovery years and control areas** (Values are mean±SE,  $n=5$ ) 不同大写字母表示不同恢复年限的草本生物量间差异显著,不同小写字母表示不同恢复年限的根系生物量间差异显著 ( $P < 0.05$ )

## 2.4 铜矿废弃地植物群落稳定性

铜矿废弃地不同恢复年限植物群落 Godron 稳定性拟合曲线与  $y=100-x$  的交点到 (20, 80) 的欧式距离分别为 23.19(R1)、43.91(R10)、24.25(R30)、15.41(R45),均大于 CK 的 10.78(图 4,表 3);铜矿废弃地植物群落稳定性随着恢复年限的增加群落逐渐趋于稳定。其中 R45 铜矿废弃地植物群落稳定性最高(15.41)(图 4,表 3),R10 的植物群落最不稳定(43.91)(图 4,表 3)。

表 3 不同恢复年限铜矿废弃地和对照区草本植物群落的 Godron 稳定性

**Table 3 Godron stability of herbaceous plant communities in copper mining areas with different restoration years and control areas**

恢复年限 Restoration ages	拟合曲线 Fitted curves	决定系数 ( $R^2$ ) $R$ square	交点坐标 Moving point	欧氏距离 Euclidean distance
R1	$y = -0.000028052x^3 - 0.0069x^2 + 1.9681x - 0.3515$	0.9976	(36.40, 63.60)	23.19
R10	$y = -0.00023607x^3 - 0.0073x^2 + 1.9857x - 3.7338$	0.9952	(55.48, 44.52)	43.91
R30	$y = -0.000012176x^3 - 0.008x^2 + 1.8799x + 3.5354$	0.9966	(37.15, 62.85)	24.25
R45	$y = 0.0003x^3 - 0.0525x^2 + 3.8413x - 8.3333$	0.9927	(30.90, 69.10)	15.41
CK	$y = 0.00095278x^3 - 0.0270x^2 + 2.7944x - 4.2857$	0.9987	(27.62, 72.38)	10.78

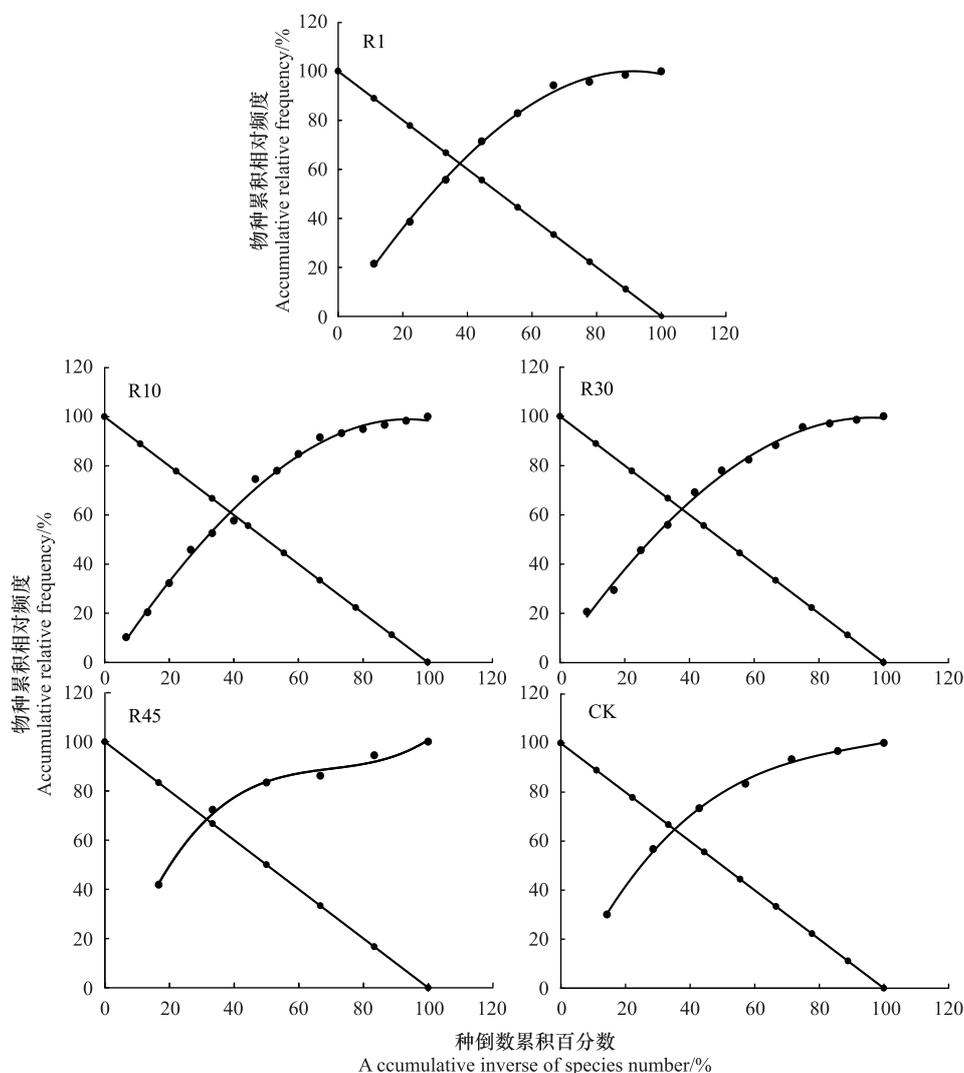


图4 不同恢复年限铜矿废弃地和对照区草本植物群落的 Godron 稳定性拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of Godron stability of herbaceous plant communities in copper mining areas with different recovery years and control areas

### 3 讨论

#### 3.1 不同恢复年限铜矿区植物群落特征

该研究发现不同演替阶段的植物群落结构存在显著差异,各植物群落均以草本植物为主,且多为禾本科和菊科植物(表1)。这一结果与其他类型废弃地的植物群落演替规律相似<sup>[26, 39]</sup>。该研究发现禾本科和菊科植物均能在铜矿废弃地恶劣的生境中生存且分布较为广泛,表明其具有较强的抗重金属能力和适应性,可作为铜矿废弃地生态恢复的先锋物种之一。一方面是此类物种对生长环境的土壤条件要求不高且其生长速度快、适应性强、根系发达(耐旱、耐贫瘠)和对重金属抗性强等,使其能够在恶劣的土壤条件下生存和繁衍,并在竞争激烈的环境中占据优势,成为优势物种<sup>[40-42]</sup>,例如,五节芒作为多年生禾本科植物,生长较快、产量较高、适应性强、耐旱性较好且具有发达的根块茎,可通过根茎和分蘖繁殖,水土保持作用较强,因此虽然其不是典型的铜超积累植物,但可作为铜污染土壤的修复植物<sup>[43]</sup>。另一方面是该类植物对重金属具有一定的耐受性,例如禾本科和菊科植物的根系具有吸附和沉积重金属的能力,能够有效地吸收土壤中的重金属离子,将其

沉积在根部或者茎叶等位置,并通过凋落等方式减少重金属对植物本体的危害<sup>[44]</sup>;一些禾本科和菊科植物可通过根系产生有机物质(如氨基酸等),与土壤中的重金属形成螯合物或者沉淀物,从而降低土壤中重金属对其的伤害<sup>[45-46]</sup>;部分禾本科和菊科植物也可以通过泌盐作用排出体内的盐分和重金属等有害物质<sup>[47-48]</sup>;此外,一些禾本科和菊科植物可通过根系分泌物与重金属离子相互作用并使其转化为无毒或毒性较小的形态滞留在根外,以减少植物对于土壤中有害物质的吸收量,从而降低了有害物质在植物体内的浓度,减轻了对植物本身的毒害<sup>[49-50]</sup>。此类生长策略使得禾本科和菊科植物能够在受到重金属等污染的土壤中和繁殖。同时,铜矿废弃地干旱的条件对其他植物的生长和繁殖不利,导致其他植物定植困难,减少了物种间的竞争<sup>[51-52]</sup>。

随着铜矿废弃地植物群落的形成和演替,主要组成物种之间发生了明显的变化(表 1、2),表明在演替过程中,早期定植阶段的草本物种已被演替后期的物种所取代,是该矿区废弃地植被自发演替的基本过程。其中,五节芒和茵陈蒿等优势植物的入侵和扩展,促进了铜尾矿废弃地不同区域群落之间的联系,从而推动了废弃地植物群落的演替进程<sup>[26]</sup>。且随着演替年限的增加,Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数均先增加后降低,而丰富度整体上也呈现先增加再降低的趋势(图 2)。植物群落的物种组成、种间竞争和演替时间则可能是该研究对象物种多样性波动变化的原因。袁鑫奇等<sup>[53]</sup>对滇东北铅锌矿区废弃地自然演替特征的研究发现多样性呈现先增后减的趋势,耿冰瑾等<sup>[34]</sup>发现复垦地的物种丰富度随复垦年限增加呈现先增后减的变化趋势,与该研究结果一致。随着恢复年限的增加,整体上矿区废弃地的物种多样性通常会有所提高<sup>[54]</sup>,但本研究中发现 R45 群落的物种多样性显著降低(图 2),这可能是由于植物能够调节自身的微环境,增强保水保水能力,但同时也会增加营养元素的消耗,使植物之间对资源的竞争加剧,进而导致物种多样性呈现下降趋势<sup>[55-56]</sup>,与前人的研究相似<sup>[53,55]</sup>。

植被生产力或生物量决定生态系统的服务功能<sup>[57]</sup>。该研究发现铜矿废弃地演替过程中草本生物量和根系生物量均呈现先增加后减少的趋势(图 3)。耿冰瑾等<sup>[34]</sup>在露天矿区不同年限复垦地植被重建的样地上也发现总地上生物量随复垦年限增加呈现先增加后减少的趋势,与该研究结果一致。随着恢复年限的增加,在土壤微生物的矿化作用下,促进了土壤有机碳的积累,改善了生境质量<sup>[58]</sup>,且草本物种多样性随着恢复年限增加逐渐增大,但增加的草本物种其重要值较小,生态位与其他物种高度重叠,使其在各物种的竞争处于劣势,导致部分草本植物物种退化甚至消失,从而使得生物多样性和草本生物量呈现先增后减的趋势<sup>[59]</sup>。该研究演替初期物种多样性较低,表明群落存在较多的空缺生态位,竞争不激烈,入侵的一年生草本植物(例如鸭跖草、鼠曲草等)数量较多,且多为个体矮小、寿命短的物种,在较短的生长期难以积累较高的地上生物量<sup>[60-61]</sup>。以茵陈蒿为主的样地中,植被多样性和生物量均显著高于其他样地,属于物种数最高的演替阶段,其生物量也最大(R10)。这与植物多样性-生产力关系理论相一致,表明物种丰富度与生产力之间呈正相关,即随着物种丰富度的增加,植物群落的生产力也会随着升高<sup>[62]</sup>,Jia 等在对严重退化矿区进行植物多样性的调控实验研究中也发现物种丰富度与生产力呈正相关关系<sup>[63]</sup>。

### 3.2 不同恢复年限铜矿废弃地群落稳定性变化特征

铜矿废弃地不同演替阶段草本植物群落稳定性整体呈上升趋势(图 4),与群落物种多样性指数升高趋势相似(图 2),表明随着恢复时间的增加,植物群落结构越来越趋向复杂化。植物群落的稳定性不仅与群落组成密切相关,还可能受土壤养分、物种间竞争、演替时间等因素调控。群落中的物种数量不仅决定群落的 Godron 稳定性,也可影响植物群落结构的变化<sup>[64]</sup>。铜矿废弃地的土壤温度较高、蓄水能力差,养分和水分极度匮乏,且受到铜等重金属的危害,影响了群落物种组成,从而影响了群落的稳定性<sup>[65]</sup>。方紫妍<sup>[66]</sup>发现,不同演替阶段的植物群落稳定性是随演替阶段变化而变化,植物群落的稳定性不仅与其结构有关,还与外界条件密切相关;而且所有植物生长过程中均需获取资源如光照、水分和养分等,但在资源稀缺的环境中,由于资源的供应量无法满足所有植物的需求,植物之间发生竞争<sup>[67]</sup>,可能会导致一些弱势的物种或个体无法获取足够的资源,进而影响其生长和繁殖,甚至可能导致其死亡,因此,可能会降低群落的稳定性。乔欢欢等<sup>[68]</sup>认为

在局部可共享资源稀缺环境中生长,植物种间和种内竞争加剧,致使群落稳定性低。该研究中自然恢复 R10 样地中的伴生种较多,且无明显优势种,可能是由于生态位重叠程度较高使得草本植物之间的竞争作用增强,故而演替至 R10 时群落稳定性最差(表 2);而 R45 的明显优势种和亚优势种的重要值虽然较为接近(表 2),但其生态位重叠程度较其他演替阶段小,因而此生态系统较为稳定性。杜忠毓等<sup>[27]</sup>对贵州晴隆大厂镇矿区植被恢复进行研究,发现矿区物种组成简单,物种多样性低且群落不稳定;张琳等<sup>[26]</sup>对露天煤炭排土场南坡植物群落稳定性的分析发现,恢复 2a 的植物群落稳定性明显高于恢复 7a 和 10a 的植物群落,均与该研究所得结果相似。综上所述,铜矿废弃地自发演替 45a 后各植物群落仍处于一个相对不稳定的演替阶段,物种组成、群落结构和竞争等仍然处于波动状态。因此,铜矿废弃地的生态演替是一个缓慢而复杂的过程,需要经历多个阶段才能逐渐恢复其各项生态功能,自发演替时间的长短对其生境的影响尤为重要。

#### 4 结论

铜矿废弃地 1—45a 的演替过程中共发现 20 种植物,其中禾本科和菊科 11 种,占群落物种总数的 55%。随着演替的进行,禾本科和菊科植物逐渐成为群落的优势类群。铜矿区废弃地的植被恢复动态变化为:海州香薷+茵陈蒿+鸭跖草(前期,1a)—茵陈蒿+五节芒+海州香薷(中期,10a)—海州香薷+鸭跖草(后期,30—45a),是该矿区废弃地自发演替的基本过程,表明此演替序列为该矿区废弃地的进展演替过程。随着演替的发生,废弃地的物种多样性(Shannon-Wiener、Simpson、Pielou 均匀度指数)和草本生物量均呈现先增加后降低的变化趋势,Whittaker  $\beta$  指数呈增加趋势;演替过程中草本生长量增长主原因是禾本科和菊科植物丰度的增长。未来可利用禾本科和菊科植物与铜矿超级累植物(海州香薷)进行矿区初始植被恢复,以加快铜矿区的植被恢复演替。4 个自然恢复演替阶段植物群落均处于相对不稳定阶段,但随着恢复年限的增加,群落优势物种更替明显,群落稳定性上升。该研究揭示了铜矿废弃地自然恢复植被演替特征,其结果可为及时加强矿区人工干预措施的实施提供依据。并通过对各个演替阶段的细化,丰富了矿区自然恢复演替阶段的研究,为开展铜矿废弃地环境治理和改善其生态环境提供了基础数据支持。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Bodlák L, Křovčáková K, Nedbal V, Pechar L. Assessment of landscape functionality changes as one aspect of reclamation quality—the case of Velká podkrušnohorská dump, Czech Republic. *Ecological Engineering*, 2012, 43: 19-25.
- [ 2 ] Wang J, Qin Q, Bai Z. Characterizing the effects of opencast coal-mining and land reclamation on soil macropore distribution characteristics using 3D CT scanning. *Catena*, 2018, 171: 212-221.
- [ 3 ] Yang Z, Li J, Zipper C E, Shen Y, Miao H, Donovan P F. Identification of the disturbance and trajectory types in mining areas using multitemporal remote sensing images. *Science of The Total Environment*, 2018, 644: 916-927.
- [ 4 ] 赵鑫娜,杨忠芳,余涛. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展. *中国地质*, 2023, 50(1): 84-101.
- [ 5 ] Bini C. Environmental impact of abandoned mine waste: a review. Nova Science Publishers Inc., New York., 2023.
- [ 6 ] 杨金中,许文佳,姚维岭,孙娅琴. 全国采矿损毁土地分布与治理状况及存在问题. *地学前缘*, 2021, 28(4): 83-89.
- [ 7 ] 邢宇,王静雅,杨金中,陈栋,杜晓敏,郭靖凯,宋丽聪. 全国废弃露天矿山采矿用地分布状况与存在问题. *自然资源遥感*, 2024, 36(2): 21-26.
- [ 8 ] 《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》. *黄金科学技术*, 2021, 29(2): 286.
- [ 9 ] Asr E T, Kakaie R, Ataei M, Mohammadi M R T. A review of studies on sustainable development in mining life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 213-231.
- [ 10 ] Erskine P D, Bartolo R, McKenna P, Humphrey C. Using reference sites to guide ecological engineering and restoration of an internationally significant uranium mine in the Northern Territory, Australia. *Ecological Engineering*, 2019, 129: 61-70.
- [ 11 ] Farjana S H, Huda N, Mahmud M P, Saidur R. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 1200-1217.
- [ 12 ] Feng Y, Wang J, Bai Z, Reading L. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 12-25.

- [13] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,邓蕾,李继伟,刘玉林,李妙宇,潘英杰,吕文文,上官周平. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(23): 8570-8581.
- [14] Yuan Y, Zhao Z, Niu S, Bai Z. The reclaimed coal mine ecosystem diverges from the surrounding ecosystem and reaches a new self-sustaining state after 20-23 years of succession in the Loess Plateau area, China. *Science of The Total Environment*, 2020, 727: 138739.
- [15] Vidal-Macua J, Nicolau J M, Vicente E, Moreno-de Las Heras M. Assessing vegetation recovery in reclaimed opencast mines of the Teruel coalfield (Spain) using Landsat time series and boosted regression trees. *Science of The Total Environment*, 2020, 717: 137250.
- [16] 张进德, 郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究. *生态学报*, 2020, 40(21): 7921-7930.
- [17] Xu X, Zhang D. Comparing the long-term effects of artificial and natural vegetation restoration strategies: A case-study of Wuqi and its adjacent counties in northern China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(14): 3930-3945.
- [18] Dávila J G, Zhang J, Kørnø L. Challenges to carry out transboundary environmental assessment in ASEAN countries. *Environmental Impact Assessment Review*, 2020, 84: 106432.
- [19] Lechner A M, Chan F K S, Campos-Arceiz A. Biodiversity conservation should be a core value of China's Belt and Road Initiative. *Nature ecology & evolution*, 2018, 2(3): 408-409.
- [20] 白中科, 师学义, 周伟, 王金满, 赵中秋, 曹银贵. 人工如何支持引导生态系统自然修复. *中国土地科学*, 2020, 34(9): 1-9.
- [21] Glenn-Lewin D.C, Peet R.K, Veblen T.T. *Plant succession: theory and prediction*. Springer Science & Business Media, 1992.
- [22] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. *林业科学*, 2000, (5): 28-32.
- [23] 张明霞, 王得祥, 彭舜磊, 黄雅昆, 张岗岗. 秦岭松栎混交林群落的稳定性. *生态学报*, 2015, 35(8): 2564-2573.
- [24] 郑世群, 刘金福, 冯雪萍, 何中声, 李文周, 李霖, 陈文伟, 刘梦昕. 戴云山不同类型植物群落的物种多样性与稳定性研究. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 50-57,64.
- [25] 杜忠毓, 安慧, 文志林, 王波, 张馨文. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应. *生态学报*, 2021, 41(6): 2359-2371.
- [26] 张琳, 陆兆华, 唐思易, 张萌, 张润廷, 黄玉凯, 尚志. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价. *生态学报*, 2021, 41(14): 5764-5774.
- [27] 杜忠毓, 王剑武, 邢文黎, 肖江, 薛亮, 侯红, 陈光才. 喀斯特锑矿植被恢复区植物多样性及群落稳定性. *环境科学研究*, 2023, 36(1): 188-197.
- [28] Huang L, Zhang P, Hu Y, Zhao Y. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 638-646.
- [29] 林曼利, 胡振琪, 彭位华, 叶文玲, 张春雷, 黄欣瑞, 陈松, 桂和荣. 安徽铜陵典型矿区周边土壤重金属污染评价及来源解析. *环境科学*, 1-14[2024-09-03]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202307274>.
- [30] Wang R, Zhang J, Sun H, Sun S, Qin G, Song Y. Effect of different vegetation on copper accumulation of copper-mine abandoned land in tongling, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112227.
- [31] 李闽, 王联军, 罗小利. 铜陵矿区矿地质环境问题及治理对策. *中国矿业*, 2014, 23(5): 67-70.
- [32] 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞. 铜陵某废弃硫铁矿土壤重金属污染特征及来源解析. *环境科学*, 2024, 45(1): 407-416.
- [33] 李瑞娟, 周冰. 安徽铜陵铜尾矿土壤污染评价及综合利用研究. *矿产综合利用*, 2021(4): 36-40.
- [34] 耿冰瑾, 王舒菲, 曹银贵, 郭春艳, 郭东罡, 赵冰清, 白中科. 山西平朔露天矿区不同年限复垦地植被重建特征对比分析. *生态学报*, 2022, 42(8): 3400-3419.
- [35] 谭许脉, 张文, 肖纳, 莫雪青, 高冠女, 尤业明, 明安刚, 黄雪蔓. 杉木林改造成乡土阔叶林对林下植物物种组成和多样性的影响. *生态学报*, 2022, 42(7): 2931-2942.
- [36] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. *林业科学*, 2000, 36(5): 28-32.
- [37] 罗久富, 周金星, 赵文霞, 董林水, 郑景明. 围栏措施对青藏高原高寒草甸群落结构和稳定性的影响. *草业科学*, 2017, 34(3): 565-574.
- [38] 张振佳, 曹银贵, 耿冰瑾, 王舒菲, 郭春燕, 王翔, 白中科. 黄土露天矿区不同复垦年限重构土壤微生物数量差异及其影响因素分析. *中国土地科学*, 2020, 34(11): 103-112.
- [39] 珊丹, 邢恩德, 荣浩, 刘艳萍, 梁占岐. 草原矿区排土场不同植被配置类型生态恢复. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 336-342.
- [40] 王连锐, 严亚, 商崇菊, 谭娟, 杨永宇. 两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 146-154.
- [41] Ma P F, Liu Y L, Jin G H, Liu J X, Wu H, He J, Guo Z H, Li D Z. The *Pharus latifolius* genome bridges the gap of early grass evolution. *The Plant Cell*, 2021, 33(4): 846-864.
- [42] Shen F, Qin Y, Wang R, Huang X, Wang Y, Gao T, He J, Zhou Y, Jiao Y, Wei J, Li L, Yang X Z. Comparative genomics reveals a unique nitrogen-carbon balance system in Asteraceae. *Nature Communications*, 2023, 14: 4334.
- [43] 胡萧, 王栋, 张轩, 刘书洪, 谢伟东. 锑矿区修复的不同植被类型植物多样性及生物量特征. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(10): 1314-1321,1330.

- [44] 江民锦, 胡佳琴, 司卫静. 江西德兴铜矿区内铜富集植物的调查及筛选. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 357-361.
- [45] 徐炜杰, 郭佳, 赵敏, 王任远, 侯淑贞, 杨芸, 钟斌, 郭华, 刘晨, 沈颖, 柳丹. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 1137-1148.
- [46] 胡浩, 潘杰, 曾清如, 马云龙, 刘小燕. 低分子有机酸淋溶对土壤中重金属 Pb Cd Cu 和 Zn 的影响. 农业环境科学学报, 2008, (4): 1611-1616.
- [47] Manousaki E, Kadukova J, Papadantonakis N, Kalogerakis N. Phytoextraction and phytoexcretion of Cd by the leaves of *Tamarix smyrnensis* growing on contaminated non-saline and saline soils. *Environmental Research*, 2008, 106(3): 326-332.
- [48] Manousaki E, Galanaki K, Papadimitriou L, Kalogerakis N. Metal phytoremediation by the halophyte *Limoniastrum monopetalum* (L.) Boiss: Two contrasting ecotypes. *International journal of phytoremediation*, 2014, 16(7/8): 755-769.
- [49] 王亚, 冯发运, 葛静, 李勇, 余向阳. 植物根系分泌物对土壤污染修复的作用及影响机理. 生态学报, 2022, 42(3): 829-842.
- [50] 傅晓萍, 豆长明, 胡少平, 陈新才, 施积炎, 陈英旭. 有机酸在植物对重金属耐性和解毒机制中的作用. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1354-1358.
- [51] 徐金玉, 王伟伟, 王惠, 张海燕. 铜污染土壤的生物修复研究进展. 生物工程学报, 2020, 36(3): 471-480.
- [52] Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought. *Science*, 2020, 368(6488): 266-269.
- [53] 袁鑫奇, 郭兆来, 王越, 曾铭, 俞乃琪, 潘瑛, 刘嫦娥, 段昌群. 滇东北铅锌矿区废弃地的自然演替特征研究. 农业现代化研究, 2021, 42(4): 764-775.
- [54] 庞景豪, 梁燊, 刘亚斌, 李国荣, 朱海丽, 胡夏嵩, 史兴萍, 尚卿, 缪晓星, 王延秀. 恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响. 水土保持通报, 2023, 43(4): 110-120.
- [55] Wiegleb G, Felinks B. Predictability of early stages of primary succession in post-mining landscapes of Lower Lusatia, Germany. *Applied Vegetation Science*, 2001, 4(1): 5-18.
- [56] Yuan X Q, Guo Z L, Wang S C, Zhao L Q, Yuan M X, Gao Y H, Huang L, Liu C, Duan C Q. Drivers and mechanisms of spontaneous plant community succession in abandoned Pb-Zn mining areas in Yunnan, China. *Science of The Total Environment*, 2023, 904: 166871.
- [57] McLaren J R, Turkington R. Ecosystem properties determined by plant functional group identity. *Journal of Ecology*, 2010, 98(2): 459-469.
- [58] 胡文浩, 张晓婧, 陈雅杰, 宇振荣, 段美春. 坝上地区不同年代退耕还林生境的草本层植物多样性及影响因子. 生态学报, 2021, 41(3): 1116-1126.
- [59] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 王少昆. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系. 中国沙漠, 2022, 42(2): 134-141.
- [60] Bohn F J, Huth A. The importance of forest structure to biodiversity-productivity relationships. *Royal Society open science*, 2017, 4(1): 160521.
- [61] Zhang Y, Chen H Y H, Reich P B. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *Journal of ecology*, 2012, 100(3): 742-749.
- [62] Pan Q, Symstad A J, Bai Y, Huang J, Wu J, Naeem S, Chen D, Tian D, Wang Q, Han X. Biodiversity-productivity relationships in a natural grassland community vary under diversity loss scenarios. *Journal of ecology*, 2022, 110(1): 210-220.
- [63] Jia P, Liang J L, Yang S X, Zhang S C, Liu J, Liang Z W, Li F M, Zeng Q W, Fang Z, Liao B, Shu W S, Cadotte M W, Li J T. Plant diversity enhances the reclamation of degraded lands by stimulating plant - soil feedbacks. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(7): 1258-1270.
- [64] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6): 902-910.
- [65] Ye Q P, Zhang W H, Yu S C, Xue W Y. Interspecific association of the main tree populations of the *Quercus acutissima* community in the Qiaoshan forest area. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38: 3165-3174.
- [66] 方紫妍, 李林瑜, 阿克拜尔·毛拉, 周龙, 陆彪. 人为干扰对西天山野果林群落结构和物种多样性的影响. 水土保持通报, 2019, 39(2): 267-274.
- [67] Lu Y, Yang Y, Sun B, Yuan J, Yu M, Stenseth N, Bullock J, Obersteiner M. Spatial variation in biodiversity loss across China under multiple environmental stressors. *Science Advances*, 2020, 6(47): eabd0952.
- [68] 乔欢欢, 李强, 何国兴, 纪童, 杨冬阳, 文铜, 关文昊, 刘志刚, 杨军银, 柳小妮. 山地草甸植被生物多样性及群落稳定性对坡向的响应. 草地学报, 2022, 30(8): 2173-2181.